

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

## **ESTUDO DO USO DE GARRAFAS PET EM GEOTECNIA**

**AUTOR: DEILTON BRAGA DOS SANTOS**

ORIENTADOR: Profº. Dr. Saulo Gutemberg Ribeiro

C O-ORIENTADOR: Profº. Dr. Luís Fernando Martins Ribeiro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Geotecnia.

Ouro Preto, setembro de 2005.

## *DEDICATÓRIA*

---

*O sonho, o desejo e a vontade.  
E aí está o futuro,  
Não sabemos o que nos espera,  
Que surpresas estão por vir.  
Não adianta pensar  
Nem se preocupar...  
Você não pode resolver  
O que ainda não aconteceu.  
Por isso viva o aqui e o agora,  
faça as coisas acontecerem já,  
trabalhe e confie.  
O futuro se faz hoje...  
Não se prenda as coisas  
que ainda não aconteceram,  
que já não existem e que não  
mais voltarão.  
O passado é bom como referência.  
Assim, cada dia  
será uma aventura, um desafio,  
uma conquista e uma experiência  
que sempre valerá a pena viver.*

*Nuno Cobra*

*Dedico esta dissertação aos meus pais, Raimunda e Damião,  
pelo apoio, sacrifício, amor e compreensão durante toda minha vida.*

## ***AGRADECIMENTOS***

---

*Á DEUS PELA GRAÇA DE VIVER.*

Muitas pessoas e algumas instituições foram o coração e o corpo deste trabalho, os quais procuro agradecer com a alma, dentre muitas outras peço desculpas àquelas que não foram citadas, mas são tão importantes quanto àquelas que se encontram imortalizadas nestas humildes palavras.

Aos meus irmãos: Reinaldo, Vera e a minha cunhada Geovana; pelo apoio, amizade, força e carinho, minha eterna gratidão.

Aos meus familiares, Meire, júnior, Tia Antônia, Mãe Isaura, Fernando, Joice, Val, Rosa, Santos, “ Tim” , Macinho, Juninho, Adolfo, Neila, “Nil”, Evânia, Marlice, Beto pelo incentivo e força.

Aos Departamentos de Engenharia Civil, Física e Metalurgia da Universidade Federal de Ouro Preto. Em especial aos Professores: Romero César, Leonardo Godefroid, Flávio Cassino e Arlene Sarmanho e ao Engenheiro Sydnei.

Ao Professor, Orientador e ‘Pai’ Dr. Saulo Gutemberg Silva Ribeiro, pela sua amizade, cooperação, ensinamentos, incentivo e lições de vida que contribuíram para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Ao Professor, Co-Orientador Dr. Luís Fernando Martins Ribeiro pelo apoio, compreensão, amizade e pelos seus ensinamentos, cooperação e aconselhamentos, contribuindo para que eu me tornasse uma pessoa mais branda (menos estressada).

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Mestrado em Geotecnia: Saulo Gutemberg Silva Ribeiro, Luís Fernando Martins Ribeiro, Romero César Gomes, Christiane Lyra Nogueira, Frederico Garcia Sobreira, Rodrigo Pelucci e Waldir Lopes de Oliveira Filho; pelos conhecimentos adquiridos.

Ao Professor Ênio Palmeira e colegas do Curso de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, Elder, Isabela e Newton, pela atenção e confiança dadas durante minha estadia naquela universidade.

Aos meus Professores da Graduação e Iniciação Científica: Miriam e Sandro Machado; por terem me dado a oportunidade de interagir com o mundo científico.

Aos amigos e amigas do Mestrado em Estruturas Metálicas: Tatiana, Fabiola, Katita, Adriana , Cássius, Ana Amélia, Carol, Flávia, Cereno, Fabiano Medanha e Alexandre.

Aos colegas e amigos de turma: Germano, Fernanda, Eleonardo, Wagner, Júnio e Tadeu; e aos da turma seguinte: Rafael, Rodrigo, Frank, Brasileu, Jeanne, Priscila, Luciana, Edmar, Gustavo, Rafael Magno, Michel.

Aos meus amigos da República OX e irmãos ouropretanos: Germano, Cássius, Tadeu, Paulo, Flávio, Bruno, Zé Maria e Rafael, pela amizade, companheirismo e pelos momentos de descontração.

A Legião Urbana, Capital Inicial e a Cássia Eller por embalar diversas madrugadas de estudo durante o mestrado.

Ao Professor Walter Dornelas e a secretária do Curso de Pós-Graduação Róvia, pela simpatia, atenção e dedicação constantes.



Aos profissionais das empresas Embrapack (Juarez e Leila), ABIPET (Janne e Priscila) e a BahiaPET (Geraldini), os quais colaboraram com o fornecimento de informações durante todo o processo de elaboração da dissertação.

Ao Professor Saulo e sua esposa Margarete pelo apoio e incentivo na conclusão da pesquisa.

À UFOP e a Fundação Gorceix pelo apoio e auxílio financeiro. Em especial a Dr<sup>a</sup>. Telma, Sr. José Alberto, Keila e Juliana.

A reciclagem de materiais de difícil degradação tem sido uma das maiores preocupações da atualidade. Destinos alternativos destes resíduos têm sido apresentados com embasamento técnico-científico por centros de pesquisas e de forma criativa e artesanal pela sociedade. Dentre os produtos de difícil degradação, a garrafa PET tem sido a grande preocupação dos ambientalistas. Projeções indicam que o consumo continua crescendo, mas com menores taxas. Por outro lado, de forma positiva, a reciclagem tem mostrado um crescimento exponencial. Do ponto de vista de sua reutilização, uma forte característica da garrafa PET estaria associada a sua alta resistência à tração e elevada durabilidade (450 anos). Estes fatores incentivam os centros de pesquisa a desenvolverem estudos voltados para sua aplicação como material alternativo de engenharia. Para o trabalho em questão, estudos foram desenvolvidos procurando viabilizar a utilização das garrafas PET em obras de contenções e fundações, aqui denominadas Muro PET e Estaca PET, respectivamente. Os resultados mostraram que o Muro PET pode ser adotado de forma direta, em contenções de baixa altura, com até 1,8m. No caso de fundações, a Estaca PET seria indicada para obras de pequeno porte, podendo ser transmitidas cargas de até 10kN por estaca. Os estudos mostraram que o Muro e Estaca PET podem ser facilmente confeccionados, com custo material praticamente nulo. Importante realçar que este é um estudo preliminar que tem como premissa, apresentar uma proposta alternativa para obras de pequeno porte. Este estudo não propõe a aplicação destes elementos alternativos sem critérios técnicos, mas abre a possibilidade de utilização sem a necessidade de mão-de-obra especializada.

## ***ABSTRACT***

---

Nowadays, recycling materials, which are difficult to naturally degrade, is a great concern around the world. Alternatives associated to the destination of these materials have been proposed with technical and scientific background by research centers and, at the same time, in creative craftwork by society. Among the products that are difficult to degrade, PET bottle is one of the greatest preoccupations of the environmentalists. It is predicted that consumption of this bottle is arising, but at low rates. On the other hand, in a positive sense, recycling has been exponentially increasing. When the reutilization is taken into account, the very good characteristics of PET bottle would be associated with excellent tension strength (about 1MPa) and high durability (450 years). These very good factors encourage researchers to apply this kind of material as an alternative for civil engineering. In this work, studies were developed in order to evaluate the viability of using PET bottles in retaining walls and foundations, here simply named, respectively, PET Retaining Wall and PET Pile. The results show that the PET Retaining Wall could be efficiently adopted at low heights, about 1.8 meters. In the case of the foundations, the PET Pile could be appropriate to small buildings, like houses and two-floor buildings. In this case, these piles could transfer loads about 10kN to the earth. The studies showed that the retaining wall and pile could easily be made, with almost no material cost. It is important to emphasize that this is a new approach that has a premise to show an alternative proposal for the construction of small buildings. This study does not suggest the application of these alternative materials by unskilled labor, but open the possibility of using them in the near future.

# ÍNDICE

---

## *Página*

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xii</b>
------------------------------	------------

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xviii</b>
------------------------------	--------------

<b>LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....</b>	<b>xx</b>
--	-----------

## ***CAPÍTULO 1***

1.1 – COMENTÁRIOS. INICIAIS.....	01
1.2 – OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO.....	02
1.3 – ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	02

## ***CAPÍTULO 2 – UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS RECICLADOS***

2.1 – INTRODUÇÃO.....	05
2.2 - DESTINAÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU).....	06
2.3 – RECICLAGEM.....	08
2.3.1 – Aspectos Econômico da Reciclagem.....	09
2.3.2 – Importância da Reciclagem.....	09
2.4 – RECICLAGEM DOS PLÁSTICOS.....	10
2.4.1 – Identificação dos Plásticos.....	11
2.4.2 – Principais Processos de Transformação dos Plásticos .....	12
2.4.3 – Utilização do Plástico Politereftalato de Etileno (PET).....	13
2.5 – RECICLAGEM DO PLÁSTICO PET.....	14
2.6 – MATERIAIS POLIMÉRICOS.....	17
2.7 – O PLÁSTICO PET.....	22

## ***CAPÍTULO 3 – ENSAIOS PRELIMILARES PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS***

3.1 – INTRODUÇÃO.....	24
3.2 – CARACTERIZAÇÃO DA GARRAFA PET.....	25

3.2.1 – Pressão de Trabalho da Garrafa PET.....	30
3.3 – CARACTERIZAÇÃO DA AREIA.....	32
3.3.1 – Ensaio de Cisalhamento Direto.....	34
3.3.2 – Moldagem dos Corpos de Prova.....	36
3.3.3 – Tensões Normais.....	37
3.3.4 – Velocidade de Cisalhamento.....	37
3.4 – RESULTADO DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO.....	39
3.5 – METODOLOGIA DE ENVASAMENTO DAS GARRAFAS.....	40
3.6 – COMENTÁRIOS FINAIS.....	44

## ***CAPÍTULO 4 – ENSAIOS DE LABORATÓRIOS PARA ESTUDO DA APLICAÇÃO DAS GARRAFAS PET EM OBRAS DE CONTENÇÃO.***

4.1 – INTRODUÇÃO.....	45
4.2 – ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA.....	46
4.3 – RESISTÊNCIA DAS INTERFACES SOLO – PET UTILIZANDO O EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	47
4.3.1 – Preparação das Amostras PET.....	48
4.3.2 – Resultados dos Ensaio de Cisalhamento Direto em Interfaces.....	49
4.4 – RESISTÊNCIA DA INTERFACE SOLO - PET UTILIZANDO O EQUIPAMENTO DE PLANO INCLINADO.....	64
4.4.1 – Equipamento de Ensaio de Plano Inclinado.....	65
4.4.2 – Metodologia do Ensaio.....	68
4.4.3 – Resultado dos Ensaio de Cisalhamento em Plano Inclinado.....	70
4.5 – ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE CONTATO ENTRE AS GARRAFAS PET.....	74
4.5.1 – Equipamento para Determinação da Área de Contato.....	74
4.5.2 – Metodologia do Ensaio .....	74
4.5.3 – Apresentação dos Resultados.....	76

## ***CAPÍTULO 5 – APLICAÇÃO DAS GARRAFAS PET EM OBRAS DE CONTENÇÃO***

5.1– ANÁLISE DA ESTABILIDADE.....	78
5.1.1 – Estabilidade Quanto ao Deslizamento.....	79
5.1.2 – Estabilidade Quanto ao Tombamento.....	81
5.1.3 – Capacidade de Carga da Fundação.....	82
5.1.4 – Análise da Estabilidade Global.....	83
5.2 – ANÁLISES DESENVOLVIDAS.....	85
5.2.1 – Parâmetros de Análise.....	85
5.2.2 – Estudo de Sensibilidade.....	89
5.3 – COMENTÁRIOS FINAIS.....	98

## ***CAPÍTULO 6 – ENSAIOS DE LABORATÓRIOS PARA ESTUDO DA APLICAÇÃO DE GARRAFAS PET EM OBRAS DE FUNDAÇÃO.***

6.1 – INTRODUÇÃO.....	99
6.1.1 – Escolha do Tipo de Fundação.....	100
6.2 – ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES.....	101
6.2.1 – Preparação dos Moldes Adaptadores para Ensaios de Compressão.....	101
6.2.2 – Determinação da Deformação da Garrafa PET Envasada com Água....	105
6.2.3 – Ensaio de Compressão com Areia Adaptador no Topo e na Base.....	110
6.2.4 – Ensaio de Compressão com Areia Adaptador apenas no Topo.....	112
6.2.5 – Ensaio de Compressão com Garrafas Acopladas.....	124
6.2.6 – Ensaio de Compressão – Carga Constante.....	126
6.3 – ENSAIO DE CISALHAMENTO - GARRAFA PET.....	130
6.4 – TESTE DE ADESÃO AO CIMENTO.....	134
6.5 – RESULTADO DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO EM INTERFACES (SPS; SP).....	135
6.6 – AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE GARRAFAS PET EM FUNDAÇÕES.....	146
6.6.1 – Capacidade de Carga.....	146
6.7 – COMENTÁRIOS FINAIS.....	153

## ***CAPÍTULO 7 – ESTUDO NUMÉRICO DA CAPACIDADE DE CARGA DA ESTACA PET***

7.1 – Estudo Numérico – Garrafa.....	161
7.2 – Estudo Numérico – Estaca PET.....	167
7.2.1 – Primeira Simulação – Caso 1.....	168
7.2.2 – Segunda Simulação – Caso 2.....	175
7.3 – COMENTÁRIOS FINAIS.....	179

## ***CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS***

8.1 – CONCLUSÕES.....	181
8.2 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	181
8.3 – SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS.....	190

<b><i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</i></b>	<b>191</b>
---	------------

<b><i>APÊNDICE A – PROJETO DE LEI DO SENADO N.º 269,1999.....</i></b>	<b>197</b>
---	------------

<b><i>APÊNDICE B - CARACTERÍSTICA DE ENVASAMENTO DAS GARRAFAS.....</i></b>	<b>203</b>
--	------------

# ***LISTA DE FIGURAS***

---

## ***Página***

### ***CAPÍTULO 2***

Figura 2.1 – Sistema internacional de codificação dos Plásticos.....	12
Figura 2.2 – Comportamento tensão-deformação.....	19
Figura 2.3– Estágios na deformação de um polímero semicristalino.....	20
Figura 2.4 – Comportamento tensão-deformação para polímeros semicristalinos.....	21

### ***CAPÍTULO 3***

Figura 3.1a – Garrafa Tipo 1.....	25
Figura 3.1b – Garrafa Tipo 2.....	25
Figura 3.2 – Processo de orientação.....	27
Figura 3.3 – Pré-formas.....	28
Figura 3.4 – Processo de fabricação - garrafa PET.....	29
Figura 3.5 – Processo de reação.....	31
Figura 3.6 – Medidor de pressão.....	31
Figura 3.7 – Curva granulométrica.....	33
Figura 3.8 – Equipamento de cisalhamento direto.....	35
Figura 3.9 – Curva tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal.....	39
Figura 3.10 – Curva deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal.....	39
Figura 3.11 – Envoltória linear de resistência para areia 1.....	40
Figura 3.12 – Processo de enchimento.....	42

## ***CAPÍTULO 4***

Figura 4.1 – Esquema do muro com garrafas PET.....	46
Figura 4.2 – Interfaces entre materiais.....	49
Figura 4.3 – Ensaio solo-plástico-plástico-solo (SPPS) – Tensão Normal de 50kPa.....	51
Figura 4.4 – Ensaio plástico-plástico (PP) – Tensão Normal de 50kPa.....	52
Figura 4.5 – Influência da areia – Tensão Normal de 50kPa.....	53
Figura 4.6 – Influência da areia – Resultados médios – Tensão Normal de 50kPa.....	55
Figura 4.7 – Influência da areia – Tensão Normal de 100kPa.....	56
Figura 4.8 – Influência da areia – Resultados médios – Tensão Normal de 100kPa.....	57
Figura 4.9 – Influência da areia – Tensão Normal de 200kPa.....	59
Figura 4.10 – Influência da areia – Resultados médios – Tensão Normal de 200kPa.....	60
Figura 4.11 – Influência da areia – Tensão Normal de 400kPa.....	62
Figura 4.12 – Influência da areia – Resultados médios – Tensão Normal Média de 400kPa.....	63
Figura 4.13 – Envoltória de ruptura.....	64
Figura 4.14 – Equipamento para ensaios de plano inclinado.....	66
Figura 4.15 – Esquema da caixa de cisalhamento.....	67
Figura 4.16 – Blocos de concreto.....	67
Figura 4.17 – Tipos de arranjo.....	68
Figura 4.18a – Montagem ensaio cúbico.....	69
Figura 4.18b – Fase intermediária do ensaio.....	69
Figura 4.19a – Inclinação <i>versus</i> deslocamento - arranjo triangular.....	71
Figura 4.19b – Inclinação <i>versus</i> deslocamento - arranjo cúbico.....	71
Figura 4.19c – Tensão cisalhante de contato <i>versus</i> deslocamento - arranjo triangular.....	72



Figura 4.19d – Tensão cisalhante de contato <i>versus</i> deslocamento - arranjo cúbico.....	72
Figura 4.19e – Envoltória de resistência - arranjo triangular.....	73
Figura 4.19f – Envoltória de resistência - arranjo cúbico.....	73
Figura 4.20– Caixa para determinação da área de contato.....	75
Figura 4.21 – Ensaio para determinação área de contato.....	75
Figura 4.22 – Gráfico área de contato.....	77
Figura 4.23 – Ilustração dos pontos de contato.....	77

## ***CAPÍTULO 5***

Figura 5.1 – Geometria e características gerais do muro PET.....	79
Figura 5.2 – Fator modificador para $\psi$ igual a 15 graus.....	85
Figura 5.3 – Configuração em duas garrafas para Muro PET.....	90
Figura 5.4 – Comportamento da segurança com a altura do muro PET.....	91
Figura 5.5 – Solução tipo retaludamento para maiores alturas.....	92
Figura 5.6 – Influência do atrito na interface.....	93
Figura 5.7 – Influência da inclinação da garrafa.....	95
Figura 5.8 – Influência da inclinação do muro.....	96
Figura 5.9 – Influência do atrito solo-muro.....	97
Figura 5.10 – Perfil construtivo muro PET.....	98

## ***CAPÍTULO 6***

Figura 6.1 – Esquema construtivo da Estaca PET.....	101
Figura 6.2a – CP pós-moldagem.....	103
Figura 6.2b – CP pós- ensaio.....	103
Figura 6.3 – Compressão simples CP - 1 e CP – 2.....	103
Figura 6.4 – Módulo de elasticidade da resina.....	104
Figura 6.5 – Processo de fabricação dos adaptadores.....	105

Figura 6.6 – Estágio intermediário do ensaio.....	106
Figura 6.7 – Comportamento da garrafa com água.....	107
Figura 6.8 – Módulo de elasticidade da garrafa.....	108
Figura 6.9 – Comportamento da deformação radial da garrafa.....	109
Figura 6.10 – Coeficiente de Poisson da garrafa com água.....	110
Figura 6.11 – Coeficiente de Poisson da garrafa com água – 1º Estágio.....	110
Figura 6.12 – Ensaio com base e topo.....	111
Figura 6.13 – Comportamento G4 – Molde de Topo e Base.....	112
Figura 6.14 – Ensaio sem base.....	113
Figura 6.15 – Comportamento G5 – Molde de Topo.....	114
Figura 6.16 – Efeito do molde e envasamento no comportamento.....	115
Figura 6.17– Estado de tensão especulado na ruptura (início do escoamento)....	116
Figura 6.18 – Tensão <i>versus</i> deformação com aumento de escala de observação.....	117
Figura 6.19 – Comportamento comparativo para molde no topo.....	118
Figura 6.20 – Comportamento comparativo para molde no topo e base.....	119
Figura 6.21 – Comportamento comparativo geral.....	120
Figura 6.22 – Comportamento carga-descarga (G7) – molde no topo e base.....	121
Figura 6.23 – Comportamento elasto-plástico - Molde no topo e base (G7).....	121
Figura 6.24 – Comportamento comparativo carga-descarga <i>versus</i> carga (G7 e G4).....	122
Figura 6.25 – Comportamento comparativo carga-descarga <i>versus</i> carga (G1 e G5) moldes apenas no topo.....	123
Figura 6.26 – Comportamento elasto-plástico comparativo - Molde no topo, Molde no topo e base (G1 e G7) respectivamente.....	123
Figura 6.27 – Confecção da amostra.....	124
Figura 6.28 – Comportamento comparativo do acoplamento de Garrafas.....	125
Figura 6.29 – Ensaio em andamento e amostras após os ensaios.....	126
Figura 6.30 – Comportamento da fluência devido ao nível de tensão.....	127
Figura 6.31 – Fluência secundária – Taxas de deformação.....	128
Figura 6.32 - Influência da mobilização na velocidade de deformação.....	128
Figura 6.33 – Comportamento da velocidade de deformação <i>versus</i> tempo.....	129

Figura 6.34 – Comportamento em escala logarítmica da velocidade de deformação <i>versus</i> tempo.....	130
Figura 6.35 – Esquema do material utilizado para o ensaio de cisalhamento.....	131
Figura 6.36 – Comportamento ao cisalhamento.....	133
Figura 6.37 – Comportamento geral – Tensão cisalhante de trabalho.....	133
Figura 6.38 – Processo de desmoldagem da garrafa.....	134
Figura 6.39 – Ensaio solo-plástico-solo (SPS) – Tensão Normal de 50kPa.....	136
Figura 6.40– Ensaio solo-plástico (SP) – Tensão Normal de 50kPa.....	137
Figura 6.41 – Influência da areia – Tensão Normal de 50kPa.....	138
Figura 6.42 – Influência da areia – Resultados médios - Tensão Normal de 50kPa.....	139
Figura 6.43 – Influência da areia – Tensão Normal de 100kPa.....	140
Figura 6.44 – Influência da areia – Resultados médios - Tensão Normal de 100kPa.....	141
Figura 6.45 – Influência da areia – Tensão Normal de 200kPa.....	142
Figura 6.46 – Influência da areia – Resultados médios - Tensão Normal de 200kPa.....	143
Figura 6.47 – Influência da areia – Tensão Normal de 400kPa.....	144
Figura 6.48 – Influência da areia – Resultados Médios – Tensão Normal de 400kPa.....	145
Figura 6.49 – Ensaio de cisalhamento direto solo-plástico-solo (SPS) e solo- plástico-madeira (SP).....	146
Figura 6.50 - Detalhe construtivo da estaca PET.....	148
Figura 6.51 – Ábaco Caso 1 – Carga de trabalho versus profundidade e número de estacas.....	152
Figura 6.52 – Ábaco Caso 2 – Carga de trabalho versus profundidade e número de estacas.....	153
Figura 6.53 – Carga abaixo de 10 kN – 1 estaca.....	155
Figura 6.54 – Carga abaixo de 20 kN – 2 estacas.....	156
Figura 6.55 – Carga abaixo de 40 kN – 4 estacas.....	157
Figura 6.56 – Carga abaixo de 50 kN – 5 estacas.....	158
Figura 6.57 – Carga abaixo de 90 kN – 9 estacas.....	159

## ***CAPÍTULO 7***

Figura 7.1 – Garrafa PET - Malha de elementos finitos e condições de contorno.....	160
---	-----

Figura 7.2 – Recalque na ruptura – Garrafa com água.....	162
Figura 7.3 – Deslocamento radial externo na ruptura – Garrafa com água.....	162
Figura 7.4 – Recalque – Simulação garrafa com areia (G5).....	163
Figura 7.5– Deslocamento radial externo – Simulação garrafa com areia (G5)..	164
Figura 7.6 – Simulação numérica com base em modelo elasto-plástico.....	165
Figura 7.7– Simulação numérica do ensaio de compressão simples - G5.....	166
Figura 7.8 – Malha de elementos finitos – Caso 1.....	168
Figura 7.9 – Curva carga <i>versus</i> recalque – Caso 1.....	169
Figura 7.10 – Desenvolvimento de plastificação no processo de carga – Caso1.	170
Figura 7.11 – Recalque para carga de trabalho (10kN) – Caso 1.....	171
Figura 7.12 – Deslocamento radial para carga de trabalho (10kN) Caso 1.....	172
Figura 7.13 – Tensão horizontal para carga de trabalho (10kN) – Caso 1.....	173
Figura 7.14 – Linhas de isovalores para recalque, tensão vertical e horizontal – Caso 1.....	174
Figura 7.15 – Curvas carga <i>versus</i> recalque – Casos 1 e 2.....	175
Figura 7.16 – Desenvolvimento de plastificação no processo de carga – Caso 2	176
Figura 7.17 – Recalque para carga de trabalho (10kN) – Caso 2.....	177
Figura 7.18 – Deslocamento radial para carga de trabalho (10kN) – Caso 2.....	177
Figura 7.19 – Tensão horizontal para carga de trabalho (10kN) – Caso 2.....	178
Figura 7.20 – Linhas de isovalores para recalque, tensão vertical e horizontal – Caso 2.....	179

## ***LISTA DE TABELAS***

---

### ***Página***

#### ***CAPÍTULO 2***

Tabela 2.1 – Classificação dos resíduos.....	06
Tabela 2.2 – Produção, consumo e reciclagem t/ano.....	15
Tabela 2.3 – Características Mecânicas do PET.....	22

#### ***CAPÍTULO 3***

Tabela 3.1 – Características das garrafas PET dois litros.....	26
Tabela 3.2 – Propriedades índices das areias.....	34
Tabela 3.3 – Índice de vazios das garrafas pelo método desenvolvido.....	42
Tabela 3.4 – Índice de vazios por diferentes métodos.....	43

#### ***CAPÍTULO 4***

Tabela 4.1 – Dados área de contato.....	76
---	----

#### ***CAPÍTULO 5***

Tabela 5.1 – Influência da altura do muro nos fatores de segurança.....	90
Tabela 5.2 – Influência do atrito na interface (SPPS).....	93

Tabela 5.3 – Influência da inclinação das garrafas.....	94
Tabela 5.4 – Influência da inclinação do muro .....	95
Tabela 5.5 – Influência do atrito – solo muro .....	97

## ***CAPÍTULO 6***

Tabela 6.1 – Características das garrafas PET envasada com areia (adaptador topo e base).....	111
Tabela 6.2 – Características garrafas PET envasada com areia (adaptador base)...	113
Tabela 6.3 – Cargas e tensões de ruptura.....	115
Tabela 6.4 – Características das garrafas PET, envasada com areia, usadas no ensaio de carga e descarga.....	120
Tabela 6.5– Características garrafas PET, envasada com areia, usadas nos ensaios de acoplamento (adaptador de topo).....	125
Tabela 6.6 – Características garrafas PET, envasada com areia, usadas no ensaios de carga constante .....	126
Tabela 6.7 – Influência da mobilização na velocidade de deformação.....	129
Tabela 6.8 – Características garrafas PET, envasada com areia, usadas no ensaio de cisalhamento.....	131
Tabela 6.9 – Fatores de mobilização para estacas.....	149
Tabela 6.10 – Parâmetros para estudo técnico comportamental da estaca PET.....	150
Tabela 6.11 – Caso 1 - atrito 30 graus; diâmetro da base 0,15m.....	151
Tabela 6.12 – Caso 2 - atrito 35 graus; diâmetro da base 0,15m.....	152

## ***CAPÍTULO 7***

Tabela 7.1 – Materiais, modelos constitutivos e parâmetros.....	167
---	-----

## ***LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS***

---

$A_1$ e $A_2$	Comprimento longitudinal da garrafa
ABIPET	Associação Brasileira da Indústria de PET
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria de Plásticos
ABIQUIM	Associação Brasileira da Industria Química
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	Associação Society for Testing and Materials
$B_1$ e $B_2$	Comprimento transversal da garrafa
$B_s$	Projeção da base sobre a horizontal
$c$	Coesão do solo de fundação
$c'$	Coesão de intercepto efetiva
$C_c$	Coefficiente de Curvatura
CEMPRE	Compromisso Empresarial para a Reciclagem
$c_f$	Coesão ao longo da fatia da base
CNU	Coefficiente de Não Uniformidade
CP	Corpo de prova
$c_x$	Coesão horizontal específica
$c_y$	Coesão vertical específica
D	Embutimento da estrutura no solo de fundação
$D_{10}$	Diâmetro equivalente da partícula para o qual se tem 10% das partículas passando
$D_{30}$	Diâmetro equivalente da partícula para o qual se tem 30% das partículas passando
$D_{50}$	Diâmetro equivalente da partícula para o qual se tem 50% das partículas passando
$D_{60}$	Diâmetro equivalente da partícula para o qual se tem 60% das partículas passando
$e$	Excentricidade

$e$	Índice de vazios
$E_a$	Empuxo ativo (Coulomb)
EBR	Empresa Brasileira de Reciclagem
$e_{\max}$	Índice de vazios mínimo
$e_{\min}$	Índice de vazios máximo
$E_{a_v}$	Empuxo ativo vertical
$E_{a_h}$	Empuxo ativo horizontal
$E_p$	Empuxo passivo (Rankine)
$E_{p_h}$	Empuxo passivo horizontal
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
$FS_d$	Fator de segurança ao deslizamento
$FS_f$	Fator de segurança na fundação
$FS_t$	Fator de segurança ao tombamento
$h$	Altura em estudo do muro
$H_o$	Altura inicial da amostra
$K$	Coefficiente de empuxo lateral
$k_a$	Coefficiente de empuxo ativo
$k_p$	Coefficiente de empuxo passivo
$l_w, l_{a_v}, l_{p_h}$	Braços de alavanca
MB	Método Brasileiro
MEF	Método dos elementos finitos
$M_g$	Massa da garrafa mais tampa
$M_t$	Massa total
$M_w$	Massa de água
$N$	Força vertical
NBR	Normas Brasileira Registradas
$N_c, N_q, N_\gamma$	Fatores de capacidade de carga de Terzaghi
$n_{linha}$	Número de linhas de garrafas
$N_v$	Resultante das forças verticais na base
PET	Politereftalato de Etileno
PVC	Policloreto de Vinila
$Q$	Carga aplicada para determinação da área de contato



$q$	Carga distribuída uniformemente
$Q_f$	Resistência lateral
$Q_p$	Resistência de ponta
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
$T$	Força tangencial
$t_{100}$	Tempo necessário para completar 100% do recalque devido ao acréscimo de carga
$t_f$	Tempo para atingir a resistência de pico
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
$v$	Velocidade do ensaio de cisalhamento
$V_{\text{garrafa}}$	Volume da garrafa PET
$V_w$	Volume de água
$V$	Volume da amostra;
$W$	Peso do muro PET
$w$	Umidade higroscópica
$Z$	Profundidade
$\Delta H$	Variação da altura da amostra
$M$	Massa úmida
$\Sigma M_a$	Somatório do momentos atuantes
$\Sigma M_r$	Somatório do momentos resistentes
$\alpha$	Inclinação da fatia
$\alpha_m$	Inclinação do muro
$\beta$	Ângulo de inclinação do terrapleno
$\delta$	Atrito do solo contra a face do muro PET
$\varepsilon_f$	Deformação específica na resistência de pico
$\phi$	Ângulo de atrito do solo de fundação
$\phi'$	Ângulo de atrito efetivo
$\phi_{\text{SPPS}}$	Atrito solo-plástico-plástico-solo (SPPS)
$\phi_y$	Ângulo atrito vertical específico
$\phi_x$	Ângulo atrito horizontal específico
$\phi_f$	Ângulo atrito ao longo da fatia da base
$\gamma_d$	Peso específico do solo seco

$\gamma_g$	Peso específico do muro PET
$\gamma_s$	Peso específico dos sólidos
$\gamma$	Peso específico do solo
$\gamma_w$	Peso específico da água
$\psi$	Inclinação da garrafa
vvs	Vibração vertical mais golpes na parede lateral com soquete
s	Golpes na parede lateral com o soquete
PP	Plástico - Plástico
SPPS	Solo-Plástico-Plástico-Solo
SPS	Solo-Plástico-Solo
SP	Solo-Plástico
vv	Vibração vertical
M	Massa úmida
FS	Fator de segurança
$\sigma_r$	Capacidade de carga do solo de fundação

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1 - COMENTÁRIOS INICIAIS**

O avanço tecnológico e o crescimento populacional têm impulsionado uma produção cada vez maior de novos produtos. Neste contexto, os plásticos têm ocupado um espaço especialmente importante em várias áreas de aplicação, tais como: informática; saúde; aviação; construção civil; engenharia geotécnica, dentre outras.

No âmbito da engenharia geotécnica, que tradicionalmente utiliza uma grande quantidade de materiais naturais, o uso dos plásticos esta cada vez mais presente em seus projetos. Essa inserção tem proporcionado não só a utilização dos plásticos criados com fins geotécnicos específicos, mas também a utilização de plásticos recicláveis.

O uso dos plásticos “pós-consumo” não tem apenas como proposta a diminuição dos resíduos sólidos dispostos nos aterros, mas a aplicação deste material em substituição a outros materiais tradicionais de engenharia, desde que possua viabilidade técnica e econômica.

Do ponto de vista ambiental, a aplicação dos materiais recicláveis reduz a exploração das jazidas de materiais de construção. Este procedimento minimiza os problemas ambientais causados por esta exploração. Tem-se que em países desenvolvidos tais como EUA, Japão, França, Itália, Inglaterra, e Alemanha, a reciclagem se consolidou, com centenas de unidades instaladas. Os governos locais dispõem de leis exigindo o uso de materiais reciclados na construção e em serviços públicos.

No Brasil dentre as principais aplicações dos materiais pós-consumo pode-se destacar o seu uso na engenharia como: muro de contenção (com pneus usados), na fabricação de tubos, tintas, vernizes e material drenante (com garrafa PET), etc.

Em face de grande disponibilidade de garrafa PET de dois litros no mercado brasileiro, este trabalho buscou estabelecer, sob base experimental e técnica, a empregabilidade em obras geotécnicas, da garrafa PET pós-consumo envasada com solo desestruturado.

## **1.2 - OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO**

O estudo da aplicação de garrafas PET na Engenharia Geotécnica é um trabalho pioneiro do Departamento de Engenharia Civil da UFOP e tem como proposta utilizá-la como matéria prima alternativa.

Dentro deste contexto, essa pesquisa visa estudar a substituição dos elementos convencionais aplicados em obras geotécnicas, tais como concreto, pedra de mão, materiais pré-moldados, etc., por garrafas PET de dois litros, preenchidas com solo desestruturado para utilização em fundações e construção de muros de arrimo.

## **1.3 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Este trabalho foi desenvolvido e estruturado em oito capítulos. Os temas foram abordados seqüencialmente, conforme descrito a seguir:

No Capítulo 1, faz-se uma abordagem geral sobre a natureza e os objetivos do trabalho proposto.

O Capítulo 2 consiste em uma apresentação sobre a disposição de resíduos, reciclagem de materiais e características dos polímeros. Assim, são citados as formas de classificação do lixo, os aspectos econômicos e a importância da reciclagem. Tem-se descrita a reciclagem dos plásticos, os processos de fabricação, a utilização do plástico PET, a reciclagem do plástico PET, os materiais polímeros, as características mecânicas dos polímeros, e as características do plástico PET.

No Capítulo 3, são apresentados os ensaios preliminares para caracterização do material aqui utilizado (solo - garrafa PET). Para os solos foram determinadas suas propriedades granulométricas, densidade dos grãos, índices de vazios máximo e mínimo. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto, explicitando os procedimento do ensaio, velocidade de cisalhamento adotada e os parâmetros de resistência ( $c$  e  $\phi$ ) do solo obtido de envasamento. Para a garrafa PET foram definidas as suas características físicas, tais como: volume, altura, diâmetro médio, etc., sendo apresentadas as metodologias desenvolvidas para o envasamento da garrafa com areia.

O Capítulo 4 compreende a utilização de garrafas como estrutura de contenção (muro de arrimo) e versa sobre a descrição e os resultados dos ensaios de cisalhamento direto em interfaces do tipo: Plástico-Plástico, Solo-Plástico-Plástico-Solo. Estas configurações foram desenvolvidas em conformidade com as possíveis situações de campo. São também descritos os procedimentos dos ensaios de rampa realizados e os resultados destas análises. Este último teve o propósito complementar os ensaios de cisalhamento direto desenvolvidos e definir o melhor tipo de arranjo a ser adotado em campo. Os ensaios de determinação da área de contato garrafa-garrafa foram também descritos e analisados para diversas faixas de carregamentos.

O Capítulo 5 apresenta a metodologia de cálculo para o muro de arrimo PET utilizando os dados obtidos nos ensaios descritos no capítulo 4. Neste capítulo são definidos a altura do muro, inclinação da garrafa e do muro. Todas as análises que viabilizaram a implementação do muro PET foram realizadas através de um programa comercial e simulações matemáticas.

No Capítulo 6, tem-se a utilização das garrafas PET em estruturas de fundação, sendo apresentada à descrição e os resultados dos ensaios desenvolvidos. Dentre estes ensaios, tem-se: ensaio de compressão simples com a garrafa envasada com água; ensaio de compressão simples com a garrafa envasada com areia; ensaio de compressão simples com garrafas acopladas; ensaio de fluência e ensaio de cisalhamento na garrafa PET. Foram também realizados testes de adesão da garrafa ao cimento e ensaios de cisalhamento direto em interface do tipo: Plástico-Solo e Solo-Plástico-Solo. Neste capítulo também foram realizados estudos de capacidade de carga com base em formulações racionais propiciando uma melhor visão sobre a gama de utilização das

estacas PET em engenharia de fundações. Além disto foram desenvolvidos ábacos que auxiliam à aplicação da garrafa PET como estrutura de fundação.

O Capítulo 7 foi desenvolvido um estudo numérico, através de um programa comercial, para avaliar o comportamento da estaca PET em condições simuladas de campo. Primeiramente, foi desenvolvido um estudo do tipo calibração numérica, com a simulação (em retro-estudo) dos ensaios realizados com a garrafa PET envasada com a água e com areia. Destas simulações, foi possível avaliar melhor os parâmetros dos modelos constitutivos que seriam posteriormente aplicados nas simulações numéricas do comportamento das estacas em condições hipotéticas de campo.

No Capítulo 8, são estabelecidas as principais conclusões obtidas neste trabalho e sugestões para trabalhos futuros, utilizando garrafas PET como elementos para estruturas de fundações e contenções, de maneira a otimizar as metodologias de projetos e critérios de dimensionamento de tais estruturas.

### **UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS RECICLADOS**

#### **2.1 - INTRODUÇÃO**

O lixo hoje é um problema ambiental e social. Todos os anos a humanidade descarta 30 bilhões de toneladas de detritos, isto representa quase 1000 toneladas por segundo. Muitas regiões não dispõem de espaço para armazenar os resíduos sólidos gerado pela atividade humana. Em cidades como São Paulo, a construção de aterro sanitário é um problema grave. Em Nova York, que produz 11000t/dia, saem diariamente 550 caminhões de lixos para os aterros sanitários nos estados de Nova Jersey e Virgínia. No Canadá, o lixo coletado na cidade de Toronto viaja 800km até ser despejado em uma mina desativada (Veja, 2004).

Dispor o lixo o mais longe possível só aumenta os custos e transfere o problema de lugar, sem resolvê-lo, pois parte dos resíduos sólidos são constituídos de matéria-prima recicláveis como plástico, papel e vidro. As cidades de grande porte são as que mais sofrem com esse problema. Somente em Belo Horizonte, 4.500t de resíduos sólidos são despejados por dia nos aterros municipais, de acordo com a Superintendência de Limpeza Urbana (SLU); desse total, 11% são plásticos, em suas diversas formas de apresentação.

Na tentativa de diminuir o impacto ambiental, países como os EUA, que ocupam o topo da lista dos países que mais reciclam seu lixo, conseguem reaproveitar um pouco mais da metade do que vai ser descartado antes de irem para o lixo. Na Europa Ocidental, virou rotina nos supermercados, cobrar uma taxa para fornecer sacolas plásticas, forçando os clientes a levarem as suas de casa. Na Europa os cascos de vidro ou de plásticos valem descontos nas compras de refrigerantes e água mineral. Para

redução do lixo industrial, a União Européia está financiando projetos em que a indústria transforma em insumo o lixo de outras fábricas. Até fuligem das chaminés de algumas fábricas são aproveitadas para a produção de tijolos e estrutura metálica.

## 2.2 - DESTINAÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

A escolha do tratamento e/ou aproveitamento e disposição final dos resíduos sólidos urbanos deve-se pautar na sua composição física, química e biológica, que são importantes para definir a melhor tecnologia a ser adotada, e os custos financeiros envolvidos. É importante considerar nestes processos a preservação do meio ambiente e os aspectos relacionados ao desenvolvimento social.

De acordo com Hiwatashi (1999), os RSU podem ser classificados de diferentes formas, como apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classificação dos resíduos.

Classificação	Tipo de material
Composição química	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ matéria orgânica;</li> <li>○ matéria inorgânica;</li> </ul>
Riscos potenciais ao meio ambiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ resíduos classe I - perigosos;</li> <li>○ resíduos classe II - não perigosos;</li> <li>○ resíduos classe III - inertes.</li> </ul>
Origem	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ domiciliar: originado da vida diária das residências;</li> <li>○ comercial: originado de estabelecimentos comerciais e de serviço;</li> <li>○ industrial: originado das atividades de diversos ramos da indústria;</li> <li>○ público: originados de serviço de limpeza pública urbana e de limpeza de áreas de feiras livres;</li> <li>○ hospitalar: (serviços de saúde);</li> <li>○ especial (portos e aeroportos, agrícolas, entulho, eventos).</li> </ul>

(Fonte: Hiwatashi, 1999).



Segundo o Manual de Gerenciamento Integrado (Consoni et al., 2000), o termo “Lixo ou Resíduo Sólido” é definido como o resto de atividades humanas, considerado pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis. Normalmente, apresentam-se no estado sólido, semi-sólido ou semilíquido (com conteúdo líquido insuficiente para que este líquido possa fluir livremente).

No entanto, o significado de “Resíduo Sólido” diverge do significado de “lixo”, pois o lixo não possui qualquer tipo de valor, já que deve ser apenas descartado, enquanto os resíduos sólidos possuem valor econômico por possibilitar o reaproveitamento no processo produtivo (Demajoravic, 1995).

No passado, o lixo era constituído basicamente de matéria orgânica. As concentrações humanas eram pequenas, em consequência, o destino do lixo produzido era de fácil solução, sendo então enterrados. Esta prática favorecia dois aspectos: o controle de doenças e a fertilização do solo.

O aumento populacional e o crescimento industrial favoreceram uma maior produção de lixo, influenciando sua composição. Hoje, eles não são formados basicamente por matéria orgânica, mas por diversos tipos de materiais tais como plásticos, vidros, metais, etc. O crescente volume de lixo tem demandado áreas cada vez maiores para sua disposição. A sua composição diversificada e o aumento da consciência ambiental induziram uma reavaliação nas formas tradicionais de disposição.

Os aterros sanitários, que constituem até hoje, em todo mundo, o meio mais utilizado para disposição de resíduos com algum tratamento, apresentam graves problemas. A redução, nos países desenvolvidos, de espaço disponível para a construção de novos aterros e o aumento dos problemas relacionados à poluição ambiental (principalmente a poluição das águas subterrâneas) torna claro que esta opção não se constitui na melhor alternativa (Demajoravic, 1995).

No processo de incineração, alguns materiais presentes nesses resíduos, como plásticos e pilhas, geram compostos tóxicos e corrosivos que podem ser eliminados com as técnicas de combustão, exigindo instalação de sistemas de limpeza de gases, tornando o custo muito elevado. Esta é considerada uma das alternativas mais dispendiosas, sendo indicada apenas nas situações em que outras formas de disposição final do lixo sejam inviáveis, principalmente, nas grandes cidades, em decorrência de grandes

volumes de lixo a serem tratados e da ausência de grandes áreas disponíveis (FEAM, 1995).

A prática da reciclagem ou reinserção dos resíduos sólidos de forma a torná-lo novamente consumíveis vem ganhando espaço, pois permite o reaproveitamento de parte destes resíduos, contribuindo para dirimir um dos maiores problemas urbanos da atualidade, o do que fazer com o lixo.

## **2.3 - RECICLAGEM**

O lixo possui composição heterogênea, isto é, ele é constituído de diversos materiais com características diferentes que não podem ser tratados da mesma maneira. Isto favorece a separação dos seus constituintes. A seleção desses materiais visa à reciclagem dos seus componentes, mas esta reciclagem só se justifica se houver mercado consumidor.

Segundo CEMPRE (1999), o processo de separação de materiais a serem reciclados podem ser feitos da seguinte forma:

- Coleta seletiva é a separação na fonte geradora dos diferentes tipos de materiais, com posterior coleta dos materiais separados. Esse procedimento apresenta quatro modalidades: coleta porta-a-porta, em que o lixo é separado pelo morador em seco e úmido; postos de entrega voluntária que são contêineres ou pequenos depósitos em alguns pontos urbanos (estes contêineres são identificados pela cor e nome do material reciclado, onde o cidadão deposita espontaneamente o reciclado); postos de troca/recebimento, que recebem o material reciclado e trocam por alimento, vale-transporte, vale refeição, etc; e os catadores, que são os ‘agentes’ da coleta seletiva responsáveis pelo abastecimento do mercado de recicláveis e manutenção das indústrias recicladoras.
- Usinas de triagem, onde a coleta é feita sem que haja uma segregação da fonte geradora e destinada a uma central de triagem onde haverá a separação de todos os materiais recicláveis, incluindo o material orgânico que será destinado a

compostagem (processo biológico de decomposição da matéria orgânica contida em restos de origem vegetal ou animal).

A coleta seletiva no Brasil foi iniciada em torno de 1950, sendo difundida através dos “garrafeiros” e “papeleiros”. Este último conhecido hoje como aparista ou sucateiro, comerciantes que recolhem pela cidade matérias para serem recicladas (Oliveira et al., 2001).

### **2.3.1 - Aspectos Econômicos da Reciclagem**

A reciclagem não é somente uma questão de recuperar o material reciclável, mas a possibilidade de gerar ganhos econômicos (Bidlle, 1993). Para garantir esta sustentação econômica, devem ser levados em consideração os seguintes fatores (Wiebeck, 1997):

- ¬ Existência de demanda de mercado para o resíduo;
- ¬ Proximidade da fonte geradora com o local onde será reciclado o material;
- ¬ Quantidade de material disponível e condições de limpeza;
- ¬ Custo de separação, coleta, transporte, armazenamento e preparação dos resíduos antes do processamento;
- ¬ Custo de processamento e transformação do resíduo em novo produto;
- ¬ Existência de demanda de mercado para produto resultante da reciclagem;
- ¬ Características e aplicação de produto resultante.

### **2.3.2 - Importância da Reciclagem**

Segundo Valle (1995), a reciclagem tem como maiores estímulos dois fatores:

- ¬ Possibilidade de reduzir substancialmente o volume dos resíduos urbanos a serem dispostos ou tratados;
- ¬ Permite a recuperação de valores contidos nesses resíduos urbanos que, de outra forma, seriam perdidos.

Wiebeck (1997) também sintetiza alguns fatores que incentivam a atividade de reciclagem, tais como:

- ¬ Necessidade de poupar e preservar recursos naturais;
- ¬ Redução do volume de resíduos a transportar, tratar e dispor;
- ¬ Diminuição da carga de poluentes enviada ao meio ambiente;
- ¬ Aumento de vida útil dos locais de descarte de resíduos (aterro sanitário e aterro industrial);
- ¬ Redução do gerenciamento dos resíduos, com menores investimentos em instalações de tratamento e disposição final;
- ¬ Redução da poluição/contaminação ambiental e dos problemas de saúde pública e social decorrentes;
- ¬ Criação de empregos ou aproveitamento de mão de obra (catadores, por exemplo) em melhores condições de trabalho;
- ¬ Possibilidade de participação da população no processo de separação, levando ao conhecimento dos problemas (educação ambiental e conscientização em relação a sua responsabilidade).

## **2.4 - RECICLAGEM DOS PLÁSTICOS**

A reciclagem dos plásticos tem sido bastante incentivada e viabilizada devido à necessidade de se minimizar espaço para seu descarte (ou destinação final) bem como pelo seu alto valor econômico e potencial de reaproveitamento. O aumento crescente da produção e o consumo de plásticos motivaram o Senado Federal brasileiro a criar o projeto de lei nº 269, de 1999 (ainda em tramitação), que estabelece normas para a destinação final de garrafas e outras embalagens plásticas e da outras providências (ver Apêndice A).

A disposição dos plásticos em aterro sanitário dificulta a sua compactação e prejudica a decomposição dos materiais biodegradáveis. Embora represente 4 a 7% em massa, os plásticos ocupam de 15 a 20% do volume do lixo. Este volume é suficiente para aumentar o custo do transporte, coleta e disposição final (Lixo Municipal, 2000).

Nos Estados Unidos são despejados cerca de 160 milhões de toneladas anuais de resíduos sólidos no meio ambiente. Dessa massa total, cerca de 7% correspondem aos plásticos. No Japão, na Europa e nos países em desenvolvimento não é muito diferente. Cada habitante norte americano descarta 70kg de lixo plástico por ano. Na Europa são 38kg e, no Brasil 10kg (Reciclagem, 1999; citado por Lima, 2004).

Em 2002 a produção de plástico no Brasil atingiu 3,7 milhões de toneladas, sendo a reciclagem de plástico pós-consumo em torno de 17,5%. Este percentual representa um aspecto muito positivo em comparação à taxa Européia, que gira em torno de 22% (Plastivida/Abiquim, 2003). O consumo de plástico em todo o mundo, inclusive no Brasil vem aumentando. Isso se deve as vantagens proporcionadas pelo plástico, tais como (Recicloteca, 2004):

- └ Ampla gama de propriedade que vão deste a rigidez até a alta elasticidade e transparência;
- └ Segurança no manuseio;
- └ Resistência à corrosão;
- └ Baixa densidade que possibilita conseguir propriedades mecânicas extraordinárias com um peso relativamente reduzido;
- └ Grande durabilidade, em cerca de 450 anos.

Dentre os plásticos mais utilizados podemos destacar os termoplásticos. Apesar da sua grande variedade, apenas seis representam cerca de 90% de consumo no país: PEBD, PEAD; PP; PS; PVC e o PET (Pinto, 2000).

#### **2.4.1- Identificação dos Plásticos**

A separação dos plásticos por tipo de resina limita-se a reciclagem. Diante dos diversos estudos desenvolvidos ainda não há um consenso para se identificar de maneira rápida, eficiente e perfeita os diversos tipos de plásticos. Entretanto, já existe no exterior e sendo implementada por empresas brasileiras, uma codificação das resinas utilizadas na fabricação de artefatos plásticos. Esta codificação da resina é impressa no artefato ou

na embalagem ou no rótulo. A Figura 2.1 ilustra o Sistema Internacional de Codificação dos Plásticos (Pinto, 2000).

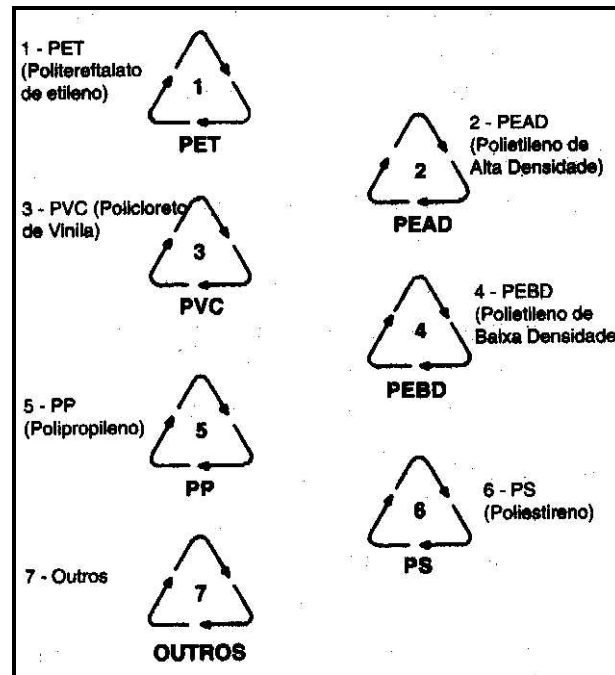


Figura 2.1 – Sistema internacional de codificação dos plásticos.

Este sistema tem como objetivo auxiliar os recicladores a identificar e separar os plásticos manualmente.

#### 2.4.2 - Principais Processos de Transformação dos Plásticos

- Extrusão: a extrusora funde o plástico aglutinado ou moído e o torna homogêneo. Neste equipamento, o plástico passa por uma matriz para ter uma forma final e posteriormente é resfriado. Cada matriz dá a forma final ao produto que se deseja obter. A extrusora consiste em um cilindro cujo interior gira um parafuso de Arquimedes (uma rosca sem fim), que promove o transporte do plástico. O material é progressivamente aquecido, plastificado, homogeneizado e comprimido, sendo forçado através do orifício de uma matriz montada no cabeçote existente na extremidade do cilindro. O perfil contínuo que sai da matriz (uma espécie de espaguete de plástico) é resfriado em um banho

com água para ser, então, picotado, para a obtenção de *pellets* (grãos plásticos) (CEMPRE, 1998b).

- Sopro: processo usado para obter artigos com volume interno, tais como garrafas, frascos e embalagem para materiais de limpeza. A resina é fundida e por meio de uma matriz, toma forma de tubo. Ainda quente, é colocado dentro de um molde e expandido com sopro de ar comprimido. Cada peça a ser fabricada exige um molde específico. Em contato com o molde, o material resfria e endurece, permitindo a abertura da ferramenta e a retirada do artefato. Pode-se observar no frasco plástico uma linha contínua, em relevo, que percorre de cima a baixo toda a embalagem, resultante desse tipo de moldagem (CEMPRE, 1999b).
- Injeção: processo pelo qual a resina é fundida e transferida para um molde com o desenho que dará seu formato final. Uma composição moldável fundida é introduzida em um molde frio ou pouco aquecido e fechado, por intermédio de pressão fornecida por um êmbolo. O material preenche as cavidades do molde e o artefato é posteriormente extraído. Em geral, pode-se observar na base da peça plástica uma “cicatriz”, que é o ponto de injeção do material plástico dentro do molde (CEMPRE, 1998b). Este tipo de processo de transformação permite a confecção de utensílios plásticos em geral - bacias, tampas, caixas e peças de grandes dimensões.

## **2.4.3 - Utilização do Plástico Politereftalato de Etileno (PET)**

A utilização do PET no Brasil iniciou-se em 1988, mas somente passou a ser usado como embalagem de refrigerantes em 1993. Essa aplicação foi possível devido às vantagens das embalagens do PET frente aos outros tipos de materiais. Podendo ser destacado como vantagens (ABIPET, 2004):

- Excelentes propriedades de barreira;
- Estabilidade química;
- Embalagens mais livres, com otimização no transporte e manuseio;

- ¬ Baixo custo compatível com os demais termoplásticos de finalidades e empregos semelhantes;
- ¬ Evita interrupções na linha de montagem de envase por quebra de embalagens;
- ¬ Apresenta segurança e praticidade.

Além dessas aplicações, o PET é utilizado nas indústrias têxteis e automotivas e na construção civil. A sua maior aplicação, em torno de 90% é direcionada a fabricação de embalagens (ABIPLAST, 2004).

## **2.5 - RECICLAGEM DO PLÁSTICO PET**

O processo de reciclagem pode se dar através de moagem e lavagem das embalagens ou misturando-as com reagentes químicos capazes de restaurar o produto original. Desta forma os polímeros são novamente transformados em grânulos.

A seleção e pré-processamento da sucata são muito importantes para a garantia de qualidade do reciclado. A seleção pode ser feita pelo símbolo que identifica o material ou pela cor (cristal, âmbar ou verde). A separação pode seguir processos manuais ou mecânicos, como sensores óticos. No pré-processamento, após a prensagem, é preciso retirar os contaminantes, separando-os por diferença de densidade em fluxo de água ou ar. Além do rótulo (polietileno ou papel), tampa (polipropileno ou alumínio) e base (Polietileno de alta densidade), devem ser retirados da sucata os resíduos de refrigerantes e demais detritos, por meio de processos de lavagem (ABIPET, 2004). Após a seleção, separação e pré-processamento do material, a reciclagem pode ocorrer de três formas. Na reciclagem primária, a sucata limpa é triturada em pedaços uniformes, retornando à produção de resina na própria unidade. Na chamada reciclagem secundária, o PET é reprocessado mecanicamente em equipamentos que recuperam o poliéster para a fabricação de fibras, lâminas ou embalagens. Já a reciclagem terciária consiste na reversão química do processo que formou o polímero de PET, possibilitando o retorno às matérias-primas originais, usadas novamente para a fabricação do mesmo produto.



Atualmente, o maior mercado para o PET pós-consumo no Brasil é a produção de fibras para a fabricação de cordas (multifilamento), fios de costura (monofilamento) e cerdas de vassouras e escovas. Outra parte é destinada à moldagem de autopeças, lâminas para termo-formadores e formadores a vácuo (manequins plásticos), garrafas de detergentes, carpetes e enchimentos de travesseiros.

A reciclagem das embalagens PET, como as garrafas de refrigerantes de 600ml, 1l, 1,5l e 2l descartáveis, está em franca ascensão no Brasil, conforme mostra a Tabela 2.2. Em 2004, 48% das embalagens pós-consumo foram recicladas, totalizando 173 mil toneladas. A recuperação destas garrafas é feita principalmente pelos catadores, além de fábricas e coleta seletiva operada por municípios. Os programas de coleta seletiva, que existem em mais de 200 cidades do país, recuperam por volta de 1000t por ano. Além de garrafas descartáveis existem no mercado 70 milhões de garrafas retornáveis, feitas com este material (ABIPET, 2005).

Tabela 2.2 – Produção, consumo e reciclagem t/ano.

Ano	Produção	Consumo	Reciclagem	%Reciclagem/ produção	%Reciclado/ consumo
1997	125mil	185,7 mil	30 mil	24,00	16,16
1998	165 mil	223,6 mil	40 mil	24,24	17,89
1999	185 mil	244,8 mil	50 mil	27,03	20,42
2000	235 mil	255,1 mil	67 mil	28,51	26,26
2001	251 mil	270 mil	89 mil	35,46	32,96
2002	250mil	300 mil	105 mil	42,00	35,00
2003	244mil	330 mil	141,5 mil	58,00	42,88
2004	264mil	360 mil	173 mil	65,53	48,06

Fonte: ABIPET, 2005

A evolução do mercado e os avanços tecnológicos têm impulsionado novas aplicações para o PET reciclado, principalmente na engenharia. A utilização de materiais alternativos em substituição aos materiais convencionais de engenharia traz como vantagens a preservação dos recursos naturais e a implementação de novas tecnologias. Estes materiais alternativos (recicláveis) muitas vezes apresentam características similares ou superiores àqueles que seriam utilizados para o mesmo propósito. Várias pesquisas têm sido realizadas com o intuito de utilizar materiais recicláveis PET (Paranhos, 2002; Suvinil, 2002; UFSCar, 2003). A seguir, apresenta-se um resumo desses trabalhos.

Paranhos (2002) desenvolveu uma pesquisa visando à utilização de garrafas PET como elemento drenante na substituição de britas e seixos rolados. Essas garrafas, após terem seus rótulos e tampas retiradas, foram deixadas em “banho maria” temperatura de 100°C e levemente comprimidas. Este procedimento conduziu a uma redução de volume em torno de 30% aumentando a resistência ao esmagamento. Após um processo de compressão, as garrafas foram envolvidas por um geotêxtil formando um núcleo drenante. Dando origem a um cilindro flexível cujo comprimento e diâmetros variam de acordo com as características da obra em que o dreno é empregado.

A empresa de tintas Suvinil (2002) implementou, na fabricação da linha de tintas e vernizes, a utilização da resina PET como seu principal componente, reduzindo em 40% a quantidade de efluentes químicos na produção destes produtos. As PETs recicladas fornecem o poliácido e o poliálcool, elementos básicos da resina alquídica, para produção de esmaltes e vernizes. Em um sistema produtivo tradicional, a obtenção dessas duas matérias-primas passa por um processo de reação química que deixam resíduos. Como as garrafas plásticas já contêm o poliácido e o poliálcool, seu uso elimina justamente a etapa poluente. Para cada galão de 3,7 litros de tinta, há seis garrafas recicladas. Já foram consumidas pelo menos 110 milhões de garrafas PET desde a implantação desta metodologia em 2002.

A UFSCar & EBR (2003) desenvolveu tubos de esgoto com resina PET nos diâmetros de 40, 60, 75, 100mm, apresentando como vantagem uma maior rigidez e um custo de 15 a 20% menor que o PVC. Além disto, os tubos PETs fixam facilmente as conexões existentes. De acordo com os dados desta pesquisa, são necessárias noventa garrafas PET para produzir seis metros de tubo.

A diversificação da utilização do PET pós-consumo exige uma adequada compreensão das características do polímero. Neste sentido, os aspectos relativos à natureza da matéria-prima, são fundamentais na previsão do seu comportamento para a sua aplicação em diversas áreas da engenharia.

## **2.6 - MATERIAS POLIMÉRICOS**

Há um bom tempo, os polímeros orgânicos e inorgânicos serviram como materiais de construção. Um dos primeiros materiais de engenharia utilizados pelo homem foi a madeira, seguindo-se a pedra, depois os metais, a cerâmica e o vidro (Mano 1991).

O aumento do consumo destes materiais e o avanço tecnológico proporcionaram a criação de novos materiais (polímeros sintéticos) com características similares ou superiores aos materiais utilizados para uma mesma aplicabilidade. Estes podem ser utilizados em diversas áreas da engenharia. Muitos desses polímeros são variações ou desenvolvimentos de moléculas que já existem.

Os polímeros (termo criado por Berzelius em 1832) são macromoléculas, de peso molecular da ordem de  $10^3$  a  $10^6$ , constituída por unidades químicas simples ('mero' do grego 'partes') que se repetem sucessivamente, caracterizando a cadeia polimérica (Mano, 1991).

A reação química que origina os polímeros é conhecida como polimerização. E o grau de polimerização está associado ao número de meros na correspondente cadeia polimérica. Quando uma cadeia se constitui de um mesmo 'mero', o polímero resultante é denominado homopolímero. Quando constituído de duas ou mais unidades de mero diferentes são denominados copolímeros (Callister, 1994).

Os polímeros podem ser classificados devido a sua estrutura química, método de preparação, característica tecnológica e comportamento mecânico (Mano, 1991).

Em função da estrutura química e devido às características das macromoléculas envolvidas, os polímeros podem ser classificados como poliamidas, poliésteres, poliéteres, dentre outros. De acordo com o método de preparação, estes são divididos em dois grupos: polímeros de adição e polímeros de condensação. No primeiro caso, a

cadeia polimérica desenvolve-se rapidamente com elevado grau de polimerização ainda nas fases iniciais das reações. No segundo caso ocorre o contrário, as policondesações ocorrem devagar e o crescimento da cadeia é bastante lento, dependendo da eliminação de pequenas moléculas dos monômeros, como  $H_2O$ ,  $KCl$  e  $HCl$  convertidos em subprodutos das reações.

As características de fusibilidade são condicionantes primárias do comportamento tecnológico destes materiais, constituindo a base para classificação geral dos polímeros em termoplásticos e termorrígidos.

Os termoplásticos são polímeros lineares ou ramificados que possibilitam a fusão por aquecimento e solidificam por resfriamento. Os termorrígidos são polímeros que assumem estruturas tridimensionais, reticuladas, com ligações cruzadas devido ao aumento de temperatura ou outra forma de tratamento, transformando-se em insolúveis e infusíveis.

Do ponto de vista do comportamento mecânico, os polímeros são divididos em três grandes grupos: borrachas ou elastômeros, plásticos e fibras. Neste contexto, os plásticos apresentam uma enorme variedade de materiais poliméricos. O polietileno, o polipropileno, o cloreto de polivinila, o poliestireno e os fluorocarbonos, epóxi, fenólicos e poliésteres são alguns deles.

Alguns plásticos são muito rígidos e frágeis, outros flexíveis, exibindo tanto deformações elásticas como plásticas quando submetidos à tração, algumas vezes apresentam deformações excessivas antes da ruptura. Os polímeros plásticos podem apresentar qualquer grau de cristalinidade, assim como todas as estruturas e configurações moleculares (linear, ramificada, etc.) são possíveis. Os plásticos são também conhecidos como resina, baseado no elemento químico carbono e são feitos pela síntese de materiais brutos advindos do petróleo.

Segundo Vlack (1994) o plástico na engenharia é um adjetivo que define um material permanentemente deformável, mas na linguagem comum “plástico” se refere aos materiais que foram conformados por deformações plásticas.

As propriedades mecânicas dos polímeros são caracterizadas pelo modo como esses materiais respondem às solicitações mecânicas aplicadas, podendo estas últimas ser do tipo tensão ou deformação. Os plásticos e os outros polímeros apresentam três tipos de comportamento tensão *versus* deformação tipicamente diferentes. A Figura 2.2

mostra o comportamento tensão *versus* deformação apresentada por um polímero frágil (curva A), que sofre ruptura quando se deforma. O plástico, curva B, é semelhante ao comportamento de muitos materiais metálicos; a deformação inicial é elástica, seguido por um escoamento e por uma região de deformação plástica. A curva C é totalmente elástica, característica típica da borracha (Callister, 1994).

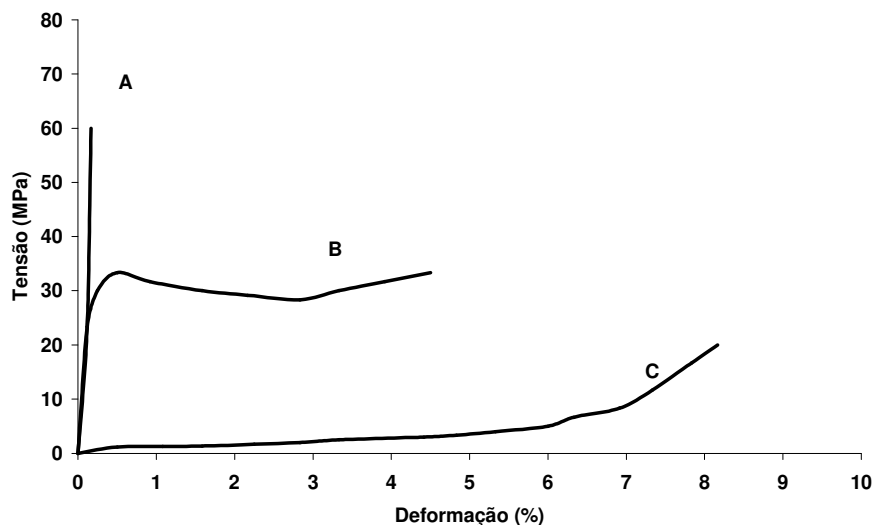


Figura 2.2 – Comportamento tensão-deformação (Callister, 1994).

A descrição do processo de deformação do polímero semicristalino e o seu entendimento no contexto desta pesquisa são relevantes, pois a garrafa PET é constituída por uma estrutura semicristalina.

Os polímeros semicristalinos, polímero composto por região cristalina e amorfa, quando submetidos às tensões de tração, promovem o alongamento das moléculas da cadeia na direção da tensão aplicada, através das dobras e pelo estiramento das fortes ligações presentes na cadeia. Enquanto o mecanismo de deformação plástica é bem mais pronunciado pelas alterações que existem entre as regiões lamelares e as regiões amorfas (caracterizado por um arranjo desordenado de moléculas) intermediárias em resposta a aplicação de carga de tração. Este processo pode ser descrito em vários estágios, como mostrado esquematicamente na Figura 2.3.

