

CLÁUDIA CLAUMANN DA SILVA

**COMPORTAMENTO DE SOLOS SILTOSOS QUANDO REFORÇADOS
COM FIBRAS E MELHORADOS COM ADITIVOS QUÍMICOS E
ORGÂNICOS**

**Curitiba
Abril/2007**

CLÁUDIA CLAUMANN DA SILVA

**COMPORTAMENTO DE SOLOS SILTOSOS QUANDO REFORÇADOS
COM FIBRAS E MELHORADOS COM ADITIVOS QUÍMICOS E
ORGÂNICOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de mestre em Construção Civil, do Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

**Orientador: Professor Dr.
Alessander C. Morales Kormann**

**Curitiba
Abril/2007**

TERMO DE APROVAÇÃO

CLÁUDIA CLAUMANN DA SILVA

COMPORTAMENTO DE SOLOS SILTOSOS QUANDO REFORÇADOS COM FIBRAS E MELHORADOS COM ADITIVOS QUÍMICOS E ORGÂNICOS

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre no
Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, pela Comissão formada pelos
Professores:

Profº Alessander C. Morales Kormann
D.Sc. –Escola Politécnica, USP
Orientador

Profº Ney Augusto Nascimento
Ph.D. – University of New Mexico
Coordenador do PPGCC – UFPR

Profº Rubens Brazetti
Dr. – Escola Politécnica, USP

Roberta Bomfim Boszczowski
Msc. - PUC-RJ

Curitiba, 16 de abril de 2007

AGRADECIMENTOS

Ao professor Alessandro Morales Kormann pela atenção e orientação no desenvolvimento da dissertação;

À Roberta Bomfim pela grande ajuda dada no desenvolvimento do trabalho;

Ao LACTEC e à COPEL pelo investimento de recursos financeiros;

Ao pessoal do PPGCC pela grande ajuda;

À secretária Ziza pelo grande apoio prestado;

Aos estagiários e técnicos que tanto colaboraram no desenvolvimento do trabalho;

Às empresas que forneceram as fibras, as raspas de pneu e os aditivos para a realização da pesquisa.

Ao meu pai Reinaldo, pela compreensão e motivação;

A Deus, por me dar força, saúde e coragem de enfrentar todos os obstáculos enfrentados durante o período de realização do trabalho.

A todos que de forma direta ou indiretamente colaboraram no desenvolvimento do trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE QUADROS.....	viii
RESUMO.....	ix
ABSTRAT.....	x
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Relevância da pesquisa.....	1
1.1.1 Construção x solo frágil.....	4
1.2 Objetivo.....	5
1.3 Hipóteses.....	5
1.4 Método de pesquisa.....	5
1.5 Limitação da pesquisa.....	6
1.6 Estratégia de validação.....	7
1.7 Estrutura da dissertação.....	7
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	8
2.1 Fundamentação teórica.....	8
2.2 Histórico.....	9
2.3 Métodos de reforço e melhoramento de solos.....	9
2.3.1 Estabilização de solos.....	10
2.3.1.1 Aplicações da estabilização de solos.....	15
2.3.1.2 Tipos de estabilização de solos.....	15
2.3.2 Melhoramento de solos.....	19
2.3.2.1 Reforço de solos com fibras.....	20
2.3.2.1.1 Tipos de fibras utilizadas como reforço.....	23

2.3.3 Estudos experimentais realizados com a adição de fibras.....	40
2.3.3.1 Mudanças no comportamento dos solos com a inclusão das fibras.....	42
2.3.4 Melhoramentos de solos com aditivos.....	44
2.3.4.1 Aditivos existentes no mercado.....	45
2.3.4.2 Composição básica dos aditivos.....	55
2.3.4.3 Reagentes.....	56
2.3.4.4 Características físicas de alguns aditivos.....	57
CAPITULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	58
3.1 Considerações iniciais.....	58
3.2 Planejamento do experimento.....	58
3.3 Variáveis investigadas.....	59
3.3.1 Solo.....	59
3.3.2 Materiais considerados no estudo.....	59
3.3.3 Dosagens dos materiais utilizados.....	62
CAPITULO 4 – REFORCO DE SOLOS COM FIBRAS.....	66
4.1 Ensaio realizado com o solo puro.....	66
4.2 Ensaio realizado com o solo aditivado.....	73
CAPÍTULO 5 – MELHORAMENTO DE SOLOS COM ADITIVOS.....	94
5.1 Ensaio realizado com o solo puro.....	94
5.2 Metodologia adotada.....	98
5.3 Execução dos ensaios com o solo aditivado.....	100
5.3.1 Procedimentos adotados para a compactação das cavas.....	100
5.4 Resultados obtidos com o solo aditivado.....	107
CAPÍTULO 6 – DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	129

6.1 Discussão e análise dos resultados obtidos na mistura solo-fibra.....	12
6.2 Discussão e análise dos resultados obtidos na mistura solo-aditivo.....	9
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	13
FUTURAS.....	9
..	
7.1 Conclusões.....	14
7.1.1 Reforço de solos com fibras.....	7
7.1.2 Melhoria de solos com fibras.....	14
7.2 Sugestões para pesquisas futuras.....	8
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
	1

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Decomposição de alguns materiais no meio ambiente.....	2
Figura 1.2 - Disposição de pneus.....	3
Figura 2.1 – Classificação das fibras.....	20
Figura 2.2 – Efeito das fibras numa matriz atuando como reforço.....	22
Figura 2.3 – Reforço de solos com fibras.....	23
Figura 2.4 – Polycon HPC 20 n monofilamento.....	26
Figura 2.5 – Polycrret MF.....	26
Figura 2.6 – Polycrret CR.....	26
Figura 2.7 – Fibras de PET.....	34
Figura 2.8 – Cultivo do sisal na Bahia.....	36
Figura 2.9 – Raspas de pneu.....	39
Figura 2.10 – Pedacos de pneu.....	39
Figura 2.11 – Estrutura de um pneu.....	40
Figura 2.12 – Aplicação do EMC ²	47
Figura 2.13 – Intersecção entre trecho tratado e não tratado.....	49
Figura 2.14 – Rua David Tows sem e com o tratamento de Terrazyme.....	49
Figura 2.15 – Rua estabilizada com Ecolopavi.....	50
Figura 2.16 – Trecho tratado com Dynacal.....	51
Figura 3.1 – Filetador de PET	60
Figura 3.2 – Corpo de prova submetido ao ensaio de compressão simples.	65
Figura 4.1 – Curva de distribuição granulométrica.....	66
Figura 4.2 – Curva de compactação.....	67
Figura 4.3 - Curvas de expansão e ISC para o solo A.....	69
Figura 4.4 - Curvas de expansão e ISC para o solo B.....	69
Figura 4.5 - Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal solo A puro.....	70

Figura 4.6 - Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal solo B puro.....	70
Figura 4.7 – Envoltória de resistência dos solos A e B no estado puro	71
Figura 4.8 – Compressão simples do solo B sem adição.....	71
Figura 4.9 – Recipiente para realização das misturas.....	74
Figura 4.10 – Cilindro de compactação.....	76
Figura 4.11 – Curvas obtidas nos ensaios de compactação.....	77
Figura 4.12 – Anel de cisalhamento direto.....	79
Figura 4.13 – Solo A com adição de 0,5% de Sisal.....	80
Figura 4.14 – Solo A com adição de 0,5% de PET	81
Figura 4.15 – Solo A com adição de 1,0% de PET.....	82
Figura 4.16 – Solo A com adição de 0,5% de polipropileno Polycrret MF.....	83
Figura 4.17 – Solo A com adição de 0,5% de polipropileno Concrefil.....	84
Figura 4.18 – Solo A com adição de 1,0% de polipropileno Concrefil.....	85
Figura 4.19 – Solo A com adição de 0,5% de raspas de pneu.....	86
Figura 4.20 - Solo A com adição de 7,5% de raspas de pneu	87
Figura 4.21 – Solo B com adição de 2,0% de PET.....	88
Figura 4.22 – Solo B com 0,5% de polipropileno Polycrret MF.....	89
Figura 4.23 – Curvas de pressão versus deslocamento	93
Figura 5.1 – Granulometria do solo puro.....	94
Figura 5.2 – Compactação do solo C puro.....	95
Figura 5.3 – Gráfico tensão tangencial x deslocamento horizontal solo puro C.	96
Figura 5.4 – Envoltória de resistência do solo puro C.....	96
Figura 5.5 – Compressão simples do solo puro C.....	97
Figura 5.6 – Cavas.....	100
Figura 5.7 – Peneiramento do solo.....	101
Figura 5.8 – Colocação do solo aditivado nas cavas.....	102
Figura 5.9 – Cava compactada.....	102
Figura 5.10 – Vista geral das cavas aditivadas	105
Figura 5.11 – Retirada das amostras das cavas do sítio experimental.....	106
Figura 5.12 – Curvas granulométricas do solo aditivado e puro.....	107

Figura 5.13 – Adição de 2% de cimento.....	110
Figura 5.14 – Adição de 4% de cimento.....	111
Figura 5.15 – Adição de 2% de cal.....	112
Figura 5.16 – Adição de 4% de cal	113
Figura 5.17 – Adição de 0,05% de Terrazyme.....	114
Figura 5.18 – Adição de 1,16% de Terrazyme.....	115
Figura 5.19 – Adição de 0,17% de Dynacal.....	116
Figura 5.20 – Adição de 0,67% de Dynacal.....	117
Figura 5.21 – Adição de 2% de Lignosulfonato.....	118
Figura 5.22 - Adição de 4% de Lignosulfonato.....	119
Figura 5.23 – Adição de 1,63% de EMC ²	120
Figura 5.24 - Adição de 0,67% de EMC ²	121
Figura 5.25 – Adição de 0,67% de Ecolopavi	122
Figura 5.26 – Adição de 1,52% de Ecolopavi.....	123
Figura 5.27 – Adição de 0,67% de Homy solo.....	124
Figura 5.28 – Adição de 0,17% de DS-328.....	125
Figura 6.1 – Curvas de compactação.....	129
Figura 6.2 – Comparação da envoltória do sisal com o solo puro.....	133
Figura 6.3 – Comparação da envoltória da PET com o solo puro.....	134
Figura 6.4 – Comparação da envoltória do polipropileno fino e solo puro.	135
Figura 6.5 – Comparação da envoltória do polipropileno com o solo puro....	135
Figura 6.6 – Comparação da envoltória do pneu com o solo puro.....	136
Figura 6.7 – Variação da coesão do solo reforçado em função do solo puro	137
Figura 6.8 – Variação do ângulo de atrito do solo reforçado em função do puro.....	138
Figura 6.9 – Comparação dos resultados do ensaio compressão simples	139
Figura 6.10 – Envoltórias de ruptura para deslocamento de 5 mm.....	141
Figura 6.11 – Envoltória de ruptura para deslocamento de 5 mm nas adições de cal e cimento.....	142
Figura 6.12 – Envoltória de ruptura para deslocamento de 5 mm para aditivos que levam cal como reagente.....	143
Figura 6.13 – Envoltória de ruptura para deslocamento de 5 mm do aditivo	

Lignosulfonato	144
Figura 6.14 – Envoltória de resistência para deslocamento de 5 mm dos aditivos orgânicos EMC ² e Terrazyme.....	145
Figura 6.15 – Resumo das resistências à compressão simples média dos aditivos estudados em comparação com o solo puro.....	147
LISTA DE QUADROS	
Quadro 1 – Elementos utilizados como reforço na pesquisa.....	6
Quadro 2 – Características das fibras.....	27
Quadro 3 – Evolução do consumo de embalagens PET no Brasil.....	30
Quadro 4 – Plásticos mais encontrados na construção civil, características.	32
Quadro 5 – Teste de identificação dos plásticos.....	33
Quadro 6 – Propriedades mecânicas e físicas do sisal.....	36
Quadro 7 – Estudos realizados.....	41
Quadro 8 – Mudanças no comportamento dos solos com a inclusão das fibras.....	43
Quadro 9 – Relação de aditivos, seus produtores, origem e composição básica.....	46
Quadro 10 – Características físicas de alguns aditivos.....	57
Quadro 11 – Principais características das fibras e raspas de pneu.....	61
Quadro 12 – Caracterização do solo puro.....	67
Quadro 13 – Resultados do índice Suporte Califórnia do solo A puro.....	68
Quadro 14 – Resultados do índice Suporte Califórnia do solo B puro.....	68
Quadro 15 – Compressão simples do solo B puro.....	72
Quadro 16 – Ensaio de laboratório.....	73
Quadro 17 – Resumo das dosagens realizadas nos solos A e B.....	75
Quadro 18 – Ensaio de CBR ou índices de Suporte Califórnia.....	90
Quadro 19 – Ensaio de compressão simples.....	92
Quadro 20 – Resistência à compressão simples do solo puro C	97
Quadro 21 – Resumo dos ensaios realizados com os aditivos.....	99
Quadro 22 – Procedimentos adotados	103
Quadro 23 – Dados do ensaio de cisalhamento.....	108
Quadro 24 – Comparação entre os parâmetros de resistência dos aditivos.	126
Quadro 25 – Resultados obtidos no ensaio de compressão simples.....	127
Quadro 26 – Resumo dos ensaios de CBR.....	131
Quadro 27 – Comparação dos resultados de coesão e ângulo de atrito.....	132
Quadro 28 – Resumo das resistências obtidas nas aditivações.....	146

RESUMO

Existem diversos tipos de solos cada qual com características diferenciadas. Aqueles que apresentam melhores condições são mais explorados, restando com isso os considerados frágeis, problemáticos para desempenhar determinadas funções. Assim sendo, muitas são as alternativas capazes de qualificar o material em questão, como, por exemplo, tentar melhorar as suas propriedades físicas com o intuito de proporcionar ao mesmo uma maior capacidade de resistência. Tendo em vista essa problemática, o presente estudo trata do reforço de dois solos siltosos chamados solos A e B e do melhoramento de um solo também siltoso, solo C. O reforço em questão foi realizado com fibras de PET, sisal, polipropileno e raspas de pneu e o melhoramento com aditivos químicos e orgânicos.

A revisão bibliográfica aborda aspectos relevantes para uma boa fundamentação no assunto tanto no que diz respeito aos tipos de materiais utilizados, suas principais características e aplicações assim como pesquisas relacionadas na área.

O capítulo experimental traz ensaios de granulometria, compressão simples, cisalhamento direto e CBR os quais são realizados em laboratório cujo objetivo é avaliar a possibilidade de melhoria nas características dos solos em questão tanto no que diz respeito à utilização de fibras de PET, sisal, polipropileno, raspas de pneu quanto aditivos químicos e orgânicos. Essa melhoria está relacionada com o possível aumento da resistência do solo proporcionada pela adição do material. Foram utilizados dois tipos de fibras de polipropileno (Polycrét MF e Concrefil), além das de PET, sisal e nove aditivos classificados em três categorias: orgânicos (EMC², Terrazyme), químicos (Dynacal, DS-328, Homy solo, Ecolopavi, Cal, Cimento e o Lignosulfonato VIXIL I). Foram realizados ensaios tanto com o solo no estado puro quanto reforçado e aditivado a fim de poder comparar os resultados obtidos. O procedimento adotado para os aditivos foi a realização de cavas no Sítio Experimental da UFPR para poder deixar a mistura curando por um período de trinta dias e somente após esse tempo, proceder aos ensaios. Os resultados informaram que as fibras de polipropileno proporcionaram melhores rendimentos no que diz respeito à resistência em relação ao solo puro. Com relação aos aditivos pode-se dizer que houve uma grande variação de resultados de acordo com a dosagem adotada, mas, de um modo geral pode-se dizer que a cal e o DS-328 apresentaram os melhores desempenhos no que se refere à resistência proporcionada ao solo em questão.

ABSTRAT

There are several kinds of soils, each one with particular characteristics. The ones showing better geotechnical properties are easily used in civil constructions. Where as the others are generally left behind for different purposes. For the latter soils, soils, some alternatives do exist in order to improve their behaviour, specially as far as bearing capacity.

The present study deals with reinforcement for two silty soils named "A" and "B", and the improvement of a third silty material, herein called soil "C". By reinforcement (similarly to steel bars concrete), fibers from PET, sisal, polypropylene and tyre rubber scrape materials were mixed to the soils and tested; soil improvement was done with the addition of chemical and organic products to the same soils.

A literature review was carried out and summarizes important aspects of the subject, including materials, techniques, standards and main applications of the composites.

One full chapter was dedicated to soil testing and shows results of grain size analysis, unconfined compression, direct shear and CBR tests, all of them used to check to possible improvement of the resulting materials, as far as their geotechnical characteristics due to the added products.

Besides PET and sisal, two polypropylene fibers (Polycrret MF, Concrefil), two organic products (EMC², Terrazyme), chemical substances (Dynacal, DS-328, Homy solo, Ecolopavi, lime, cement) and lignosulphonates VIXIL I were tested. Both natural and reinforced or improved states were considered (compacted) for comparisons.

Natural soils from the UFPR Geotechnical Experimental Site (located at Centro Politécnico, Curitiba) were excavated, mixed with the different products, let cure for thirty days, sampled and checked; other soils were also collected elsewhere and also tested in a similar way.

The main results indicated that the polypropylene fibers yielded higher strength, if compared to the same property of the natural soil, always compacted. As far as the chemical and organic added products, although the scattered results obtained, it can be said that both lime and DS-328 showed better performance than the natural soil alone, when submitted to unconfined compression. Numbers obtained from the direct shear determinations were not considered inclusive, as discrepant results came out from the present testing program.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Atualmente, com o crescimento dos grandes centros urbanos, está sendo cada vez mais necessária a utilização de solos de baixa resistência a fim de dar suporte às grandes obras de engenharia. Muitas das técnicas de melhoramento de solos são utilizadas até mesmo após a execução de determinadas obras, permitindo, com isso, usar adequadamente o solo além de satisfazer questões técnicas e econômicas (BUENO, 2003).

A utilização de determinados elementos para melhorar as características desta matriz, considerada frágil, para determinadas obras de engenharia pode ser um fator relevante tanto no que diz respeito ao desenvolvimento de novas tecnologias quanto para questões relacionadas ao meio ambiente.

O desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente aquelas relacionadas à Engenharia, vem comprometendo grande parcela de recursos naturais, como os hídricos, por exemplo, que estão seriamente ameaçados pelo alto grau de poluição que os rodeia. O mesmo vem ocorrendo com o solo e o subsolo que se encontram na mesma situação. Devido a essa evolução, cada vez mais os solos considerados “bons” estão sendo explorados e conseqüentemente, vão restando aqueles que não possuem características adequadas para serem utilizados como base de fundação.

A atual paisagem desoladora em que se encontra o meio ambiente é fruto da má atuação de vários setores os quais dispõem seus resíduos de forma indiscriminada, entre eles podem-se citar pneus e restos de produtos jogados em terrenos baldios. Deve-se começar a pensar em desenvolvimento tecnológico como

preservação do meio, buscando alternativas cabíveis que possam neutralizar os males que o mesmo vem causando na natureza.

Uma visão do panorama atual é mostrada na Figura 1.1, resultado da atuação do homem no meio ambiente. A imensa quantidade e disposição inadequada de resíduos revelam que uma atitude emergencial deve ser tomada, tendo em vista o tempo de decomposição de cada um na natureza.

Tendo em vista essa problemática, se todos os setores se aliassem em busca de um reaproveitamento ou uma reciclagem, alguns dos problemas citados poderiam ser reduzidos. Todavia, enquanto não houver uma conscientização do que vem ocorrendo e principalmente, do que virá a acontecer, os problemas que serão enfrentados pela humanidade deverão ser cada vez maiores.



Figura 1.1 - decomposição de alguns materiais no meio ambiente.

Fonte: ABEPET (2005).

Assim, com relação à atuação da engenharia, hoje ela enfrenta um dos seus maiores desafios: minimizar os ataques que vem cometendo à natureza, realizar pesquisas onde poderá reutilizar alguns de seus rejeitos na composição de determinados tipos de compósitos assim como na melhoria de solos. FEUERHARMEL (2000) cita que uma boa saída seria o gerenciamento dos resíduos

sólidos pela reutilização de toda a parcela reciclável a qual até então vem sendo disposta no meio ambiente.

Neste contexto, fica claro que se pode encontrar alternativas cabíveis para uma melhor disposição destes resíduos. A Figura 1.2 revela uma situação bastante preocupante no que diz respeito à disposição inadequada de alguns produtos no meio ambiente.

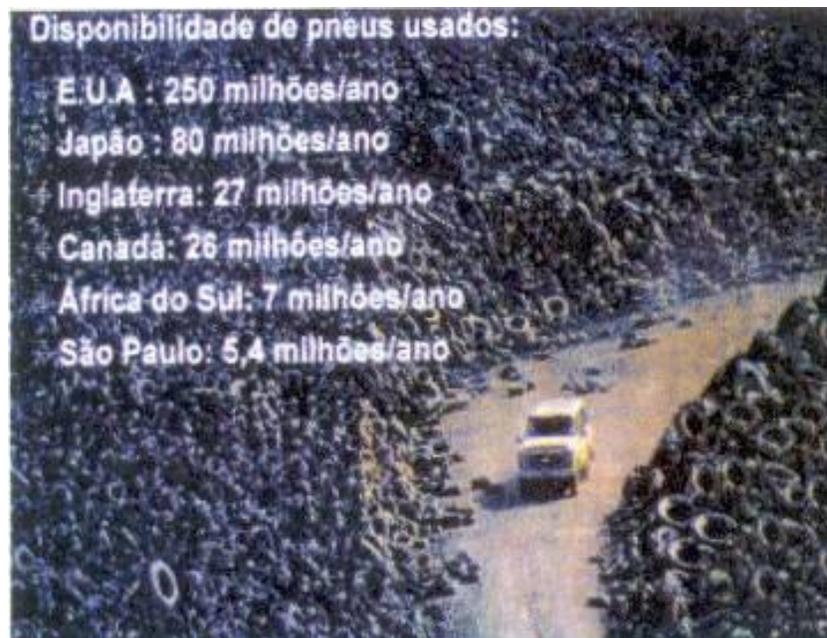


Figura 1.2 – disposição de pneus
Fonte: CAPPI (2004)

A reutilização de alguns produtos que, a priori, são descartados pelo homem no meio ambiente, se utilizados de forma correta, pode ser considerada um fator positivo na economia, visto que a tentativa dessa inclusão, se tomada cientificamente, poderá favorecer a redução no consumo de determinados elementos no processo.

1.1.1 Construção x solo frágil

Com relação ao solo natural, por ser um material complexo e variável, dependendo de suas condições, para ser utilizado como base para construção pode não oferecer satisfatórias condições para a utilização em questão. Entretanto, está sendo cada vez mais necessária a realização de obras em terrenos considerados inicialmente inadequados. Dessa forma, seja pela baixa capacidade de suporte ou então pela sua elevada compressibilidade é comum ocorrer que ele não consiga preencher algumas exigências pretendidas em um projeto.

Assim, é função do engenheiro geotécnico encontrar uma saída técnica, ambiental e economicamente viável para a realização da obra em questão, visto que projetar e executar obras sob essas condições implica em soluções caras, com elevada relação custo-benefício, muitas vezes inviabilizando os pequenos empreendimentos.

Uma alternativa poderia ser a remoção do material existente no local, substituindo-o por outro com características adequadas ao projeto. Porém, isso não atenderia condicionantes ambientais, pois haveria um grande desperdício de material, sendo a melhor opção modificar e melhorar as características do solo no próprio local, reforçando-o. Dessa forma, seria concebido um material com propriedades de resistência alta e deformação baixa, adequadas para constituir uma boa base de fundação em obras de engenharia (NBR 6122-96 DNIT).

O reforço mencionado acima pode ser entendido como uma melhoria das características do solo por meio de processos físicos e/ou químicos. Essas técnicas podem ser aplicadas com a utilização de alguns tipos de fibras como PET, sisal e polipropileno, além das raspas de pneus e dos aditivos (químicos e orgânicos).

No que tange à utilização das fibras de PET e às raspas de pneu, tendo em vista sua origem e destino, principalmente, é muito relevante enfatizar a importância de se dar um encaminhamento correto devido a grande dificuldade que o meio ambiente enfrenta quando da disposição inadequada desses materiais pelo tempo de decomposição de cada um na natureza, muitas vezes longo.

1.2 OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo verificar a atuação de alguns tipos de aditivos, fibras de polipropileno, de sisal e de PET, assim como raspas de pneu em solos siltosos, mostrando as melhorias proporcionadas nas propriedades geotécnicas dos mesmos.

1.3 HIPÓTESES

A presente pesquisa parte de duas hipóteses:

- O reforço de solos com aditivos químicos e orgânicos, fibras de PET, sisal, polipropileno e raspas de pneu causa a melhoria de algumas características como resistência e rigidez.
- A inclusão de alguns aditivos também promove uma melhoria nas características de resistência dos solos em estudo.

1.4 MÉTODO DE PESQUISA

A presente pesquisa baseia-se principalmente na análise do comportamento de solos siltosos quando melhorados com aditivos e reforçado com fibras de polipropileno, sisal, PET e raspas de pneu. Dessa forma, este trabalho objetiva solucionar o seguinte problema:

A adição de aditivos químicos e/ou orgânicos e o reforço com raspas de pneu, fibras de polipropileno, sisal e PET conferem melhoria suficiente a um solo do tipo siltoso a fim de que possa suportar determinadas cargas que futuramente atuarão sobre ele?

A dissertação em uma revisão bibliográfica e o método adotado é o experimento.

A comprovação da utilização do referido método se dá pelo fato de se poder manipular diretamente as variáveis de controle (dosagem de aditivos e fibras)

assim como pela necessidade da utilização de equipamentos e aparelhos devidamente calibrados (CERVO e BERVIAN, 1996).

De acordo com o problema de pesquisa caracterizado nesse estudo vislumbra-se uma análise explanatória.

Segundo SANTOS (1999) uma pesquisa é caracterizada como sendo explanatória ou explicativa quando existe uma preocupação com a identificação dos fatores que contribuem ou determinam a ocorrência, ou a forma com que ocorrem determinados fatos ou fenômenos. GIL (2002) complementa que esse tipo de pesquisa é o que mais aprofunda o conhecimento da realidade, porque explica a razão, o porquê dos acontecimentos sendo válida quase que exclusivamente para o método experimental.

1.5 LIMITAÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa limita-se a analisar o comportamento de solos siltosos melhorados com alguns tipos de aditivos e reforçado com determinadas fibras e raspas de pneu no âmbito dos ensaios mecânicos e físicos.

Com relação ao tipo de reforço e aditivação a serem utilizados, devido à grande disponibilidade de produtos existentes no mercado, essa pesquisa limita-se ao estudo de alguns elementos mostrados no Quadro 1.

Quadro 1 – elementos utilizados como reforço na pesquisa.

Produtos de ação química no solo	Produtos de ação física no solo
Cal	
Cimento	
DS – 328	
Dynacal	
Ecolopavi	
Homy solo	
Lignosulfonato	
EMC ²	
Terrazyme	
	Polipropileno fino Polycrret MF
	Polipropileno Concrefil
	Raspas de pneu
	Sisal
	PET

1.6 ESTRATÉGIA DE VALIDAÇÃO

De acordo com ESPIRITO SANTO (1992) a validação interna será verificada através da triangulação dos dados a qual caracteriza-se por ser uma validação qualitativa cruzada que avalia a suficiência dos dados, considerando fontes múltiplas de dados ou múltiplos procedimentos de coleta.

Neste estudo, a validação interna será realizada por uma comparação dos solos com e sem reforço ou aditivos quando compactados e a externa, através de uma comparação com outros trabalhos similares.

1.7 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente pesquisa encontra-se estruturada em quatro capítulos da seguinte maneira:

No capítulo 1 apresenta-se uma introdução ao assunto enfocando a relevância da pesquisa, objetivos, hipóteses, método de pesquisa, limitações da mesma e estratégia de validação.

No capítulo 2 é apresentado um resumo do estado – da - arte sobre o tema mostrando algumas características sobre determinados materiais para reforço de solos como fibras de PET, sisal, polipropileno e raspas de pneu assim como do melhoramento dos mesmos com alguns tipos de aditivos químicos e inorgânicos.

O terceiro capítulo insere o programa experimental com os métodos utilizados, descrevendo os ensaios utilizados realizados nas etapas de reforço e melhoramento de solos.

O quarto capítulo reservou-se para a realização do programa experimental de reforço de solos com fibras e raspas de pneu assim como a apresentação dos resultados obtidos.

No quinto capítulo é realizada a segunda etapa do programa experimental, com aditivos e apresentação dos resultados obtidos.

Finalmente, o sexto capítulo destina-se a conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No presente capítulo é apresentada uma revisão de literatura onde são enfatizados aspectos sobre estabilização, reforço e melhoramento de solos quando reforçados com aditivos, raspas de pneu e fibras (PET, sisal e polipropileno).

2.2. HISTÓRICO

A estabilização de solos teve seu marco histórico durante a segunda guerra mundial, quando houve a necessidade da construção de rotas militares. No contexto moderno, devido ao desenvolvimento da humanidade tendo como consequência uma grande aceleração do setor da construção civil, tem ocorrido uma elevada exploração de áreas terrestres reduzindo a disponibilidade dos chamados solos “bons”. Perdura, então, a necessidade de uma expansão em pesquisas a fim de se encontrar alternativas viáveis que solucionem o problema dos solos pouco resistentes, que na maioria das vezes não apresentam condições de suportar uma determinada obra da engenharia civil.

A busca por materiais alternativos para uso na construção civil, principalmente no que diz respeito à construção de pavimentos, já que o setor rodoviário é responsável por 70 % das cargas transportadas atualmente no país, tem sido foco de algumas pesquisas visando alavancar soluções que sejam capazes de oferecer ganhos, buscando qualidade e segurança, a fim de garantir resistência mecânica e uma vida útil mais longa aos pavimentos.

Com relação às fibras, as de polipropileno, por serem consideradas uma das mais promissoras existentes no mercado, se sobressaem ao oferecer condições

satisfatórias de utilização em alguns setores da construção civil. Como aumentam a resistência à tração, sua aplicabilidade é bastante ampla como material de terraplenos, estabilização de solos, pavimentação, além de outras aplicações (TRINDADE et al, 2004).

A inclusão aleatória de fibras gera um compósito bastante interessante para a engenharia geotécnica, o chamado fibrossolo. Dessa forma os solos reforçados com determinados tipos de fibras podem apresentar melhorias em muitos parâmetros de engenharia, tornando-se aptos a desempenhar determinadas funções que anteriormente não poderiam (TRINDADE et al, 2004).

Pela riqueza de publicações a respeito, percebe-se a grande aplicabilidade das fibras no setor da construção civil. Para tanto, antes de se pensar em utilizar uma fibra como reforço de solos, devem-se analisar cuidadosamente suas características a fim de se conhecer melhor todo o seu entorno, uma vez que cada fibra possui distintas particularidades (SPECHT, 2000).

2.3 MÉTODOS DE REFORÇO E MELHORAMENTO DE SOLOS

Muitos autores fazem distinção entre estabilização, melhoramento e reforço de solos de acordo com o grau de alteração provocada nas propriedades do material, a quantidade a ser adicionada e o tipo de material utilizado.

NUÑES apud SPECHT (2000) cita que o termo estabilização é utilizado quando nas misturas entre solo e cal ou solo e cimento (com grandes concentrações destes aditivos) ocorrem características de durabilidade e resistência suficientes que permitam seu emprego como base de pavimento rodoviário. Já o melhoramento é atribuído a misturas que apresentam relativa alteração em suas propriedades mecânicas, devido ao baixo teor de aditivo utilizado. Com relação ao reforço de solos, BUENO (2003) caracteriza o método pela utilização de determinados tipos de fibras, sejam elas orgânicas ou inorgânicas.

2.3.1 Estabilização de Solos

A estabilização de solos consiste em modificar as características do sistema solo - água - ar com a finalidade de se obter propriedades necessárias para a aplicação desejada. Existem muitos materiais que agem como estabilizadores de solos como, por exemplo, cimento, cal, aditivos, fibras, etc.

A utilização correta das técnicas de estabilização de solos leva à redução nos tempos de execução da obra, viabiliza a industrialização do processo construtivo além de proporcionar uma considerável economia para o empreendimento em questão (PESSOA, 2004).

A estabilização de solos compreende todas as formas de melhoria de suas propriedades, sejam elas naturais ou artificiais cujo objetivo é garantir a constância destas características durante o tempo de vida útil das obras de engenharia.

Um solo estabilizado é aquele que passou por aplicações de processos e técnicas cujo objetivo era a melhoria de suas propriedades mecânicas como aumento da resistência, rigidez, durabilidade, deformabilidade e permeabilidade (INGLES e METCALF apud VENDRUSCOLO, 2003).

O processo consiste na preparação de uma mistura de solo finamente pulverizado, cimento e água, em proporções previamente determinadas. Normalmente a percentagem de cimento é dada entre 5 a 7% nos siltes, 7 a 15% nas areias e é de cerca de 4% no cascalho. A mistura obtida é assim aplicada e compactada, ficando posteriormente a hidratar (normalmente por sete dias) em condições de umidade adequadas, verificando-se o seu progressivo endurecimento.

A mistura solo - cimento representa o tipo de estabilização mais utilizado, sendo particularmente vantajosa em solos granulares, solos siltosos e argilas pouco plásticas.

Em solos pouco plásticos ($IP < 10\%$) a reduzida fração argilosa não permite que a cal produza outro efeito senão o abaixamento do teor em água, enquanto o tratamento com cimento permitirá não só uma reutilização dos materiais em aterro, mesmo com um elevado teor em água (visto que o teor ótimo para compactação

aumenta), como uma melhoria das características mecânicas, permitindo, por exemplo, a sua utilização em camadas de leito do pavimento.

Nos solos finos plásticos, as forças de ligação entre as partículas constituintes são capazes de impedir uma adequada mistura com o cimento. Dessa forma, é importante quebrar essas ligações transformando o solo em pequenos grânulos, recorrendo ao tratamento com cal. Isto permite que o cimento atue como ligante dessas novas partículas incoerentes, melhorando consideravelmente as propriedades do solo.

Na estabilização química de solos os cimentos do tipo Portland sempre foram os mais utilizados embora praticamente todos os tipos possam ser empregados. Os cimentos de pega rápida podem ser indicados para solos com elevada percentagem de matéria orgânica, visto o fato de libertarem quantidades extras de cálcio úteis no combate ao referido material orgânico.

Os principais objetivos da utilização do cimento na estabilização de solos são a melhoria das características mecânicas e uma maior estabilidade relativa à variação do teor em água e cimento que consiste na preparação de uma mistura de solo finamente pulverizado com cimento e água, em proporções previamente determinadas.

NÚÑEZ apud VENDRUSCOLO (2003) faz uma distinção entre solo estabilizado e solo melhorado ou tratado. Ele designa o primeiro como sendo misturas de solo e aditivo que possuem características de durabilidade e resistência que permitem o seu emprego como base de pavimentos rodoviários. Já o segundo devido ao seu baixo teor de aditivos, caracteriza solos que não possuem propriedades para serem utilizados como base de pavimentos.

De acordo com VENDRUSCOLO (2003) se o objetivo for apenas modificar as propriedades do solo, a solução é a adição de pequenas quantidades de cimento, até 2% por exemplo. Por outro lado, grandes quantidades irão alterar por completo suas características.

O cimento tem sua utilização bastante difundida nos Estados Unidos não só na estabilização de solos, mas também no melhoramento de estradas de seixo, no que constitui um caso particular da aplicação deste aditivo.

O processo de se combinar solo com cimento é bastante similar ao do concreto. A diferença se dá pelo fato de que no solo-cimento há um envolvimento das partículas de cimento com os grãos de solos finos resultando, com isso, em ligações menos resistentes.

Deve-se estar ciente de que a estabilização não é necessariamente um processo infalível através do qual toda e qualquer propriedade do solo é alterada para melhor. Uma aplicação correta de qualquer método exige assim a identificação clara de quais propriedades do solo que se pretende melhorar. Essa técnica se faz necessária, principalmente quando o solo possui as seguintes características:

- Fraca capacidade de carga ou então elevada permeabilidade em solos de fundação que, devido à localização, são difíceis de tratar por outros métodos.
- Solos naturais que são pouco adequáveis à execução de fundações superficiais, principalmente estradas e aeroportos.

Segundo VENDRUSCOLO (2003) os métodos de estabilização de solos são freqüentemente classificados em três grupos: estabilização mecânica, cujo objetivo é melhorar as características do solo através de uma melhor “arrumação” das suas partículas constituintes e/ou recorrendo a correções da sua composição granulométrica; física, onde as propriedades do solo são alteradas através da ação do calor, da eletricidade, etc.; e química, modifica permanentemente as propriedades do solo através de aditivos. A escolha do método a ser utilizado é baseada nas análises econômicas e técnicas do problema em questão, a fim de se escolher aquele mais adequado ao processo.

- Estabilização química

A estabilização química de um solo é dada pelas alterações produzidas na sua massa pela introdução de uma pequena quantidade de aditivo. Essa adição confere certas propriedades pré-determinadas, podendo a estabilização ser processada via quatro mecanismos diversos: substituição das moléculas de água e

cátions adsorvidos por cátions hidrorrepelentes; estabelecimento de ligações reforçadas entre agregados de partículas pela adição de ligantes; floculação e dispersão.

A estabilização química, quando utilizada para solos granulares, visa melhorar sua resistência ao cisalhamento por meio da adição de pequenas quantidades de ligantes nos pontos de contato dos grãos. Dentre os ligantes mais utilizados, tem-se o cimento Portland, a cal, as pozolanas, os materiais betuminosos e certas resinas.

Os dois tipos de estabilização química mais conhecidos são solo-cimento e solo-cal, embora existam outros como o solo-betume que também merece destaque na estabilização de solos, cuja finalidade está mais direcionada à pavimentação (LIMA, 1993).

A estabilização química solo-cimento resulta da combinação de solo, cimento e água cujas proporções devem ser determinadas por ensaios em laboratório e por processo construtivo que leva esses materiais após serem misturados e compactados no campo a uma massa específica seca fixada em ensaios de laboratório.

- Estabilização física

A estabilização física é classificada em elétrica e térmica. A primeira consiste na passagem de uma corrente elétrica pelo solo que se pretende estabilizar. Essas descargas sucessivas de alta tensão são necessárias ao adensamento de solos arenosos saturados e as de baixa tensão contínua são usadas em solos argilosos onde são empregados os fenômenos de eletro - osmose, eletroforese e consolidação eletroquímica. Com relação à estabilização térmica, essa é feita pelo emprego de energia térmica por meio de congelamento (solução temporária, onde é alterada a textura do solo), termo - osmose (técnica de drenagem onde é promovida a difusão de um fluido em um meio poroso pela ação de gradientes de temperatura) e o aquecimento (técnica que busca rearranjos na rede cristalina dos minerais constituintes do solo) (TECPAR, 2006).

A estabilização física por eletro-osmose é um processo que consiste em se colocar dois eletrodos em uma massa de solo favorecendo a passagem de uma corrente elétrica entre eles. Com a migração da água, presente no solo, do eletrodo positivo para o negativo, ocorre uma remoção da água do solo, permitindo seu adensamento.

Com relação à estabilização física por aquecimento, o método é caracterizado pelo conhecimento de que um elevado aquecimento converte argila em cerâmica. Assim a partir de uma determinada temperatura consegue-se atingir um processo de endurecimento irreversível.

O método consiste em se introduzir no solo, utilizando-se um tubo perfurado, uma mistura comprimida de ar muito quente e combustível. Esse aquecimento pode ser dado por processos elétricos, microondas e raio laser.

A Estabilização física por congelamento artificial baseia-se na premissa de que como os solos possuem vazios os quais poderão estar total ou parcialmente ocupados por água, ao se realizar o congelamento da mesma, a chamada água intersticial, origina-se um material rígido com elevada resistência.

CRISTELO (2001) cita que com relação aos solos incoerentes, consegue-se atingir um estado de congelamento da água a temperaturas em torno de 0°C ao passo que com as argilas, a uma temperatura inferior. Esse método consiste em se criar uma barreira que seja resistente o suficiente a fim de impedir a passagem da água ao redor da zona a ser escavada, pode ser usado, por exemplo, no reforço para preparação de estruturas recalçadas.

- Estabilização mecânica

A estabilização mecânica também chamada de granulométrica consiste na alteração das propriedades dos solos através da adição ou retirada de partículas do mesmo, ou pode ser dada por compactação (pelo tratamento do solo com a finalidade de minimizar sua porosidade pela aplicação repetida de cargas) ou por correção granulométrica.

2.3.1.1 Aplicações da Estabilização de Solos

De acordo com CRISTELO (2001) as principais justificativas para a utilização da estabilização de um solo podem ser enunciadas como:

- A necessidade de elevar uma região de terrenos lodosos ou arenosos de modo a permitir maiores possibilidades de desenvolvimento econômico;
- Permitir a utilização de estradas secundárias e rurais em boas condições;
- Fornecer bases para pavimentos de qualidade,
- Atuar como fonte de absorção de ruído, particularmente em zonas urbanas, em que adequados sistemas de solo estabilizado possuem vantagens consideráveis sobre outros materiais de construção;
- Propiciar a circulação de tráfego em determinadas áreas e em curtos intervalos de tempo em caso de emergências militares ou outras. Porém, a principal aplicação da estabilização de solos sempre foi na execução de pavimentos, nomeadamente das bases, sub-bases de estradas e aeródromos além de estradas de terra.

2.3.1.2 Tipos de estabilização de solos

No que diz respeito aos tipos de estabilização de solos mais conhecidos até então, pode-se citar solo cal e solo cimento.

- Estabilização de Solos com Cimento

O cimento é um dos aditivos mais conhecidos e aplicados na estabilização química de um solo. Sua aplicação se dá em certos solos pouco plásticos ou não plásticos, com teores em água suficientemente elevados para permitir a sua adequação aos trabalhos de terraplenagem.

Na estabilização de solo com cimento pode-se fazer uso de qualquer tipo de solo, com exceção daqueles altamente orgânicos, pois a matéria orgânica tem a capacidade de retardar ou impedir a hidratação do cimento. Como a matéria orgânica absorve os íons cálcio, a adição de cal hidratada pode permitir que o solo seja tratado com o cimento. Uma outra questão é que a presença de sais, principalmente de sulfato e um pH ácido, também inibem o desenvolvimento da resistência de um solo tratado com cimento (VENDRUSCOLO, 2003).

Embora como já citado anteriormente, qualquer tipo de solo pode ser tratado com cimento, entretanto, considera-se adequado que os solos granulares são mais indicados em relação aos argilosos, pois conseguem atingir resistências mais elevadas, com menores teores de cimento. Já os solos finos requerem maiores quantidades de aglomerantes além de serem de difícil pulverização e mistura (ABCP, 1984).

A bibliografia consultada considera de extrema relevância a presença de algum tipo de argilomineral presente no solo para a estabilização com cimento. Assim, LIMA (2001) estudando o comportamento de diversos minerais argilosos com cimento constatou que:

- Solos caulíníficos e ílíticos são mais susceptíveis à estabilização com cimento, quando comparados com os solos que contêm grandes quantidades de argilominerais expansivos;
- Solos muito argilosos são de difícil estabilização, pois exigem grandes quantidades de cimento. No entanto, em algumas situações, um tratamento preliminar com cal e posterior adição de cimento podem conduzir a resultados aceitáveis;
- Outros tipos de atuações do cimento nos minerais de argila estudados, relatam a redução dos índices de plasticidade e os aumentos nos limites de contração.

Segundo LIMA et al (1993) uma das principais vantagens da utilização do solo-cimento é que a mistura possui resistência e traz economia quando aplicado como base de pavimentos.

O solo, por ser o componente de maior porcentagem na mistura, deve ser criteriosamente selecionado de modo a permitir a necessidade da menor quantidade possível de cimento e/ou aglomerante.

Solos com grande quantidade de argila possuem dificuldade de mistura e requerem uma elevada quantidade de aditivos para que se consiga significativa alteração em suas propriedades (CASANOVA, 2004).

Em solos pouco plásticos, ou seja, aqueles que possuem índice de plasticidade menor que 10%, a reduzida fração argilosa não permite que a cal produza outro efeito senão a redução do teor de água. Com relação ao tratamento com cimento, a adição permitirá não só uma reutilização dos materiais em aterro, mesmo com uma elevada quantidade de água, como também uma melhoria das características mecânicas, permitindo, por exemplo, a sua utilização em camadas de leito do pavimento.

- Estabilização do Solo com Cal

De acordo com CRISTELO (2001) a estabilização do solo com cal é uma das técnicas mais antigas utilizadas pelo homem. Segundo o autor, essa técnica vem sendo bastante utilizada em países como Itália, China, Estados Unidos, Japão e outros. É baseada na inter-relação de elementos presentes no solo, dos componentes do meio ambiente e da cal a ser adicionada. O solo interfere com argilas e quartzo, o meio ambiente com a temperatura, água, ar e finalmente a cal (hidratada ou virgem) com seus teores de óxidos de cálcio e de magnésio.

Na estabilização de solos com cal ocorre de início a hidratação da cal que modifica o pH do solo e provoca a floculação das argilas em função das reações de troca de cátions. Após essa etapa o material sofre uma redução de expansão e retração melhorando sua plasticidade. Com o tempo, há a produção de reações pozolânicas e fenômenos de carbonatação proporcionando ao material melhores características geo-mecânicas.

As principais características do solo capazes de influenciar as reações de misturas solo cal são: pH do solo, teor de matéria orgânica, drenagem natural e presença excessiva de solo permutável (troca catiônica), mineralogia da fração

argilosa, grau de intemperismo, presença de carbonatos e/ou sulfatos (LIMA et al, 1993).

Ao se adicionar cal em um solo argiloso, consegue-se alterar suas propriedades físicas, obtendo-se uma melhora na plasticidade, na trabalhabilidade e nas características de resistência, tensão-deformação e fadiga. Para tanto, essas alterações dependem de diversos fatores como tipo e teor de cal, energia de compactação, período e condições de cura (LOVATO, 2004).

A presença de sulfatos no solo dificulta a reação solo cal, pois estes modificam as reações formando etringita e taumasita (produtos expansivos) e inibem a formação dos silicatos e aluminatos hidratados (LOVATO, 2004).

Pode-se aplicar a estabilização alcalina em praticamente todo tipo de solo com pelo menos 10 a 15% de argila, baixos teores de matéria orgânica, mica e sulfatos. Com relação aos tipos de estabilização existentes, citam-se os solos modificados e os estabilizados pela cal (DIAS, 2004).

Segundo estudos realizados por DIAS (2004) de um modo geral todo solo que contém argila pode ser estabilizado com cal. Geralmente se o índice de plasticidade for maior ou igual a 10%, a estabilização com cal é mais econômica do que com o cimento.

Os solos modificados são caracterizados pela baixa adição da cal, o suficiente para desenvolver as reações da fase rápida. Ocorrem melhorias principalmente na trabalhabilidade e na textura do solo. Assim fica caracterizado que o termo solo modificado é utilizado quando se deseja alterar apenas algumas propriedades do solo. Com relação aos estabilizados o teor é tal que além das reações rápidas, as reações lentas irão estabilizar o solo. Esse tipo de estabilização oferece ao solo ganho de resistência, estabilidade e durabilidade.

O teor do estabilizante a ser utilizado depende do objetivo específico do processo que pode ser dado por modificação ou estabilização. Assim, o teor ótimo depende dos critérios técnicos, caracterizados pela resistência e durabilidade que se pretende alcançar (CRISTELO, 2001).

Quando o objetivo for tão somente alterar algumas propriedades, a quantidade de cal adicionada é pequena, o suficiente apenas para a ocorrência da fase rápida das reações, sem a formação de produtos cimentantes, tem-se com isso

a modificação do solo. Por outro lado se a intenção for atingir reações pozolânicas pela adição de uma maior quantidade de cal, proporcionando um maior ganho de resistência, tem-se o processo de estabilização do solo (LOVATO, 2004).

De acordo com a literatura consultada, as principais características inerentes aos solos estabilizados e compactados com cal são: o aumento do limite de plasticidade, a redução do limite de liquidez assim como o achatamento das curvas de compactação decorrentes da elevação do teor ótimo de umidade (MILANI, 2005).

2.3.2 Melhoramento de Solos

A técnica do melhoramento de solos segundo (CRISTELO, 2001) representa provavelmente o método mais antigo e tecnicamente, o mais intrigante de todos as que são utilizados na Engenharia Civil.

Há mais de 3000 anos já se fazia uso do processo de melhoramento de solos, época em que houve a construção dos templos da antiga Babilônia. Neste período, os chineses usavam madeira, bambu ou palha para reforço do solo.

Segundo BRANDI (2004) o processo de melhoria de solos está relacionado à utilização de métodos, sejam eles físicos ou químicos, os quais são destinados a melhorar as propriedades dos solos para fins de engenharia.

Uma das principais aplicações desta técnica se dá pela crucial importância para a resolução dos complicados problemas dos solos de fundação. O que difere essa técnica da estabilização de solos diz respeito à quantidade de produto a ser adicionado ao solo.

CRISTELO (2001) cita que existem três grupos relacionados às técnicas de melhoramento de solos, os quais podem ser assim distinguidos:

1. Técnicas de melhoramento temporárias que são limitadas ao período de construção;
2. Melhoramentos permanentes aplicados para melhorar o solo natural sem a adição de quaisquer materiais;
3. Melhoramento permanente com adição de materiais ao solo natural.

A técnica de reforço de solos é realizada com a utilização de diversos tipos de fibras, que vão desde PET, polipropileno, sisal, pneu e também aditivos.

2.3.2.1 Reforço de Solos com Fibras

Com o passar dos anos, a necessidade do reaproveitamento de determinados materiais como as fibras de PET, polipropileno assim como as raspas de pneu, cresceu devido ao aumento da disponibilidade dos mesmos no meio ambiente. Por esse motivo, a técnica de reforço de solos através da inclusão de fibras e pneus, tem sido estudada por vários pesquisadores do mundo inteiro. A Figura 2.1 mostra que as fibras podem ser classificadas em orgânicas e inorgânicas, as quais por sua vez são classificadas em naturais e artificiais.

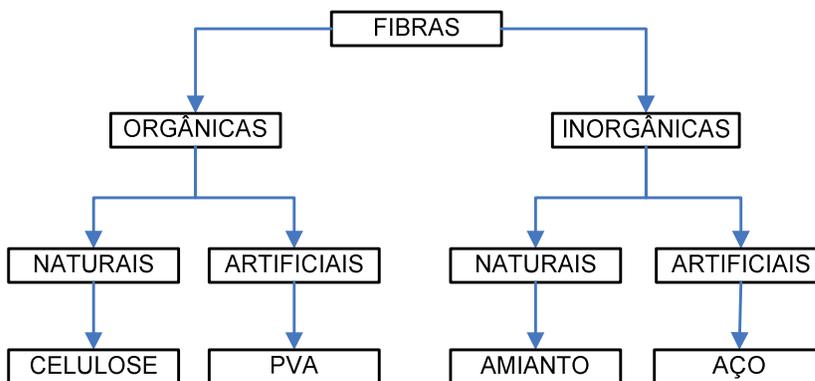


Figura 2.1 – Classificação das fibras

Fonte: Adaptado de SILVA (2003)

Para BUENO (2003) a utilização das fibras no solo – o chamado fibrossolo – possui um grande potencial de aplicação em diversos tipos de obras de engenharia como reforço de solos para apoio de fundação rasa, barreiras de vedação, assim como capas de proteção de aterros sanitários, etc. As fibras

desempenham um papel fundamental, pois melhoram o desempenho das matrizes frágeis quando da exigência de esforços dinâmicos (JOHN, 1999).

Segundo o autor, a ação dessas fibras implica num comportamento reológico particular ao fibrossolo quando comparado ao solo natural. Essas modificações se refletem no aumento da capacidade de carga do solo e na redução de sua compressibilidade. Como qualquer estabilizante químico tradicional, o mesmo deve ser dosado para poder ser utilizado com sucesso na engenharia obtendo-se, com isso, melhores ganhos de desempenho mecânico (TEIXEIRA et al, 1995).

TRINDADE et al (2005) considera que a presença de fibras modifica o comportamento do solo gerando um material mais dúctil, mais coesivo e levemente mais compressível. Segundo o autor, solos arenosos com a adição de fibras apresentam maiores ângulos de atrito interno. Por outro lado, a presença das fibras afeta levemente a permeabilidade dos solos, causam uma redução no coeficiente de permeabilidade de solos mais permeáveis além de provocar um efeito inverso nos menos permeáveis. Dessa forma TRINDADE et al (2005) acreditam que um material de características tão atrativas como as fibras deveriam receber mais atenção da comunidade geotécnica, principalmente pelo fato de que a reutilização desse material é considerada de todas as formas uma contribuição para com o meio ambiente.

Na utilização de fibras como reforço de compósitos na construção civil, a escolha do tipo de fibra é de fundamental importância, tendo em vista as várias opções existentes no mercado. Assim, por exemplo, deve-se levar em conta que as naturais sofrem decomposição, tendo uma vida útil menor em relação às sintéticas. Contudo, para uma aplicabilidade correta, o entendimento de alguns conceitos é de fundamental importância, como os citados por JOHN (1999):

- Durabilidade: capacidade que um produto possui de manter suas condições de serviço durante o tempo para o qual foi projetado e construído. Pode ser avaliada pelo seu tempo de vida em anos ou pela sua resistência a agentes que afetem seu desempenho.

- Vida útil: período de tempo que um material ou componente construtivo ou edificação, mantém seu desempenho acima dos níveis aceitáveis.
- Degradação: é o processo no qual um material sofre transformações irreversíveis que implicam perda de qualidade ou valor.
- Agentes ou fatores de degradação: são ações físicas, químicas, ambientais ou biológicas que causam degradação do material.
- Mecanismos de degradação: são as formas como os agentes causam uma seqüência de mudanças físicas e/ou químicas que levam a perdas nas propriedades esperadas do material.
- Indicadores de degradação: são os indicativos utilizados para quantificar os mecanismos de degradação, ou seja, que expressam as variações de desempenho de um produto durante o seu uso.

As fibras são utilizadas como elemento de reforço para dar suporte a solos frágeis, sendo seu volume bem menor em relação ao volume da matriz. A Figura 2.2 traz uma representação esquemática da atuação das fibras em uma determinada matriz agindo como elemento de reforço.

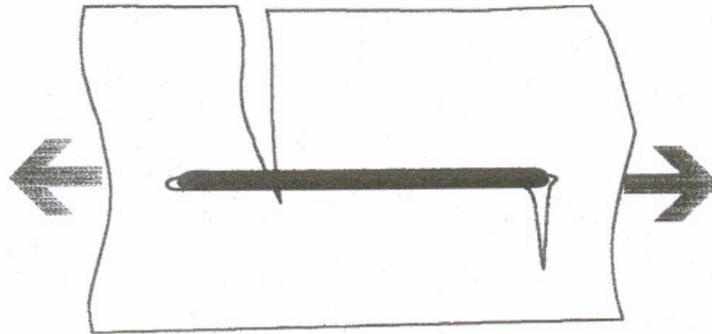


Figura 2.2 – Efeito das fibras numa matriz atuando como reforço

Fonte: JOHN (1999)

Em se tratando de reforço em solos, uma representação mais clara pode ser mostrada na Figura 2.3 a seguir, que mostra um corpo de prova reforçado com fibras.

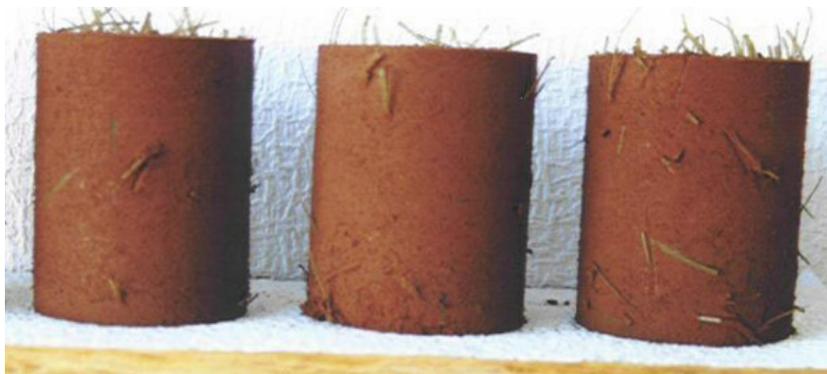


Figura 2.3 – Reforço de solos com fibras

Fonte: CARBONIERI et al(1999).

2.3.2.1.1 Tipos de Fibras Utilizadas como Reforço

Existe no mercado uma grande variedade de fibras, as quais podem ser utilizadas como elemento de reforço de materiais compósitos. A diferença entre elas se justifica pela composição física e química, assim como pelas propriedades mecânicas e de resistência que apresentam quando expostas a meios agressivos.

Devido a essa grande quantidade de fibras disponíveis, para se fazer uso ou escolher aquela que melhor se adapta à devida utilização, deve-se, antes de tudo, conhecer suas características (VENDRUSCOLO, 2003).

Para SILVA (2004), as fibras são divididas de acordo com sua elasticidade, em fibras de alto e baixo módulo, tendo com isso, aplicações diferentes. Segundo ele, as de alto módulo possuem a capacidade de melhorar a resistência do compósito, principalmente em relação à tração. Já as de baixo módulo, oferecem melhores resistências ao impacto e permitem ao compósito trabalhar no estágio pós-fissurado proporcionando um aumento considerável de sua tenacidade, quando aplicadas em teores adequados. O autor relata ainda que as fibras podem ser classificadas de acordo com sua composição em orgânicas (vegetais e poliméricas) e inorgânicas (minerais e metálicas).

TEODORO e BUENO (1998) apontam as fibras que mais se adaptam às necessidades e condições da engenharia civil. Segundo eles, fibras naturais como coco, sisal e celulose, as minerais, poliméricas e metálicas têm apresentado bons

resultados no que tange questões relativas à melhoria das propriedades mecânicas de materiais de construção. Afirmam ainda que as mais utilizadas são as de aço e as poliméricas. As de aço vêm sendo estudadas para reforço de solos argilosos fissurados, assim como em concretos cuja finalidade é a de garantir um comportamento mais dúctil desses materiais.

Uma das desvantagens encontradas com o uso de fibras naturais se dá pelo fato destas serem oriundas de matéria orgânica. Isso contribui para o ataque de fungos e insetos que associado ao efeito alcalino do cimento, interfere decisivamente na vida útil do compósito (AGOPYAN, 1987). Dessa forma, o problema principal a ser analisado quando utilizadas fibras vegetais é a durabilidade dos compostos que serão formados.

Apesar da desvantagem citada acima, existem muitos estudos visando encontrar uma saída a fim de que se possa fazer uso das qualidades que as fibras naturais podem oferecer à construção civil.

- Fibras vegetais

As fibras vegetais representam uma grande gama de variedades no que diz respeito aos tipos disponíveis no mercado. Assim, faz-se necessário analisar todas as características das mesmas a fim de verificar aquela que mais se adequa ao objetivo em questão. De um modo geral, podem-se citar algumas das principais vantagens e desvantagens da utilização de fibras vegetais como reforço de solos, relacionadas a seguir:

Vantagens:

- Grande abundância de fibras;
- Baixo custo;
- Baixa densidade;
- Não prejudicial à saúde;
- Conservação de energia;
- Condição de incremento na economia agrícola.

Desvantagens:

- Baixa durabilidade devido a tolerância à decomposição;
- Fraca adesão, em estado natural, às matrizes;
- Grande variabilidade de propriedades.

As fibras vegetais, de um modo geral, são constituídas principalmente por lignina, que é uma estrutura amorfa, e celulose, uma estrutura cristalina.

A principal forma de degradação das fibras vegetais é pela biodeterioração. Este processo é resultante da ação dos fungos apodrecedores que processam a lignina, removendo-a. Estes fungos são aeróbios, ou seja, necessitam da presença de oxigênio para o seu desenvolvimento, embora possam sobreviver por algum tempo sem a presença de água, necessitando que o meio possua um pH próximo do neutro. Assim, pode-se dizer que em relação à pasta de cimento, teoricamente, mesmo após a carbonatação, deve apresentar a ação do mecanismo da degradação (JOHN et al, 1999).

Com relação aos tipos de fibras vegetais, JOHN et al (1999) em seu estudo concluiu que na comparação entre as de coco e sisal, estas se degradam mais rapidamente, embora apresentem uma resistência mecânica inicial maior.

- Fibras de Polipropileno

O polipropileno é constituído por um material polimérico – o termoplástico. Uma das grandes características que possuem os polímeros termoplásticos é que consistem em uma série de longas cadeias de moléculas polimerizadas, as quais podem deslizar umas sobre as outras. Dessa forma, possuem grande flexibilidade e tenacidade além de propiciarem aumento da resistência ao impacto aos materiais a que é incorporada (SPECHT, 2000).

As fibras de polipropileno mais conhecidas são as do tipo monofilamentos e as fibriladas.

As fibras monofilamentos são representadas por fios cortados em comprimento padrão (Figura 2.4).

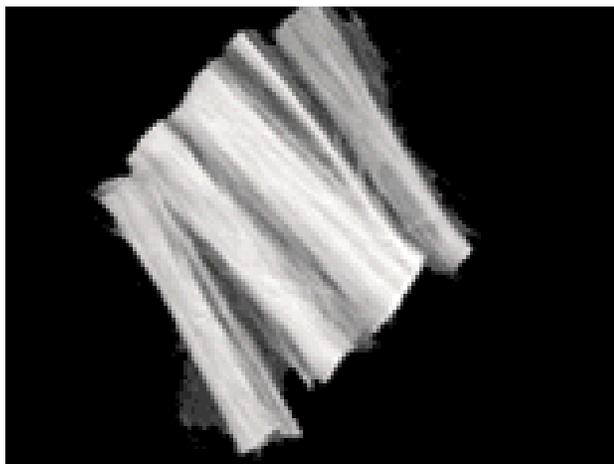


Figura 2.4 - Polycon HPC 20 N monofilamento

Fonte: Vulcan do Brasil

As fibriladas também conhecidas por multifilamentos são representadas por uma malha de finos filamentos de seção retangular. Sua estrutura em malha promove um aumento de adesão entre a fibra e a matriz, devido a um efeito de intertravamento (Figuras 2.5 e 2.6). No caso do concreto são utilizadas para inibir o aparecimento de fissuras por retração.