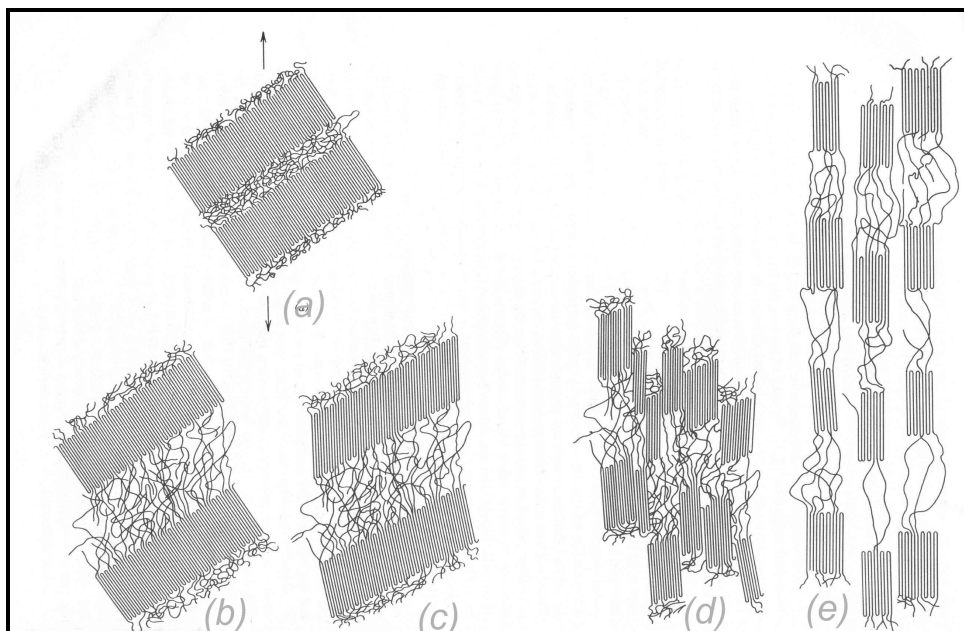


Figura 2.3 – Estágios na deformação de um polímero semicristalino (Callister, 1994).

A Figura 2.3a apresenta duas lamelas com cadeias dobradas adjacentes e o material amorfo interlamelar, antes do pronunciamento da deformação. Durante o estágio inicial de formação (Figura 2.3b), as cadeias nas regiões amorfas deslizam umas contra as outras e se alinham na direção do carregamento. A continuação da deformação no segundo estágio ocorre pela inclinação das lamelas, de modo que as dobras da cadeia ficam alinhadas com o eixo de tração (Figura 2.3c). Em seguida, o seguimento de blocos cristalinos se separa das lamelas permanecendo presos uns aos outros através da cadeia de ligação (Figura 2.3d). No estágio final (Figura 2.3e), os blocos e as cadeias de ligação ficam orientados na direção do eixo da força de tração. Dessa forma, as deformações por tração apreciável dos polímeros semicristalinos produzem uma estrutura altamente orientada. Este comportamento possui reflexo na deformação macroscópica podendo ser observado na Figura 2.4.

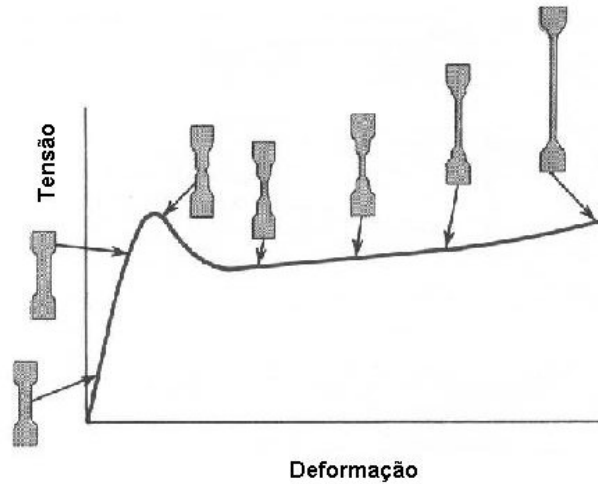


Figura 2.4 – Comportamento tensão *versus* deformação para polímeros semicristalinos (Callister, 1994).

A Figura 2.4 apresenta o perfil do corpo de prova para vários estágios de deformação ao longo do ensaio de tração. É possível observar que durante o processo de deformação um depressão “estreitamento” é formado na seção útil do corpo de prova. No interior desta depressão, as cadeias se tornam orientadas (isto é, os eixos da cadeia ficam alinhados paralelos à direção do alongamento), o que leva o aumento da resistência localizada. Como consequência, neste ponto, existe uma resistência à continuidade da deformação, e o alongamento do corpo de prova prossegue pela propagação dessa depressão ao longo da seção útil (Callister, 1994).

O comportamento mecânico dos polímeros sofre forte influência da taxa de deformação e da temperatura estes fatores influenciam na fragilidade e na ductilidade do material. Além destes dois fatores pode-se citar:

- Peso molecular é a relação entre g/mol, quanto maior o peso molecular maior a resistência à tração.
- Grau de cristalinidade são regiões cristalinas, em que a cadeia molecular se encontra densamente compactada em um arranjo ordenado e paralelo. Quanto maior o aumento da cristalinidade maior o módulo de tração.

- Tratamento térmico é a elevação da temperatura de recozimento para materiais que não tenham sido submetidos ao estiramento. Este procedimento favorece ao aumento do módulo de tração, ao aumento do limite de escoamento e a redução da ductilidade.
- Pré-deformação por estiramento é uma das técnicas mais utilizada para fabricação de garrafa PET e consiste em deformar polímero permanentemente sob tração. Este procedimento é conhecido como estiramento e corresponde ao processo de extensão da depressão como foi ilustrado na Figura 2.4. Este mecanismo tende a favorecer o aumento de resistência a tração.

## 2.7 - O PLÁSTICO PET

O Politereftalato de Etileno é um polímero formado a partir de uma reação química entre o ácido carboxílico e um álcool, pertencendo ao grupo dos materiais (poliester) que se obtém por meio de reações de condensação. Este é um material quimicamente inerte, termoplástico e semicristalino, desenvolvido em 1941 pelos químicos ingleses J. R. Whinfield e J. T. Dickson. A Tabela 2.3 mostra alguns valores das características mecânicas do PET em contraposição ao PVC e ao aço, materiais consagrados na engenharia.

Tabela 2.3 Características Mecânicas do PET.

<b>Materiais</b>	<b>Resistência Impacto (Kgf. mm/mm).</b>	<b>Resistência Tração (MPa)</b>	<b>Resistência Compressão (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Along. Ruptura (%)</b>
PET	3,00-6,00	166-906,3	109,3-110,7	4,1-14,0	6,1-52,3
PVC <sup>1</sup>	3,75-4,55	31,2-40,7	53,0-68,2	2,77-8,6	4,6-41,6
AÇO	545,30	140,1-1000	1002-1167	20,0	21,5-24,6

Fonte: Callister (1994); Mano (1991); ABIPET (2002).

Como citado anteriormente, as características mecânicas do PET podem sofrer forte influência da temperatura, condicionando a sua aplicabilidade em algumas

<sup>1</sup> Policloreto de vinila



situações. As temperaturas as quais se definem o limite superior e inferior de aplicação, especialmente nos caso de polímeros semicristalinos, são as temperaturas vítreas e de fusão. A temperatura vítrea é a temperatura de amolecimento ou de transição entre o estado rígido e o elástico, onde as propriedades dos polímeros começam a ser influenciadas, enquanto a temperatura de fusão é a transição entre um estado sólido ordenado de cadeias moleculares alinhadas, em um líquido viscoso, onde a estrutura é altamente aleatória. Estas temperaturas estão em torno de 80 e 260°, respectivamente.

### **ENSAIOS PRELIMINARES PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS**

#### **3.1 - INTRODUÇÃO**

O dimensionamento de uma estrutura sobre o solo ou no interior do solo exige o conhecimento das suas propriedades de resistência e sua interação com o meio onde será instalada. Neste sentido, são comumente realizados ensaios de laboratório ou de campo que visam estabelecer esses parâmetros, os quais favorecem a realização de projetos tecnicamente e economicamente viáveis.

Contudo, a escolha de uma campanha de ensaios depende da característica do material, dos tipos de esforços que esse material vai ser submetido e das propriedades que se deseja medir.

Desta forma, a análise da interação solo-garrafa, frente as possíveis solicitações de campo, fornecerá informações para sua aplicabilidade nas várias situações propostas. Dentro deste contexto, o presente capítulo apresenta a descrição dos ensaios e as metodologias adotadas para determinação dos parâmetros relacionados ao solo e a garrafa preenchida com areia. Além disso, aborda a técnica desenvolvida para o envasamento da areia, comparando com os valores obtidos nos ensaios de índices de vazios mínimo com outros processos de envasamento que tentaram simular as condições de enchimento em campo.

Os ensaios que compõem este capítulo (caraterização do solo, garrafa PET, solo mais garrafa PET, pressão de trabalho e ensaio de resistência ao cisalhamento da areia)

tiveram como propósito viabilizar a utilização do solo+garrafa como material alternativo.

A evolução desta investigação proporcionou a condução de outros ensaios que complementaram os estudos propostos inicialmente e que serão apresentados nos capítulos seguintes.

### 3.2- CARACTERIZAÇÃO DA GARRAFA PET

Dentre as diversas garrafas disponíveis no mercado de bebidas carbonatadas, foram estudadas dois tipos de garrafa PET, ambas com capacidade de dois litros. As formas geométricas destas garrafas apresentam-se ilustradas nas Figuras 3.1a e 3.1b. A escolha do modelo de dois litros foi essencialmente devido a maior disponibilidade no mercado e interesse político-social pelo reuso. Dentre as várias geometrias das garrafas PETs de dois litros, o formato estudado foi escolhido em função da sua forma mais regular ao longo do seu comprimento e por possuir uma geometria “tradicional” utilizada por vários fabricantes de refrigerantes, podendo ser facilmente encontrada em qualquer usina de reciclagem.

A Tabela 3.1 apresenta as características das garrafas escolhidas para este estudo.

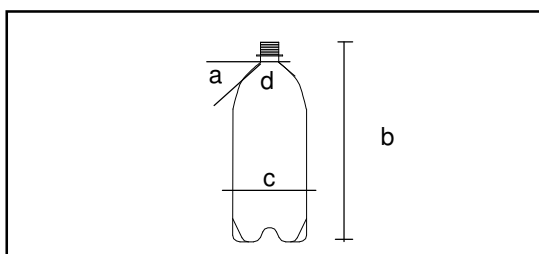


Figura 3.1a - Garrafa Tipo 1.

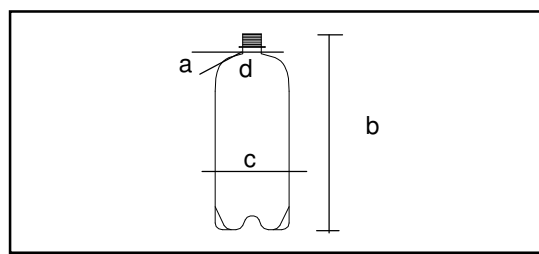


Figura 3.1b - Garrafa Tipo 2.

A escolha dos tipos de garrafas PET possibilitou a identificação das características destas garrafas, bem como evidenciar o processo de fabricação, que por sua vez, influencia diretamente na forma, dimensão e resistência do material.

Tabela 3.1 - Características das garrafas PET dois litros.

Dados	Unidade	Garrafa Tipo 1	Garrafa Tipo 2
Altura da garrafa - b	(m)	0,3358	0,3360
Diâmetro médio bocal - d	(m)	0,0253	0,0261
Diâmetro médio garrafa - c	(m)	0,0986	0,0972
Inclinação - a	(°)	52 – 54	19 - 21
Espessura da garrafa	(m)	0,00025 a 0,00035	0,00025 a 0,00035
Peso da garrafa PET	(N)	0,482	0,501
Pressão suportada p/garrafa <sup>1</sup>	(kPa)	1019	1019
Resistência ao impacto <sup>2</sup>	(N.m/m)	40,00	40,00

### Forma

A forma da garrafa PET é projetada para compensar os efeitos da pressão hidrostática permitindo uma deformação controlada, de modo a que, após arrefecimento, a garrafa mantenha o formato desejado e sobretudo sua estabilidade. A geometria de uma embalagem PET está associada aos aspectos técnicos-econômicos, ambientais e aos objetivos de marketing. A evolução tecnológica tem proporcionado a otimização das embalagens PET, ou seja, produzir embalagens cada vez mais atraentes e resistentes que facilitem a sua utilização e com uma quantidade de matéria prima cada vez menor. Isto conduz a uma economia de material, que influencia diretamente nos aspectos ambientais.

### Espessura

A espessura é usualmente definida pela indústria “utilizadora”. Como regra geral para as garrafas sem retorno é exigida uma espessura mínima de 0,00025m. A espessura das paredes de uma embalagem, respeitando as condições acima, é escolhida em função da sua aplicação final. Esta escolha leva também em consideração as propriedades de barreira (permeabilidade aos gases), resistência e menor peso (ABIPET, 2004).

<sup>1</sup> Dados fornecidos pela Bahiapet

<sup>2</sup> Dados fornecidos pela Embrapack

## **Inclinação**

A inclinação consiste no ângulo formado entre o gargalo e o corpo da garrafa, conhecido como “ombros da garrafa”. Estes “ombros” distribuem a pressão da garrafa sobre as paredes verticais e representa a resistência à carga vertical. Esta resistência é avaliada em função das práticas de empilhamento das embalagens e pela pressão exercida nas linhas de engarrafamento. Deve-se evitar o uso de ombros largos, planos, ou com ângulos de declividade demasiadamente fechados, os quais favorecem a um fraco desempenho em relação à carga vertical, devido ao efeito de dobragem. (ABIPET, 2004).

## **Coloração**

A coloração é atribuída através de pigmentos líquidos ou sólidos com a entrada da resina na garganta da injetora. A mesma não influencia na resistência da garrafa PET e tem apenas caráter estético (Geraldini, 2005).

## **O Processo de Fabricação da Garrafa PET**

A transformação da resina PET em garrafas engloba processos combinados de moldagem por injeção, estiragem e sopro. A transformação da pré-forma em garrafa através do processo de estiragem-sopro provoca orientação biaxial (axial e circunferencial) das paredes da garrafa, como ilustrado na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Processo de orientação.

As cadeias moleculares que se encontravam entrançadas alinham-se no sentido da estiragem, contribuindo para paredes de garrafas mais lisas, mais transparentes e brilhantes, com maior resistência e menor permeabilidade dos gases. Isto faz com que as garrafas PET sejam inquebráveis em utilização normal e suportem pressões elevadas, muito acima das pressões máximas utilizadas no engarrafamento de bebidas carbonatadas. Os processos de injeção-estiragem-sopro estão descritos a seguir:

- A moldagem por injeção tem por finalidade a produção de pré-formas – Após a produção da resina, esta é aquecida e injetada em um molde gelado. Com este processo, ocorre um choque térmico que fixa o formato da pré-forma. As pré-formas são peças cilíndricas que possuem diversos tamanhos, pesos e cores. Alguns modelos estão apresentados na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Pré-formas.

- A estiragem e sopro são iniciados depois de concluído o processo de injeção, as pré-formas encontram-se no estado vítreo. Na fase seguinte é necessário reaquecê-las até chegarem ao “estado termoplástico”, onde são introduzidas no molde de sopro, como ilustrado na Figura 3.4.

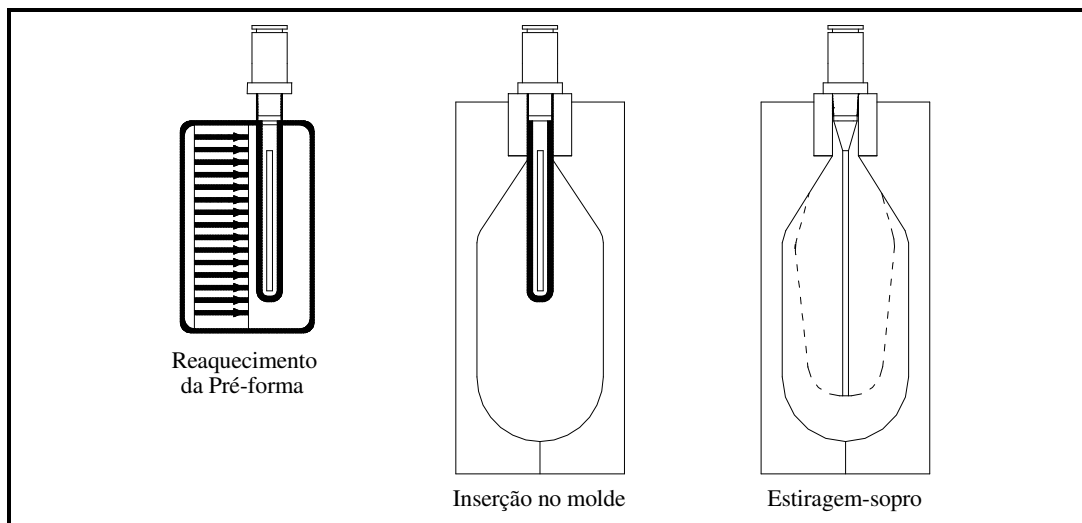


Figura 3.4 - Processo de fabricação - garrafa PET (modificado ABIPET, 2004).

Para que a garrafa PET possa adquirir as propriedades citadas acima, a pré-forma deverá ser processada de maneira que haja uma bi-orientação dos filamentos de PET. Esta bi-orientação é obtida pelo sistema de estiramento e pré-sopro/sopro. O estiramento é feito através de uma vareta (após o aquecimento das pré-formas a uma temperatura de aproximadamente  $100^{\circ}\text{C}$ ) que orienta os filamentos no sentido vertical. Quase ao mesmo tempo, é injetado ar comprimido (pré-sopro), empurrando o material para a parede do molde, orientando os filamentos no sentido horizontal. Depois se injeta o ar comprimido com maior pressão (sopro), que tem como finalidade dar o formato final da garrafa. Todo este processo é feito dentro do molde resfriado para que ocorra um choque térmico, fixando o formato final da garrafa e a orientação dos filamentos de PET.

A fabricação da garrafa PET pode ser realizada através de dois métodos:

- Método *one step* (um estágio): as etapas acima referidas ocorrem na mesma máquina. As pré-formas são injetadas num primeiro molde e passam ao “estado vítreo” (abaixo da temperatura de cristalização) durante a transferência para segunda estação, na qual são novamente levadas para uma temperatura de “estado termoplástico” e transferidas instantaneamente para a estação de estiragem-sopro, onde são moldadas as garrafas.

→Método *two step* (dois estágios): as etapas são independentes, ocorrem em máquinas diferentes e podem ser diferidas no tempo. A primeira etapa destina-se a injeção da pré-formas, sendo usada uma máquina de injeção modificada. É primordial garantir o arrefecimento completo e rápido das pré-formas, deixando-as no “estado vítreo” imediatamente após a injeção. As pré-formas podem ser armazenadas ou transferidas para os equipamentos onde é realizada a fase seguinte. Nesta última fase, as pré-formas são reaquecidas em condições controladas, de forma atingir a temperatura no “estado termoplástico”. Um equipamento especial encarrega-se de introduzi-las na máquina de estiragem-sopro, onde são produzidas as garrafas.

Há também o processo de injeção-sopro (sem estiragem) que pode ser utilizado para produzir garrafas de menor formato, designado para produtos alimentares, detergentes domésticos, produtos farmacêuticos, etc. As embalagens de PET produzidas por injeção-sopro têm normalmente uma orientação apenas circunferencial, diferindo das garrafas PET bi-orientadas.

### **3.2.1 - Pressão de Trabalho da Garrafa PET**

As garrafas PET são embalagens submetidas à pressurização durante o processo de envasamento. Por isso, faz-se necessário verificar sua resistência após o sopro. Segundo Geraldini (2005), a resistência última da garrafa PET é em torno de 1019kPa medido através do ensaio de explosão (*burst test*). Há um outro procedimento muito usado pelos fabricantes de garrafas PET para determinação da resistência de trabalho, que é feito através de reações químicas. Os materiais que compõem esta reação são bicarbonato de sódio, ácido cítrico, água carbonatada, papel de seda e cola neutra. A Figura 3.5 ilustra a reação em andamento.

A água carbonatada é colocada dentro do recipiente (garrafa PET) com volume desejado, onde é adicionada uma determinada quantidade de bicarbonato de sódio e em seguida o ácido cítrico. Este último é enrolado em papel de seda e fechado com cola neutra, isto faz com que a reação não se inicie de imediato para que a garrafa possa ser fechada sem que haja perda de pressão. Após alguns minutos, a reação é completada e a pressão interna gerada é medida por um manômetro. Este possui uma ponta biselada



que perfura a tampa da garrafa liberando o gás de reação. A Figura 3.6 mostra o equipamento utilizado para medir pressão interna da garrafa PET.

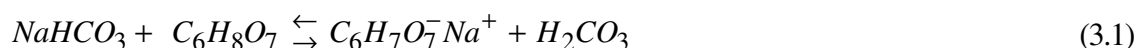


Figura 3.5 - Processo de reação.



Figura 3.6 – Medidor de pressão.

A maior ou menor pressão gerada está condicionada a quantidade de reagentes. O ácido cítrico reage com o bicarbonato de sódio formando citrato de sódio e ácido carbônico. Portanto, o ácido carbônico dissocia-se em água e gás carbônico. A água carbonatada desloca o equilíbrio desta dissociação gerando mais gás carbônico. Este gás gerado é responsável pelo aumento da pressão interna.



Sendo:

$NaHCO_3$  – Bicarbonato de Cálcio;

$C_6H_8O_7$  – Ácido Cítrico;

$H_2CO_3$  – Ácido Carbônico;

$C_6H_7O_7^- Na^+$  – Citrato de Sódio;

$CO_2$  – Gás carbônico.

### 3.3 - CARACTERIZAÇÃO DA AREIA

O conhecimento da granulometria do solo, sob o ponto de vista da geotecnia, visa estimar o provável comportamento do solo, ou mesmo orientar no programa de investigação necessário para permitir a adequada análise do problema. Isto se deve ao fato de que o tamanho e a distribuição das partículas condicionam um grande número de propriedades geotécnicas como, por exemplo, permeabilidade, compacidade, arranjo entre partículas, etc. Vale ressaltar que esta classificação é baseada em parâmetros físicos (tamanho dos grãos), não podendo fornecer dados mais completos e nem substituir um determinado ensaio específico.

Os solos utilizados na execução desta pesquisa são areias originárias dos arredores de Brasília – DF e Ponte Nova – MG. A metodologia empregada para

caracterização das amostras foram baseadas nas normas da NBR 7181 (ABNT/ 1984) e NBR 6508 (ABNT/ 1984).

Os resultados obtidos nos ensaios de análise granulométrica estão apresentados na Figura 3.7. Segundo a norma NBR 6502 (ABNT /1995), as amostras 1 e 2 podem ser classificadas como areia com vestígios de silte e pedregulho; a amostra 3 como areia com vestígio de pedregulho, e a amostra 4 como areia com vestígios de silte, argila e pedregulho. Além da classificação citada anteriormente, existem outros sistemas de classificação que lançam mão de alguns índices característicos da curva granulométrica, para avaliação da uniformidade do material. Os coeficientes de não uniformidade (CNU) e curvatura (Cc) são obtidos a partir de alguns diâmetros equivalentes característicos do solo. As Expressões (3.3) e (3.4) apresentam os coeficientes de não uniformidade e curvatura de uma dada curva granulométrica:

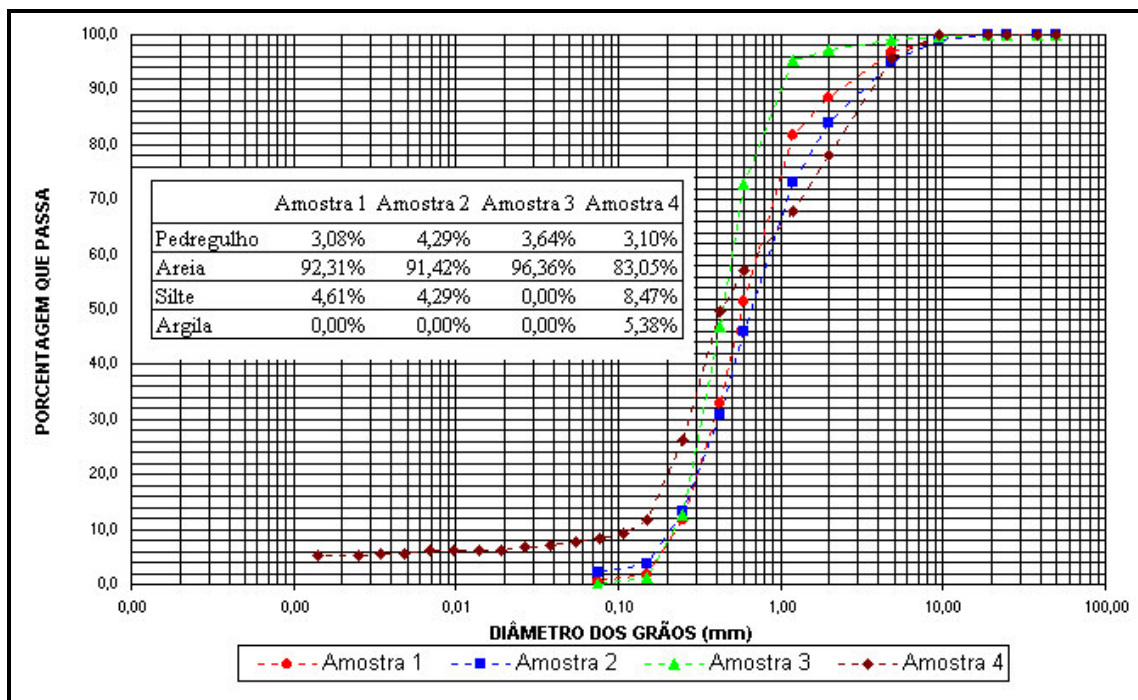


Figura 3.7 - Curva granulométrica.

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.3)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (3.4)$$

Sendo:

$D_{10}$  – conhecido como diâmetro efetivo - diâmetro equivalente da partícula para o qual se tem 10% das partículas passando;

$D_{30}$  e  $D_{60}$  – o diâmetro da partícula para o qual se tem 30 e 60% das partículas passando, respectivamente.

As amostras apresentaram coeficiente de não uniformidade de 2,69; 5,60; 2,10 e 2,71, referentes às amostras 1, 2, 3 e 4, respectivamente. De acordo com os dados obtidos, as areias 1, 3 e 4 podem ser classificadas como “muito uniforme” e a areia 2 como tendo “uniformidade média”. Os coeficientes de curvatura para as amostras citadas acima são 0,9; 1; 1,23; 1, respectivamente.

No ensaio de índice de vazios máximo, o método utilizado foi o método A, com relação a este método, maiores detalhes podem ser encontrados na norma MB 3324 (ABNT/ 1990). Para o índice de vazios mínimo o método utilizado foi o B, pelo processo de via úmida, conforme norma MB 3388 (ABNT/ 1991).

Tabela 3.2 - Propriedades índices das areias.

	$\gamma_s$ ( kN/m <sup>3</sup> )	$e_{max}$	$e_{min}$
Amostra 1	25,10	0,73	0,51
Amostra 2	28,68	0,89	0,69
Amostra 3	28,50	1,09	0,80
Amostra 4	26,80	0,63	0,39

Nota: todas as amostras ensaiadas não apresentaram plasticidade.

### 3.3.1 - Ensaio de Cisalhamento Direto

A resistência ao cisalhamento é uma das propriedades mais importantes dos solos, sendo fundamental para o estudo de estabilidade de taludes e obras de fundações. Em laboratório, geralmente, a quantificação da resistência é obtida através de ensaios

triaxiais ou cisalhamento direto. Neste trabalho, foi escolhido o ensaio de cisalhamento direto para avaliação dos parâmetros de resistência. Esta opção se deve basicamente à rapidez de execução, facilidade da moldagem dos corpos de provas e pelas análises das interfaces propostas, que serão vistas no Capítulo 4.

O ensaio de cisalhamento direto foi idealizado e realizado por Coulomb em 1776. O ensaio permite o estudo da resistência em um plano de ruptura pré-determinado. O ensaio consiste em colocar uma amostra de solo em uma caixa bipartida horizontalmente, em que a metade superior se desloca em relação a inferior, cisalhando a amostra (Figura, 3.8). Neste processo aplica-se uma força vertical  $N$  e uma força tangencial  $T$ , na parte superior do corpo de prova, provocando seu deslocamento. Mede-se então a força suportada pelo solo face aos deslocamentos impostos, que são registrados pelos extensômetros colocados nas direções vertical e horizontal. As forças  $N$  e  $T$  divididas pela área transversal do corpo de prova, fornecem as tensões cisalhantes e normais que estão ocorrendo.

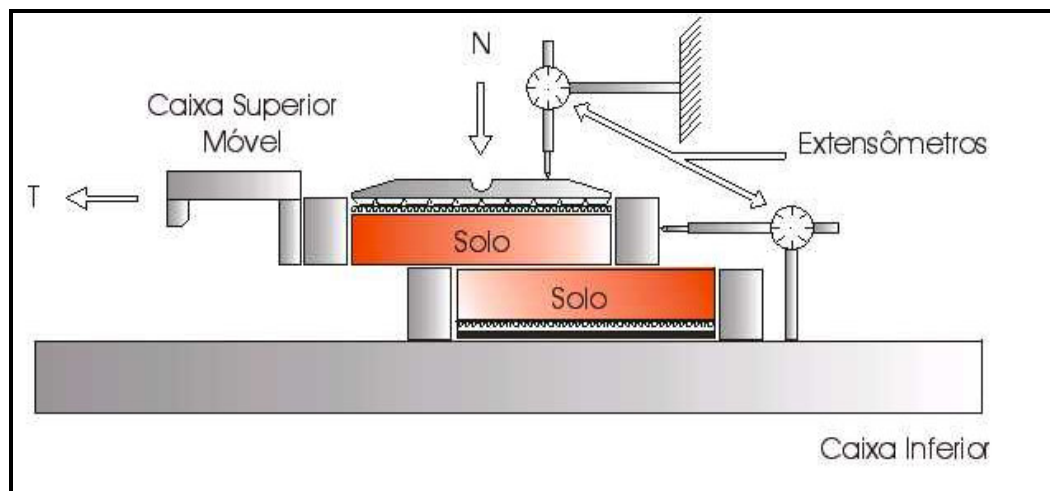


Figura 3.8 - Equipamento de cisalhamento direto.

O carregamento durante o ensaio (força cisalhante horizontal crescente) pode ser feito de duas maneiras. A primeira com a carga (ou tensão) controlada, que consiste num aumento controlado da força  $T$  possibilitando a obtenção da resistência de pico. A segunda com deformação controlada do deslocamento horizontal (velocidade constante) que permite a obtenção das resistências de pico e residual.

Cada amostra deve ser ensaiada sob uma determinada tensão normal que fornecerá um ponto da envoltória de resistência. Para obtenção de uma envoltória de resistência são necessários no mínimo três pontos. Logo, o ensaio é realizado sob três diferentes valores de tensão normal, associados a níveis de tensão de campo.

### 3.3.2 - Moldagem dos Corpos de Prova

Na preparação dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto, a metodologia que se mostrou mais adequada foi à técnica de “compactação com o soquete”. O material (areia 1) foi compactado em três camadas, sendo aplicados sessenta golpes por camada, atingindo um índice de vazios final de 0,54. A adoção desta metodologia baseou-se na necessidade de se obter um índice de vazios mínimo próximo ao obtido nos ensaios de determinação do  $e_{min}$ .

Para moldar os corpos de prova no índice de vazios próximo do mínimo foi preciso adotar duas etapas. A primeira consistiu na determinação da umidade da amostra, necessária para o preenchimento do volume da caixa de cisalhamento. A segunda consistiu na determinação do volume da amostra (baseada nas dimensões da caixa de cisalhamento – 101,6mm x 101,6mm x 30mm) em função da densidade real dos grãos e do índice de vazios mínimo. Obteve-se assim, a densidade do solo compactado em relação ao volume medido em peso. A seguir, apresenta-se o procedimento para determinação da massa úmida necessária para o preenchimento do volume da caixa de cisalhamento.

$$\bar{\alpha} = \frac{M}{V} = \bar{\alpha}_d (1 + w) \quad (3.5)$$

$$\bar{\alpha}_d = \frac{\bar{\alpha}_s}{e + 1} \quad (3.6)$$

Sendo:

$\gamma$  – peso específico do solo;

$M$  – massa úmida;  
 $V$  – volume da amostra;  
 $\gamma_d$  – peso específico do solo seco;  
 $w$  – umidade higroscópica;  
 $\gamma_s$  – peso específico dos sólidos;  
 $e$  – índice de vazios.

Das Expressões (3.5) e (3.6), tem-se:

$$M = \frac{(1 + w)}{(1 + e)} \times \bar{\gamma}_s \times V \quad (3.7)$$

A Expressão (3.7) permite determinar a massa de solo  $M$  a ser colocada na caixa de cisalhamento com o volume  $V$ , com índice de vazios  $e$ , para um solo que apresenta peso específico dos sólidos  $\gamma_s$  e umidade  $w$ .

É importante salientar que os corpos de prova foram moldados na umidade higroscópica em que estes apresentaram valores em torno de 0,11%.

### **3.3.3 - Tensões Normais**

As tensões normais utilizadas foram: 50, 100, 200 e 400kPa. Estes valores representam carregamentos típicos de obras de engenharia.

### **3.3.4 - Velocidade de Cisalhamento**

Os ensaios de cisalhamento direto são realizados, em condição drenada, de forma que não haja geração de poropressão durante o desenvolvimento do ensaio. Segundo Head (1984), a velocidade de cisalhamento que a amostra será submetida depende das características de drenagem, ou seja, da permeabilidade do solo e da espessura da amostra. Assim a velocidade dos ensaios foi estabelecida em função dos valores obtidos nas fases de adensamento dos corpos de prova.

A consolidação da amostra é feita em estágios de carregamento com tempo pré-definidos (ensaio de adensamento unidimensional) gerando o gráfico redução da altura

da amostra *versus* raiz do tempo ( $\Delta H \times t^{1/2}$ ), que fornece o valor de  $t_{100}$  (tempo necessário para completar 100% do recalque devido ao acréscimo de carga). Após obtido o valor de  $t_{100}$ , a velocidade  $v$  na fase de cisalhamento pode ser determinada a partir do valor da deformação axial de pico ( $\epsilon_f$ ) em relação ao tempo ( $t_f$ ), pela relação sugerida por Head (1984):

$$v = \frac{\dot{\epsilon}_f \times H_o}{100 \times t_f} \quad (3.8)$$

Sendo:

$v$  – velocidade do ensaio de cisalhamento;

$\epsilon_f$  – deformação específica na resistência de pico;

$t_f$  – tempo para atingir a resistência de pico;

$H_o$  – altura inicial da amostra.

A deformação especificada para atingir a resistência de pico é uma característica do material. No caso dos solos granulares, o valor de  $\epsilon_f$  depende da compactidade. Desta forma, os materiais densos apresentam menores deformações de ruptura e os materiais fofos poderão apresentar deformações de até 10% ou mais, em função do seu comportamento.

O tempo necessário para atingir a ruptura ( $t_f$ ) é em função das condições de drenagem. Como o ensaio de cisalhamento direto é do tipo drenado na base e no topo do corpo de prova, ou seja, possui drenagem dupla. È recomendável à utilização da Expressão 3.9:

$$t_f = 12,7 \times t_{100} \quad (3.9)$$

A partir da equação (3.9) e considerando a característica do material ensaiado, obteve-se uma velocidade de 0,24mm/min. Esta velocidade foi utilizada para todos os ensaios de cisalhamento direto realizados nesta pesquisa.



### 3.4 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO

Os resultados obtidos são apresentados através das curvas tensões cisalhantes *versus* deslocamentos horizontais e deslocamentos horizontais *versus* deslocamentos verticais. Para todos os ensaios procedeu-se a correção das áreas para a determinação das tensões normais e cisalhantes atuantes em cada estágio de deslocamento relativo. Os gráficos relativos aos ensaios para as diferentes tensões normais estão expostos a seguir.

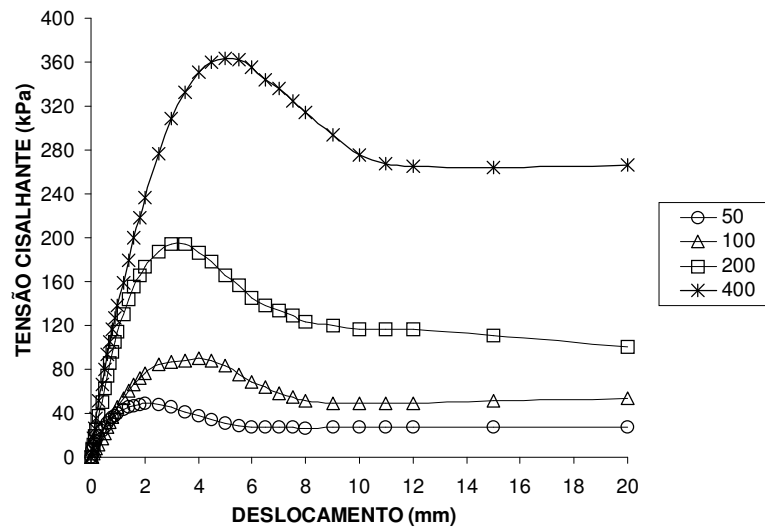


Figura 3.9 – Curva tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal.

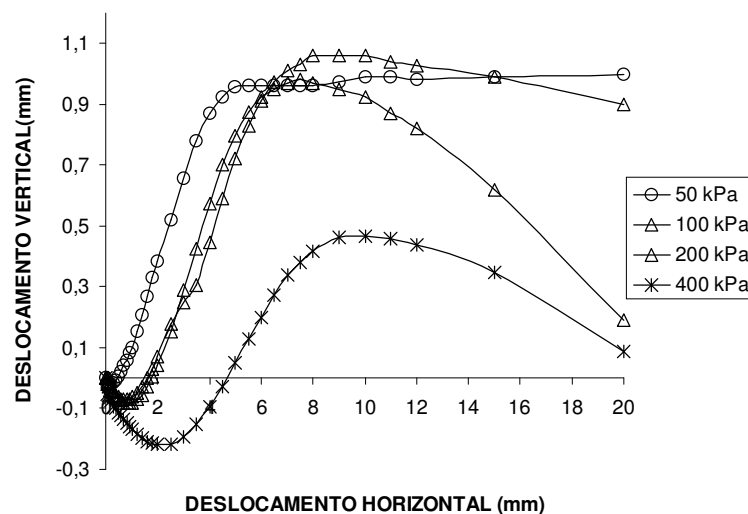


Figura 3.10 – Curva deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal.

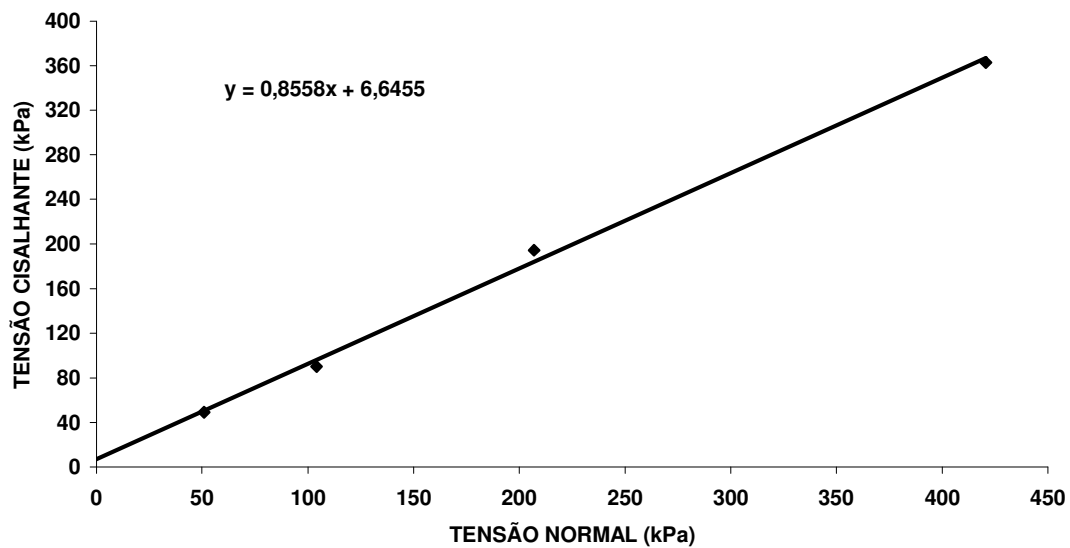


Figura 3.11 – Envoltória linear de resistência para areia 1.

Com base no critério linear de Mohr-Coulomb, os parâmetros de resistência da areia (areia1), obtidos através dos ensaios de cisalhamento, são:

- coesão de intercepto efetiva:  $c' = 6,64 \text{ kPa}$
- ângulo de atrito efetivo:  $\phi' = 40,36^\circ$

Este elevado ângulo de atrito é típico para areias densas. Vale ressaltar que os ensaios de cisalhamento foram feitos apenas para areia 1.

Para o envasamento das garrafas com areia, procurar-se-á, aplicar processos de densificação que otimizem ao máximo a resistência ao material, proporcionando maior resistência total ao sistema.

### 3.5 - METODOLOGIA DE ENVASAMENTO DAS GARRAFAS

Para iniciar o envasamento das garrafas bem como determinar o índice de vazios mínimo e a massa específica seca do material (garrafa + solo) foi necessário determinar a massa de solo envasada após a compactação e o volume da garrafa. Este volume foi

definido através do enchimento da garrafa com água e logo em seguida o conjunto garrafa, água e tampa foi pesado, sendo posteriormente medida a temperatura da água. A seguir, apresenta-se o procedimento para determinação do volume da garrafa.

$$M_t = M_w + M_g \quad (3.10)$$

$$\gamma_w = \frac{M_w}{V_w} \quad (3.11)$$

Sendo:

$M_t$  – massa total;

$M_w$  – massa de água;

$M_g$  – massa da garrafa mais tampa;

$\gamma_w$  – peso específico da água;

$V_w$  – volume de água.

Das Expressões (3.10) e (3.11) tem-se

$$V_w = \frac{M_t - M_g}{\gamma_w} = V_{\text{garrafa}} \quad (3.12)$$

Depois de definida a massa, temperatura e a densidade da água, o volume da garrafa PET ( $V_{\text{garrafa}}$ ) foi determinado. A compactação da areia no interior da garrafa foi realizada através de processos combinados de vibração vertical e compactação com soquete. A areia utilizada foi previamente seca em estufa e o envasamento da garrafa foi feito com ajuda de um funil. A compactação foi realizada em cinco camadas. Nesta técnica, o solo foi compactado aplicando-se sessenta golpes por camada nas paredes laterais da PET e vibrando verticalmente (deixando cair de uma altura de 50mm, aproximadamente) durante um minuto. Após este procedimento, a compactação era realizada com auxílio de um pequeno soquete, aplicando golpes nas laterais da garrafa. Este procedimento foi repetido para as camadas seguintes. Durante o processo de

compactação do solo com soquete, a aplicação de golpes no entorno da garrafa foi adotada, visando evitar uma orientação preferencial das partículas. Os processos de enchimento das garrafas estão ilustrados na Figura 3.12.

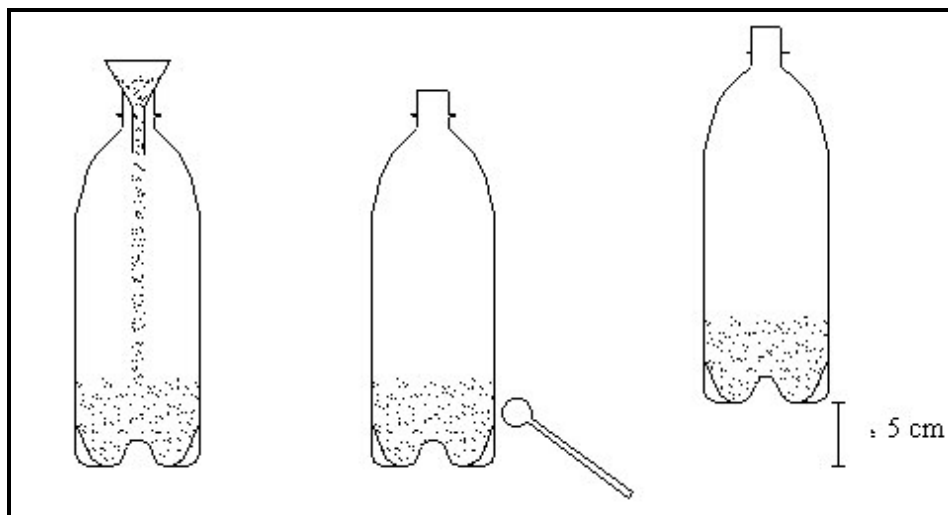


Figura 3.12 - Processo de enchimento.

Os resultado destes envasamentos podem ser vistos na Tabela 3.3. Mais detalhes podem ser obtidos a partir dos resultados apresentados no Apêndice B.

Tabela 3.3 - Índice de vazios das garrafas pelo método desenvolvido.

Número da garrafa		1	2	33	52
Garrafa. + tampa + solo seco	(kg)	3,436	3,592	3,777	4,076
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05039	0,05015	0,05233	0,05228
Massa de água + tampa	(kg)	2,130	2,110	2,172	2,152
Temperatura	(°C)	23,00	23,00	18,50	23,50
Densidade da água	(kg/m³)	997,6	997,6	998,5	997,4
Volume da garrafa	(m³)	0,0020746	0,0020549	0,0021165	0,0020943
Massa específica seca	(kg/m³)	1630	1720	1760	1920
Índice de vazios mínimo		0,75	0,46	0,63	0,52

As areias utilizadas no envasamento das garrafas 1, 2, 33 e 52 foram as areias 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Foram definidos outros processos de enchimento com o

objetivo de avaliar a diferença entre o método desenvolvido e o possível enchimento aleatório que pode ser realizado em campo. Para o processo de vibração vertical (vv) a compactação do solo no interior da garrafa foi feita em cinco camadas. Para cada camada realizada a garrafa era deixada cair a uma altura de mais ou menos 50mm. No processo de vibração lateral para cada camada (total de cinco) eram aplicados 30 golpes nas paredes laterais da garrafa. A Tabela 3.4 ilustra a diferença entre os processos desenvolvidos.

Tabela 3.4 - Índice de vazios por diferentes métodos.

Número da garrafa		8vv	8s	8vvs	Diferença	
Garrafa + tampa + solo seco	(kg)	3,383	3,364	3,485	3,01%	3,50%
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05066	0,05066	0,05410		
Massa de água + tampa	(kg)	2,110	2,110	2,154		
Temperatura	(° c)	19,00	19,00	17,50		
Densidade da água	(kg/m³)	998,4	998,4	998,7		
Volume da garrafa	(cm³)	0,002056	0,002056	0,002056		
Massa específica seca	(k/m³)	1650	1610	1670	1,20%	6,0%
Índice de vazios mínimo		0,73	0,77	0,71	(2,74%)	(7,0%)

Nota: 8vv – garrafa 8 vibração vertical; 8s – garrafa 8 golpes na parede lateral com soquete; 8vvs – garrafa 8 vibração vertical mais golpes na parede lateral com soquete (método).

A garrafa utilizada para o processo de enchimento aleatório e para o método foi à mesma. Observa-se que para um mesmo volume, tem-se uma massa de solo seco obtida pelo processo 8vvs em torno de 3,01% maior em relação ao método 8vv; e de 3,5% maior quando comparado com o processo 8s. Esta diferença conduz a uma massa específica seca maior e um índice de vazios menor em comparação com os métodos aleatórios.

O procedimento de compactação por vibração vertical (vv) consiste em deixar a garrafa cair durante um minuto para cada camada, num total de cinco camadas. A outra forma de compactação, denominada (s) consiste na aplicação de sessenta golpes em torno da garrafa, também por camada, num total de cinco camadas.

### **3.6 - COMENTÁRIOS FINAIS**

O presente capítulo descreveu ensaios e algumas metodologias adotadas para determinação de parâmetros de resistência de garrafas tipo PET e o solo de preenchimento.

Vale ressaltar que todas as garrafas utilizadas nos ensaios não continham nenhum tipo de rasgo ou risco que comprometesse sua aplicabilidade. Esta garrafa intacta tem uma grande resistência à pressurização, em torno de 1000kPa, valor que garante a sua aplicabilidade em obras específicas de engenharia.

Naturalmente, para garantir uma baixa compressibilidade, tornou-se necessário fazer o envasamento com material resistente. O material de preenchimento escolhido foi uma areia uniforme.

Um estudo, aparentemente expedito, mas de relevância, mostrou a influência dos diversos processos de envasamento no grau de compactação final da areia no interior das garrafas. Os processos aqui apresentados mostraram-se eficientes, uma vez que os índices de vazios (no preenchimento da garrafa com areia) alcançados ficaram próximos àqueles determinado para o material MB 3388 (ABNT/ 1991).

O envasamento aleatório mostrou baixas diferenças na compactação, em torno de 3,5%. Este é um fato importante, uma vez que a operacionalização de campo tende a ser naturalmente aleatória.

### **ENSAIOS DE LABORATÓRIO PARA ESTUDO DA APLICAÇÃO DAS GARRAFAS PET EM OBRAS DE CONTENÇÃO**

#### **4.1 - INTRODUÇÃO**

Muitas vezes, na implantação de uma estrutura, não há espaço suficiente para fazer uma transição gradual das elevações do terreno onde será implantada uma determinada obra. Nestes casos os taludes são relativamente altos ou muito inclinados. Sendo assim, estudos minuciosos da estabilidade a curtos e longos prazos devem assegurar a segurança destas obras. Quando o solo não tem resistência suficiente para combater as elevadas mobilizações, estruturas de contenção são projetadas para promover o suporte adequado.

Dentre as diversas estruturas de contenção pode-se citar os muros de arrimo por gravidade, às cortinas ancoradas e o solo grampeado. Têm-se também as técnicas que utilizam material alternativo para contenção de encostas, como: saco de solo estabilizado com cimento, pneus descartados, dentre outras. A utilização destes materiais apresenta como vantagens o seu baixo custo e o fato de não requerer mão-de-obra ou equipamento especializados. Agrega-se ainda o fato de se ter um bom apelo ecológico.

Estes muros utilizam seu peso próprio para restabelecer o equilíbrio do maciço suportando as solicitações do empuxo de terra que depende da interação solo/estrutura. O atrito de sua base contra o solo deve ser suficiente para assegurar a estabilidade da obra e a geometria adotada destina-se a evitar o tombamento. Estas estruturas são indicadas em situações de solicitações reduzidas, pois, para atender esforços elevados,

passam a demandar maior espaço para implantação da base, podendo se tornar economicamente inviáveis.

Com o intuito de verificar a viabilidade técnica do uso da garrafa PET, envasada com areia pura desestruturada, como elemento constitutivo do Muro PET, foram realizados uma série de ensaios e simulações numéricas, objetivando avaliar o desempenho deste material alternativo (garrafa + solo) em obras de contenção de pequeno porte, como ilustrado preliminarmente na Figura 4.1. Estes estudos serão apresentados a seguir.

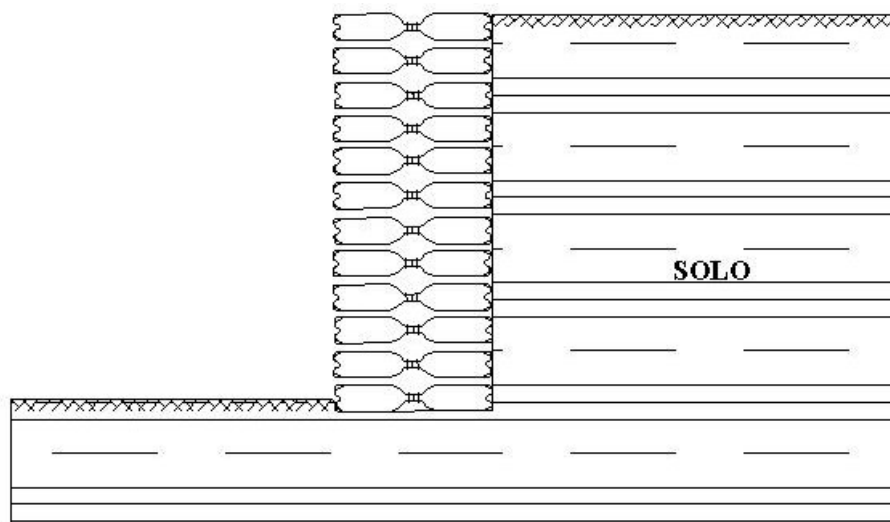


Figura 4.1 – Esquema do muro com garrafas PET.

## 4.2 - ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Os parâmetros de resistência são comumente obtidos em ensaios de laboratório. Cada ensaio pode simular, com maior ou menor precisão, as condições de fronteiras de uma estrutura real. A estrutura analisada é composta única e exclusivamente de garrafas PET tendo a sua rigidez uma forte influência na estabilidade. Em termos de mecanismo, os contatos entre as garrafas e a sua disposição ao longo do muro são condicionantes importantes na resistência ao cisalhamento do conjunto. Assim, a determinação da resistência na interface e a geometria do sistema nortearão a disposição destas garrafas ao longo do muro.



Os parâmetros de resistência foram obtidos através de ensaios de cisalhamento direto e ensaios de rampa. Apesar de ambos ensaios fornecerem os parâmetros de resistência baseado no critério de Mohr-Coulomb, os ensaios de rampa foram realizados em níveis baixos de tensão. Infelizmente este procedimento, mostrou-se inadequado para um estudo comparativo, mas propiciou a avaliação do comportamento resistivo para uma faixa maior de tensão.

O teste de cisalhamento direto tem sido muito utilizado para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento em interfaces. Estes são freqüentemente conduzidos sob altas tensões normais e acredita-se que para baixas tensões normais os resultados não apresentam precisão, devido a dificuldades mecânicas (Izgin & Wasti, 1998). Recentemente, a obtenção dos parâmetros de cisalhamento em interfaces tem sido realizada através dos ensaios de rampa (Giroud et al., 1990, Girard et al., 1990, Koutsourais et al., 1991, Lima Jr, 2003).

#### **4.3 - RESISTÊNCIA DAS INTERFACES SOLO – PET UTILIZANDO O EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO**

A interface solo/PET é uma estrutura composta e apresenta características mecânicas diferentes. Confinado, o solo apresenta elevada resistência à compressão e o PET elevada resistência à tração. A avaliação da associação solo/PET não depende apenas do tipo e das características do material sintético, mas também das características do solo e do nível de tensão envolvido. Portanto a quantificação dessa interação resume-se na determinação do coeficiente de atrito e da interação solo/PET.

O coeficiente de atrito entre as interfaces pode ser determinado através de ensaios de cisalhamento direto de pequeno e grande porte. Jewell e Wroth (1987) após realizarem ensaios em interfaces de solos arenosos e geotêxteis tecidos e não tecidos, concluíram que as dimensões mínimas das caixas de cisalhamento devem ser iguais ou maiores que 50 vezes o diâmetro médio ( $D_{50}$ ) dos grãos. Já a D 3080 (ASTM/ 1991) preconiza uma dimensão mínima de 12 vezes o tamanho da maior partícula do solo.

Devido às características granulométricas do solo (diâmetros médios dos grãos de 0,60mm para areia 1), foi possível utilizar o aparelho de cisalhamento direto convencional com dimensões 101,6mm x 101,6mm.

#### **4.3.1- Preparação das Amostras PET**

Antes de iniciar o ensaio de cisalhamento foi necessário eliminar a conformação plástica da amostra de PET. Esta conformação se deve ao processo de fabricação da garrafa PET.

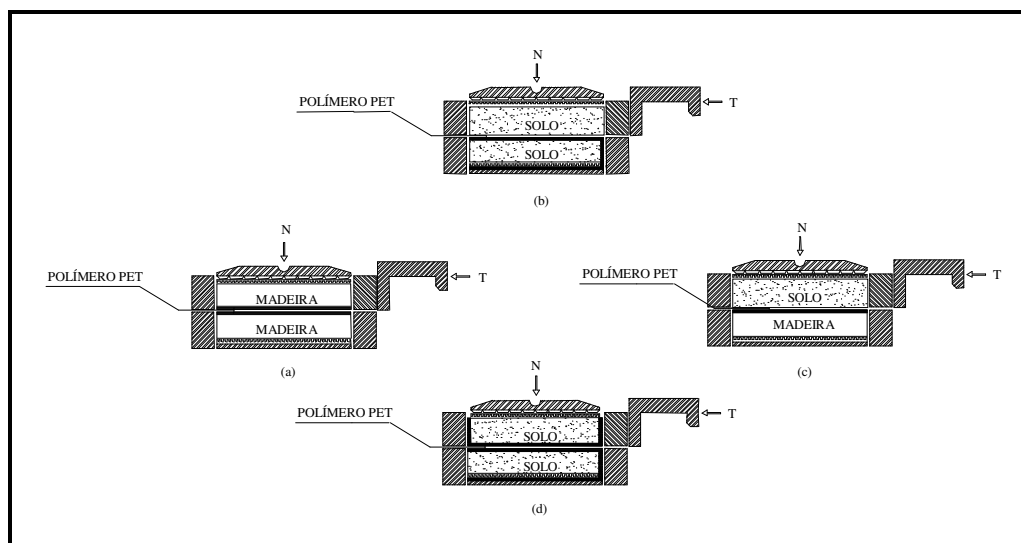
Sendo assim, as amostras de PET foram cortadas no tamanho um pouco maior do que as utilizadas nos ensaios. Em seguida, estas amostras foram dobradas durante alguns minutos no sentido contrário à conformação. Este procedimento objetivou eliminar a curvatura da amostra para que fosse possível ensaiá-las nas configurações propostas e colá-las sobre as peças de madeira.

Os plásticos PET utilizados nos ensaios madeira-plástico-plástico-madeira (PP) e solo-plástico (SP) foram cortados nas dimensões 101,6mm por 101,6mm e fixados nos blocos de madeira com o auxílio de cola branca tradicional. Detalhes deste procedimento estão apresentados nas Figuras 4.2a e 4.2c. As dimensões de cortes da amostra PET foram baseadas nas dimensões internas da caixa de cisalhamento.

Quanto à configuração ilustrada nas Figuras 4.2b e 4.2d, ensaios solo-plástico-solo (SPS) e solo-plástico-plástico-solo (SPPS). Estes plásticos foram cortados com dimensões 101,6mm por 224, mm e ancorado na placa ranhurada que fica na parte inferior da caixa de cisalhamento. A opção de ancoragem na base e o comprimento do plástico se deram depois de muitos testes.

Na interface solo-plástico-plástico-solo (SPPS), Figura 4.2d, além do procedimento descrito acima, foi colocado um outro plástico com dimensões 101,6mm por 151,6cm em forma de U e logo em seguida preenchido com areia. Todas as amostras foram retiradas no sentido longitudinal à altura da garrafa.

Os arranjos propostos em interfaces PP e SPPS tiveram como propósito à utilização de seus dados na avaliação do muro de arrimo PET como será visto no Capítulo 5. Já os sistemas considerando interfaces SPS e SP foram também avaliados visando à aplicação destes parâmetros para modelação da estaca PET como será apresentado no Capítulo 6.



(a) - interface plástico-plástico (PP); (b) - interface solo-plástico-solo (SPS);  
(c) - solo-plástico (SP); (d) - solo-plástico-plástico-solo (SPPS).

Figura 4.2 - Interfaces entre materiais.

A areia utilizada nos arranjos descritos acima foi moldada nas mesmas condições dos ensaios de cisalhamento direto descritas no Capítulo 3, assim como a definição de sua velocidade e as tensões aplicadas.

#### 4.3.2 - Resultados dos Ensaios de Cisalhamento Direto em Interfaces

A seguir são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para vários arranjos de interface. Para todos os ensaios, procedeu-se a correção das áreas para a determinação das tensões normais e cisalhantes atuantes em cada estágio dos deslocamentos relativos. Além disto, todos os ensaios foi repetido três vezes para cada tensão normal com o objetivo de avaliar a dispersão dos resultados e ao mesmo tempo propiciar maior credibilidade aos resultados apurados.

Os ensaios desenvolvidos procuraram simular as condições de campo e ao mesmo tempo avaliar os processos mecânicos envolvidos. Para simular as condições de campo, foram realizados ensaios considerando as interfaces solo-plástico-solo (SPS) e solo-plástico-plástico-solo (SPPS), que representam o contato da garrafa com o solo e entre elas.

Os ensaios do tipo plástico-plástico (PP - madeira-plástico-plástico-madeira) e solo-plástico (SP - solo-plástico-madeira) foram propostos com o objetivo de avaliar a influência do solo na resistência ao cisalhamento entre interfaces de plástico.

Os resultados dos ensaios solo-plástico-plástico-solo (SPPS), para o nível de tensão normal 50kPa estão apresentados na Figura 4.3.

O comportamento mostra que para deslocamentos horizontais da ordem de 0,5mm ocorre uma pré-ruptura. Até a pré-ruptura o comportamento é bastante similar entre os ensaios. Após a pré-ruptura tem-se um crescimento da resistência em todos os ensaios, porém, de forma distinta para cada ensaio.

Avaliando o comportamento do gráfico deslocamento horizontal *versus* vertical, tem-se que a pré-ruptura ocorre ainda na fase de compressão e o pico de resistência durante a dilatação. Verifica-se que a magnitude do pico de resistência foi sensibilizada pela respectiva compressão que antecedeu a dilatação, sendo relativamente maior para compressões maiores. Observa-se ainda que o processo de dilatação iniciou-se em torno de 2mm para todos os ensaios, mostrando-se insensível à magnitude da compressão inicial (deslocamento vertical).

Para avaliar a influência da areia neste sistema, foram realizados ensaios considerando apenas a interface plástico-plástico (PP - madeira-plástico-plástico-madeira), como descrito anteriormente. Os resultados para o nível de tensão de 50kPa estão apresentados na Figura 4.4.

Estes resultados mostram que o comportamento apresentado é de um material rígido, puramente plástico. Face às características de homogeneidade tecnológica do plástico, o comportamento apresentado pelo ensaio 50 PP - E2 (distintas compressão e dilatação), sugere que pode ter havido algum problema na execução. Interessante observar que tanto o comportamento inicial (rigidez) quanto à resistência de colapso assemelham-se àsquelas observadas para o comportamento anterior à pré-ruptura, conforme a configuração solo-plástico-plástico-solo (SPPS) como apresentado na Figura 4.3.

Este comportamento sugere que a pré-ruptura do modelo solo-plástico-plástico-solo (SPPS) é na verdade o limite de resistência da interface plástico-plástico (PP). A partir deste momento, a resistência passa a ter uma forte contribuição do processo

compressivo proporcionado pela areia, este, inibido pela madeira nos ensaios plástico-plástico (PP).

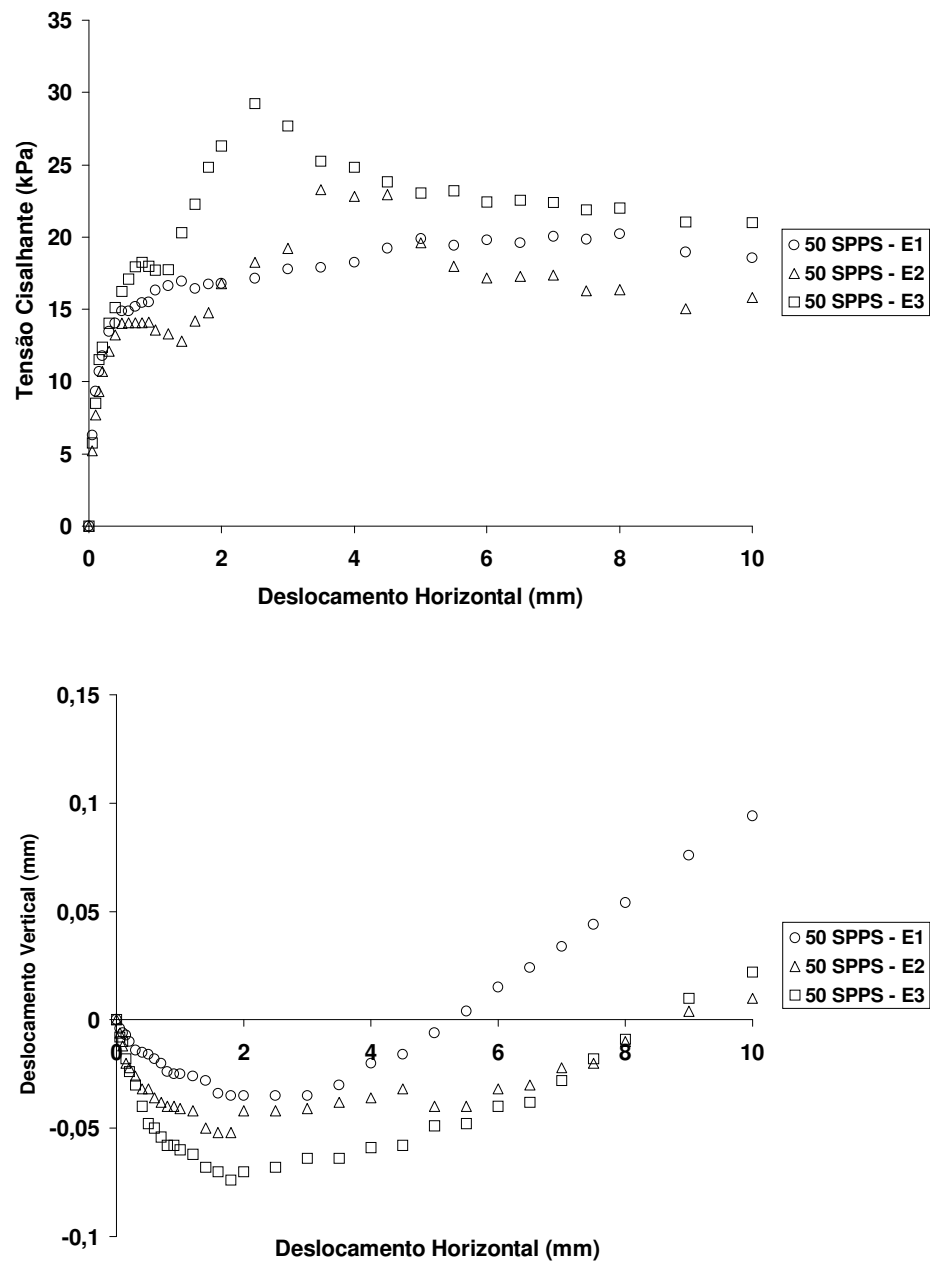


Figura 4.3 – Ensaio solo-plástico-plástico-solo (SPPS) – Tensão Normal de 50kPa.

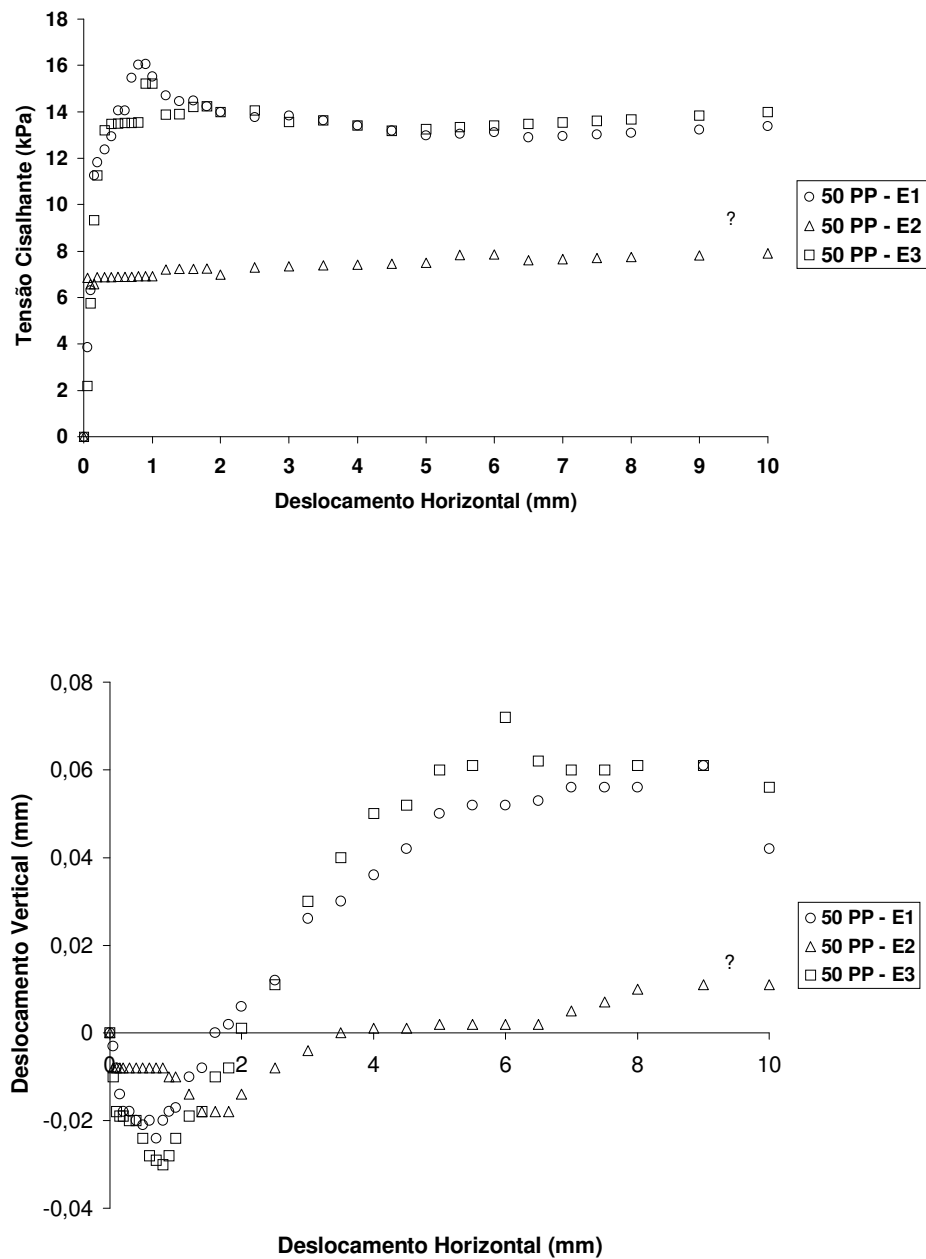


Figura 4.4 – Ensaio plástico-plástico (PP) – Tensão Normal de 50kPa.

No sentido de visualizar melhor este comportamento, apresenta-se na Figura 4.5, o resultado conjunto dos ensaios solo-plástico-plástico-solo (SPPS) e plástico-plástico (PP).

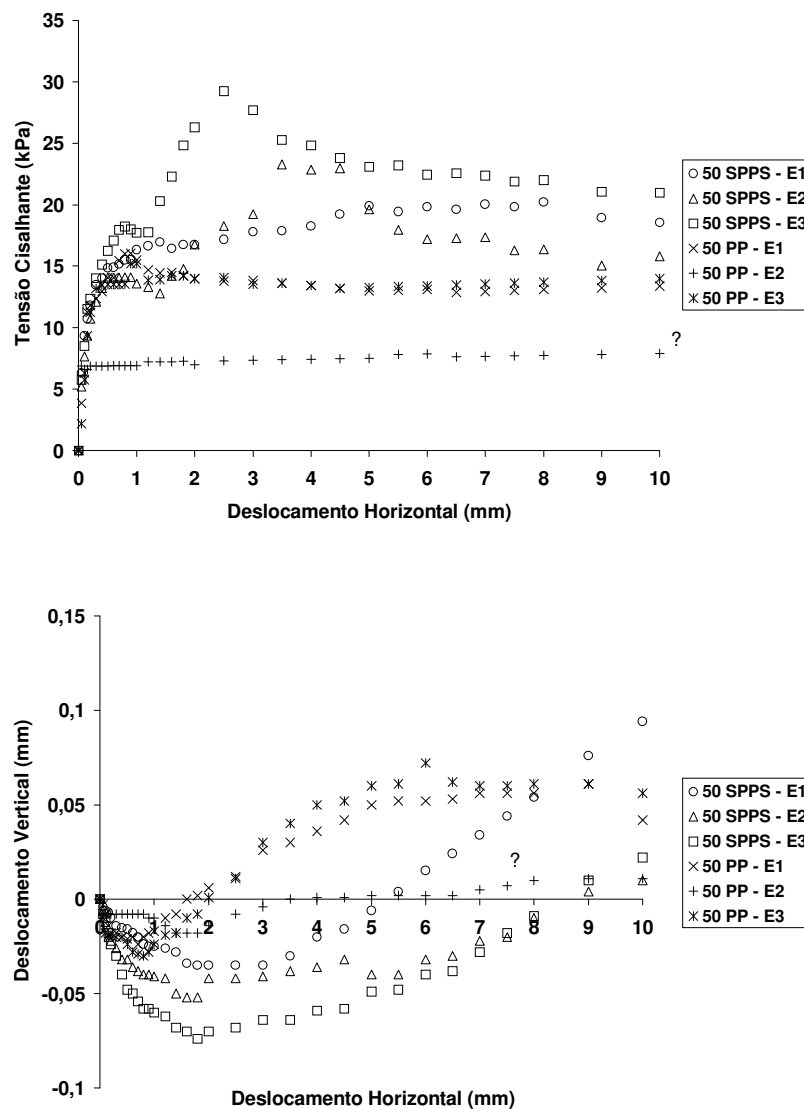


Figura 4.5 – Influência da areia – Tensão Normal de 50kPa.

Ao considerar todos os dados num mesmo gráfico pôde-se verificar que o limite de resistência do ensaio plástico-plástico (PP) e a pré-ruptura no ensaio solo-plástico-plástico-solo (SPPS), ocorrem para deslocamentos horizontais próximos do início da dilatância no ensaio plástico-plástico (PP), ou seja, em cerca de 0,8mm.

É também importante observar que esta avaliação comparativa mostra que a areia proporciona um aumento de 50 a 100% na resistência ao cisalhamento do sistema solo-plástico-plástico-solo (SPPS).

Apesar de ser observada uma aproximação da resistência residual do sistema solo-plástico-plástico-solo (SPPS) em relação ao sistema plástico-plástico (PP), o

comportamento sugere uma dispersão forte com variação em cerca de 15 a 60% em sua magnitude em relação ao sistema plástico-plástico (PP).

Um estudo particular foi desenvolvido com base na média dos resultados dos três ensaios. Este estudo tem como proposta, uma melhor avaliação em termos de tendências, sendo mais representativo para apresentação de um modelo de comportamento. Na Figura 4.6 têm-se os resultados médios para o nível de tensão 50kPa.

Com base na média dos resultados, ficou mais nítido observar que a pré-ruptura do arranjo solo-plástico-plástico-solo (SPPS) dá-se ligeiramente acima da ruptura do arranjo plástico-plástico (PP), ou seja, este acréscimo pode estar associado ao nível de tensão normal, que tende a aumentar a rugosidade da superfície de cisalhamento.

Em ambas interfaces, verifica-se que o pico de resistência dá-se na fase de dilatação, sendo a pré-ruptura do arranjo solo-plástico-plástico-solo (SPPS) ainda na fase de compressão.

Na Figura 4.7 tem-se ilustrado os resultados dos ensaios destas interfaces, para o nível de tensão de 100kPa. Para a interface solo-plástico-plástico-solo (SPPS) pode-se perceber um comportamento não esperado com relação à pré-ruptura do primeiro ensaio e a ausência de aumento de resistência após a pré-ruptura para segundo ensaio.

Diferentemente ao caso anterior (50kPa), o gráfico de deslocamento horizontal *versus* vertical mostra um longo trecho de deslocamento vertical nulo após a compressão e antes da dilatância (cerca de 1,5mm), principalmente na interface plástico-plástico (PP). Numa primeira análise, este efeito pode ser atribuído ao aumento da tensão de confinamento, como condicionante inibidor da dilatância.

Como apresentado para o nível de tensão 50 kPa, apresenta-se na Figura 4.8 o resultado com base na média dos valores apresentados na Figura 4.7 (100kPa).

Destaca-se neste caso a forte influência do nível de tensão na posição da pré-ruptura da interface solo-plástico-plástico-solo (SPPS). Com o aumento do nível de tensão, a pré-ruptura sofre um distanciamento da resistência de pico plástico-plástico (PP). Este efeito pode ser atribuído a uma maior rugosidade da superfície de cisalhamento, proporcionada pelo acréscimo de tensão normal.



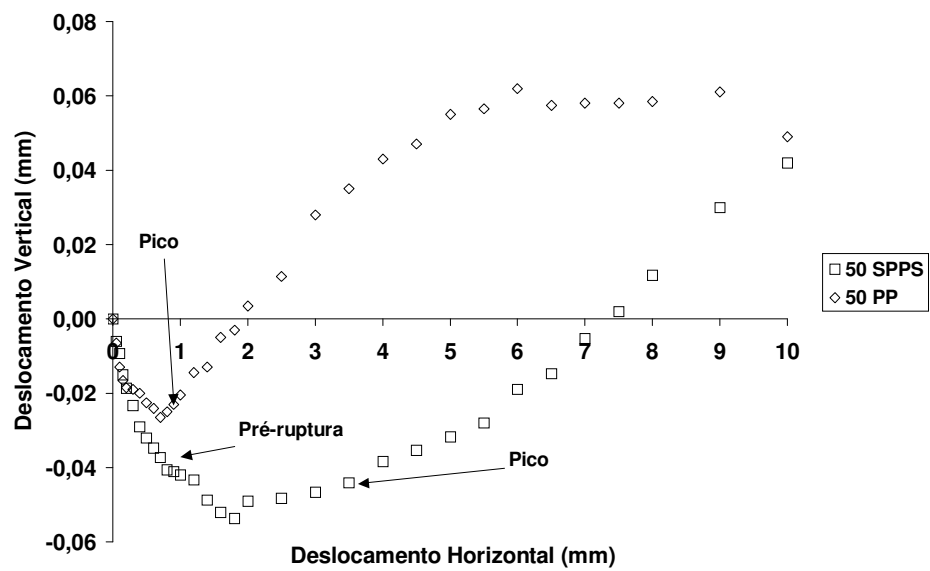
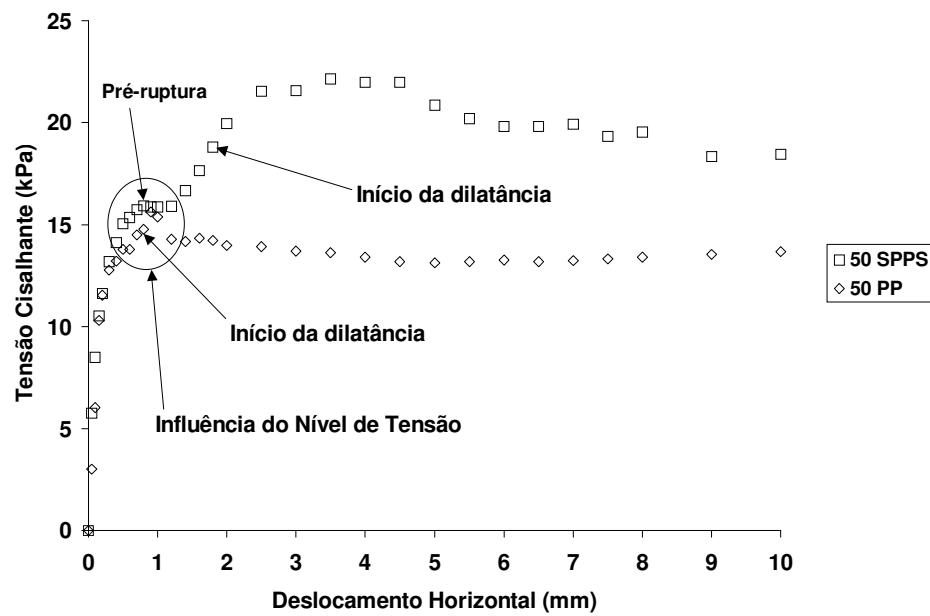


Figura 4.6 – Influência da areia – Resultados médios – Tensão Normal de 50kPa.

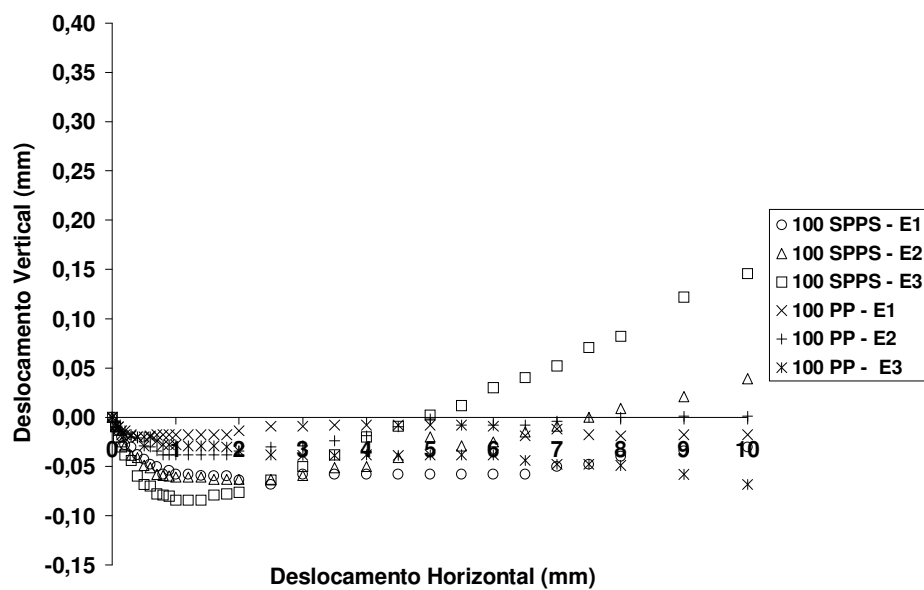
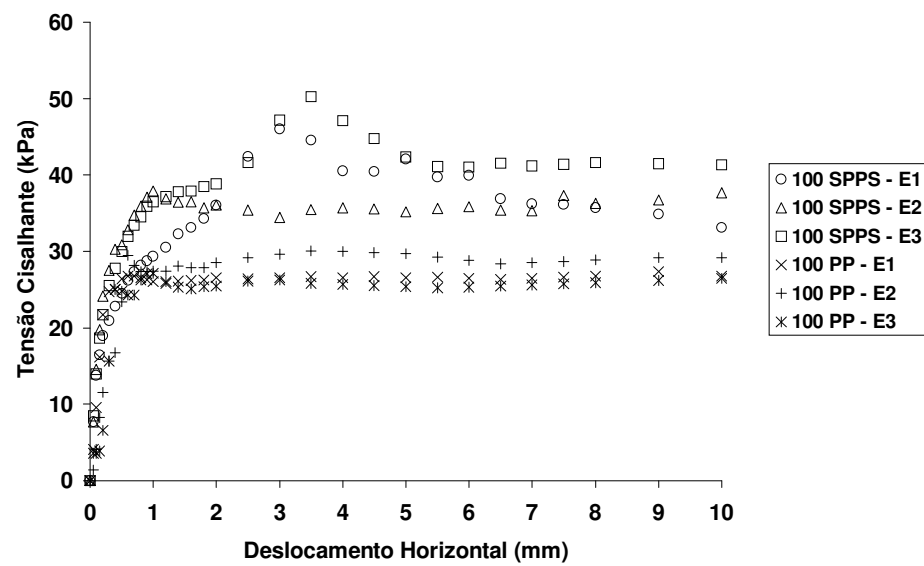


Figura 4.7 - Influência da areia – Tensão Normal de 100kPa.

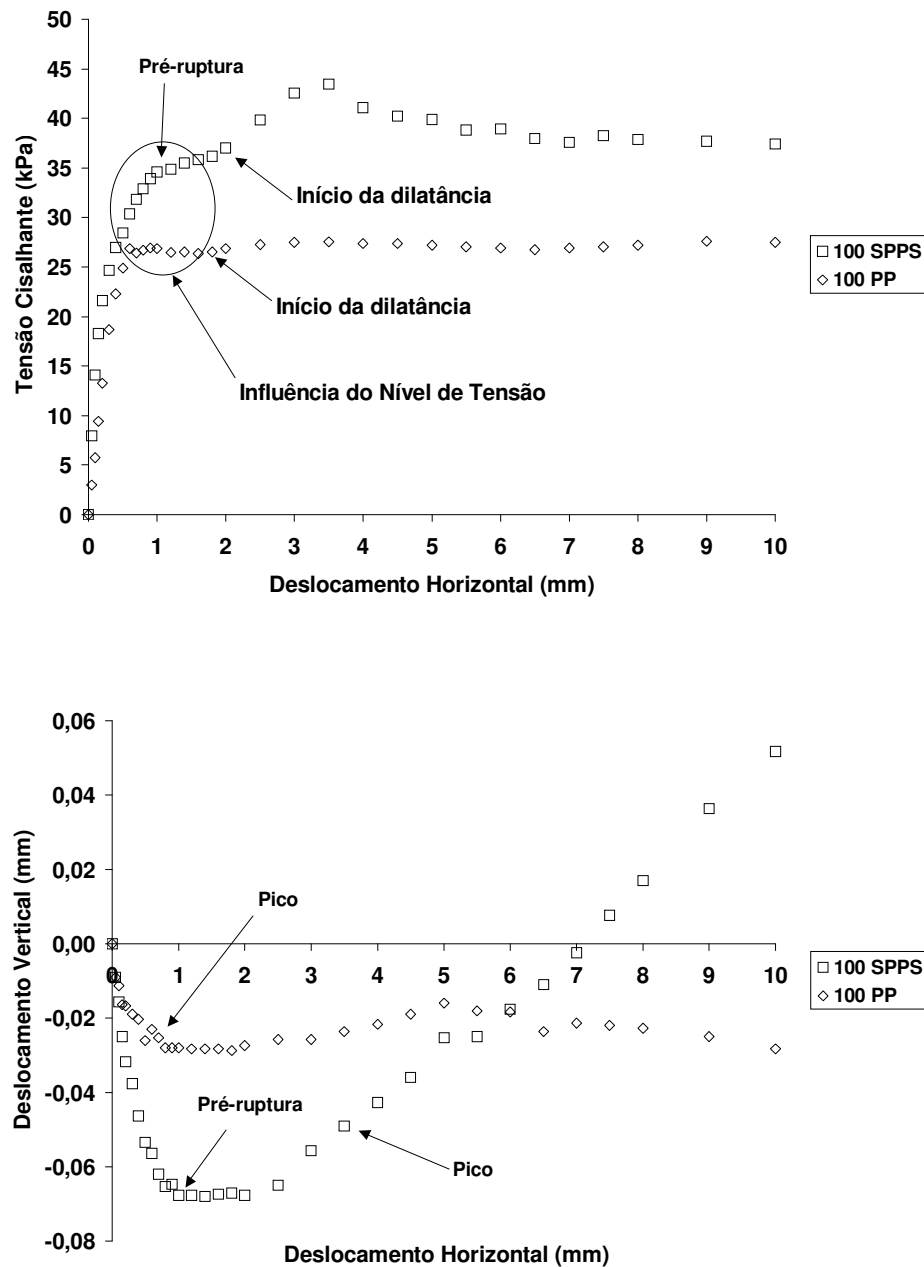


Figura 4.8 – Influência da areia – Resultados médios – Tensão Normal de 100kPa.

Interessante observar no gráfico deslocamento horizontal *versus* vertical, que em termos médios, o patamar de deslocamento vertical nulo, dá-se para mesma faixa de valores de deslocamento horizontal, entre 1 e 2mm, sendo independente da interface em questão. Este comportamento está refletido no gráfico de resistência, quando para a interface solo-plástico-plástico-solo (SPPS) tem-se o final da compressão coincidindo

com a pré-ruptura e o início da dilatação coincidindo com o deslocamento necessário para o endurecimento.

Outro comportamento observado no gráfico deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical está relacionado à posição dos picos de resistência. Para o nível de tensão 50kPa, em ambas interfaces o pico se deu na dilatação. Para o nível de tensão 100kPa, o pico ocorreu na fase de compressão para interface plástico-plástico (PP) e durante a dilatação para interface solo-plástico-plástico-solo (SPPS).

Dando continuidade a este estudo particular de interfaces, apresenta-se na Figura 4.9 os resultados dos ensaios de cisalhamento para o nível de tensão 200kPa. Para interface plástico-plástico (PP) nota-se um comportamento disperso, que pode ser considerado como forte indicativo de perturbações na própria estrutura do plástico.

Para a interface solo-plástico-plástico-solo (SPPS) o comportamento foi semelhante em todos os ensaios. No entanto, o ganho de resistência após a pré-ruptura foi bastante baixo para o primeiro e o terceiro ensaio.

De forma semelhante ao nível de tensão 100kPa, a pré-ruptura ocorreu para deslocamentos horizontais em torno de 1mm e o endurecimento para deslocamentos horizontais em torno de 2mm. Diferentemente ao fato observado para o nível de tensão 100kPa, os deslocamentos verticais não se mostraram nulos neste trecho (1 a 2mm).

O comportamento com base nos valores médios está ilustrado na Figura 4.10. Após analisar estes três níveis de tensão, nota-se uma forte sensibilidade do sistema com relação à tensão normal. A tensão de pré-ruptura do arranjo solo-plástico-plástico-solo (SPPS) tende a majorar, relativamente à tensão de ruptura do arranjo plástico-plástico (PP). Observa-se também uma minimização da fragilidade do sistema na fase de endurecimento.

Similarmente ao nível 100kPa, o pico de resistência ocorre na fase de compressão, para interface plástico-plástico (PP) e na fase de dilatação, para interface solo-plástico-plástico-solo (SPPS).

Para o nível de tensão 400kPa não foi possível realizar ensaios para interface plástico-plástico (PP). Como já observado e comentado, para o nível de tensão 200kPa (Figura 4.9), esta interface apresentou problemas, proporcionando magnitudes dispersas para resistência de pico. Este comportamento sugere haver interferências na estrutura do plástico ou da madeira, a partir deste nível de tensão.

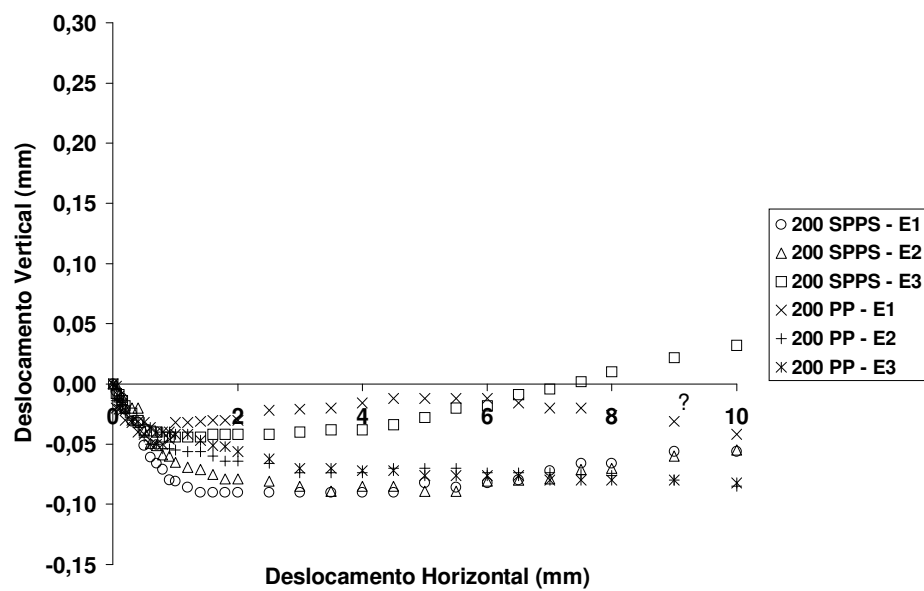
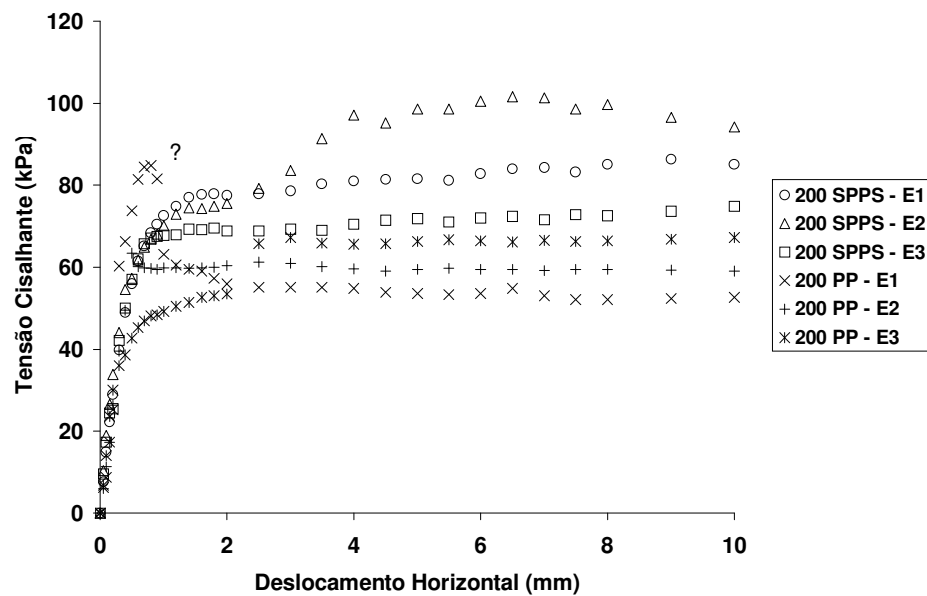


Figura 4.9 - Influência da areia – Tensão Normal de 200kPa.

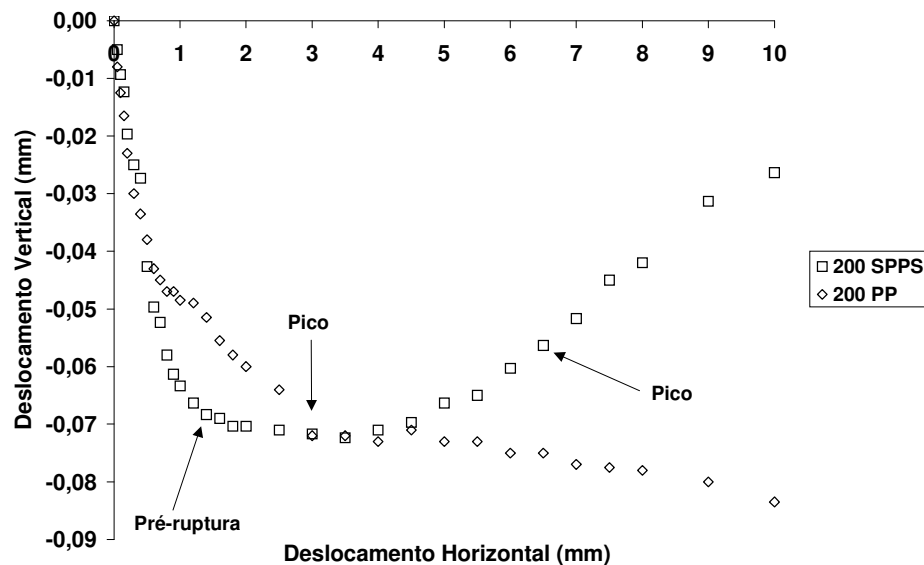
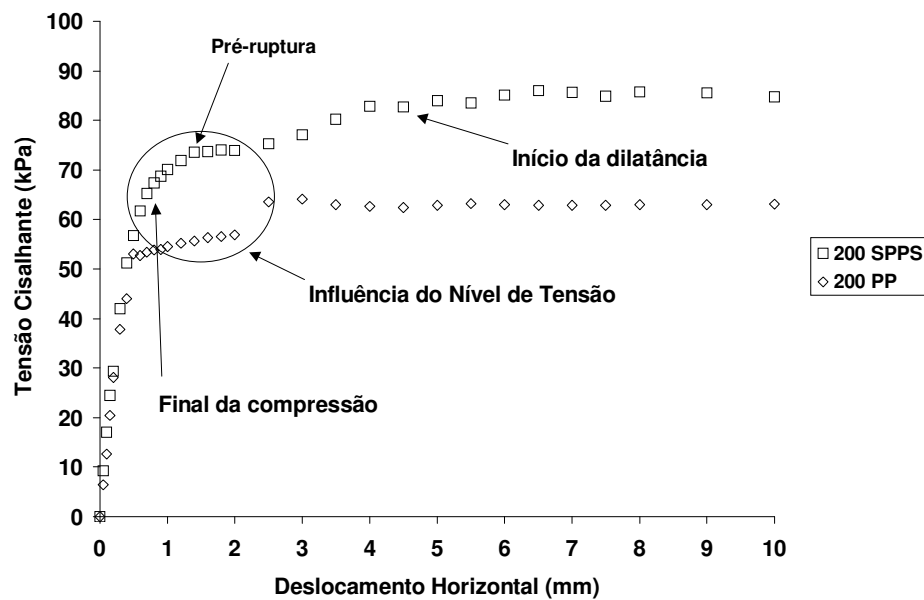


Figura 4.10 – Influência da areia – Resultados médios – Tensão Normal de 200kPa.

Assim, ilustram-se na Figura 4.11, apenas os resultados dos ensaios de cisalhamento direto, obtido para interface solo-plástico-plástico-solo (SPPS), para o nível de tensão 400 kPa.

É importante observar que neste nível de tensão os resultados mostraram-se bastante semelhantes, estando a pré-ruptura ocorrendo em torno de 1,6mm de

deslocamento horizontal. Em face de elevada tensão normal, percebe-se um endurecimento modesto, provocado pela inibição da dilatação, como pode ser verificado nas curvas deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical.

Para uma melhor visualização, tem-se na Figura 4.12, o comportamento com base nos valores médios, obtidos para o nível de tensão 400kPa, interface solo-plástico-plástico-solo (SPPS).

O comportamento, com o aumento do nível de tensão parece consistente, indicando uma minimização do endurecimento e da fragilidade.

De forma semelhante aos casos anteriores tem-se a ocorrência da pré-ruptura no final da compressão, estando o pico na fase de dilatação, mesmo sendo mais modesta. Como apresentado na Figura 4.13, com base nos resultados médios, foi possível avaliar os parâmetros de resistência das interfaces, segundo o critério de resistência de Mohr-Coulomb.

Para interface solo-plástico-plástico-solo (SPPS), os pontos apresentaram um ajuste linear razoável. Pela linha de tendência, o ângulo de atrito calculado foi de 20,51 graus e o intercepto de coesão 4,25kPa. Considerando as tensões na pré-ruptura do ensaio solo-plástico-plástico-solo (SPPS), a envoltória de resistência mostrou-se também linear, sendo praticamente paralela à envoltória de pico. Neste caso, a linha de tendência indicou um ângulo de atrito de 20,46 graus sendo o intercepto de coesão negativo e igual 2,68kPa. Para interface plástico-plástico (PP) os pontos apresentaram um comportamento côncavo para cima, sugerindo um crescimento exponencial da resistência com o aumento do nível da tensão normal.

Sobre a envoltória de resistência da interface Solo-Plástico-Plástico-Solo (SPPS) foi aplicado um fator de segurança (FS) típico de obras de contenções (FS=1,5). Os resultados mostram que para baixos níveis de tensão, as mobilizações de campo tendem a localizar-se abaixo da linha de pré-ruptura e da mobilização plástico-plástico (PP). Desta forma, sendo as tensões de campo inferiores a 50kPa, pode ser sugerido que as mobilizações estejam abaixo da pré-ruptura, sendo o diferencial proporcionado pelo envasamento por areia, não perceptivo para o âmbito da resistência na interface.

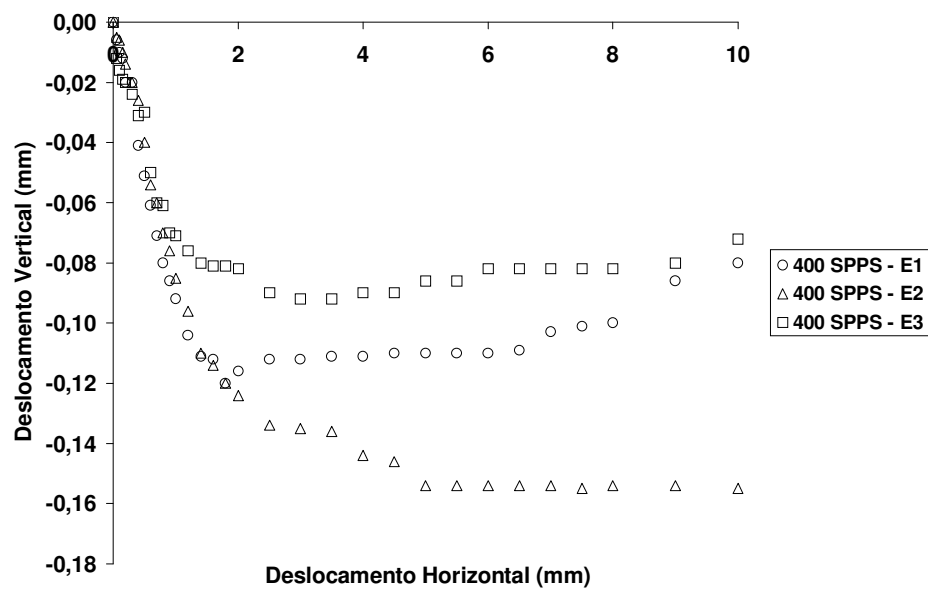
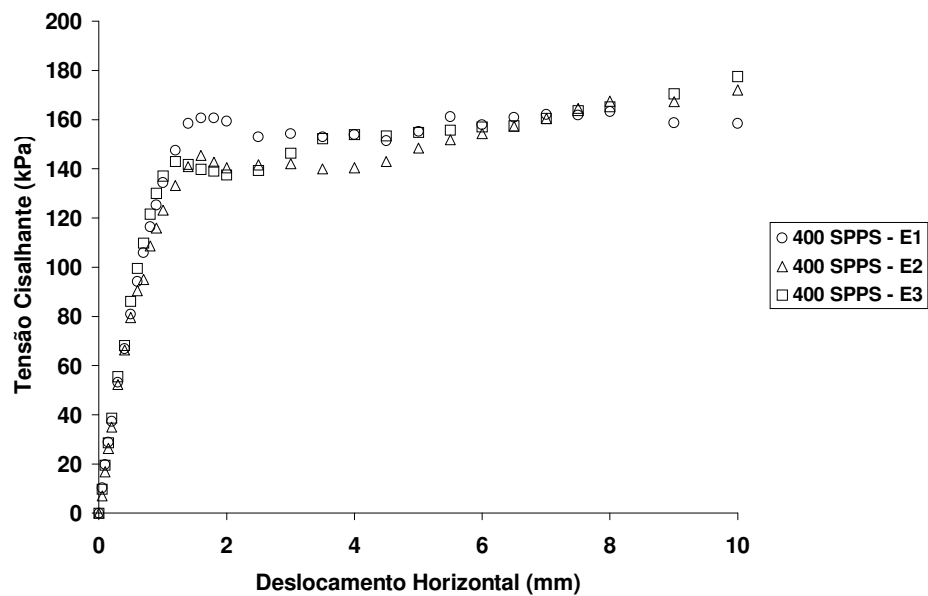


Figura 4.11 - Influência da areia – Tensão Normal de 400kPa.



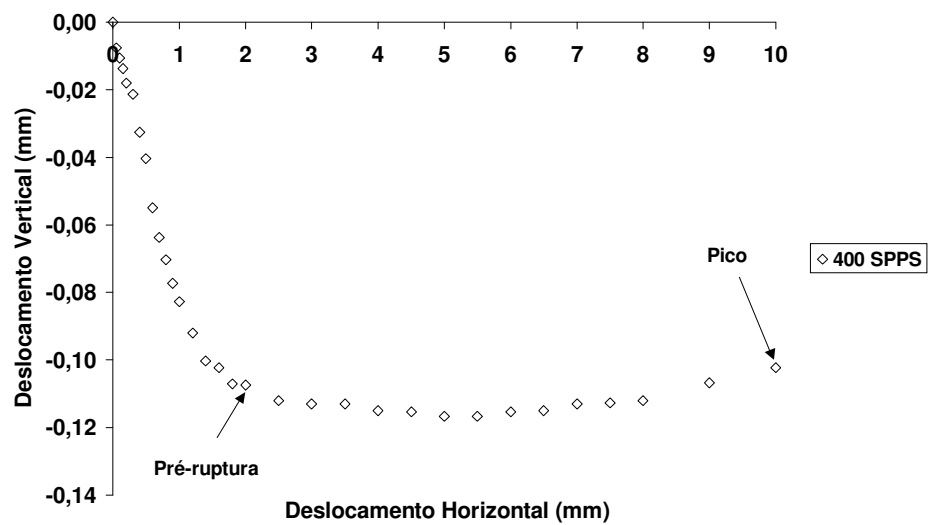
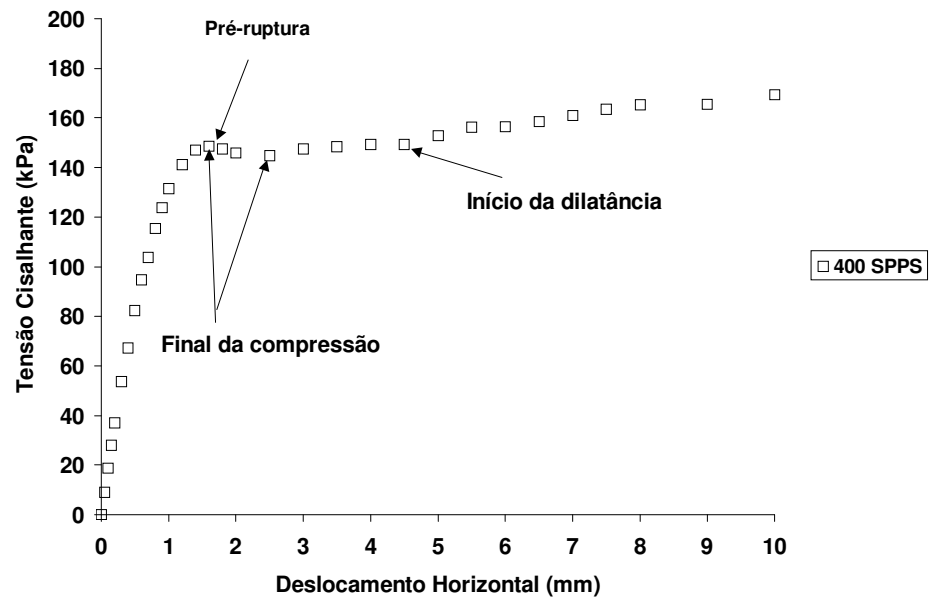


Figura 4.12 - Influência da areia – Resultados médios – Tensão Normal de 400kPa.

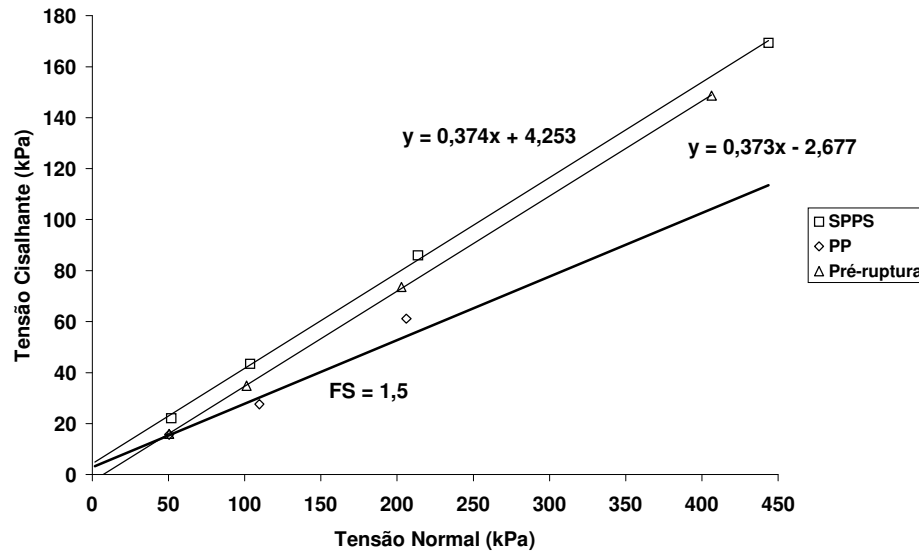


Figura 4.13 – Envoltória de Ruptura.

#### 4.4 - RESISTÊNCIA DAS INTERFACES SOLO – PET UTILIZANDO O ENSAIO DE PLANO INCLINADO

O uso do plano inclinado para obtenção dos parâmetros de interface tem sido prática comum entre os pesquisadores. Basicamente, o ensaio consiste em uma caixa que confina o solo apoiado sobre o material que é fixado no plano inclinado, inicialmente posicionado horizontalmente. A inclinação do plano é aumentada até ocorrer o deslizamento ao longo das interfaces.

Ao contrário do ensaio de cisalhamento direto, o plano inclinado é realizado com pequenas tensões normais, variando geralmente entre 5 e 50 kPa. Segundo Izgin & Wasti (1998), o ensaio de plano inclinado é conduzido para baixas tensões normais, onde esta limitação da magnitude não é considerada uma desvantagem, pois essa restrição não compromete a qualidade dos resultados para situações reais em que as tensões normais são geralmente baixas.

Giroud et al. (1990), após realizarem ensaios de cisalhamento direto e plano inclinado com tensões normais diferentes em geotêxtil concluíram que o ensaio de plano inclinado são complementares aos resultados dos ensaios de cisalhamento direto, devido a diferença de tensões normais aplicadas em cada ensaio. Portanto os autores

sugerem uma mudança na envoltória de resistência de Mohr-Coulomb para níveis de tensão abaixo de 25kPa.

Izgin & Wasti (1998) realizando ensaios de cisalhamento direto com tensões de 14 a 200kPa e ensaios de plano inclinado com tensões de 5 a 50kPa em amostra com interface de geomembrana – areia, concluíram que quanto menor a tensão normal utilizada no cisalhamento direto, quando comparado ao ensaio de rampa, maior a discrepância encontrada.

#### **4.4.1- Equipamento de Ensaio de Plano Inclinado**

Os ensaios de plano inclinado foram realizados na UnB (Universidade Federal de Brasília), utilizando o equipamento existente no laboratório de Geotecnia, visando avaliar o efeito de atrito entre as garrafas. Os itens seguintes versarão sobre o equipamento, a metodologia utilizada e os resultados dos ensaios.

O equipamento de plano inclinado foi proposto por Lima Jr. (2000). É constituído de uma estrutura metálica de apoio e uma rampa. A rampa é articulada em uma das extremidades por meio de uma rótula e outra extremidade é elevada através de uma talha, proporcionando a inclinação da rampa. A Figura 4.14 apresenta as principais medidas do equipamento, tais como, o comprimento útil da rampa de 2,654m e 0,592m. O ponto de rotação da rampa servirá como referência para o cálculo do ângulo de deslizamento e está localizado a 0,13m acima da base do equipamento e 0,036m da borda da rampa, portanto o comprimento horizontal da rampa para o cálculo é 2,67 m.

Foi utilizada na realização dos ensaios uma caixa bipartida para confinar as garrafas PET que pode ser visualizada na Figura 4.15. A caixa, confeccionada em madeira, tem dimensões internas de 0,50m x 0,34m x 0,10m.

Para medição dos deslocamentos foram utilizados deflectômetros instalados em bases magnéticas. Os dois deflectômetros utilizados mediam o deslizamento da caixa superior em relação a inferior sendo instaladas nas extremidades da caixa com a finalidade de acusar qualquer rotação da caixa durante o ensaio. Os deflectômetros têm precisão de 0,01mm e deslocamento máximo de 80mm.

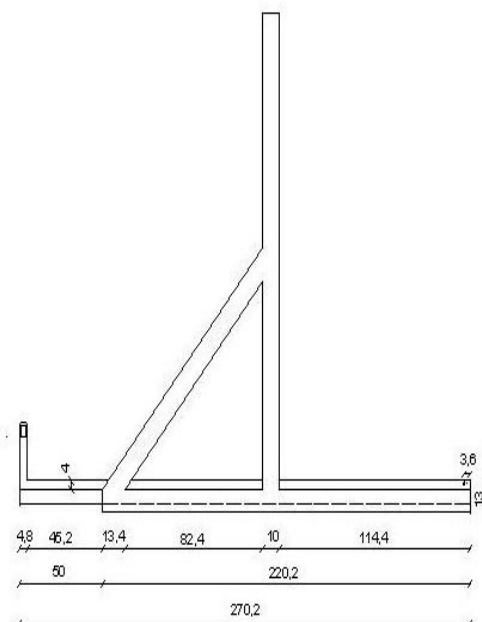


Figura 4.14 - Equipamento para ensaios de plano inclinado (Fonte: Lima Jr, 2000).

Para obtenção da resistência das interfaces SPPS foram realizados ensaios com aplicações de três tensões normais distintas. As tensões aplicadas foram feitas através de blocos de concreto de alturas de 0,05; 0,15 e 0,25m, aplicados diretamente sobre uma placa no topo da caixa de cisalhamento com dimensões de 0,33m x 0,49m. O bloco com 0,05m de altura tem dimensões de 0,445m x 0,375m x 0,05m e massa de 21,3kg, o que proporciona uma tensão normal de 1,32kPa. O bloco de 0,15m de altura tem dimensões de 0,445m x 0,375m x 0,15m e massa de 61,5 kg que induz uma tensão normal de 3,80kPa. O bloco de 0,25m tem dimensões de 0,445m x 0,375m x 0,25m e massa de 98,5kg que produz uma tensão normal de 6,09kPa. Ressaltando que estas tensões normais aplicadas referem-se a rampa na horizontal e seu cálculo está relacionado com a área da “tampa” adotada. A Figura 4.16 mostra os blocos de concreto utilizados.

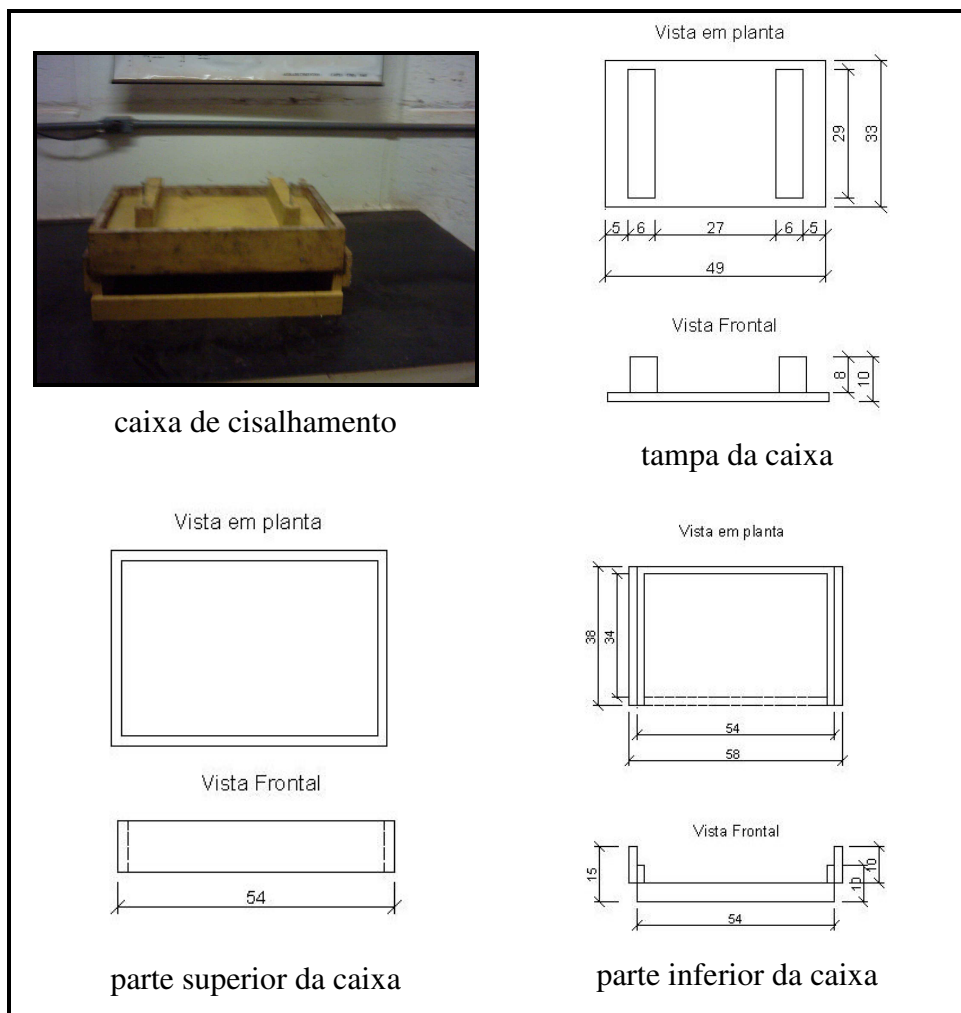


Figura 4.15 - Esquema da caixa de cisalhamento.



Figura 4.16 – Blocos de concreto (Fonte: Lima Jr, 2000).

#### 4.4.2 - Metodologia do Ensaio

Este item tem como objetivo descrever os passos utilizados para realização do ensaio de plano inclinado utilizando garrafas PET envasada com areia.

A caixa para confinamento da PET era composta de duas partes, uma inferior e outra superior. A caixa inferior foi fixada sobre a rampa impedindo o seu deslocamento durante a elevação da rampa. A caixa superior tinha como propósito deslocar-se sobre a caixa inferior no sentido longitudinal ao plano de cisalhamento, ou seja, no sentido da inclinação da rampa. Por possuir uma pequena área de contato entre as caixas (inferior e superior) da ordem de  $0,0368\text{m}^2$ , favorecendo deslocamentos laterais durante a elevação da rampa, foi necessário colocar guias laterais (Figura 4.15, parte inferior da caixa) para inibir possíveis deslocamentos horizontais. Um outro ponto relevante foi à utilização de óleo lubrificante no contato entre as caixas para minimizar o atrito durante o deslizamento da caixa superior.

As garrafas PET utilizadas nos ensaios foram envasadas utilizando a metodologia apresentada no Capítulo 3 e o material de envasamento foi à amostra do tipo 4 com características descritas também no Capítulo 3.

Foram propostos dois tipos de configuração para ensaios, um com arranjo triangular e outro com arranjo cúbico, ambos paralelo à inclinação da rampa, como mostra a Figura 4.17.

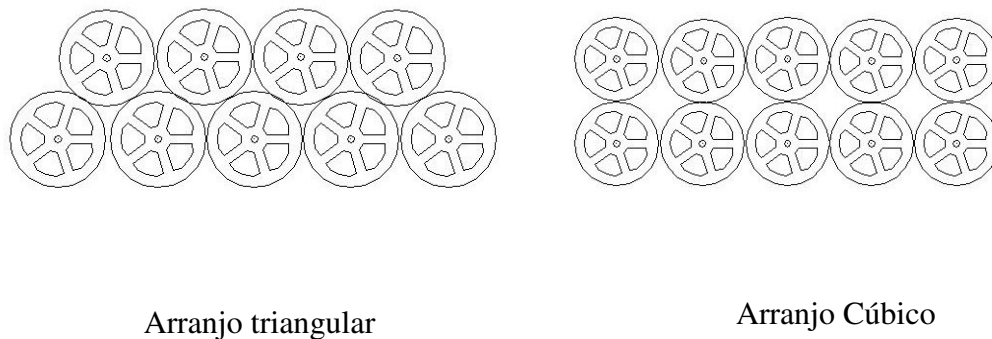


Figura 4.17 - Tipos de arranjo.

Foram distribuídas cinco garrafas na parte inferior da caixa de confinamento e quatro na parte superior para o arranjo triangular. No arranjo cúbico foram dispostas

cinco na parte inferior e cinco na parte superior. Após esta etapa foi colocada a tampa da caixa de confinamento e aplicada a carga de ensaio sobre a mesma, seguindo-se do posicionamento dos extensômetros nas extremidades da parte superior da caixa. A Figura 4.18 ilustra a seqüência do ensaio para um arranjo cúbico.

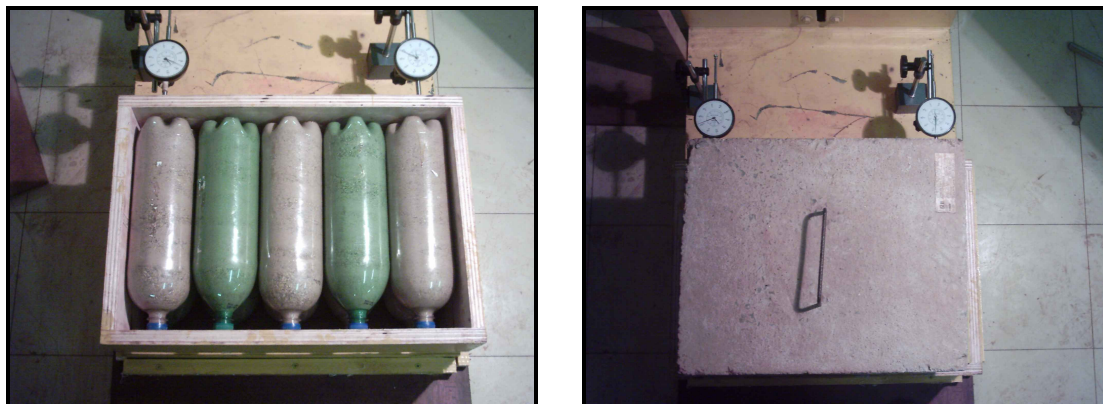


Figura 4.18a - Montagem ensaio cúbico.



Figura 4.18b - Fase intermediária do ensaio.

A rampa então foi erguida lentamente, por meio de uma talha, em alturas pré-determinadas, quando foram realizadas leituras nos dois deflectômetros, até que se atingisse a ruptura, ou seja, o deslizamento da caixa superior sobre a inferior. Esta mesma metodologia também foi utilizada para o ensaio de arranjo triangular.

#### **4.4.3 - Resultados dos Ensaio de Cisalhamento em Plano Inclinado**

Foram realizados três ensaios para o arranjo cúbico e três para o arranjo triangular com cargas variadas. Observa-se que para este tipo de ensaio há uma variação da tensão normal, diminuindo ao longo da inclinação do plano. As cargas normais máximas utilizadas foram de 0,41kN, 0,81kN e 1,18kN, para arranjo cúbico e de 0,37kN, 0,77kN e 1,14kN, para arranjo triangular. Todos esses valores foram acrescidos do peso médio das garrafas distribuídas na parte superior da caixa. É importante salientar que as tensões utilizadas foram explicitadas em termos de tensões de contato garrafa-garrafa. Para determinação destas tensões, foi necessário avaliar a área de contato relativa à carga imposta. Este estudo foi feito em caráter particular, estando apresentado detalhadamente no item que se segue.

Nas Figuras 4.19a 4.19f estão plotados os gráficos inclinação da rampa *versus* deslocamento, tensão cisalhante de contato *versus* deslocamento e tensão cisalhante de contato *versus* tensão normal de contato, para os arranjos triangular e cúbico. O gráfico deslocamento *versus* inclinação da rampa evidencia uma forte influência da magnitude da carga aplicada em função dos deslocamentos, observa-se que próximo a 20 graus de inclinação os deslocamentos apresentam-se significativos até alcançar a ruptura.

Os deslocamentos relativos ao ensaio com arranjo cúbico apresentaram o mesmo comportamento do arranjo triangular, como pode ser observado na Figura 4.19b. Pode-se notar que as curvas seguem o mesmo comportamento entre si.

Os resultados apresentados nas Figuras 4.19c e 4.19d destacam o aumento da resistência ao cisalhamento com o aumento da carga normal e o reflexo proporcionado ao deslocamento necessário para sua mobilização plena.



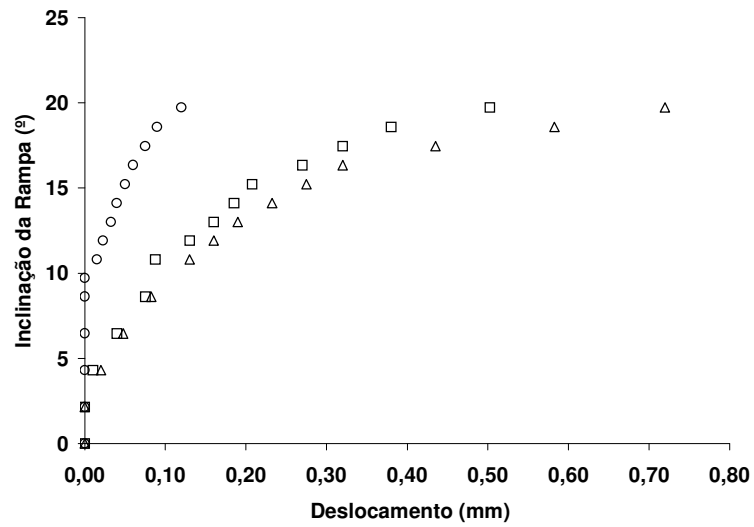


Figura 4.19a – Inclinação *versus* deslocamento - arranjo triangular.

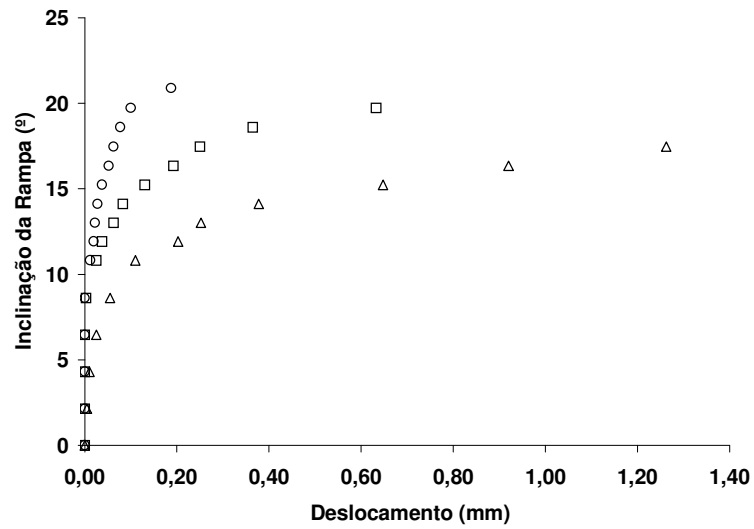


Figura 4.19b – Inclinação *versus* deslocamento - arranjo cúbico.

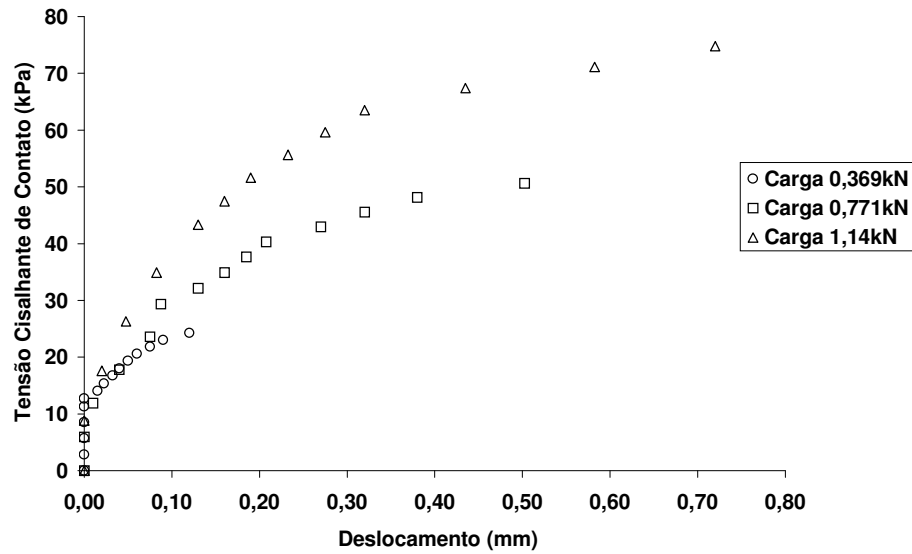


Figura 4.19c – Tensão cisalhante de contato *versus* deslocamento - arranjo triangular.

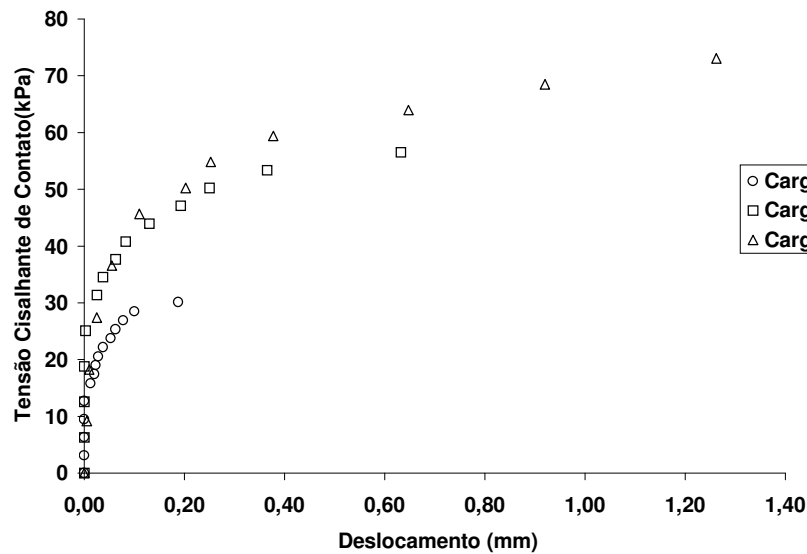


Figura 4.19d – Tensão cisalhante de Contato *versus* deslocamento - arranjo cúbico.

Na Figura 4.19e tem-se ilustrado o critério de Mohr-Coulomb para os pares de tensões normal e cisalhante detectados na ruptura do arranjo triangular. O resultado demonstrou um bom ajuste linear, sendo o ângulo de atrito do sistema igual a 18,7 graus e o intercepto de coesão desprezível.

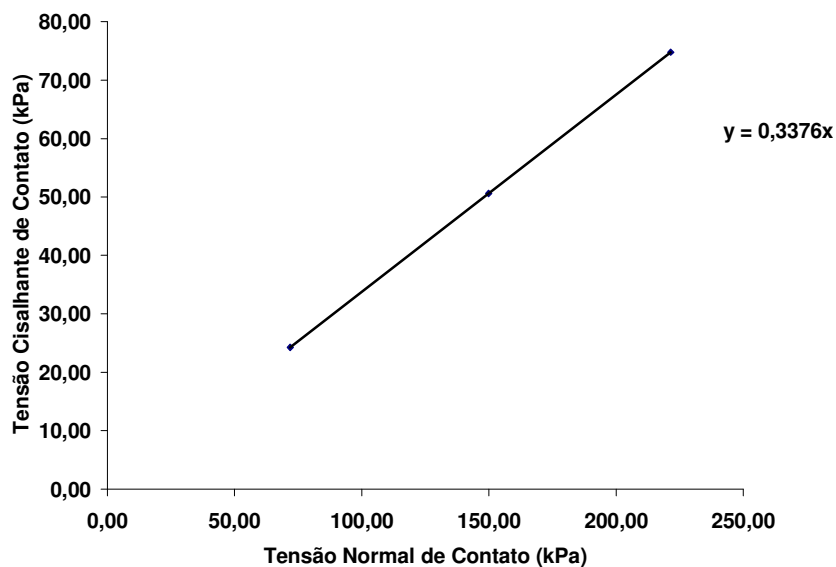


Figura 4.19e – Envoltória de resistência - arranjo triangular.

Para o arranjo cúbico, Figura 4.19f, o mesmo comportamento não foi detectado, ou seja, os resultados mostram-se dispersos. Naturalmente, esta dispersão pode estar associada a problemas no ensaio intermediário, que mostrou uma resistência relativamente superior. Desconsiderando este ensaio, o resultado friccional assemelha-se àquele encontrado para o arranjo triangular.

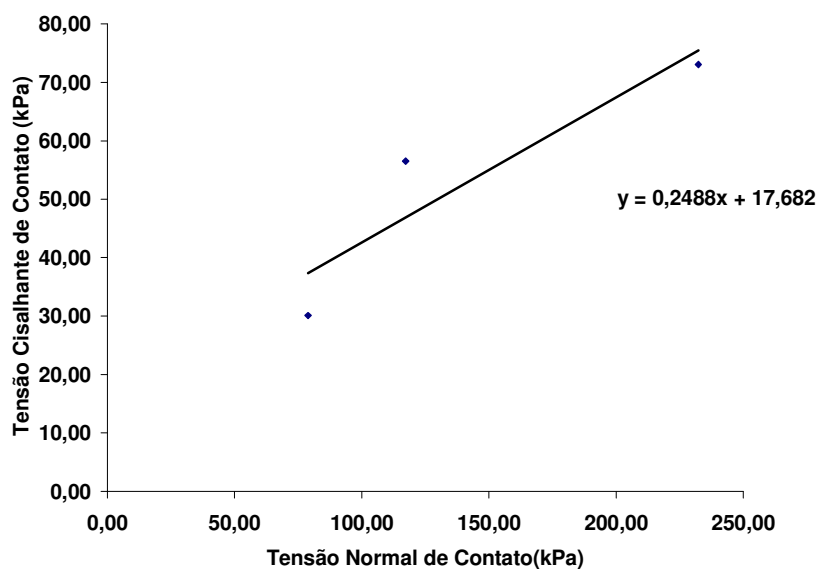


Figura 4.19f – Envoltória de resistência - arranjo cúbico.

## **4.5 - ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE CONTATO ENTRE AS GARRAFAS PET**

A resistência da estrutura (muro de garrafa PET) é fortemente influenciada pela resistência no contato entre as garrafas. O conhecimento da magnitude desta resistência é um fato muito importante para dimensionamento deste tipo de estrutura de contenção, aqui denominada “muro PET”. A resistência entre as garrafas é a força que pode ser aplicada sem que haja movimento relativo significativo entre elas. O aspecto friccional entre as garrafas é de mesma natureza que aqueles definidos para um bloco de concreto ou aço, ou seja, o número de contatos é fortemente influenciado pela geometria e rugosidade do material PET. Portanto, o entendimento da resistência ao cisalhamento entre as garrafas envolve o entendimento dos fatores que influenciam a interação entre as superfícies e seus pontos de contato.

### **4.5.1 - Equipamento para Determinação da Área de Contato**

A máquina utilizada para realização do ensaio é uma máquina Kratos, modelo K-1000, com capacidade de 100kN (10tf), precisão de 0,5% da carga aplicada, velocidade de deslocamento variando de 0,05 a 100mm/minuto, que possibilita realizar ensaios de tração e compressão. A velocidade adotada para realização do ensaio foi de 7mm/min.

A caixa utilizada possuía dimensões internas de 0,34m x 0,12m x 0,05m com espessura de 0,02cm (Figura 4.20). A altura da caixa foi definida em função do diâmetro médio das PET avaliadas para que fosse possível acompanhar a medida das deformações ao longo das cargas aplicadas.

### **4.5.2 - Metodologia do Ensaio**

Foram utilizadas três garrafas para determinação da área de contato. O arranjo estudado foi o triangular, como ilustrado na Figura 4.21. Primeiramente, foram colocadas duas garrafas no interior da caixa e outra imediatamente superior a essas duas. Em seguida, foi colocado um apoio superior sobre a garrafa e sobre o apoio

superior, foi colocado um cilindro de aço, de uma polegada, com objetivo de eliminar os momentos gerados pela aplicação de carga. As cargas utilizadas foram de 8, 03, 25,03 e 40,03kN, valores que já embutem o peso das garrafas.