Figura 2.5 – Polycrret MF

Fonte: Fitesa



Figura 2.6 – Polycrret CR

Fonte: Fitesa

As características das principais fibras, assim como suas propriedades, estão relacionadas no Quadro 2:

Quadro 2 – Características das fibras

TIPO (fornecedor)	CARACTERÍSTICAS
Monofilamento (Orpec)	<ul style="list-style-type: none"> - Fibras formadas por filamentos; - Representadas por fios cortados em comprimento padrão; - Flexibilidade e tenacidade; - Módulo de elasticidade em torno de 8 GPa; - Resistência à tração aproximadamente 400 Mpa; - Resistência ao ataque de várias substâncias químicas e aos álcalis.
Fibriladas/mesh (Orpec)	<ul style="list-style-type: none"> - Formada por pequenos filamentos unidos; - Representadas por uma malha de finos filamentos de seção retangular. - Sua estrutura em malha promove um aumento de adesão entre a fibra e a matriz, devido a um efeito de intertravamento. - Flexibilidade e tenacidade - Módulo de elasticidade em torno de 8 GPa - Resistência à tração de aproximadamente 400 MPa - Resistência ao ataque de várias substâncias químicas e aos álcalis
Crackstop (Fitesa)	<ul style="list-style-type: none"> - São fibras sintéticas do tipo multifilamentos; - Especialmente desenvolvidas para atuarem como elementos de reforço secundário tridimensional dos concretos; - Quimicamente inertes; - Imputrescíveis; - Resistentes ao meio alcalino;
Policret CR (Fitesa)	<ul style="list-style-type: none"> - Fibras corrugadas; - Sintéticas do tipo monofilamento obtidas por extrusão; - Possuem a função principal de evitar fissuras de retração por secagem e aumentar a resistência ao impacto - Podem ser aplicadas em pisos e pavimentos de concreto, pré-moldados, reforço de solos.
Policret MF	<ul style="list-style-type: none"> - Sintéticas do tipo monofilamento obtidas por extrusão; - Evitam fissuras de retração por secagem e aumentam a resistência ao impacto; - Podem ser aplicadas em pisos e pavimentos de concreto, pré-fabricados, barragens, revestimento de túneis, concreto celular, reforço de solos, etc.

As fibras de polipropileno possuem muitas aplicações promissoras, por exemplo, uso no revestimento secundário de túneis, pois melhoram consideravelmente a resistência do concreto à ação do fogo. Com a adição dessas fibras, que possuem temperatura de fusão em torno de 165°C, ao se fundirem criam pequenos espaços e canais que permitem a dissipação da pressão de vapor, diminuindo as tensões de tração internas e a deterioração do concreto (TANESI et al, 2002).

O uso dessas fibras é bastante difundido nos Estados Unidos e na Europa, principalmente em assuntos relacionados à área de compósitos. Seu emprego é bastante considerável em pavimentos industriais quando são adicionados baixos teores dessas fibras (1% em volume) em substituição às telas metálicas, cuja função é controlar a fissuração por retração. Uma das grandes vantagens que se consegue com isso é o ganho de produtividade, já que é eliminado o tempo para a disposição e fixação de telas, além do custo otimizado. Esta técnica foi utilizada no revestimento dos pavimentos do World Vision, em Victoria, Austrália no ano de 1992 (TANESI et al, 2002).

Outras aplicações destas fibras em elementos constitutivos de engenharia dizem respeito a reforço de solo, combate à fissuração por retração do concreto, coberturas de aterros sanitários e aterros sobre solos moles, etc.

Ao se adicionar fibras de polipropileno ao concreto, em baixos teores, consegue-se melhorar o comportamento deste em relação a solicitações dinâmicas, principalmente é imputada a elas a capacidade de redução da área de fissuras associadas à retração (TANESI et al, 1999).

Sua utilização no solo proporciona um aumento na resistência e na ductilidade do mesmo. Essa inclusão, em muitos estudos, mostrou uma mudança no comportamento tensão-deformação para grandes deformações e apresentou um acréscimo de resistência (CASAGRANDE et al, 2002).

Como desvantagens, principalmente pela sua recente descoberta, não há uma dosagem predefinida, sendo necessário que, para cada tipo de solo seja determinado, em laboratório, o teor ótimo de fibras, bem como o comprimento das mesmas. Dessa forma, com relação às de polipropileno, quando o objetivo do uso dessas fibras for redução da fissura por retração do concreto, é conveniente adotar o

consumo empírico de 0,9 Kg/m³, ou seja, 0,1% em volume (TANESI et al, 1999). Outra dificuldade enfrentada diz respeito à baixa resistência ao fogo, sensibilidade à luz solar e aderência limitada à matriz (TRINDADE et al, 2004).

Apesar desses fatores negativos, eles são considerados contornáveis. Como trabalham embebidas à luz, seus efeitos de sensibilidade e resistência ao fogo são minimizados. Uma forma de se contornar o problema de aderência é por um tratamento superficial feito pela adição de micro-agregados e aditivos inorgânicos (RESENDE, 2003).

- Fibras de PET

Nos últimos anos o consumo de alguns materiais tem aumentado progressivamente numa razão considerada incalculável. Com isso, deve-se atentar ao consumo de PET (polietileno tereftalato), por exemplo, que é um tipo de plástico empregado na fabricação de garrafas de refrigerante. Devido às suas características específicas, o PET vem substituindo outros tipos de plásticos com determinadas funções como, por exemplo, as garrafas de água mineral, tradicionalmente confeccionadas com PVC (policloreto de vinila).

Como consequência da alta utilização desse material e do fato de sua decomposição ser muito lenta, tem-se um aumento considerável da geração de resíduos. Dessa forma, uma das alternativas cabíveis a essa situação, diz respeito à reciclagem desses materiais.

Como as embalagens de polietileno tereftalato (PET) são facilmente encontradas no lixo e que o mundo produz em torno de sete milhões de toneladas ao ano, além de que elas constituem-se num poluente em potencial com uma vida média de cem anos é relevante que se pense numa utilização em massa a fim de se dar um destino a todo este material (CANTO apud CARBONIERI, 1999).

O polietileno tereftalato é o mais importante membro pertencente à família dos poliésteres, grupo de polímeros descoberto na década de 30 por W.H. Carothers, da Du Pont e que há mais de 40 anos vem sendo utilizado em vários setores de atividades, desde fibras têxteis a recipientes para bebidas carbonatadas, passando por filmes para fotografia e embalagens e componentes de automóveis.

Em geral, o polietileno tereftalato é conhecido como poliéster, e no segmento de embalagens, como PET.

Foi somente no final da década de 60 que o PET começou a ser desenvolvido para aplicações em embalagens. Suas características de leveza, transparência, brilho, boas propriedades mecânicas e de barreira do dióxido de carbono fazem dele um material adequado para a fabricação de garrafas de bebidas carbonatadas como os refrigerantes.

No Brasil, o PET chegou somente no final da década de 80, seguindo uma trajetória semelhante à do resto do mundo. Teve sua primeira aplicação na indústria têxtil e somente em 1993 passou a ser fortemente utilizada no mercado de embalagens para refrigerantes.

O Quadro 3 mostra a evolução do consumo de PET no Brasil.

Quadro 3 – Evolução do consumo de embalagens PET no Brasil

ANO	CONSUMO PARA EMBALAGENS (TONELADAS)
1996	150.000
1997	185.700
1998	223.600
1999	223.600
2000	244.800
2001	255.100
2002	270.000
2003	300.000

Fonte: ABEPET (2005).

O polietileno tereftalato pode ser obtido em alguns tipos diferentes, apropriados às exigências particulares de cada aplicação à qual se destina. A principal diferença entre os tipos de polietileno tereftalato reside no peso molecular ou grau de polimerização que dá origem a diferentes propriedades dos materiais

resultantes. Quanto maior o peso molecular, maior a resistência mecânica, química e térmica do polietileno tereftalato.

Os vários tipos de polietileno tereftalato podem ser classificados em dois grandes grupos principais, como citado por SONCIM (2000):

- Polietileno tereftalato de baixa VI (inferior a 0,7), usado para produção de fibras e filmes;
- Polietileno tereftalato de alta VI (acima de 0,7), utilizado para produção de chapas, embalagens sopradas (frascos, garrafas) e plásticos de engenharia.

Plásticos

Depois das idades da pedra, bronze e ferro, a sociedade industrializada começa a viver a era dos plásticos, visto que na atualidade sua presença é uma constante. A maioria dos plásticos foi desenvolvida na segunda metade do século XIX, pois foi nessa época que houve o crescimento do celulóide, um material plástico baseado em celulose modificada de material natural o qual era produzido da madeira ou da palha. Após esse período, começaram a surgir novos compostos como a resina de acetato de celulose para explorar as características deste produto.

A primeira guerra mundial estimulou o desenvolvimento de materiais como o Policloreto de Vinila (PVC) na Alemanha. No começo dos anos 30, a estrutura e síntese das substâncias chamadas de materiais poliméricos, foram adequadas pela teoria científica. Este progresso criou a base para a síntese de um grande número de novos polímeros (LIMA, 2001).

O Quadro 4 mostra os tipos de plásticos, suas descrições, utilizações assim como características e seus respectivos produtos reindustrializados.

Quadro 4 - Plásticos mais encontrados na construção civil, suas características e utilizações

Nome	Descrição	Utilização	Características	Produtos reindustrializados
PEAD	Polietileno de Alta Densidade	Injeção Sopro Extrusão	Resistente a baixas temperaturas, leve, impermeável, rígido e possui boa resistência química.	Baldes, bacias, engradados, caixas, frascos de detergentes, “bombonas”, entre outros.
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade	Extrusão de Filmes	Flexível, leve, transparente, impermeável e aderente.	Reembalagem de artigo de consumo (capa de fardo), sacaria industrial, sacos de lixo, sacolas, lonas...
PP	Polipropileno	Injeção Extrusão	Conserva o aroma de alimentos, possui boa transparência, brilho e boa resistência a variações de temperatura.	Autopeças, potes para utensílio, cabos, tubos, brinquedos, caixas de bateria, fios, cordas, etc.
PS-AI	Poliestireno de Alto Impacto	Injeção Extrusão	Impermeável, muito rígido, leve, brilhante e possui ótima fluidez.	Brinquedos, saltos e solas de calçados, puxadores para móveis, chapas, perfis, Eletrodomésticos, etc.

Fonte: LIMA (2001)

Como alguns materiais plásticos chegam às recicladoras sem condições de se determinar o tipo de resina com que são fabricados, foi criada, com a experiência de profissionais encarregados do manuseio deste material, uma forma prática de identificação dos tipos de resinas – realizada através da queima do material.

Ao se queimar o material, pode-se observar a cor e o tipo de chama, o odor e algumas características relevantes na identificação dos plásticos.

O Quadro 5 revela como fazer uso deste tipo de teste (RECICLÁVEIS 2005).

Quadro 5 – Teste de identificação dos plásticos

Resina	Teste de chama	Observação	Odor	Ponto fusão °C	Densidade
Poliétileno de baixa densidade	Chama Azul, vértice amarelo	Pinga como vela	Cheiro de vela	105	0,89 a 0,93
Poliétileno de alta densidade	Chama Azul, vértice amarelo	Pinga como vela	Cheiro de vela	130	0,94 a 0,98
Polipropileno	Amarela, crepita ao queimar, fumaça fuliginosa.	Pinga como vela	Cheiro Agressivo	165	0,85 a 0,92
ABS	Amarela, crepita ao queimar, fumaça fuliginosa.	Amolece e pinga	Monômero de estireno	230	1,04 a 1,06
SAN	Tal qual PS e ABS, porém fumaça menos fuliginosa.	Amolece e Pinga	Borracha queimada	175	1,04 a 1,06
Poliacetato	Chama azul sem fumaça com centelha	Amolece e borbulha	Monômero de estireno	130	1,08
Acetato de celulose	Amarela, centelhas queimando	Cuidado ao cheirar	Formaldeído	175	1,42 a 1,43
Acetato de butirato de celulose	Chama azul faiscando	-	Ácido acético	230	1,25 a 1,35
PET	Amarela, fumaça	-	Manteiga rançosa	180	1,15 a 1,25
Acetato de vinila	Amarela esverdeada	-	-	255	1,38 a 1,41
PVC rígido	Amarela, vértice verde	Chama auto extingüível	-	127	1,34 a 1,37
PVC flexível	Chama amarela, vértice verde.	Chama auto extingüível	Cheiro de cloro	150	1,19 a 1,35
Policarbonato	Decompõe-se, fumaça fuliginosa com brilho.	Chama auto extingüível	Cheiro de cloro	150	1,19 a 1,35
Poliuretanos	Bastante fumaça	-	Acre	230	1,20 a 1,22
PTFE	Deforma-se	Chama auto extingüível	-	205	2,14
Nylon - 6	Chama azul, vértice amarelo, centelhas, difíceis de queimar.	Formam bolas na ponta	-	215	1,12 a 1,16
Nylon-66	Chama azul, vértice amarelo,	Formam bolas na ponta	Pena e cabelo queimado	260	1,12 a 1,16
Nylon - 11	Chama azul, vértice amarelo, centelhas, difíceis de queimar.	Formam bolas na ponta	Pena e cabelo queimado	180	1,04
Poli (metacrilato de metila)	Queima lentamente, chama amarela em cima, azul em baixo. Amolece e quase não apresenta carbonização	Não pinga	Cheiro de alho ou resina de dentista	160	1,16 a 1,20

Fonte: Recicláveis (2005)

Utilização das Garrafas PET Recicladas

O processo de reciclagem, além da diminuição do impacto ambiental, questão fundamental para um crescimento auto sustentável, possui uma função social de grande importância, o que proporciona a retirada de trabalhadores dos grandes lixões, direcionando-os para o trabalho em cooperativas organizadas (KLEUBER et al, 2004).

A evolução do mercado e os avanços tecnológicos têm impulsionado novas aplicações para a PET reciclada. Confeção de cordas, fios de costura, carpetes, bandejas de frutas, transparências, além de novas garrafas, são algumas das reutilizações oferecidas por este material.

A reciclagem das garrafas PET, além de utilizar lixo plástico de aterros, necessita apenas de 30% da energia necessária para a produção da resina virgem e têm a vantagem de poder ser reciclado várias vezes sem prejudicar a qualidade final do produto. Uma outra forma de reaproveitar as garrafas PET é no modo de fibras/tiras (Figura 2.7) para a confecção de bolsas e utensílios domésticos, sendo necessário um aparelho para o desenvolvimento do processo. Uma outra utilização das garrafas é na forma de grãos, mais conhecida como areia de PET a qual é obtida em usinas de reciclagem (SONCIM et al, 2000).



Figura 2.7 – Fibras de PET

Fonte: CARBONERI et al (1999).

- Fibras de sisal

A cultura do sisal está presente no Brasil desde a década de 40, quando foi trazida da região de Yucatan – México, para ser cultivado nos Estados da Bahia, Paraíba e Rio Grande do Norte, já que estas são regiões de clima propício para seu desenvolvimento.

O Brasil é o maior produtor e exportador das fibras de sisal do mundo, seguido por Quênia e Tanzânia. Praticamente 70% do sisal beneficiado brasileiro é exportado para o mercado europeu e asiático. Com relação ao manufaturado, tem como principais destinos os Estados Unidos e o Canadá. Devido a essa grande oferta de fibras naturais, no Brasil, pode-se dizer que o sisal e a fibra de coco são as que apresentam maiores potenciais de utilização tanto na obtenção direta destas matérias primas quanto no aproveitamento de resíduos gerados durante o processamento industrial.

Sob o ponto de vista anatômico as fibras de sisal estão inseridas na categoria de “estruturais”, já que conseguem dar sustentação e rigidez à planta sisal.

No que diz respeito à constituição das fibras de sisal, BERALDO e VIEIRA (2003) em sua pesquisa apresentam a composição química dessas fibras a fim de que se possa fazer uma avaliação adequada do comportamento do material quando misturado com outros. Assim sendo, o sisal é quimicamente composto por: 65,8% de celulose, 12,0% de hemicelulose, 0,8% de pectina, 9,9% de lignina, 1,2% de substâncias solúveis em água e 0,3% de substâncias graxas e ceras.

De acordo com alguns autores, as propriedades mecânicas e físicas do sisal podem apresentar grande variabilidade (Quadro 6).

Quadro 6 – Propriedades mecânicas e físicas do sisal

Referência	Módulo elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Densidade (Kg/m ³)
Chand et al (1988)	9,4 – 22	530 – 640	3 – 7	1450
Beaudoin (1990)	13 – 26	1000 – 2000	3 – 5	-
Toledo Filho 1997)	10,94 – 26,70	227,8 - 230	2,08 – 4,18	750 - 1070

Fonte: SILVA (2004)

O Estado da Bahia é o principal produtor de sisal do país e sua contribuição para o desenvolvimento é cerca de 90% da produção brasileira. A Figura 2.8 mostra uma plantação de sisal no estado da Bahia.



Figura 2.8 - cultivo do sisal na Bahia.

Fonte: Embrapa (2005).

O sisal teve seu apogeu econômico durante a crise do petróleo nas décadas de 60 e 70. Sua utilização declinou devido ao aparecimento das fibras sintéticas. Contudo, devido à grande preocupação atual com a preservação da natureza, a produção do sisal está voltando a crescer no mercado, com algumas aplicações em determinadas áreas.

As fibras de sisal possuem várias aplicações como, por exemplo, revestimento das paredes traseiras e laterais de ônibus e caminhões, reforço de matrizes, fibras para tapeçaria e cordas, assim como mantas para isolamentos térmicos de coberturas.

Um ponto considerado fundamental na utilização das fibras de sisal é que como sua função principal é servir de reforço mecânico, seu volume deve ser bem menor que o volume da matriz (JOHN, 1999).

A colheita do sisal pode ser feita durante todo o ano. Seu ciclo de transformação em fios inicia-se quando a planta atinge seus três anos de vida, ou então quando suas folhas se desenvolvem rapidamente atingindo cerca de 1,40 m de comprimento, resultando em fibras de aproximadamente 0,9 a 1,2 m, as quais representam apenas 4 a 5% da massa bruta da folha do sisal.

- Raspas de Pneu

A borracha natural é um polímero obtido da seiva da seringueira, árvore de origem amazônica. Esse material ganhou o mundo, principalmente pela rápida adaptação que sofreu quando, na virada do século, foi plantada com sucesso nas florestas tropicais asiáticas. Sua extração é realizada fazendo-se pequenos cortes superficiais no caule da árvore, através dos quais o látex é captado. Depois de sua coagulação e secagem, este material é aquecido e posteriormente processado com outras substâncias químicas, transformando-se em borracha (KAMIMURA, 2002).

Com o passar do tempo, criou-se na Alemanha a tecnologia de fabricação da borracha de forma artificial a partir do petróleo. Apesar da borracha sintética ser muito parecida com a borracha natural, ela não é tão resistente ao calor e racha com uma mudança de temperatura muito rápida. Por isso, os artefatos são sempre constituídos de uma parcela da borracha natural (KAMIMURA, 2002).

No Brasil, a maior parte da borracha produzida industrialmente é usada na fabricação de pneus, correspondendo a 70% da produção. Além disso, ela pode ser empregada em calçados, instrumentos cirúrgicos (como tubos, seringas, além de preservativos e luvas cirúrgicas).

O Brasil gera um mercado de aproximadamente 60 milhões de pneus por ano, sendo que cerca de 27 milhões são resultantes da produção nacional e 33 milhões são reaproveitados, ou seja, são usados importados que passaram pelo processo de recauchutagem. De acordo com CEMPRE (2005) o Brasil está classificado em 2º lugar no ranking mundial de recauchutagem de pneus.

A estimativa atual é que, desse total, pelo menos 50% estão sendo descartados, sendo que quase sempre dispostos em locais inadequados, e que, das 300 mil toneladas de sucata disponíveis no Brasil, para obtenção de borracha regenerada, apenas 10% são recicladas (SANTOS et al, 2004).

De todos os resíduos que causam problemas ao meio ambiente, o pneu se destaca devido ao seu tempo de decomposição, não inferior a 150 anos. Isso gera muita preocupação pois grandes quantidades de borrachas utilizadas na confecção de pneus para aviões, caminhões, carros, etc., são descartadas quando se tornam inservíveis, ou seja, quando não têm mais condições de serem reformados (KAMIMURA, 2002).

Segundo estimativa da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), no Brasil são depositados cerca de 100 milhões de pneus velhos, em aterros, terrenos baldios, rios e lagos. Além disso, dezenas de milhões de pneus novos são fabricados a cada ano no País. A principal matéria-prima, a borracha vulcanizada, mais resistente que a natural, não se degrada facilmente e, além disso, quando queimada a céu aberto, contamina o meio ambiente com substâncias carboníferas, sulfurosas e outros poluentes (SANTOS et al, 2004).

O depósito clandestino desses pneus não representa apenas um problema ambiental, mas também de saúde pública, pois o acúmulo de água das chuvas favorece ambientes propícios à disseminação de doenças como a dengue e a febre amarela (SANTOS, et al 2004).

Para combater os problemas supracitados, a reciclagem é uma das propostas que mais ganha estímulo. No entanto, reciclar pneus chamados inservíveis ainda é um desafio. Como possibilidade de reaproveitamento, o pó e as raspas de pneus velhos gerados na recauchutagem têm sido introduzidos como adições no concreto, visando à melhoria de certas propriedades como: tenacidade e resistência ao impacto, isolamento térmico e acústico.

Segundo SEGRE apud SANTOS et al (2004), cerca de duzentas mil toneladas de resíduo sólido já são recicladas. Hoje já existem muitos materiais, antes poluentes, como sílica ativa, escória de alto-forno, cinza volante e pozolanas de argila calcinada, que possuem uma aplicação como adições em argamassa e concreto. Outros também vêm sendo testados como carpetes, resinas de polietileno tereftalato (PET), resíduos de serragem de mármore e granito, cinza de bagaço de cana de açúcar, cinza de casca de arroz e o pneu. Também já foram feitos muitos estudos preliminares das principais características do concreto com adições de borracha (KAMIMURA, 2002).

Nas Figuras 2.9 e 2.10 são mostradas as formas de utilização do pneu, em pedaços ou em raspas, como são adquiridas para o processo de recauchutagem de pneus.



Figura 2.9 – Raspas de pneu



Figura 2.10 - pedaços de pneu

A estrutura básica do pneu de automóvel é formada por quatro partes de diferentes materiais as quais se integram e permitem o seu funcionamento (Figura 2.11): a *carcaça* que é a estrutura esquelética do pneu e constitui uma lona de poliéster, náilon ou aço, disposta diagonalmente ou radialmente; os *flancos* que são elementos de borracha de alta flexibilidade, dispostos lateralmente que visam proteger a carcaça; o *talão* que é um anel composto por um agrupamento de arames de aço dispostos de forma paralela, visando o acoplamento do pneumático ao aro e a banda de rodagem que é a parte do pneu que entra em contato com a pista de rolamento e é composto por borracha vulcanizada.

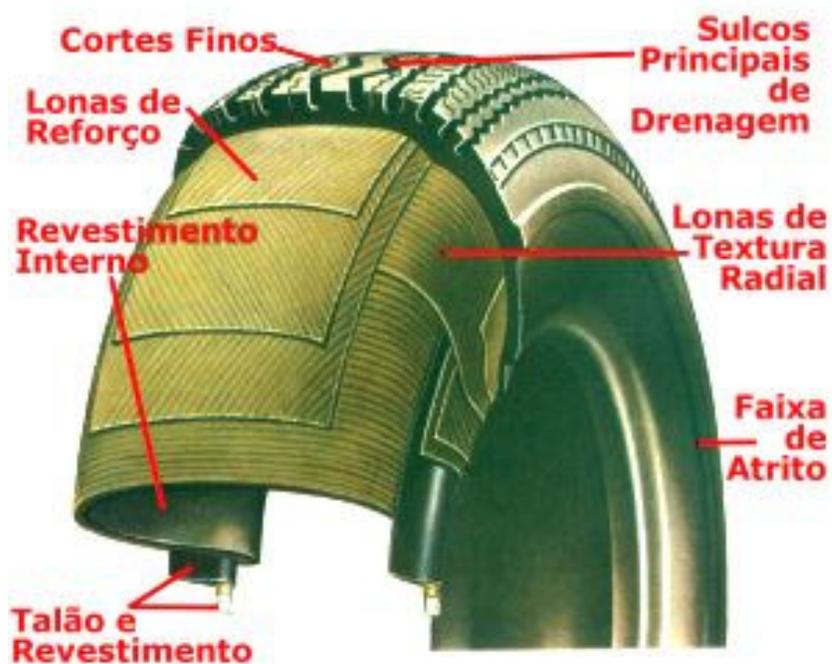


Figura 2.11– Estrutura de um pneu

Fonte: Envenenado (2006)

2.3.3. Estudos Experimentais Realizados com Reforço de Solos com a Adição de Fibras

O Quadro 7 traz alguns estudos realizados por pesquisadores na busca do desenvolvimento de técnicas a fim de melhorar propriedades de resistência, compressibilidade e permeabilidade do solo com a adição de fibras.

Quadro 7 – Estudos realizados

Pesquisador	Estudo realizado
VAHAN AGOPYAN (1991)	Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais.
THOMÉ (1994)	Estudo do comportamento de um solo mole tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais.
ULBRICH (1997)	Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras
SALES (1998)	Estudo do comportamento de fundações superficiais assente em solos tratados
CARBONIERI (1999)	Reciclagem de garrafas PET: utilização em forma de fibra para reforço de solo
TEODORO (1999)	Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas
ROLIM (1999)	Caracterização físico-mecânica de misturas de solo, cal e resíduo (“água-de-cola”).
FAZIO (2000)	Utilização do pó de borracha de pneu reciclado em misturas betuminosas para pavimentação urbana rodoviária
FEUERHARMEL (2000)	Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno
SPECHT (2000)	Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação.
CASAGRANDE (2001)	Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais.
KAMIMURA (2002)	Potencial de utilização dos resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil.
CASAGRANDE (2002)	Comportamento em campo e laboratório de um solo reforçado com fibras
MONTARDO e CONSOLI (2002)	Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra; estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes
VENDRUSCOLO (2003)	Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais.
BUENO (2003)	Uso de fibras plásticas para reforço de solos compactados
VENDRUSCOLO (2003)	Comportamento de ensaios de placa em camadas de solo melhorada com cimento e fibras de polipropileno
LOVATO (2004)	Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação.
DIAS (2004)	Estudo de misturas de areia asfalto e cinza-cal para emprego em pavimentação urbana.
PRIETTO (2004)	Resistência e dilatação de solos cimentados: uma abordagem teórico - experimental.
CASAGRANDE (2005)	Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações
TRINDADE (2005)	Latossolo vermelho-amarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória

2.3.3.1 Mudanças no Comportamento dos Solos com a Inclusão de Fibras

FEUERHARMEL (2000) apresenta em seus estudos as alterações ocorridas nos solos quando sujeitos à inclusão de fibras (Quadro 8).

Quadro 8 - Mudanças no comportamento dos solos com a inclusão de fibras.

Estudo	Resultados
Compactação	
AL WAHAB & AL QURNA (1995) Avaliaram os efeitos da adição de fibras nas quantidades de 0,5; 1 e 2 % em peso de solo seco nas curvas de compactação de uma argila.	- Decréscimo da densidade (4%); - Pequeno acréscimo na umidade ótima (11%) para uma adição de 2% de fibra.
BUENO et al (1996) - Avaliaram solos arenosos e argilosos	- Para os arenosos verificaram pequeno acréscimo na umidade ótima (11%) para uma adição de 2% de fibra. Não houve mudanças na densidade máxima. - Para os argilosos Não observou alteração na umidade ótima e nem na densidade máxima
MAHER & HO (1994), NATARAJ et al (1996), ULBRICH (1997) e CONSOLI et al (1999)	Não encontraram nenhuma alteração significativa tanto para a umidade quanto para a densidade.
Resistência de pico para materiais argilosos	
MAHER & HO (1994) Realizaram uma série de ensaios de compressão não-confinada e diametral	- Aumento do pico da resistência à compressão e à tração. - Aumento da ductilidade do material
AL-WARAB & AL-QURNA (1995) e TEODORO (1999) Analisaram o comportamento de um solo argiloso siltoso	Encontraram um comprimento ótimo das fibras em termos de resistência
NATARAJ et al (1996) avaliaram Ensaio de cisalhamento direto	Aumento do ângulo de atrito.
LIMA et al (1996) Analisaram um silte argiloso estabilizado com cal	Com a adição de fibras houve um aumento da relação entre resistência à tração e à compressão, assim como do ângulo de atrito através de ensaios triaxiais e da coesão para uma matriz com teor de 4% de cal e uma redução para uma matriz com 8% de cal.
Resistência de pico para materiais granulares	
MONTARDO (1999) Estudou o aumento do ângulo de atrito de uma areia uniforme cimentada e não cimentada reforçada com alguns tipos de fibras.	Com relação à coesão, encontrou acréscimo somente nas areias cimentadas reforçadas com fibras de polipropileno.
TEODORO (1999) Analisou o comportamento de uma areia siltosa enquanto aumentava o comprimento das fibras de polipropileno	Houve um aumento da resistência com o aumento das fibras de polipropileno 0 para 30 mm.
CONSOLI et al (1999) Analisaram através de ensaios triaxiais o acréscimo em termos de resistência provocado pela inclusão das fibras em relação à quantidade de cimento adicionado ao solo	Observaram que quanto maior a quantidade de cimento, menor é o acréscimo de resistência.
Modo de ruptura	
SHEWBRIDGE & SITAR (1989) Analisaram o comportamento de solos argilosos quando reforçados com fibras	Observaram uma interação entre o comprimento da fibra e a espessura da zona de cisalhamento
NATARAJ et al (1996) analisaram o comportamento de solos argilosos quando reforçados com fibras	Houve uma mudança na forma de ruptura. Passou de frágil para dúctil.

Fonte: Feuerharmel (2000).

2.3.4 Melhoramento de Solos com Aditivos

Os aditivos são substâncias que adicionadas ao solo possuem a finalidade de reforçar ou melhorar determinadas características como aumento de compacidade, redução de higroscopicidade, aumento de durabilidade assim como acréscimo de resistência (TECPAR, 2006).

De acordo com BRAZETTI (1998) a maioria dos problemas relativos ao uso do solo estão relacionados às interações entre suas partículas e a água. Para o autor, no que diz respeito a questões relacionadas à engenharia, a ocorrência do aumento do teor de água acarreta uma série de conseqüências consideradas desfavoráveis, podendo-se citar a redução da coesão, um inchamento e expansão do solo, assim como o fato de que os efeitos alternados de expansão e contração acabam por destruir a estrutura do solo e conseqüentemente afetando completamente a resistência do solo.

Historicamente pode-se considerar que os aditivos foram utilizados pela primeira vez pelos romanos quando empregavam em suas obras determinadas substâncias que nos dias atuais poderiam ser chamadas de aditivos, como a albumina (formada por sangue e clara de ovos) e o álcalis (cal).

A principal aplicação dos aditivos desde o início diz respeito à pavimentação, quando foram utilizados na construção de estradas vicinais, visando o aumento da resistência e a redução do desgaste e a formação de pó das camadas de subleito e revestimento primário (TRINDADE, 2005).

Essa aplicação não é recente, sendo que muitos aditivos foram patenteados para essa função. A principal utilização, desde o início do século tem sido para evitar a formação de lama e poeira em estradas de terra. Hoje em dia sua aplicação também tem sido feita para reforçar solos pouco resistentes. (BRAZETTI, 1998).

A utilização com a finalidade de estabilização de solos de pavimentação, visando problemas de deslocamento em áreas intransitáveis, foi desenvolvida inicialmente pelos americanos, durante a Segunda Guerra Mundial, na busca de um local para o desembarque de material bélico, para serem utilizados na construção de aeroportos assim como para o desenvolvimento das cidades. A utilização do cimento

e da cal foram descartados nessa época devido à necessidade de transportes a grandes distâncias além de tempo de cura demasiado longo, o que inviabilizava o processo. Dessa forma a utilização de outros tipos de aditivos poderia trazer benefícios ainda maiores. Segundo BRAZETTI (1998), antigamente os aditivos tinham como desvantagens a dificuldade em se realizar a mistura com o compósito, a sensibilidade ao tipo de solo além do alto custo.