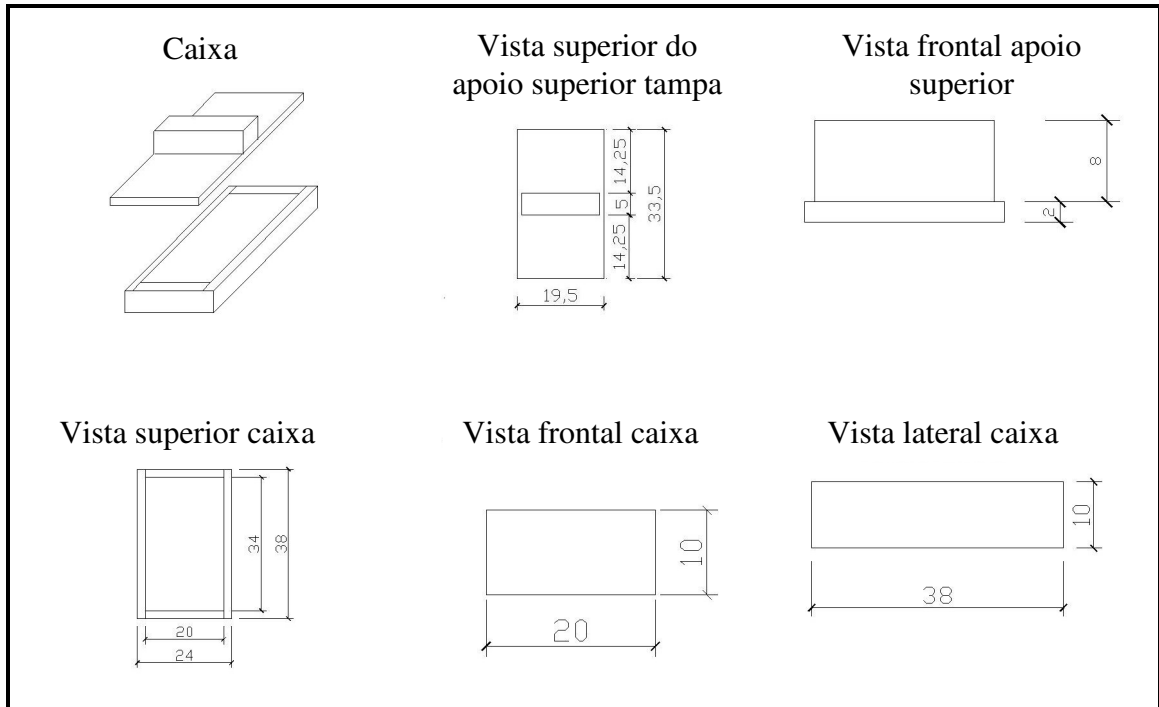


Figura 4.20 – Caixa para determinação área de contato.



Figura 4.21 – Ensaio para determinação da área de contato.

Antes da realização do ensaio, foi medida a área de contato inicial e logo em seguida aplicada uma carga de 8kN. A carga foi mantida nesta faixa para que fosse possível medir o comprimento do contato. Este comprimento foi medido nas duas faces laterais dos dois eixos sendo utilizado um paquímetro. O mesmo procedimento foi adotado para carga de 25 e 40kN.

### 4.5.3 - Apresentação dos Resultados

Após os procedimentos descritos acima, foi possível gerar o gráfico da Figura 4.22 que relaciona a área *versus* carga aplicada, utilizando os valores médios obtidos e apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados área de contato

Carga (kN)	Área (m <sup>2</sup> )	A <sub>1</sub> (m)	A <sub>2</sub> (m)	B <sub>1</sub> (m)	B <sub>2</sub> (m)
8,03	0,011693	0,0256	0,0242	0,2366	0,233
25,03	0,015244	0,0333	0,03135	0,2236	0,248
40,03	0,019228	0,0386	0,04135	0,2389	0,2421

Com os resultados apresentados na Tabela 4.1, foi possível estimar o comportamento da área de contato com o nível de carga do ensaio. Como poder ser observado na Figura 4.22, o comportamento é praticamente linear. Por simplificação, um ajuste linear foi aplicado, possibilitando apresentar uma equação aproximada para determinação da área de contato nos ensaios de rampa, como apresentados no item anterior.

Durante o ensaio para determinação da área de contato foi observada que a área medida para as garrafas inferiores apresentaram ligeira diferença. Isso se deve ao fato de que as garrafas apresentam diâmetros diferentes, ou seja, para duas garrafas inferiores a de diâmetro ligeiramente menor absorverá uma maior carga e conseqüentemente terá uma maior área de contato.

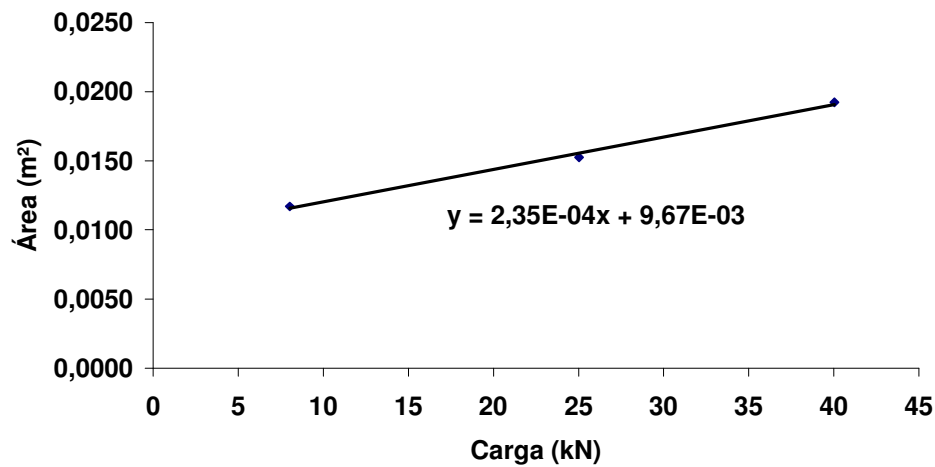


Figura 4.22 – Gráfico área de contato.

Estes ensaios, apesar de terem sido realizados para o arranjo triangular, com base na expressão para cálculo das áreas de contato, foram estendidos para o arranjo cúbico. Como ilustrado na Figura 4.23, para o arranjo triangular a carga nos contatos é a metade da carga aplicada. No entanto, aplicando uma função linear, as áreas de contato seriam as mesmas, em ambos os arranjos.



Figura 4.23 – Ilustração dos pontos de contato.

Para o arranjo triangular a distribuição de carga ( $Q$ ) nas duas garrafas inferiores é  $Q/2$  e no arranjo cúbico a carga transferida para a garrafa inferior é o próprio  $Q$ .

### **APLICAÇÃO DAS GARRAFAS PET EM OBRAS DE CONTENÇÃO**

#### **5.1 – ANÁLISE DA ESTABILIDADE**

Baseado nos ensaios realizados e nos dados gerados, um esboço para esta estrutura foi definido verificando a possibilidade da utilização da garrafa PET envasada com solo como estrutura de contenção em obras de pequeno porte.

A estrutura de contenção muro PET contempla as mesmas análises de estabilidade utilizadas para este tipo de obra. São então avaliadas a estabilidade ao tombamento, deslizamento, capacidade de carga das fundações e ainda os estudos de estabilidade global e interna. Esta, associada à estabilidade das seções (em altura) do muro PET.

Nesta análise, a estrutura está submetida à ação de seu peso próprio, sobrecargas e empuxos de terra. A avaliação é realizada de forma a verificar a sua capacidade de resistir aos riscos potenciais de uma ruptura por tombamento, deslizamento ou por falta de capacidade de carga do solo de fundação. A adequada resistência a estes mecanismos de ruptura é expressa por coeficientes ou fatores de segurança (FS) admissíveis, calculados em função das solicitações externas e das condições dos solos de fundação. Para efeito de exposição geral, considera-se o caso de uma estrutura inclinada (modelo PET) e submetida à ação de uma sobrecarga uniformemente distribuída  $q$ , como ilustrado na Figura 5.1.



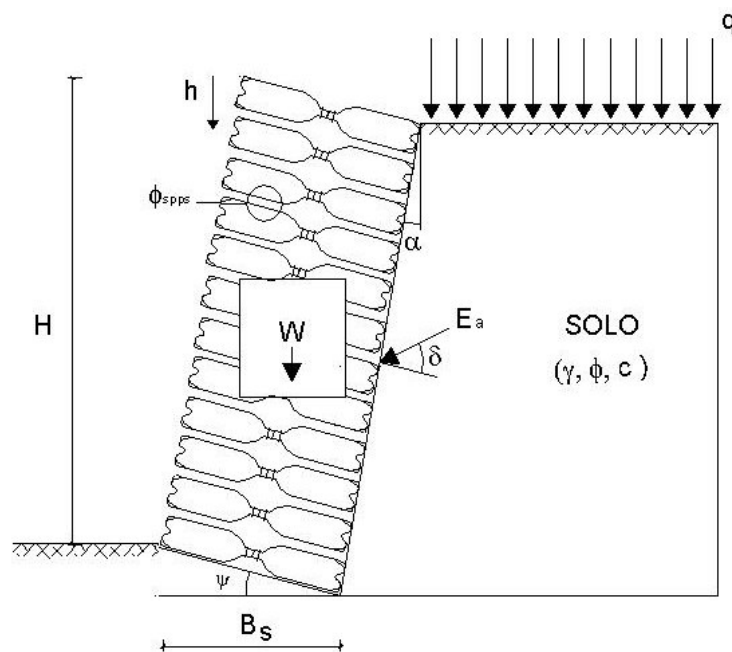


Figura 5.1 – Geometria e características gerais do muro PET.

Neste tipo de estrutura proposta, a análise da estabilidade interna foi levada em consideração devido a possibilidade de seccionamento do muro em uma determinada altura. As tensões suportadas pelo conjunto da estrutura podem levar a esforços internos excessivos que atuam diretamente nas junções das garrafas causando movimentos na interface garrafa-garrafa. Neste caso, foi verificada a segurança contra o deslizamento e o tombamento das garrafas ao longo de todo o muro.

### 5.1.1 - Estabilidade Quanto ao Deslizamento

O muro tende a deslizar devido ao efeito do empuxo horizontal. Na fundação, as forças que se contrapõe a este deslizamento são o empuxo passivo horizontal, o empuxo ativo vertical e o peso próprio da estrutura, sendo estes dois últimos de forma indireta, por meio da resistência ao cisalhamento do contato garrafa e fundação. O fator de segurança ao deslizamento aqui adotado foi igual ou superior a 50%, ou seja,  $FS_d \geq 1.5$ .

O fator de segurança ao deslizamento foi calculado pelo da Expressão (5.1) apresentada a seguir. Tomando-se como base o modelo tradicional Dente de Serra (Rowe, 1961, citado em Ortigão, 1993), a implementação da inclinação da garrafa PET foi feita considerando este com sendo um ângulo de dilatação do sistema. Neste caso, o atrito da junta é majorado do valor correspondente a dilatação da junta.

$$FS_d = \frac{E_p + (E_a \cdot \text{sen}(\delta + \alpha) + (\gamma_g \cdot h \cdot B_s)) \cdot \text{tan}(\psi + \theta_{SPPS})}{E_a \cdot \text{cos}(\delta + \alpha)} \quad (5.1)$$

Sendo:

$E_p$  – empuxo passivo (Rankine);

$E_a$  – empuxo ativo (Coulomb);

$\delta$  – atrito do solo contra a face do muro PET;

$\alpha_m$  – inclinação do muro;

$\gamma_g$  – peso específico do muro PET;

$h$  – altura em estudo do muro;

$B_s$  – projeção da base sobre a horizontal;

$\psi$  – inclinação da garrafa;

$\phi_{SPPS}$  – atrito solo-plástico-plástico-solo (SPPS).

Como mencionado anteriormente para efeito de cálculo do  $FS_d$  foi considerada a resistência ao deslizamento por interface. A largura da base utilizada foi a sua projeção na horizontal, sua inclinação foi um recurso utilizado para aumentar sua resistência ao deslizamento. Estas inclinações ao longo das análises variaram entre 0 e 30°. A definição do peso específico do muro PET foi feita considerando a quantidade de garrafa presente num volume unitário.

Os coeficientes de empuxo ativo (Coulomb) e passivo (Rankine) foram calculados pelas Expressões (5.2) e (5.3), respectivamente.

$$k_a = \frac{\cos^2(\phi - \alpha)}{\cos(\alpha)^2 \cdot \cos(\alpha + \delta) \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\phi + \delta) \cdot \text{sen}(\phi - \beta)}{\cos(\alpha + \delta) \cdot \cos(\alpha - \beta)}} \right)^2} \quad (5.2)$$

$$k_p = \text{tg}^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (5.3)$$

Sendo:

$\phi$  – ângulo de atrito do solo de fundação;

$\beta$  – ângulo de inclinação do terrapleno.

### 5.1.2 - Estabilidade Quanto ao Tombamento

O fator de segurança ao tombamento, também considerado igual ou superior a 50%, ou seja,  $FS_t \geq 1,5$ . Este, foi determinado com base na Expressão (5.4). Esta expressão foi obtida a partir do equilíbrio de momentos em relação a extremidade de base mais externa do muro. Para que não ocorra tração na fundação do muro, tem-se que a resultante das forças atuantes passe dentro do núcleo central (terço médio da seção) da base. As análises do tombamento nas seções transversais relativas a altura do muro (interfaces) foram feitas tomando-se o equilíbrio de momentos para cada seção.

$$FS_t = \frac{\Sigma M_r}{\Sigma M_a} = \frac{W \cdot l_w + Ea \cdot \text{sen}(\delta + \alpha) \cdot l_{a_v} + 0,5 * E_{p_h} \cdot l_{p_h}}{Ea \cdot \text{cos}(\delta + \alpha)} \quad (5.4)$$

Sendo:

$\Sigma M_r$  – Somatório do momentos resistentes;

$\Sigma M_a$  – Somatório do momentos atuantes;

W – peso do muro PET;

Ea – Empuxo ativo;

$E_{p_h}$  – empuxo passivo horizontal;

$l_w, l_{a_v}, l_{p_h}$  – respectivos braços de alavanca.

### 5.1.3 - Capacidade de Carga da Fundação

A análise da capacidade de carga da fundação é a verificação contra a ruptura e a deformação excessiva do terreno de fundação. As equações de equilíbrio utilizadas estão apresentadas abaixo.

$$(\sigma_v)_{\max} = \frac{N_v}{B_s} \cdot \left( 1 + \frac{6e}{B_s} \right) \quad (5.5)$$

$$(\sigma_v)_{\min} = \frac{N_v}{B_s} \cdot \left( 1 - \frac{6e}{B_s} \right) \quad (5.6)$$

$$e = \frac{B_s}{2} - \frac{M_r - M_a}{N} \quad (5.7)$$

Sendo:

$e$  - excentricidade;

$N_v$  - resultante das forças verticais na base.

Para não haver tração na fundação, a excentricidade deve atender a Expressão (5.8).

$$e \leq \frac{B_s}{6} \quad (5.8)$$

O fator de segurança quanto a capacidade de suporte da fundação foi considerado 100% ou superior, ou seja,  $FS_f \geq 2$ , sendo determinado pela Expressão (5.9).

$$FS_f = \frac{\sigma_r}{\sigma_{\max}} \quad (5.9)$$

Na Expressão (5.9), o numerador representa a carga de ruptura para fundação. Para determinação desta carga, foi utilizada a expressão de capacidade de carga de Terzaghi (Expressão 5.10).

$$\sigma_r = c.N_c + \gamma.D.N_q + 0,5.\gamma.B_s.N_y \quad (5.10)$$

Sendo:

$\sigma_r$  – capacidade de carga do solo de fundação;

$c$  – coesão do solo de fundação;

$N_c, N_q, N_y$  – fatores de capacidade de carga de Terzaghi;

$D$  – embutimento da estrutura no solo de fundação.

#### **5.1.4 - Análise da Estabilidade Global**

A análise da estabilidade global é feita de forma a garantir a estabilidade de todo o sistema. Neste contexto, são utilizados métodos convencionais de estabilidade de taludes, obedecendo as características do problema em estudo.

Através de uma análise por equilíbrio limite pode-se avaliar a estabilidade de uma encosta ou obra de contenção por equilíbrio de momentos e/ou forças. A NBR 11682 (ABNT /1991) estabelece fatores de segurança baseado no método de equilíbrio limite com valores mínimos de, 1,5; 1,30; 1,15, sendo representativos do grau de segurança alto, médio e baixo, respectivamente. Neste estudo, a estabilidade global do muro PET será considerada alta/média, com fator de 1,4.

Para o estudo em questão foi utilizado o programa SLOPE (GeoSlope, 2001) que utiliza o método de equilíbrio limite para determinar fatores de segurança em taludes de solos ou rochas.

A análise no SLOPE foi feita considerando o muro PET como sendo uma estrutura anisotrópica devido a inclinação da garrafa. Esta anisotropia foi definida por meio da função de resistência anisotrópica que descreve a relação entre o ângulo de inclinação da base da fatia e a resistência do solo e pode ser simulada modificando a resistência cisalhante na base de cada fatia através de uma função modificadora.

O programa ajusta para cada fatia da superfície de ruptura uma coesão e um ângulo de atrito, a partir da inclinação da base da fatia, utilizando os parâmetros  $c_f$  e  $\phi_f$  nas direções vertical e horizontal, como mostram as Expressões (5.11) e (5.12).

$$c_f = c_x \cdot \cos^2 \alpha + c_y \cdot \sin^2 \alpha \quad (5.11)$$

$$\phi_f = \phi_x \cdot \cos^2 \alpha + \phi_y \cdot \sin^2 \alpha \quad (5.12)$$

Sendo

$c_f$  – coesão ao longo da fatia da base;

$\phi_f$  – ângulo atrito ao longo da fatia da base;

$c_x$  – coesão horizontal específica;

$c_y$  – coesão vertical específica;

$\phi_x$  – ângulo atrito horizontal específico;

$\phi_y$  – ângulo atrito vertical específico;

$\alpha$  – inclinação da fatia.

A inclinação da fatia varia de  $-90^\circ$  a  $+90^\circ$ , sendo a inclinação considerada positiva quando o movimento é descendente e negativa quando ascendente. Para simular a inclinação da garrafa, o parâmetro  $\psi$  foi introduzido nas Expressões (5.11) e (5.12), originando as expressões (5.13) e (5.14).

$$c_f = c_x \cdot \cos^2(\alpha + \psi) + c_y \cdot \sin^2(\alpha + \psi) \quad (5.13)$$

$$\phi_f = \phi_x \cdot \cos^2(\alpha + \psi) + \phi_y \cdot \sin^2(\alpha + \psi) \quad (5.14)$$

A partir destas expressões foi possível criar uma função modificadora para cada inclinação da garrafa proposta, como mostra a Figura 5.2.

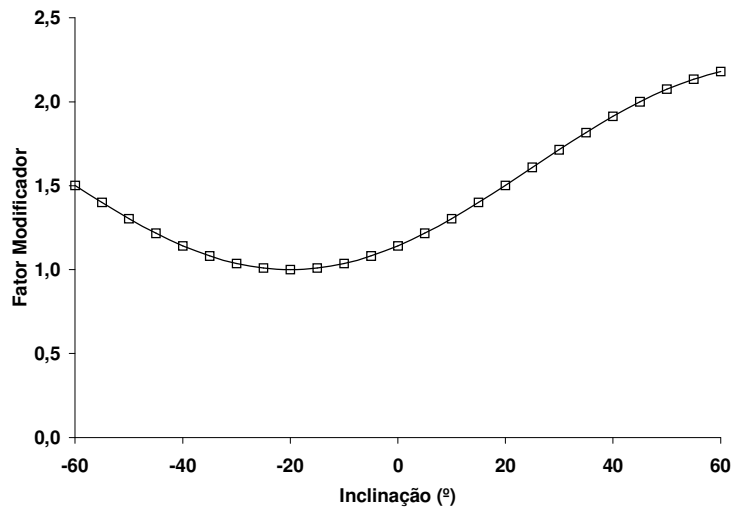


Figura 5.2 – Fator modificador para  $\psi$  igual a 15 graus.

Na verdade esta função modificadora nada mais é do que um fator ponderador que majora ou minora uma determinada coesão e atrito na base de uma fatia a partir de um determinado fator modificador.

## 5.2- ANÁLISES DESENVOLVIDAS

Para o desenvolvimento de um estudo quantitativo para aplicabilidade do muro PET, algumas considerações foram tomadas, com base nos estudos laboratoriais aqui desenvolvidos e nas ponderações da mecânica dos solos. No item a seguir, os parâmetros são apresentados, seguidos de um breve comentário.

### 5.2.1 – Parâmetros de Análise

#### Ângulo de Atrito da Interface

Este parâmetro foi quantificado por ensaios de cisalhamento direto e rampa. Os ensaios de cisalhamento direto que procuraram simular a interface do muro PET, foram aqueles designados por solo-plástico-plástico-solo (SPPS). Os resultados mostram um comportamento linear para faixa de tensão estudada. O ângulo de atrito de pico

encontrado foi 20,51 graus. Este resultado foi alcançado após a realização de três ensaios por nível de tensão, ou seja, 12 ensaios. Com base na taxa de mobilização imposta ao sistema no campo, é de se esperar que a mobilização esteja antes da pré-ruptura dos ensaios SPPS. A envoltória de resistência para pré-ruptura indicou um comportamento linear e paralelo ao apresentado pela envoltória de pico. Neste caso, o ângulo de atrito calculado foi de 20,46 graus. Sendo assim, do ponto de vista prático, para mobilizações de resistência inferiores ou superiores a pré-ruptura, o ângulo de atrito poderia ser considerado igual a 20 graus.

Os ensaios de rampa mostraram que para o arranjo triangular, que é similar ao arranjo proposto para o muro PET, o ângulo de atrito foi igual a 18,7 graus. Desprezando o ensaio intermediário do arranjo cúbico, valor similar pôde ser detectado. Apesar do ensaio de rampa ser mais representativo das condições de interface no campo, o mesmo não ocorre com a indução das tensões de cisalhamento. No ensaio de rampa as tensões cisalhantes são induzidas concomitantemente ao alívio de tensões normais. O decréscimo das tensões normais tende a minimizar a rugosidade da superfície de contato plástico-plástico. Desta forma, o ângulo de atrito da superfície diminui com o transcorrer do ensaio, sendo mínimo no momento da ruptura. Por outro lado, no campo, as garrafas serão preferencialmente dispostas inclinadas. Assim, a indução de cisalhamento proporcionará movimentos ascendentes das garrafas. Desta forma, o aumento da tensão cisalhante será acompanhado por aumento de tensão normal. O aumento de tensão normal tende a aumentar a rugosidade do contato plástico-plástico, sendo o ângulo de atrito crescente com o progresso dos movimentos.

Levando em consideração as ponderações acima, o ângulo de atrito de interface ( $\phi_{SPPS}$ ) será considerado igual a 20 graus.

### **Ângulo de Inclinação das Garrafas**

A inclinação das garrafas proporciona maior dificuldade ao movimento de translação do muro, restringindo o deslizamento. Para que este estudo não fosse exaustivo, seis ângulos múltiplos de cinco foram adotados para as análises, a saber: 0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 graus.



## **Parâmetros do Solo**

O ângulo de atrito do solo pode variar numa grande escala, numa faixa de 0 a 45 graus. Valores menores estariam associados as condições não drenadas em argilas normalmente adensadas, submetidas a carregamentos. Valores maiores estariam associados a materiais granulares, que apresentam facilidade de dissipação de pressões. Para realizar um estudo desta natureza é importante minimizar as variáveis, dando prioridade às novas componentes do sistema. Assim, por simplificação, optou-se por adotar um ângulo de atrito único para o solo, sendo este igual a 30 graus. Com se sabe, este ângulo é comum para as areias fofas e densas, em condições residuais, representativa do estado de plastificação das teorias de empuxo tradicionais. Neste trabalho, opta-se por utilizar o ângulo de atrito de 30 graus, não por se tratar de um valor típico utilizado pelos escritórios de engenharia, mas porque este valor varre uma grande gama de situações de campo, quando da presença de solos granulares na constituição do maciço terroso.

Para o peso específico do solo, tem-se uma gama menor de valores, exceto quando se têm processos de submersão. Este estudo será desenvolvido considerando um estado natural de umidade, estando o sistema acima do lençol freático. Valores comuns para peso específico natural de solos podem estar entre 16,5 e 19kN/m<sup>3</sup> (Bowles, 1984). Para o trabalho em questão, optou-se por utilizar o limite superior, ou seja, 19kN/m<sup>3</sup>.

A coesão do solo foi considerada nula. Este procedimento pode ser justificado em função do processo de plastificação do solo no estado ativo e a conseqüente desestruturação do solo. Em termos de intercepto de coesão, mesmo em solos coesivos, a plastificação tende quantificar o intercepto como nulo, similar aos solos normalmente adensados.

## **Ângulo de Atrito Solo-Muro**

Para o cálculo do empuxo ativo, foi utilizada a expressão de Coulomb. De acordo com Coulomb, no processo de ativação do empuxo ativo, o solo tende a movimentar-se para baixo e para o lado. Assim, a força de empuxo sobre uma reação da parede do muro, inclinando-se de  $\delta$ . Este ângulo é conhecido como ângulo de atrito

solo-muro. Dentre os posicionamentos existentes na literatura, para este estudo, este ângulo foi considerado como sendo dois terços do ângulo de atrito do solo, ou seja, 20 graus.

### **Peso Específico do Muro**

O peso específico do muro PET foi obtido através da quantificação do número de garrafas por metro quadrado de face, sendo o arranjo construtivo triangular, similarmente ao ilustrado na Figura 4.17 do Capítulo 4.

Considerando um muro vertical, o número de linhas de garrafa ( $n_{linhas}$ ) em um metro de altura pode ser calculado através da Expressão (5.15).

$$n_{linhas} = \frac{\sqrt{2}}{diâmetro} \quad (5.15)$$

Como detalhado na Figura 5.1, sendo o diâmetro das garrafas igual a 0,10m, o número de linhas é estimado em 14,4. Longitudinalmente, em um metro de muro têm-se 10 garrafas, ou seja, são 288 garrafas por metro quadrado frontal de muro. De forma conservadora, considerando o peso mínimo encontrado no estudo de enchimento (Tabela 3.3 do Capítulo 3), o peso da garrafa será considerado igual a 34N. Sendo a largura do muro 0,70m, o peso específico do muro PET pode ser estimado em 13,99kN/m<sup>3</sup>. Para o desenvolvimento deste estudo, o peso específico adotado para o muro PET foi de 14kN/m<sup>3</sup>.

### **Inclinação do Muro**

Por estética ou disponibilidade de espaço, muitas obras de contenção têm que ser realizadas na vertical. No entanto, nas situações que esta exigência não está presente, fazer uma leve inclinação do talude pode ser bem interessante para as condições de segurança e custo benefício. Para avaliar o comportamento da segurança do muro PET em função da sua inclinação (“vertical”/“horizontal”), algumas inclinações foram

sugeridas, sendo elas: 1/6; 1/5; 1/4; 1/3; e 1/2. Estas inclinações representam os ângulos 9,5; 11,3; 14,0; 18,4; e 26,6 graus, respectivamente.

## **Sobrecarga**

Projetos de contenção normalmente são realizados levando em consideração a possibilidade de ocorrência de sobrecarga na superfície contida. Normalmente, este valor é desprezível, não alterando os projetos em suas dimensões. No entanto, para este estudo, será considerada uma sobrecarga de arquibancada. De acordo com a NBR-6120 (ABNT/ 1980), o valor sugerido é 4kPa.

### **5.2.2– Estudo de Sensibilidade**

Procurando avaliar a relevância dos parâmetros na estabilidade do muro PET, desenvolve-se a seguir um estudo de sensibilidade. Foram cinco, os parâmetros avaliados neste estudo: altura; atrito na interface das garrafas, inclinação da garrafa; atrito solo-muro; e inclinação do muro.

#### **Altura do Muro PET**

Este estudo preliminar visou avaliar o potencial do muro PET para utilização como sistema alternativo de construção de baixo custo. Neste sentido, tem-se que sua utilização estaria focada para famílias de baixa renda, quando aterros e cortes de pequena altura, são realizados.

Após estudos exaustivos de sensibilidade, foi possível concluir que o uso de apenas uma garrafa para confecção do muro PET seria inviável. Com a largura de 0,30m, a altura não ultrapassava 1 metro. Assim, para viabilizar o uso da garrafa PET em sistemas de contenção, testes foram simulados utilizando duas garrafas acopladas pela tampa por uma luva de PVC de 3/4'. Este arranjo propiciou um aumento da largura do muro, que foi para 0,70m. Uma ilustração do sistema de acoplamento está apresentada na Figura 5.3.



Figura 5.3 – Configuração em duas garrafas para Muro PET.

Como apresentado na Tabela 5.1, variando a altura e mantendo os demais parâmetros constantes, foi possível avaliar a altura máxima para o muro PET. Nesta análise, após estudos particulares, a inclinação do muro e a inclinação da garrafa foram otimizadas, sendo estas consideradas iguais a 1/6 e 15 graus, respectivamente. Os resultados demonstram maior fragilidade para estabilidade ao deslizamento. Na passagem da altura 1,75m para 2,00m o fator de segurança ao deslizamento ficou menor que 1,5.

Tabela 5.1 – Influência da altura do muro nos fatores de segurança.

$\alpha (^{\circ})$	$\psi (^{\circ})$	$\Phi_{SPPS} (^{\circ})$	$\delta (^{\circ})$
1/6	15	20	20
H (m)	FS <sub>d</sub>	FS <sub>t</sub>	FS <sub>f</sub>
1,00	2,31	3,55	11,87
1,25	2,03	2,61	8,63
1,50	1,82	2,05	6,21
1,75	1,66	1,67	4,55
2,00	1,39	1,28	3,31

Para avaliar graficamente o comportamento dos fatores de segurança ao deslizamento e tombamento, foi elaborado um gráfico altura *versus* fator de segurança. Os resultados estão apresentados na Figura 5.4. Devido a elevada magnitude dos fatores de segurança contra ruptura de fundação, estes não foram incorporados à análise.

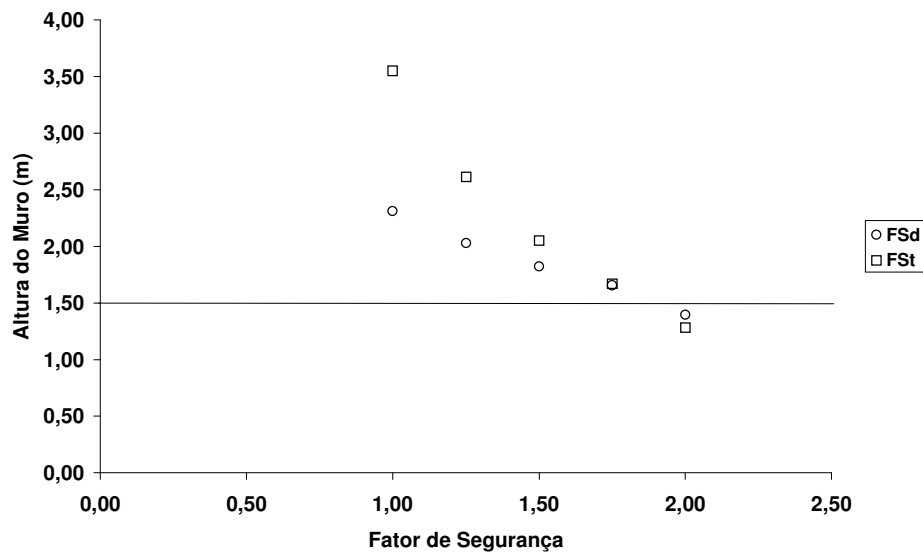
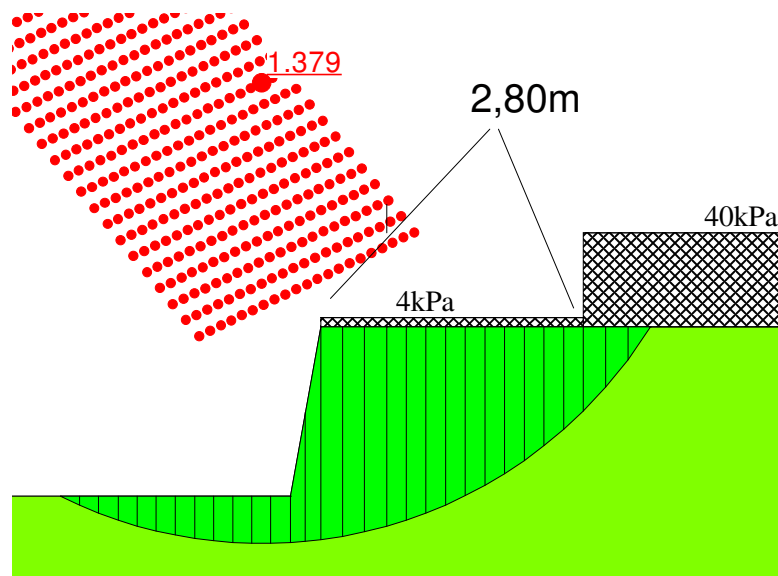


Figura 5.4 – Comportamento da segurança com a altura do muro PET.

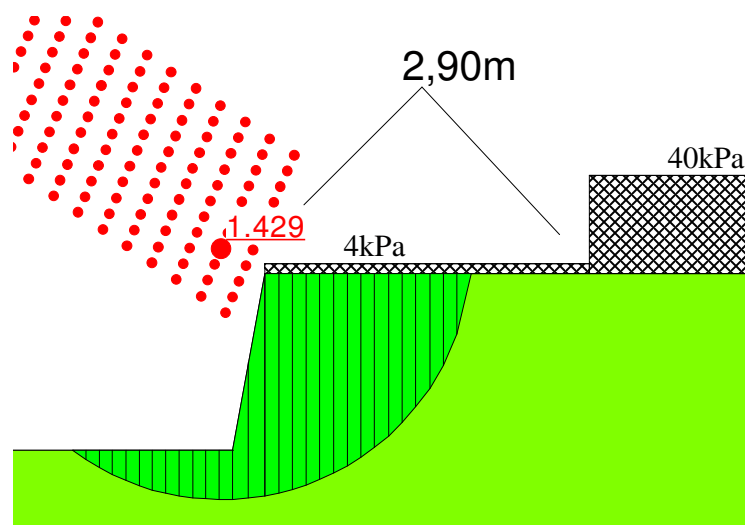
Os resultados ilustram bem o comportamento dos fatores de segurança em função da elevação do muro. Apesar dos fatores contra tombamento serem maiores para maioria das alturas avaliadas, parece haver uma convergência para altura igual 1,8m, quando o fator de segurança foi igual a 1,5.

Assim, de acordo com o aqui apresentado, a aplicação do muro PET estaria condicionada a altura de 1,80m, respeitando ainda as seguintes especificações: inclinação do muro 1/6; inclinação das garrafas 15 graus.

Em situações em que o muro tiver que ser mais alto, um sistema tipo retaludamento poderia ser adotado. Considerando o uso deste sistema, para garantir a estabilidade global, o afastamento das bermas deve ser de no mínimo 2,90m, como ilustrado na Figura 5.5. Para simular o muro superior, foi considerada uma sobrecarga equivalente. Como mencionado anteriormente, para estabilidade global foi considerado um fator de segurança igual a 1,4.



(a)



(b)

Figura 5.5 – Solução tipo retaludamento para maiores alturas.

### Atrito na Interface

O atrito na interface SPSS já foi bem discutido, sendo seu valor considerado igual a 20 graus. No entanto, este estudo procurou avaliar a sensibilidade deste parâmetro, considerando os demais constantes. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.2.

Como pode ser observado na Tabela 5.2 e Figura 5.6, a influência deste parâmetro está restrita ao deslizamento. Com base no comportamento observado na Figura 5.6, o muro estaria instável ao deslizamento para atrito na interface menor que 16 graus.

Tabela 5.2 – Influência do atrito na interface (SPPS).

H (m)	$\psi$ (°)	$\alpha$ (°)	$\delta$ (°)
1,8	15	1/6	20
$\Phi$ (°)	FS <sub>d</sub>	FS <sub>t</sub>	FS <sub>f</sub>
15	1,37	1,58	4,26
20	1,59	1,58	4,26
25	1,85	1,58	4,26
30	2,15	1,58	4,26

Para avaliar este comportamento graficamente, apresenta-se na Figura 5.6, o comportamento do fator de segurança com a variação do atrito na interface (SPPS).

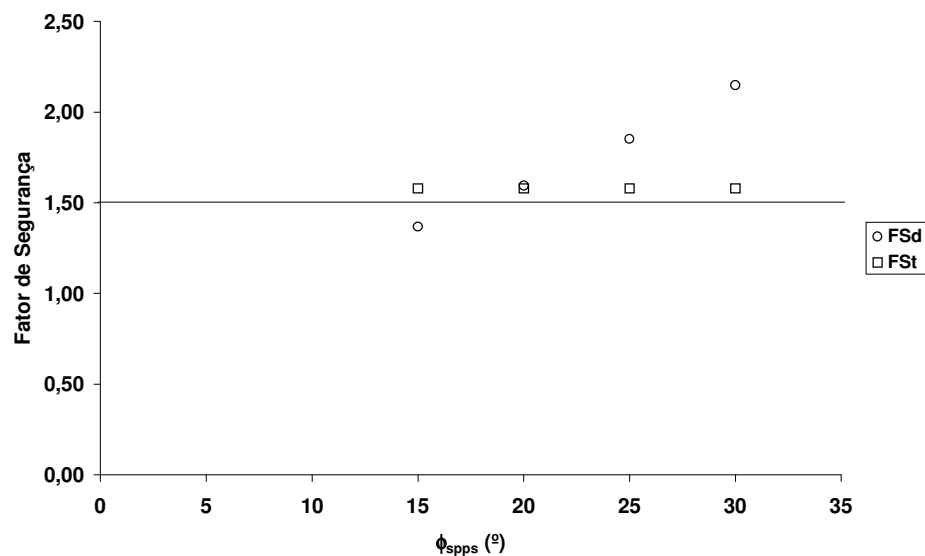


Figura 5.6 – Influência do atrito na interface.

## Inclinação das Garrafas

A inclinação das garrafas é um procedimento muito importante para aumento da resistência ao atrito do sistema. De forma direta, a inclinação das garrafas representa uma dilatância induzida.

Como pode ser observado na Tabela 5.3 o aumento da inclinação da garrafa gerou aumento da resistência ao deslizamento e uma redução do fator de segurança contra o tombamento e fundação. É interessante observar que a estabilidade requerida só foi alcançada para faixa de inclinação situada entre 15 e 20°.

Tabela 5.3 – Influência da inclinação das garrafas.

<b>H (m)</b>	<b><math>\Phi_{SPPS}</math> (°)</b>	<b><math>\alpha_{muro}</math></b>	<b><math>\delta_{Solo/PET}</math></b>
<b>1,8</b>	<b>20</b>	<b>1/6</b>	<b>20</b>
<b><math>\phi</math> (°)</b>	<b>FS<sub>d</sub></b>	<b>FS<sub>t</sub></b>	<b>FS<sub>f</sub></b>
0	1,02	1,70	4,66
5	1,21	1,69	4,61
10	1,41	1,65	4,48
15	1,59	1,58	4,26
20	1,78	1,49	3,96
25	1,95	1,38	3,60
30	2,11	1,25	3,19

Este comportamento pode ser melhor avaliado no gráfico ilustrado na Figura 5.7. Um ponto de congruência, em termos de segurança ao deslizamento e tombamento, pode ser determinado para a inclinação em torno de 15 graus.

O aumento do coeficiente de segurança ao tombamento está sendo influenciado pelo ganho de dilatância condicionado pelo aumento da inclinação da garrafa. Por outro lado, o aumento da inclinação da garrafa reduz a espessura do muro, minimizando os braços de alavanca relativos ao peso do muro e empuxo ativo vertical. Este comportamento faz com que a inclinação das garrafas minimize a segurança ao tombamento.



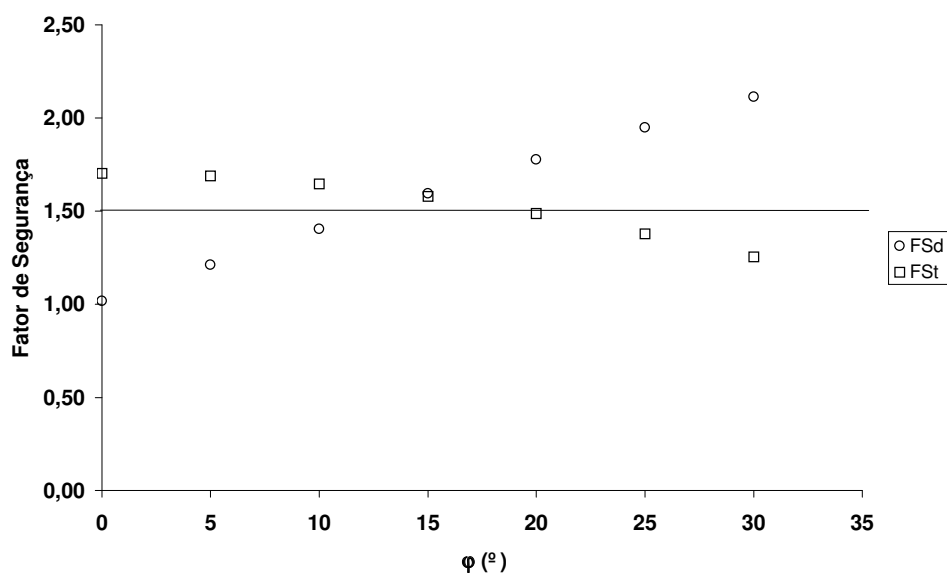


Figura 5.7 – Influência da inclinação da garrafa.

### Inclinação do Muro

A inclinação do muro é importante para minimizar os empuxos ativos. Como exposto na Tabela 5.4 o abatimento na inclinação do muro proporciona um aumento inicial dos fatores de segurança ao deslizamento e tombamento, seguido de uma minimização destes fatores, sendo detectado um ponto comum de máximo para inclinação 1/6 ou 9,46 graus. Para segurança da fundação, o comportamento foi de majoração progressiva com o abatimento da inclinação do muro.

Tabela 5.4 – Influência da inclinação do muro.

H (m)	$\alpha (^{\circ})$	$\Phi_{SPPS} (^{\circ})$	$\delta_{Solo/PET}$
1,8	15	20	20
$\alpha_{muro}$	FS <sub>d</sub>	FS <sub>t</sub>	FS <sub>f</sub>
1/20 – (2,86°)	1,53	1,28	2,57
1/10 – (5,71°)	1,57	1,41	3,11
1/6 – (9,46°)	1,59	1,58	4,26
1/5 – (11,41°)	1,43	1,47	4,83
1/4 – (14,04°)	1,28	1,36	5,73

O comportamento dos fatores de segurança contra deslizamento e tombamento podem ser melhor visualizado na Figura 5.8. De acordo com o observado, o muro só estaria em condições de segurança para inclinações compreendidas entre 8 e 10,5 graus.

Para inclinações superiores a 10,5 graus, ambas as condições apresentam fatores menores que 1,5. A minimização da estabilidade do muro contra o deslizamento está associada a diminuição da tensão normal na base. Esta diminuição se dá diretamente pelo menor peso do muro projetado sobre a fundação e pela minimização do empuxo ativo vertical. Para inclinação maior que o valor do atrito solo/muro (20 graus), o empuxo ativo vertical é negativo, ou seja, este esforço tende aliviar os esforços normais sobre a base.

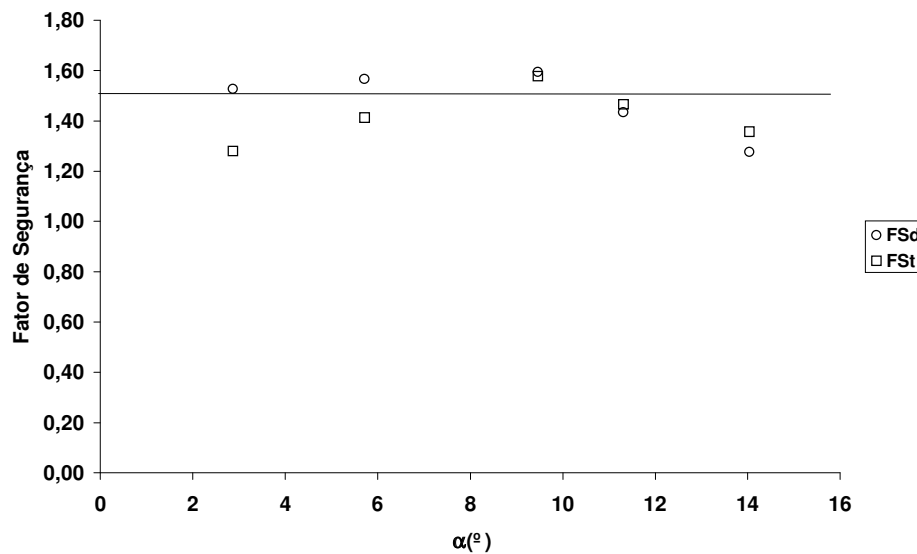


Figura 5.8 – Influência da inclinação do muro.

### Atrito Solo-Muro

Como apresentado na Tabela 5.5, o atrito solo-muro tem forte influência sobre a estabilidade da obra devendo ser sempre considerado. Para avaliar a influência de sua magnitude no sistema, este foi variado de zero até a magnitude considerada para o atrito do solo contido, ou seja, de 0 a 30 graus.

Para configuração aplicada, os resultados mostram que todos os fatores de segurança aumentam com o aumento do atrito solo-muro.

Tabela 5.5 – Influência do atrito solo-muro.

H (m)	$\alpha$ (°)	$\Phi_{SPPS}$ (°)	$\alpha_{muro}$
1,8	15	20	1/6
$\delta_{Solo-Muro}$	$FS_d$	$FS_t$	$FS_f$
0	1,14	0,98	2,70
5	1,26	1,13	3,02
10	1,37	1,28	3,37
15	1,48	1,43	3,78
20	1,59	1,58	4,26
25	1,71	1,73	4,85
30	1,83	1,89	5,60

Através dos resultados apresentados na Figura 5.9, pode-se verificar que a influência sobre a segurança é ligeiramente superior para tombamento. Este crescimento estaria associado ao aumento do empuxo ativo vertical e a minimização do empuxo ativo horizontal. Este comportamento é favorável ao equilíbrio de forças e momentos, assim como, proporciona menor tensão máxima na fundação.

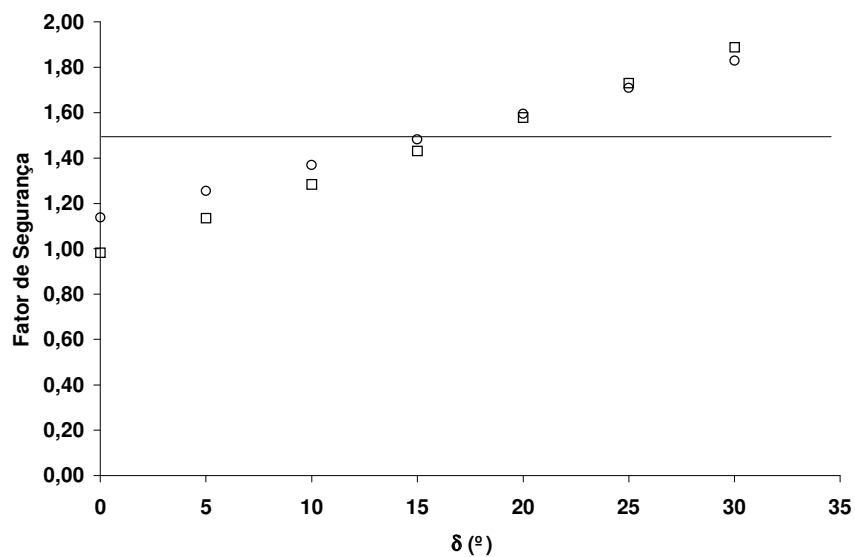


Figura 5.9 – Influência do atrito solo-muro.

### 5.3 – COMENTÁRIOS FINAIS

O maior diferencial do muro PET é a forte mobilização do atrito de interface, este foi minuciosamente estudado neste capítulo. Os diversos ensaios desenvolvidos possibilitaram quantificá-lo em cerca de 20 graus.

Nas primeiras análises, foi possível verificar que o sistema de contenção não seria viável com a aplicação de apenas uma garrafa envasada. Para uma garrafa, a altura da contenção deveria ser inferior a um metro. Neste sentido, estudos com duas e três garrafas em série foram desenvolvidos.

Os estudos em três garrafas mostraram a possibilidade de contenções com alturas bem superiores, em torno de 2,10m. No entanto, face ao elevado número de garrafas necessárias ao sistema, esta opção foi descartada.

Finalmente, a melhor alternativa foi de balizar o estudo no acoplamento de duas garrafas. Para um solo plastificado típico (coesão nula e ângulo de atrito 30 graus), este sistema mostrou que a altura poderia atingir 1,80m, conforme perfil construtivo apresentado na Figura 5.10.

Os estudos de sensibilidade mostraram o quanto é necessário pesquisar numericamente os modelos e arranjos de estruturas de contenção, visando a otimização do sistema. Ao mesmo tempo, este estudo evidenciou o quanto é relevante a adoção de parâmetros mais consistentes.

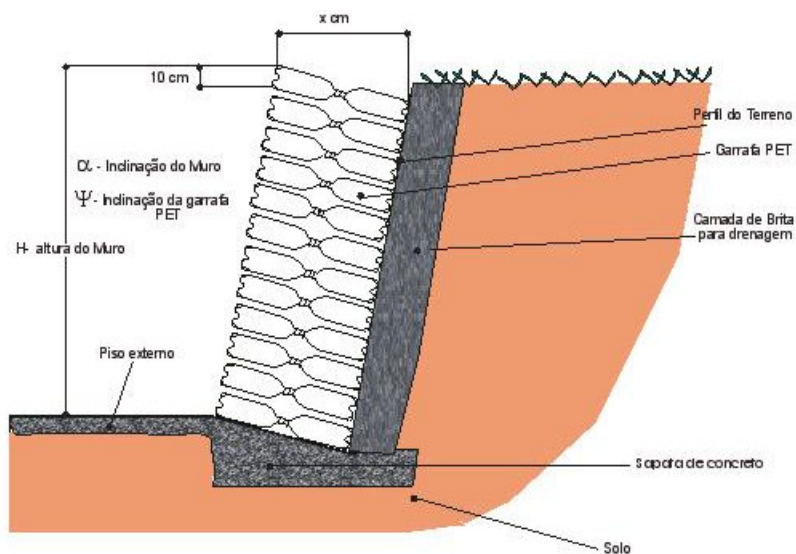


Figura 5.10 – Perfil construtivo muro PET.

### **ENSAIOS DE LABORATÓRIO PARA ESTUDO DA APLICAÇÃO DE GARRAFAS PET EM OBRAS DE FUNDAÇÃO**

#### **6.1 - INTRODUÇÃO**

As fundações são elementos estruturais com função de transmitir as cargas da estrutura ao terreno onde se apóia (Azeredo, 1988). Em obras de engenharia, a fundação é indispensável, pois ela é responsável pela garantia das condições de estabilidade, conservação e manutenção da vida útil das estruturas que nelas estão assente.

Segundo Presa (2001) as fundações podem ser concebidas e executadas para garantir quatro requisitos básicos:

- Segurança contra a ruptura, tanto no que diz respeito a resistência dos elementos estruturais que compõem a infra-estrutura, quanto a resistência do terreno que lhe dá suporte;
- Deslocamentos, especialmente os recalques, compatíveis com o tipo de estrutura e com a funcionalidade da mesma;
- Durabilidade que garanta a qualidade da fundação;
- Não oferecer riscos de segurança contra a ruptura e recalques das fundações de estruturas vizinhas.

### **6.1.1 - Escolha do Tipo de Fundação**

A escolha de uma fundação está condicionada a dois requisitos básicos que são as condições técnicas e econômicas da obra em questão. Após escolhida a fundação que atenda tecnicamente o caso em questão, procede-se um estudo comparativo de custo dos diversos tipos selecionados visando com isso escolher o mais econômico. Assim é sensato estudar mais de uma alternativa e comparar custos e prazos de execução.

As fundações podem ser separadas em dois grandes grupos:

- Fundações superficiais
- Fundações profundas

Segundo a NBR 6122 (ABNT /1996) as fundações superficiais são elementos de fundação em que a carga é transmitida ao terreno, predominantemente pelas pressões distribuídas sob a base da fundação, e em que a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação. Incluem-se neste tipo de fundação as sapatas, os blocos, as sapatas associadas, as vigas de fundação e as sapatas corridas. Com relação à fundação profunda, a norma citada, define como elemento de fundação aquela que transmite a carga do terreno pela base através da resistência de ponta e/ou por sua superfície lateral através da resistência de fuste. A fundação deve estar assente a uma profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta. Neste tipo de fundação incluem-se as estacas, os tubulões e os caixões.

As estacas podem ser conceituadas como peças de pequena seção transversal em relação ao seu comprimento, submetidas a esforços axiais de compressão. Estes esforços são resistidos pelo atrito das paredes laterais da estaca contra o terreno e pelas reações exercidas pelo terreno sobre a ponta da estaca. É importante salientar que a estaca pode resistir pelo atrito lateral e pela ponta, ou só por atrito lateral ou apenas pela ponta dependendo das condições do terreno, podendo ser executada por cravação ou por escavação.

Este capítulo aborda a utilização de garrafas PET como estrutura de fundação com cargas de pequeno porte, submetidas a esforços apenas de compressão e situada

acima do nível d'água. A seguir estão descritos os ensaios realizados para obtenção dos parâmetros de projeto, bem como o uso destes, em simulações de estruturas de fundação, compostas por garrafas PET – “Estaca PET”, como preliminarmente ilustrado na Figura 6.1.

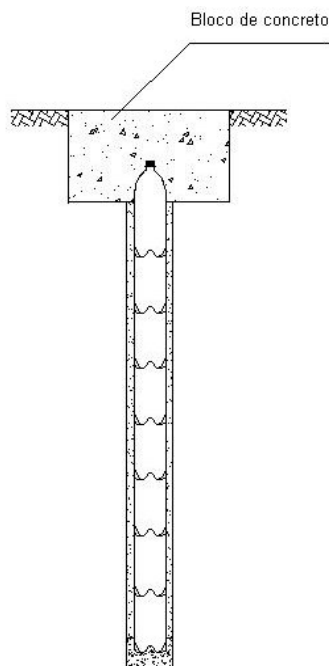


Figura 6.1 – Esquema construtivo da Estaca PET.

## **6.2 - ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES**

### **6.2.1 - Preparação dos Moldes Adaptadores para Ensaios de Compressão**

Devido à geometria das garrafas PET, que apresenta forma irregular em suas extremidades, foi necessário, confeccionar ‘adaptadores’ (base e topo) para minimizar, durante o ensaio, as concentrações de carga nestas regiões.

O material utilizado para confecção dos adaptadores foi uma resina de poliuretano fluida com nome comercial ‘resina cristal’. O seu processo de enrijecimento foi realizado através da adição de um catalisador de cobalto, utilizado na proporção de 9ml para cada litro de poliuretano fluido. A quantidade de cobalto adicionada foi definida em função do tempo de reação e da resistência do material, ou seja, quanto maior a quantidade adicionada menor o tempo de enrijecimento e menor a resistência.

Devido a este comportamento, optou-se pela quantidade de catalisador definida anteriormente, implicando num tempo de cura de 48h para cada adaptador. Outro fator relevante foi a temperatura, 36°C, gerada durante o processo de enrijecimento, pois possibilitou a utilização da própria garrafa PET para confecção dos adaptadores.

### **Teste de Resistência a Compressão Simples com a Resina de Poliuretano**

Antes da confecção dos adaptadores foi necessário verificar a resistência, a compressão da resina e suas deformações durante o carregamento. Para isto foram moldados dois corpos de prova com diâmetros e alturas de 50 e 100mm, respectivamente. As Figuras 6.2a e 6.2b ilustram o corpo de prova (CP) após a moldagem e realização do ensaio.

### **Resultados dos Ensaio de Compressão Simples com a Resina de Poliuretano**

Após a moldagem, os corpos de prova foram capeados com enxofre para terem suas bases regularizadas, com o objetivo de evitar pontos de concentração de carga durante o carregamento. O comportamento da resistência da resina a ser utilizada para os moldes de encaixe das garrafas PET, foi avaliado através dos ensaios de compressão simples. A Figura 6.3 ilustra os gráficos obtidos para os corpos de prova 1 e 2.

Os resultados apresentados na Figura 6.3, indicam um comportamento linear compreendido pelas fases de acomodação e ruptura. A acomodação pode ser devido a fatores particulares ou conjugados. O trecho definido como acomodação da amostra de resina pode estar associado a: existência de ar na amostra; ocorrência de superfícies irregulares nos contatos; engrenagem do equipamento; e comportamento real da amostra. De acordo com as leituras, a acomodação foi alcançada para os níveis de tensão 10,6 e 15,7MPa e deformações axiais de 1,53 e 1,39%, respectivamente. Estas deformações correspondem a deslocamentos verticais de 1,50mm e 1,35mm, respectivamente. Uma vez que se trata do mesmo material, tem-se sugerido que a acomodação estaria associada a fatores conjugados e não particulares.





Figura 6.2a - CP pós-moldagem.

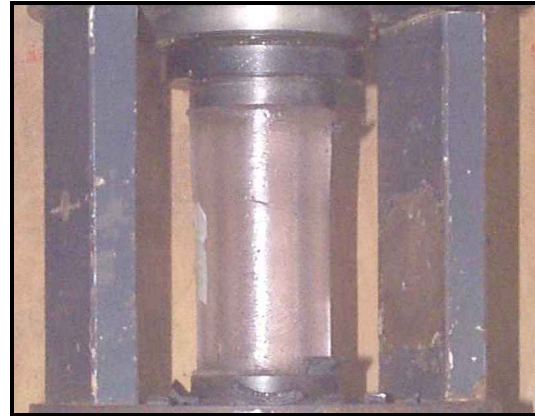


Figura 6.2b – CP pós-ensaio.

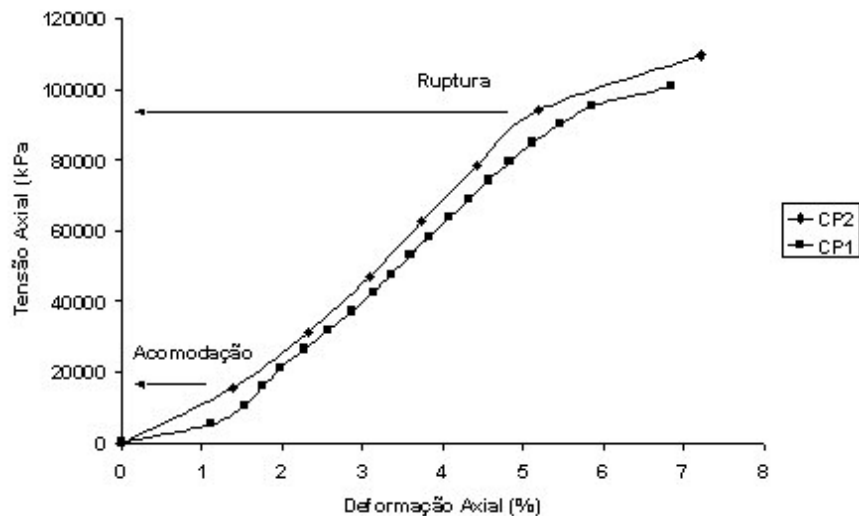


Figura 6.3 – Compressão simples CP - 1 e CP - 2.

Para avaliação da rigidez dos trechos de acomodação foram calculados os respectivos módulos de elasticidade. Os valores encontrados foram de 0,7GPa e 1,1GPa. Para determinação do módulo de elasticidade no trecho linear (Figura 6.4), os pontos extremos (acomodação e pós-ruptura) foram desconsiderados. Com base nos dois ensaios, o módulo de elasticidade da resina foi de 2,1GPa.

Os ensaios também demonstraram que a resina apresenta ótima resistência a compressão, com tensão de ruptura de 95MPa, correspondente a carga axial de 180kN, aplicada sobre os corpos de prova.

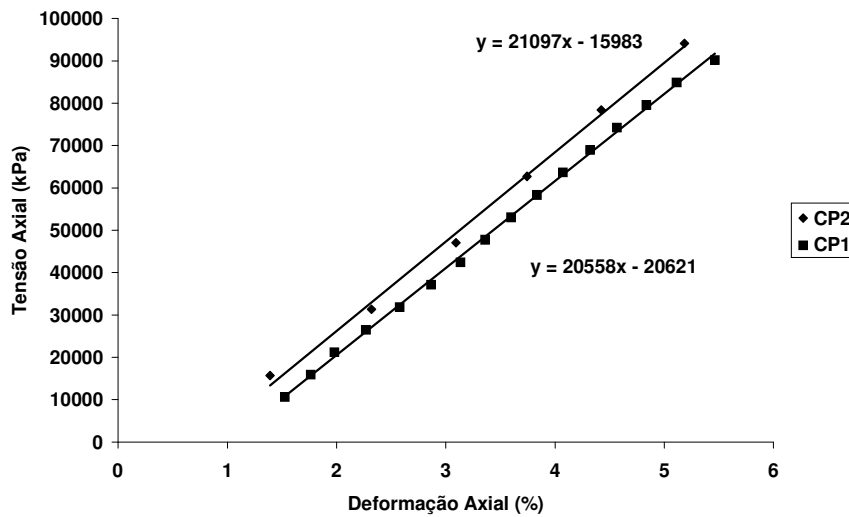


Figura 6.4 –Módulo de elasticidade da resina.

Após a obtenção dos dados de resistência e deformação da resina de poliuretano, a base foi então confeccionada com altura 100mm e diâmetro de 150mm e o topo com altura de 200mm e diâmetro igual a 150mm.

Os adaptadores de base e topo foram confeccionados com a utilização de tubos de PVC (utilizados como fôrma) com diâmetro interno de 150mm e alturas de 100 e 200mm, respectivamente. Além dos tubos de PVC, foi utilizado um anel e uma base inferior em madeira que serviu para conter o fluido de poliuretano. Neste anel superior existem duas aberturas laterais e uma central. A primeira tem o propósito de facilitar a entrada do fluido de poliuretano e a segunda, central, permite a introdução da garrafa PET na fôrma de PVC. Antes de introduzir a garrafa PET no interior da fôrma de PVC, esta foi preenchida até a altura de 50mm com fluido de poliuretano e logo em seguida a garrafa PET (com água) foi introduzida e o volume da fôrma pode ser completado.

A garrafa foi banhada em vaselina, antes da imersão, para evitar a adesão a resina de poliuretano. A garrafa permaneceu imersa por 48 horas até a desmoldagem. A Figura 6.5 ilustra o processo de fabricação dos adaptadores, para realização do ensaio de compressão simples.

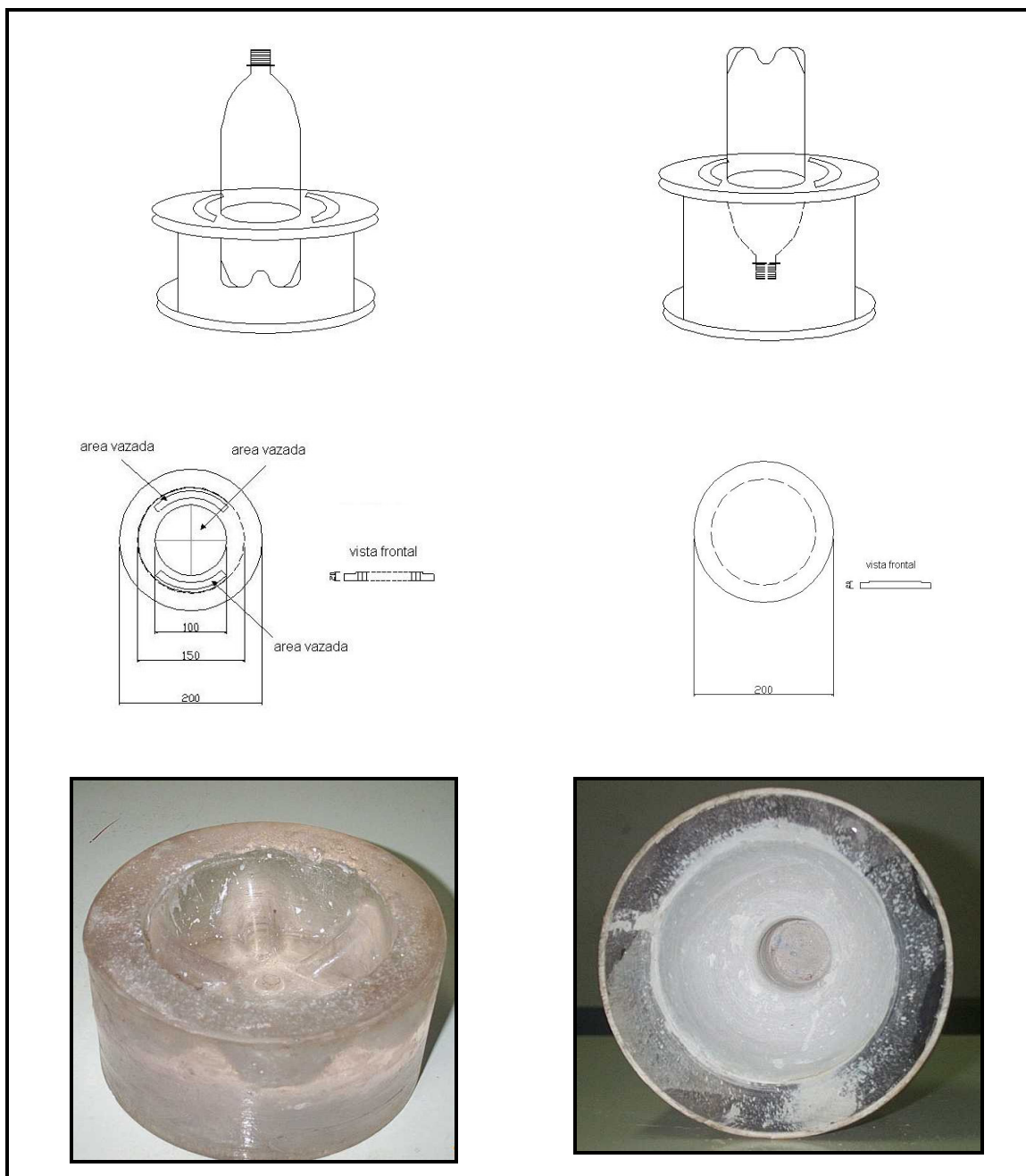


Figura 6.5 – Processo de fabricação dos adaptadores.

### 6.2.2 - Determinação da Deformação da Garrafa PET Envasada com Água

As características da garrafa PET apresentadas no Capítulo 3 trazem apenas informações sobre sua resistência de ruptura e trabalho, que são informações importantes para os fabricantes de refrigerantes. Para o presente trabalho, além dos

dados de resistência, a quantificação da deformação da garrafa é de extrema importância para sua aplicação como estrutura de fundação.

Para realização deste ensaio, a garrafa G22 foi preenchida com água e submetida a carregamentos axiais, sendo medida a sua deformação axial e radial para diversas cargas aplicadas.

Foi utilizado, na realização deste ensaio, uma mesa com um furo central de diâmetro 150mm e sobre esta colocou-se um anel em aço com diâmetro de 200mm. Este anel serviu como suporte para os defletômetros de base magnéticas. Os três defletômetros utilizados mediam os deslocamentos radiais da garrafa, sendo estes distribuídos ao seu redor, a cada 120 graus. A opção por três defletômetros teve a finalidade de avaliar como se processava o deslocamento em torno da garrafa. Os defletômetros utilizados têm precisão de 0,01mm e o curso máximo de 10mm. Os deslocamentos verticais foram medidos pela própria máquina de compressão axial. A Figura 6.6 ilustra o ensaio realizado para determinação da deformação radial da garrafa.

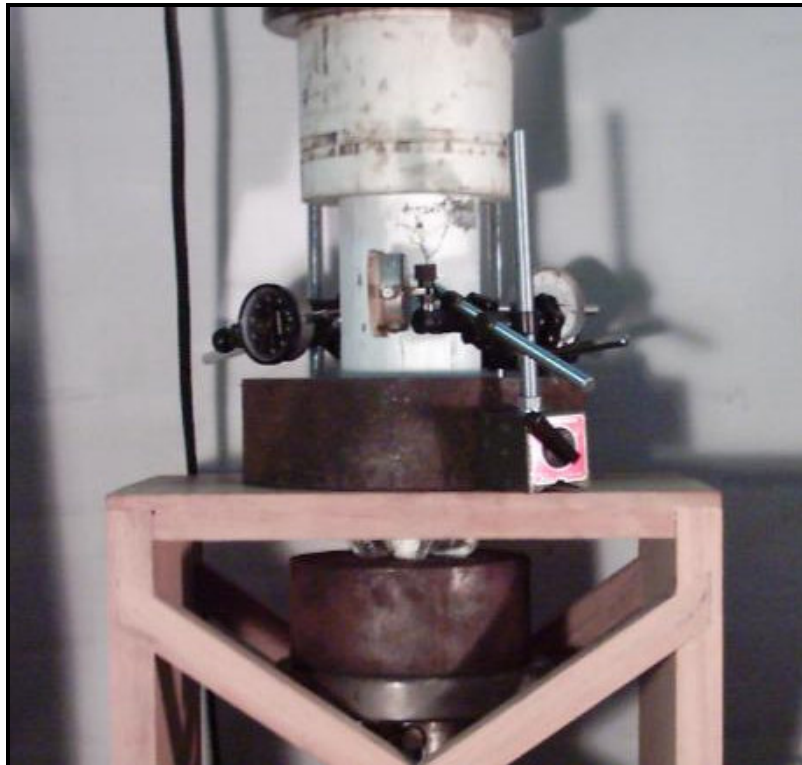


Figura 6.6 – Estágio intermediário do ensaio.

## Metodologia do Ensaio

A garrafa utilizada para o ensaio foi submetida a uma carga máxima de 7,51 kN com 15 estágios intermediários para medidas de seus deslocamentos. A cada estágio de carregamento eram feitas leituras radiais nos três defletômetros e a leitura axial, esta fornecida pela máquina. Neste ensaio não foi utilizado o adaptador inferior, apenas o superior. A garrafa utilizada é do tipo 2 e foi pintada com cal para facilitar a visualização da sua deformação ao longo do carregamento.

Como observado no Capítulo 3, a tensão necessária para o rasgo do plástico é em torno de 1019kPa e a tensão obtida no ensaio para o diâmetro médio de 97,3mm foi de 1010kPa. A velocidade utilizada para os ensaios de compressão simples foi de 7mm/minuto.

## Resultados do Ensaio para Determinação da Deformação da Garrafa

O comportamento carga *versus* deformação da garrafa com água, apresentou dois estágios (Figura 6.7). No primeiro, a garrafa mostrou um comportamento linear, com módulo de elasticidade calculado em cerca de 11,71MPa (Figura 6.8).

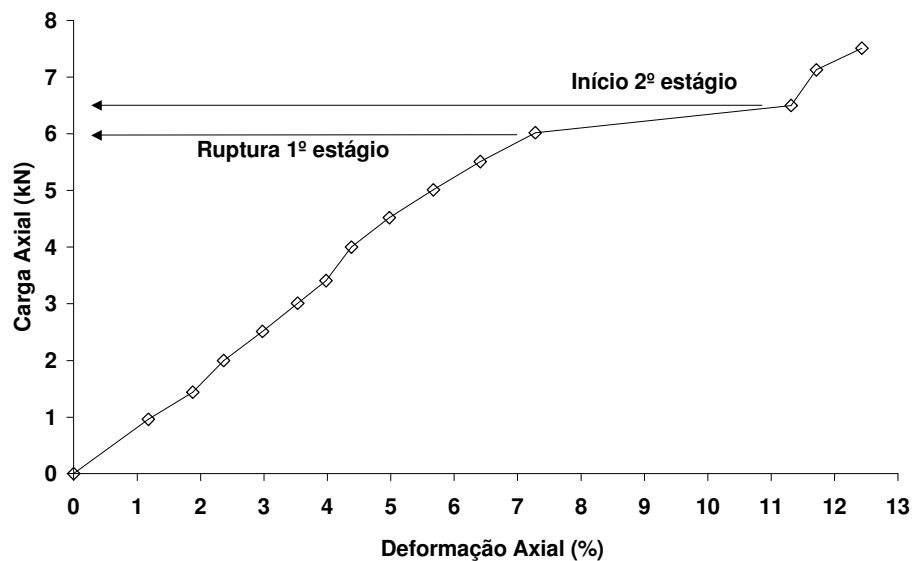


Figura 6.7 – Comportamento da garrafa com água.

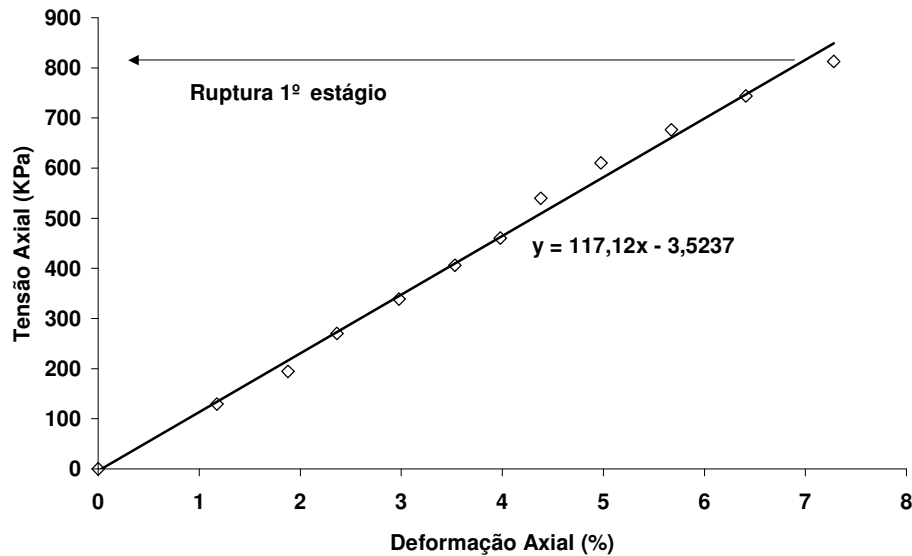


Figura 6.8 – Módulo de elasticidade da garrafa.

Um colapso foi observado para carga axial de 6,0kN (Figura 6.7), sendo a deformação axial igual a 7,3%, ou seja, 24,5mm de deslocamento vertical. Este primeiro colapso será aqui definido como ponto de ruptura. Após a ruptura, a garrafa recupera nitidamente resistência ao alcançar deformação axial de 11,3% (38mm), quando a carga axial mobilizada foi de 6,5kN. Este comportamento pode estar associado a uma plastificação inicial seguida de mobilização das fibras do plástico após deslocamento vertical complementar de 13,5mm. No sentido de evitar o rasgo da garrafa e possível inundação do motor do equipamento de compressão, a 12,42% de deformação axial o ensaio foi paralisado.

Interessante observar que, neste ensaio, não foi detectada a fase de acomodação, como apresentado para a resina. Cabe relatar que a garrafa PET estava assente diretamente na base do equipamento (sem o molde de base) com o topo sendo acondicionado pelo molde superior. Vale destacar, tem-se que, mesmo na fase de acomodação (Figura 6.3), o módulo de elasticidade da resina foi bem superior ao calculado para garrafa com água, ou seja, cerca de 1GPa contra 12MPa (mais de oitenta vezes maior). No ensaio com resina, o nível de tensão na fase de acomodação foi de 10 a 15MPa, contra 1MPa para toda gama de tensões aplicada na garrafa PET com água. Este comportamento sugere que a acomodação evidenciada no comportamento da

resina, está associada ao nível de tensão adotado em contrapartida às rigidezes mobilizadas. Desta forma, para o caso em questão, os resultados não evidenciaram processos de acomodação inicial no ensaio.

Os resultados obtidos para a deformação radial média da garrafa estão apresentados na Figura 6.9. Para o final do primeiro estágio, a deformação radial média foi de 3,45% (1,68mm), sendo igual a 5,22% (2,54mm) no início do segundo estágio.

Considerando todas as leituras do ensaio, o coeficiente de Poisson, da garrafa com água, foi de 0,51 (Figura 6.10), similar a condição não drenada, ou seja, congruente com 0,5. Considerando o trecho até o final do 1º estágio (Figura 6.11), este parâmetro foi quantificado em 0,48. Considerando não haver variação de volume durante o ensaio, estes valores ratificam as leituras de deslocamentos horizontais obtidas pelos três deflectômetros.

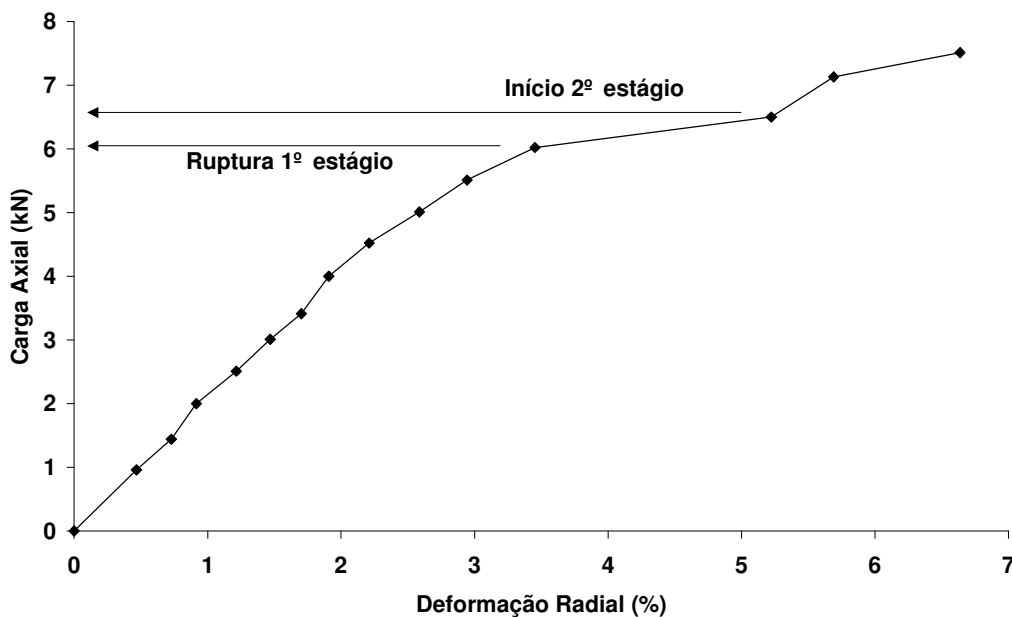


Figura 6.9 – Comportamento da deformação radial da garrafa.

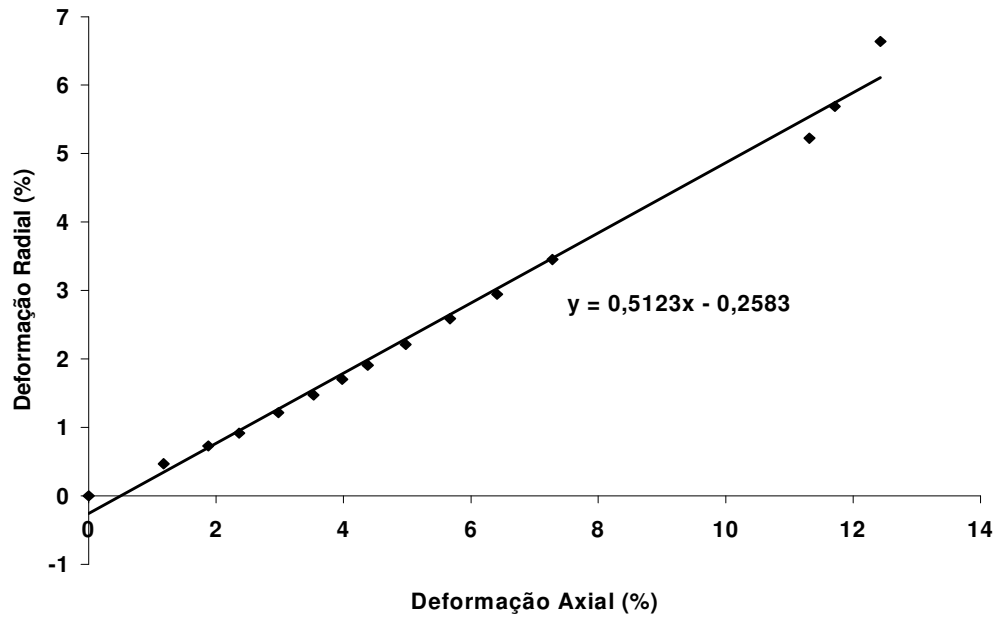


Figura 6.10 – Coeficiente de poisson da garrafa com água.

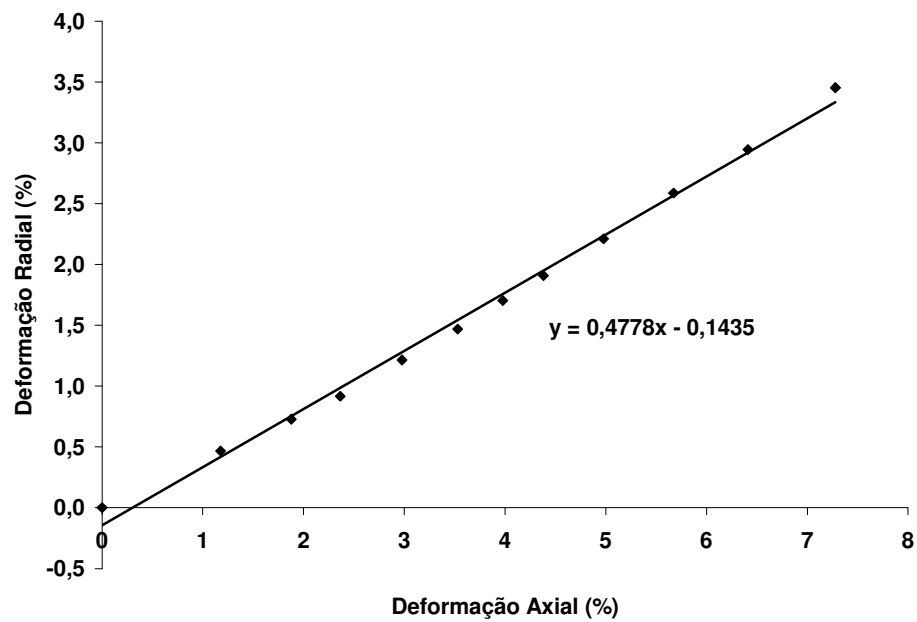


Figura 6.11 – Coeficiente de poisson da garrafa com água – 1º Estágio.

### 6.2.3 - Ensaio de Compressão com Areia Adaptador no Topo e na Base

Esta modalidade de ensaio foi definida com objetivo de avaliar a influência do confinamento da base inferior quando submetido a cargas axiais, induzindo a ruptura na



parte mais central da garrafa. As garrafas utilizadas neste tipo de ensaio foram envasadas com areia e suas características estão descritas na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Características das garrafas PET envasada com areia (adaptador topo e base).

Massa total garrafa	(kg)	3,788	3,589	3,582	3,792
Massa específica seca	(kg/m <sup>3</sup> )	1770	1710	1710	1760
Índice de vazios mínimo.		0,62	0,47	0,47	0,63
Tipo garrafa		2	1	1	2
Número da garrafa		G4	G5	G9	G13

### Metodologia do Ensaio

Para este tipo de ensaio as garrafas também foram pintadas com cal e foram lidos apenas os seus deslocamentos verticais até atingir a ruptura. A velocidade foi de 7mm/min e o processo de envasamento com areia foi o mesmo descrito no Capítulo 3. Em todos os ensaios de compressão simples foi utilizada a mesma metodologia e o mesmo equipamento. A Figura 6.12 mostra uma fase intermediária do ensaio com base inferior e superior para a garrafa número 4 (G4).

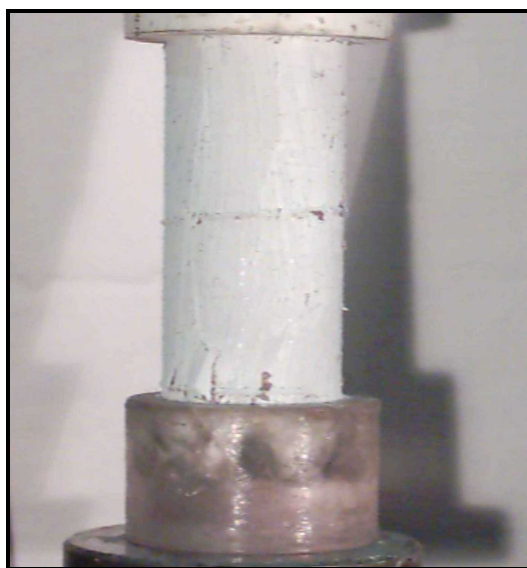


Figura 6.12 – Ensaio com base e topo.

## Resultado com Adaptador no Topo e na Base

Na Figura 6.13, apresenta-se a curva tensão axial *versus* deformação axial para garrafa G4, que foi fixada ao equipamento por moldes de topo e base. O resultado possibilitou identificar quatro fases distintas de comportamento, a saber: Fase I – Acomodação; Fase II – Linear; Fase III – Dúctil; Fase IV – Escoamento do Plástico com Enrijecimento. Destacam-se ainda dois pontos de ruptura. O primeiro associado ao início de escoamento do plástico, aqui denominado de “ponto de ruptura”; o segundo, referente ao final do ensaio, quando ocorre o rasgo do plástico da garrafa, com a liberação e desconfinamento da areia.

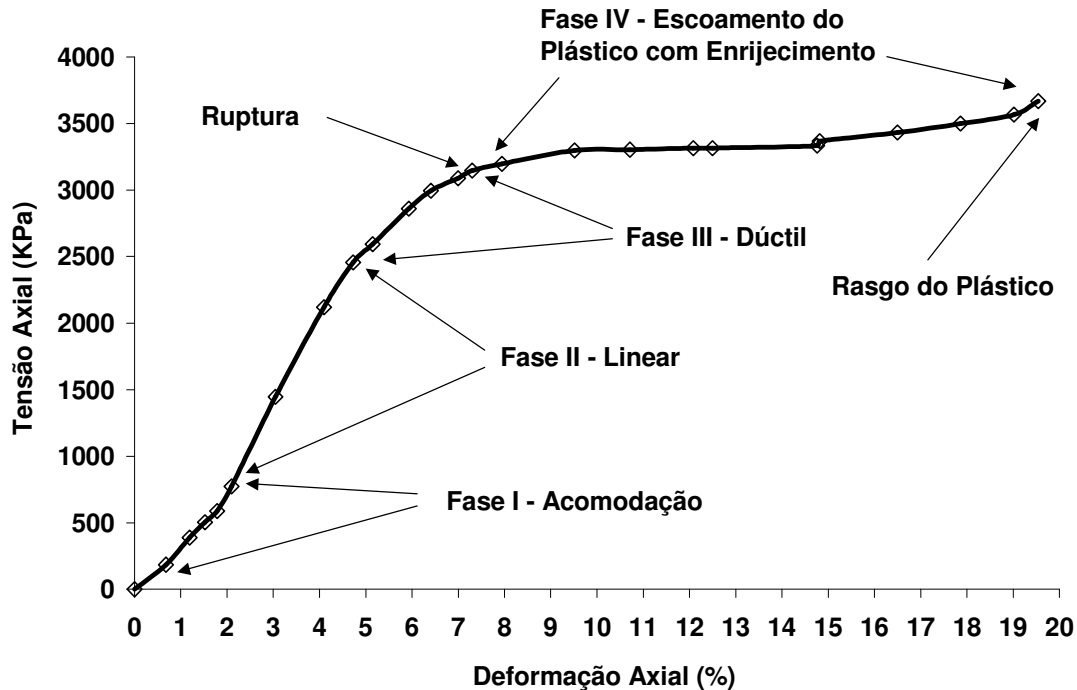


Figura 6.13 - Comportamento da G4 – Molde de Topo e Base.

### 6.2.4 - Ensaio de Compressão com Areia Adaptador apenas no Topo

Este ensaio consistiu em avaliar a resistência do conjunto PET- areia sem a restrição de deformação imposta pela base. A Tabela 6.2 mostra as garrafas utilizadas neste ensaio e a Figura 6.14 ilustra o ensaio com a garrafa número 5 (G5).

Tabela 6.2 – Características garrafas PET envasada com areia (adaptador base).

Massa total garrafa	(g)	3,484	3,588	3,381	3,394
Massa específica seca	(kg/m <sup>3</sup> )	1630	1720	1620	1620
Índice vazios mínimo.		0,75	0,46	0,76	0,75
Tipo garrafa		2	1	1	1
Número da garrafa		G5	G6	G17	G19



Figura 6.14 – Ensaio sem base.

### Resultados do Ensaio com Adaptador de Topo

Para exemplificar apresenta-se, na Figura 6.15, a curva tensão axial *versus* deformação axial para garrafa G5.

Similarmente ao comportamento com molde de topo e base, quatro fases distintas puderam também ser identificadas. No entanto, para o ensaio sem o molde da base, a Fase I – Acomodação, mostrou-se bem menor, com deformação axial de 0,53% (deslocamento vertical de 1,8mm) contra 1,79% (deslocamento vertical de 6,0mm). da opção com molde nos dois extremos. Em ambos os casos, a ruptura foi considerada como sendo a interface entre as Fases III e IV, ou seja, quando do início do escoamento do plástico.

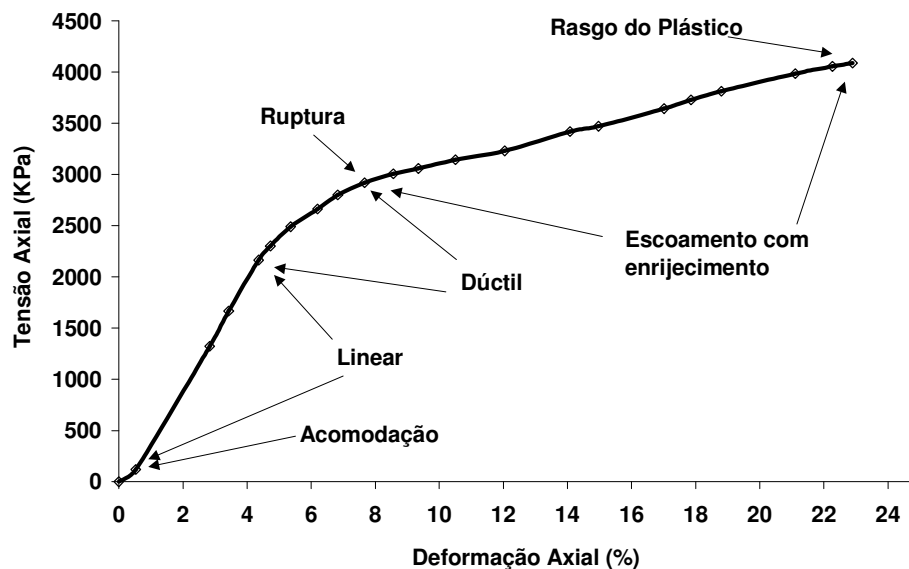


Figura 6.15 - Comportamento da G5 – Molde de Topo.

O objetivo da análise que se segue é o de avaliar comportamentos diferenciais face as diferenças dos critérios de apoio utilizados. Acrescenta-se a este estudo a inserção dos dados obtidos com o ensaio da garrafa com água, quando se pode verificar a eficiência proporcionada pela inserção de areia. Os resultados estão apresentados na Figura 6.16.

Como pode ser observado, o ponto de escoamento da garrafa com água, assemelha-se ao ponto de escoamento das garrafas com areia. Esta evidência comportamental facilita a definição do ponto de ruptura das garrafas PET envasadas com areia. Assim, o ponto de ruptura da garrafa envasada será o mesmo que proporciona o início do escoamento da garrafa com água. Para o caso em questão, esta deformação foi igual a 7,3%, ou seja, este valor pode ser tomado como forte referência à ruptura, independentemente do material utilizado para o envasamento.

A Figura 6.16 mostra o comportamento da garrafa G4 e G5 com areia. O resultado comparativo mostra e evidencia o ganho significativo de resistência proporcionado pelo envasamento com areia. Destaca-se também a congruência do ponto de ruptura. No entanto, para o início do 2º estágio, para a garrafa com água, na escala de observação, não se verifica um reflexo deste comportamento das resistências das

garrafas com areia. A Tabela 6.3 resume alguns quantitativos importantes para discussão.

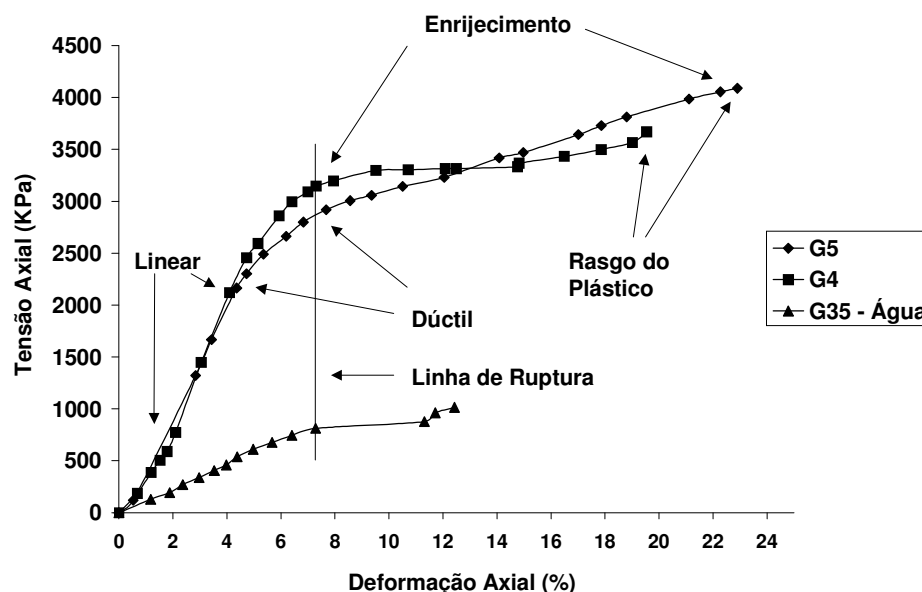


Figura 6.16 - Efeito do molde e envasamento no comportamento.

Tabela 6.3 – Cargas e tensões de ruptura.

Garrafa	Ruptura (kPa)	Ruptura (kN)	Molde	Tipo
G5	2919	21,5	Topo	2
G4	3146	23,5	Topo e Base	2
Água - G22	813	6,0	Topo	2

De acordo com os dados apresentados, o ganho de resistência foi de 459% para a G5 e 487% para G4 em relação à garrafa envasada com água. O ganho maior para garrafa G4 pode estar associado à contribuição do enrijecimento da base proporcionada pelo apoio de base. No entanto, a deformação requerida para ruptura mostrou-se muito próxima, sendo considerada igual a 7,3%. O apoio de base pode também ser o condicionador da maior taxa de acomodação observada e da maior rigidez na fase linear. O molde de base também refletiu no grau de não linearidade do comportamento na fase dúctil, sendo mais suave para G5. Reflexos do molde de base foram também percebidos na fase de enrijecimento. No ensaio sem molde de base o enrijecimento é linear e progressivo até o rasgo do plástico. No entanto, no ensaio com molde de base

parece haver um escoamento do tipo fluência, seguido de um ganho de resistência em um segundo estágio, similar ao ocorrido com a garrafa com água. Quanto ao rasgo da garrafa, de acordo com estes ensaios, este ocorre primeiramente para o ensaio que utiliza o molde de base.

Considerando o aspecto macroscópico do comportamento, a ruptura da garrafa com água ocorreu para tensão axial de 813kPa. Sendo um estado hidrostático de distribuição de tensões, tem-se que a ruptura deu-se para tensão horizontal de mesmo valor. Com a inserção de areia, a tensão axial de ruptura foi majorada para cerca de 3000kPa. Considerando que a tensão horizontal de ruptura, ou seja, aquela que causa o início do escoamento do plástico é única, o estado de tensão na ruptura, para garrafa envasada com areia é de tensão principal maior igual a cerca de 3000kPa e tensão principal menor igual a cerca de 800kPa. De forma especulativa, para o intercepto de coesão nulo, tem-se um ângulo de atrito mobilizado, no início do escoamento, igual a 35,4 graus, típico de areias densas. Este estado de tensão está ilustrado no gráfico apresentado na Figura 6.17.

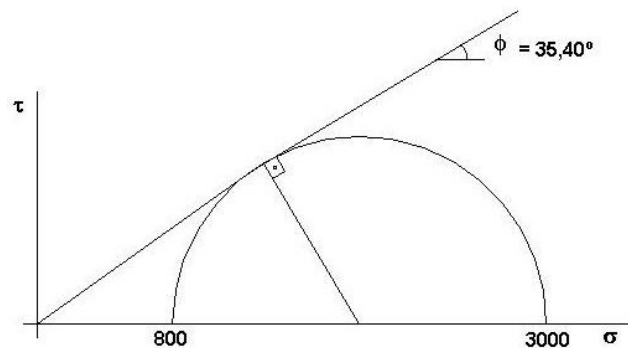


Figura 6.17– Estado de tensão especulado na ruptura (início do escoamento).

Cabe salientar que o ângulo de atrito de pico encontrado para os ensaios de cisalhamento direto (Figura 3.11) foi de 40,36 graus. O ângulo aqui determinado, refere-se àquele mobilizado no início do escoamento. Este valor superior, pode também estar associado a uma maior densificação do material e/ou maior restrição ao rearranjo, proporcionado pela rigidez das paredes do equipamento de cisalhamento direto.

O efeito relativo da influência do molde de base sobre o módulo de elasticidade da Fase II – Linear está caracterizado pelo comportamento registrado no gráfico apresentado na Figura 6.18. Quantificado pelas linhas de tendência, o módulo de elasticidade foi de 69,91MPa (70MPa) para o ensaio com molde de topo e base e de 53,30MPa para o ensaio com uso de molde apenas no topo. Este resultado mostra que o molde de base aumenta o módulo de elasticidade da Fase II em mais de 30%. Comparando estas magnitudes com a obtida no ensaio da garrafa com água (11,71MPa), tem-se que a contribuição da rigidez do plástico da garrafa é significativa, sendo superior a 17%.

Na Figura 6.18, com o aumento da escala de observação é possível destacar a influência do molde de base na fase de acomodação. A influência pode ser considerada mínima para o ensaio sem molde de base (0,53%) mas razoável (1,79%) para o ensaio com molde de topo e base. Estes resultados também sugerem que a acomodação da garrafa no molde de base é mais difícil que a acomodação no molde de topo.

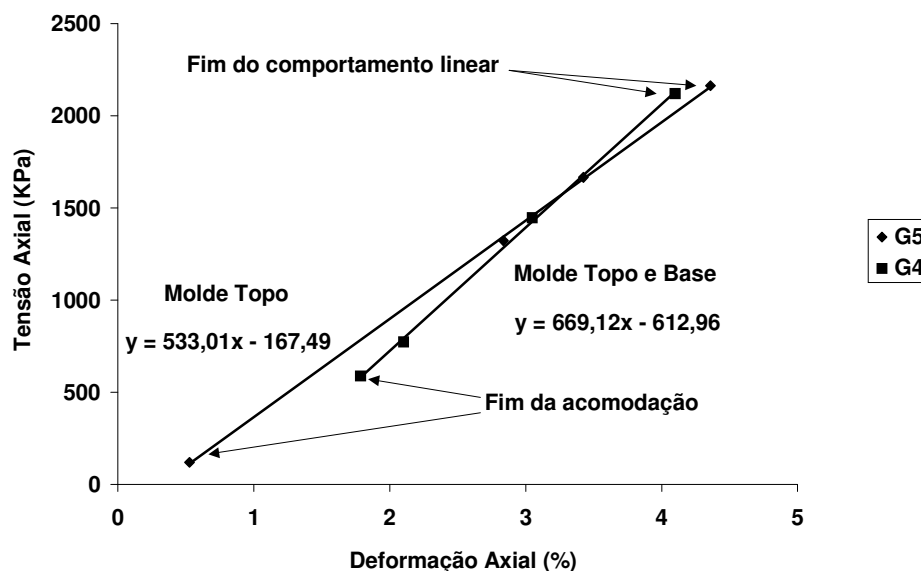


Figura 6.18 – Tensão *versus* deformação com aumento de escala de observação.

Face aos resultados, com foco no uso das garrafas PET (molde no topo e molde topo e base) envasadas com areia, como elementos de fundação, tem-se que a carga de trabalho poderia ser de 10kN (1tf) proporcionando fator de segurança superior a dois.

Com relação ao recalque, levando em consideração as condições mais desfavoráveis de campo, ou seja, confinamento nulo em toda extensão e inclusive na base, a garrafa tenderia a se comportar similarmente ao modelo sem molde de base. Neste caso, a taxa de deformação seria de 2,19%, considerando a acomodação de 0,56%. Não havendo acomodação no campo, a taxa líquida seria de 1,63%. Com esta taxa, para um recalque máximo de 25mm na estaca, esta poderia alcançar a profundidade de 1,5m. Este primeiro esboço comportamental, sugere que o elemento de fundação tenderá a ter recalque elevado

Para avaliar melhor o comportamento das garrafas envasadas com areia, novos ensaios foram realizados. Na Figura 6.19, são apresentados aqueles realizados com molde de topo e sem molde de base. Na Figura 6.20, são apresentados os ensaios realizados com molde de topo e base.

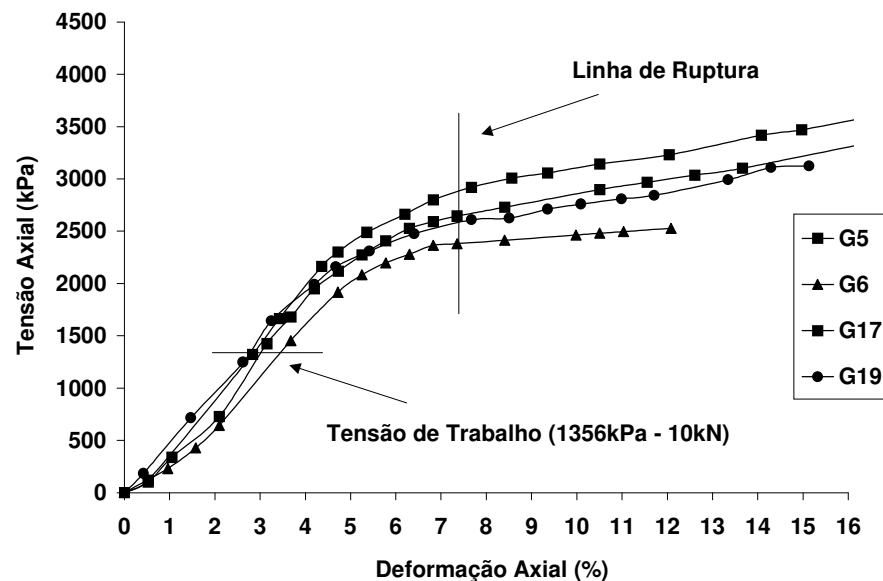


Figura 6.19– Comportamento comparativo para molde no topo.

Os resultados apresentados na Figura 6.19 mostram comportamentos similares entre as garrafas, com sensível variação das tensões de ruptura alcançadas para a deformação axial de 7,3%. Interessante observar que esta deformação sugerida ocorreu para o início do enrijecimento em todo os ensaios. Face ao fator de segurança proposto



para uso deste elemento em engenharia ( $FS=2$ ), esta variação encontrada para carga de ruptura não compromete a segurança. Cabe realçar que os recalques são muito influenciados pela fase de acomodação, sendo interessante este efeito ser minimizado ao máximo por detalhamentos adequados para uso em campo.

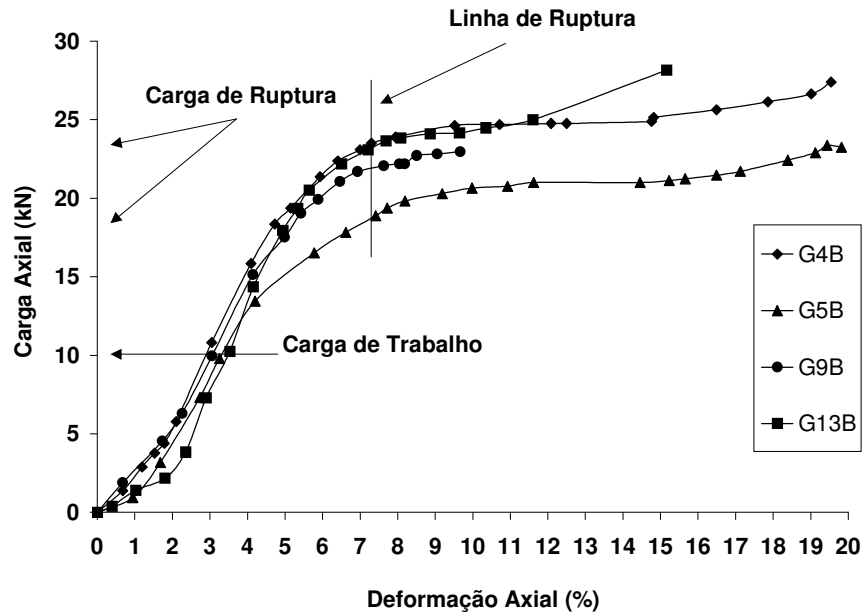


Figura 6.20 – Comportamento comparativo para molde no topo e base.

Os resultados com molde no topo e base, ilustrados na Figura 6.20, mostram também um comportamento similar entre as garrafas. De uma maneira geral, a consideração de ruptura para deformação de 7,3% parece atender. Similarmente ao caso anterior, o fator de segurança proposto para uso deste elemento em engenharia ( $FS=2$ ) não compromete a segurança.

Para uma avaliação comparativa entre todos os ensaios, têm-se estes apresentados na Figura 6.21. É interessante observar, que os resultados menos dispersos encontram-se na região da carga de trabalho (10kN). Este comportamento pode ser considerado positivo, pois minimiza as discrepâncias nos projetos de engenharia.

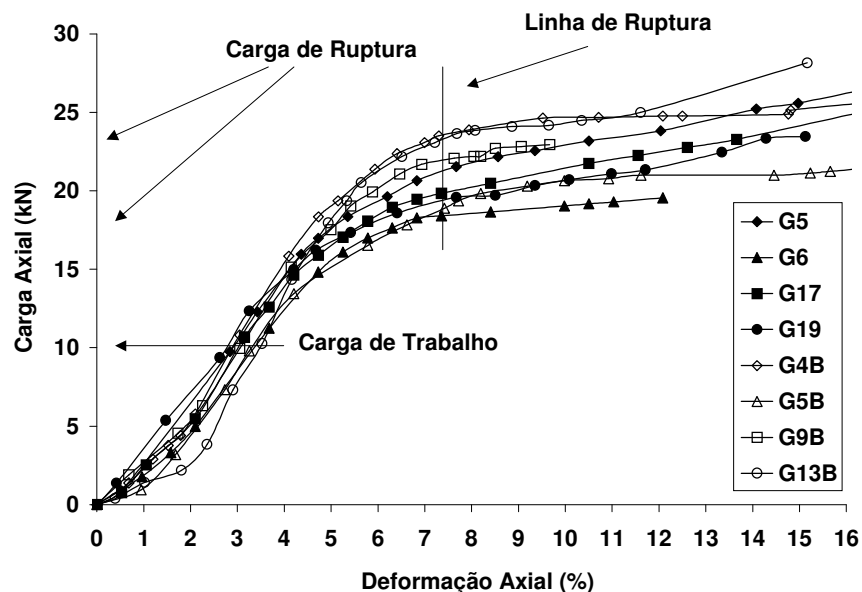


Figura 6.21 – Comportamento comparativo geral.

### Ensaio Cíclico de Carga e Descarga

Para avaliar o desempenho das garrafas envasadas com areia submetidas a obras com ciclos de carga-descarga, foram desenvolvidos dois ensaios cíclicos, sendo um com molde de apoio no topo e base (G7) e outro com molde apenas no topo (G1). A Tabela 6.4 resume as características das garrafas utilizadas para estes ensaios.

Tabela 6.4 – Características das garrafas PET, envasada com areia, usadas no ensaio de carga e descarga.

Massa total garrafa	(g)	3,464	3,771
Massa específica. seca	(kg/m <sup>3</sup> )	1620	1760
Índices vazios mínimo		0,75	0,63
Tipo garrafa		2	2
Número da garrafa		G1	G7

O resultado do ensaio cíclico, com molde no topo e base, está apresentado na Figura 6.22. Neste ensaio, pode-se observar um comportamento linear das tensões alcançadas no carregamento, até a deformação de 3%. Nos ensaios de carregamento

constante, a fase linear estendeu-se aproximadamente até a deformação axial de 4%, ou seja, o processo cíclico enrijeceu a garrafa, proporcionando um maior módulo de elasticidade.

O comportamento da deformação plástica na descarga, está apresentado na Figura 6.23. Apesar da forte histerese do sistema, as deformações plásticas foram relativamente baixas. Para deformação de 1,6%, referente a carga de trabalho sugerida de 10kN, esta situou-se em torno de 0,15%.

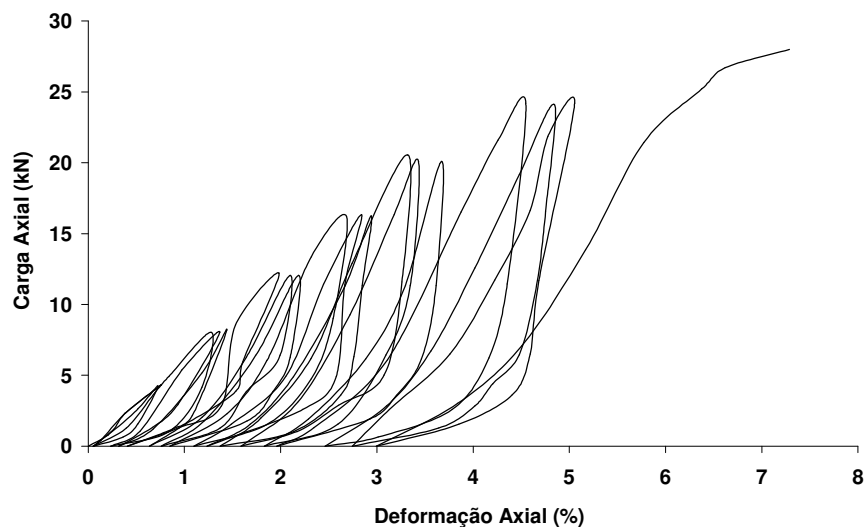


Figura 6.22 – Comportamento carga-descarga (G7) – molde no topo e base.

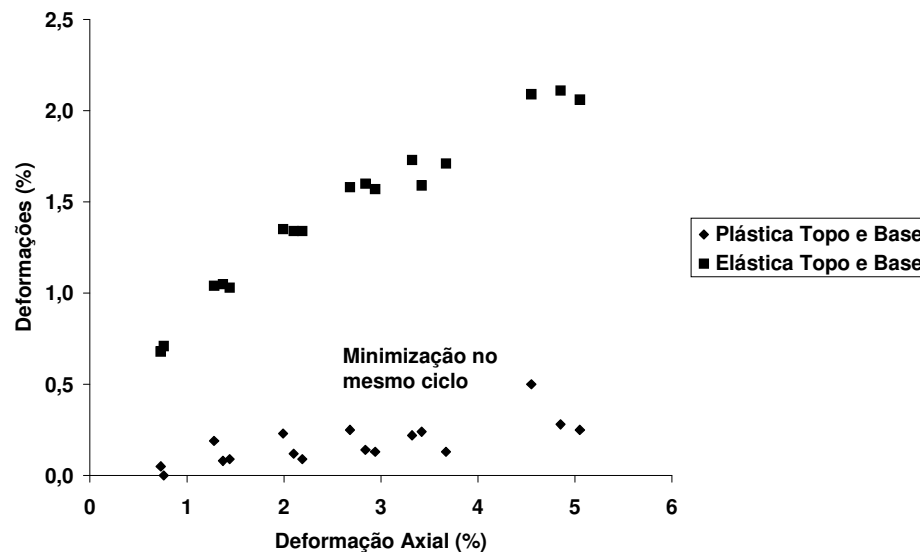


Figura 6.23 – Comportamento elasto-plástico - Molde no topo e base (G7).

No sentido de se poder avaliar o efeito cíclico na curva carga *versus* deformação, apresenta-se na Figura 6.24 os resultados conjuntos do ensaio cíclico com o ensaio de carga da garrafa G4, que também foi ensaiada com molde no topo e base.

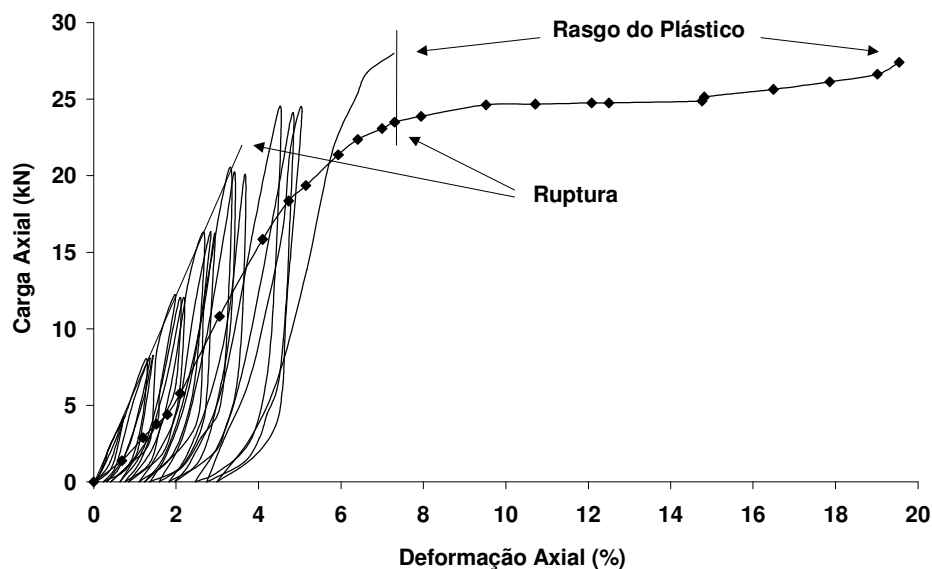


Figura 6.24 – Comportamento comparativo carga-descarga *versus* carga (G7 e G4).

Como pode ser observado, o ciclo de carga tem forte influência no comportamento da garrafa. O material se mostrou mais rígido, sem acomodação, com o ponto de ruptura antecipado para deformação 3,5%, ao invés de 7,3%. Destaca-se ainda o fato da ruptura por rasgo do plástico no ensaio cíclico ocorrer para mesma deformação registrada para o início do escoamento do plástico (7,3%) e carga igual àquela obtida para o ensaio de carga, com deformação controlada (28kN).

O comportamento cíclico foi também estudado para situação de molde apenas no topo. Na Figura 6.25 estão apresentados os resultados conjuntos do ensaio cíclico G1 e o de carga com deformação controlada G5.

Neste caso, até à ruptura, não foi observado um crescimento da rigidez com o processo cíclico de carga. Este comportamento sugere que o enrijecimento inicial da garrafa, como apresentado na Figura 6.24, estaria associado à restrição ao deslocamento da base, provocada pelo molde.

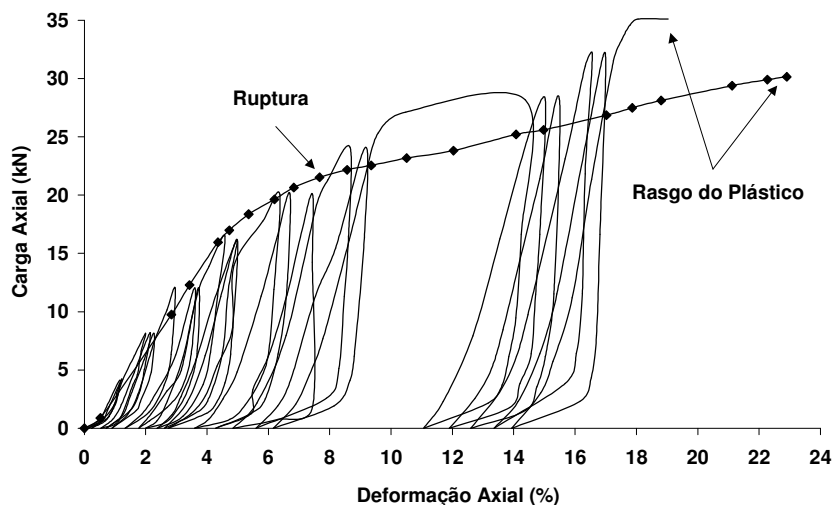


Figura 6.25 – Comportamento comparativo carga-descarga *versus* carga (G1 e G5) moldes apenas no topo.

No entanto, após a ruptura, tem-se uma garrafa mais rígida, sendo a carga no rasgo do plástico majorada para 35kN no ensaio cíclico, contra 30kN no ensaio convencional.

Procurando ilustrar o comportamento comparativo das deformações plásticas elásticas, tem-se na Figura 6.26 os resultados compilados para os ensaios cíclicos realizados com molde no topo e base e apenas no topo.

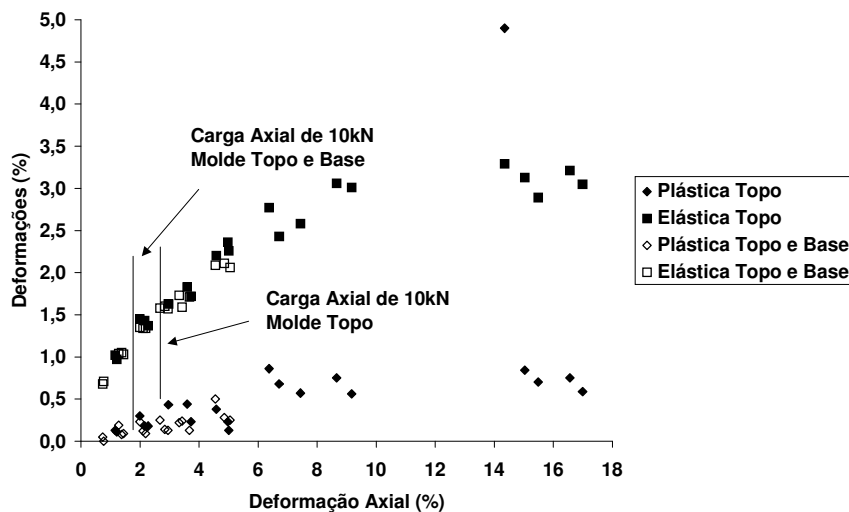


Figura 6.26 – Comportamento elasto-plástico comparativo - Molde no topo, Molde no topo e base (G1 e G7) respectivamente.

O ensaio cíclico aplicado aos dois arranjos mostrou que apesar do forte efeito na rigidez inicial, o mesmo não se reflete na magnitude das deformações plásticas, para o mesmo nível de deformação axial. No entanto, o efeito do aumento da rigidez pode ser refletido no deslocamento necessário para mobilização da carga de trabalho. Os valores estão em cerca de 1,6% para o arranjo com molde de topo e base e 2,7% para o molde apenas no topo. Assim, como pode ser observado na Figura 6.26, para a condição sem restrição de movimentos laterais na base, as deformações plásticas se tornam maiores.

### **6.2.5 - Ensaio de Compressão com Garrafas Acopladas**

Para uso como elemento de fundação, torna-se necessário o acoplamento das garrafas. Este acoplamento foi feito por corte aproximadamente a dois terços da altura. Em seguida, a garrafa foi preenchida com areia até atingir 30mm abaixo do corte. Após este procedimento, a garrafa intacta foi introduzida na garrafa cortada. Sendo necessária a utilização de fita adesiva nesta junção com a finalidade de apenas impedir a saída do material durante a aplicação de carga axial. A metodologia utilizada segue os mesmos princípios dos outros ensaios de compressão, como comentado anteriormente. A Figura 6.27 mostra o procedimento de confecção da amostra acoplada até a realização do ensaio



Figura 6.27– Confecção da amostra.

Foram ensaiadas três amostras com molde apenas no topo, cujas características estão descritas na tabela abaixo.

Tabela 6.5– Características garrafas PET, envasada com areia, usadas nos ensaios de acoplamento (adaptador de topo).

Massa total garrafa	(kg)	5,720	5,750	5,360
Massa especifica seca	(kg/m <sup>3</sup> )	1570	1710	1680
Índice de vazios mínimo.		0,81	0,68	0,70
Tipo garrafa		2	2	2
Altura	(mm)	520,00	505,00	490,00
Número da garrafa		G47+G24	G42+G45	G46+G43

## Resultado dos Ensaios

Para avaliar o desempenho do acoplamento, além dos três ensaios realizados foi desenvolvida uma avaliação comparativa com os resultados obtidos nos ensaios com molde apenas de topo (garrafas não acopladas). Os resultados encontram-se ilustrados na Figura 6.28.

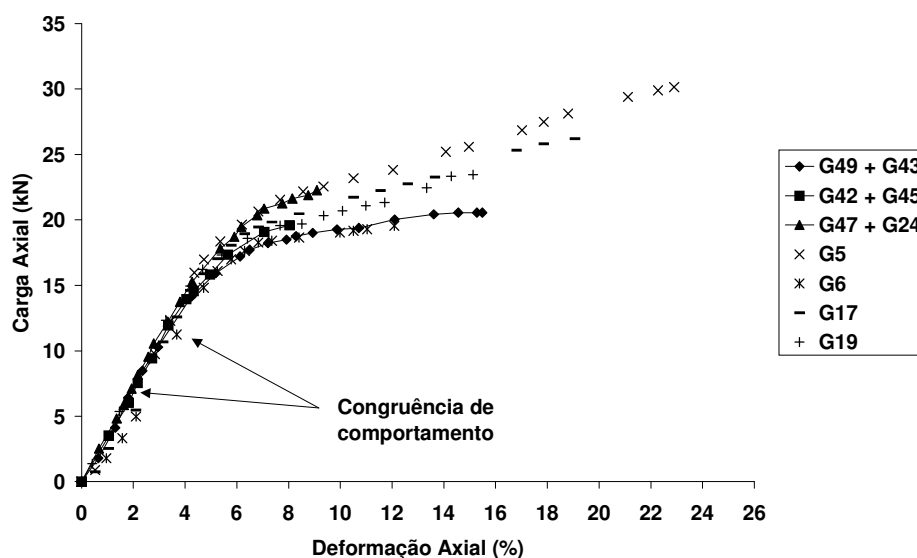


Figura 6.28 – Comportamento comparativo do acoplamento de garrafas.

O comportamento mostra uma boa eficiência do conjunto, que não evidenciou nenhuma discrepância com as garrafas ensaiadas unitariamente. Mesmo sendo o modelo composto de apenas um acoplamento, estando os elementos confinados no campo, o comportamento tende a ser satisfatório.

### 6.2.6 - Ensaio de Compressão - Carga Constante

Este ensaio teve o objetivo de avaliar o comportamento do material, em termos de fluência, ao longo do tempo. Foram ensaiadas três amostras com cargas constantes diferentes. A Figura 6.29 mostra o ensaio em andamento e as garrafas após os ensaios.



Figura 6.29 – Ensaio em andamento e amostras após os ensaios.

Foram ensaiadas três amostras com molde apenas no topo cujas características estão descritas na tabela abaixo.

Tabela 6.6 – Características garrafas PET, envasada com areia, usadas no ensaios de carga constante.

Massa total garrafa	(kg)	3,400	3,420	3,430
Massa específica seca	(kg/m <sup>3</sup> )	1590	1590	1600
Índice de vazios mínimo.		0,79	0,81	0,81
Tipo garrafa		2	2	2
Número da garrafa		G19	G23	G39

### Resultados dos Ensaios Carga Constante

Os ensaios de fluência, aqui denominados de ensaios com carga constante, foram executados, respeitando o tempo disponível para pesquisa e o custo da utilização dos



respectivos equipamentos de alta precisão e controle. Assim, os ensaios foram conduzidos num tempo inferior a 120 horas.

Dos ensaios de compressão simples desenvolvidos neste trabalho, têm-se que a carga de ruptura (início do escoamento) ficou compreendida entre 18,4 e 21,6kN, sendo a carga para o rasgo do plástico entre 19,6 e 25,6.

Para minimizar os efeitos desfavoráveis provenientes do baixo tempo de execução, um dos ensaios foi realizado numa carga bastante elevada, igual a 21,6kN. Esta carga foi aqui considerada como sendo representativa de 100% de mobilização. Para um estudo comparativo, cargas inferiores de 20,4kN e 16,8kN foram também aplicadas. Nestes casos, as taxas de mobilização foram de 94 e 78%, respectivamente.

Na Figura 6.30, os resultados dos ensaios mostram o adequado comportamento a fluência do material, sendo registradas as fases primária, transiente e secundária (permanente). Na fase primária tem-se a deformação desacelerando no tempo e na fase secundária, a deformação sendo constante no tempo.

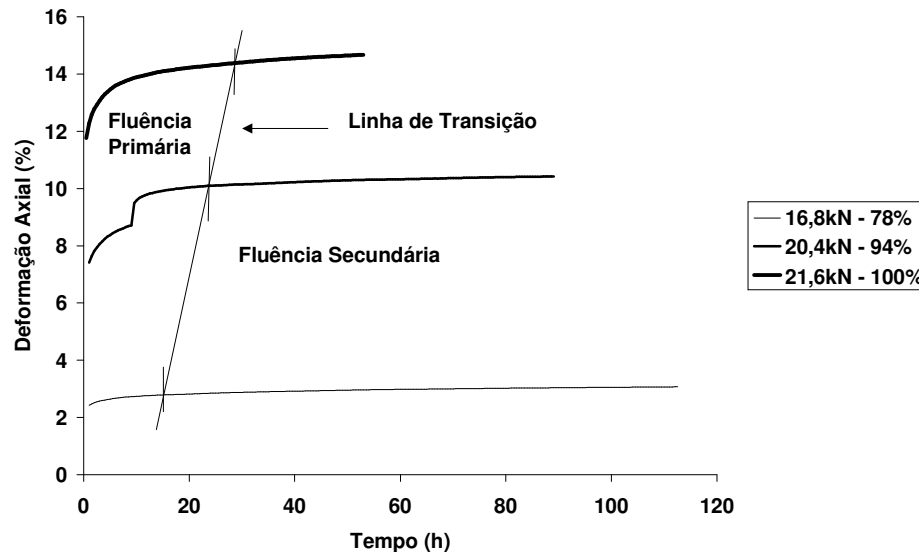


Figura 6.30– Comportamento da fluência devido ao nível de tensão.

Na Figura 6.31 tem-se apresentado apenas a fase secundária, sendo possível apresentar as taxas de deformação no tempo. De acordo com os resultados, também apresentados na Tabela 6.3, a taxa de deformação tende a minimizar com a redução da

carga mobilizada. Para uma redução em 6% da carga, a taxa minimizou 57% e para redução de 22% na carga, a taxa de deformação minimizou 77%.

Na Figura 6.32 com base no comportamento clássico da fluência, apresenta-se um gráfico especulativo, do comportamento da velocidade de deformação com a taxa de mobilização da carga. Neste gráfico, foi considerada a taxa de 100% como sendo de ruptura e as mobilizações 94 e 78% presentes na fase linear de comportamento. Sendo a mobilização de campo igual a 50% (fator de segurança igual a dois), estando esta mobilização na fase linear, a velocidade de deformação pode ser estimada em 0,001%/h.

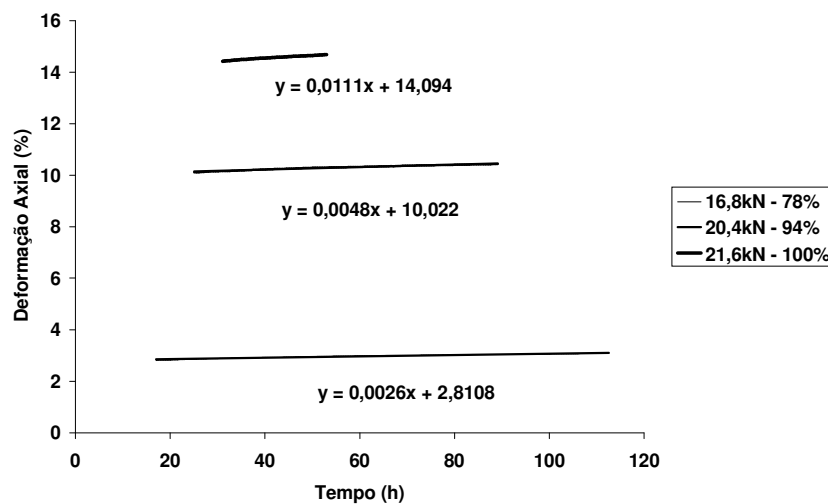


Figura 6.31 – Fluência secundária – Taxas de deformação.

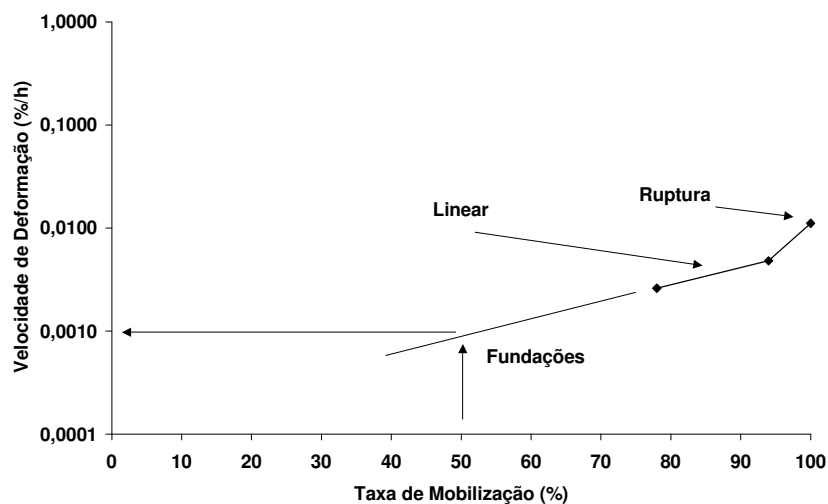


Figura 6.32 - Influência da mobilização na velocidade de deformação.

Tabela 6.7 – Influência da mobilização na velocidade de deformação.		
Mobilização (%)	Carga (kN)	Velocidade de Deformação (%/h)
50	10,8	0,0010*
78	16,8	0,0026
94	20,4	0,0048
100	21,6	0,0111

\*estimativa.

Estudos de fluência são também avaliados em gráficos que relacionam a velocidade de deformação com o tempo. Estes resultados estão apresentados na Figura 6.33. Os resultados mostram o quanto rápido cai a velocidade de deformação com o tempo, tendendo a mesma para zero.

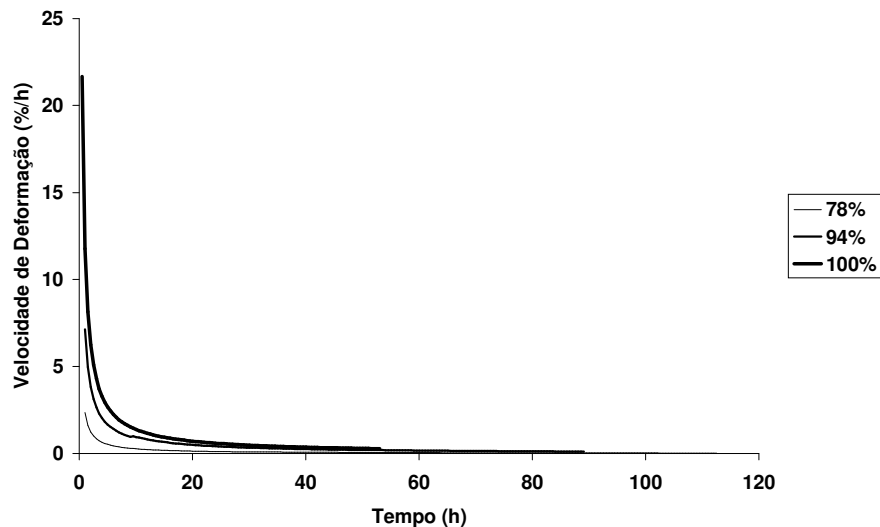


Figura 6.33 – Comportamento da velocidade de deformação *versus* tempo.

Para melhor apreciação deste estudo a velocidade *versus* tempo foi reapresentada na escala logarítmica, como ilustra a Figura 6.34. Observa-se que o comportamento da velocidade de deformação no tempo encontra-se semelhante com os resultados típicos registrados para o fenômeno em argila (Mitchell, 1976), ou seja, linear, decrescente e paralelo com a taxa de mobilização.

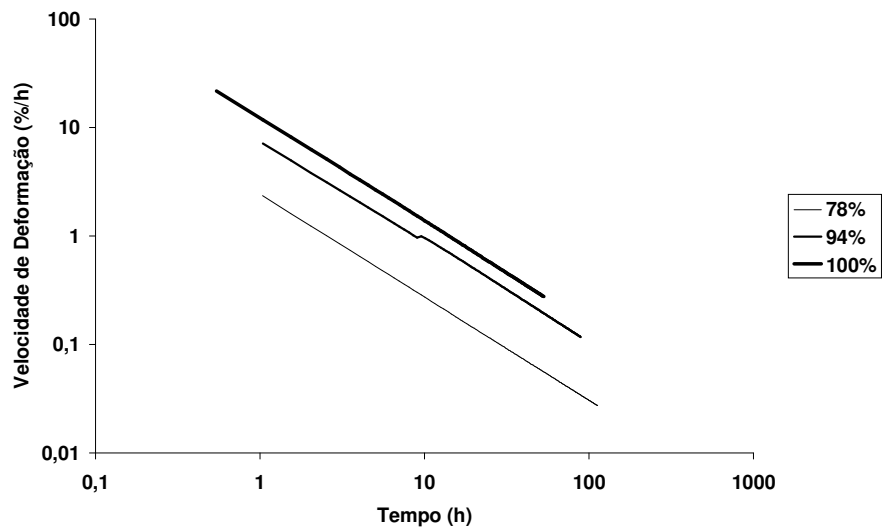


Figura 6.34 – Comportamento em escala logarítmica da velocidade de deformação *versus* tempo.

Na escala de tempo de estudo, não foi observada a aceleração da velocidade de deformação. Sendo esta escala compatível, este comportamento sugere a não ocorrência de ruptura por fluência da garrafa PET envasada com areia.

### 6.3 - ENSAIO DE CISALHAMENTO - GARRAFA PET

Este ensaio teve com objetivo avaliar o comportamento da garrafa PET quanto submetido a esforço cisalhante. Para isto foram confeccionadas peças em madeira (Figura 6.35) para simular esta condição. As características das garrafas utilizadas estão descritas na Tabela 6.8.