Segundo RAUCH et al (2003) os aditivos são introduzidos no mercado por um número de companhias cujo objetivo é a estabilização de solos da base e do subleito do pavimento. Quando são considerados eficazes, estes produtos podem ser usados como alternativas no tratamento de solos ricos em sulfatos, que são susceptíveis quando tratados com estabilizadores tradicionais, baseados em cálcio tais como a cal e cimento. Porém, a maior dificuldade encontrada diz respeito ao fato de que a composição química, os mecanismos da reação, e o desempenho desses produtos líquidos ainda não são bem compreendidos.

2.3.4.1 Aditivos Existentes no Mercado

De acordo com BRAZETTI (1998) os aditivos podem se subdividir em naturais, artificiais, patenteados, ligninas, derivados e outros tipos.

Os aditivos classificados como naturais são aqueles provenientes de melaços, rosina, tall oil, vinsol e lignina.

A lignina da madeira é definida como um polímero tridimensional complexo, de elevado peso molecular, amorfo, que trabalha como material incrustante em torno das microfibrilas, conferindo rigidez às paredes celulares dos elementos anatômicos, tornando-as resistentes a solicitações mecânicas.

Consideradas constituintes secundários, diversas substâncias podem ser extraídas da madeira por intermédio da água, de solventes orgânicos ou por volatilização. São os extrativos, que abrangem taninos, óleos, gomas, resinas, corantes, sais de ácidos orgânicos, compostos aromáticos, depositados preponderantemente no cerne, conferindo-lhe coloração mais acentuada e maior densidade.

O Quadro 9 relaciona uma série de aditivos, seus produtores e a origem de cada um.

Quadro 9 – Relação de aditivos, seus respectivos produtores, origem e composição básica.

Aditivo	Produtor	Composição	Origem
EMC ²	SSPco	Bioenzima	EUA
Terrazyme®	Natureplus- INC	Enzima natural	EUA
Permazyme®	International Enzymes INC	Bioenzima	EUA
DS-328®	Dynasolo	Composto metálo orgânico	Brasil
Dynacal®	Dynacal	Composto metálo orgânico	Brasil
Ecolopavi®	Ilesa Amazônia	Sal orgânico	Brasil
Moldenzol 43®	Gienex	Composto metálo orgânico	Brasil
Rheocem 30®	Rogertec	Sílica e quartzo	Brasil
VIXIL® I	Melbar	Lignina da madeira	Brasil
RBI Grade 81®	Anyway Solid Environmental Solutions LTD	Composto metálo orgânico	Israel e Canada
Enzymatic®	Enzymatic	Bioenzima	Austrália
Conaid®	Conaid Plus	Ácido sulfônico aromático	África do Sul
Terrafix®	A. B. E. Industrial Products	Copolímero	Africa do Sul
Homy solo GB®	Homy química	Composto metálo orgânico	Brasil
Bio cat	Soil Stabilization productions CO	Enzima	
Clay Pack	Soil Bond International Texas	Enzima	EUA
PSCS-320	Alpha Omega Enterprises	Enzima	EUA
ABS 65	Southwest Envirotech services	Polímero	
Base Seal	Base Seal International	Polímero	EUA
Polybuilt 4178	EXXON	Polímero	EUA
Soil Seal	Soil Stabilization Product CO.	Polímero	EUA

Fonte: Brazetti (1998)

Os aditivos a serem utilizados como reforço de solos devem satisfazer algumas condições que vislumbrem a questão ambiental, embora muitos deles sejam produzidos sem essa preocupação. A bibliografia consultada recomenda que o aditivo ideal deva ter algumas características como ser hidrófobo, solúvel em água, ser resistente à oxidação e ao ataque de microorganismos, deve ser aplicável como um líquido de baixa viscosidade além de ser barato ou capaz de necessitar pequenas quantidades quando forem mais caros.

A seguir são relacionados alguns aditivos que fazem parte da presente revisão bibliográfica.

- EMC²®

O EMC²® é um catalizador biológico superconcentrado cuja formulação serve para aumentar a densidade, cimentação, resistência à umidade e estabilidade de materiais terrosos.

Segundo o fabricante, essa bioenzima promove mecanismos de adsorção, troca iônica, ligações covalentes e micro-encapsulação das partículas do solo, o que garante uma maior coesão e um intertravamento do material compactado.

No Paraná, foram feitas muitas aplicações do aditivo, podendo-se citar o estacionamento do Complexo de Ensino Superior do Brasil – Unibrasil (Figura 2.12).



Figura 2.12 – Aplicação do EMC²

As principais aplicações do EMC²® são: estradas vicinais e carreadores, ruas e estradas não pavimentadas, pátios e aterros sanitários, pistas de pouso, base e sub-base para pavimentação, fazendas, sítios e chácaras, ciclovias e pistas de Cooper, trilhas e caminhos ecológicos e urbanização de loteamentos.

- Terrazyme®

O Terrazyme® é um aditivo a base de melação de cana, superconcentrado e que possui a finalidade de melhorar a trabalhabilidade e as características do solo. Segundo o fabricante, o produto é capaz de promover o colapso dos materiais orgânicos do solo alterando suas propriedades físicas e químicas.

O Terrazyme® é composto basicamente por: extrato fermentado de melação de cana, sulfatantes não iônicos, potássio como clorido, alumínio como sulfato e cálcio como clorido.

As principais aplicações do Terrazyme® são: sub-base de melhoramento antes da pavimentação com asfalto, estradas de terra, mineração, áreas agrícolas, estradas vicinais, áreas de controle à erosão, ruas, rodovias, pátios de estacionamento, campos de aviação, conserto e vedação de buracos em estradas de terra.

As principais obras realizadas em Curitiba, de acordo com BRAZETTI (1998) foram a aplicação do Terrazyme em alguns bairros, como por exemplo:

- Bairro Alto: Rua Marcílio Dias, uma extensão de 100 m (01/07/1999);
- Sítio Cercado: Rua David Tows, uma extensão de 200 m (09/08/1999);
- Cajuru: Rua Florianópolis, uma extensão de 180 m (13/08/1999).

A Figura 2.13 fornecida pelo fabricante mostra a situação de uma estrada situada em Guaporé, com uma interseção entre trecho tratado e não tratado.



Figura 2.13 Interseção entre trecho tratado e não tratado

A Figura 2.14 mostra um trecho da Rua David Tows sem aplicação do aditivo e com a aplicação.

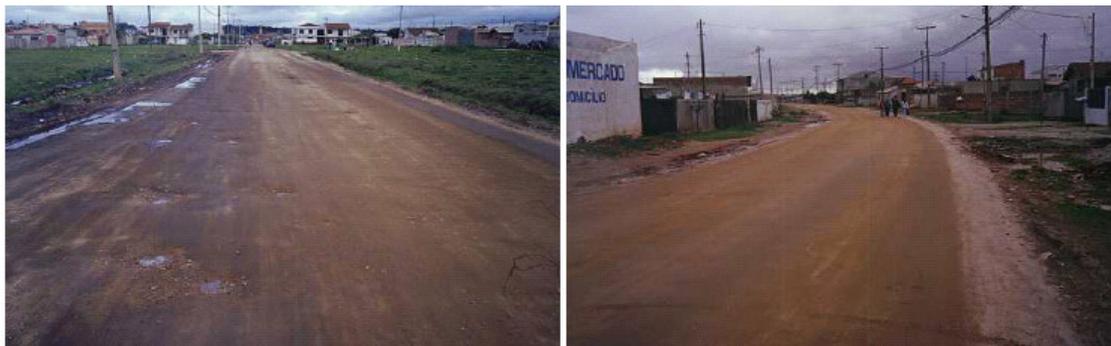


Figura 2.14 - Rua David Tows (Curitiba) sem tratamento e com tratamento de Terrazyme.

- Ecolopavi®

O Ecolopavi é um sal químico de origem orgânica, líquido, totalmente solúvel em água, que atua como um catalisador, promovendo e facilitando a troca iônica, permitindo maior coesão, melhor ligação entre as partículas finas dos solos, impermeabilizando-as.

Os solos estabilizados com o produto adquirem trabalhabilidade, tornando-se compactáveis, têm redução na absorção de água, na ascensão capilar, no poder de sucção e na expansibilidade, além disso, ganham um aumento de suporte no

ensaio CBR. Com relação ao meio ambiente, a utilização deste estabilizante químico promove uma redução na exploração das jazidas de solos granulares, segundo o fabricante.

O campo de aplicação do Ecolopavi é dado por reforço de solos, reforço de pavimentos, impermeabilização dos fundos de lagoas de estabilização de esgoto doméstico e das estações de tratamento de lixo.

As principais obras realizadas são o entorno do Hotel Meridien em Luanda na África (Figura 2.15) e uma lagoa de estabilização em Florianópolis.



Figura 2.15 – Rua estabilizada com Ecolopavi

- Dynacal®

O Dynacal®, segundo as especificações fornecidas pelo fabricante, é um composto orgânico – metálico alcalino derivado de um hidrocarboneto saturado. Sua função é impermeabilizar o solo, tornando-o mais estável e conferindo-lhe capacidade de suporte ao tráfego permanente. Como atua sobre as partículas finas do solo é capaz de aumentar sua capacidade de suporte a fim de absorver cargas de tráfego, reduzir sua expansão e sucção, assim como dispensar o uso de agregados no processo de pavimentação. A Figura 2.16 mostra uma aplicação do Dynacal® em um trecho de rodovia brasileira.



Figura 2.16 – Trecho tratado com Dynacal

- Lignosulfonato VIXIL I®

O lignosulfonato é um complexo polímero orgânico derivado da lignina da madeira, representando cerca de 20 a 30 % do seu peso seco.

O VIXIL I® é um lignosulfonato de cálcio e magnésio que é totalmente solúvel em água, apresentando reação ácida, podendo ser facilmente neutralizado com soda cáustica, se necessário. Sua composição apresenta aproximadamente 20 a 25% de açúcares redutores, predominantemente do tipo hexoses e carboidratos ácidos.

O fabricante cita que as principais aplicações do VIXIL I® são: aglomerantes, aditivos para concreto, briquetes e pellets de carvão e minérios, cerâmicas, defensivos agrícolas, extintores de incêndios, fabricação de baterias, negro – de - fumo, produtos de limpeza industrial, ração animal, refratários, tintas para fundição, além do reforço de solos.

- Moldenzol 43®

Segundo o fornecedor, o Moldenzol 43® é um composto à base de resinas e óleos vegetais que pode ser aplicado sempre que se tratar de um solo que não é capaz de resistir à ação das rodas de veículos sem esboroar (desmanchar). Afirma também que os solos tratados com o produto devem ser submetidos a ensaios de laboratório para uma possível verificação de sua utilização ou não em camadas de pavimentos.

As principais aplicações relacionadas ao Moldenzol 43® são: melhoramento de solos, camadas de pavimentos, revestimentos de bacias de decantação, tratamento de efluentes e execução de aterros sanitários.

Uma das principais obras realizadas foi o aeroporto Internacional Eduardo Gomes em Manaus (AM).

- Enzymatic®

O Enzymatic® é um biocatalizador de solos, fabricado na Austrália foi desenvolvido para melhorar as propriedades de cimentação, impermeabilização, e estabilização de solos.

Segundo o fabricante, o produto possui algumas características como:

- quando utilizado como pavimento primário, não altera a aparência do solo;
- pode ser utilizado como base ou sub-base para asfaltamento;
- facilidade de aplicação;
- produto ambientalmente correto.

- DS-328®

O DS-328® é um aditivo químico baseado num composto metálo-orgânico desenvolvido para a estabilização de solos e utilizado na pavimentação de estradas de rodagem, acostamentos, ruas, pátios de estacionamento, aeroportos, etc. Sua ação resulta em uma coesão estável e permanente ligação entre as partículas do solo, protegendo-as da ação prejudicial da água (FERREIRA e FREIRE, 2001).

De acordo com o prospecto do fabricante, o DS-328® foi desenvolvido para a finalidade de estabilizar solos, assim como na aplicação de pavimentação de estradas de rodagem, acostamentos, pistas de pouso, estacionamentos, etc.

Segundo o fabricante, a utilização do produto proporciona algumas vantagens como redução do volume de transporte como consequência do reaproveitamento do solo local; redução do impacto ambiental causado pela exploração de jazidas e pedreiras, diminuição da absorção de água, ascensão capilar e poder de sucção do solo; elevação do CBR, redução da expansibilidade do solo, além de não necessitar de equipamentos sofisticados para a devida aplicação, não ser tóxico, corrosivo ou inflamável.

Para atingir um bom desempenho o DS-328® necessita da utilização de um reagente, o qual pode ser o sulfato de alumínio, o hidróxido de cal úmido, a cal hidratada ou então o cimento.

As principais obras realizadas com a utilização do DS-328® foram: duplicação da rodovia Raposo Tavares, praças de pedágios, Aeroporto Internacional do Galeão, estacionamentos, pátios industriais dos supermercados Wall Mart e Carrefour em São Paulo. A Figura 2.17 traz um exemplo de aplicação do aditivo na Rodovia Raposo Tavares.

- RHEOCEM 30®

O Rheocem 30® ou cimento hidráulico é um microcimento que é indicado para a realização de injeções no solo, rochas e estruturas de concreto. Devido ao tamanho de suas partículas, penetra com facilidade nos poros do solo, impermeabilizando-o.

O fabricante enuncia que o produto possui pega inicial e final muito mais rápida do que os cimentos normais e finos. Suas principais propriedades e benefícios são: altíssima fluidez, elevado grau de penetração em microfissuras e solos, longo tempo de trabalhabilidade.

- CONAID®

BRAZETTI (1998) cita o óleo sulfonado de origem sul-africana, o Conaid®, como sendo derivado de um ácido sulfônico aromático. O autor cita que o aditivo pertence a um grupo de compostos orgânicos, os sulfatantes, que associados a certos cátions metálicos promovem a estabilização de solos argilosos.

Segundo o autor, o aditivo é utilizado para a melhoria de estradas vicinais, ruas urbanas, desvios, pistas de pouso e decolagem, pisos, fundações de fábricas e outros.

Dentre os principais benefícios que o fabricante anuncia estão: o incremento de capacidade de suporte e trabalhabilidade de solos, melhoria das características de resistência de solos frágeis, mantém a estabilidade do solo sob umidade, melhora as propriedades dos solos argilosos, diminui a manutenção nas estradas de terra além de reduzir o nível de poeira.

O Conaid pode ser utilizado em praticamente todos os solos argilosos (melhorando suas características físicas e químicas) ou naqueles que possuam pelo menos 5 % de argila (facilitando a compactação).

O fabricante cita que os principais benefícios proporcionados pelo uso do aditivo são os de ordem técnica como redução do índice de plasticidade, o aumento da densidade seca máxima, redução do inchamento e do desperdício de pó e os

econômicos como utilização permanente do caminho, redução de custos de execução, materiais e manutenção.

- Homy Solo GB®

Segundo dados do fabricante o Homy solo GB ® é um composto líquido, organo-metálico, alcalino, derivado de hidrocarbonetos insaturados e solúvel em água. É de origem brasileira e tem a função de impermeabilizar e estabilizar solos para a construção de estradas, aterros sanitários e aeroportos a baixo custo. Esse aditivo atua sobre as partículas finas do solo, aumentando sua capacidade de suporte, reduzindo sua expansão e sucção, não havendo a necessidade do uso de pedras e outros agregados no processo.

O Homy solo GB® é um aditivo que ao ser diluído em água necessita da incorporação de um reagente, que pode ser o sulfato de alumínio ou a cal para produzir o efeito de impermeabilização, capaz de reduzir capilaridade, pelo simples fato de que as partículas argilosas são capazes de absorver parte desse reagente produzindo mudanças na atividade superficial.

2.3.4.2 Composição Básica dos Aditivos

A composição dos aditivos varia de acordo com a classe do aditivo. Levando em conta que praticamente todos os fabricantes não divulgam por completo a composição de seus produtos, apenas os dados de segurança os quais são fornecidos para as licitações podendo-se considerar, basicamente, que são assim formulados Melços de cana, óleo sulfonado, lignina da madeira, resinas vegetais, silicatos, aluminatos e ferroaluminatos de cálcio.

2.3.4.3 Reagentes

Para a obtenção de um melhor desempenho, de acordo com o tipo de solo, deve-se incorporar a alguns estabilizantes um reagente que pode ser o sulfato de alumínio, a cal hidratada seca ou úmida ou então o cimento Portland.

- Sulfato de alumínio

O sulfato de alumínio é um sal químico metálico, com 16% de teor de alumina, solúvel em água, que tem a função de atuar como acelerador da reação entre os componentes químicos do estabilizante e do solo, resultando em um composto metálo-orgânico insolúvel e permanente.

Sua utilização é recomendada para solos areno-argilosos ou argilo-arenosos, e deve ser aplicado na dosagem de 1 a 3% em peso, em relação aos valores da densidade aparente seca máxima do solo.

- Cimento Portland

As dosagens de cimento Portland recomendadas pelos fabricantes variam de 1 a 3% em peso, em relação aos valores da densidade aparente seca máxima do solo.

- Cal

Proveniente da fabricação do gás acetileno ou da calcinação do calcário, sua utilização é recomendada quando o solo a ser tratado for predominantemente siltoso ou muito argiloso. A dosagem a ser utilizada é de 1 a 3% em peso em relação ao solo seco.

2.3.4.4 Características Físicas de Alguns Aditivos

Os aditivos possuem características bastante distintas. Representando classes ou categorias diferenciadas, alguns são orgânicos, outros químicos. Dessa forma, se faz necessário conhecer algumas de suas propriedades a fim de se verificar a viabilidade da utilização dos mesmos. Dessa forma, no Quadro 10 são apresentadas as principais propriedades que caracterizam os aditivos analisados nessa revisão bibliográfica.

Quadro 10 – Características dos aditivos

Aditivo	Aspecto	Cor	Densidade Específica (g/cm ³) a 25°C	Solubilidade em água	pH	Toxicidade
EMC ²	Líquido	Marrom escuro	1,006 a 1,01	Infinita	8,5 ± 1	Não tóxico
Terrazyme	Líquido	Marrom escuro	1,040	Infinita	-	Não tóxico
DS-328	Líquido	Verde escuro	1,040	Total	10,5	Não tóxico
Dynacal	Líquido	Verde escuro	1,040	Infinita	-	-
Ecolopavi	Líquido	Castanho	1,060	Total	12 - 14	Não tóxico, não inflamável, não corrosivo
Moldenzol 43	Líquido	Verde escuro	1,040	Total	10,5 - 11,2	Tóxico, pode causar poluição dos solos e das águas devido à elevação do teor de alcalinidade.
Rheocem 30	Pó granular	Cinza	3,10	Total	12,5	-
Lignosulfonato VIXIL I	Pó / líquido	Amarelo	-	Total	2,8 - 4,5	Não tóxico
Homy solo	Líquido transparente	Castanho	1,059	Total	12,87	Não tóxico

Fonte: Prospectos fornecidos pelos fornecedores (2006)

CAPÍTULO 3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental da presente pesquisa contempla duas etapas de estudo em laboratório: uma análise de dois solos siltosos chamados A e B no estado puro, quando reforçado com fibras de polipropileno, sisal e raspas de pneu, e outra com um terceiro tipo de solo siltoso, aqui classificado como solo C, quando o mesmo é melhorado com nove aditivos previamente selecionados, visando através de uma comparação com o solo sem adição, investigar e identificar o efeito causado nas suas propriedades. Para as duas etapas foram realizados ensaios de caracterização, compressão simples e cisalhamento direto com os três solos siltosos no estado puro, reforçado com as fibras e raspas de pneu, assim como melhorado com aditivos químicos e orgânicos (para estes, foram executadas cavas pequenas no Sítio Experimental de Geotecnia da UFPR).

3.2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

O planejamento do presente estudo foi realizado da seguinte forma: inicialmente foram selecionados os solos a serem analisados. Após essa etapa foram pesquisados alguns tipos de fibras e aditivos que segundo a literatura poderiam proporcionar algum reforço ou melhoramento a determinado tipo de solo.

Na seqüência, buscou-se verificar na bibliografia existente, algumas dosagens, métodos de utilização e ensaios que poderiam ser realizados com os referidos materiais a fim de compor um quadro completo sobre tipo, quantidade e ensaios para dar continuidade ao estudo.

3.3 VARIÁVEIS INVESTIGADAS

As variáveis analisadas neste estudo foram classificadas como tipo de solo, aditivo, categoria das fibras quantidade/dosagem.

3.3.1 Solo

Com já citado anteriormente, para este estudo elegeu-se utilizar três tipos de solos siltsos classificados por A, B e C coletados em duas cidades do Interior do Paraná. Os dois primeiros, retirados de pontos diferentes de uma mesma jazida, em Palmas, foram utilizados para os ensaios com as fibras e raspas de pneu. O terceiro, cuja coleta foi feita em Campo Largo foi utilizado para os ensaios com os aditivos químicos e orgânicos. O critério de adoção desses solos retirados dos dois locais citados se deu pelo fato de se aproveitar um material já disponível no laboratório para a realização de uma outra pesquisa.

Foram realizados ensaios buscando conhecer suas propriedades e características para poder estabelecer alguns parâmetros fundamentais no processo de melhoramento/reforço do mesmo. Assim sendo, a determinação da curva granulométrica, da densidade real dos grãos e curva de compactação foram ensaios indispensáveis para dar prosseguimento ao programa experimental.

3.3.2 Materiais considerados no estudo

As fibras de polipropileno Polycrét MF e concrefil foram selecionadas de acordo com algumas características como uniformidade, o fato de serem quimicamente inertes assim como pela grande disponibilidade no mercado. Estas fibras foram cedidas pelas empresas FITESA em São Paulo e ORPEC em Curitiba. Com relação às de sisal, as mesmas foram adquiridas em lojas em Curitiba. As de PET foram cedidas pelo Sr. Takashi em São Paulo, o qual desenvolveu um aparelho chamado filetador de fibras PET que corta as garrafas em forma de fibras (Figura 3.1).



Figura 3.1 - Filetador de PET (Utsumi, 2005)

Já as raspas de pneu foram utilizadas visando, da mesma forma que as de PET, amenizar a disposição do material no meio ambiente. As mesmas foram adquiridas na Recauchutadora Taquarense em Curitiba.

Algumas das principais características das fibras e raspas de pneu são mostradas no Quadro 11.

Quadro 11 - Principais características das fibras e raspa de pneu

	<p>Fibra de polipropileno Concrefil</p> <p>Comprimento aproximado 20 mm, não absorve água, peso específico $9,1\text{kg/m}^3$, baixa condutividade elétrica/térmica, imputrescível.</p>
	<p>Fibra de polipropileno Polycrét MF</p> <p>Comprimento aproximado 10 mm, não absorve água, baixa condutividade elétrica/térmica, imputrescível.</p>
	<p>Fibra de PET</p> <p>Comprimento aproximado 30 mm, largura média 5 mm. São imputrescíveis, não absorvem água, não enferrujam,</p>
	<p>Fibra de sisal</p> <p>Comprimento aproximado 20 mm, massa específica $0,75 - 1,07 (\text{Kg/m}^3)$, diâmetro $0,08 - 0,30 \text{ mm}$.</p>
	<p>Raspa de pneu</p> <p>Comprimento aproximado 20 mm, largura aproximada (mm) $10 - 30$. Não absorvem água, não enferrujam, baixa condutividade elétrica/térmica.</p>

Com relação aos nove aditivos, os mesmos foram escolhidos mediante uma seleção por categoria, pela disponibilidade no mercado e pela facilidade de utilização. Alguns foram gentilmente cedidos pelos representantes, outros adquiridos mediante compra direta com o fornecedor.

3.3.3 Dosagens dos materiais utilizados

As dosagens dos materiais utilizadas para a realização dos ensaios nas duas etapas foram as seguintes de acordo com o recomendado por (FEUERHARMEL, 2000):

Na etapa 1 foram realizados ensaios com dosagens diferentes de fibras e as raspas de pneu tanto para o solo A quanto para o B.

Solo A

- Polipropileno fino Polycrret MF (algodão): 0,5%
- Polipropileno concrefil (plástico): 0,5%
- Polipropileno concrefil (plástico): 1,0%
- PET: 0,5%
- PET: 1,0%
- Sisal: 0,5%
- Pneu: 5%
- Pneu: 7,5%

Solo B

- Polipropileno fino Polycrret MF (algodão): 0,5%
- Polipropileno concrefil (plástico): 0,5%
- Polipropileno concrefil (plástico): 1,0%
- PET: 0,5%
- PET: 1,0%
- PET: 2%
- Sisal: 0,5%
- Pneu: 7,5%

Com relação aos aditivos adicionados no solo C, as dosagens utilizadas foram as seguintes:

- EMC²: 1,63% e 0,67%
- Terrazyme: 0,05% e 1,16%
- Dynacal: 0,67% e 0,5%
- Ecolopavi: 1,52% e 0,67%
- DS-328: 0,17%
- Homy solo: 0,67% e 0,17%
- Lignosulfonato VIXIL I: 2% e 4%
- Cal: 2% e 4%
- Cimento: 2% e 4%

Nesta fase do projeto foram realizados ensaios, inicialmente caracterizando o solo puro e em seguida com o mesmo na forma reforçada e aditivada. A seguir são descritos os ensaios realizados.

- Ensaio de caracterização: análise granulométrica realizada por peneiramento e sedimentação (sem o defloculante: hexa-metafosfato de sódio), teor de umidade seguindo a NBR 6457, limite de liquidez pela NBR 6459, limite de plasticidade de acordo com a NBR 7180, densidade real dos grãos utilizando os procedimentos do DNER.

- Ensaio de cisalhamento direto: coesão, ângulo de atrito interno.
- Ensaio de compressão simples
- CBR

- Análise granulométrica

Amplamente utilizado para a classificação dos solos visando determinar as porcentagens em peso de cada fração existente na massa total ensaiada.

Para se determinar a curva granulométrica de um solo, deve-se fazer uso do peneiramento para solos grossos, como pedregulhos e areias, e sedimentação, quando se tratar de um material fino como silte e argila abaixo de 0,074 mm.

- Ensaio de compactação

O ensaio de compactação foi realizado com vistas à obtenção de alguns parâmetros fundamentais à caracterização do material analisado, como o peso específico seco máximo e o teor ótimo de umidade do solo em seu estado natural, assim como, das misturas que serão realizadas posteriormente.

O ensaio com o Proctor Normal foi realizado com base na NBR 7182/86 (Norma de ensaio de compactação). O objetivo da compactação é aumentar a resistência do solo, diminuindo sua compressibilidade ou o recalque, assim como sua permeabilidade.

Como compactar equivale em aumentar artificialmente, ou seja, mecanicamente, o peso específico aparente do solo, esse processo permite a obtenção da curva de compactação e conseqüentemente do peso específico aparente seco máximo relacionado à umidade ótima do solo analisado.

- Ensaio de CBR

O ensaio de CBR ou ISC procura avaliar a resistência de uma amostra de solo imerso e não imerso, compactada segundo o método Proctor.

O ensaio de Índice Suporte Califórnia foi realizado nos dois solos. Para cada um foram retirados cinco pontos para determinar a umidade ótima para usar no ISC.

Para a caracterização de resistência do solo foram realizados os ensaios de cisalhamento direto e compressão simples.

- Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto é utilizado para a determinação da resistência ao corte de corpos de prova de solo com o formato de um prisma de seção quadrada ou circular com uma espessura pequena. Para a realização do ensaio em questão o corpo de prova pode ser de solo compactado ou então talhado de uma amostra indeformada.

Com os resultados consegue-se traçar uma curva de desenvolvimento do ensaio tirando-se o valor máximo da tensão cisalhante, e com isso determinar os valores do ângulo de atrito interno e o intercepto coesivo.

- Compressão simples

O ensaio de compressão simples tem o objetivo de verificar a deformação ocorrida a uma determinada pressão exercida em um corpo de prova. A Figura 3.2 a seguir mostra um corpo de prova sendo submetido ao ensaio de compressão simples.



Figura 3.2 – Corpo de prova submetido ao ensaio de compressão simples

CAPÍTULO 4

Reforço de solos com fibras

4.1 Ensaios realizados com o solo puro

Inicialmente foi feita uma caracterização do solo no estado puro a fim de poder obter parâmetros a serem comparados com os resultados obtidos pelo mesmo quando reforçado.

A seguir são mostrados os resultados obtidos com a realização dos ensaios com o solo puro.

- Análise granulométrica

Na Figura 4.1 estão representadas as duas curvas granulométricas obtidas com o material em estudo no ensaio de análise granulométrica por peneiramento utilizando a NBR 7181/84.

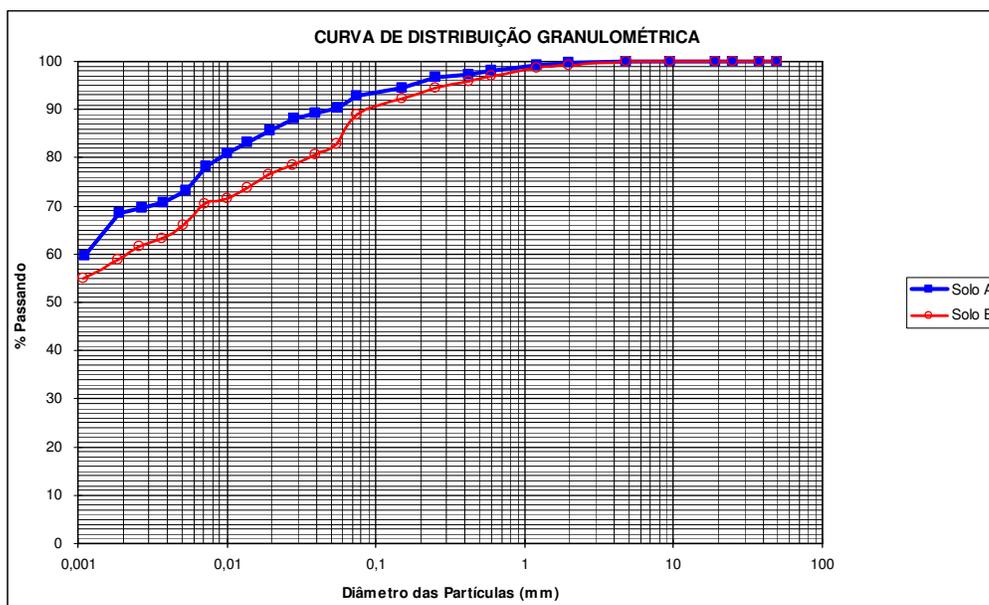


Figura 4.1 – Curva de distribuição granulométrica

Os resultados obtidos com relação às porcentagens das frações granulométricas, os limites de Atterberg e a massa específica dos solos em questão estão mostrados no Quadro 12.

QUADRO 12 – CARACTERIZAÇÃO DO SOLO PURO.

Solo	% Argila	% Silte	% Areia	δ_g (kN/m ³)
A	69	22	9	2,94
B	60	24	16	2,95

- Ensaio de compactação

A seguir são mostrados os resultados dos ensaios realizados na caracterização do solo em questão (Figura 4.2).