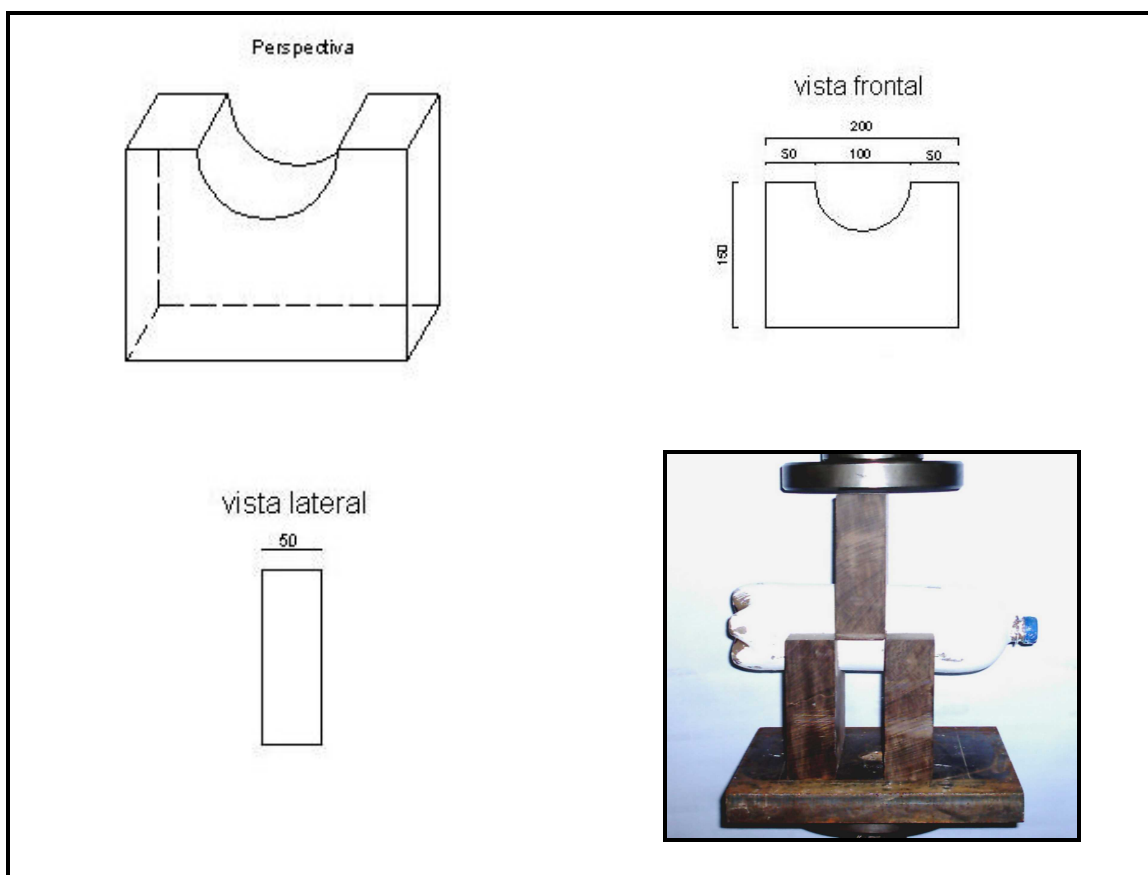


Figura 6.35 – Esquema do material utilizado para o ensaio de cisalhamento.

Tabela 6.8 – Características garrafas PET, envasada com areia, usadas no ensaio de cisalhamento.

Massa total garrafa	(Kg)	3,436	3,86	3,754	3,503	3,777
Massa específica seca	(Kg/m³)	1630	1710	1760	1650	1760
Índice de vazios mínimo		0,75	0,46	0,63	0,74	0,63
Tipo garrafa		1	1	2	2	2
Número da garrafa		G1	G4	G20	G32	G33

### Metodologia do Ensaio

Para este tipo de ensaio as garrafas também foram pintadas com tinta cal, a velocidade utilizada foi de 7mm/min e o equipamento utilizado foi mesmo utilizado nos ensaios de compressão simples. As peças em madeira tiveram os arcos cortados no

diâmetro da garrafa PET, sendo o espaçamento entre as peças definido para que o cisalhamento fosse puro.

### **Resultados dos Ensaios Cisalhamento**

Os resultados mostraram um comportamento bastante similar àquele observado nos ensaios de carregamento axial, considerando molde apenas de topo como mostra a Figura 6.36. A única diferença detectada foi na rápida passagem da Fase I – Linear para Fase II – Escoamento com Enrijecimento.

Para uma avaliação quantitativa, apresentam-se na Figura 6.37, resultados de cinco ensaios de cisalhamento. Tomando-se como base a região sugerida como sendo de ruptura (antes do escoamento), para um fator de segurança próximo de dois, a tensão ao cisalhamento de trabalho pode ser considerada igual a 1MPa.

Com base nos resultados dos ensaios, para este modelo de mobilização ao cisalhamento da garrafa, as deformações transversais em trabalho estão compreendidas entre 2 e 4%.

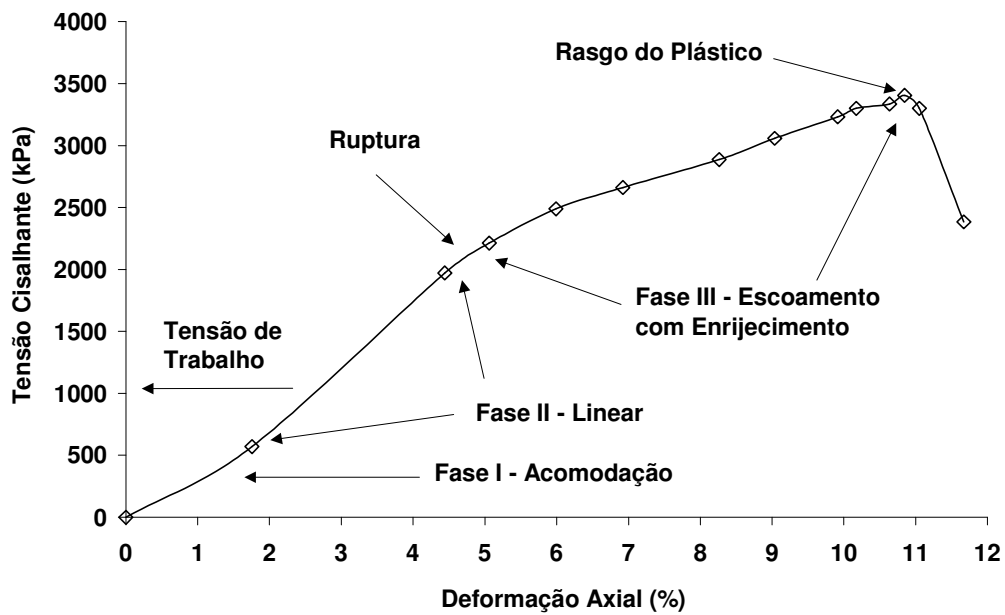


Figura 6.36– Comportamento ao cisalhamento.

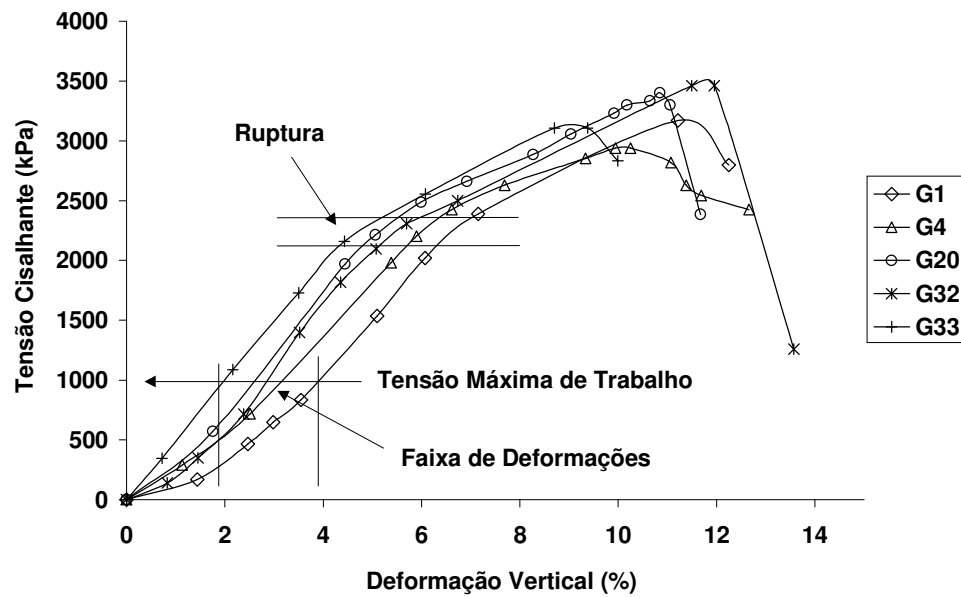


Figura 6.37– Comportamento geral – Tensão cisalhante de trabalho.

## 6.4 - TESTE DE ADESÃO AO CIMENTO

Este teste teve como propósito avaliar a possibilidade de aderência do cimento em contato com a garrafa PET, não levando em consideração a quantificação desse grau de adesão.

### Metodologia do Ensaio

Para esta avaliação foi utilizada a proporção de 1/1/0,48 (cimento, agregado miúdo e água). Este material foi transferido para um cilindro em aço (diâmetro de 150mm e altura de 30mm) atingindo uma altura 40mm e logo em seguida foi introduzida a garrafa PET, Figura 6.38.



Figura 6.38– Processo de desmoldagem da garrafa.



Após esta introdução foi adicionada mais argamassa até atingir uma altura máxima de 80mm. A garrafa permaneceu imersa durante 7 dias até a desmoldagem.

Este teste, como relatado acima, teve apenas o caráter de avaliar a adesão PET/cimento. Outro fator importante observado foi que as reações desenvolvidas durante processo de cura da argamassa não comprometeu a estrutura do material.

Vale ressaltar que a quantificação da resistência a adesão é de extrema importância para o propósito da aplicação da garrafa PET em obras de fundação, mas a realização do ensaio de arrancamento para quantificação desta resistência não foi possível, por questões de limitação do tempo de pesquisa. Sendo assim, esta quantificação foi feita manualmente. Foi constatado através deste teste, que não haveria possibilidade de remover manualmente a garrafa do molde de cimento.

## **6.5 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO EM INTERFACES DO TIPO SPS E SP**

Para uma melhor avaliação do comportamento das interfaces solo-plástico-solo (SPS) e solo-plástico-madeira (SP), três ensaios foram realizados para cada nível especificado de tensão. O ensaio solo-plástico-solo (SPS) foi desenvolvido no sentido de simular o atrito existente entre o solo e a garrafa envasada com areia. O ensaio solo-plástico-madeira (SP) foi realizado com o objetivo de avaliar a influência do envasamento da garrafa com areia, comparando-se os resultados destes dois tipos de modelagem. A seguir são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para os arranjos citados.

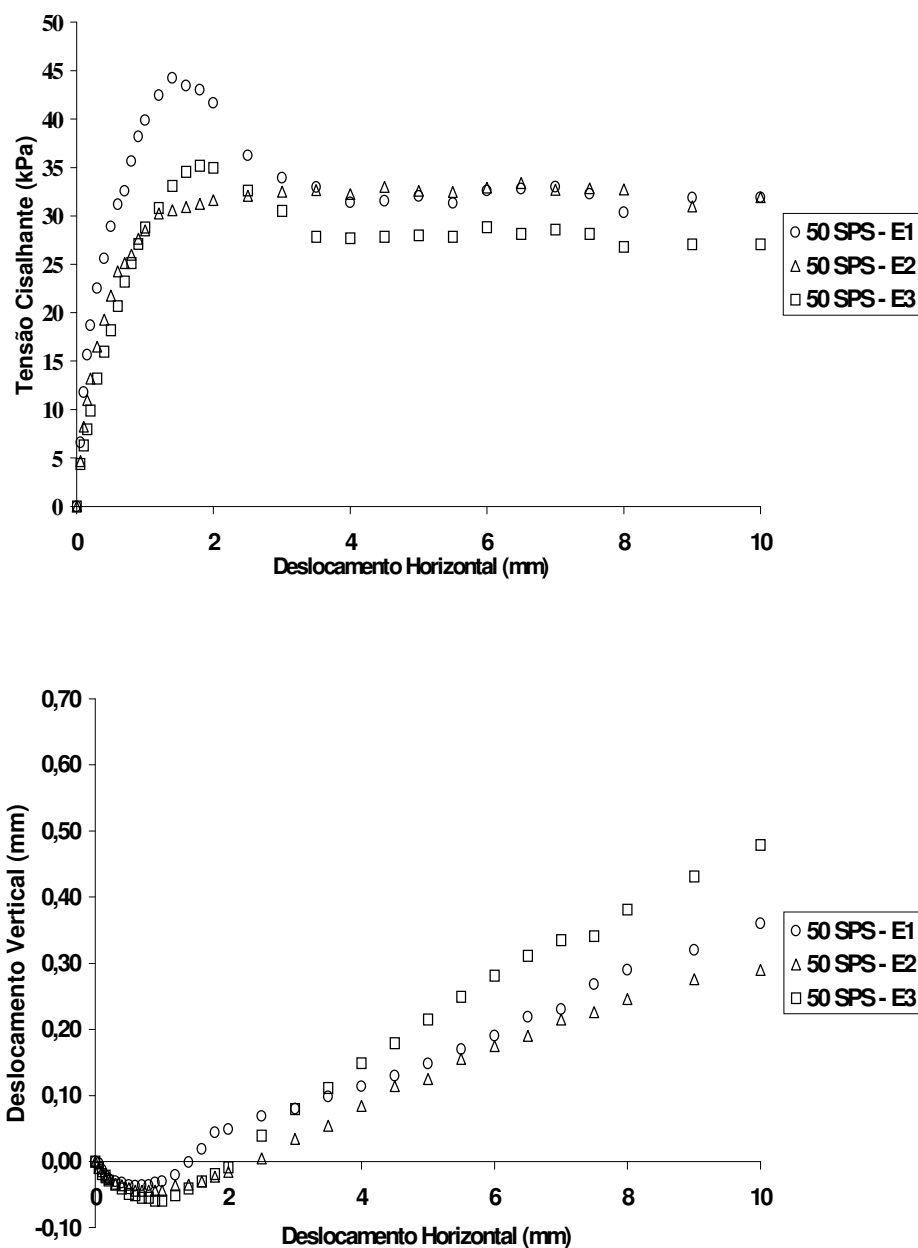


Figura 6.39 – Ensaio solo-plástico-solo (SPS) – Tensão Normal de 50kPa.

Os resultados apresentados na Figura 6.39 indicam um comportamento tendenciosamente friável, com pico de resistência ocorrendo para deslocamentos superiores a 1mm. Os resultados mostram uma ligeira dispersão para resistência de pico alcançada. Com relação a variação de volume, pode-se observar que a dilatância ocorre para deslocamentos horizontais inferiores a 1mm.

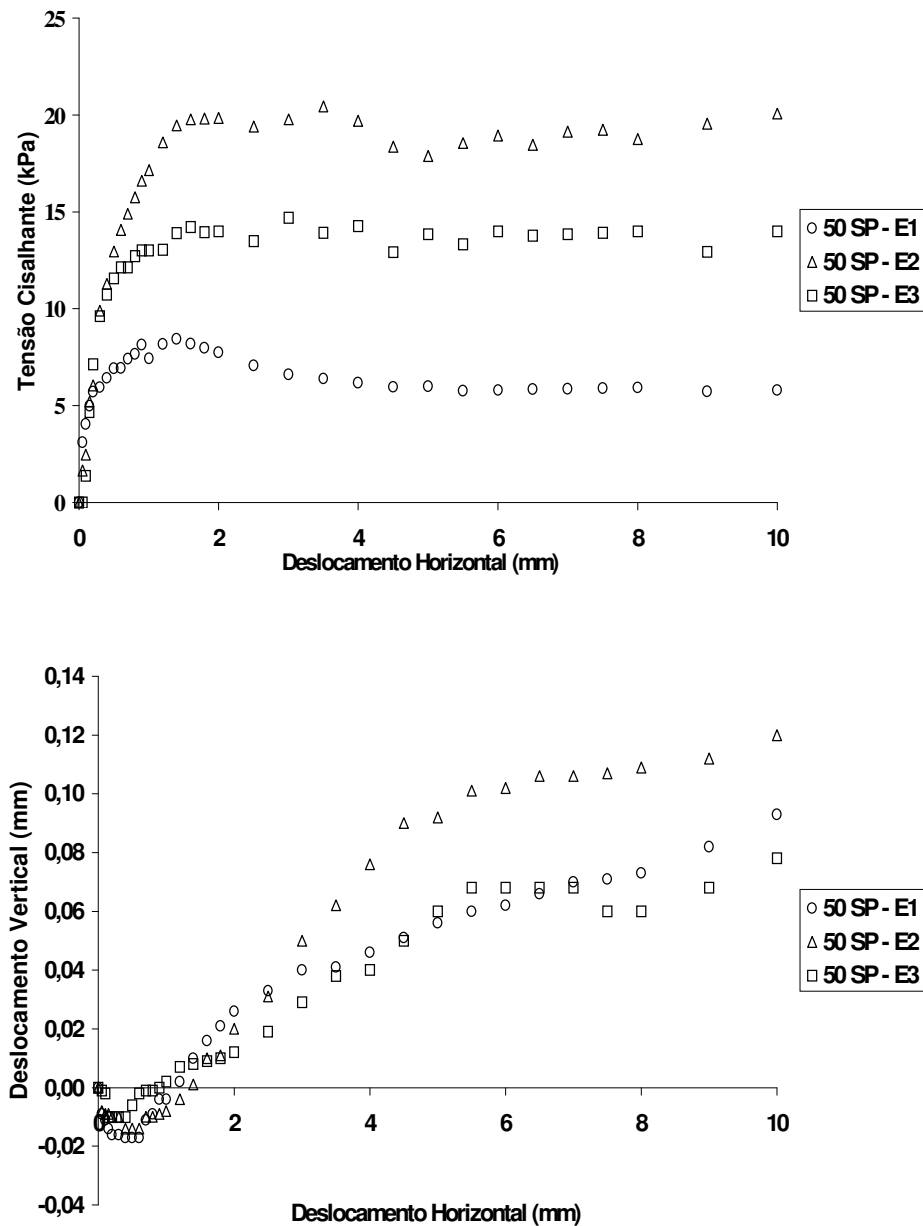


Figura 6.40– Ensaio solo-plástico (SP) – Tensão Normal de 50kPa.

Conforme apresentado na Figura 6.40, para interface solo-plástico-madeira, os resultados apresentam forte dispersão, evidenciando um comportamento tendenciosamente dúctil. Observa-se ainda que para o ensaio 2, de maior resistência de pico e residual, tem-se a maior dilatância. De forma especulativa, pode-se sugerir que a aspereza da madeira pode ter influenciado na discrepância dos resultados.

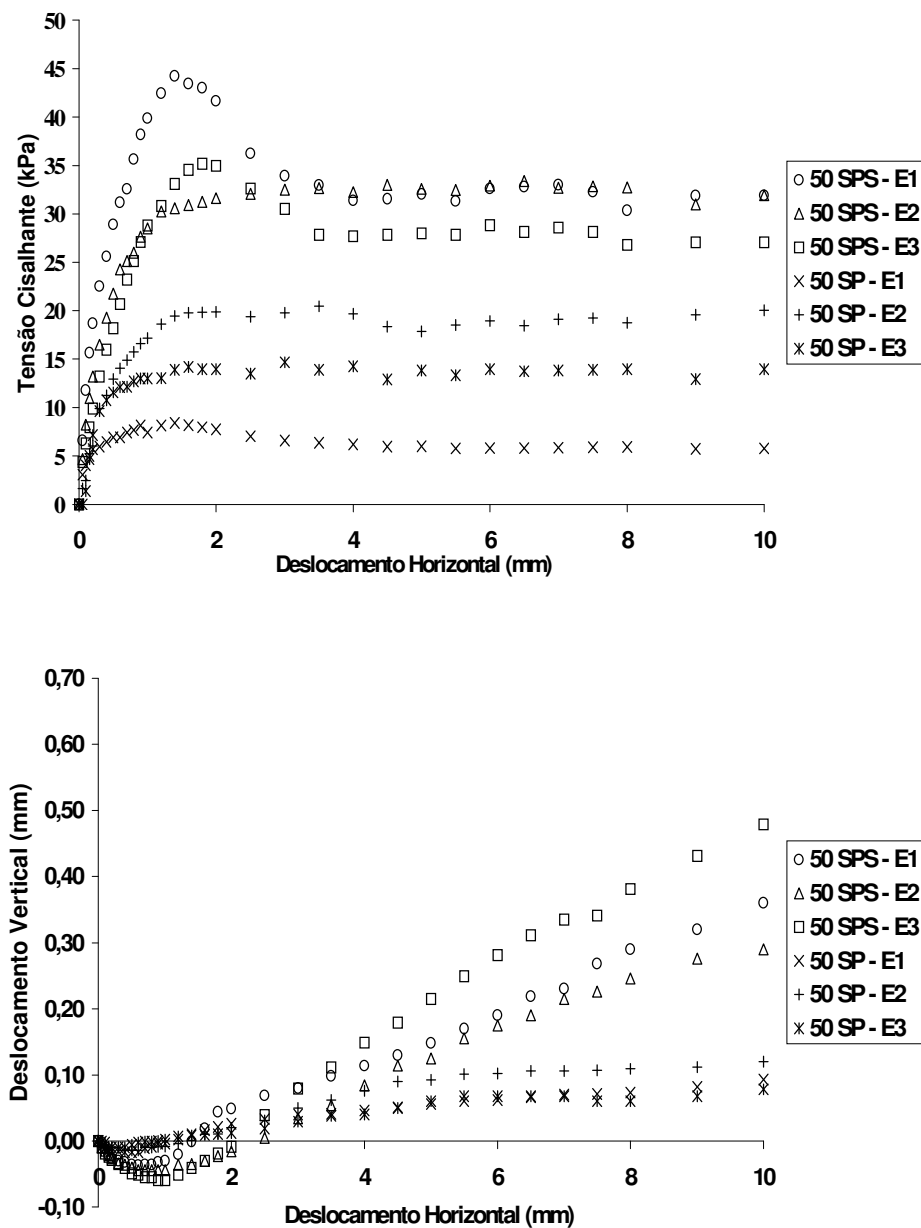


Figura 6.41 – Influência da areia – Tensão Normal de 50kPa.

Aglutinando ambos os resultados, na Figura 6.41 é possível verificar o ganho de resistência devido a presença de areia em ambos os lados do sistema, que seria representativo do contato da garrafa envasada com areia com o solo. Analisando o comportamento em termos de variação de volume, a interface com areia em ambos os lados tem, em todos os três ensaios, valor superior da dilatância.

Uma avaliação da influência da areia em termos médios foi desenvolvida através da quantificação com base na média dos resultados obtidos nos três ensaios, relativos a cada interface. Os resultados deste procedimento estão apresentados na Figura 6.42. O que se percebe mais visivelmente é que o ganho de resistência é muito significativo, calculado em torno de 140%. Conforme resultados da variação de volume, este ganho pode ser atribuído a forte contribuição da dilatação na interface solo-plástico-solo (SPS).

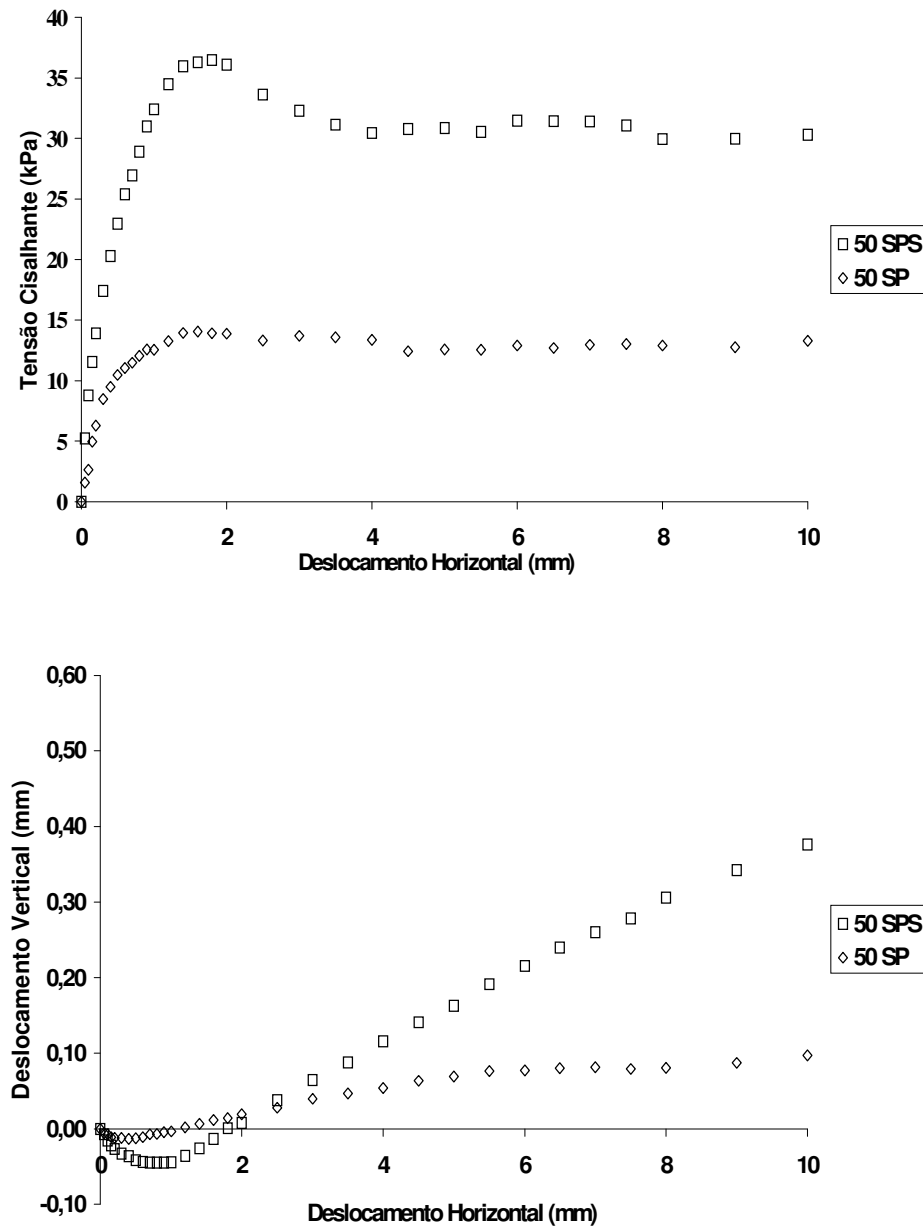


Figura 6.42 – Influência da areia – Resultados médios - Tensão Normal de 50kPa.

Na Figura 6.43 tem-se o comportamento das interfaces para o nível de tensão normal de 100kPa. Os resultados apresentam-se dispersos mais com uma tendência de minimização da fragilidade para interface SPS e para o ganho relativo da resistência ao cisalhamento.

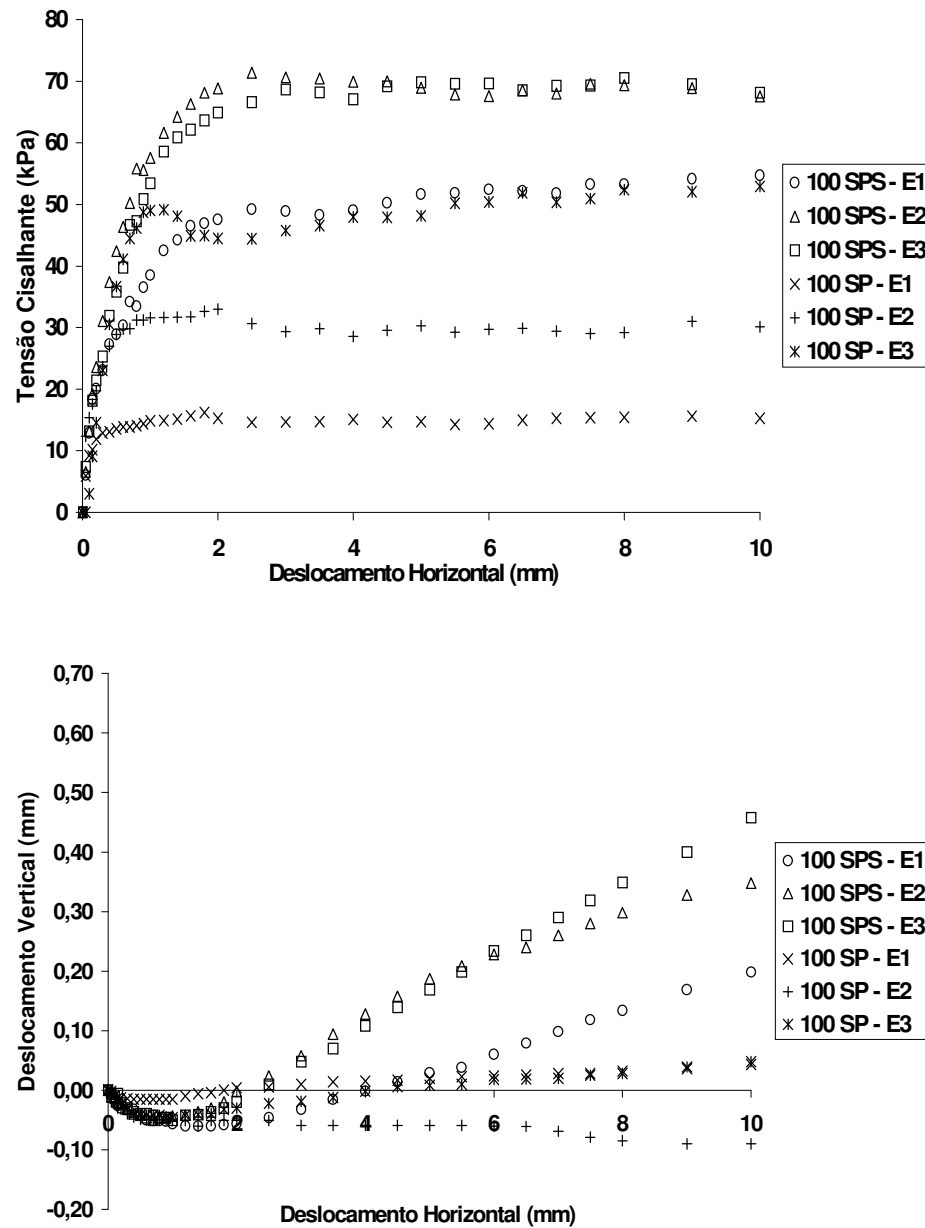


Figura 6.43 – Influência da areia – Tensão Normal de 100kPa.

Similarmente à Figura 6.42 (50kPa), na Figura 6.44, tem-se a média dos resultados para o nível de tensão normal de 100kPa. Este comportamento médio evidencia que o comportamento friável, obtido para o nível de tensão 50kPa, não mais ocorre no nível de tensão 100kPa. Pode-se ainda quantificar o ganho de resistência em cerca de 94%, contra cerca de 140% observado para o nível de tensão 50kPa. Comparando-se as dilatações no momento do pico de resistência em ambos os casos, pode-se verificar que para o nível de tensão normal igual a 50kPa esta é maior.

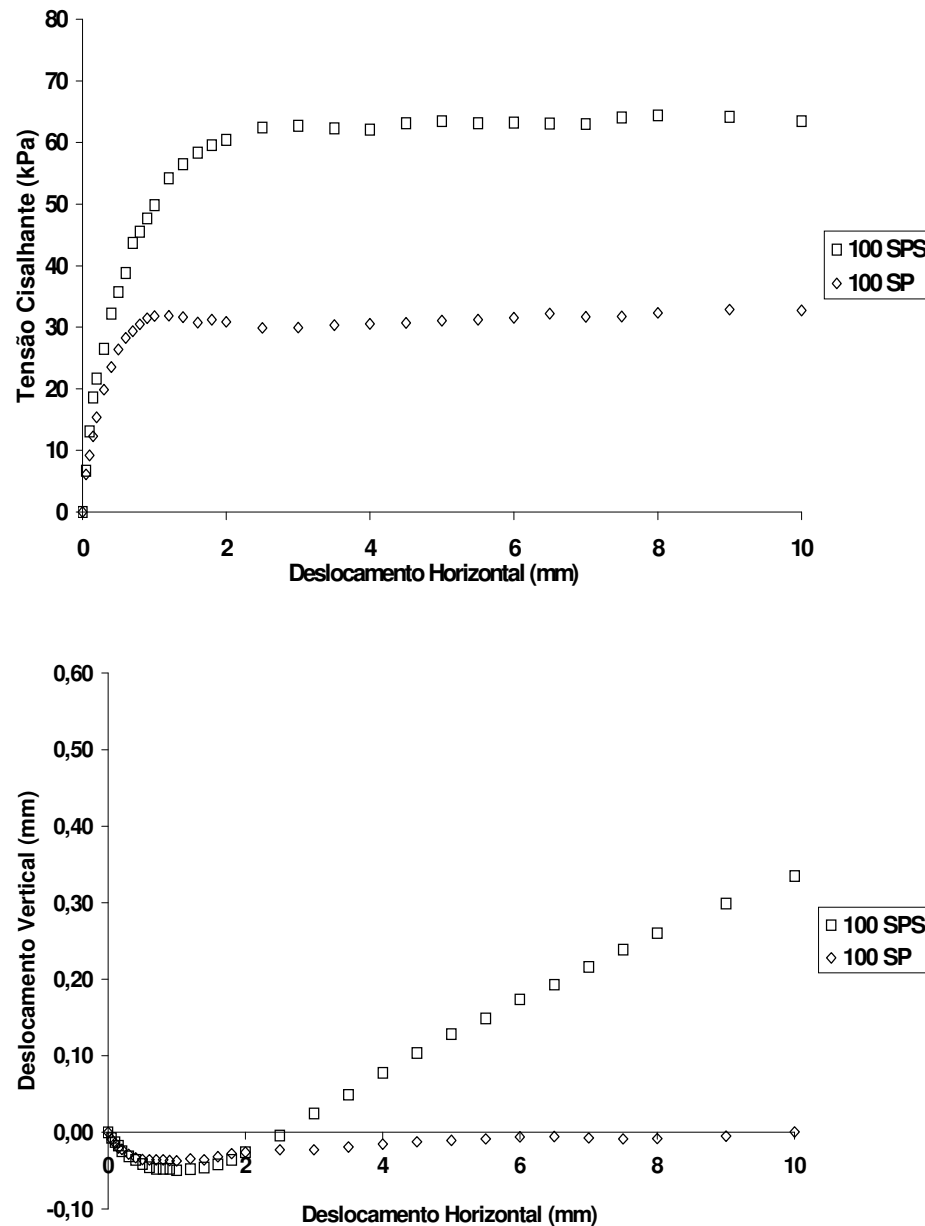


Figura 6.44 – Influência da areia – Resultados médios - Tensão Normal de 100kPa.

Dando prosseguimento a este estudo comparativo, como observado na Figura 6.45, tem-se para o nível de tensão normal igual a 200kPa, as mesmas tendências observadas, ou seja, menor ganho relativo de resistência para a interface SPS e um comportamento mais dúctil.

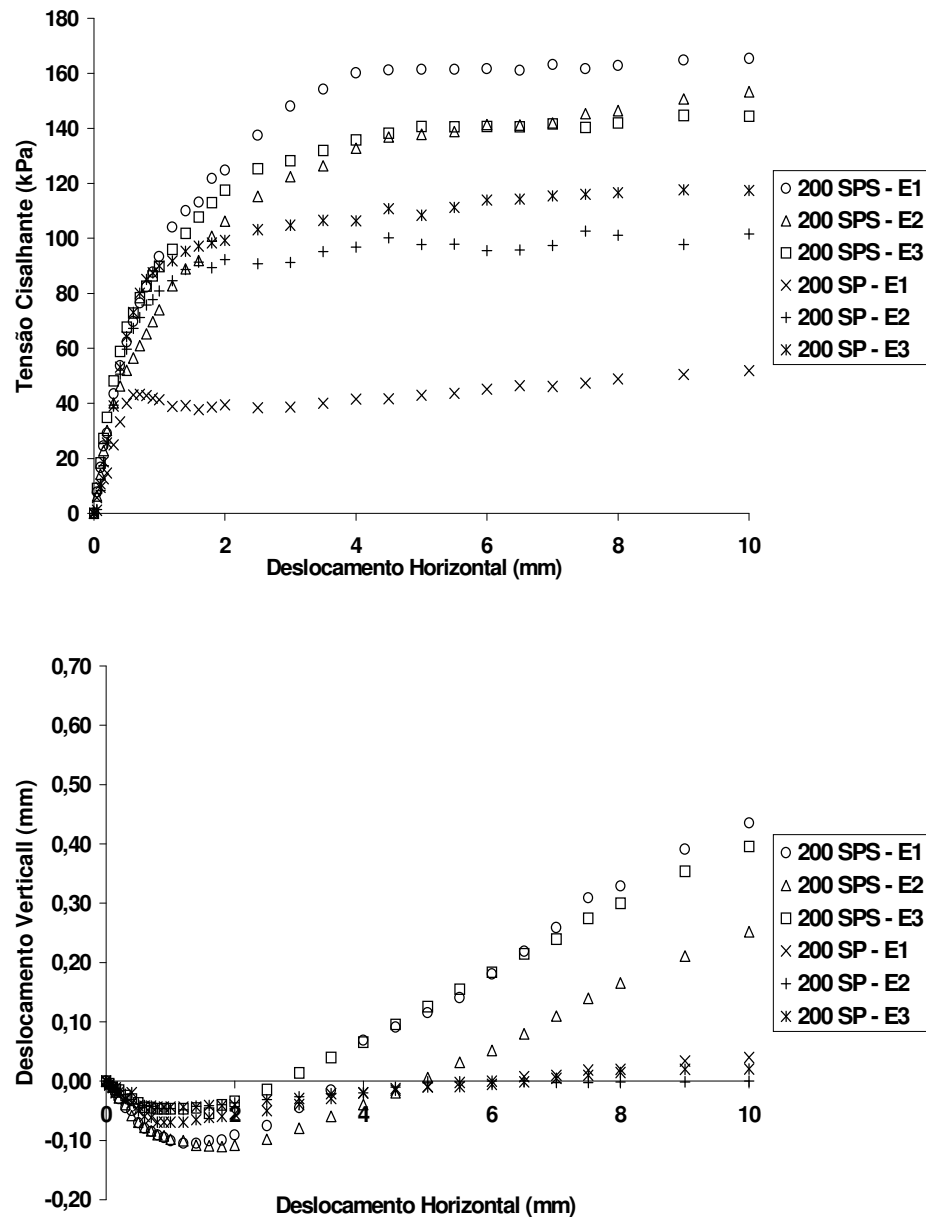


Figura 6.45 – Influência da areia – Tensão Normal de 200kPa.

Com base nos resultados apresentados nas Figuras 6.42, 6.44 e 6.46, pode-se ainda relatar que os deslocamentos horizontais para alcançar o pico estão bastante



sensíveis e diretamente proporcionais aos níveis de tensão normal. Para as tensões 50, 100 e 200kPa, estes foram de aproximadamente 1,5, 3,0 e 6,0mm, respectivamente.

Na Figura 6.46, tem-se evidenciada a tendência de minimização do ganho relativo de resistência do sistema SPS, sendo quantificado em aproximadamente 66%, contra 94 e 140% para os níveis de tensão 100 e 50kPa, respectivamente.

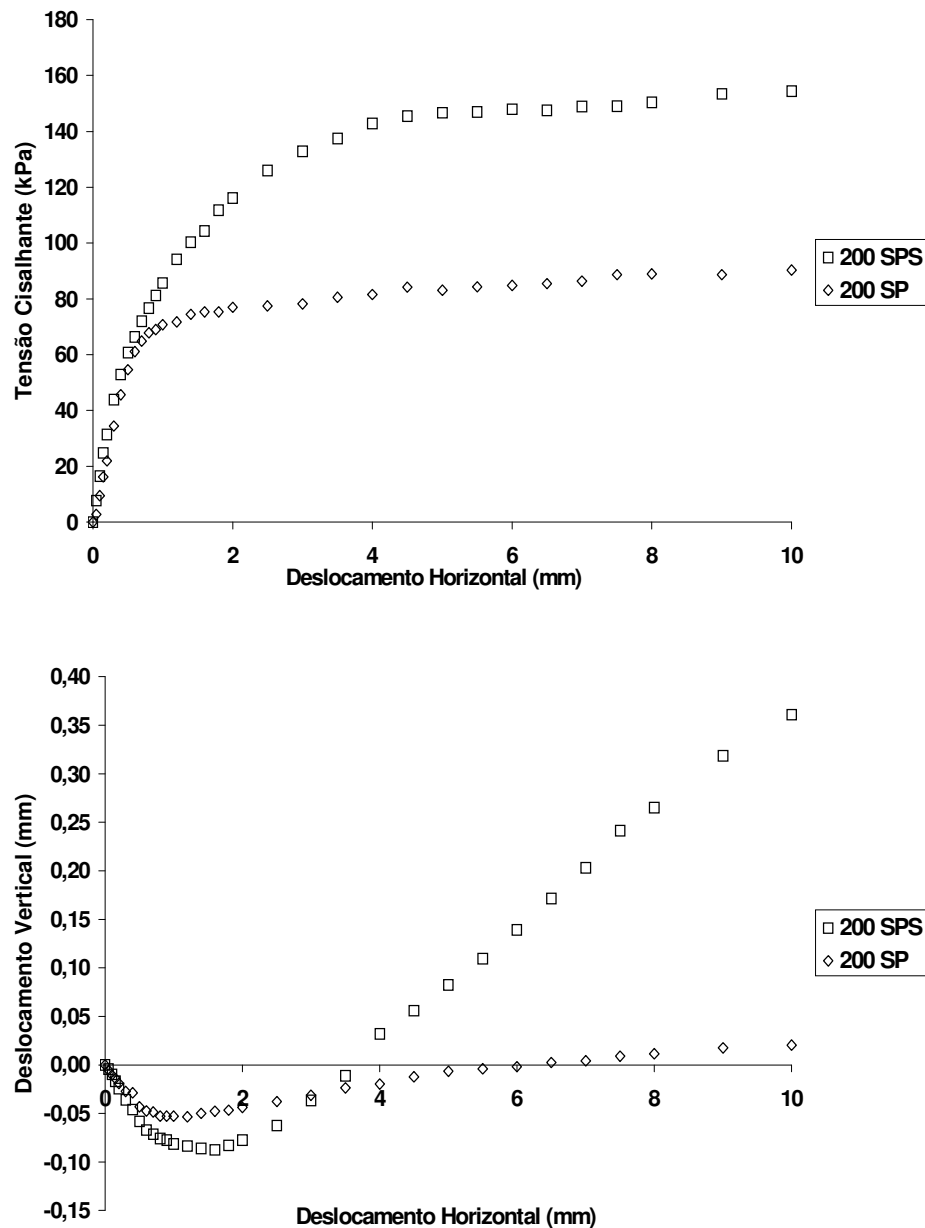


Figura 6.46 – Influência da areia – Resultados médios - Tensão Normal de 200kPa.

Com o aumento do nível de tensão normal para 400kPa, Figura 6.47, o comportamento parece sofrer uma ligeira variação, com uma tendência ao endurecimento após o deslocamento horizontal de 2mm. O ganho relativo de resistência ainda é visível, mas obedece a tendência de queda com o aumento da tensão normal. Registra-se ainda que ensaio 400 SP – E3, mostrou resultados discrepantes, sendo desconsiderado neste estudo.

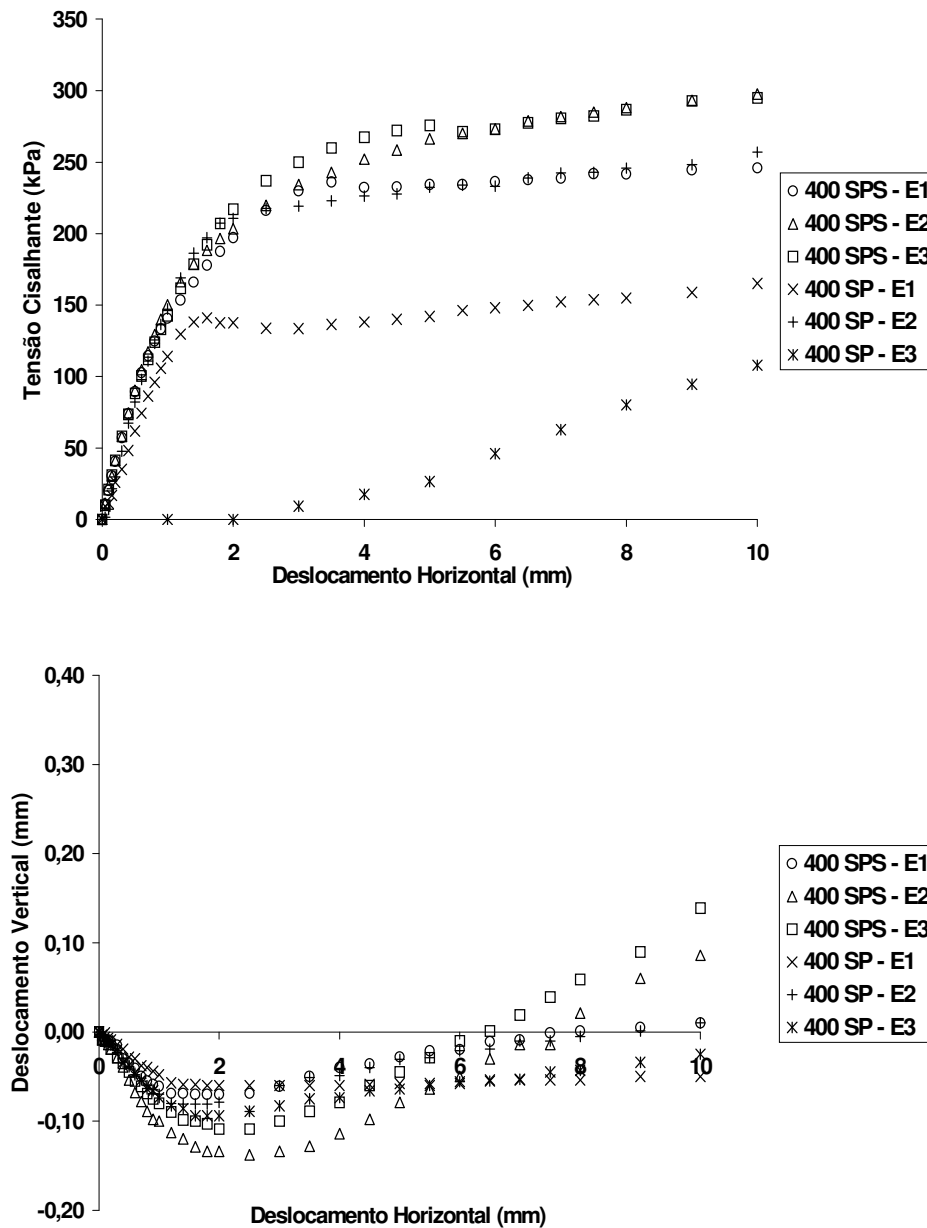


Figura 6.47 – Influência da areia – Tensão Normal de 400kPa.

De acordo com os resultados médios apresentados na Figura 6.48, registra-se um ganho relativo de resistência de 31%, ou seja, cerca de 50% daquele registrado para o nível de tensão 200kPa.

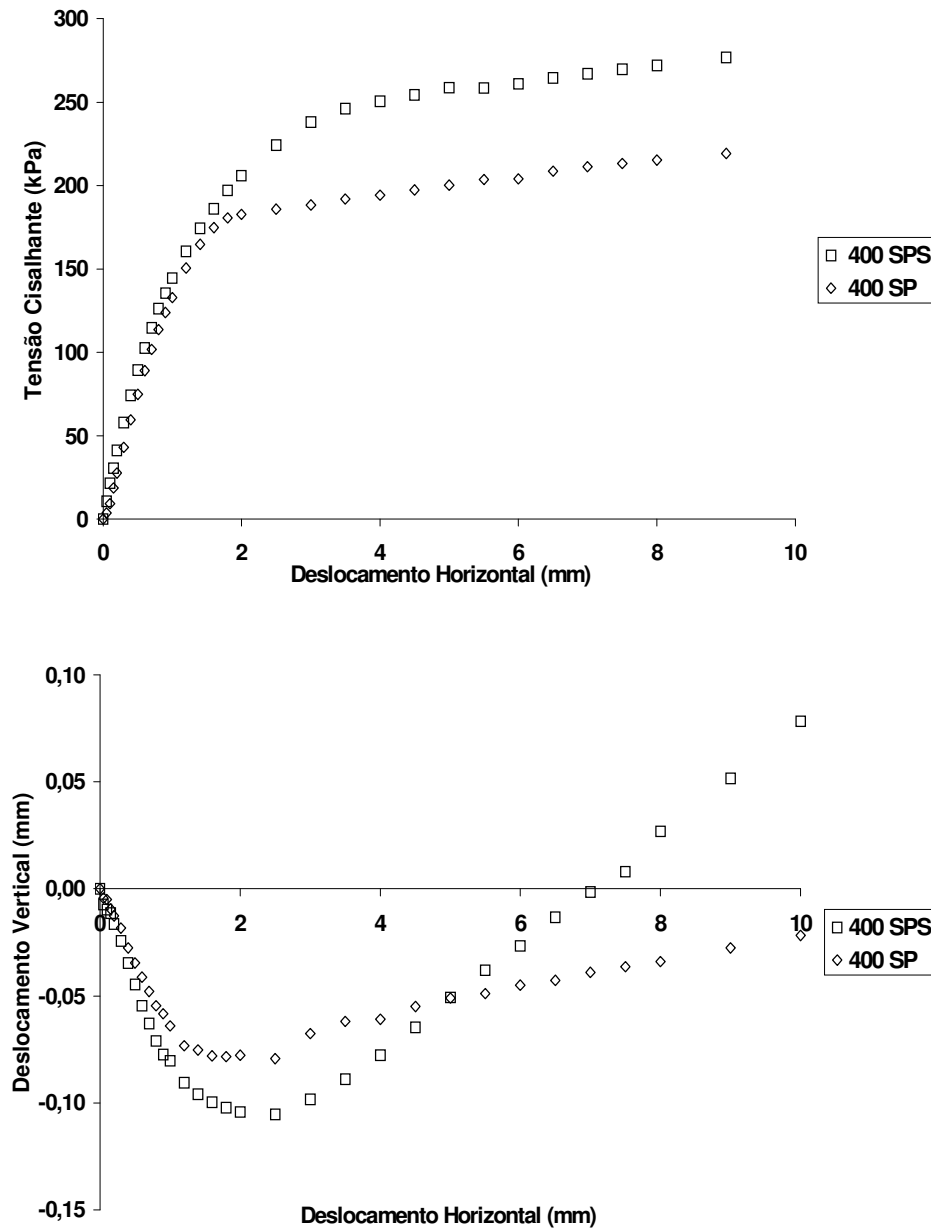


Figura 6.48 – Influência da areia – Resultados Médios – Tensão Normal de 400kPa.

Com base nos resultados de pico, apresentam-se na Figura 6.49, as envoltórias lineares de resistência destes modelos de interface (SPS e SP). Os resultados são

bastante interessantes, mostrando como a resistência de pico da interface SPS é mais sensível ao nível de tensão, apresentando um crescimento relativo maior, ou seja, um ângulo de atrito igual a 32,2 graus, contra 28,8 graus para interface SP.

Como já mencionado, este maior ângulo de atrito está associado a maior dilatação do sistema SPS. Esta dilatação sugere uma maior rugosidade da junta cisalhante. Esta maior rugosidade estaria associada a um processo de encaixe entre os grãos dos distintos lados. Acrescenta-se o fato de que, avaliando o estado do plástico após os ensaios, pôde-se observar uma maior penetração dos grãos no plástico do ensaio SPS em relação ao SP.

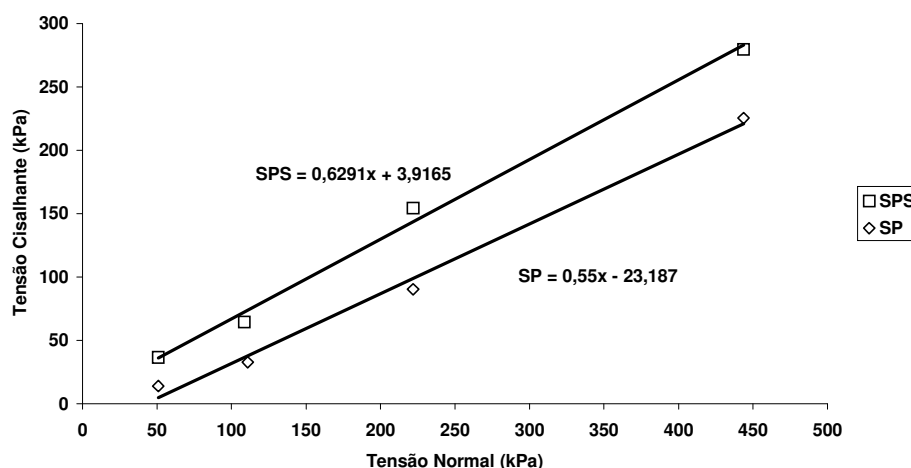


Figura 6.49– Ensaio de cisalhamento direto solo-plástico-solo (SPS) e solo-plástico-madeira (SP).

## 6.6 - AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE GARRAFAS PET EM FUNDAÇÕES

### 6.6.1 - Capacidade de Carga

De acordo com o comportamento da garrafa PET envasada com areia nos ensaios apresentados, a carga axial máxima sugerida a ser aplicada é 10kN. Esta carga garante o trabalho da garrafa na zona linear, mobilizando cerca de 50% da carga necessária ao início do escoamento do plástico.

Uma vez que a garrafa tem em torno de 0,30m de altura, para uso em fundações, a garrafa PET tem que ser utilizada de forma acoplada, para que seja possível alcançar

profundidades que condicionem melhores capacidades de carga. Este modelo de estrutura de fundação será aqui denominado “Estaca PET”.

Sendo a carga de trabalho da estaca PET igual a 10kN (1tf), propõe-se que grupos de estacas sejam utilizados para atender uma faixa de carga maior. Neste trabalho, foram apresentados os grupos de duas, quatro, cinco e nove garrafas, para atender cargas próximas de 20, 40, 50 e 90kN, respectivamente. Estas cargas de pilares são comuns para obras estruturadas de um pavimento. Obras de um pavimento não estruturadas (sem pilar) têm comumente cargas lineares de 10 a 15kN/m, podendo as estacas PET ser utilizadas como apoios espaçados de até um metro.

Para elaboração de um estudo de capacidade de suporte do solo, foram utilizados dois tipos de solos. O primeiro, considerado de baixa resistência, com ângulo de atrito de 30 graus. O segundo, mais resistente, com ângulo de atrito de 35 graus. Ambos os solos dispõem de quantidade suficiente de finos cimentantes, necessária para manter o fuste estável no processo de escavação. Por se tratar de um estudo de comportamento conservador, mesmo com a presença de finos, a parcela coesiva foi desconsiderada.

A proposta executiva para estaca PET é o corte da parte superior da garrafa, enchimento com apiloamento ou vibração com areia, deixando um trecho de 50mm para encaixe da próxima garrafa. Para auxiliar neste encaixe, deve ser utilizada uma fita plástica adesiva (típica de embalagens) de largura igual a 50mm. A confecção da estaca deve ser em posição vertical, em tamanho concordante com o projeto. Após terminada a confecção da estaca, esta deve ser introduzida em um tubo de PVC, diâmetro 125mm. O fuste pode ser escavado a trado manual, no diâmetro 150mm. Para lastro de fundo, deve ser utilizado um concreto magro, com 100mm de espessura, lançado e apiloado da superfície. Esta dimensão representa um volume de 2 litros, coincidente com o volume da garrafa. O tubo de PVC com a estaca é então introduzido no fuste, sendo as garrafas fixas por um arame amarrado no extremo superior, passando pelo interior do tubo, contornando a última garrafa e voltando ao extremo superior. Após apoiada no concreto magro, a estaca é comprimida manualmente, para penetração de cerca de 50mm da base da última garrafa no lastro de concreto. O arame no extremo superior do tubo de PVC é solto para que o tubo possa ser sacado manualmente do fuste. O arame deve ser abandonado no fuste. Para preenchimento do vazio lateral é sugerido o lançamento

manual de areia. O detalhamento desta sugestão construtiva está apresentado na Figura 6.51

Com base nos dois solos propostos, dois casos foram estudados, conforme parâmetros que serão apresentados na Tabela 6.9. Nesta tabela, o ângulo de atrito lateral foi determinado com base nos ensaios de cisalhamento direto solo-plástico-solo, conforme apresentado na Figura 6.50.

O resultado mostrou um comportamento tendenciosamente linear, sendo o ângulo de atrito igual a 32 graus. Para o ensaio solo-plástico-madeira (SP) o ângulo de atrito mostrou-se muito sensível ao nível de tensão, apresentando um comportamento não linear côncavo para cima. Por aproximação linear, o ângulo de atrito solo-plástico-madeira foi de 29 graus. Neste caso, pode-se comentar que para o primeiro nível de tensão (50kPa), o atrito foi de apenas 15 graus.

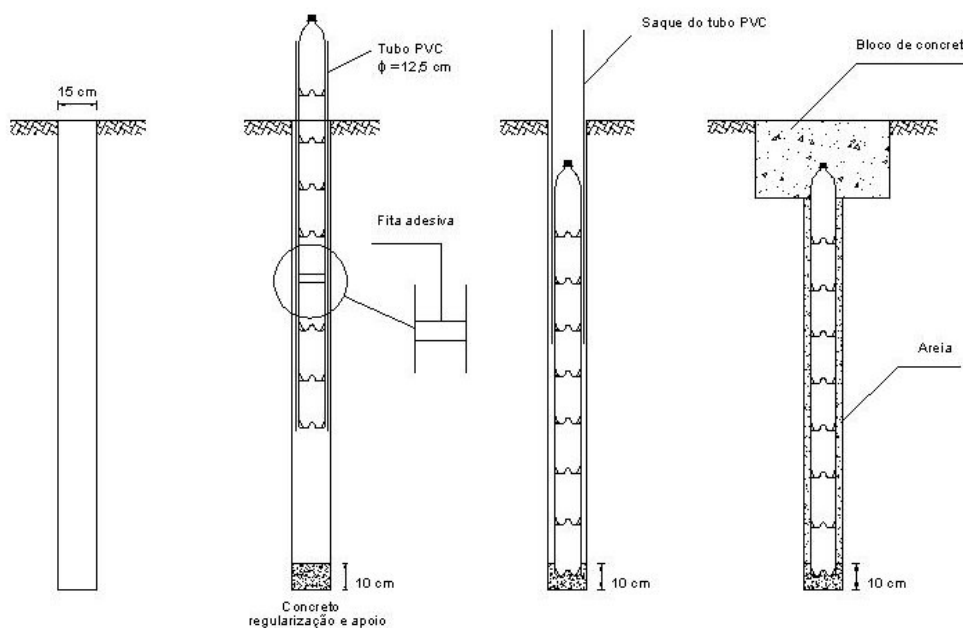


Figura 6.50 - Detalhe construtivo da estaca PET.

Para atrito lateral em estacas e estruturas de contenção, tem sido sugerida minimização do parâmetro em cerca de 2/3. Adotando este critério, o ângulo de atrito lateral seria de 21,3 graus. Face ao processo construtivo da estaca, que prevê o

enchimento lateral manual do contorno da estaca, o valor empregado neste trabalho foi de 20 graus.

Sendo o atrito lateral muito baixo e a confecção do lastro de base com diâmetro superior ao da estaca, o modelo de comportamento da estaca PET será considerado como sendo similar, mas não idêntico, ao de base alargada. Na Tabela 6.9, tem-se os fatores de segurança (ou mobilização) sugeridos para as fundações em estacas (Araújo, 1999).

Como apresentado na Tabela 6.9, os fatores de mobilização sugeridos para estaca em base alongada são 1,5 para resistência de ponta e 3 para resistência lateral. Uma vez que na estaca tipo Franki o alongamento da base é substancial e realizado com elevadíssima energia, para o baixo alongamento proposto para estaca PET o fator sugerido para ponta é 2. Sendo o módulo de elasticidade da estaca PET cerca de duas mil vezes menor que o módulo de elasticidade da estaca de concreto, tem-se que a estaca de concreto, que trabalha preferencialmente por resistência de ponta, mobiliza ponderadamente resistência lateral.

Tabela 6.9 – Fatores de mobilização para estacas.

Tipo	Fator de Ponta	Fator Lateral
Cravada – Grande Deslocamento	3,0	1,5
Escavada – Pequeno Deslocamento	4,0	1,5
Base Alargada – Tipo Franki	1,5	3,0
Estaca PET	2	1,5

Assim, como artifício de cálculo, tem-se um fator tão elevado para as estacas tipo Franki igual a 3. Como a estaca PET, mesmo trabalhando fortemente por ponta, vai ter deslocamentos verticais induzidos pela carga de trabalho (mobilizando resistência lateral), o fator de segurança sugerido é de 1,5, similar ao das estacas flutuantes cravadas e/ou escavadas, como apresentado na Tabela 6.9.

O coeficiente de empuxo lateral, parâmetro K, representa a relação entre as tensões horizontais e verticais efetivas. Para este cálculo, foi considerada a equação tradicional  $K=1-\text{sen } \phi$ , representativa da acomodação em estado no repouso do solo

circunvizinho à estaca. O módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson foram estimados com base em valores típicos apresentados em Hachich et al. (1998).

O peso específico aqui adotado, foi estimado com base em valores típicos encontrados para solos em umidade natural, sendo aquele utilizado pelo estudo do muro PET.

Tabela 6.10 – Parâmetros para estudo técnico comportamental da estaca PET.

<b>Parâmetros Fixos</b>	<b>Casos 1 e 2</b>	
Atrito Lateral (graus)	20,00	
Diâmetro PET (m)	0,10	
Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	19,00	
Fator de Segurança de Ponta	2,00	
Fator de Segurança Lateral	1,50	
Diâmetro da Base (m)	0,15	
<b>Parâmetros Variáveis</b>	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>
Atrito Solo (graus)	30	35
Coeficiente $K_0$	0,5	0,43
Coeficiente $N_q$ (Terzaghi)	22,50	41,40
Módulo de Elasticidade (kPa)	15000	21000
Coeficiente de Poisson	0,3	0,3

A resistência de ponta ( $Q_p$ ) foi calculada com base na equação de Terzaghi de capacidade de carga, sendo a resistência lateral ( $Q_f$ ) calculada com base no critério de Morh-Coulomb. Os resultados referentes ao Caso 1 estão apresentados na Tabela 6.10. Na seqüência das colunas têm-se as cargas de trabalho do sistema, considerando uma estaca e grupos de 2, 4, 5 e 9 estacas. Na parte inferior é apresentada a eficiência considerada para os respectivos grupos de estaca e a carga máxima de trabalho da própria estaca (10kN). As cargas sombreadas representam valores acima da segurança singular estipulada para própria estaca.



Tabela 6.11 – Caso 1 - atrito 30 graus; diâmetro da base 0,15m.

<b>Profundidade</b>	<b>Ponta</b>	<b>Lateral</b>	<b>Estacas - Capacidade de Carga (kN)</b>				
Z (m)	Qp (kN)	Qf (kN)	1	2	4	5	9
0,2	1,51	0,02	0,77	1,39	2,46	3,00	4,43
0,4	3,02	0,09	1,57	2,82	5,02	6,12	9,04
0,6	4,53	0,20	2,40	4,31	7,67	9,35	13,81
0,8	6,04	0,35	3,25	5,86	10,41	12,69	18,74
1,0	7,55	0,54	4,14	7,45	13,25	16,14	23,84
1,2	9,07	0,78	5,05	9,10	16,17	19,71	29,11
1,4	10,58	1,06	6,00	10,80	19,19	23,39	34,55
1,6	12,09	1,39	6,97	12,55	22,31	27,19	40,15
1,8	13,60	1,76	7,97	14,35	25,51	31,09	45,92
2,0	15,11	2,17	9,00	16,21	28,81	35,11	51,86
2,2	16,62	2,63	10,06	18,11	32,20	39,24	57,96
2,4	18,13	3,13	11,15	20,07	35,68	43,49	64,23
2,6	19,64	3,67	12,27	22,08	39,26	47,85	70,67
2,8	21,15	4,26	13,42	24,15	42,93	52,32	77,27
3,0	22,66	4,89	14,59	26,26	46,69	56,90	84,04
Eficiência			1,00	0,90	0,80	0,78	0,64
Carga Máxima na Fundação (kN)			10,00	20,00	40,00	50,00	90,00

Os resultados apresentados na Tabela 6.11 estão formatados graficamente na Figura 6.51. Através desta formatação, que pode também ser denominada de ábaco, é possível avaliar a profundidade requerida para estaca PET e o grupo ideal de estacas a ser utilizado. Como exemplo, tem-se que para uma carga de 30kN e o solo com atrito de 30 graus, a solução da fundação seria em grupo de 4, 5 ou 9 garrafas, assentes nas profundidades 2,10, 1,75 e 1,25 m, respectivamente.

Os resultados relativos ao Caso 2, que considerou um solo de boa resistência, estão apresentados na Tabela 6.12. Os resultados evidenciam uma forte retração da profundidade requerida para alcançar a carga de trabalho. No Caso 1, para alcançar 10kN com uma estaca era necessário escavar 2,20m. Para o Caso 2, a mesma carga foi alcançada para profundidade de 1,40m.

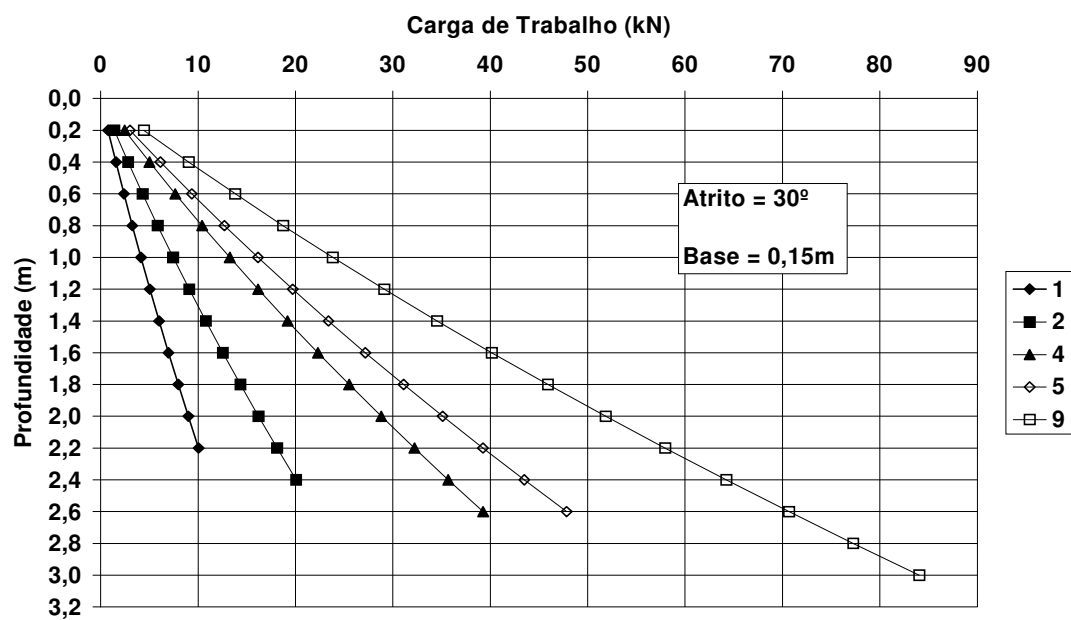


Figura 6.51 - Ábaco Caso 1 – Carga de trabalho *versus* profundidade e número de estacas.

Tabela 6.12 – Caso 2 - atrito 35 graus; diâmetro da base 0,15m.

Profundidade	Ponta	Lateral	Estacas - Capacidade de Carga (kN)				
Z (m)	Qp (kN)	Qf (kN)	1	2	4	5	9
0,2	2,78	0,02	1,40	2,53	4,49	5,48	8,09
0,4	5,56	0,09	2,84	5,11	9,08	11,07	16,35
0,6	8,34	0,20	4,30	7,74	13,76	16,77	24,77
0,8	11,12	0,35	5,79	10,43	18,53	22,59	33,36
1,0	13,90	0,54	7,31	13,16	23,40	28,52	42,12
1,2	16,68	0,78	8,86	15,95	28,36	34,56	51,04
1,4	19,46	1,06	10,44	18,79	33,41	40,72	60,13
1,6	22,24	1,39	12,05	21,69	38,55	46,98	69,39
1,8	25,02	1,76	13,68	24,63	43,79	53,37	78,82
2,0	27,80	2,17	15,35	27,63	49,12	59,86	88,41
Eficiência			1,00	0,90	0,80	0,78	0,64
Carga Máxima na Fundação (kN)			10,00	20,00	40,00	50,00	90,00

Similarmente ao caso anterior, na Figura 6.52 tem-se o comportamento ilustrado da carga de trabalho em função do grupo de estacas e profundidade.