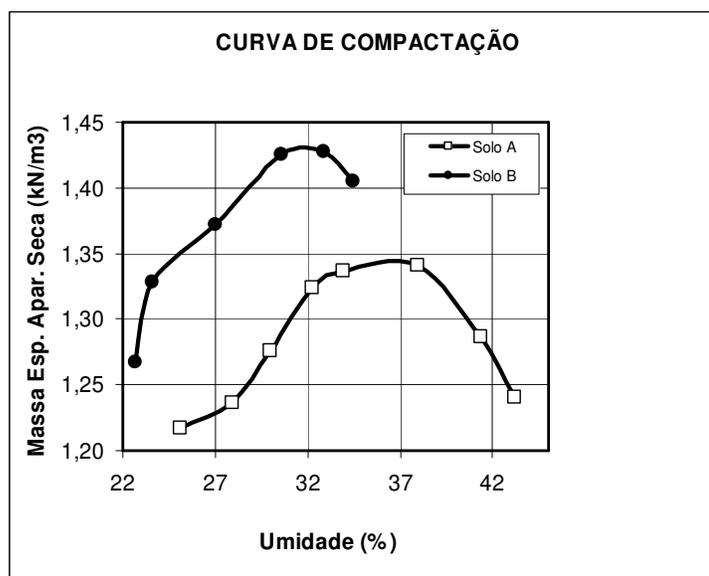


Figura 4.2 – Curva de compactação

O solo A apresenta uma umidade ótima de 36% com uma massa específica aparente seca de 1,34 g/cm³. Já o solo B apresenta umidade ótima e massa específica aparente seca respectivamente de 32% e 1,43 g/cm³.

- Ensaio de CBR

Os ensaios de Índice Suporte Califórnia foram realizados nos dois solos. Para cada um foram moldados cinco pontos determinação da umidade, massa específica aparente seca, expansão e Índice Suporte Califórnia, cujos resultados são apresentados nos Quadros 13 e 14.

Quadro 13 – Resultados do ensaio de Índice de Suporte Califórnia do solo A puro.

PONTO	Umidade (%)	Densidade aparente seca	Expansão (%)	ISC (%)
1	32,4	1,301	1,46	9,31
2	34,4	1,320	0,96	11,69
3	36,5	1,322	0,52	12,03
4	38,6	1,299	0,56	6,61
5	41,1	1,287	0,42	6,95

Quadro 14 – Resultados do ensaio de Índice de Suporte Califórnia do solo B puro.

PONTO	Umidade (%)	Densidade aparente seca (g/cm ³)	Expansão (%)	ISC (%)
1	28,8	1,440	8,33	19,07
2	30,3	1,458	4,74	25,73
3	32,4	1,460	3,31	16,09
4	34,8	1,415	2,70	4,64
5	37,4	1,302	4,09	1,88

Na Figura 4.3 são mostrados os gráficos de expansão e ISC obtidos para os solos A e B.

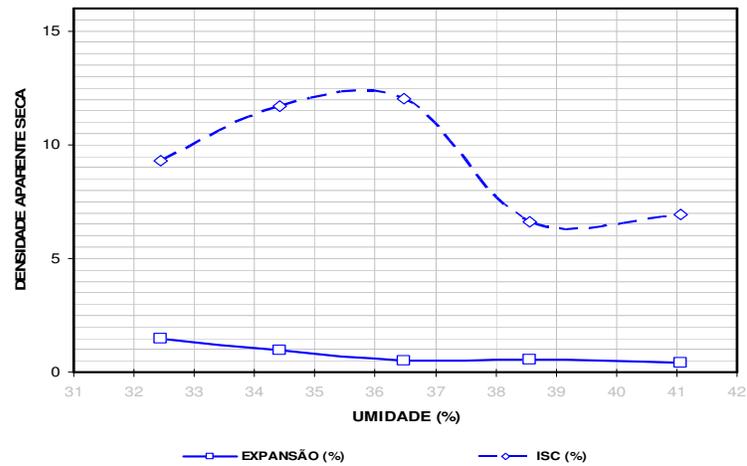


Figura 4.3 - Curvas de expansão e ISC para o solo A

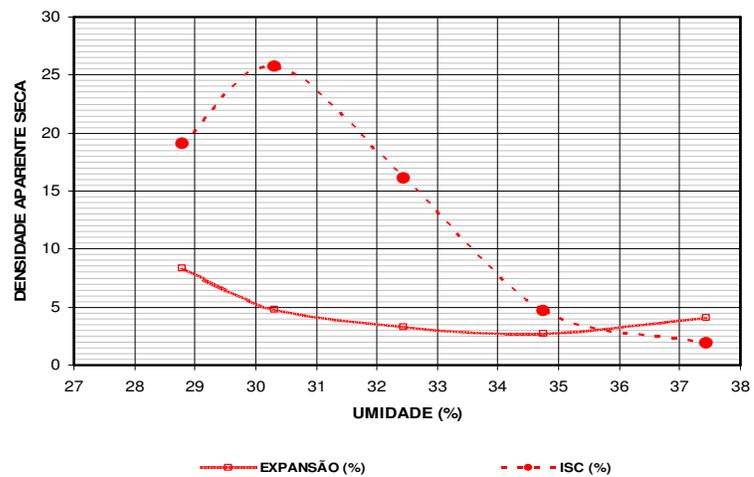


Figura 4.4 - Curvas de expansão e ISC para o solo B

Nas Figuras 4.3 e 4.4 acima os resultados indicam que o solo B apresentou melhor compactação e um Índice Suporte Califórnia maior em comparação com o tipo A.

- Ensaio de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com as tensões normais de 50, 100, 150, 200 e 300 kPa até um deslocamento de 8 mm como mostram as Figuras 4.5 e 4.6. A velocidade de cisalhamento aplicada foi de 0,056 mm/min e os corpos-de-prova foram moldados na umidade ótima. Os parâmetros de resistência foram determinados para o deslocamento de 5 mm. Os valores obtidos para o Solo A foram 23,9° de ângulo de atrito e 35,8 kPa de coesão. Para o Solo B, o ângulo de atrito encontrado foi de 27,4° e 15,1 kPa de coesão (Figura 4.7).

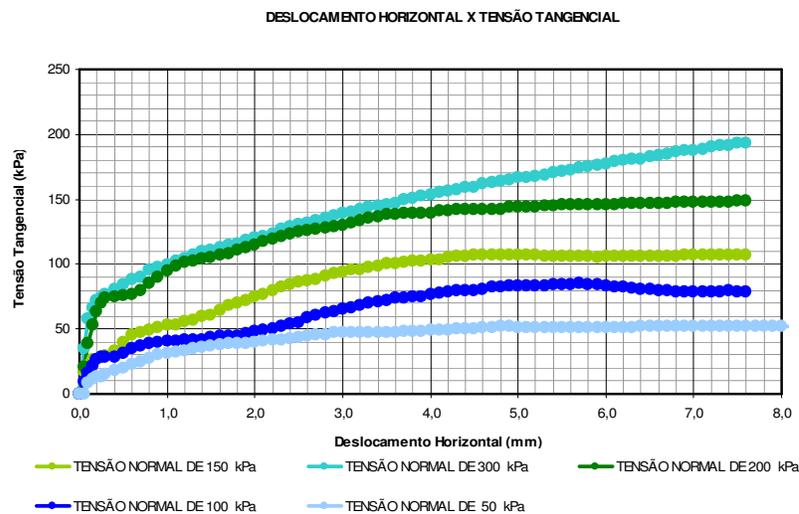


Figura 4.5 – Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal do solo A puro

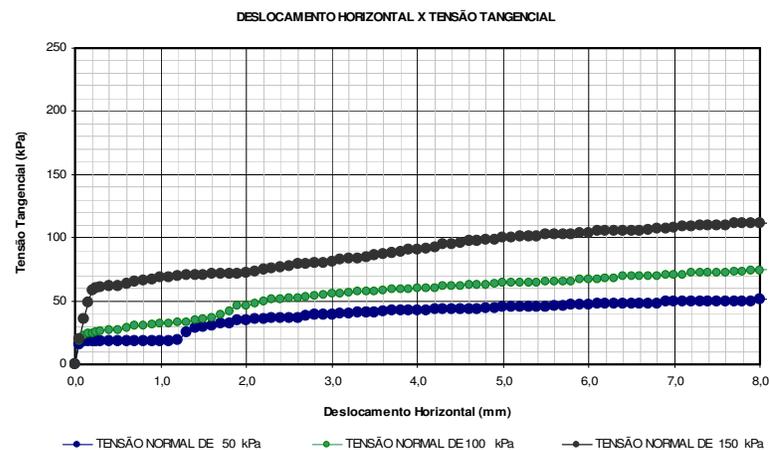


Figura 4.6 – Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal do solo B puro

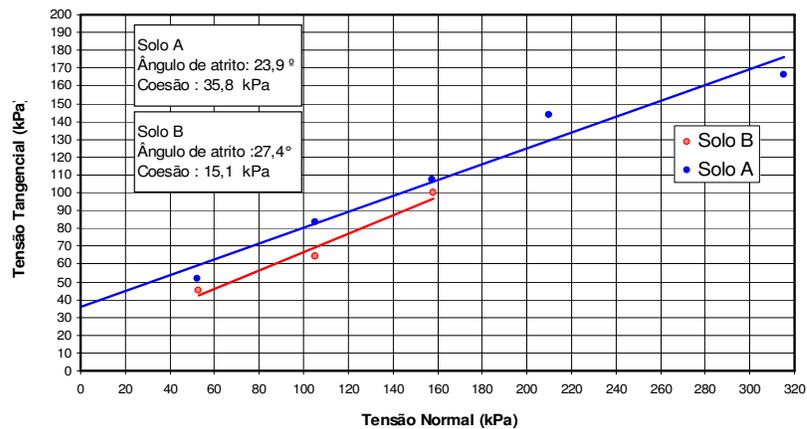


Figura 4.7 - Envoltória de resistência dos solos A e B puros

- Compressão simples

O ensaio de compressão simples foi executado em amostras de diâmetro 5 cm e altura 10 cm para o Solo B. O ensaio não foi realizado com o solo A devido à quantidade de material disponível. Foram rompidos 3 corpos de prova. As curvas pressão – deslocamento são apresentadas na Figura 4.8. No Quadro 15 são apresentadas as resistências atingidas por cada corpo-de-prova. A média de resistência atingida pelos corpos-de-prova foi de 11,52 kPa.

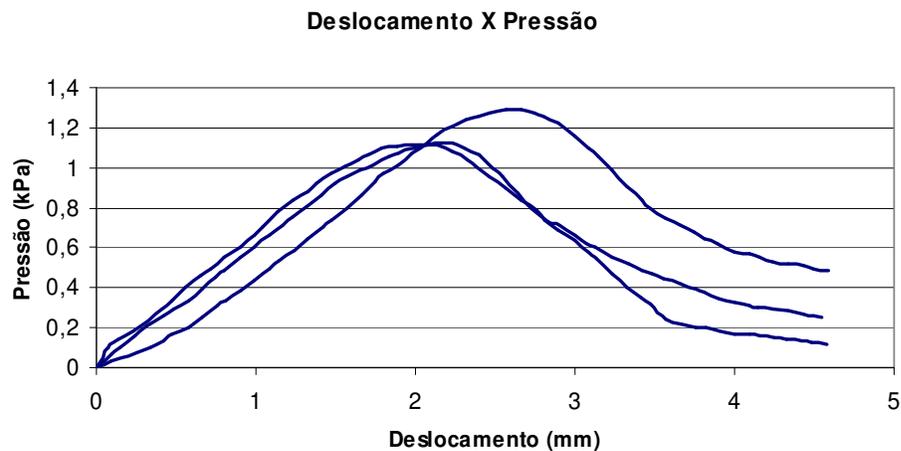


Figura 4.8 – Compressão simples do solo B sem adição

Quadro 15 – Compressão simples do solo B puro

MATERIAL	RESISTÊNCIA (KPa)	DESLOCAMENTO MAXIMO (mm)
SEM FIBRA	10,99	2,23
	12,62	2,66
	10,94	2,03
MÉDIA	11,52	2,31

4.2 Ensaio realizados com o solo reforçado

O Quadro 16 apresenta um resumo dos ensaios realizados com o solo misturado às fibras de polipropileno, sisal, PET e raspas de pneu.

Quadro 16 – Ensaio de laboratório

Reforço	%	ETAPA 1 - Ensaio de Laboratório com Fibras e Raspas de Pneu				
		Compressão Simples	Cisalhamento (kPa)			Massa Específica
			50	100	200	
Polipropileno Polycrét MF (algodão)	0,5	X	X	X	X	X
Polipropileno Concrefil (plástico)	0,5	X	X	X	X	X
	1,0	X	X	X	X	X
PET	0,5	X	X	X	X	X
	1,0	X	X	X	X	X
	2,0	X	X	X	X	X
Sisal	0,5	X	X	X	X	X
Raspas de pneu	5,0	X	X	X	X	X
	7,5	X	X	X	X	X

Para a determinação dos parâmetros de resistência do solo com as adições, da mesma forma como feito com o solo puro, foram realizados ensaios de cisalhamento direto, compressão simples e determinado o Índice de Suporte Califórnia e compactação/expansão.

A quantidade de fibras adicionada às misturas foi determinada em relação à massa de solo seco. Os componentes foram adicionados em um recipiente (Figura 4.9) na seguinte seqüência: solo, fibras, água.



Figura 4.9 - Recipiente para realização das misturas

As amostras utilizadas nos ensaios de cisalhamento direto e compressão simples foram moldadas a partir de corpos-de-prova compactados na umidade ótima.

O Quadro 17 traz um resumo de todos os ensaios realizados com cada tipo de solo e fibra analisado neste estudo.

Quadro 17 - Resumo das dosagens realizadas nos solos A e B.

Fibra / Solo	Solo A: ensaios	Solo B: ensaios
Sisal	0,5% - Compactação - Cisalhamento direto - CBR	0,5% - Compressão simples
PET	0,5% - Compactação - Cisalhamento direto - CBR	0,5% - Compressão simples
	1% - Compactação - Cisalhamento direto - CBR	1% - Compressão simples
	-	2% - Compressão simples - Compactação
Polipropileno Polycrret MF (algodão)	0,5% - Compactação - Cisalhamento direto - CBR	0,5% - Cisalhamento direto - Compressão simples
Polipropileno Concrefil (plástico)	0,5% - Compactação - Cisalhamento direto - CBR	0,5% - Compressão simples
	1% - Compactação - Cisalhamento direto - CBR	1% - Compressão simples
Pneu	5% - Compactação - Cisalhamento - CBR	-
	7,5% - Cisalhamento direto	7,5% - Compactação - CBR

A seguir são apresentados os ensaios realizados com o solo reforçado com as fibras de polipropileno, PET, sisal e raspas de pneu.

- Compactação

Devido à quantidade de material disponível, o ensaio de compactação foi realizado para todas as misturas do solo A com exceção da adição de 7,5% de raspas de pneu. Para o solo B, apenas para as misturas de 2% de PET e 7,5% de raspas de pneu.

A Figura 4.10 mostra um cilindro de compactação onde foi realizado o ensaio com a fibra de polipropileno Polycrét. E a Figura 4.11 a seguir mostra as curvas obtidas no ensaio de compactação realizado com as fibras.

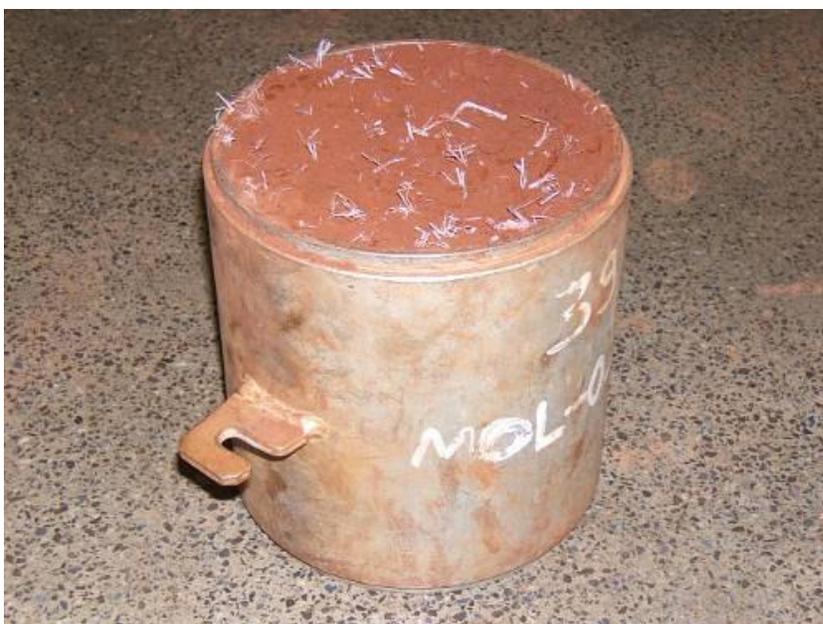
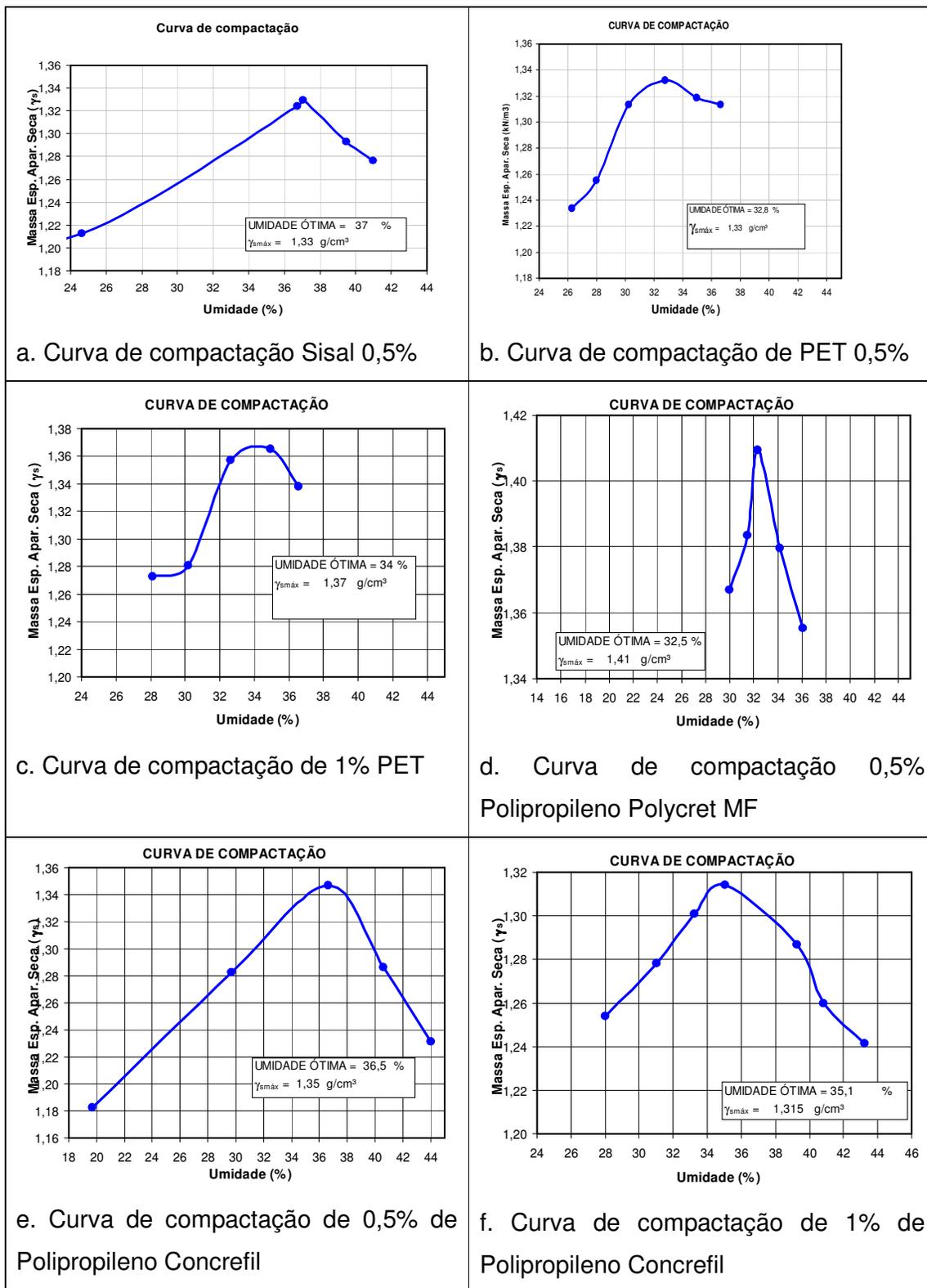


Figura 4.10 - Cilindro de compactação Proctor Normal

1) Solo A



a. Curva de compactação Sisal 0,5%

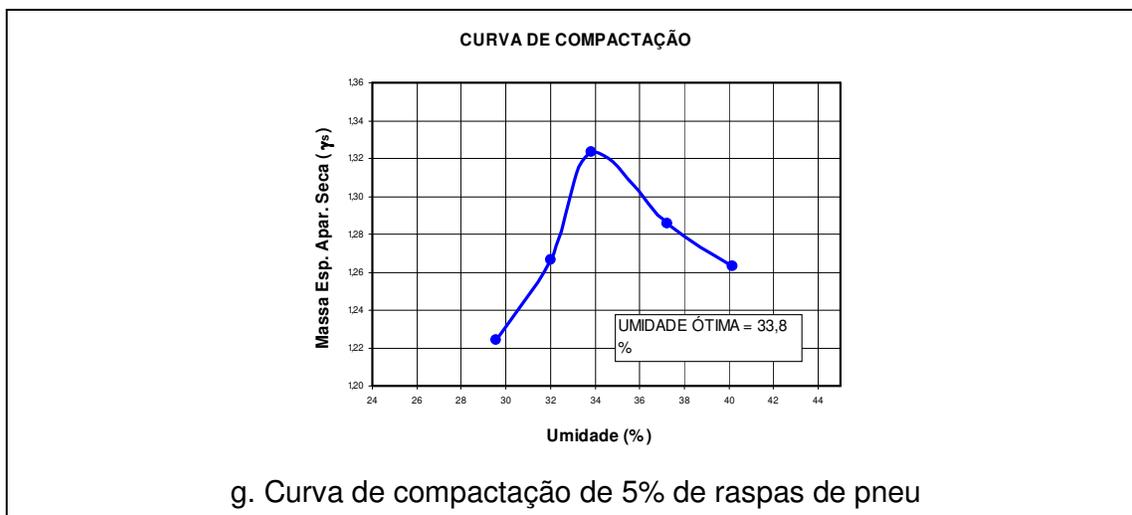
b. Curva de compactação de PET 0,5%

c. Curva de compactação de 1% PET

d. Curva de compactação 0,5% Polipileno Polycrét MF

e. Curva de compactação de 0,5% de Polipileno Concrefil

f. Curva de compactação de 1% de Polipileno Concrefil



2. Solo B

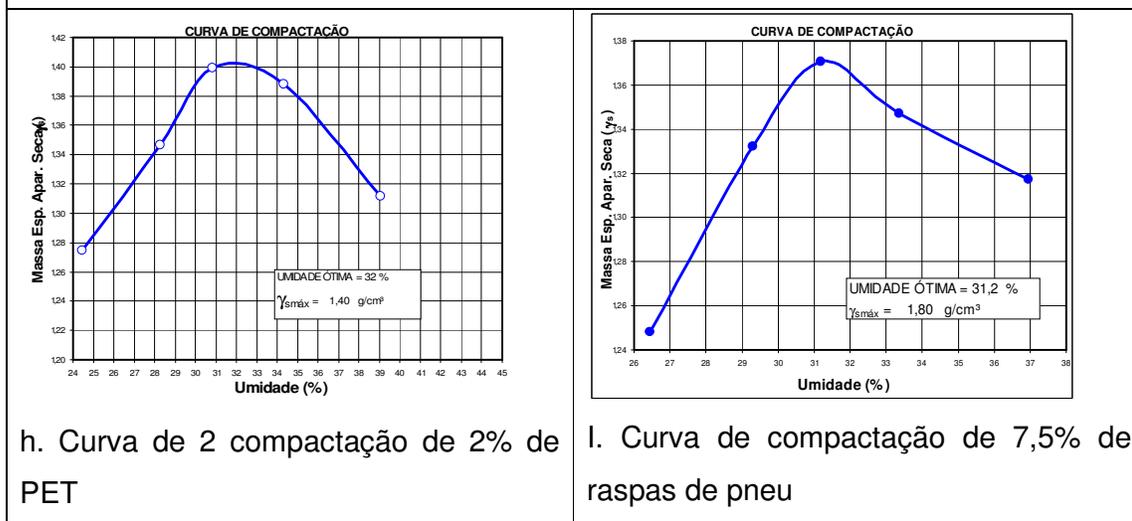


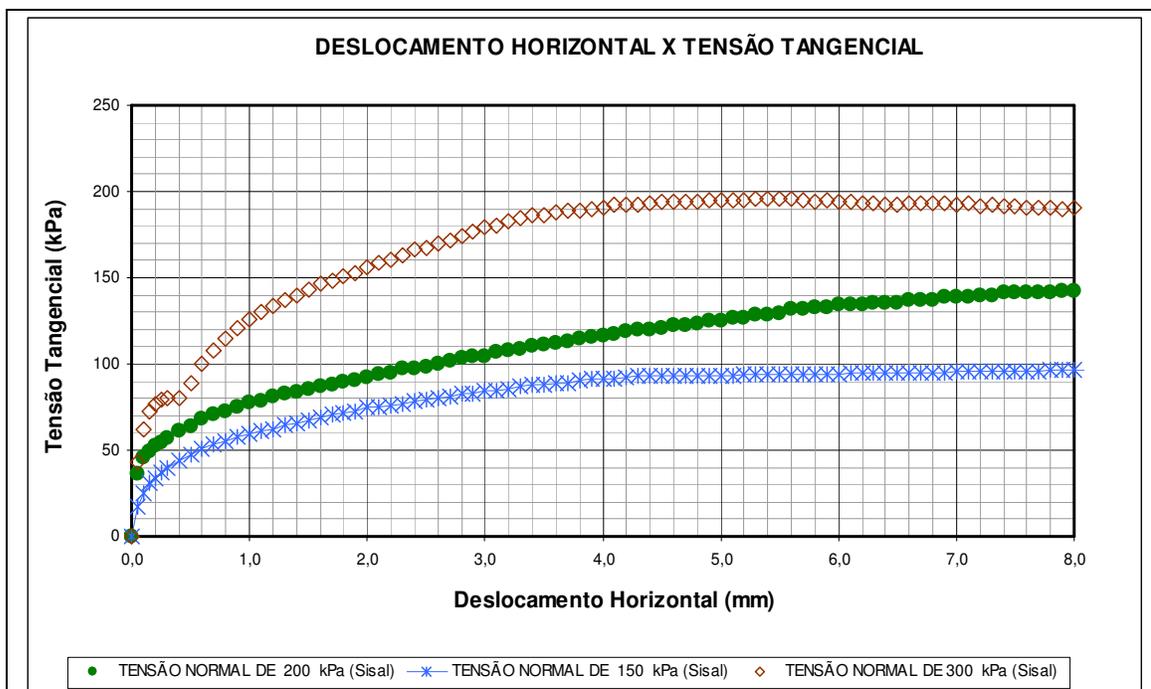
Figura 4.11 – Curvas obtidas nos ensaios de compactação.

- Cisalhamento direto

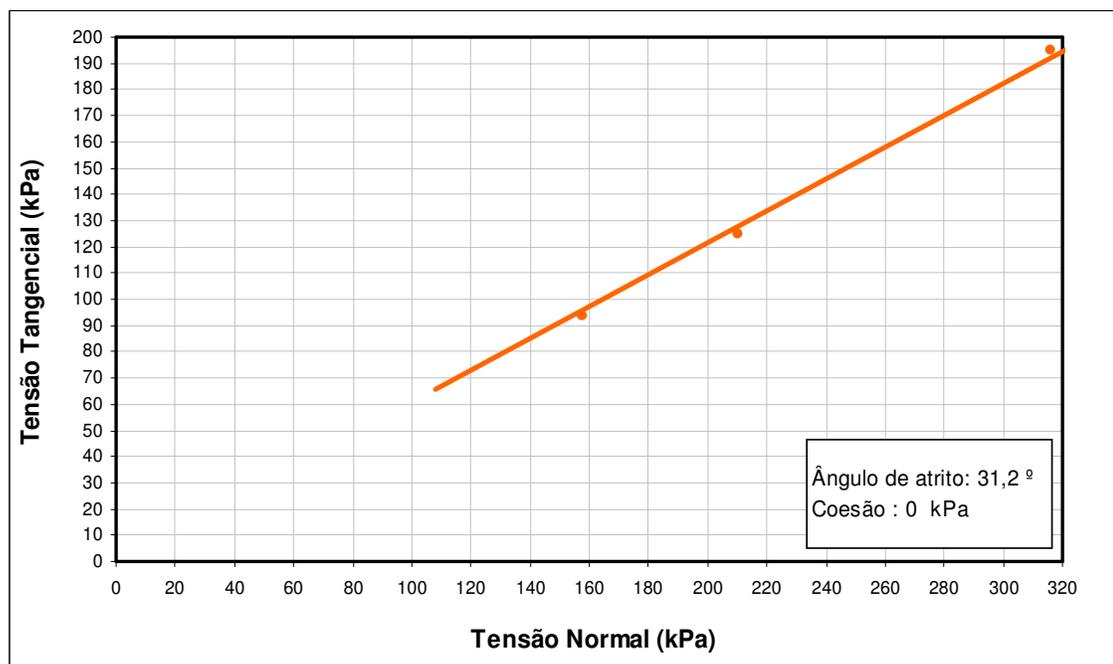
O ensaio de cisalhamento foi realizado para todas as fibras ensaiadas com o solo A (Figuras 4.13 a 4.20). Para o solo B foram analisadas apenas as adições de 0,5% de polipropileno Polycrét MF e 2% de PET (Figuras 4.21 e 4.22). A Figura 4.12 apresenta um anel de cisalhamento utilizado no ensaio realizado com a fibra de polipropileno concrefil.



Figura 4.12 – Anel de cisalhamento direto

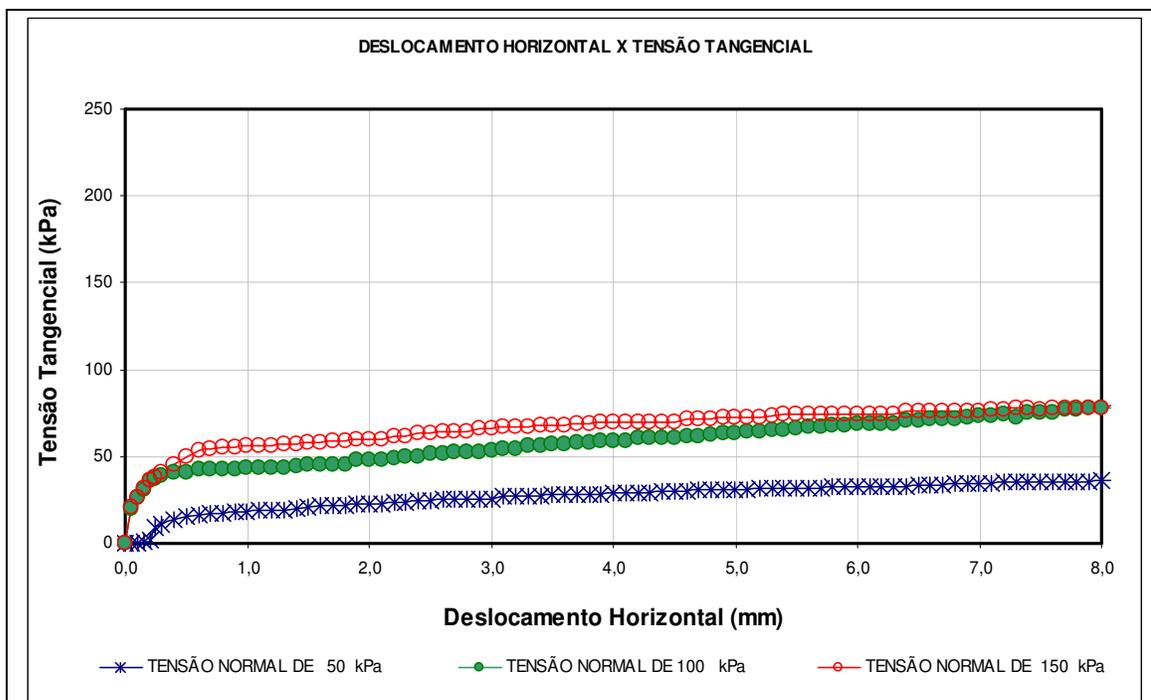


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento horizontal

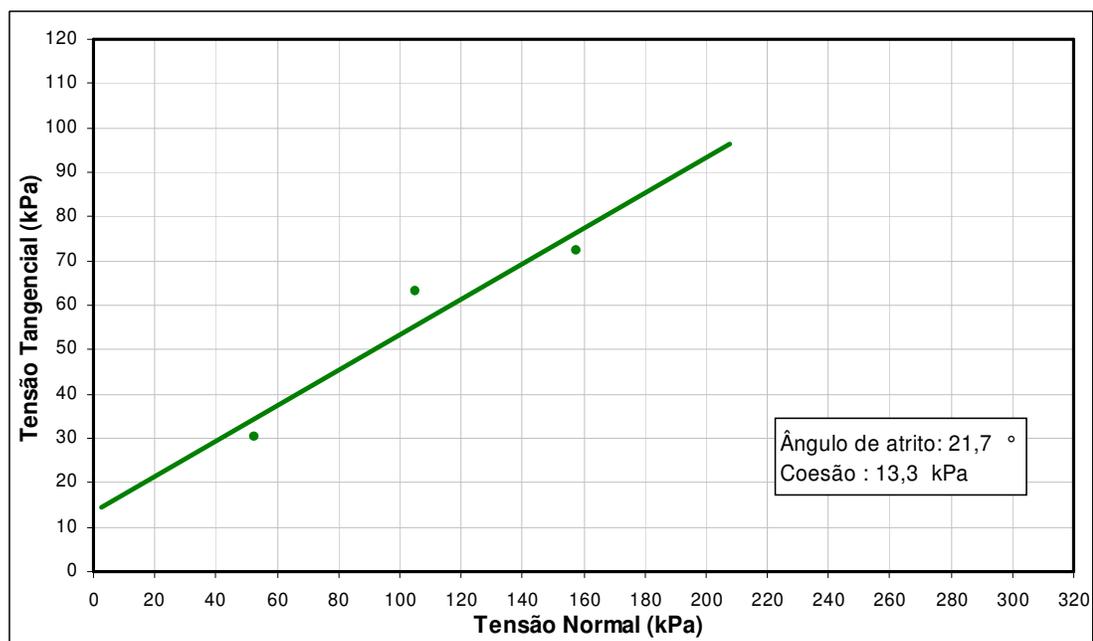


(b) Envoltória de resistência

Figura 4.13 – Solo A com a adição de 0,5% de sisal

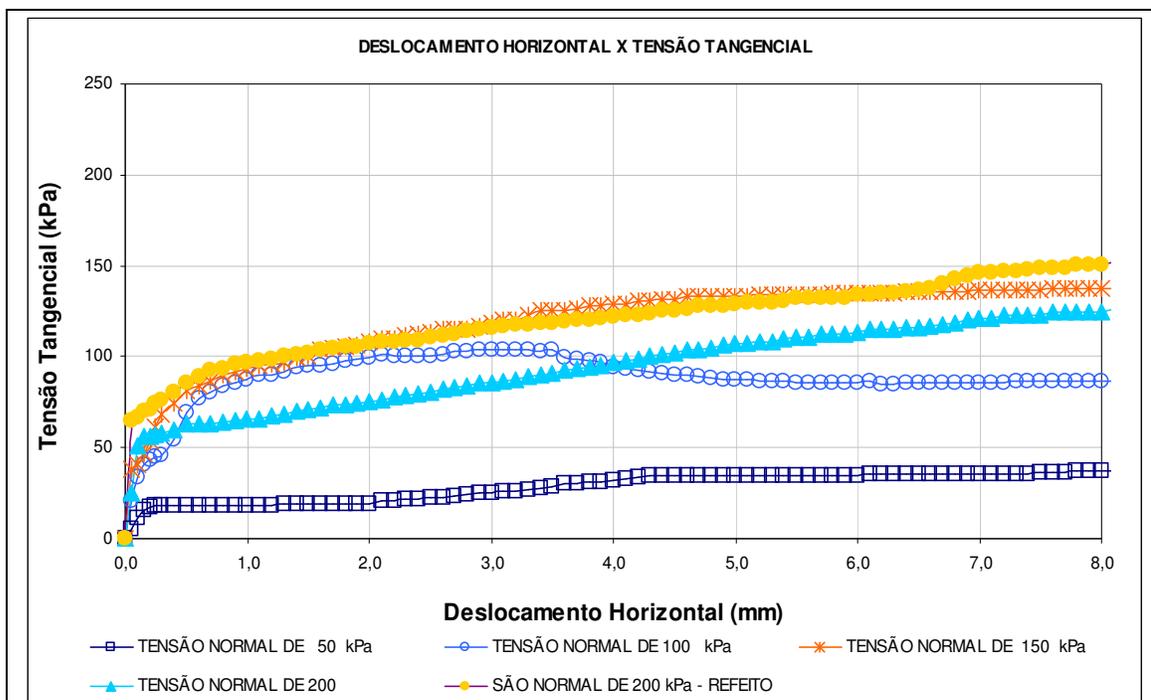


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento horizontal

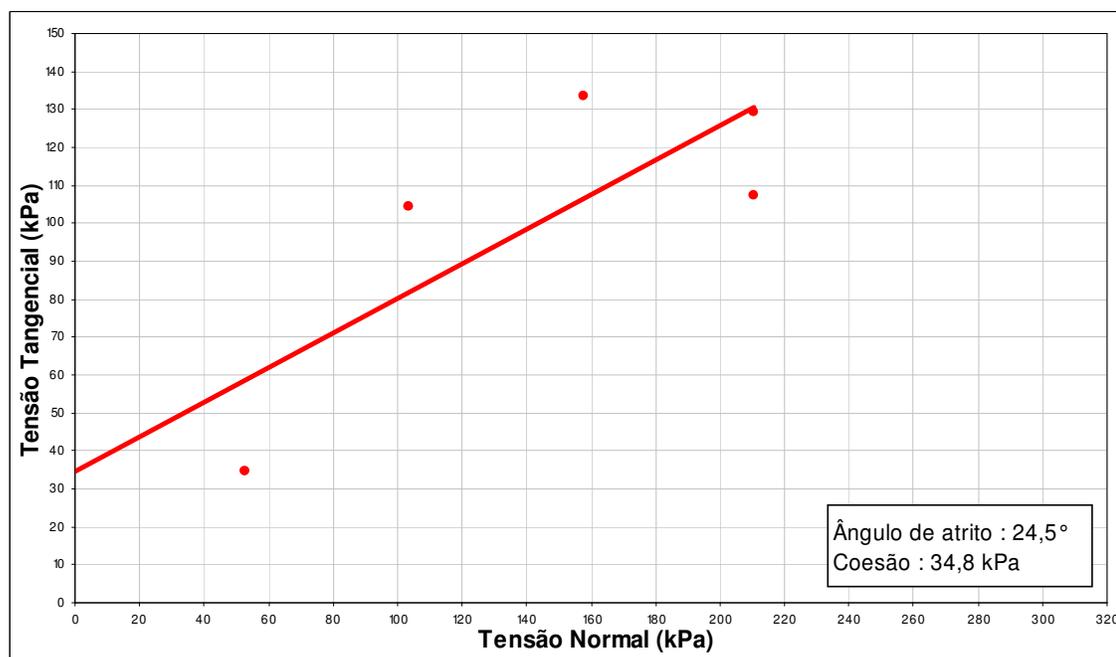


(b) Envoltória de resistência

Figura 4.14 – Solo A com a adição de 0,5% de PET

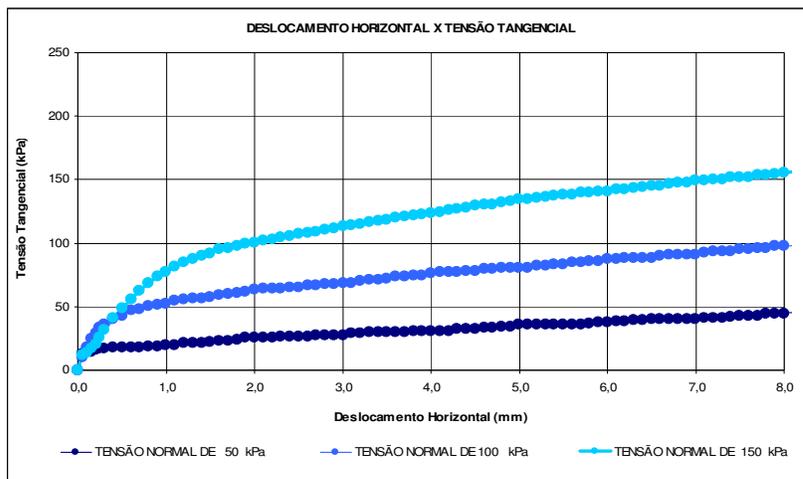


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento horizontal

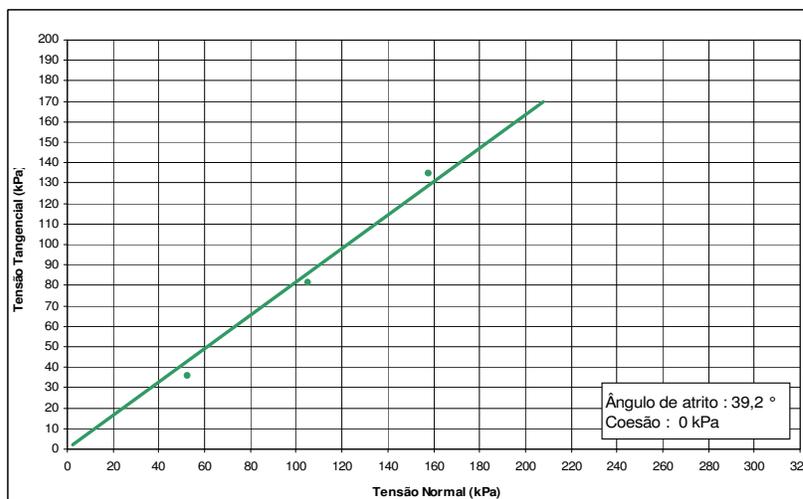


(b) Envoltória de resistência

Figura 4.15 – Solo A com a adição de 1,0% de PET

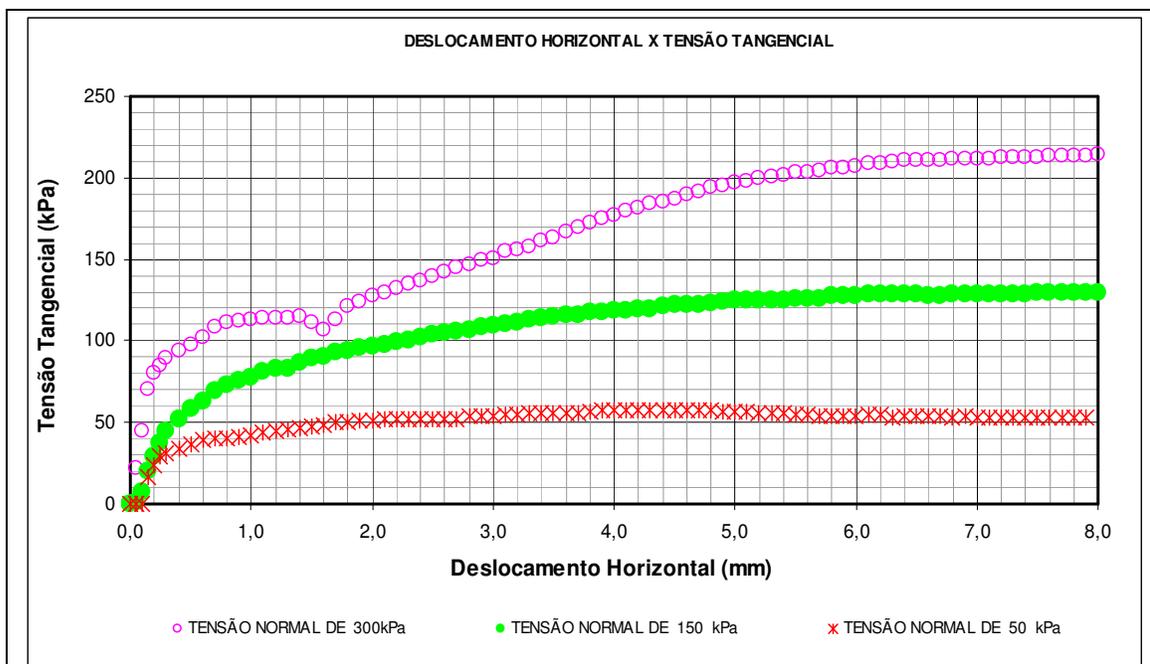


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento horizontal

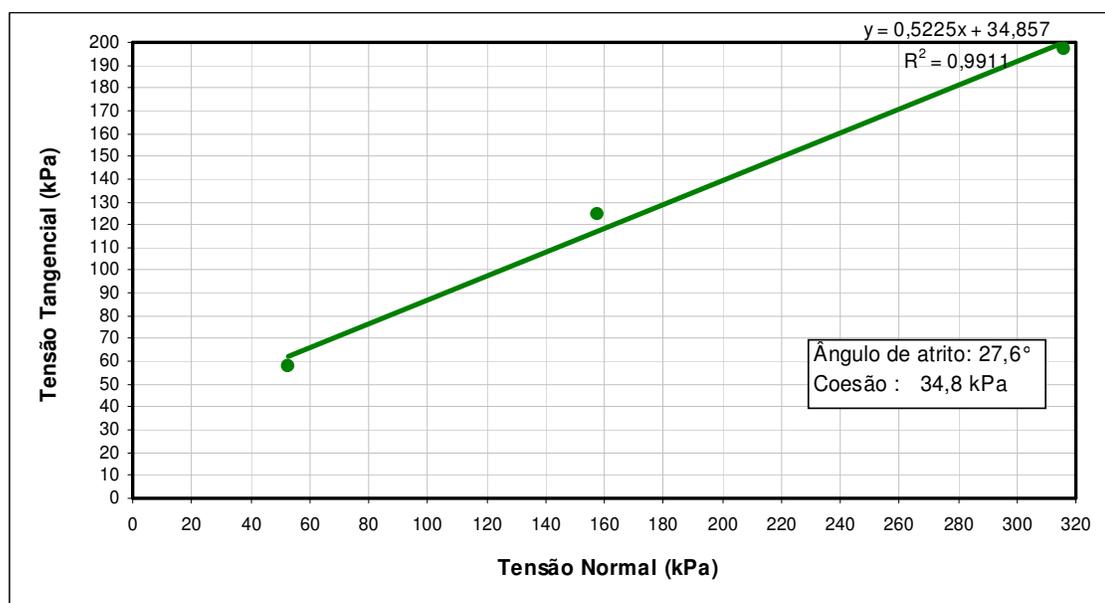


(b) Envoltória de resistência

Figura 4.16 – Solo A com a adição de 0,5% de polipropileno Polycrret MF (algodão)

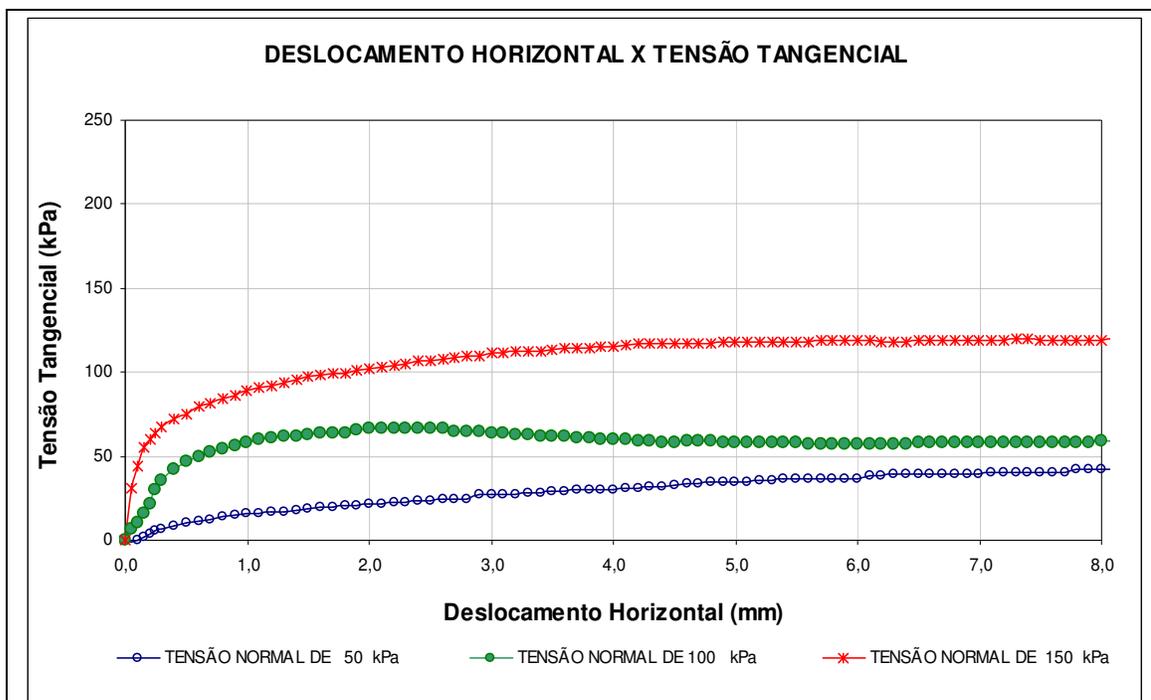


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento horizontal

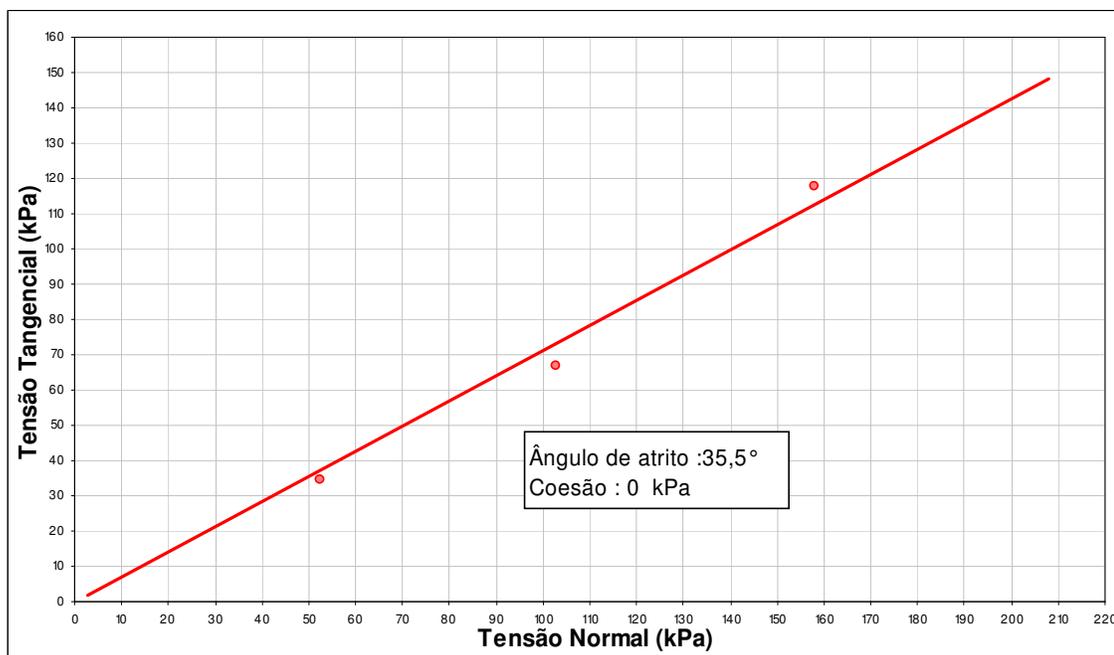


(b) Envoltória de resistência

Figura 4.17 – Solo A com a adição de 0,5% de polipropileno Concrefil

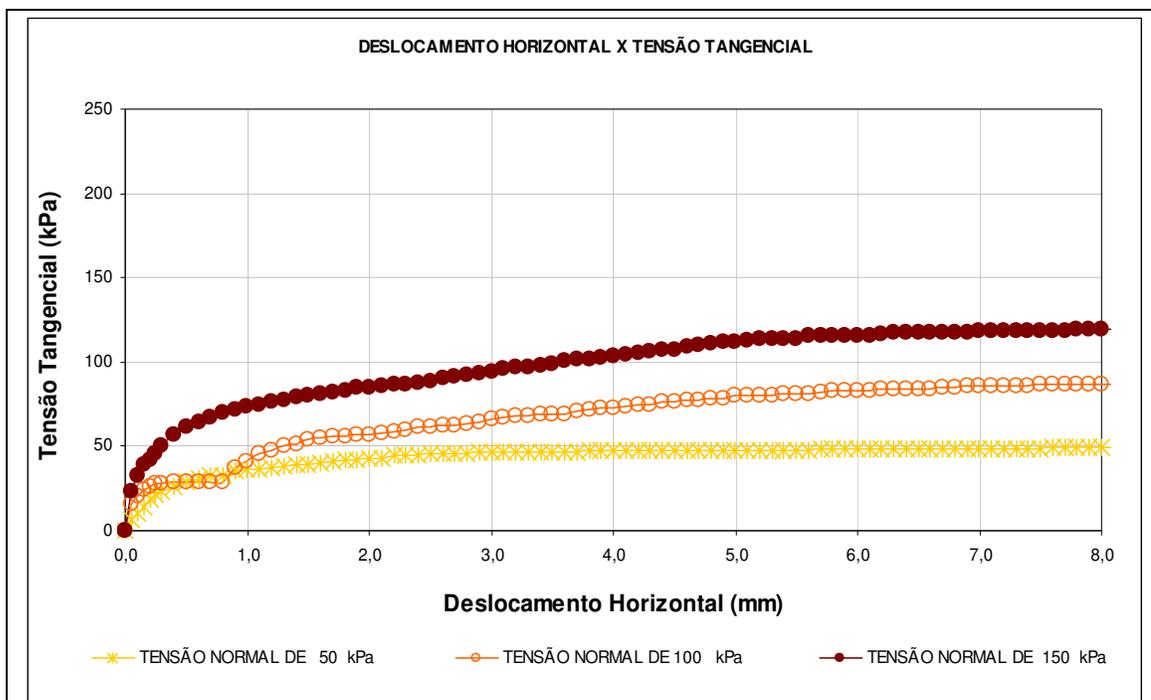


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento horizontal

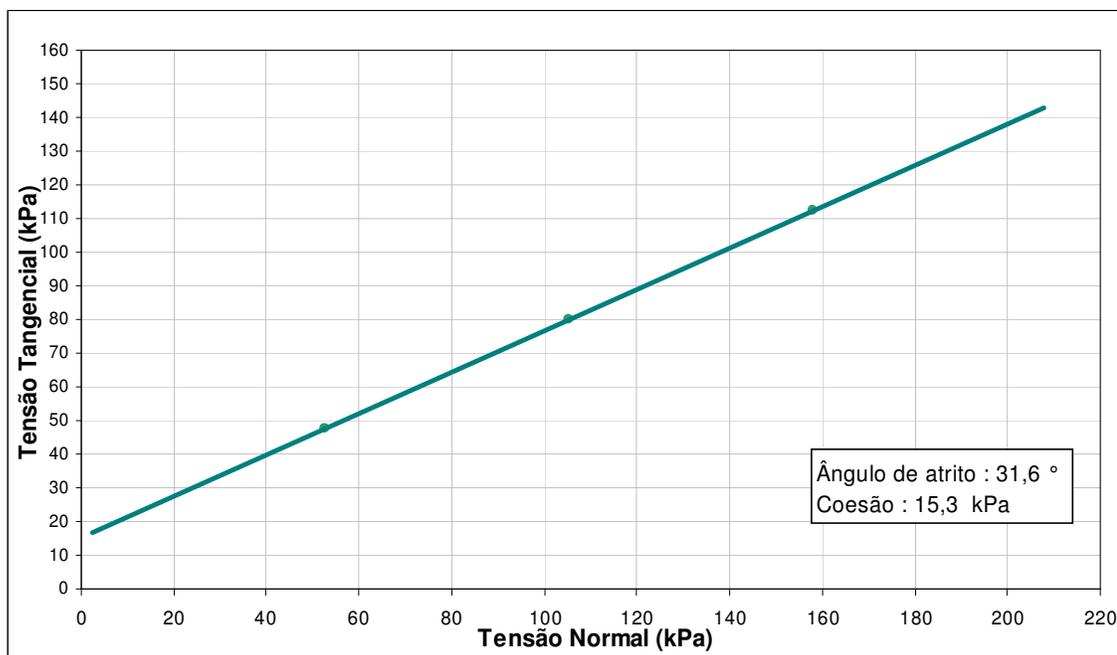


(b) Envoltória de resistência

Figura 4.18 – Solo A com a adição de 1,0% de polipropileno Concrefil

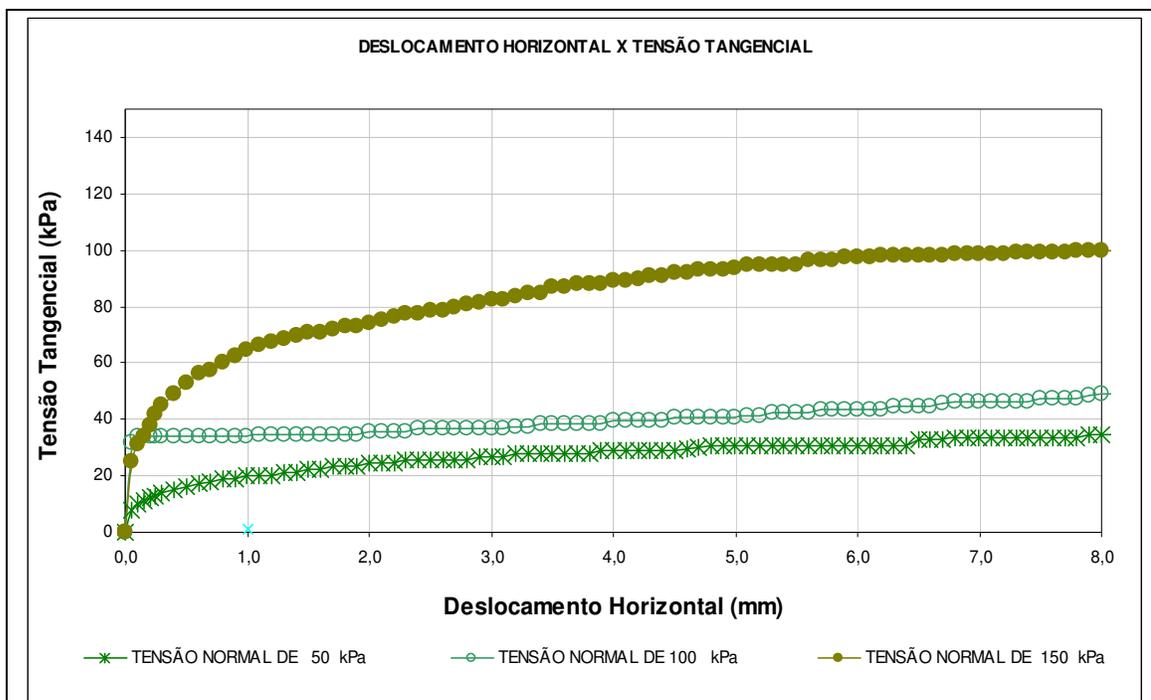


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento horizontal

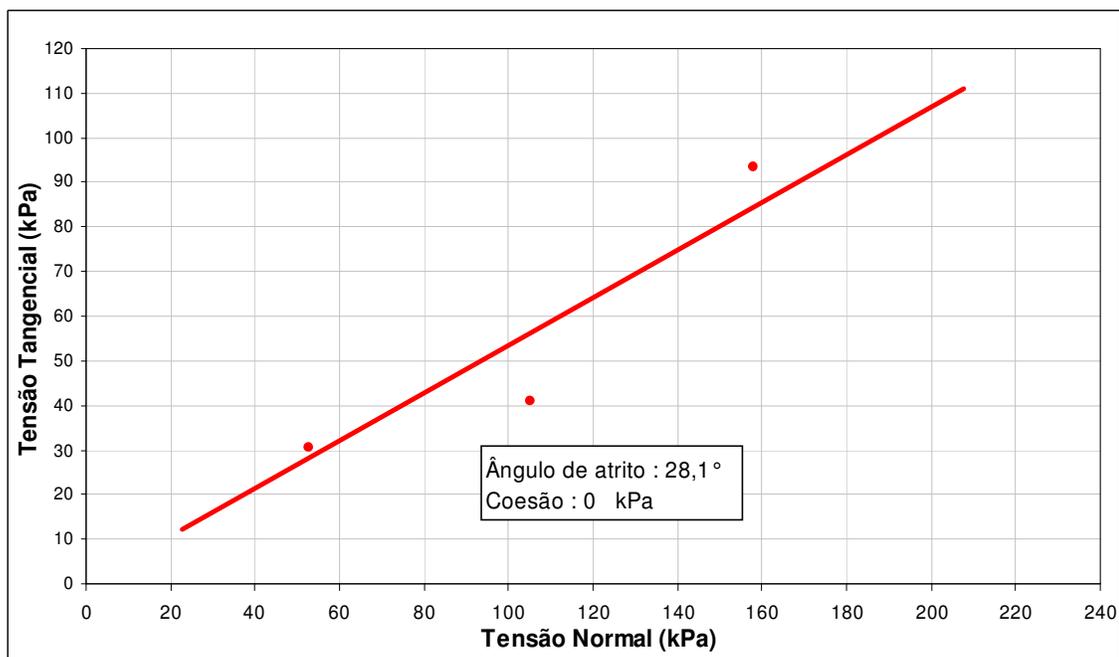


(b) Envoltória de resistência

Figura 4.19 – Solo A com a adição de 5,0% de raspa de pneu

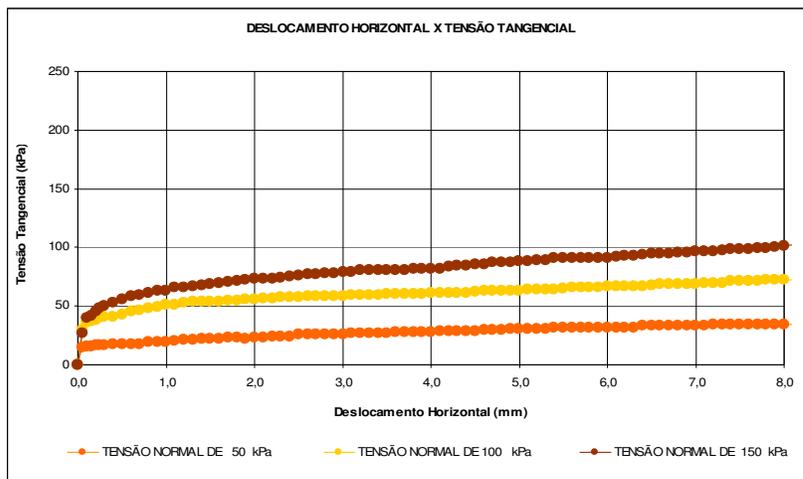


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento horizontal

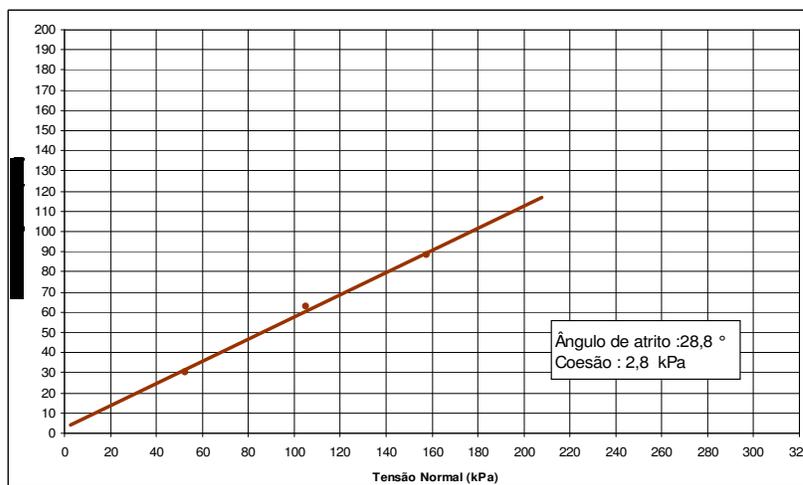


(b) Envoltória de resistência

Figura 4.20 – Solo A com a adição de 7,5% de raspa de pneu

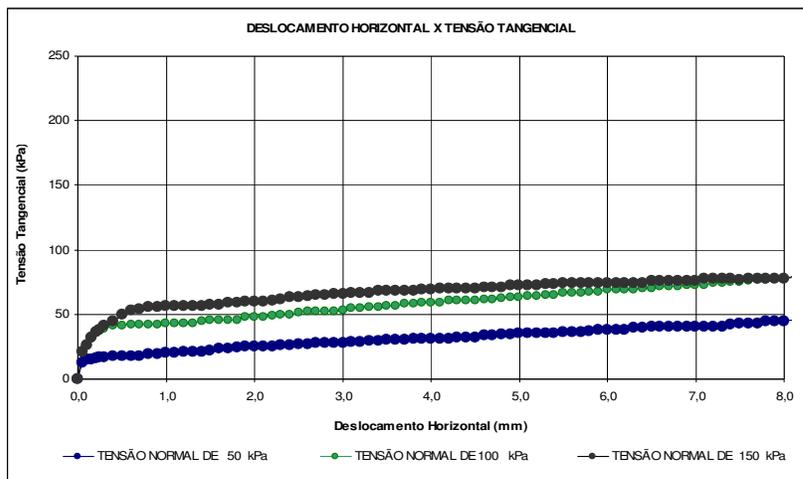


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento horizontal

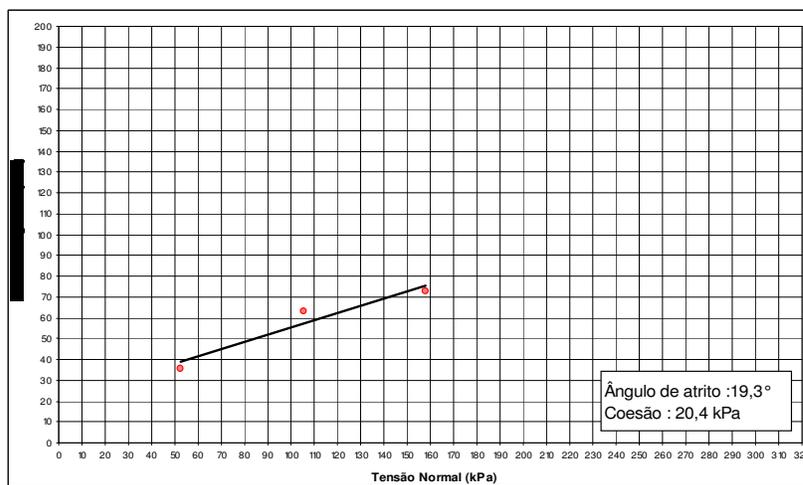


(b) Envoltória de resistência

Figura 4.21 – Solo B com a adição de 2,0% de PET



(a) Curva tensão tangencial x deslocamento horizontal



(b) Envoltória de resistência

Figura 4.22 – Solo B com a adição de 0,5% de polipropileno Polycrret MF

- Índice suporte Califórnia

Visando avaliar a resistência das amostras de solo reforçadas com as fibras de PET, sisal, polipropileno e com as raspas de pneu, buscou-se realizar o ensaio de CBR ou Índice Suporte Califórnia – ISC, para os solos no estado puro, a fim de compará-los com as devidas adições (Quadro 18).