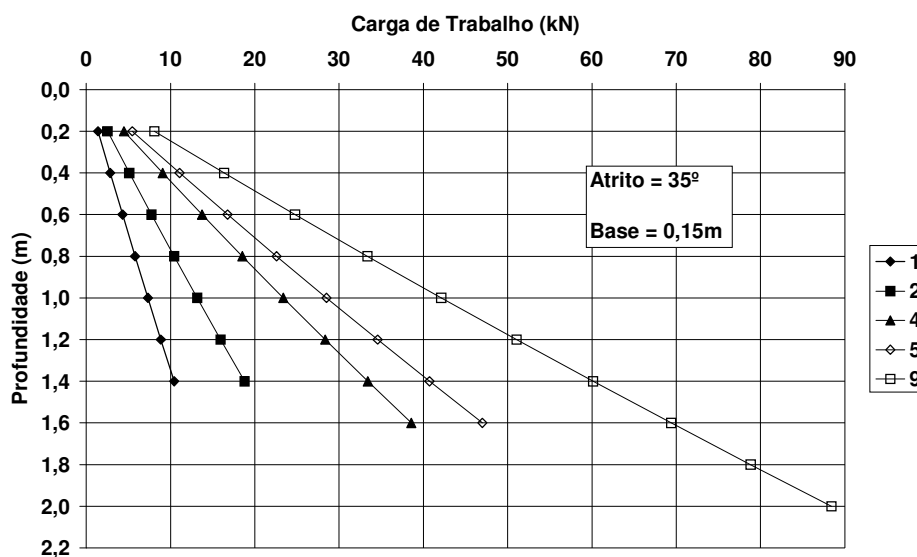


Figura 6.52 - Ábaco Caso 2 – Carga de trabalho *versus* profundidade e número de estacas.

Um estudo particular, por grupo de estaca, foi desenvolvido e apresentado em forma de ábacos. Além do diâmetro 0,15m, acrescenta-se a este estudo, o diâmetro do fuste igual a 0,12m. Estes ábacos estão apresentados nas Figuras 6.53 a 6.57, sendo de fácil aplicação.

## 6.7 – COMENTÁRIOS FINAIS

Já nos primeiros ensaios de compressão simples, foi possível verificar que o uso das garrafas PET em fundações do tipo estaca estaria associado a cargas moderadas, típicas de obras de pequeno porte.

A alternativa sugerida para melhoria da capacidade de suporte do sistema PET foi o uso de grupos de estacas. Este procedimento proporcionaria incremento satisfatório e aplicabilidade numa gama maior de casos práticos de construção.

Os estudos desenvolvidos mostraram que a estaca PET pode ser facilmente confeccionada, com custo material praticamente nulo. A carga de trabalho sugerida foi de 10kN, quando a mesma estiver envasada com areia, num estado denso.

Importante realçar que este é um estudo preliminar que tem como premissa apresentar uma proposta alternativa para fundações de obras de pequeno porte.

Este estudo não propõe a aplicação amadora da estaca PET, mas abre uma fonte de inspiração para pesquisas de viabilidade técnica e financeira.

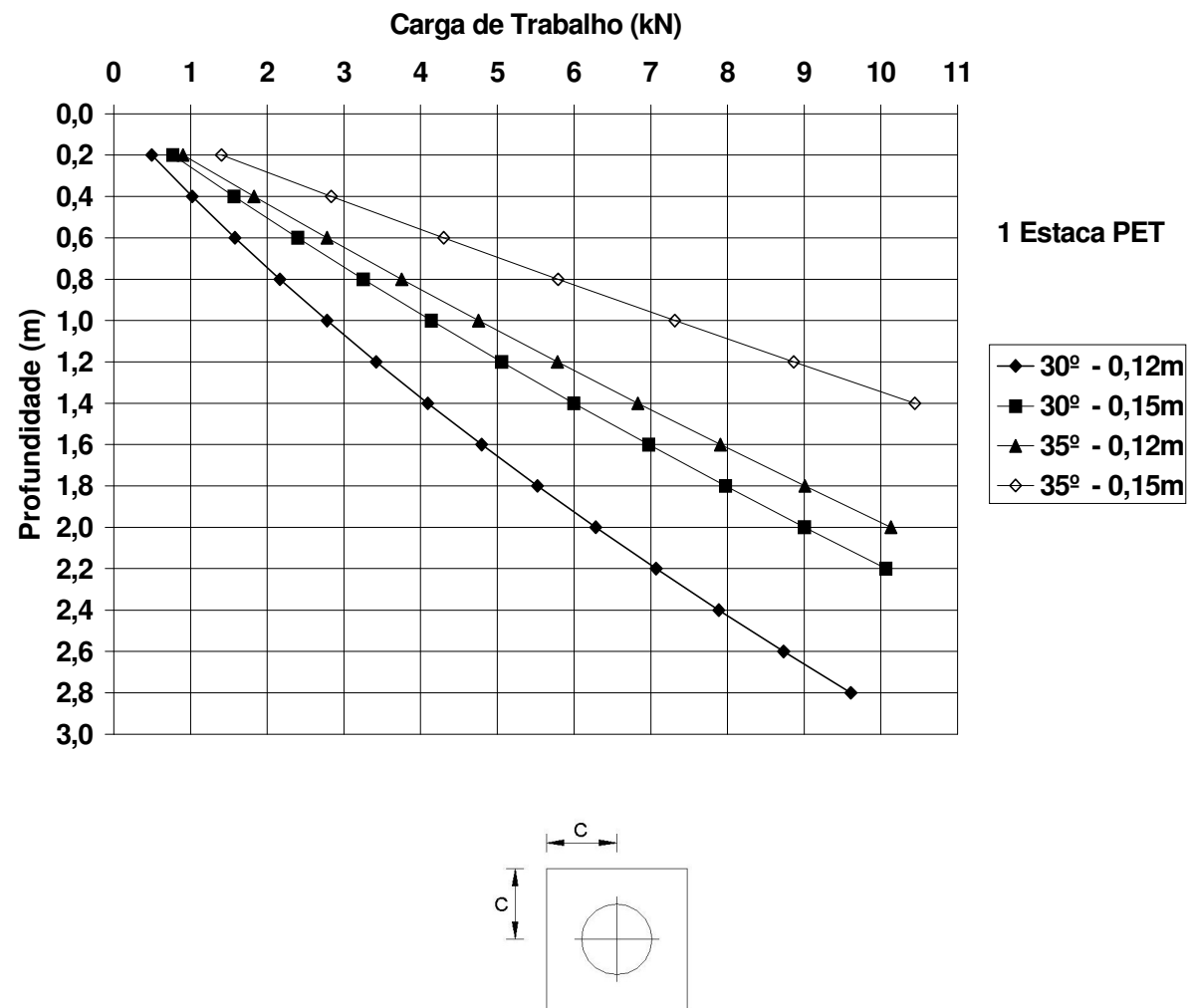


Figura 6.53 - Carga abaixo de 10 kN – 1 estaca.

$C \geq d$   
 $d$  – diâmetro da estaca

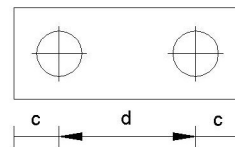
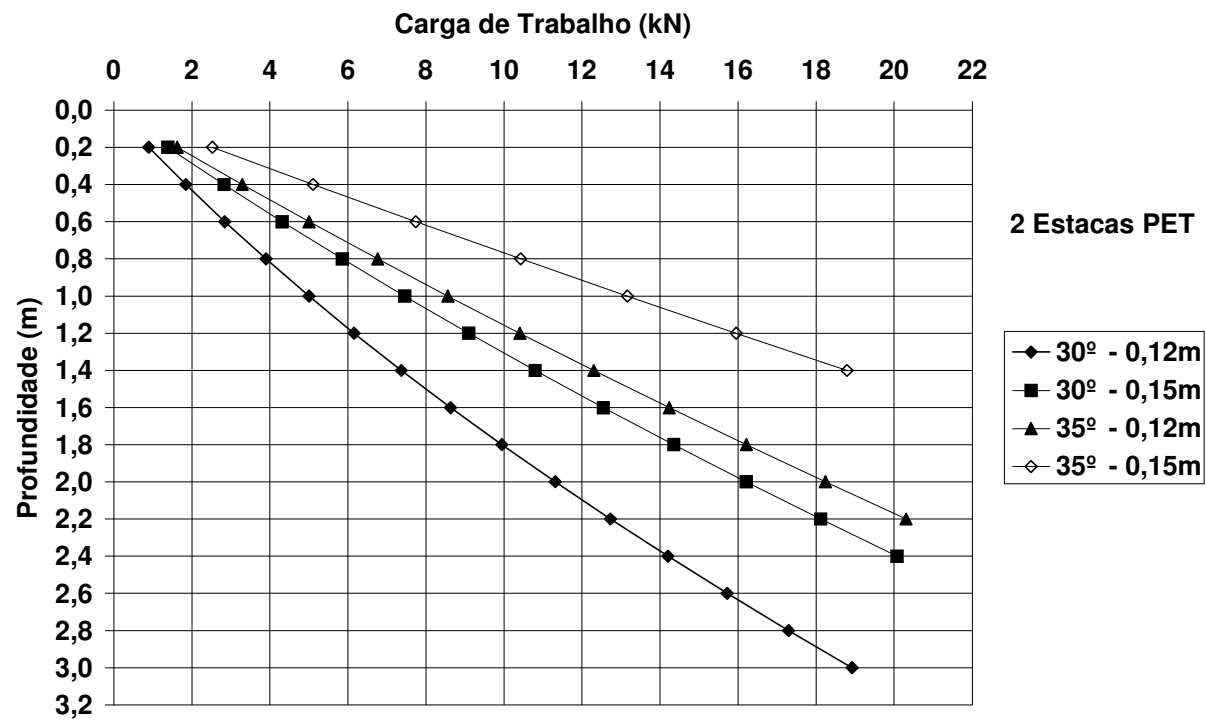


Figura 6.54 - Carga abaixo de 20 kN – 2 estacas.

$C \geq d$   
d – diâmetro da estaca

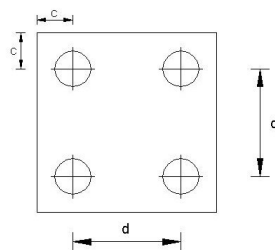
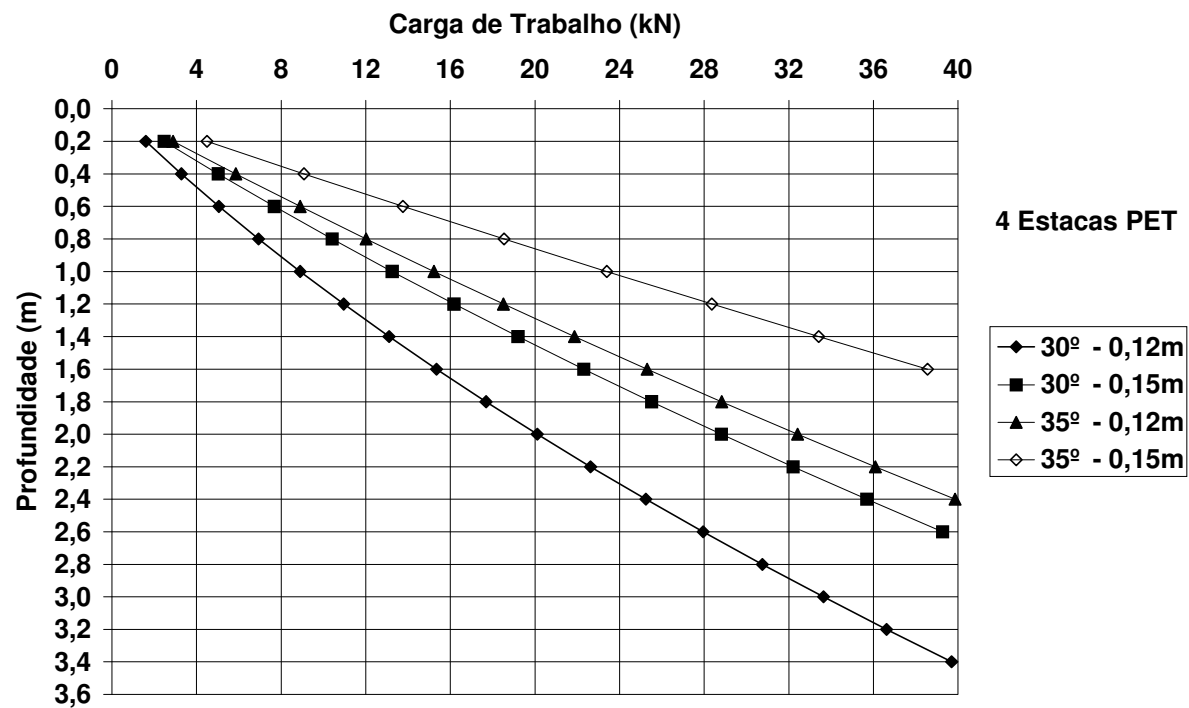


Figura 6.55 - Carga abaixo de 40 kN – 4 estacas.

$C \geq d$   
d – diâmetro da estaca

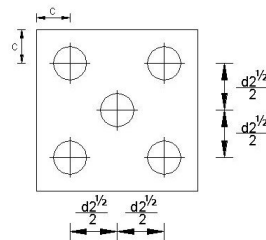
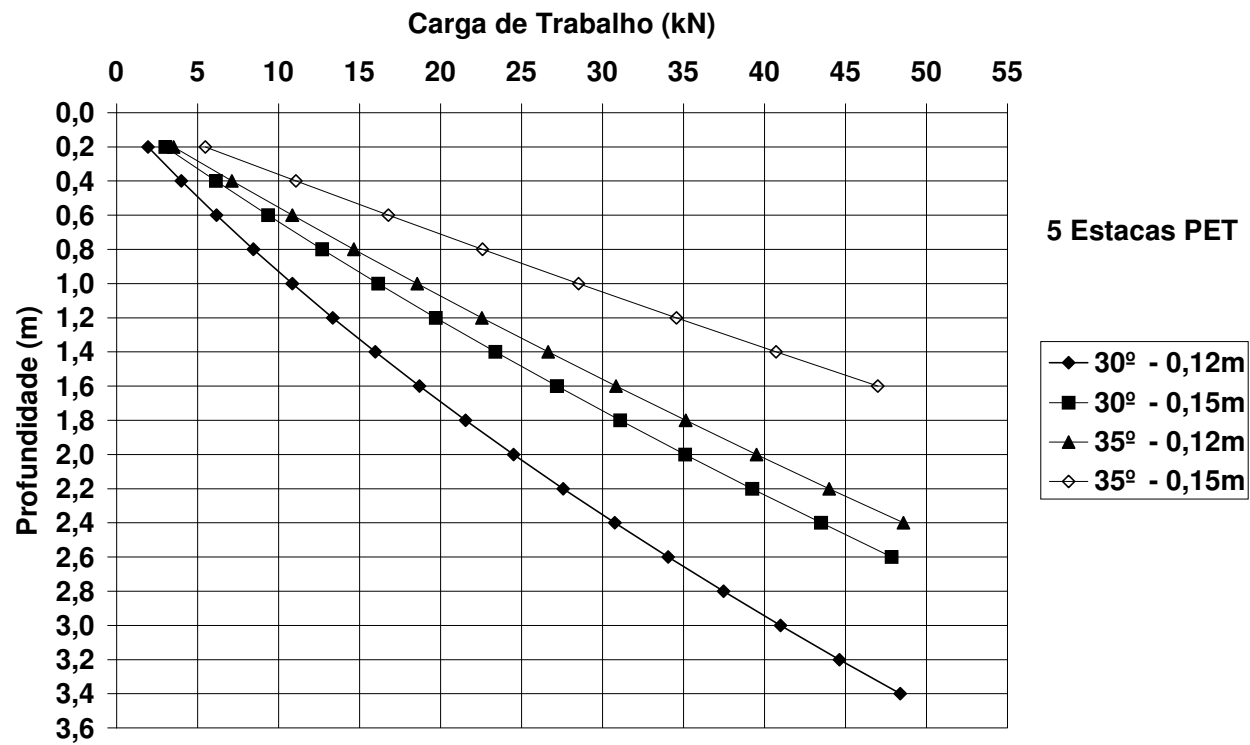


Figura 6.56 - Carga abaixo de 50 kN – 5 estacas.

$C \geq d$   
 $d$  – diâmetro da estaca



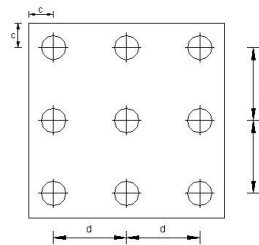
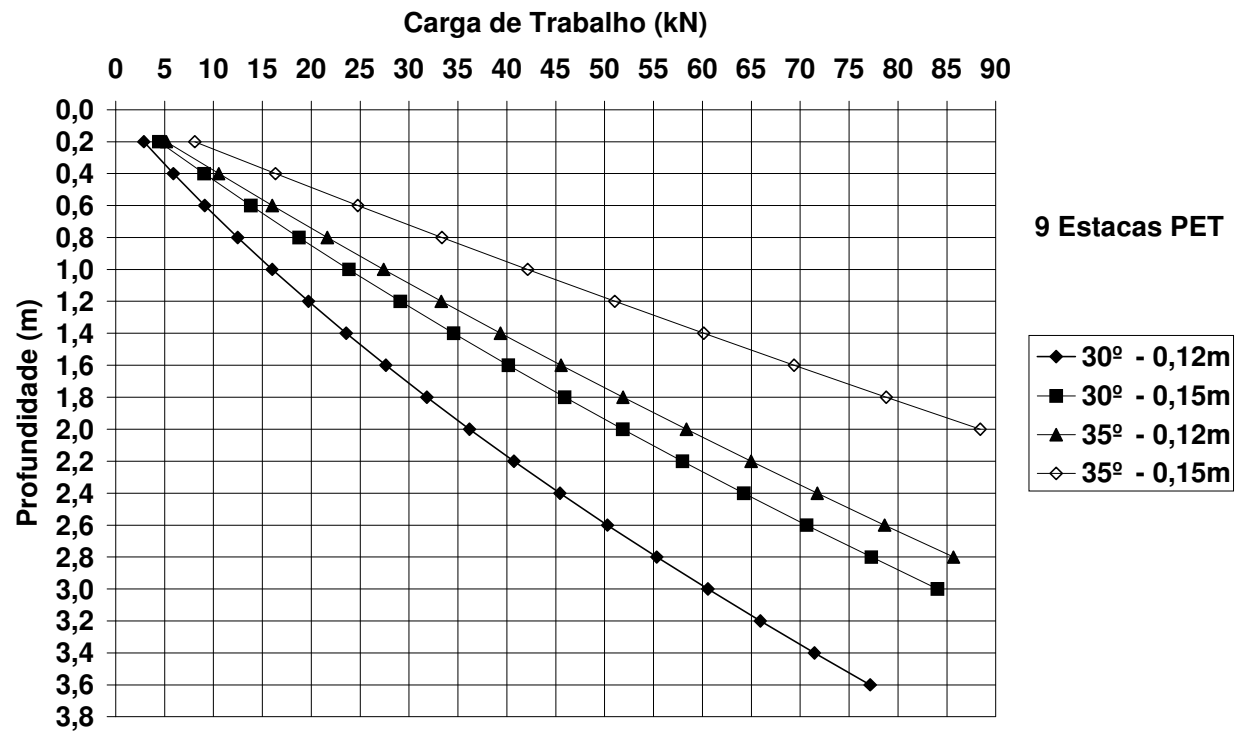


Figura 6.57- Carga abaixo de 90 kN – 9 estacas.

$C \geq d$   
 $d$  – diâmetro da estaca



### ESTUDO NUMÉRICO DA CAPACIDADE DE CARGA DA ESTACA PET

Para o desenvolvimento do estudo numérico de capacidade de carga das estacas PET no campo, foi utilizado o método dos elementos finitos (MEF), através do programa comercial SIGMA (GeoSlope, 2001). Este programa possibilita estudos planos e axissimétricos de tensão-deformação, sendo ainda possível a adoção de diferentes modelos constitutivos dos materiais.

De forma preliminar, foi avaliado o comportamento em laboratório da garrafa PET. Como casos particulares, foram escolhidos os ensaios de compressão simples realizados com a garrafa com água e a garrafa número cinco, envasada com areia (G5). A malha de elementos finitos utilizada está apresentada na Figura 7.1.

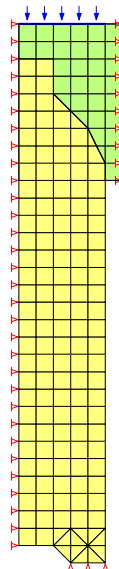


Figura 7.1 – Garrafa PET - Malha de elementos finitos e condições de contorno.

Com base nos estudos numéricos preliminares, um segundo estudo foi desenvolvido, procurando avaliar o comportamento da estaca PET em condições de campo.

### **7.1 - Estudo Numérico - Garrafa**

O primeiro estudo foi realizado com a simulação do ensaio da garrafa com água. Neste ensaio, a carga vertical de ruptura foi de 812,87kPa (início do escoamento do plástico). Importante lembrar que a pressão necessária para rasgo do plástico é de cerca de 1000kPa (1087kPa), conforme apresentado no Capítulo 3. Uma vez que o nível de tensão situou-se na fase linear, o modelo constitutivo adotado foi o linear elástico.

Como apresentado anteriormente, o módulo de elasticidade encontrado na Fase Linear deste ensaio foi de 11.710kPa, sendo este valor aqui aplicado. Por ser uma condição não drenada, o coeficiente de Poisson adotado foi de 0,49, pois o programa não permite o uso do coeficiente 0,50.

No ensaio de laboratório, a ruptura (início do escoamento) se deu para deslocamento axial de 24,46mm. Conforme apresentado no gráfico da Figura 7.2, o estudo numérico encontrou deslocamento vertical (recalque) de 14,91mm. Mesmo descontando a fase de acomodação (cerca de 5mm), o valor numérico seria menor do que aquele medido no laboratório.

Por outro lado, como apresentado na Figura 7.3, o deslocamento radial calculado pela análise numérica foi de 1,70mm, sendo determinado em laboratório, um deslocamento radial de 1,68mm, ou seja, um valor muito próximo.

Um segundo estudo numérico foi desenvolvido, simulando o comportamento da garrafa envasada com areia, G5. A carga de ruptura foi de 2919kPa, condicionando um deslocamento axial de 25,77mm. No entanto, neste caso, a carga de ruptura se dá após a Fase Linear, no final da Fase Dúctil. Assim, para execução de um estudo numérico linear elástico, a tensão axial utilizada foi a máxima alcançada na Fase Linear, ou seja, 2164kPa. Para esta tensão axial, o deslocamento axial medido foi de 14,65mm.

Face às dificuldades operacionais e a grande variação dos deslocamentos radiais, estes não foram quantificados nos ensaios de laboratório com garrafas envasadas com

areia. Lembra-se ainda que no ensaio da garrafa com água, não se pretendeu romper a garrafa no laboratório.

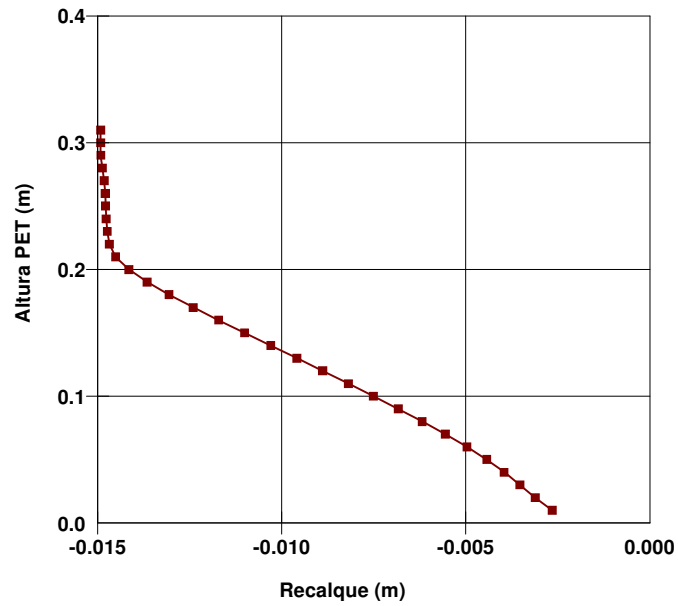


Figura 7.2 – Recalque na ruptura – Garrafa com água.

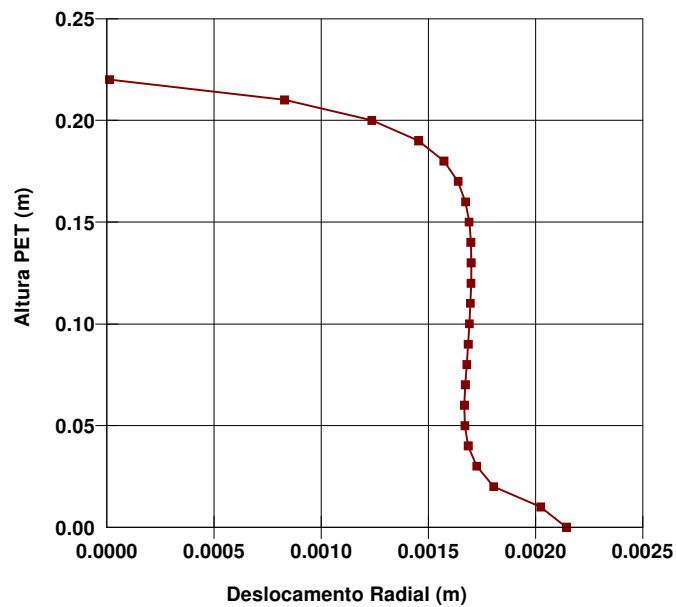


Figura 7.3 – Deslocamento radial externo na ruptura – Garrafa com água.

Na Figura 7.4, tem-se o recalque calculado numericamente para carga de 2164kPa. O valor máximo foi de 9,72mm, contra 14,65mm obtido no laboratório. Parte desta diferença estaria associada a fase de acomodação, não modelada no estudo numérico.

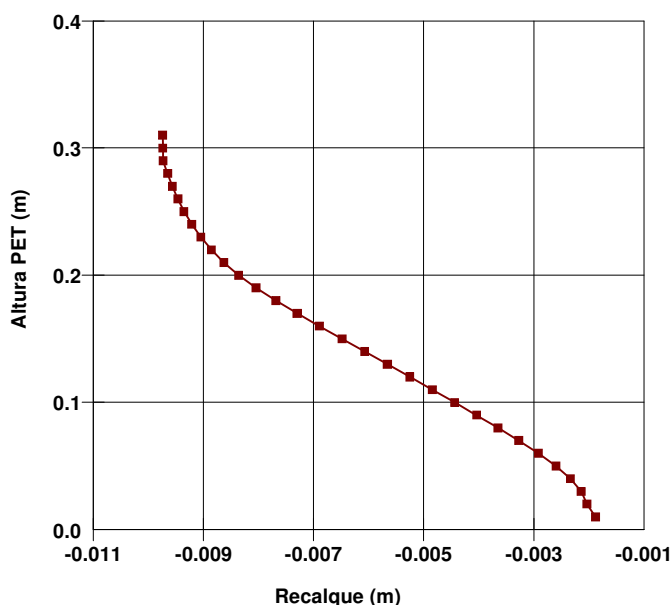


Figura 7.4 – Recalque – Simulação garrafa com areia (G5).

Na Figura 7.5, tem-se o desenvolvimento dos deslocamentos radiais com a altura da garrafa G5. Na parte central, a magnitude foi de 0,61mm, mostrando maiores deslocamentos radiais na parte inferior. Este comportamento não foi observado nitidamente em laboratório. Uma possível explicação poderia estar associada ao acabamento mais resistente do encaixe plástico do corpo da garrafa na base, que não foi modelado no estudo numérico.

Para avaliar processos de plastificação da garrafa PET no ensaio de compressão simples, foram também desenvolvidos estudos numéricos considerando um modelo elasto-plástico. Para adoção deste modelo, os parâmetros de entrada foram: módulo de elasticidade 53301kPa; coeficiente de Poisson igual a 0,3; ângulo de atrito igual a 35,4 graus, coesão igual a 1000kPa. O valor da coesão foi estimado com base na tensão de ruptura da garrafa sem areia.

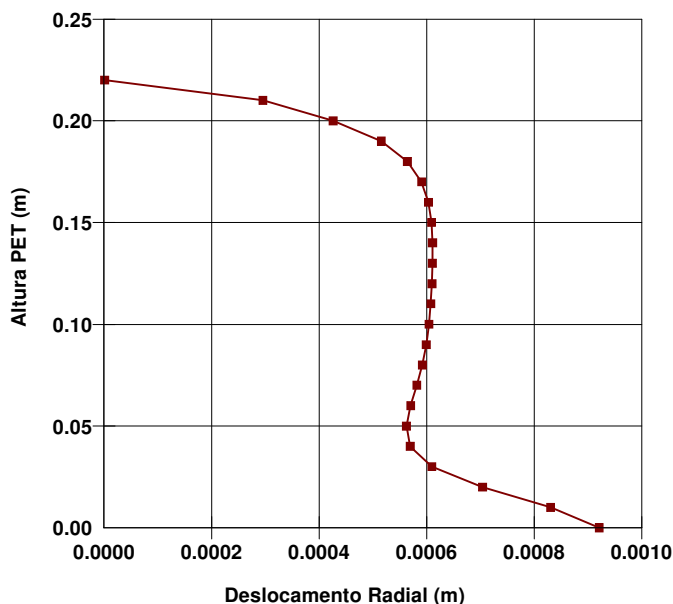


Figura 7.5– Deslocamento radial externo – Simulação garrafa com areia (G5).

O modelo elasto-plástico solicita ao usuário o ângulo de dilatância. A dilatância é um parâmetro utilizado no cálculo da função potencial plástico. Quando a dilatância é igual ao ângulo de atrito, a função potencial plástico é igual à função de plastificação. Neste caso, o fluxo plástico é associado, ou seja, as deformações têm as respectivas direções das tensões. O Sigma utiliza o critério de plastificação de Mohr-Coulomb como função de plastificação. Para esta simulação, o ângulo de dilatância foi considerado igual ao ângulo de atrito. Assim, o modelo trabalhou com fluxo associado.

Este estudo foi desenvolvido para cargas variando até 4088kPa, quando ocorreu o rasgo do plástico em laboratório. Seis níveis de tensão foram selecionados, sendo representativos: da carga de trabalho; do final da Fase Linear; do início da Fase Dúctil (não linear); da ruptura; do meio do escoamento; e do rasgo do plástico.

Os resultados estão apresentados na Figura 7.6. Para uma melhor avaliação quantitativa, estes foram apresentados na escala 1 para 1. As regiões manchadas são denominadas plastificadas. A plastificação é um indício da ocorrência de mobilização plena da resistência.

Para tensão de trabalho, a garrafa mostra-se intacta e sem plastificação interna. No final da Fase Linear, pontos de plastificação começam a surgir na base da garrafa.

No início da Fase Dútil a plastificação direciona-se para os pés e base lateral da garrafa. Na ruptura, toda base lateral está plastificada, sendo apresentados pontos de plastificação no contato do molde de topo com a garrafa. No meio da Fase de Escoamento, a plastificação alcança o meio da garrafa, num processo ascendente, sendo a plastificação no contato do molde de topo ampliada de forma descendente. No meio desta fase pode-se ainda verificar grandes deslocamentos laterais da base da garrafa, estando o fundo central em contato com o piso. Para tensão representativa do rasgo da garrafa em laboratório, os deslocamentos radiais foram bem acentuados na base. Neste momento, a garrafa mostra-se plastificada em toda extensão, exceto na região confinada pelo molde de topo.

Apesar das garrafas terem rompido (rasgado) em laboratório no centro, esta simulação ilustrou bem o processo comportamental. Como já mencionado, a garrafa PET detém uma forte resistência no anel da base, proveniente do processo de fabricação. Este diferencial resistivo não foi aqui modelado.

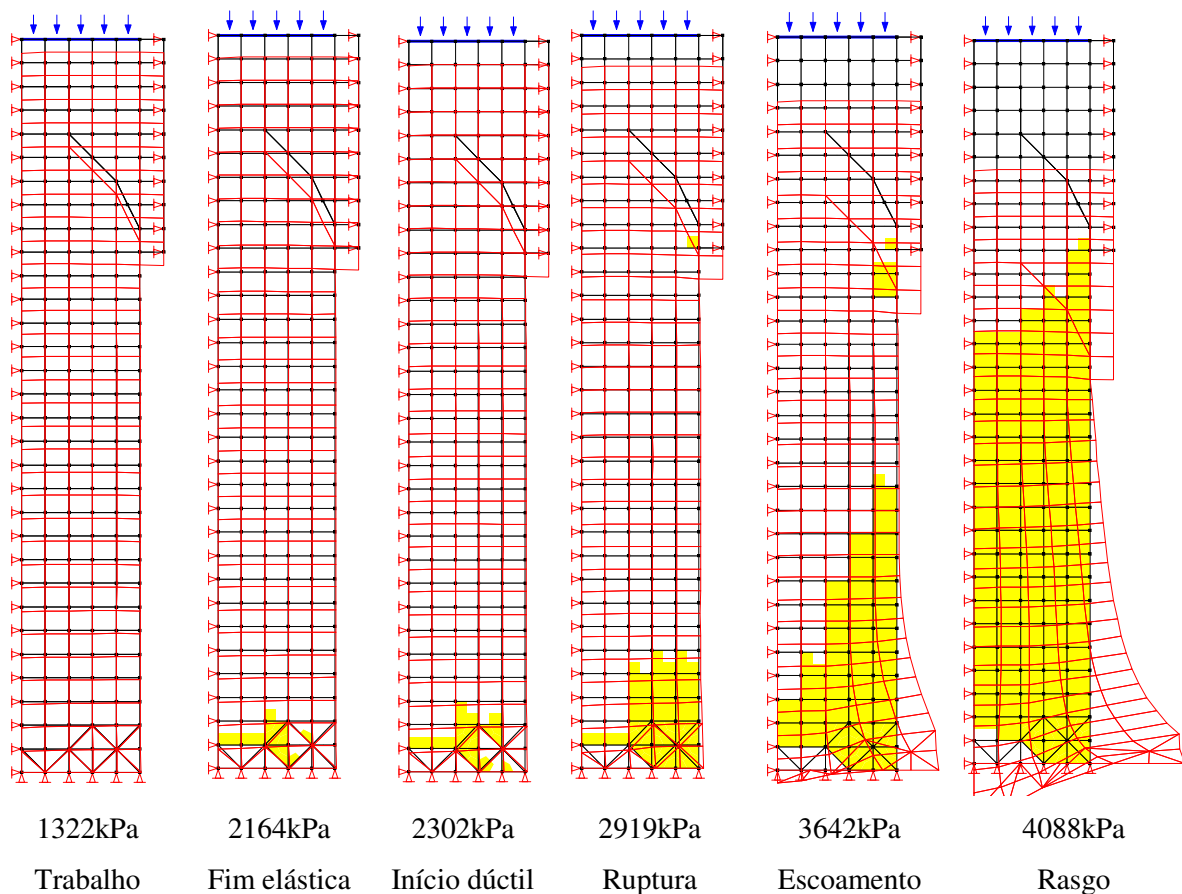


Figura 7.6 – Simulação numérica com base em modelo elasto-plástico.



Na Figura 7.7, tem-se ilustrado a curva carga versus recalque do ensaio com a garrafa número cinco (G5) em comparação com a simulação numérica. Acrescenta-se a este gráfico, uma simulação particular, realizada com módulo de elasticidade 38057kPa, que proporcionou um melhor ajuste da curva. Este módulo foi calculado para o final da Fase Dúctil, ou seja, na ruptura e início do escoamento.

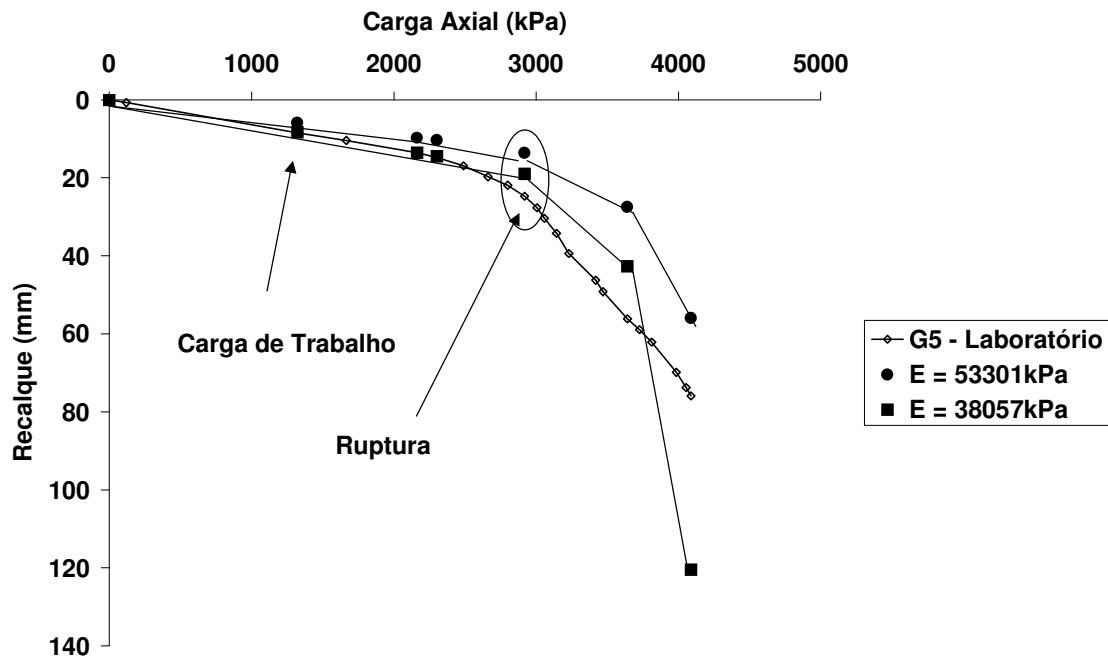


Figura 7.7– Simulação numérica do ensaio de compressão simples - G5.

A curva carga recalque obtida mostra o quanto é eficiente o uso de métodos numéricos para avaliação de comportamentos e quantificação preliminar de novos modelos estruturais. Em ambas análises os parâmetros de resistência foram mantidos, ou seja, ângulo de atrito igual a 35,4 graus e coesão igual a 1000kPa. Desta forma, a tensão de ruptura mostra-se insensível, sendo um bom ajuste de compatibilização carga *versus* recalque alcançado para o módulo de elasticidade 38057kPa.

## 7.2 - Estudo Numérico - Estaca PET

Pelo fato do programa Sigma ser configurado para solução de problemas em estado plano ou axissimétrico, não foi possível estudar numericamente os grupos de estaca. Assim, apenas as estacas simples, referentes aos Casos 1 e 2, foram estudadas. A modelagem da estaca PET procurou ser representativa das condições de campo. Quatro materiais foram selecionados para compor o modelo numérico: estaca, interface, solo e base de concreto. Para simular o comportamento do contato plástico-solo, ou seja, estaca-solo, foi elaborado um artifício numérico. Este artifício consistiu de acrescentar um elemento fino, com características de resistência e comportamento similares àsquelas esperadas no campo. Os modelos constitutivos destes materiais e seus respectivos parâmetros estão apresentados na Tabela 7.1

Tabela 7.1 – Materiais, modelos constitutivos e parâmetros.

Material	Estaca PET	Interface	Solo 1 / 2	Base
Modelo	Elasto-plástico	Elasto-plástico	Elasto-Plástico	Elasto-Linear
Módulo. elasticidade -E (kPa)	53301	1,5 / 2,1	15000 / 21000	100000000
Coefficiente Poisson	0,3	0,3	0,3	0,2
Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	-	-	19	-
Coefficiente de repouso Ko	-	-	0,5 / 0,43	-
Coesão (kPa)	1000	0	10	-
Ângulo de Atrito (graus)	35,4	20	30 / 35	-
Dilatância (graus)	35,4	0	30 / 35	-

Os parâmetros da estaca PET foram quantificados com base naqueles já apresentados para o estudo numérico com a garrafa envasada com areia.

O módulo de elasticidade da interface foi considerado igual a 10000 vezes menor que do solo. Este procedimento simula a possibilidade de deslizamento da estaca sobre solo. Este valor foi obtido por processo de tentativas, em observação aos comportamentos alcançados. Os parâmetros de resistência foram quantificados através dos ensaios de cisalhamento direto (solo-plástico-solo). A dilatância quando

quantificada menor que o ângulo de atrito, proporciona fluxo não associado ao sistema. Para que o fluxo plástico na interface fosse devido apenas às tensões de cisalhamento, a dilatância foi considerada igual a zero.

Como mencionado, os solos estudados apresentam agente cimentante. Para o estudo numérico, foi arbitrada uma coesão moderada de 10kPa em ambos os casos. A dilatância foi considerada igual ao ângulo de atrito, simulando fluxo plástico associado.

A base de concreto foi simulada através do modelo linear-elástico, sendo atribuídos parâmetros típicos para este material.

### 7.2.1- Primeira Simulação – Caso 1

Na primeira simulação – Caso 1, a malha de elementos finitos foi elaborada num espaço axissimétrico com 3,10m de altura e 0,90m de raio. Este raio de análise é 18 vezes o raio da estaca. A estaca tem 2,2m de profundidade. Assim, a distância do extrato rígido foi de 0,90m, ou seja, 12 vezes o raio. Nesta configuração, o meio foi discreto em elementos finitos quadrados, triangulares e retangulares (4 e 3 nós). A malha, ilustrada na Figura 7.8, foi então finalizada com 1243 nós e 1165 elementos.

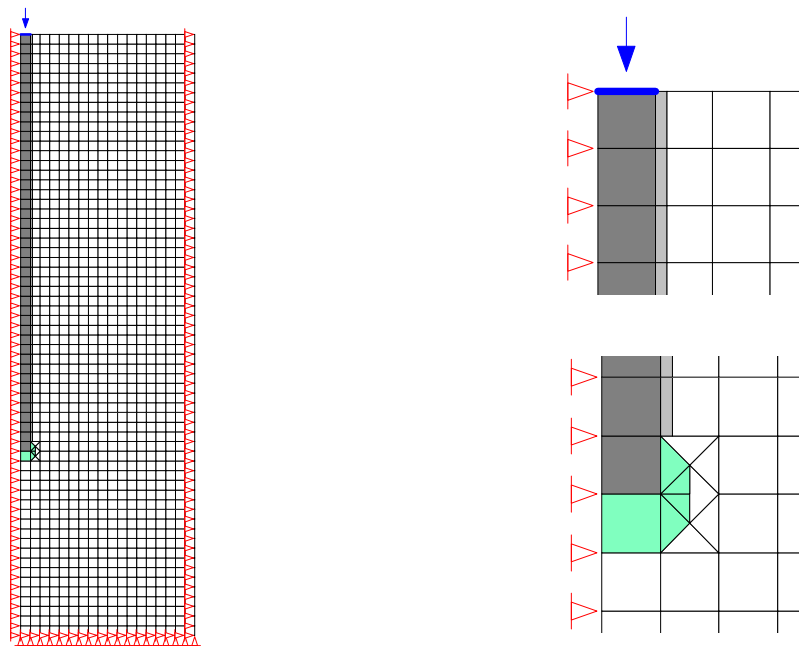


Figura 7.8 – Malha de elementos finitos – Caso 1.

Para o desenvolvimento deste estudo, a carga axial da estaca foi aplicada de forma seqüencial, simulando uma prova de carga no campo. A curva carga *versus* recalque está apresentada na Figura 7.9.

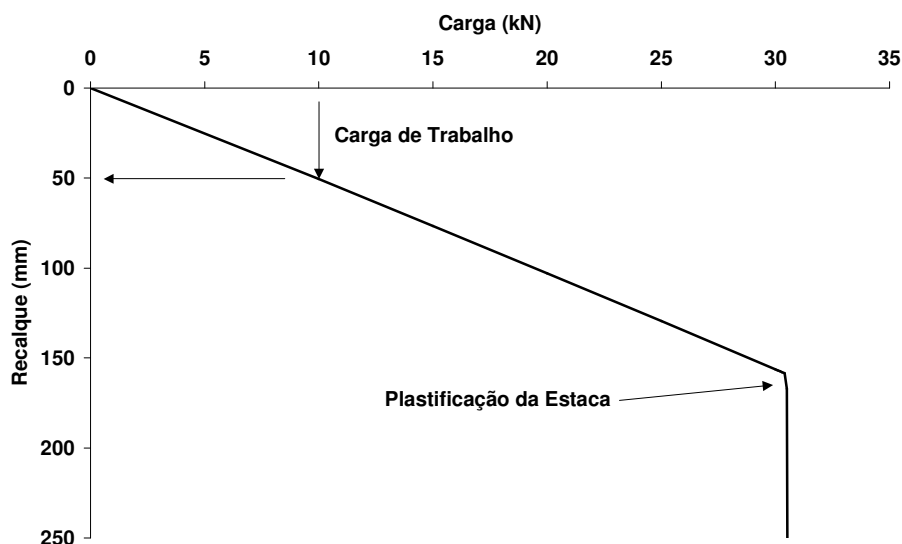
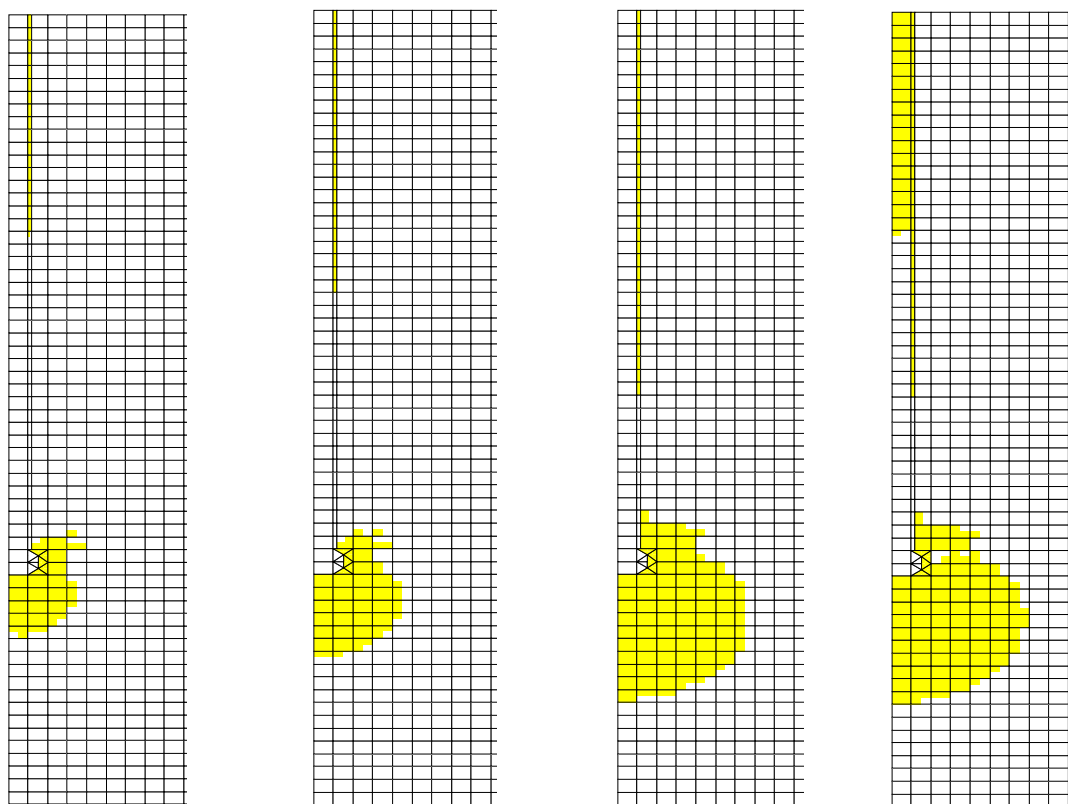


Figura 7.9 – Curva carga *versus* recalque – Caso 1.

A curva carga *versus* recalque mostra o comportamento e o desempenho do modelo elasto-plástico que atuou sobre a estaca. A carga de plastificação da estaca foi de 30,6kN, o que representa uma tensão no topo da estaca de 3896kPa. Para o ensaio com a garrafa número cinco (G5 - Figura 7.6), a ruptura se deu para tensão de 2919kPa no topo do molde, correspondente a uma carga de 22,9kN.

Este resultado é bastante importante, pois mostra o ganho absoluto que se tem com o sistema PET quando inserido em ambiente confinado. Neste caso, o ganho na capacidade de suporte foi de 34%. Comparando o comportamento das curvas de carga *versus* recalque da garrafa número cinco e a estaca PET no campo, pode-se ainda observar uma ruptura mais abrupta do segundo caso em relação ao primeiro.

Para avaliar o estado de plastificação da estaca PET durante o carregamento, quatro pontos da curva carga *versus* recalque foram apresentados. O primeiro foi para avaliação do desempenho na carga de trabalho aqui sugerida, ou seja, 10kN. O último para carga de ruptura (30,6kN). O segundo e terceiro foram para cargas intermediárias, para que fosse possível fazer uma avaliação do processo progressivo da plastificação. Os resultados estão ilustrados na Figura 7.10.



10kN – Trabalho

15kN

30kN

30,6kN Ruptura

Figura 7.10 – Desenvolvimento de plastificação no processo de carga – Caso 1.

Os resultados mostram um comportamento bastante coerente do sistema. Para carga de trabalho de 10kN tem-se a estaca não plastificada, e o solo de fundação sofre plastificação num raio de abrangência de cerca de 20cm. Esta dimensão representa 1,3 vez o diâmetro da base de concreto da estaca. A interface sofreu plastificação até a profundidade de 1,15m. O recalque calculado para a carga de trabalho foi de 50mm. Este valor pode ser considerado como insatisfatório para engenharia de fundações, que sugere recalques da ordem de 25mm a 40mm, para distorções angulares de 1/500 e 1/300, respectivamente (Bjerrum; 1963, citado em Araújo, 1999). Neste caso, torna-se necessária a confecção do bloco de fundação com majoração da cota de arrasamento em cerca de 26mm. Por segurança, é sugerida uma elevação entre 30 e 40mm.

Para carga de 15kN, a plastificação avançou para um raio de aproximadamente 30cm, ou seja, 2 vezes o diâmetro da base de concreto da fundação. Neste nível de carga, a plastificação da interface avançou para profundidade 1,35m. Este resultado

sugere que a carga de trabalho da estaca PET poderia ser majorada para 15kN. No entanto, o recalque calculado foi de 77mm, ou seja, seria necessário elevar a cota de arrasamento em cerca de 50mm. No entanto, por se tratar de um estudo numérico, estudos de campo seriam recomendados para alteração da carga de trabalho de 10kN para 15kN.

Para carga axial de 30kN, estando a estaca na eminência de romper, a plastificação avançou para um raio de 50cm. Este valor é equivalente a 3,3 vezes o diâmetro da estaca. Para esta carga limite, a plastificação na interface alcançou a profundidade 1,68m. O recalque calculado foi de 156mm.

É interessante observar que mesmo o solo de fundação plastificando em todas as etapas até aqui avaliadas, a curva carga recalque mostrou-se linear. Assim, só para carga de 30,6kN, a solução numérica indicou que a estaca plastificou, sendo esta plastificação quantificada até a profundidade 1,20m. Neste momento, o recalque acusou valor bastante elevado, em 546mm.

Para carga de trabalho, o recalque de todo o corpo da estaca está apresentado na Figura 7.11. De acordo com o resultado, o recalque na base da estaca foi de apenas 2,3mm, contra 50mm no topo.

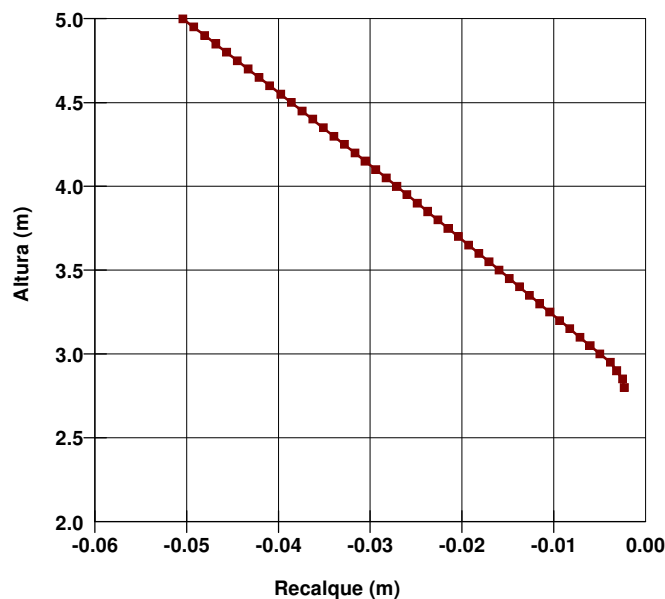


Figura 7.11 – Recalque para carga de trabalho (10kN) – Caso 1.

Os deslocamentos radiais no corpo da estaca estão ilustrados na Figura 7.12. Como pode ser observado, os deslocamentos são maiores no topo, medido em 0,36mm, sendo minimizados de forma não linear com a profundidade. No topo da base de concreto, a magnitude alcança 0,32mm. Estes deslocamentos foram alcançados com a carga de trabalho de 10kN. Esta carga representa uma tensão axial de 1273kPa. Para tensão de 2164kPa, aplicada no estudo numérico com a garrafa número cinco (G5), o deslocamento radial no centro da garrafa foi de 0,61mm. No ensaio com água, quando foi aplicada uma carga próxima do rasgo do plástico da garrafa, o deslocamento radial medido em laboratório foi de 1,68mm. Relacionando este valor com o obtido no estudo numérico com a estaca PET, a segurança quanto ao rasgo está em cerca de 4,7 vezes.

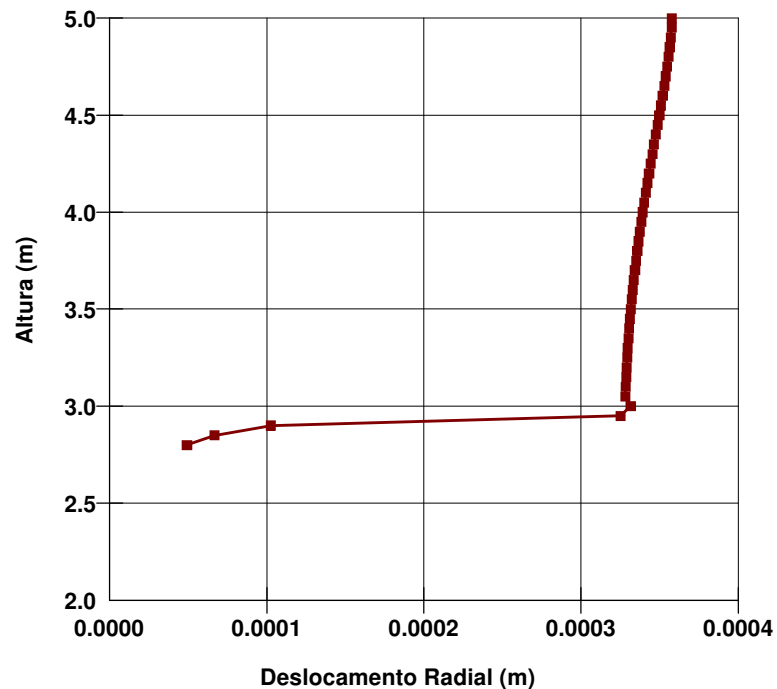


Figura 7.12 – Deslocamento radial para carga de trabalho (10kN) – Caso 1.

As tensões horizontais atuantes no corpo da estaca são importantes para mobilização da resistência ao cisalhamento lateral. Os valores encontrados numericamente, sugerem que o modelo não induziu aumento de tensão horizontal. Este comportamento numérico simula fielmente o estado no repouso proposto na modelagem

e aplicado no cálculo da resistência lateral das estacas, como apresentado nas Tabelas 6.7 e 6.9. Com o término do elemento de interface no topo da base de concreto, as tensões horizontais são fortemente majoradas, alcançando magnitudes bem acima da condição geostática. Face aos elevados gradientes de tensão, percebe-se que os resultados numéricos, nesta região, sofreram uma oscilação.

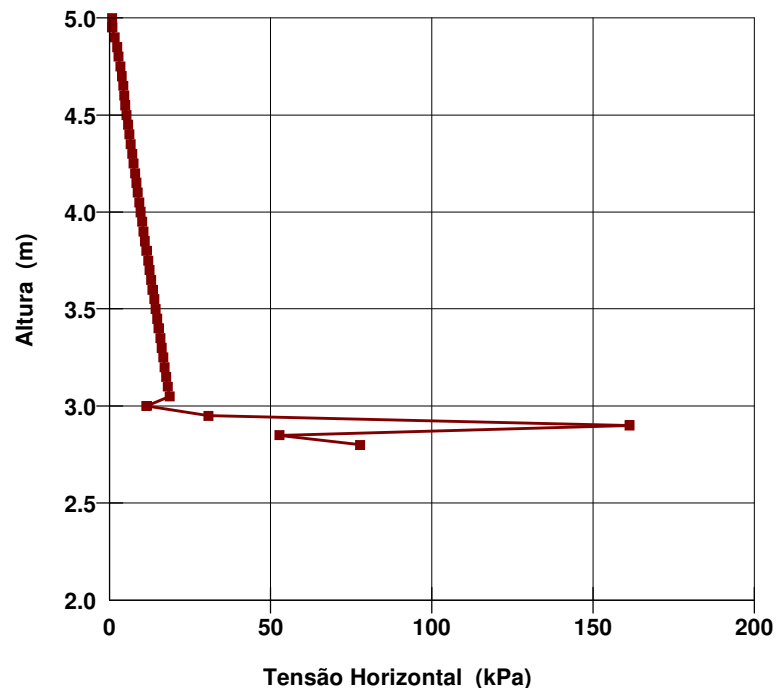


Figura 7.13 – Tensão horizontal para carga de trabalho (10kN) – Caso 1.

Para avaliação do comportamento geral da estaca PET (Caso 1), foram apresentados três gráficos de isovalores: recalques; tensões verticais; e tensões horizontais. Os resultados estão apresentados na Figura 7.14.

De acordo com o comportamento dos recalques, pode-se perceber que a modelagem correspondeu a premissa da estaca trabalhar fortemente por resistência de ponta. Os resultados mostram que o sistema não induziu recalques no solo lateral.

Sendo o coeficiente de repouso igual a 0,5, pode-se observar uma boa congruência entre as tensões verticais e horizontais, que não se mostram afetadas pela estaca na região do fuste. Por outro lado, os resultados mostram o quanto a resistência



de ponta está sendo mobilizada. Nesta região as tensões são muito majoradas, condicionando elevados gradientes de tensão.

Procurando avaliar a carga suportada pela fundação, tem-se que a média da tensão foi de 329kPa na base de concreto. Sendo a tensão *in-situ* igual a 42kPa, o acréscimo de tensão na base foi de 287kPa. Assim, a carga resistida pela ponta de concreto da estaca foi de 5,07kN, o que representa cerca de 50% da carga aplicada na estaca.

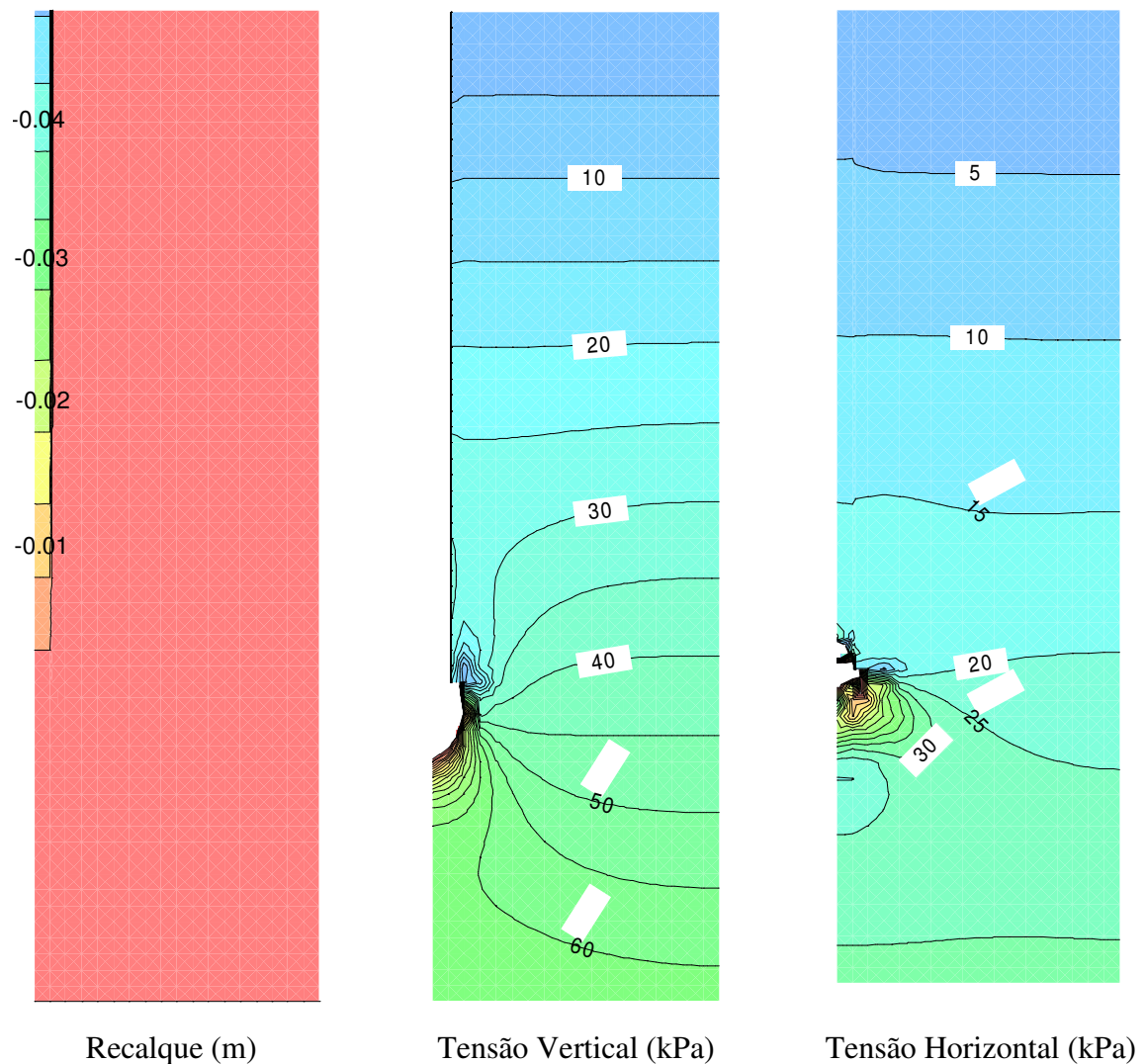


Figura 7.14 – Linhas de isovalores para recalque, tensão vertical e horizontal –  
Caso 1.

### 7.2.2- Segunda Simulação – Caso 2

Na segunda simulação – Caso 2, a malha de elementos finitos do Caso 1 foi aproveitada. Neste caso, a estaca tem 1,4m de profundidade. Assim, a distância do extrato rígido foi de 1,70m, ou seja, cerca de 23 vezes o raio. Apesar de elevada, por se tratar de um estudo comparativo, a dimensão original foi mantida.

Similarmente ao caso anterior, para o desenvolvimento deste estudo, a carga axial da estaca foi aplicada de forma sequencial, simulando uma prova de carga no campo. Para uma avaliação comparativa, as curvas carga *versus* recalque, relativas aos Casos 1 e 2, estão apresentadas na Figura 7.15

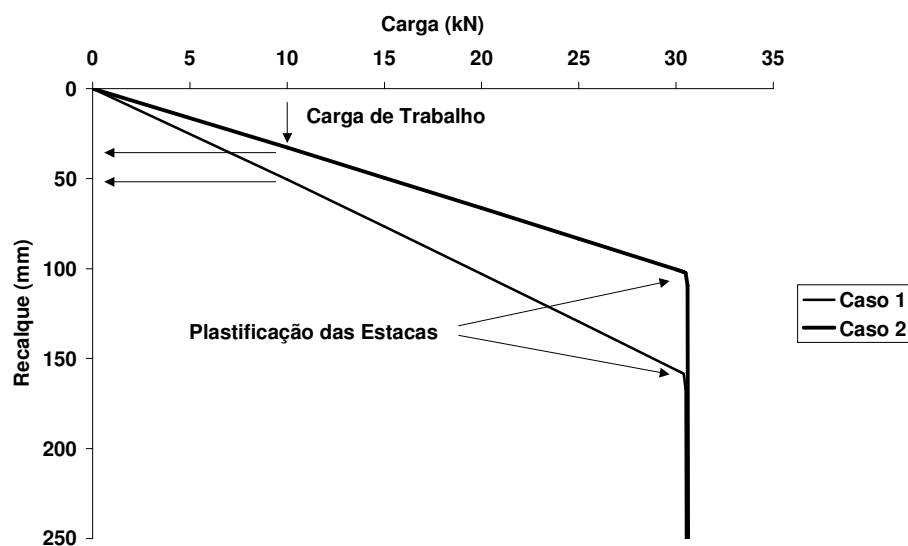


Figura 7.15 – Curvas carga *versus* recalque – Casos 1 e 2.

Como pode ser observado, a melhora na capacidade de suporte do solo não foi refletida na carga de plastificação da estaca. No Caso 1, a plastificação foi alcançada para carga de 30,6kN. Neste caso, a carga de plastificação da estaca foi de 30,7kN.

Diferentemente à carga de plastificação, o recalque foi sensivelmente reduzido com o aumento da rigidez do solo de 15MPa para 21MPa. Assim, para a carga de trabalho (10kN), o recalque que era de 50mm passou para 33mm, respectivamente.

Similarmente ao caso anterior, para avaliar o estado de plastificação da estaca PET durante o carregamento, quatro pontos da curva carga *versus* recalque foram apresentados. Os resultados estão ilustrados na Figura 7.16.

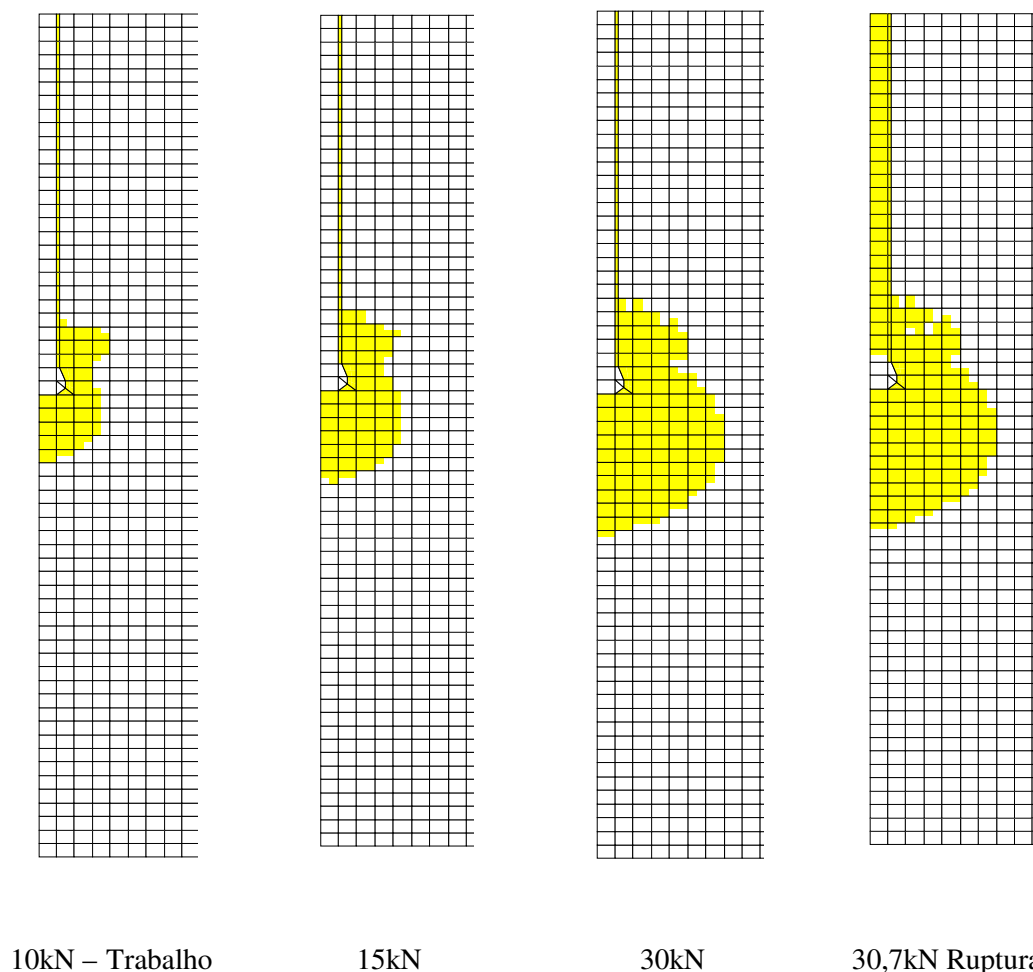


Figura 7.16 – Desenvolvimento de plastificação no processo de carga – Caso 2.

Os resultados da zona de plastificação no solo mostram-se semelhantes àqueles obtidos no Caso 1. No entanto, diferentemente ao Caso 1, a plastificação da interface foi plena em todos os níveis avaliados. Para a carga de plastificação da estaca, que para o Caso 1 alcançou parte da estaca, neste Caso foi plena em toda extensão da estaca.

O recalque de todo o corpo da estaca está apresentado na Figura 7.17. De acordo com o resultado, o recalque na base da estaca foi de apenas 1,80mm, contra 32,65mm do topo. Este resultado representa uma minimização no recalque de topo em 35% e no recalque de base em 22%, em relação ao Caso 1.

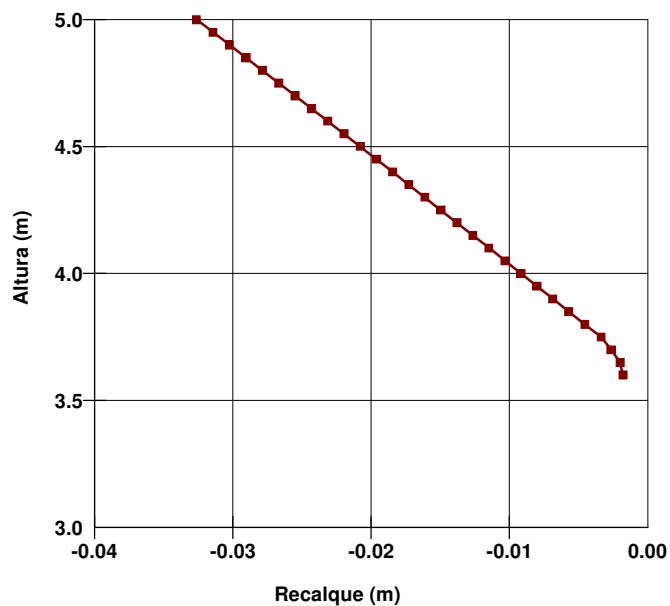


Figura 7.17 – Recalque para carga de trabalho (10kN) – Caso 2.

Os deslocamentos radiais no corpo da estaca estão ilustrados na Figura 7.18. Como pode ser observado, os deslocamentos são maiores no topo, medido em 0,36mm, igual ao calculado para o Caso 1.

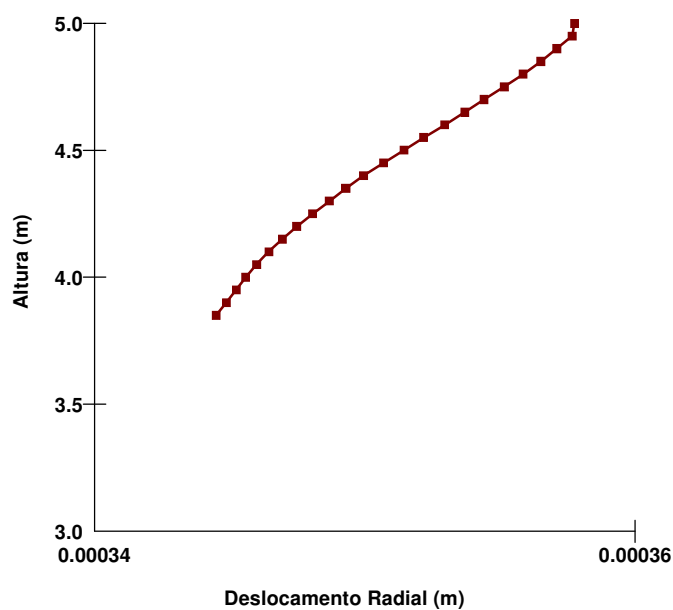


Figura 7.18 – Deslocamento radial para carga de trabalho (10kN) – Caso 2.

As tensões horizontais atuantes no corpo da estaca até a profundidade de 1,15m estão apresentadas na Figura 7.19. Similarmente ao Caso 2, a estaca não induziu aumento de esforços horizontais. Apesar de não ser apresentado neste gráfico, com o término da interface as tensões horizontais são fortemente majoradas, alcançando magnitudes bem acima da condição geostática.

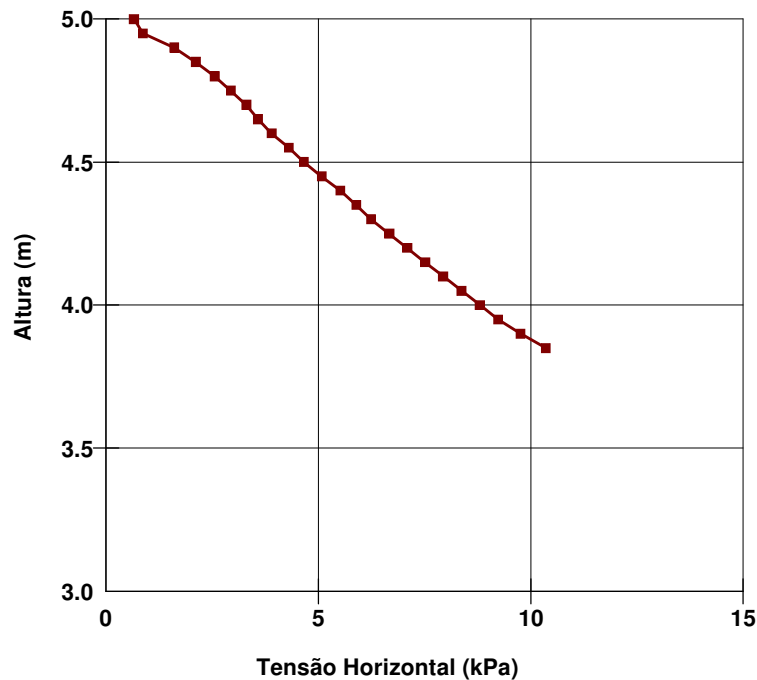


Figura 7.19 – Tensão horizontal para carga de trabalho (10kN) – Caso 2

Para avaliação do comportamento geral da estaca PET no Caso 2, foram também apresentados três gráficos de isovalores. Os resultados estão apresentados na Figura 7.20. Similarmente ao Caso 1, pode-se perceber que a modelagem correspondeu a premissa da estaca trabalhar bem por resistência de ponta. Os resultados mostram que o sistema não induziu recalques no solo lateral. Neste caso, sendo o coeficiente de repouso igual a 0,43, ao invés de 0,50, pode-se observar este efeito nitidamente ao comparar as tensões verticais e horizontais

Para avaliar a carga suportada pela base da fundação, tem-se que a média da tensão foi de 310,5kPa, contra 329kPa do Caso 1. Sendo a tensão *in-situ* igual a 26,6kPa, o acréscimo de tensão na base foi de cerca de 284kPa, contra 287kPa do Caso

1. Assim, a carga resistida pela ponta de concreto da estaca foi de 5,02kN, o que representa 50% da carga aplicada na estaca (10kN).

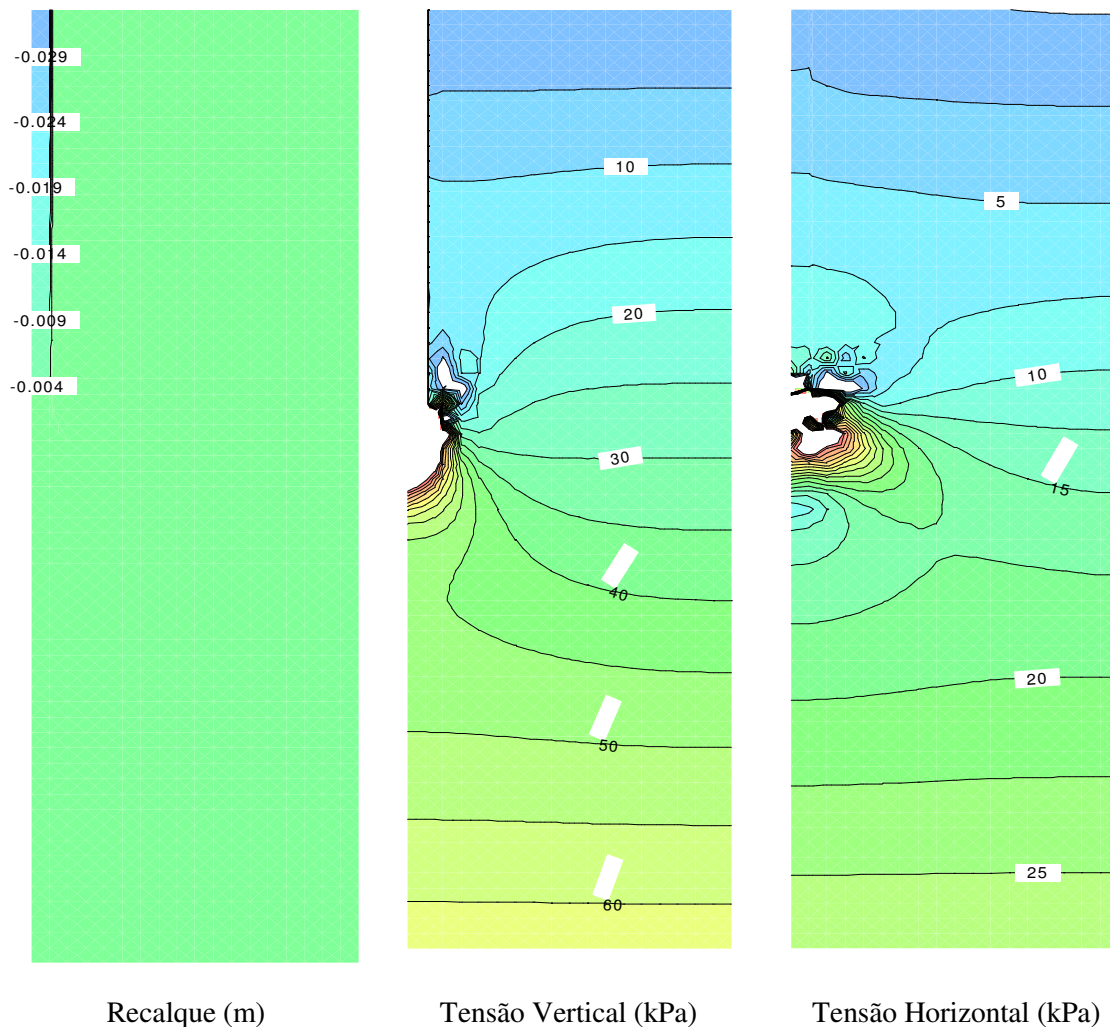


Figura 7.20 – Linhas de isovalores para recalque, tensão vertical e horizontal – Caso 2.

### 7.3 – COMENTÁRIOS FINAIS

A modelagem numérica tem sido uma forte ferramenta para avaliação do comportamento de sistemas de engenharia em condições de campo.

Para o caso em questão, este capítulo teve o objetivo de simular uma prova de carga da estaca PET, em conformidade com parâmetros bem avaliados experimentalmente e condições hipotéticas de campo.

O modelo numérico procurou simular uma interface resistente mas livre para movimentar. Esta consideração proporcionou boa correlação do comportamento numérico com os resultados apresentados pelas formulações racionais contidas no Capítulo 6.

Face ao processo executivo proposto, a estaca PET tende a mobilizar significativamente a resistência de ponta. O modelo numérico foi bastante fiel a este mecanismo, sendo 50% da carga aplicada no topo da estaca, resistida pela resistência de ponta. Em muitos sistemas flutuantes, esta mobilização pode ser considerada desprezível.

A simulação da prova de carga numérica mostrou que o efeito do confinamento lateral do solo majora a carga para o rasgo do plástico da estaca para cerca de 30kN, contra cerca de 20kN dos ensaios de compressão simples (não confinados). Porém, mesmo com este aumento da capacidade de suporte, face ao elevado recalque calculado e os aspectos preliminares da pesquisa, é sugerido que a carga de trabalho seja de 10kN.

Finalmente, é interessante comentar que a melhoria da rigidez do solo tem reflexo sobre os recalques, mas não proporciona ganho de resistência da estaca PET.

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

#### **8.1 - CONCLUSÕES**

As análises desenvolvidas no presente trabalho demonstraram que a utilização de garrafas recicláveis PET, envasadas com areia, como elementos de fundação e estrutura de arrimo, é viável, tanto em termos ecológicos, quanto em termos econômicos e sociais.

Após o desenvolvimento de alguns protótipos em campo, a implantação destas estruturas poderá dispensar a utilização de mão-de-obra especializada, contemplando o processo executivo artesanal. E tendo como intuito a sua aplicabilidade voltada para a população de baixa renda.

Os ensaios de laboratório aqui desenvolvidos e as simulações numéricas realizadas norteiam para utilização cotidiana da tecnologia PET em obras de engenharia popular. Os ensaios e simulações forneceram subsídios importantes para as análises críticas dos processos de elaboração, implantação e execução destas estruturas.

#### **8.2 - CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Procurando dar uma melhor focalização às conclusões e observações finais, estas foram dispostas de forma estruturada e seqüencial, como apresentado a seguir.



## **Reutilização de Garrafas PET**

A reciclagem de garrafas PET tem sido uma grande preocupação daqueles que detêm a ciência da gravidade do fato e felizmente, por muitos que não a detêm. Atitudes populares e governamentais se somam na busca de alternativas para solução deste grave problema ecológico.

Apresentado pelo senador Carlos Bezerra, tem-se o “Projeto de Lei do Senado Nº 269, de 1999, que “estabelece normas para a destinação final de garrafas e outras embalagens plásticas e dá outras providências”. Neste sentido, as garrafas PET tendem a voltar a sua origem, através da recompra pelas empresas produtoras, ou a ser reutilizadas como elementos de artesanato ou matéria prima para outros produtos.

Um ponto importante que pode ser aqui levantado, seria o das empresas produtoras, em conjunto com os projetistas dos modelos fabricados, trabalharem no sentido de facilitar a reutilização destes elementos plásticos, nas diversas áreas, tais como artesanato, decoração, engenharia, dentre outras.

Para o caso em questão, associado a este trabalho, vale ressaltar que a garrafa PET tem grande resistência à tração, em torno de 1000kPa, e longa durabilidade, cerca de 450 anos. Com estes quantitativos, torna-se possível a sua aplicação em obras de engenharia.

## **Envasamento**

A metodologia desenvolvida mostrou-se satisfatória em comparação aos valores obtidos em relação ao ensaio prescrito na “MB 3388 (ABNT /1991) – Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos”. Os resultados obtidos por este tipo de metodologia mostram uma variação entre os próprios índices de vazios mínimos ( $e_{min}$ ). Para as amostras 1, 2, 3 o envasamento apresentou valores menores que os obtidos através do ensaio de  $e_{min}$ . Por outro lado as garrafas envasada com a amostra 4 apresentaram índice de vazios maiores para as garrafas, quando comparados com os valores obtidos nos ensaios de  $e_{min}$ .

É possível que esta diferença (índice de vazios na garrafa variando para mais ou para menos ) esteja relacionada com a maior flexibilidade da parede da PET e/ou forma dos grãos. Após estabelecida a relação entre o método desenvolvido e o ensaio de índice de vazios mínimo. Este método de envasamento foi utilizado como padrão. Sendo comparado com o enchimento aleatório apresentando dispersão máxima de 3,5%.

Este comportamento foi importante, pois mostrou que utilizando uma técnica simples de compactação, é possível obter bons estados de densificação. Em termos de aplicação no campo, este comportamento é muito favorável, sendo possível sua aplicação por pessoal com pouco treinamento técnico.

### **Interface SPPS – Solo-Plástico-Plástico-Solo – Cisalhamento Direto**

Para avaliar a resistência ao cisalhamento no contato das garrafas envasadas com areia no muro PET, foram desenvolvidos ensaios com interface solo-plástico-plástico-solo. O comportamento deste ensaio mostrou duas fases distintas. A primeira apresenta um comportamento linear, até a ocorrência de um movimento horizontal abrupto, denominado de pré-ruptura. Após a pré-ruptura, o material apresenta um ganho de resistência, com comportamento dúctil, sendo este ganho proporcional ao nível de tensão normal imposto. Este ganho estaria associado a maior rugosidade da superfície de cisalhamento, proporcionada pelo aumento de tensão no contato, quando o plástico tenderia a contornar melhor os grãos de areia.

Com este estudo, foi possível calcular os parâmetros de pico desta interface. Por ajuste linear, o ângulo de atrito foi igual a 20,51 graus e o intercepto de coesão igual a 4,25kPa. Para avaliar a mobilização de resistência em condições de campo ( $FS=1,5$  a  $2$ ), foram determinados os parâmetros de resistência na pré-ruptura. Neste estudo, o ângulo de atrito foi igual a 20,46 graus, sendo a coesão de intercepto igual a  $-2,68$ kPa.

Os valores positivos e negativos para coesão de intercepto, podem estar associados a característica dilatante e contractante do material na ruptura e pré-ruptura, respectivamente.

## **Interface PP – Madeira-Plástico-Plástico-Madeira – Cisalhamento Direto**

Os resultados mostraram um comportamento linear, podendo ser modelado como perfeitamente plástico, ou seja, a interface resiste a uma carga limite que após alcançada, tem-se um movimento horizontal sob tensão constante.

Um fato interessante foi que, para o mesmo nível de tensão normal, as cargas limites alcançadas foram semelhantes àsquelas encontrada para pré-ruptura dos ensaios com interface SPPS.

Desta forma, tem-se que, a primeira fase dos ensaios SPPS estaria associada a resistência do contato plástico-plástico e a segunda fase, associada ao ganho de resistência proporcionado pela areia.

## **Interface PET-PET - Plano Inclinado (ensaio de rampa)**

Estudos em verdadeira grandeza foram desenvolvidos através de ensaios em plano inclinado. Estes estudos foram desenvolvidos para os arranjos triangular e cúbico. O arranjo triangular é o mais recomendado para obras de contenção, uma vez que dá a estrutura uma condição mais estática, com menor índice de vazios e como consequência, maior densidade.

A análise dos resultados dos ensaios realizados para o arranjo triangular mostrou ângulo de atrito de 18,7 graus e intercepto de coesão nulo.

O ensaio de rampa é mais representativo das condições de interface no campo, uma vez que trabalha com a própria garrafa. No entanto, o mesmo não ocorre com a indução das tensões de cisalhamento. No ensaio, as tensões cisalhantes são induzidas enquanto tem-se o alívio de tensões normais. Este decréscimo tende a minimizar a rugosidade da superfície de contato. Assim, o ângulo de atrito da superfície diminui durante o ensaio, sendo mínimo no momento da ruptura. Este processo seria inverso nas condições de campo, quando a mobilização tenderia aumentar a rugosidade no contato.

## **Altura do Muro PET**

Estudos desenvolvidos com uma garrafa PET mostraram que o sistema estaria estável para alturas da ordem de 60cm. Esta magnitude foi considerada inviável para aproveitamento em campo. Estudos utilizando três garrafas em série, mostraram que o sistema poderia conter alturas de até 2,10m. No entanto, neste caso, a quantidade de garrafas seria muito elevada. De forma otimizada, a utilização de duas garrafas, proporcionou o meio termo entre altura alcançada e número de garrafas. Para este sistema, a altura alcançada foi de 1,80m. Apesar de pequena, pode atender uma grande gama de interesse para obras de pequeno porte, para população de baixa renda.

## **Pseudo Retaludamento**

Para alcançar alturas maiores, foi apresentada uma solução do tipo retaludamento. Para um estudo hipotético apresentado, as obras de contenção deveriam ficar numa distância de pelo menos, 2,90m. Com esta magnitude, a encosta “retaludada” deveria ter inclinação máxima de 32 graus, ou seja, uma razão 1/1,6.

## **Inclinação das Garrafas**

Um artifício simples e técnico utilizado para aumentar a resistência ao cisalhamento da interface foi o de inclinar as garrafas. Os estudos mostraram que a inclinação majora a estabilidade ao deslizamento mas minora a estabilidade ao tombamento. Na análise apresentada, o ângulo de 15 graus mostrou-se o mais adequado para o sistema.

## **Inclinação do Muro**

Quando se pensa em muro de contenção tem-se a idéia de que o muro deve ser vertical. No entanto, uma leve inclinação pode proporcionar condições bem mais favoráveis sem ferir o aspecto estético e de aproveitamento de espaço.

No estudo realizado, foi possível verificar que existe um ângulo “ótimo” para o sistema de contenção. De acordo com os resultados, este ângulo seria da ordem de 9 graus.

### **Atrito Solo-Muro**

O atrito solo-muro mostrou-se bastante relevante nos estudos de estabilidade, sendo recomendada toda cautela com relação a sua supressão nos projetos (atrito zero). Para o modelo estudado, o atrito solo-muro mostrou ser forte estabilizador das obras de contenção, aumentando a segurança dos três processos de ruptura (deslizamento, tombamento, fundação).

### **Molde de Topo e Base**

Para realização dos ensaios de compressão simples, foi necessário o desenvolvimento de moldes adaptadores para o topo e base da garrafa PET. O material utilizado foi uma resina de poliuretano, com nome comercial resina cristal. A maior preocupação com estes moldes era sua compressibilidade, em confronto com compressibilidade das garrafas PET envasadas com areia, que naturalmente, naquele momento, ainda não tinham sido ensaiadas.

Os resultados mostraram um comportamento em três fases, sendo a primeira do tipo acomodação, a segunda linear, sendo a última de ruptura. Na fase de acomodação o módulo de elasticidade foi estimado em 1GPa. Para a fase linear o módulo foi estimado em 2GPa. Face aos valores encontrados para garrafa PET envasada com areia, estas magnitudes puderam ser consideradas como sendo aceitáveis para execução dos ensaios.

### **Ensaio de Compressão Simples - Garrafa PET Envasada com Água**

De acordo com a revisão bibliográfica, a carga de pressão suportada pela garrafa é da ordem de  $10\text{kgf/cm}^2$ , ou seja, 1000kPa. No ensaio de compressão simples realizado com a garrafa envasada com água, um ponto de escoamento foi verificado para carga de

813kPa, sendo alcançada a carga de 1010kPa, quando o ensaio foi paralisado evitando a ruptura da garrafa para não comprometer a integridade do equipamento. O módulo de elasticidade calculado na fase linear, foi de 11,71MPa. Comparando com muitos solos, este valor pode ser considerado significativo.

### **Ensaio de Compressão Simples - Garrafa PET Envasada com Areia**

Os ensaios de compressão simples realizados com a garrafa PET envasada com areia evidenciaram quatro fases distintas de comportamento. A Fase I é caracterizada por uma possível acomodação da garrafa nos moldes; a Fase II é linear, sendo relacionada à faixa de trabalho da garrafa; a Fase III pode ser considerada como sendo uma fase de transição, para o início da ruptura e estiramento da estrutura do plástico; a Fase IV tem-se considerada a ruptura do plástico, sendo caracterizada por um enrijecimento proporcionado pelo estiramento e alinhamento dos filamentos da composição do plástico.

Para o caso em questão, a Fase II é considerada a mais importante, sendo caracterizada como região de trabalho para os elementos. Nesta fase, o módulo de elasticidade calculado foi de 53,30MPa e 66,91MPa, para o ensaio realizado com molde no topo e topo/base, respectivamente. Pondera-se, neste momento, que o módulo de elasticidade do ensaio com água foi de 11,71MPa, ou seja, a garrafa tem forte influência na magnitude dos módulos de elasticidade encontrados para as garrafas envasadas com areia.

Com relação à ruptura (início da Fase IV), a carga axial foi superior a 20kN. Considerando uma segurança de 100%, a valor sugerido para carga axial na garrafa foi de 10kN. Interessante lembrar que a garrafa envasada com água rompe com uma carga axial de 6kN. Este valor mostra o quanto o envasamento com areia aumenta a resistência do sistema.

### **Ensaio Cíclico de Compressão Simples**

Os ensaios cíclicos mostraram que, diferentemente dos solos, as deformações plásticas foram pequenas, sendo menores que 1% nos estudos desenvolvidos. O ensaio

cíclico mostrou que o aumento da rigidez reflete no deslocamento necessário para mobilização da carga de trabalho. Para a condição sem restrição de movimentos laterais na base, as deformações plásticas mostraram-se maiores.

### **Ensaio de Compressão com Garrafas Acopladas**

Uma vez que um dos objetivos deste estudo era o de utilizar as garrafas PET como estacas, as expectativas sobre este tipo de ensaio eram muito grandes.

Felizmente, o comportamento do conjunto foi praticamente similar ao da garrafa ensaiada individualmente. Cabe lembrar que mesmo sendo uma composição feita com duas garrafas, no campo, o sistema estará confinado, proporcionando uma estabilidade satisfatória.

### **Ensaio de Fluência – Compressão Simples com Carga Constante**

Os ensaios de fluência mostraram comportamento similar àquele apresentado pela literatura, sendo a velocidade de deformação decrescente nos três níveis de mobilização ensaiados.

O nível de mobilização 100% foi utilizado de forma audaciosa, com base em resultados catalogados. Para a garrafa em questão, tem-se que este nível está abaixo de 100%, não sendo preciso o valor. De qualquer forma, mesmo não sendo 100% ele está muito próximo deste valor.

Considerando o tempo de ensaio (para esta elevada taxa de mobilização) como satisfatório, os resultados não indicam a possibilidade de ruptura por fluência neste sistema.

### **Ensaio de Cisalhamento (Cortante)**

O ensaio de cisalhamento puro, na seção da garrafa, foi desenvolvido no sentido de avaliar a sua utilização como dente de muros de contenção em solos rígidos, dentre outras obras similares. Os resultados mostraram um comportamento bastante similar ao do ensaio de compressão simples, sendo a resistência ao cisalhamento calculada em

mais de 2MPa. Para tensão de trabalho, para uma segurança igual a 100%, a tensão cisalhante de trabalho sugerida é de 1MPa.

### **Interface SPS – Solo-Plástico-Solo – Cisalhamento Direto**

Os ensaios de cisalhamento direto SPS, foram desenvolvidos para simular a resistência ao cisalhamento da interface da garrafa PET em contato direto com o solo. Os resultados mostraram que a interface apresenta boa resistência, quantificada pelo critério de Mohr-Coulomb como sendo igual a 32 graus, com intercepto de coesão igual a 3,9kPa. Em comparação com os resultados obtidos para interface SP, esta melhor resistência estaria atribuída a maior dilatância e penetração dos grãos no plástico, observadas nos ensaios SPS. Esta dilatância está associada à formação de uma junta cisalhante rugosa, proporcionada pelo encaixe dos grãos dos distintos lados do plástico.

### **Estaca PET**

Com o acoplamento dos elementos PET foi possível apresentar uma alternativa econômica para fundações. De acordo com os estudos de capacidade de carga do modelo apresentado, a profundidade requerida para alcançar a capacidade de trabalho da estaca (10kN), seria de cerca de 2m. Conforme os parâmetros apresentados, os cálculos mostraram que a estaca tenderia a trabalhar com forte resistência de ponta, diferentemente das estacas flutuantes. Para aumentar a capacidade de suporte e a resistência de ponta, um detalhe executivo foi sugerido, aumentando a base para 15cm, confeccionada em concreto. Maiores cargas poderiam ser utilizadas através da confecção de grupos de estacas.

### **Estudo Numérico – Prova de Carga**

Uma vez que não foi possível a realização de uma prova de carga, para adequada averiguação do comportamento da estaca PET no campo, uma simulação numérica foi desenvolvida.



O modelo numérico, calibrado com os ensaios de compressão simples, mostrou uma boa correlação do comportamento numérico e os resultados apresentados pelas formulações racionais.

É interessante comentar que a simulação numérica mostrou que o efeito do confinamento lateral do solo majora a carga para o rasgo do plástico da estaca para cerca de 30kN, contra cerca de 20kN dos ensaios de compressão simples.

Os estudos numéricos mostraram recalques elevados para o sistema. Como solução simples, similar a contra flecha adotada em lajes, foi sugerido que a cota de arrasamento fosse elevada em conformidade com cada caso.

### **8.3 – SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS**

Este tema tem inúmeras aplicações, o que torna difícil elaborar sugestões para aplicação de materiais reciclados em engenharia.

Para o momento, face ao trabalho aqui desenvolvido, é sugerido que sejam desenvolvidos experimentos reais de campo, com a construção de um Muro PET de pequena extensão e Estacas PET confeccionadas em perfis diferentes de solo.

Os desempenhos destas obras deveriam ser estudados através da instalação adequada de instrumentação e realização de provas de carga.

## ***REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS***

---

ABIPET ( Associação Brasileira da Indústria de PET), Disponível em:<<http://www.abepet.org.br>> Acesso em: maio 2004.

ABIPLAST ( Associação Brasileira da Indústria do Plástico), Disponível em:<<http://www.abiplast.org.br>> Acesso em: maio 2004.

ABIQUIM ( Associação Brasileira da Indústria Química), Disponível em:<<http://www.abiquim.org.br>> Acesso em: abril 2004.

ABNT (1984). Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica. NBR 6508, Rio de Janeiro, RJ, 8 p.

ABNT (1990). Solo - Determinação do índice de vazios máximo de solos não-coesivos. MB - 3324, Rio de Janeiro, RJ, 6 p.

ABNT (1991). Solo - Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos. MB - 3388, Rio de Janeiro, RJ, 14 p.

ALONSO, U. R. (1984), **Exercícios de Fundações**, São Paulo, Edgard Blucher, 201p

AMBIENTEBRASIL. **Garrafas PET Viram Tubos**, Disponível em <<http://www.ambientebrasil.com.br/noticias/index.php3?action=ler&id=10820>> acesso em: maio de 2004.

ARAÚJO, L. G. (1999), Notas de aula da disciplina , Fundações e Obras de Terra, Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.

ASM. **Hardness Testing**. Ed. Metal Park.Ohio,1987.188p

ATKINSON.J.H; BRANSBY.P.L. **The Mechanics of Soils: An introduction to critical state.** McGraw-Hill. London.1977.375p

AZEREDO, H. A. **O Edifício Até sua Cobertura.** São Paulo. Ed. Edgar

BIDLLE, D. (1993). **Recycling for Profit: The New Green Business Frontier.** Harvard Business Review. p 145 –156, nov-dec, Blucher Ltda., 1977.

BOWLES, J. E. (1984). **Foundation Analysis and Design** – McGraw – Hill, 3rd Ed, Auckland.

BRASIL. Projeto de lei nº 269, de 24 de abril de 1999. **Estabelece Normas para a Destinação Final de Garrafas e Outras Embalagens Plásticas e dá Outras Providências.** Diário Senado Federal, Brasília, 27 de abril de 1999. Disponível:[http://www.nasasaneamento.com.br/proj\\_leis.htm](http://www.nasasaneamento.com.br/proj_leis.htm). Acesso em : 10 de fevereiro de 2005.

CALLISTER, W. D. (1994). **Materials Science and Engineering; on Introduction.** 3<sup>rd</sup> ed, John Wiley e Sons.

CEMPRE (Compromisso Empresarial para Reciclagem), **Cempre informa**, Disponível em:<[http:// www.cempre.org.br](http://www.cempre.org.br)> Acesso em: 16 maio 2004.

CEMPRE – Compromisso Empresarial para a Reciclagem. **CEMPRE Informa.**

CEMPRE – Compromisso Empresarial para a Reciclagem. **CEMPRE Informa.**

CEMPRE - **Compromisso Empresarial para Reciclagem.(1999).** Guia da Coleta Seletiva, 1º Ed.

CEMPRE , São Paulo, n. 42, nov./dez., 1998a.

CEMPRE , São Paulo, n. 43, jan./fev., 1999b.

D 3080 – 90, ASTM - 1990, **Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**, Published january de 1991, 18p

DEMAJOROVIC, j. (1995) **Da Política Habitacional de Tratamento do Lixo a Política de Gestão de Resíduos Sólidos as Novas Prioridades.** Revista de Administração de Empresas. São Paulo, V.35, n. ° 3. P 88-93

EMBRAPACK EMBALGENS LTDA, **Procedimento para Pressurizar Garrafas**, Departamento de controle de qualidade, Betim, 2005.

EMBRAPACK EMBALGENS LTDA, **Treinamento em Qualidade de Garrafas PET**, Departamento de controle de qualidade, Betim, 2005, 5p.

FORLIM, F. J. & Faria, J. A. F. (2002) **Considerações de Embalagens Plásticas, Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Vol.12, nº 1, p 1-10.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE/ FEAM.(1995). **Como Destinar os Resíduos Sólidos Urbanos**, 47p, Belo Horizonte – MG

GERALDINI, E. **Processo de Fabricação de Preformas**.2005. Entrevista concedida a Deilton Braga dos santos, Ouro Preto, 25 de abril.2005.

GIRARD, H.; FISCHER, S. & ALONSO, E. (1990). **Problems of Friction Posed by the Use of Geomembranes on Dam Slopes-Examples and Measurements**. Geotextiles and Geomembranes, Vol 9, No. 2, pp. 129-143.

GIROUD, J.P.; SWAN, R.H., Jr.; RICHER, P.J.; SPOONER, P.R. (1990). **Geosynthetic Landfill cap: Laboratory and Field Tests, Design and Construction**. **Proceedings of the 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products**, Vol. 2, The Hague, Netherlands, Balkema, Rotterdam, pp. 493-498.

GOMES, R. C. (1993). **Interação Solo Reforço e Mecanismos de Ruptura em Solos Reforçados com Geotêxteis**. **Tese de Doutorado**, 270p., Escola de Engenharia de São Carlos, USP-São Carlos.

HACHICH, W. et al (1998), **Fundações: teoria e prática**, 2º Ed. São Paulo, PINI, 751p.

HEAD, K.H. **Manual of soil Laboratory Testing**. Pentech Press, 2 vols., London, UK.1984.440p

HIWATASHI, E. **O Processo de Reciclagem dos Resíduos Sólidos Inorgânicos Domiciliares em Porto Alegre** . Dissertação (Mestrado em Administração) – Programa

de Pós-Graduação em Administração, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1999.

HOLTZ, R. & KOVAKS. **An introduction to Geotechnical Engineering**. Prentice Hall, New Jersey, 1981.732p

IZGIN, M; WASTI, Y. (1998). **Geomembrane-Sand Interface Frictional Properties as Determined by Inclined Board and Shear Box Tests**. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 16, No. 4, pp. 207-219.

JEWELL, R. A. & WROTH, C. P. (1987). **Direct Shear Tests on Reinforced Sand**. Géotechnique, 37, n.1, p. 53 - 68.

KOUTSOURAIS, M.M.; SPRAGUE, C.J; PUCETAS, R.C. (1991). **Interfacial Friction Study of cap and Liner Components for Landfill Design**. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 10, Nos. 5-6, pp. 531-548.

LAMBE, W.T; WHITMAN, R.V. (1979). **Soil Mechanics**, SI Version. John Wiley & Sons, New York, USA, 553 p.

LEAL, A. C. et al.(2002). **A Reinserção do Lixo na Sociedade do Capital: uma contribuição ao entendimento do trabalho de catação e na reciclagem**. Terra Livre, Ano 18, jul/dez, n. ° 19, p.177–190, São Paulo.

LIMA JR., N. R. (2000), **Estudo da Interação Solo / Geossintéticos em Obras de Proteção Ambiental com o Uso do Equipamento de Plano Inclinado**, Dissertação de Mestrado, Programa de Geotecnia, Universidade Federal de Brasília, Brasília, 130p.

LIMA, L. T. S. (2004). **Reciclagem e Biodegradação do Plástico**. Revista Científica do IMAPES, abril, p.28-34.

LIXO MUNICIPAL.(2000). **Manual de Gerenciamento Integrado**. Coordenação: Maria Luiza Otero D`Almeida, André Vilheiro, 2ª edição IPT/ CEMPRE, São Paulo

MACHADO, S.L &. MACHADO, M.F.C. **Mecânica dos Solos I: conceitos introdutórios**. 2.ed. Salvador, 2002.113p.

MACHADO, S.L.; MACHADO, M.F.C. **Mecânica dos Solos II**: conceitos introdutórios. 2.ed. Salvador, 2002.167p.

MANO, E. B. (1985), **Introdução a Polímeros** , 2º Ed. Editora Edgar Blucher Ltda. São Paulo.

MANO, E. B. (1991) **Polímeros como Material de Construção**. 1ª Ed., Editora Edgar Blucher Ltda. São Paulo.

MITCHELL, J. K. (1976), **Fundamentals of Soil Behavior**. University of California, Berkeley, John Wiley & Sons. 437p

MOLITERNO, A. (1980). **Caderno de Muro de Arrimo**, 3ª Ed., Editora Edgar Blucher Ltda, São Paulo.

NBR 6120 (ABNT/1980) – Cargas Para o Cálculo de Estruturas de Edificações.

NISSEIASB. **Pet Bottles**, Disponível em <  
[http://www.nisseiasb.co.jp/E/Prod\\_Info/PET/main.html](http://www.nisseiasb.co.jp/E/Prod_Info/PET/main.html)> acesso em : 14 de fevereiro 2004.

OLIVEIRA, L.B et al (2001); **Coleta Seletiva, Reciclagem e Conservação de Energia**,121p, COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro – Brasil.

ORTIGÃO, J. A R. (1993).**Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. Ed. Livros técnicos e científicos S.A, Rio de janeiro.

PARANHOS, H. (2002). **Utilização de Sucatas PET, Entulho de Obras e Pneus como Material Drenantes em Obras de Geotecnia e Meio Ambiente**. Programa de Capacitação de Recursos Humanos para Atividade Estratégica, Universidade Federal de Brasília, Brasília, 69p.

PETRUCCI, E.G.R. (1980), **Concreto de Cimento Portland**. Editora Globo – Porto Alegre- RS

PINTO, C.S. **Curso básico de Mecânica dos Solos**. Oficina de textos, USP, São Paulo 2000.247p

PRESA,E,P; POUSADA, M,C., (2001) **Retrospectiva e Técnicas Modernas de Fundações em Estaca**, ABMS, Salvador, , 75p.

RECICLOTECA - Disponível em:<[http:// www.recicloteca.org.br](http://www.recicloteca.org.br)> Acesso em: 14 outubro 2004.

**Revista Veja**, São Paulo, Edição 1885, p.198-200, dezembro.2004

ROGERIO, P. R (1976), **Cálculo da Estabilidade de Taludes Pelo Método de Bishop Simplificado**, São Paulo, Edgard Blucher, 154p.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais mecânicos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1974, 239p.

VALLE, C. E.(1995); **Qualidade Ambiental: Como ser Competitivo Protegendo o Meio Ambiente: Como se Preparar para as Normas ISO 14000**, Pioneira, São Paulo.

VEADO, J.T. **Ensaio Mecânicos: dureza – tração**.Ed. Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1965.72p.

VLACK, L..H.V. (1964). **Princípio da Ciência dos Materiais**. EPUSP, São Paulo.

WEBRESOL. **O PET que virou tinta**, Disponível em <<http://www.resol.com.br/arquivoNot/PET%20como%20tinta.txt>, Acesso em: 19 agosto 2004.

WIEBEC, H. (1997) **Reciclagem do Plástico e suas Aplicações Industriais**. USP/SEBRAE SP, maio, São Paulo.

## *APÊNDICE A*

---



## PROJETO DE LEI DO SENADO Nº 269, DE 1999

### Autoria do Senador Carlos Bezerra

Estabelece normas para a destinação final de garrafas e outras embalagens plásticas e dá outras providências.

O CONGRESSO NACIONAL decreta:

Art. 1º — São solidariamente responsáveis pela destinação final ambientalmente adequada de garrafas e outras embalagens plásticas, os produtores, distribuidores, importadores e comercializadores dos seguintes produtos:

I — bebidas e alimentos de qualquer natureza;

II — óleos combustíveis, lubrificantes e similares;

III — cosméticos;

IV — produtos de higiene e limpeza.

§ 1º — É também solidariamente responsável, nos termos da presente Lei, o produtor das garrafas e outras embalagens plásticas mencionadas no *caput* deste artigo.

§ 2º — Considera-se destinação final ambientalmente adequada, para os efeitos desta lei:

I — a utilização de garrafas e outras embalagens plásticas em processos de reciclagem, para a fabricação de embalagens novas ou para outro uso econômico;

II — a reutilização das garrafas e outras embalagens plásticas, respeitadas as vedações e restrições estabelecidas pelos órgãos federais competentes da área de saúde.

Art. 2º — Os fornecedores de que trata o art. 1º estabelecerão e manterão, em conjunto, procedimentos para a reutilização e recompra das garrafas plásticas após o uso do produto pelos consumidores.

Art. 3º — A obtenção ou renovação de licenciamento ambiental a que estejam obrigados os fornecedores especificados no art. 1º será condicionada à comprovação da existência de centros de recompra de plásticos ou à contratação de serviços de terceiros para recompra e reciclagem das embalagens produzidas

ou utilizadas, com a finalidade de assegurar o cumprimento das determinações desta lei.

Art. 4º — Os vasilhames de polietileno tereftalato (PET) reciclado pode ser utilizado na fabricação de garrafas plásticas para embalagens de bebidas, desde que em camada que não entre em contato direto com o líquido.

Art. 5º — Fica proibida a utilização de plásticos com processos de reciclagem distintos numa mesma garrafa ou embalagem.

Art. 6º — Dez por cento, no mínimo, dos recursos financeiros utilizados em veiculação publicitária dos produtos discriminados no art. 1º, incisos de I a IV, deverão ser destinados à divulgação de mensagens educativas com vistas a:

I — combater o lançamento de lixo plástico em corpos d'água e no meio ambiente em geral;

II — informar sobre as formas de reaproveitamento e reutilização de vasilhames, indicando os locais e as condições de recompra das embalagens plásticas;

III — estimular a coleta das embalagens plásticas visando a educação ambiental e sua reciclagem.

Art. 7º — É proibido o descarte de lixo plástico no solo, em corpos d'água ou em qualquer outro local não previsto pelo órgão municipal competente de limpeza pública, sujeitando-se o infrator a multa aplicada pelos órgãos competentes integrantes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), nos valores previstos na regulamentação desta Lei.

Art. 8º — É proibida a referência à condição de descartabilidade das embalagens plásticas na rotulagem ou na divulgação publicitária, por qualquer meio, dos produtos referidos nos incisos I a IV do art. 1º.

§ 1º — A embalagem dos produtos referidos nos incisos I a IV do art. 1º deverá conter informação, na forma de um selo verde impresso na mesma, indicando sua possibilidade de reutilização e recompra, bem como sobre a proibição de seu descarte no solo, corpos d'água ou qualquer outro local não previsto pelo órgão municipal competente de limpeza pública.

§ 2º — Os fornecedores de que trata o art. 1º terão o prazo de um ano, a partir da publicação desta Lei, para adequarem seus produtos ao disposto no parágrafo anterior.

Art. 9º — Sem prejuízo da responsabilidade por danos ambientais causados pelas embalagens plásticas de seus produtos, a infração aos arts. 1º, 2º, 5º, 6º e 8º sujeita os fornecedores a uma ou mais das seguintes sanções, aplicadas pelos órgãos competentes integrantes do SISNAMA:

I — multa, nos valores previstos na regulamentação desta Lei;

II — interdição;

III —suspensão ou cassação de licença ambiental.

Art. 10 — O procedimento previsto no art. 2º será implantado segundo o seguinte cronograma:

I —no prazo de um ano da publicação desta Lei, reutilização e/ou recompra de, no mínimo, cinquenta por cento das embalagens comercializadas;

II —no prazo de dois anos da publicação desta Lei, reutilização e/ou recompra de, no mínimo, setenta e cinco por cento das embalagens comercializadas;

III —no prazo de três anos da publicação desta Lei, reutilização e/ou recompra de, no mínimo, noventa por cento das embalagens comercializadas.

Art. 11 —Os Estados, o Distrito Federal e os Municípios adotarão todas as medidas necessárias à eficaz aplicação da presente Lei, aditando-lhe, quando for o caso, as normas suplementares indispensáveis à consecução de seus objetivos.

Art. 12 —O Poder Executivo regulamentará esta Lei no prazo de noventa dias a contar de sua publicação.

Art. 13 —Esta Lei entra em vigor na data de sua publicação.

#### JUSTIFICAÇÃO

Em 1997, foram produzidas no Brasil 121 mil toneladas de plástico PET (polietileno tereftalato), das quais 15% foram recicladas. Nos Estados Unidos, no mesmo ano, a taxa de reciclagem foi de 40%, totalizando 760 mil toneladas. Enquanto o mercado mundial para reciclagem de plásticos se expande, em nosso País esse material ainda é, mais do que tudo, fator significativo de poluição ambiental e de agrupamento de problemas urbanos críticos, a exemplo das enchentes. É conhecido o decisivo papel que embalagens plásticas têm no entupimento de bueiros, canalizações e no assoreamento dos corpos d'água.

Deve-se considerar que a demanda por plásticos, de uma forma geral, vem aumentando entre nós. Segundo o Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), a indústria de embalagens plásticas é hoje uma das de maior crescimento no País. "Para se ter uma idéia, de 1992 a 1996, o consumo brasileiro de polietilenos (todos os tipos) cresceu cerca de 14,7% ao ano. Especialistas do setor projetam, até o ano 2000, uma taxa de crescimento estimada em 9% ao ano", afirma o boletim nº 41 do CEMPRE (out. 98). Só na composição do lixo domiciliar da cidade de São Paulo, em 1998, o plástico correspondia a 22,9%, perdendo apenas para matéria orgânica, que respondia por quase metade do volume total.

O aumento da demanda mostra que é urgente, por parte de poderes públicos, fornecedores e usuários, prevenir os graves danos ambientais e de saúde humana que são a contrapartida da praticidade e da economia do plástico. O impacto ambiental do lixo plástico decorre de vários fatores: a sua lenta degradação na natureza, o volume acumulado em locais inadequados, a negligência ou a

incapacidade de órgãos municipais na gestão dos resíduos sólidos, a lenta implantação no País da cultura da reciclagem, a começar da coleta seletiva; e a falta de uma legislação adequada que crie deveres e oportunidades para os agentes sociais e econômicos diretamente vinculados ao problema.

Segundo depoimento do ex-presidente de Portugal, Mario Soares, atual coordenador da Fundação Oceanos. Um Patrimônio da Humanidade, 60% do lixo oceânico atual é originário das embalagens e resíduos plásticos. Destes, 60% são representados pelos vasilhames PET, o que justificaria que este maior causador de poluição, socializada através do consumo, sirva de base a um amplo projeto de educação ambiental.

Alguns conceitos são hoje imprescindíveis ao bom encaminhamento de soluções para a destinação dos resíduos sólidos, especificamente os plásticos. Em primeiro lugar, impõe-se a educação, tanto de agentes econômicos quanto da população em geral, para reduzir a quantidade de lixo gerada, reutilizar e reciclar sempre que possível. Em segundo lugar, conforme já acontece em países avançados, é preciso considerar que a responsabilidade do produtor ou "fornecedor"—segundo a definição contida no art. 3º do Código de Defesa do Consumidor —não se esgota no momento da geração do produto, mas deve acompanhar o ciclo de vida deste até a destinação final ambientalmente adequada de seus resíduos.

Muitas vezes, avanços tecnológicos, a exemplo da introdução das garrafas tipo PET, fazem com que as empresas aumentem seus lucros, reduzam seus custos e ganhem em agilidade, porém, transferem os ônus para a população sob a forma do crescimento exponencial do lixo. A chamada responsabilidade pós-consumo, especialmente importante no caso de produtos de alto poder poluente, tais como baterias, pilhas e embalagens plásticas, é um passo importante, pois envolve o fornecedor na solução de um problema inerente ao produto.

Nos Estados Unidos e Canadá, a coleta para a reciclagem de garrafas fabricadas com o plástico PET já acontece desde o começo dos anos 80, inicialmente para enchimento de almofadas. Com a melhoria do material, outras aplicações surgiram, em tecidos, lâminas e garrafas para produtos não alimentícios. Já nos anos 90, o PET reciclado passou a ser utilizado também em embalagens de alimentos, porém há inúmeras restrições quanto ao potencial de contaminação de diversos componentes desse reciclado. O PET é, ademais, altamente combustível e de difícil degradação em aterros sanitários.

As embalagens plásticas, não sendo biodegradáveis, caracterizam-se por manterem suas estruturas intactas por séculos, permitindo, assim, sua reutilização diretamente logo após seu uso, em construções sólidas e resistentes, assim como em mobiliário em geral, atuando como módulo de educação ambiental e possibilitando a montagem de:

- a) bibliotecas temáticas (cultura);
- b) viveiros para reconstrução de matas ciliares (meio ambiente);

c) hortas hidropônicas (saúde);

d) espaços de coleta seletiva do lixo (tecnologia).

Segundo o CEMPRE, a reciclagem das embalagens PET usadas em refrigerantes está em franca ascensão no Brasil, inclusive em novas aplicações, tais como cordas e fios de costura, carpetes, bandejas de frutas e até mesmo novas garrafas. Mas a Associação Brasileira de Fabricantes de Embalagens PET informa que ainda existe ociosidade na reciclagem desse produto, principalmente pela inexistência de coleta seletiva e de uma legislação adequada.

O Projeto de Lei ora apresentado busca colaborar para um significativo avanço no trato legal da questão exposta, por meio da consagração do princípio da responsabilização pós-consumo do fornecedor de garrafas e outras embalagens plásticas, incentivando a reutilização e a reciclagem.

As construções realizadas com as embalagens plásticas se inserem a biomassa criando verdadeiras estruturas vivas capazes de absorver tanto os ruídos urbanos como a emissão de anidrido carbônico (CO<sub>2</sub>), fatores de máxima importância quando se reconhece não existirem mais florestas suficientes para esta função, conforme conclusão do último encontro mundial da atmosfera, ocorrido em Buenos Aires, no segundo semestre de 1998.

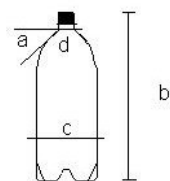
Os dispositivos constantes do texto basearam-se em proposta apresentada pelo Deputado ambientalista Fernando Gabeira à Câmara dos Deputados, em 1997, e posteriormente arquivada. Entendemos que esse é um tema sobre o qual deve-se insistir, dadas as profundas repercussões positivas que uma legislação moderna poderá trazer tanto do ponto de vista ambiental quanto para as atividades econômicas e para a melhoria de qualidade de vida da população brasileira.

Contamos com o apoio dos ilustres Parlamentares para que, com sua colaboração no aperfeiçoamento da proposta, possa o Congresso Nacional oferecer à sociedade brasileira o melhor instrumento possível para o trato legal de tão importante matéria.

## ***APÊNDICE B***

---

## CARACTERÍSTICA DE ENVASAMENTO DAS GARRAFAS



Altura média da garrafa – b 0,3358m

Diâmetro médio do bocal – d 0,0253m

Diâmetro médio da garrafa – c 0,09859m

Inclinação – a 52 a 54°

Espessura da garrafa - 0,00022 a 0,00035m

Garrafa tipo 1.

Enchimento pelo método desenvolvido.

Número da Garrafa		1	2	4	5
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,436	3,592	3,586	3,589
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05039	0,05015	0,05024	0,05058
Peso água + tampa	(kg)	2,130	2,110	2,118	2,121
Temperatura água	(°)	23	23	23	23
Densidade da água	(kg/m³)	997,6	997,6	997,6	997,6
Volume da garrafa	(m³)	0,002074	0,002054	0,002062	0,002065
Massa específica seca	(kg/m³)	1630	1720	1710	1710
Índice de vazios mínimo		0,75	0,46	0,46	0,47

Enchimento pelo método desenvolvido.

Número da Garrafa		6	9	10	11
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,588	3,582	3,582	3,383
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,0502	0,05059	0,05059	0,05045
Peso água + tampa	(kg)	2,116	2,118	2,118	2,106
Temperatura água	(°)	23,00	22,00	22,00	17,5
Densidade da água	(kg/m³)	997,6	997,8	997,8	998,8
Volume da garrafa	(m³)	2,060	2,06286	2,06286	2,053
Massa específica seca	(kg/m³)	1720	1710	1710	1620
Índice de vazios mínimo		0,46	0,47	0,47	0,76

Enchimento pelo método desenvolvido.

Número da Garrafa		12	13	14	15
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,402	3,372	3,657	3,4270
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05047	0,05068	0,05072	0,05168
Peso água + tampa	(kg)	2,099	2,097	2,105	2,1230
Temperatura água	(°)	17,50	18,00	18,00	18,00
Densidade da água	(kg/m³)	998,7	998,2	998,7	998,6
Volume da garrafa	(m³)	0,002045	0,002042	0,002051	0,002068
Massa específica seca	(kg/m³)	1640	1630	1760	1630
Índice de vazios mínimo		0,74	0,75	0,62	0,75

Enchimento pelo método desenvolvido.

Número da Garrafa		16	17	18	19
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,393	3,381	3,461	3,394
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05192	0,05053	0,05085	0,05057
Peso água + tampa	(kg)	2,113	2,111	2,117	2,112
Temperatura água	(°)	18,5	19,00	19,00	19,00
Densidade da água	(kg/m³)	998,5	998,4	998,4	998,4
Volume da garrafa	(m³)	0,002057	0,002057	0,002062	0,002058
Massa específica seca	(kg/m³)	1620	1620	1620	1620
Índice de vazios mínimo		0,76	0,76	0,72	0,75

Enchimento pelo método desenvolvido.

Número da Garrafa		20	49	62	66
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,390	3,903	3,998	4,031
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05066	0,05044	0,05040	0,05125
Peso água + tampa	(kg)	2,110	2,120	2,135	2,127
Temperatura água	(°)	19,00	24,00	23,50	23,00
Densidade da água	(kg/m³)	998,4	997,3	997,4	997,6
Volume da garrafa	(m³)	0,0020565	0,0020647	0,002079	0,002071
Massa específica seca	(kg/m³)	1620	1870	1900	1920
Índice de vazios mínimo		0,75	0,57	0,54	0,52



### Enchimento aleatório por vibração vertical.

Número da Garrafa		20	20	20	vv/vvs
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,290	3,335	3,317	
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05066	0,05066	0,05066	
Peso água + tampa	(kg)	2,110	2,110	2,110	
Temperatura água	(°)	19,00	19,00	19,00	(2%)*
Densidade da água	(kg/m³)	998,4	998,4	998,4	
Volume da garrafa	(m³)	0,002056	0,002056	0,002056	
Massa específica seca	(kg/m³)	1600	1620	1590	
Índice de vazios mínimo		0,78	0,76	0,79	

vv – enchimento por Vibração vertical

vvs – enchimento pelo método

\*O valor de 2% foi obtido pela relação entre o enchimento médio aleatório e o método desenvolvido.

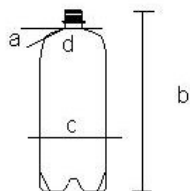
### Enchimento aleatório com golpes na parede lateral com o soquete.

Número da Garrafa		20	20	20	s/vvs
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,269	3,255	3,390	
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05066	0,05066	0,05066	
Peso água + tampa	(kg)	2,110	2,110	2,110	
Temperatura água	(°)	19,00	19,00	19,00	(2,5%)*
Densidade da água	(kg/m³)	998,4	998,4	998,4	
Volume da garrafa	(m³)	0,0020560	0,002056	0,002056	
Massa específica seca	(kg/m³)	1570	1560	1620	
Índice de vazios mínimo		0,82	0,83	0,75	

s – enchimento com golpes na parede lateral – soquete.

vvs – enchimento pelo método.

\*O valor de 2,5% foi obtido pela relação entre o enchimento médio aleatório e o método desenvolvido.



Altura média da garrafa – b 0,3360m

Diâmetro médio do bocal – d 0,0253m

Diâmetro médio da garrafa – c 0,09720 m

Inclinação – a 19 a 21°

Espessura da garrafa - 0,00022 a 0,00035mm

Garrafa tipo 2.

Enchimento pelo método desenvolvido.

Número da Garrafa		1	3	4	5
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,464	3,778	3,778	3,484
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05343	0,05447	0,05227	0,05398
Peso água + tampa	(kg)	0,002156	0,002158	0,002172	0,002162
Temperatura água	(°)	17,00	17,50	20,00	17,50
Densidade da água	(kg/m³)	998,8	998,7	998,2	998,7
Volume da garrafa	(m³)	0,002100	0,002100	0,002115	0,002105
Massa específica seca	(kg/m³)	1620	1770	1770	1630
Índice de vazios mínimo		0,75	0,62	0,62	0,75

Enchimento pelo método desenvolvido.

Número da Garrafa		7	8	9	10
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,771	3,485	3,797	3,796
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05217	0,05410	0,05338	0,05395
Peso água + tampa	(kg)	2,173	2,154	2,168	2,170
Temperatura água	(°)	20,00	17,50	17,50	17,50
Densidade da água	(kg/m³)	998,2	998,7	998,7	998,7
Volume da garrafa	(m³)	2,117	2,097	2,111	2,113
Massa específica seca	(kg/m³)	1760	1640	1770	1770
Índice de vazios mínimo		0,63	0,74	0,62	0,62

### Enchimento pelo método desenvolvido

Número da Garrafa		11	12	13	14
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,733	3,533	3,792	3,759
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05383	0,05286	0,05223	0,05277
Peso água + tampa	(kg)	2,161	2,162	2,182	2,162
Temperatura água	(°)	17,50	17,50	20,00	20,50
Densidade da água	(kg/m³)	998,7	998,7	998,2	998,1
Volume da garrafa	(m³)	0,002104	0,002106	0,002125	0,002105
Massa específica seca	(kg/m³)	1750	1650	1760	1760
Índice de vazios mínimo		0,64	0,74	0,63	0,63

### Enchimento pelo método desenvolvido.

Número da Garrafa		15	16	17	18
Garrafa + tampa + Areia seca	k(g)	3,528	3,730	3,492	3,502
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05221	0,05246	0,05238	0,05221
Peso água + tampa	(kg)	2,173	2,157	2,156	2,170
Temperatura água	(°)	20,50	19,50	19,50	19,50
Densidade da água	(kg/m³)	998,1	998,3	998,3	998,3
Volume da garrafa	(m³)	0,002116	0,002100	0,002100	0,002114
Massa específica seca	(kg/m³)	1640	1750	1640	1630
Índice de vazios mínimo		0,74	0,64	0,74	0,75

### Enchimento pelo método desenvolvido.

Número da Garrafa		19	20	21	22
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,400	3,754	3,730	Água
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05254	0,05260	0,05271	0,05332
Peso água + tampa	(kg)	0,002156	0,002157	0,002158	0,002179
Temperatura água	(°)	20,50	20,50	21,00	18,00
Densidade da água	(kg/m³)	998,1	998,1	998,0	998,6
Volume da garrafa	(m³)	0,002099	0,002100	0,002101	0,002122
Massa específica seca	(kg/m³)	1590	1760	1750	
Índice de vazios mínimo		0,79	0,63	0,64	

Enchimento pelo método desenvolvido.

Número da Garrafa		23	24	24	25
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,420	3,492	3,753	3,753
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05280	0,05219	0,05265	0,05265
Peso água + tampa	(kg)	2,179	2,176	2,163	2,163
Temperatura água	(°)	18,50	18,50	18,50	18,50
Densidade da água	(kg/m³)	998,5	998,5	998,5	998,5
Volume da garrafa	(m³)	0,002123	0,002120	0,002107	0,002107
Massa específica seca	(kg/m³)	1590	1620	1760	1760
Índice de vazios mínimo		0,81	0,77	0,63	0,63

Enchimento pelo método desenvolvido

Número da Garrafa		26	27	28	29
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,771	3,461	3,539	3,488
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05223	0,05228	0,05217	0,05216
Peso água + tampa	(kg)	2,177	2,150	2,172	2,172
Temperatura água	(°)	18,50	18,50	18,50	18,50
Densidade da água	(kg/m³)	998,5	998,5	998,5	998,5
Volume da garrafa	(m³)	0,002121	0,002094	0,002116	0,002116
Massa específica seca	(kg/m³)	1750	1630	1650	1620
Índice de vazios mínimo		0,64	0,76	0,74	0,77

Enchimento pelo método desenvolvido.

Número da Garrafa		30	31	32	33
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,799	3,775	3,503	3,777
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05262	0,05233	0,05237	0,05233
Peso água + tampa	(kg)	2,180	2,159	2,150	2,172
Temperatura água	(°)	18,50	18,50	18,50	18,50
Densidade da água	(kg/m³)	998,5	998,5	998,5	998,5
Volume da garrafa	(m³)	0,002124	0,002103	0,002094	0,002116
Massa específica seca	(kg/m³)	1760	1770	1650	1760
Índice de vazios mínimo		0,63	0,62	0,74	0,63

Enchimento pelo método desenvolvido.

Número da Garrafa		34	38	39	40
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,783	3,430	3,430	3,400
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05218	0,05218	0,05218	0,05218
Peso água + tampa	(kg)	2,184	2,143	2,167	2,172
Temperatura água	(°)	18,50	22,50	22,50	22,50
Densidade da água	(kg/m³)	998,5	997,7	998,7	998,7
Volume da garrafa	(m³)	0,002128	0,002086	0,002110	0,002115
Massa específica seca	(kg/m³)	1750	1620	1600	1580
Índice de vazios mínimo		0,64	0,77	0,79	0,81

Enchimento pelo método desenvolvido.

Número da Garrafa		41	42	43	44
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,650	3,680	3,660	3,680
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05218	0,05237	0,05233	0,05218
Peso água + tampa	(kg)	2,167	2,1738	2,165	2,170
Temperatura água	(°)	22,50	22,50	22,50	22,50
Densidade da água	(kg/m³)	997,7	997,7	997,7	997,7
Volume da garrafa	(m³)	0,002109	0,002116	0,002108	0,002112
Massa específica seca	(kg/m³)	1710	1710	1710	1720
Índice de vazios mínimo		0,68	0,67	0,68	0,67

Enchimento pelo método desenvolvido

Número da Garrafa		45	46	47	51
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,700	3,680	3,470	3,989
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05218	0,05218	0,05218	0,05275
Peso água + tampa	(kg)	2,158	2,160	2,163	2,151
Temperatura água	(°)	22,50	22,50	22,50	24,00
Densidade da água	(kg/m³)	997,7	997,7	997,7	997,3
Volume da garrafa	(m³)	0,002100	0,002103	0,002106	0,002092
Massa específica seca	(kg/m³)	174k	1720	1620	1880
Índice de vazios mínimo		0,65	0,66	0,77	0,55

Enchimento pelo método desenvolvido.

Número da Garrafa		51	52	53	54
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,989	4,076	4,097	4,092
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05275	0,05228	0,05219	0,05250
Peso água + tampa	(kg)	2,151	2,152	2,156	2,166
Temperatura água	(°)	24,00	23,50	24,00	24,00
Densidade da água	(kg/m³)	997,3	997,4	997,3	997,3
Volume da garrafa	(m³)	0,002092	0,002094	0,002098	0,002108
Massa específica seca	(kg/m³)	1880	1920	1930	1920
Índice de vazios mínimo		0,55	0,52	0,52	0,53

Enchimento pelo método desenvolvido.

Número da Garrafa		64	65	67	68
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	4,133	4,089	4,072	4,002
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05233	0,05278	0,05047	0,05267
Peso água + tampa	(kg)	2,165	2,148	2,152	2,154
Temperatura água	(°)	23,50	23,50	23,00	23,00
Densidade da água	(kg/m³)	997,4	997,4	997,6	997,6
Volume da garrafa	(m³)	0,002107	0,002089	0,002096	0,002096
Massa específica seca	(kg/m³)	1940	1920	1920	1880
Índice de vazios mínimo		0,51	0,51	0,52	0,55

Enchimento pelo método desenvolvido.

Número da Garrafa		69	70	71
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	4,038	4,055	4,089
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,049,2	0,05229	0,05268
Peso água + tampa	(kg)	2,1490	2,149	2,163
Temperatura água	(°)	23,00	23,00	23,00
Densidade da água	(kg/m³)	997,6	997,6	997,6
Volume da garrafa	(m³)	0,002094	0,002091	0,002105
Massa específica seca	(kg/m³)	1900	1910	1920
Índice de vazios mínimo		0,54	0,53	0,53

### Enchimento aleatório por vibração vertical

Número da Garrafa		8	8	8	vv./vvs
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,383	3,379	3,386	
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05066	0,05066	0,05066	
Peso água + tampa	(kg)	2,110	2,110	2,110	
Temperatura água	(°)	19,00	19,00	19,00	(3%)*
Densidade da água	(kg/m³)	998,4	998,4	998,4	
Volume da garrafa	(m³)	0,002056	0,002056	0,002056	
Massa específica seca	(kg/m³)	1650	1640	1620	
Índice de vazios mínimo		0,73	0,73	0,76	

vv – enchimento por Vibração vertical.

vvs – enchimento pelo método.

\*O valor de 3 % foi obtido pela relação entre o enchimento médio aleatório e o método desenvolvido.

### Enchimento aleatório com golpes na parede lateral.

Número da Garrafa		8	8	8	s/vvs
Garrafa + tampa + Areia seca	(kg)	3,364	3,353	3,374	
Peso garrafa + tampa	(kg)	0,05066	0,05066	0,05066	
Peso água + tampa	(kg)	2,110	2,110	2,110	
Temperatura água	(°)	19,00	19,00	19,00	(3,5%)*
Densidade da água	(kg/m³)	998,4	998,4	998,4	
Volume da garrafa	(m³)	0,002056	0,002056	0,002056	
Massa específica seca	(kg/m³)	1610	1610	1620	
Índice de vazios mínimo		0,77	0,76	0,76	

s – enchimento com golpes na parede lateral - soquete

vvs – enchimento pelo método

\*O valor de 3,5% foi obtido pela relação entre o enchimento médio aleatório e o método desenvolvido.

Característica das amostras ensaiadas.

Amostras	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_{\min}$	$e_{\max}$
Amostra 1 ( $A_1$ )	25,10	0,51	0,72
Amostra 2 ( $A_2$ )	28,68	0,64	0,89
Amostra 3 ( $A_3$ )	28,50	0,80	1,09
Amostra 4 ( $A_4$ )	26,80	0,39	0,63

$A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ , amostras originárias da cidade de Ponte Nova – MG.

$A_4$ , amostra originária arredores da cidade de Brasília – DF.

Amostras envasada nas respectivas garrafas.

$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
Garrafa Tipo 1	Garrafa Tipo 1	Garrafa Tipo 1	Garrafa Tipo 1
2, 4, 5, 6, 8, 9, 10		11, 12, 13, 14, 15, 16 17, 18, 19, 20	49, 62, 66
Garrafa Tipo 2	Garrafa Tipo 2	Garrafa Tipo 2	Garrafa Tipo 2
	3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 16, 20, 21, 22, 25, 26, 30, 31, 33, 34, 41, 42, 43, 44, 45, 46	1, 12, 15, 17, 18, 19 23, 24, 27, 28, 29, 32, 38, 39, 40 47	51, 52, 53, 54, 64, 65, 67, 68, 69, 70, 71