Quadro 18 – Ensaio de CBR ou Índice Suporte Califórnia (ISC)

Ponto	Umidade	Massa específica Aparente seca (kg/cm ³)	Expansão (%)	ISC (%)
1. Solo A				
Sisal 0,5%				
1	28,6	1,238	2,49	4,27
2	33,4	1,295	0,51	9,51
3	36,7	1,328	0,72	12,18
4	39,6	1,299	0,47	5,79
5	42,4	1,122	0,40	2,52
PET 0,5%				
1	27,0	1,333	2,43	7,12
2	28,5	1,418	1,27	14,45
3	32,5	1,427	0,66	17,04
4	35,0	1,382	0,77	4,52
5	38,8	1,316	0,61	3,06
PET 1%				
1	24,6	1,272	4,16	5,77
2	25,6	1,343	2,97	8,92
3	32,1	1,415	0,78	14,67
4	37,9	1,318	0,28	2,90
Polipropileno fino Polycrret MF 0,5%				
1	30,0	1,369	0,83	19,97
2	31,5	1,415	0,47	27,93
3	32,3	1,445	0,33	18,39
4	34,2	1,497	0,27	10,27
5	36,1	1,366	0,41	9,60
Polipropileno Concretil 0,5%				
1	28,8	1,194	1,51	3,06
2	32,8	1,309	1,55	9,48
3	37,7	1,310	1,80	11,06
4	39,1	1,297	0,45	8,82
5	44,2	1,225	0,35	3,51
6	37,8	1,306	1,37	10,68

Polipropileno Concrefil 1%				
1	29,6	1,264	2,80	7,57
2	32,2	1,271	2,02	12,03
3	34,1	1,286	1,66	15,24
4	35,5	1,293	1,93	9,48
5	38,3	1,273	1,20	12,20
Pneu 5%				
1	27,3	1,330	3,19	6,22
2	30,3	1,404	1,38	16,25
3	32,6	1,384	1,78	12,20
4	35,2	1,369	0,26	10,27
5	37,4	1,307	0,10	4,64
2. Solo B				
PET 2%				
1	24,5	1,327	1,78	8,02
2	28,3	1,418	0,90	27,42
3	30,8	1,450	0,27	29,28
4	34,3	1,412	0,11	13,43
5	39,1	1,310	0,11	4,19
Pneu 7,5%				
1	26,4	1,322	1,90	7,68
2	29,3	1,374	0,63	11,29
3	31,2	1,385	0,17	11,52
4	33,4	1,369	1,39	8,47
5	37,4	1,316	0,35	4,97

- Compressão simples

Para o ensaio de Compressão Simples, foram analisados três corpos de prova com o solo B. O Quadro 19 traz os resultados de resistência e deslocamento obtidos com cada um dos corpos de prova, assim como a média obtida para cada reforço estudado.

Quadro 19 – Ensaio de compressão simples

MATERIAL	RESISTÊNCIA (kPa)	DESLOCAMENTO MÁXIMO (mm)
Sisal 0,5%	9,62	4,24
	18,42	5,96
	16,54	8,93
MÉDIA	14,86	6,38
PET 1.0%	28,08	2,15
	35,67	2,23
	43,40	2,74
MÉDIA	35,72	2,37
PET 1.0%	28,08	2,15
	35,67	2,23
	43,40	2,74
MÉDIA	35,72	2,37
Polipropileno fino Polycrret MF (0,5%)	41,92	12,86
	39,23	9,52
	46,45	10,20
MÉDIA	42,53	10,86
Polipropileno Concrefil 0,5%	17,09	4,99
	19,69	5,14
	18,37	4,25
MÉDIA	18,38	4,80
Polipropileno Concrefil 1%	30,68	2,39
	52,96	4,32
	41,97	2,97
MÉDIA	41,87	3,23

Na Figura 4.23 são apresentadas as curvas pressão versus deslocamento dos três ensaios realizados com os respectivos reforços.

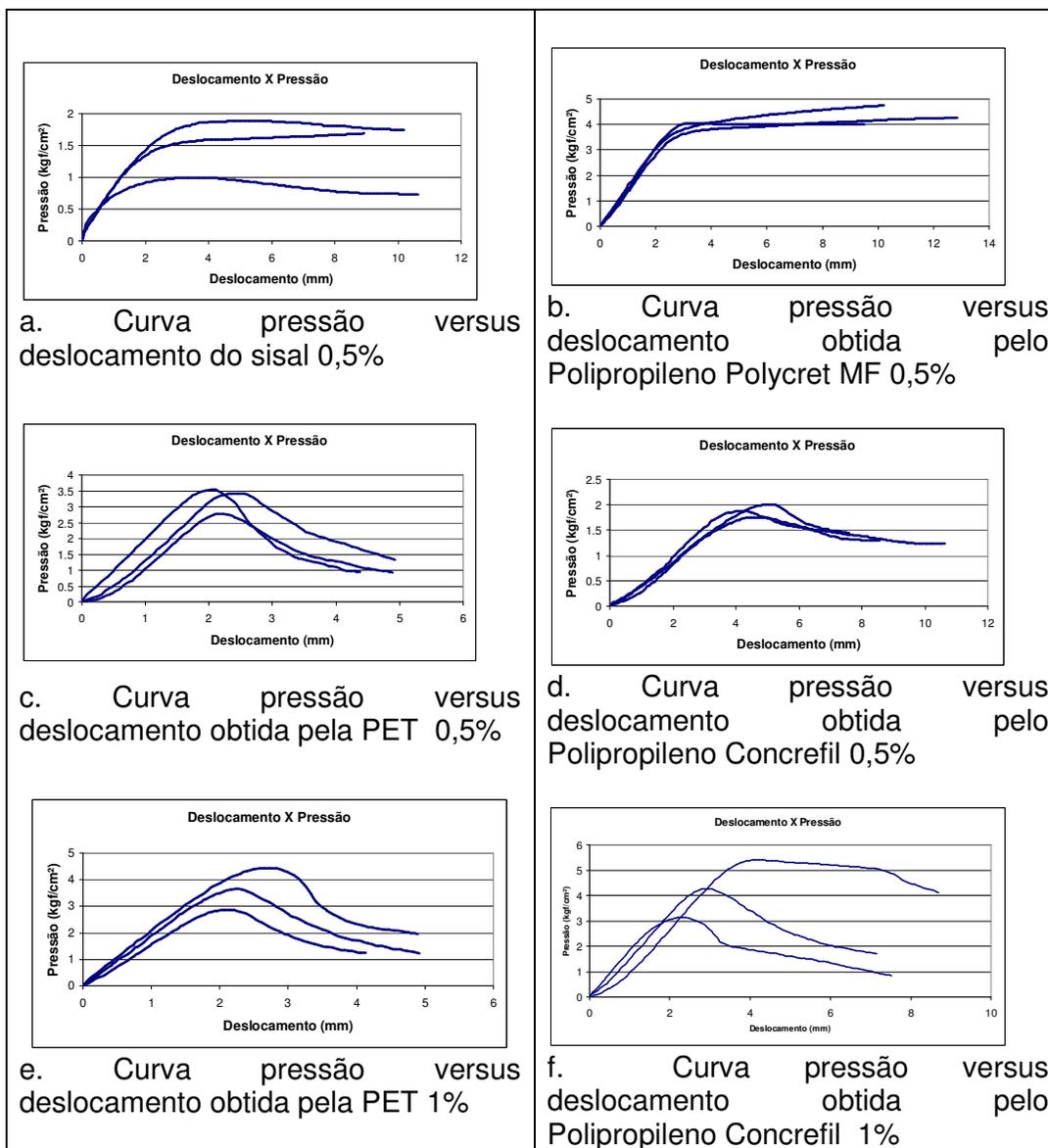


Figura 4.23 – Curvas de pressão versus deslocamento

CAPÍTULO 5

MELHORAMENTO DE SOLOS COM ADITIVOS

Este capítulo apresenta a metodologia adotada para a execução dos ensaios realizados com os aditivos, as principais características dos mesmos, assim como os resultados obtidos no estudo experimental. Para essa etapa foi utilizado um solo siltoso, chamado solo C com o qual foram realizados ensaios de caracterização descritos a seguir.

5.1 ENSAIOS REALIZADOS COM O SOLO C NO ESTADO PURO

O material utilizado para o estudo do melhoramento das características dos solos através da utilização de aditivos químicos em laboratório é um solo siltoso, chamado de solo C, composto por 43% de silte, 36% de areia e 19% de argila.

a) Granulometria

O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com a NBR 7181/84. O material foi analisado por peneiramento e sedimentação sem o uso do defloculante Hexametáfosfato de sódio. A curva granulométrica é apresentada na Figura 5.1. Esse solo apresenta limite de liquidez de 62% e limite de plasticidade de 45%.

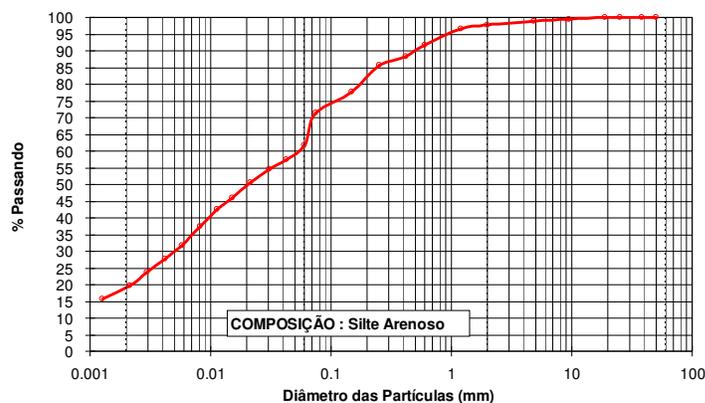


Figura 5.1 – Granulometria do solo puro

O ensaio de compactação foi necessário para determinar o peso específico aparente seco máximo e a correspondente umidade. A umidade ótima e a massa específica aparente seca são respectivamente: 29% e 1,43 g/cm³. Na Figura 5.2 é apresentada a curva de compactação da amostra.

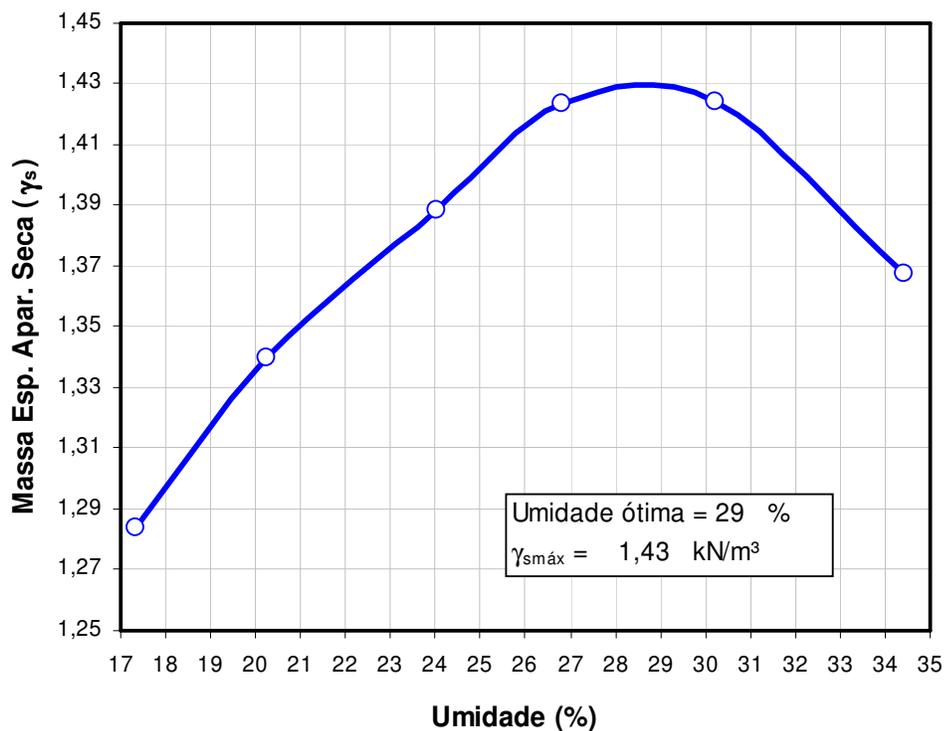


Figura 5.2 - Compactação do solo C puro

Para a caracterização de resistência do solo foram realizados os ensaios de cisalhamento direto e compressão simples.

b) Cisalhamento direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com as tensões normais de 50, 100 e 200 kPa até um deslocamento de 12 mm. A velocidade de cisalhamento aplicada foi de 0,056 mm/min. Os corpos-de-prova foram moldados na umidade ótima.

Na Figura 5.3 são apresentadas as curvas tensão-deformação e a envoltória de resistência para um deslocamento de 5 mm. Os parâmetros de resistência obtidos são 8,2 kPa de coesão e 28,1° de ângulo de atrito interno.

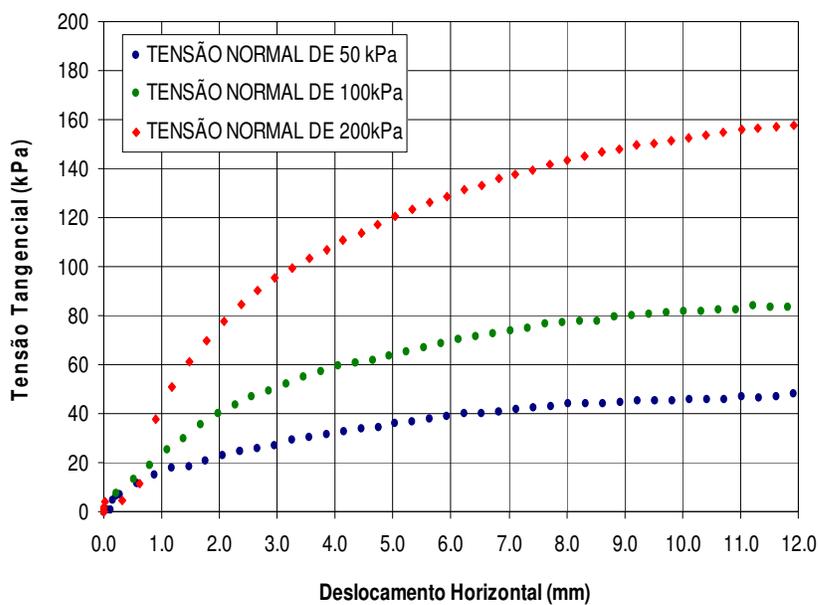


Figura 5.3 – Gráfico tensão tangencial x deslocamento horizontal do solo puro C

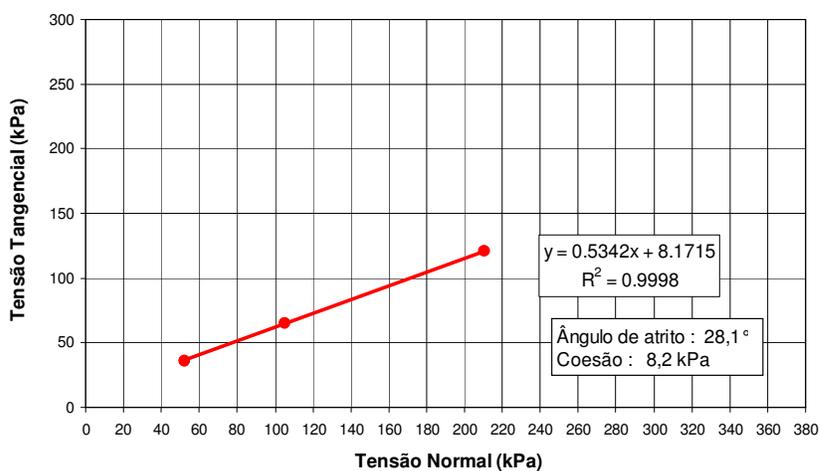


Figura 5.4 – Envoltória de resistência ao cisalhamento direto do solo puro C

c) Compressão simples

O ensaio de compressão simples foi executado em amostras de diâmetro 5 cm e altura 10 cm com o Proctor Normal. Foram rompidos 4 corpos de prova. As curvas pressão aplicada *versus* deslocamento são apresentadas na Figura 5.5. No Quadro 20 são apresentadas as resistências atingidas pelos corpo-de-prova. A média de resistência à compressão simples foi de 724 kPa.

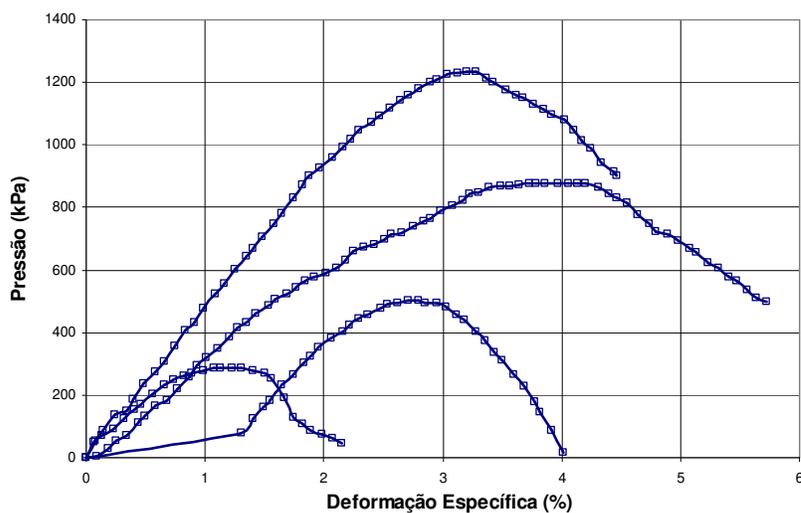


Figura 5.5 – Compressão simples do solo puro c

Quadro 20 – Resistência à compressão simples do solo puro C

Material	Resistência (kPa)	Deformação específica (%)	Umidade (%)	Peso Específico (kN/m³)
Solo Puro	12,34	3,28	29	1,50
	8,77	3,86	29	1,48
	5,01	2,70	29	1,57
	2,85	1,13	29	1,52
Média	72,425	2,74	29	1,52

5.2 Metodologia adotada

Os aditivos foram escolhidos mediante uma seleção por categoria, pela disponibilidade no mercado assim como pela facilidade de utilização. Alguns foram gentilmente cedidos pelos representantes, outros adquiridos mediante compra direta com o fornecedor. O Quadro 21 seguir traz os materiais utilizados na presente pesquisa assim como um resumo dos ensaios realizados com os aditivos em laboratório.

Quadro 21 - Resumo dos ensaios realizados com os aditivos

Aditivo	% Aditivo	% Reagente	ETAPA 2 - Ensaios de Laboratório com Aditivos Químicos e Orgânicos					
			Compressão Simples	Cisalhamento			Granulometria	Massa Específica
				50KPa	100KPa	200KPa	Água	
Cal	2,00	-	X	X	X	X	X	X
	4,00	-	X				X	
Cimento	2,00	-	X	X	X	X	X	X
	4,00	-	X				X	
Dynacal	0,67	2% (cal)	X	X	X	X	X	X
	0,5	2% (cal)	X				X	
DS-328	0,17	2% (cal)	X	X	X	X	X	X
Ecolopavi	1,52	2% (cal)	X	X	X	X	X	X
	0,67	2% (cal)	X				X	
EMC ²	1,63	-	X	X	X	X	X	X
	0,67	-	X				X	
Homy Solo	0,67	2% (cal)	X	X	X	X	X	X
	0,17	2% (cal)	X				X	
Lignosulfonato	2,00	-	X	X	X	X	X	X
	4,00	-	X				X	
Terrazyme	0,05	-	X	X	X	X	X	X
	1,16	-	X				X	

5.3 Execução dos ensaios com o solo aditivado

A presente etapa do programa experimental foi realizada em duas fases, sendo a primeira reservada para a preparação das amostras indeformadas (obtidas pela compactação do solo aditivado em cavas no campo) e a segunda por ensaios realizados em laboratório.

5.3.1 Procedimentos adotados para a compactação das cavas

Para a realização da compactação, primeiramente foi necessário construir as cavas que foram realizadas no Sítio Experimental de Geotecnia da UFPR. Assim, foram construídas duas cavas para cada aditivo, cada qual com dosagens diferentes. As dimensões das mesmas eram: 300 cm de largura x 300 cm de altura x 100 cm comprimento, como representado na Figura 5.6.



Figura 5.6 - Cavas

Depois de preparadas as cavas, procedeu-se à etapa de mistura de solo com aditivo e preenchimento das mesmas. Inicialmente foi retirada a umidade do solo em questão, utilizando o método da frigideira, para verificar a quantidade de água a ser adicionada a fim de atingir a umidade ótima.

Com o valor da umidade ótima, pôde-se estabelecer a quantidade de água a ser adicionada ao aditivo a ser utilizado no solo, utilizando a seguinte fórmula:

$$Q_{\text{água}} = M_{\text{solo}} \left(\frac{H_{\text{ótima}} - H_{\text{natural}}}{100} \right), \text{ onde } M_{\text{solo}} \text{ é a quantidade de massa seca}$$

do solo, $H_{\text{ótima}}$ é a umidade obtida no ensaio de compactação e H_{natural} é a umidade do solo obtida pelo método da frigideira.

No que diz respeito à dosagem utilizada, optou-se pela concepção de misturas contendo dois teores diferentes de aditivos. Como cada fabricante forneceu uma forma diferenciada de calcular a quantidade do produto a adicionar. Dessa forma, para cada aditivo utilizou-se a dosagem indicada.

Com os cálculos das dosagens de aditivos reagentes e quantidade de água a adicionar, seguiu-se o peneiramento do solo, para o qual foi utilizada uma peneira de malha 25 mm para a retirada de pedregulhos.

A mistura foi feita sob uma lona plástica para que não ocorresse perda de material e nem a mistura com outros (Figura 5.7).



Figura 5.7 - Peneiramento do solo

Após conseguir uma boa homogeneização, a mistura foi compactada com uma energia semelhante à do Proctor Normal (NBR 7182). Cada uma das três camadas foi compactada ficando com uma profundidade final de 10 cm (Figuras 5.8 e 5.9).



Figura 5.8 – Colocação do solo aditivado nas cavas



Figura 5.9 – Cava compactada

Quadro 22 a seguir mostra os procedimentos adotados para cada um dos aditivos analisados nessa pesquisa, sendo que a seqüência básica de todos foi mostrada nas fotos 5.7 a 5.9.

Quadro 22 - Procedimentos adotados

Aditivo	Seqüência	Procedimento
<p data-bbox="289 302 380 327">Dynacal</p>  <p data-bbox="289 554 399 579">Ecolopavi</p>  <p data-bbox="289 806 375 831">DS-328</p>  <p data-bbox="289 1058 407 1083">Homy solo</p> 	 	<p data-bbox="938 701 1385 932">Para a execução das cavas com esses quatro aditivos o procedimento adotado foi dado pela mistura inicial do reagente com o solo e em seguida com o próprio aditivo já devidamente misturado com a água.</p>
<p data-bbox="399 1352 464 1377">EMC²</p>  <p data-bbox="370 1528 488 1554">Terrazyme</p> 	 	<p data-bbox="938 1478 1385 1667">O procedimento adotado para a mistura dos aditivos orgânicos EMC² e Terrazyme são semelhantes aos anteriores diferindo apenas pela não necessidade da adição de reagente.</p>

Aditivo	Seqüência	Procedimento
<p data-bbox="412 302 451 327">Cal</p>  <p data-bbox="386 491 477 516">Cimento</p> 	 	<p data-bbox="938 432 1386 590">A mistura do cimento e da cal foi bastante simples havendo apenas a necessidade de uma boa homogeneização.</p>
<p data-bbox="310 848 553 873">Lignosulfonato VIXIL I</p> 		<p data-bbox="938 848 1386 1089">O aditivo lignosulfonato VIXIL I necessitou de uma preparação (mistura em água) por 12 horas de antecedência devido ao fato de formar uma espuma, fato que poderia ser resolvido com o auxílio de um reagente.</p>

Depois de realizadas todas as misturas, uma vista parcial das cavas preenchidas com seus respectivos aditivos é mostrada na Figura 5.10.



Figura 5.10 – Vista geral das cavas aditivadas

Com o término da compactação das cavas, as mesmas permaneceram curando ao tempo por um período de 30 dias, tempo sugerido pelos fabricantes, para então seguir para a retirada das amostras indeformadas.

A técnica utilizada foi a retirada de amostras na forma de blocos medindo 30 x 30 x 30 cm, do solo aditivado compactado. Estes blocos foram devidamente parafinados e acondicionados numa câmara úmida do laboratório de solos do LAME para conservar a umidade (Figura 5.11). Na retirada e transporte dos blocos buscou-se trabalhar com bastante cuidado a fim de não danificar ou quebrar a amostra.



Figura 5.11 - Retirada de amostras das cavas do Sítio Experimental

De posse dessas amostras, procedeu-se à realização dos ensaios em laboratório com o intuito de caracterizar o mesmo e verificar as possíveis mudanças ocorridas com a aditivação.

Conforme descrito no capítulo 3 os ensaios realizados com cada uma das amostras foram os de granulometria, compressão simples e cisalhamento direto.

5.4 Resultados obtidos com o Solo Aditivado

Após a cura e retirada das amostras indeformadas, o material foi levado ao laboratório a fim de realizar os respectivos ensaios, para análise das características da mistura, com os seguintes resultados tendo sido obtidos:

1) Análise granulométrica

A Figura 5.12 mostra um resumo das curvas granulométricas obtidas sem o defloculante.

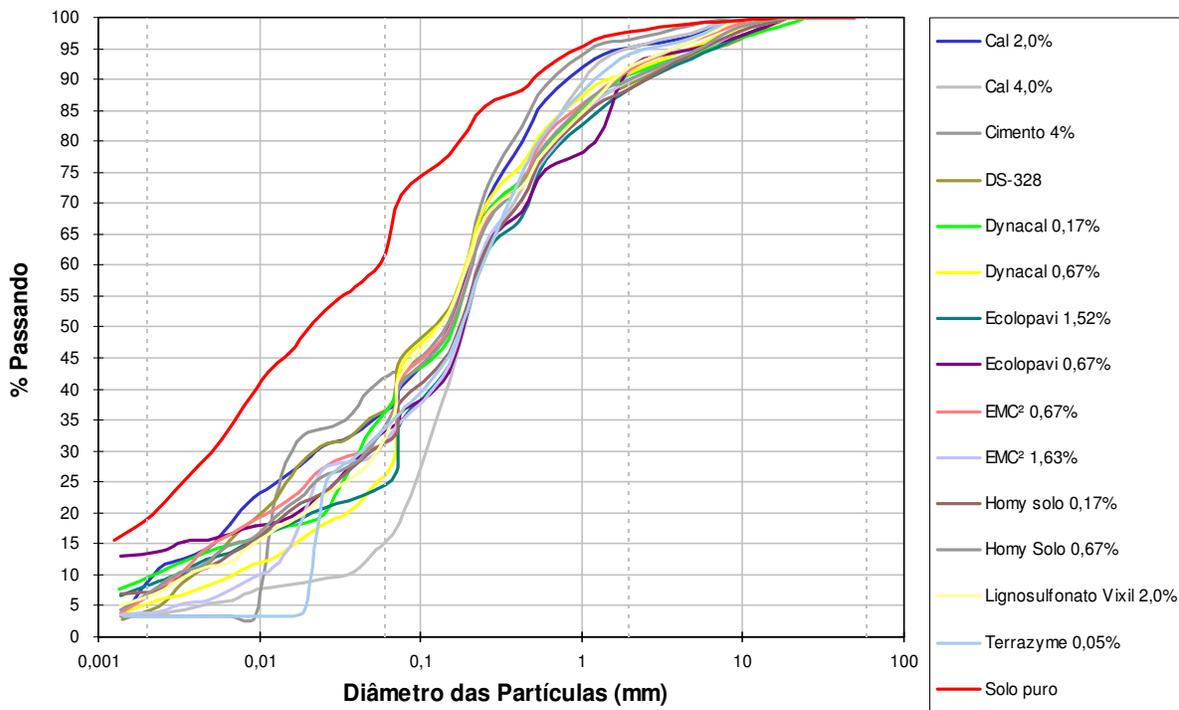


Figura 5.12 – Curvas granulométricas do solo aditivado e puro

Analisando as curvas granulométricas acima percebe-se a ocorrência de uma maior aglomeração das partículas deixando o solo com menos finos.

2) Cisalhamento

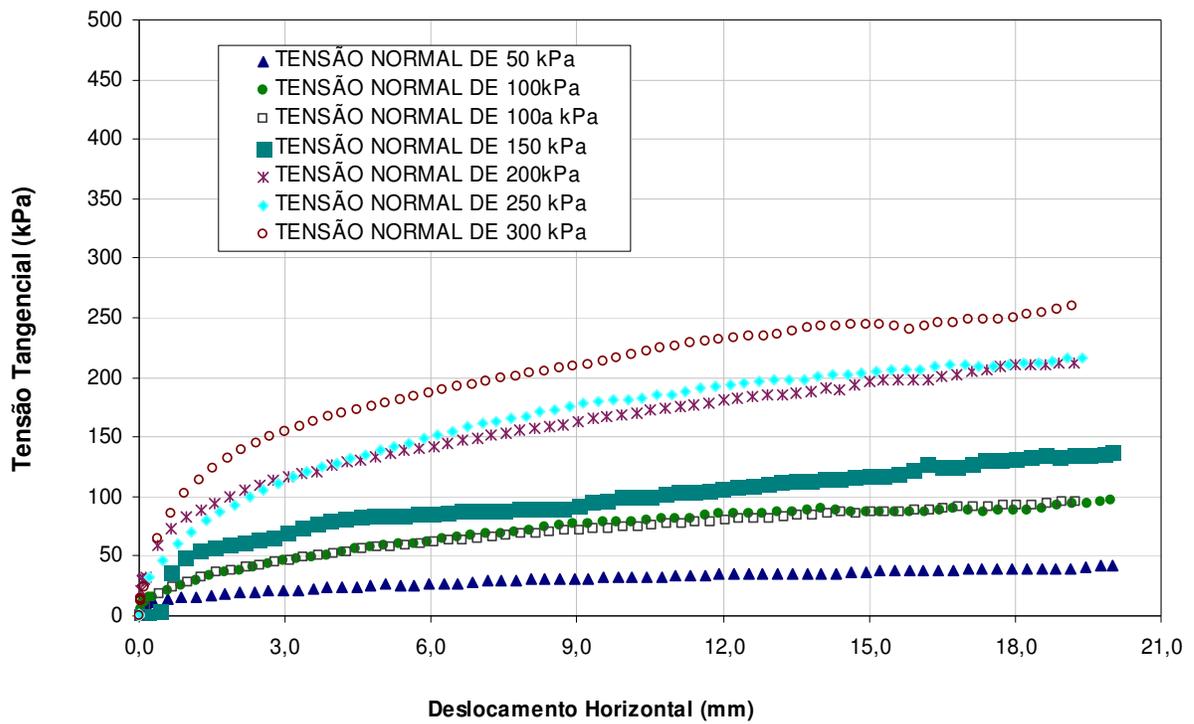
Para a realização dos ensaios, foram obtidas amostras talhadas de forma bastante cuidadosa dos blocos compactados nas cavas, utilizando-se um anel de cisalhamento adequado para o processo.

Os dados obtidos no ensaio estão representados no Quadro 23 a seguir.

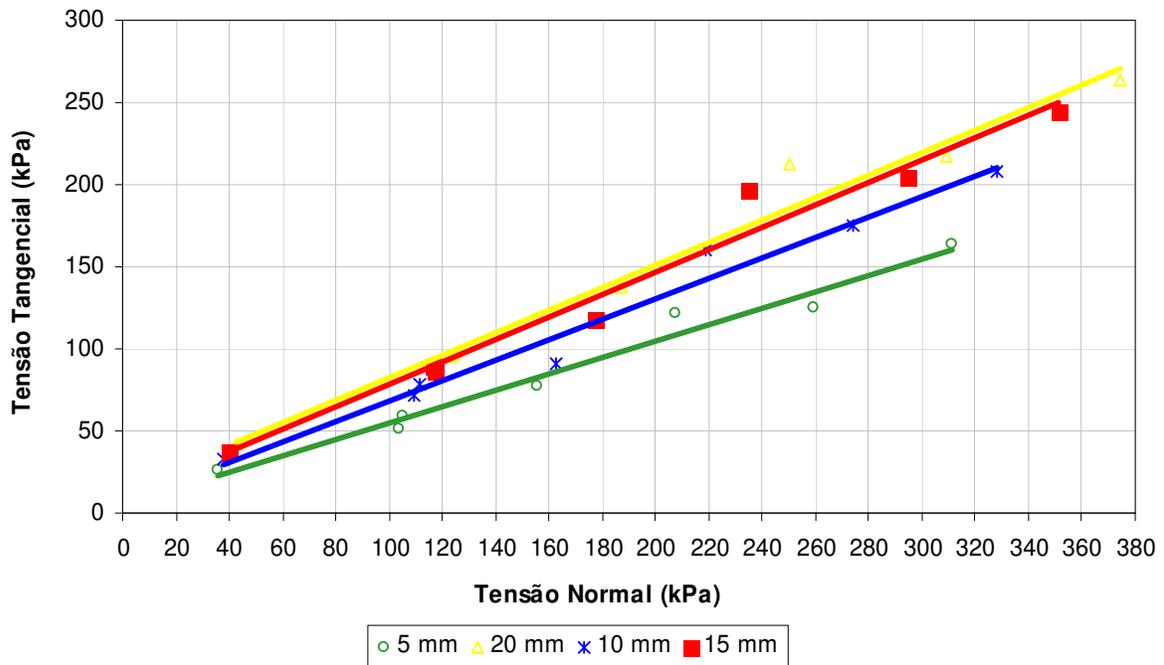
Quadro 23 - Dados do ensaio de cisalhamento

Amostra	Tensão Normal Aplicada (kPa)	w (%)	γ (kN/m ³)	γ_d (kn/m ³)	e_0
Cimento 2,0%	50	25,6	2,14	1,71	0,54
	100	25,7	2,22	1,77	0,49
	200	23,8	2,18	1,76	0,49
Cimento 4,0%	50	24,3	2,23	1,79	0,53
	100	24,2	2,10	1,69	0,62
	200	24,1	2,12	1,71	0,60
Cal 2,0%	50	23,9	2,29	1,84	0,43
	100	24,9	2,07	1,66	0,59
	200	22,8	2,06	1,68	0,57
Cal 4,0%	50	27,6	2,21	1,74	0,52
	100	27,6	2,26	1,77	0,49
	200	27,6	2,11	1,65	0,59
Terrazyme 0,05%	50	25,5	2,25	1,80	0,44
	100	25,1	2,31	1,85	0,40
	200	25,1	2,34	1,87	0,39
Terrazyme 1,16%	50	12,9	2,44	2,16	0,34
	100	12,9	2,35	2,08	0,39
	200	12,9	2,42	2,14	0,35
Dynacal 0,17%	50	25,5	2,08	1,66	0,63
	100	25,5	2,25	1,79	0,51
	200	25,5	2,34	1,86	0,45
Dynacal 0,67%	50	19,5	2,18	1,83	0,46
	100	22,1	2,00	1,64	0,63
	200	22,9	2,00	1,63	0,64
Lignosulfonato 2%	50	26,3	2,21	1,75	0,53
	100	26,3	2,22	1,76	0,52
	200	26,3	2,21	1,75	0,53
Lignosulfonato 4%	50	31,6	2,25	1,71	0,56
	100	31,6	2,33	1,77	0,51
	200	31,6	2,16	1,64	0,64
EMC ² 0,67%	50	22,1	2,44	2,00	2,33
	100	22,1	2,47	2,03	0,31
	200	22,1	2,56	2,10	0,27
EMC ² 1,63%	50	10,8	2,24	2,03	0,33
	100	10,8	2,36	2,13	0,27
	200	10,8	2,14	1,94	0,40
Ecolopavi 0,67%	50	23,9	2,38	1,92	0,35
	100	23,9	2,34	1,89	0,37
	200	23,9	2,12	1,71	0,52
Ecolopavi 1,52%	50	15,4	2,17	1,88	0,44
	100	15,4	2,00	1,73	0,56
	200	15,4	2,13	1,85	0,46
Homy solo 0,67%	50	24,4	2,16	1,74	0,55
	100	24,4	2,13	1,71	0,57
	200	24,4	2,23	1,79	0,50
DS-328 0,17%	50	24,8	2,11	1,69	0,58
	100	24,8	2,22	1,58	0,50
	200	22,9	1,98	1,61	0,66

Os gráficos obtidos nos ensaios de cisalhamento direto realizados com os aditivos estão mostrados nas Figuras 5.13 a 5.28.

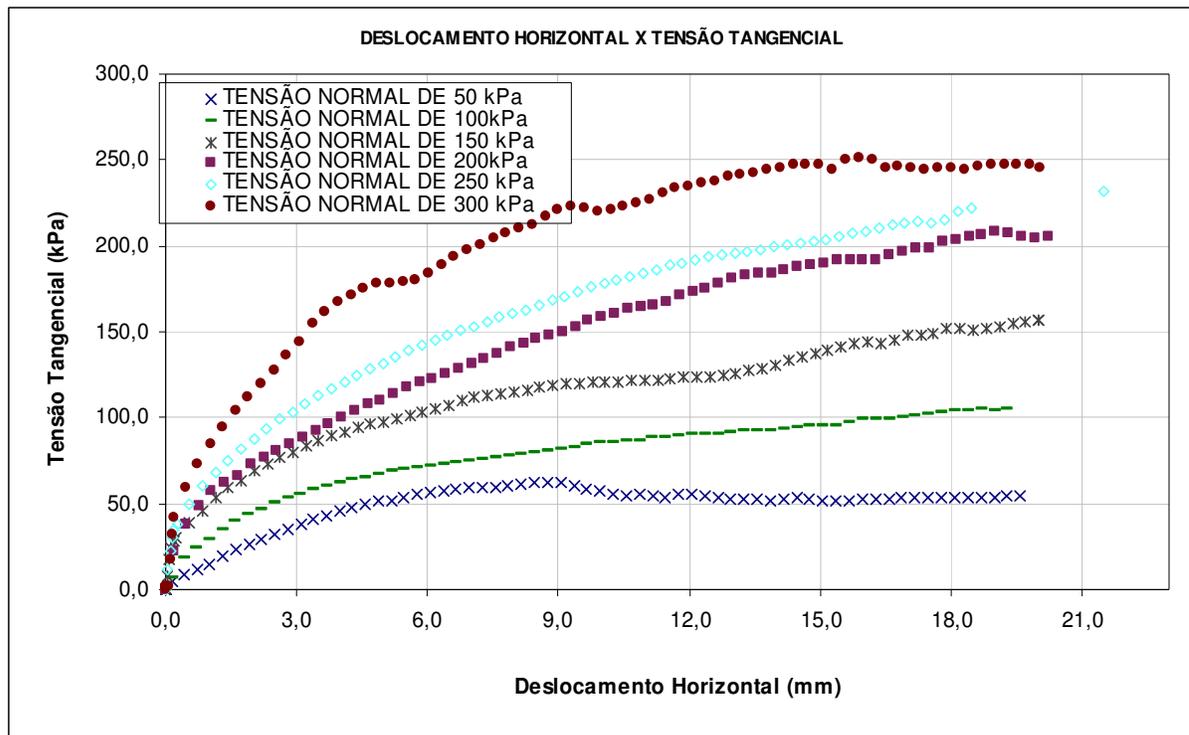


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal

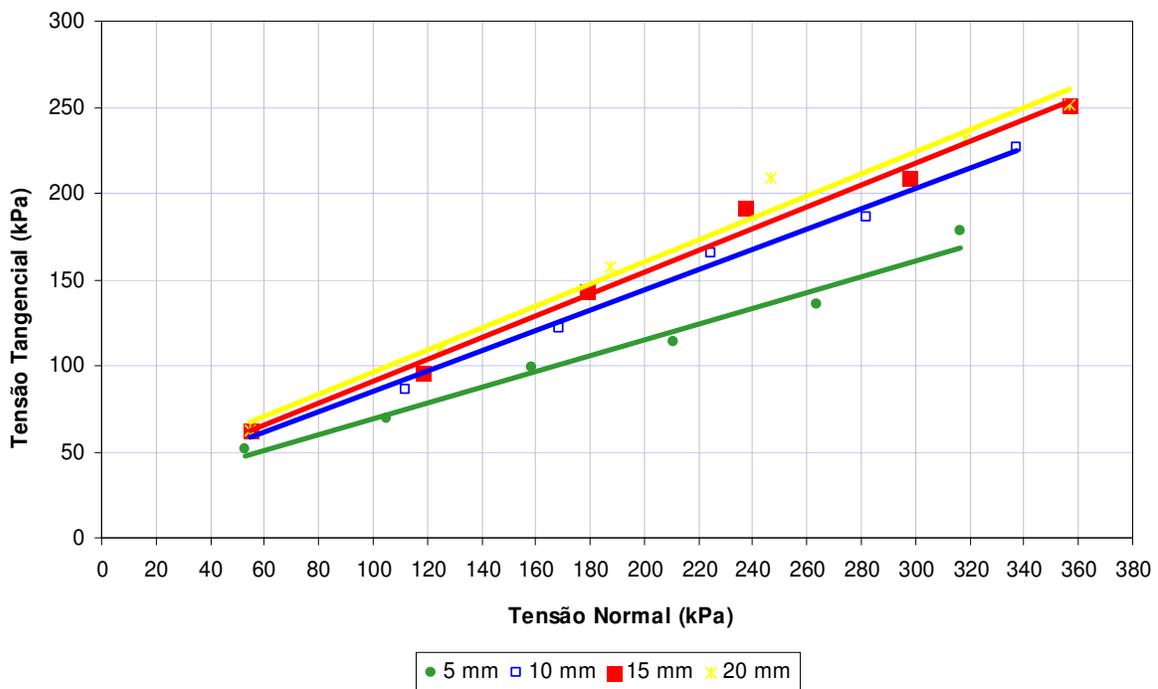


(b) Envoltórias de resistência

Figura 5.13 – Cisalhamento direto com adição de 2% de cimento e envoltória de resistência

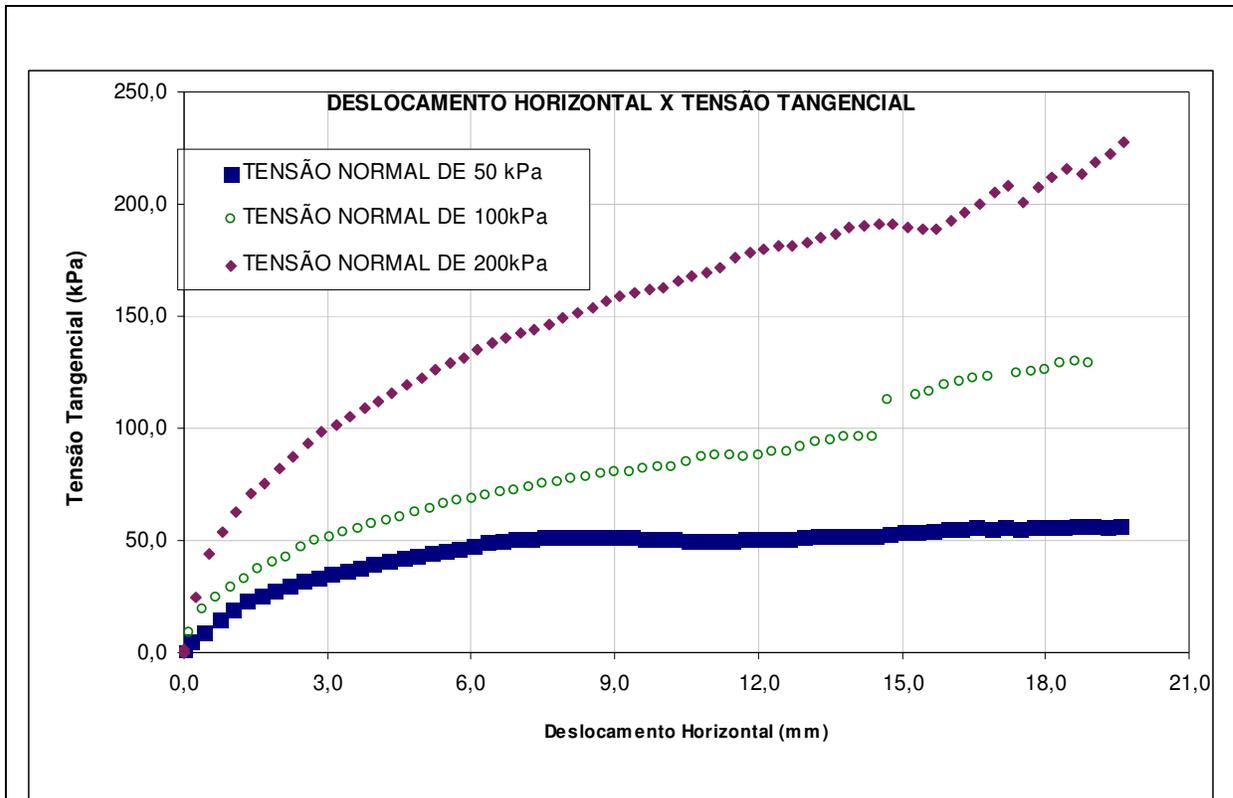


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal

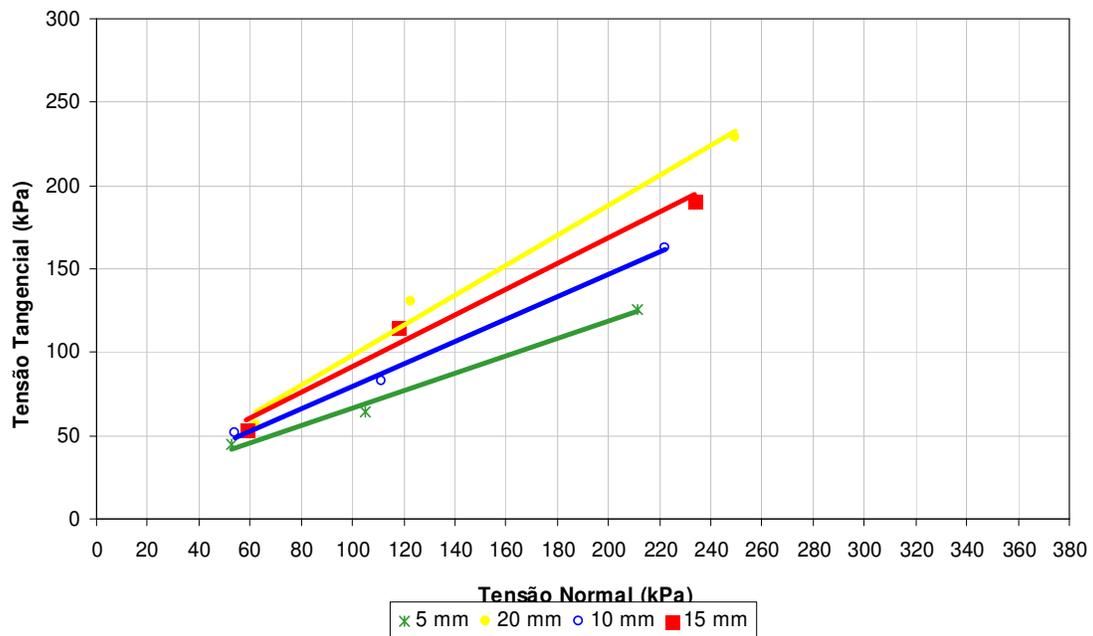


(b) Envoltórias de resistência

Figura 5.14 – Cisalhamento direto com a adição de 4% de cimento e a envoltória de resistência

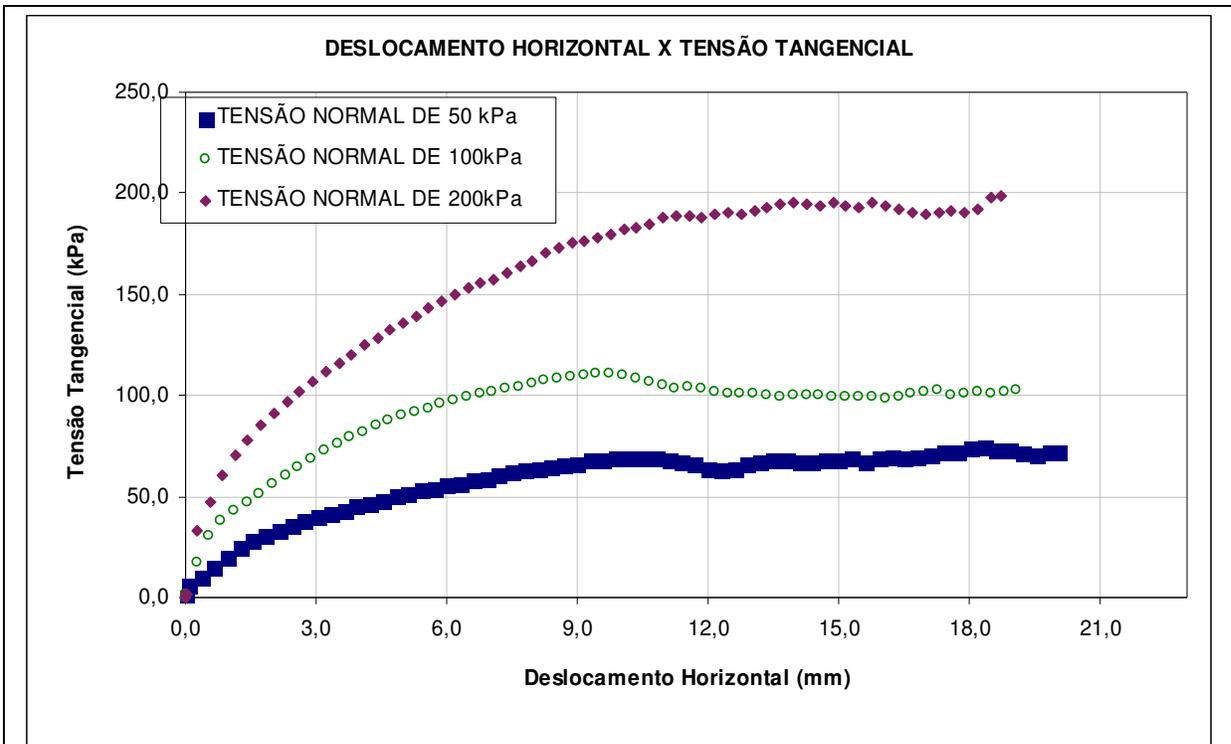


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal

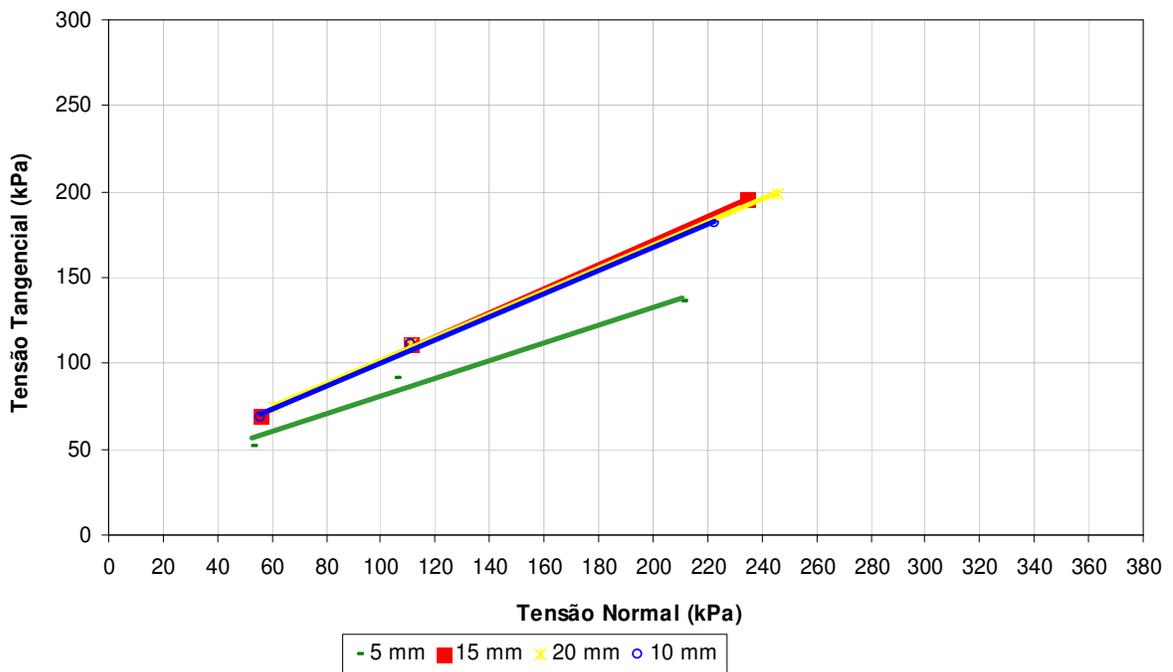


(b) Envoltórias de resistência

Figura 5.15 – Cisalhamento direto com a adição de 2% de cal e envoltória de resistência

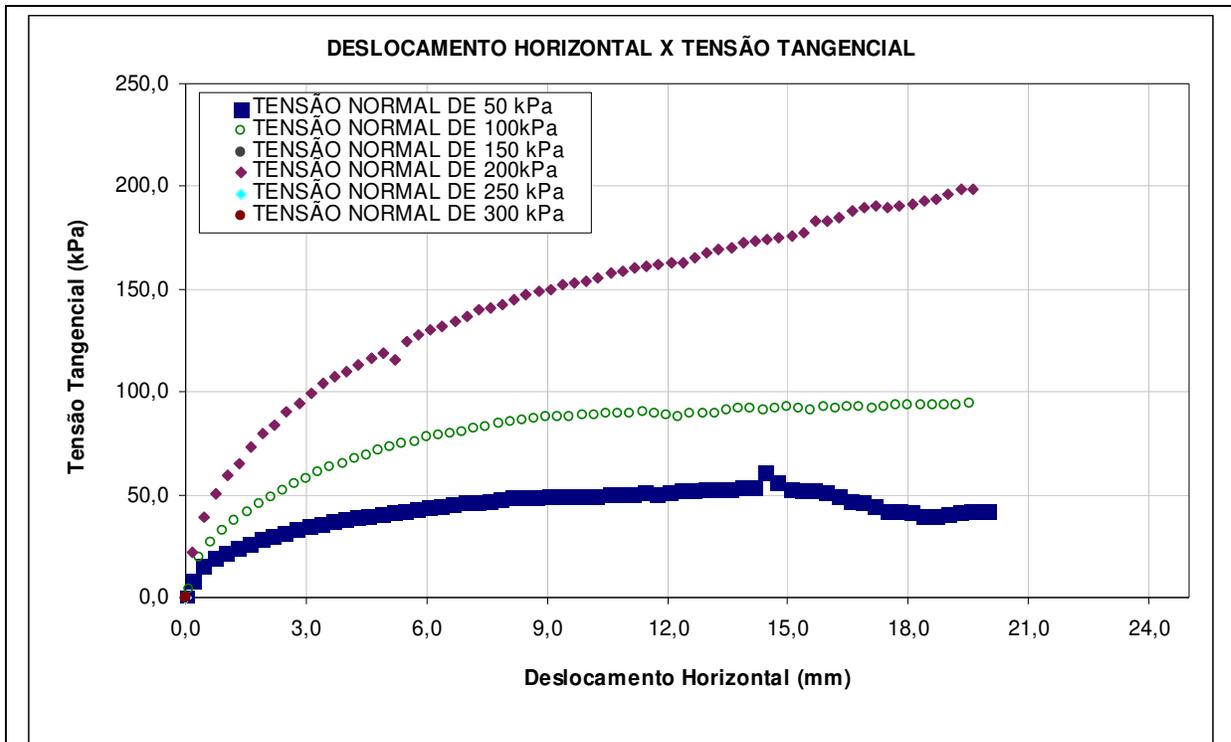


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal

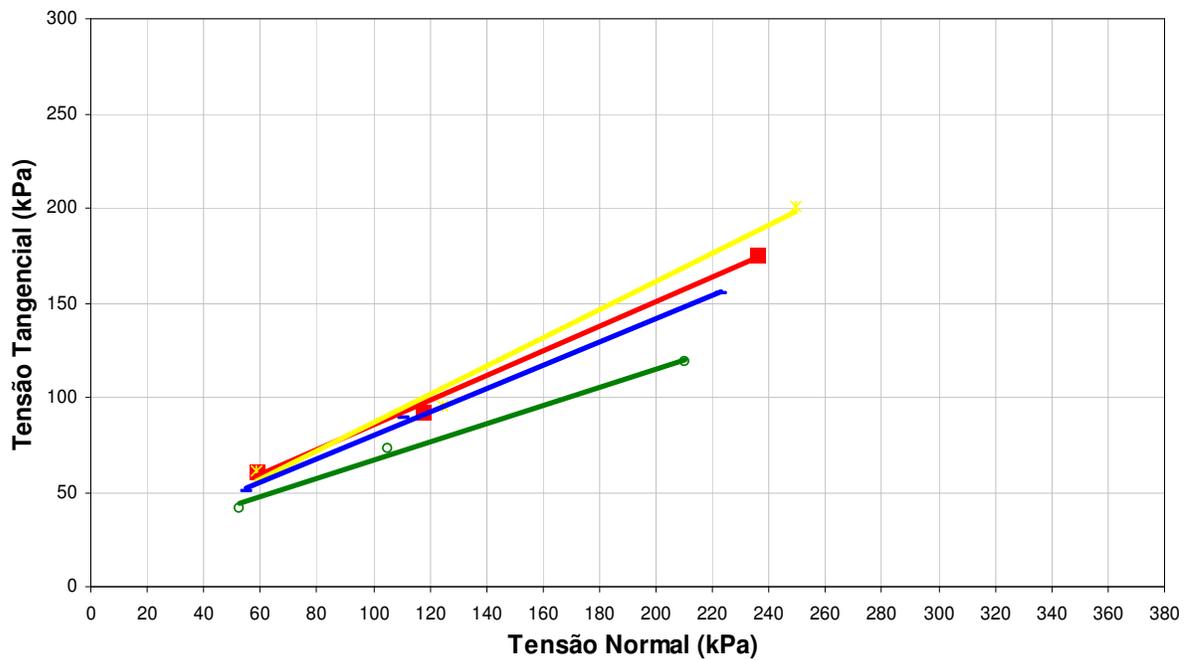


(b) Envoltórias de resistência

Figura 5.16 – Cisalhamento direto com a adição de 4% de cal e envoltória de resistência



(a) Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal



(b) Envoltórias de resistência

Figura 5.17 – Cisalhamento direto com a adição de 0,05% de Terrazyme e envoltória de resistência

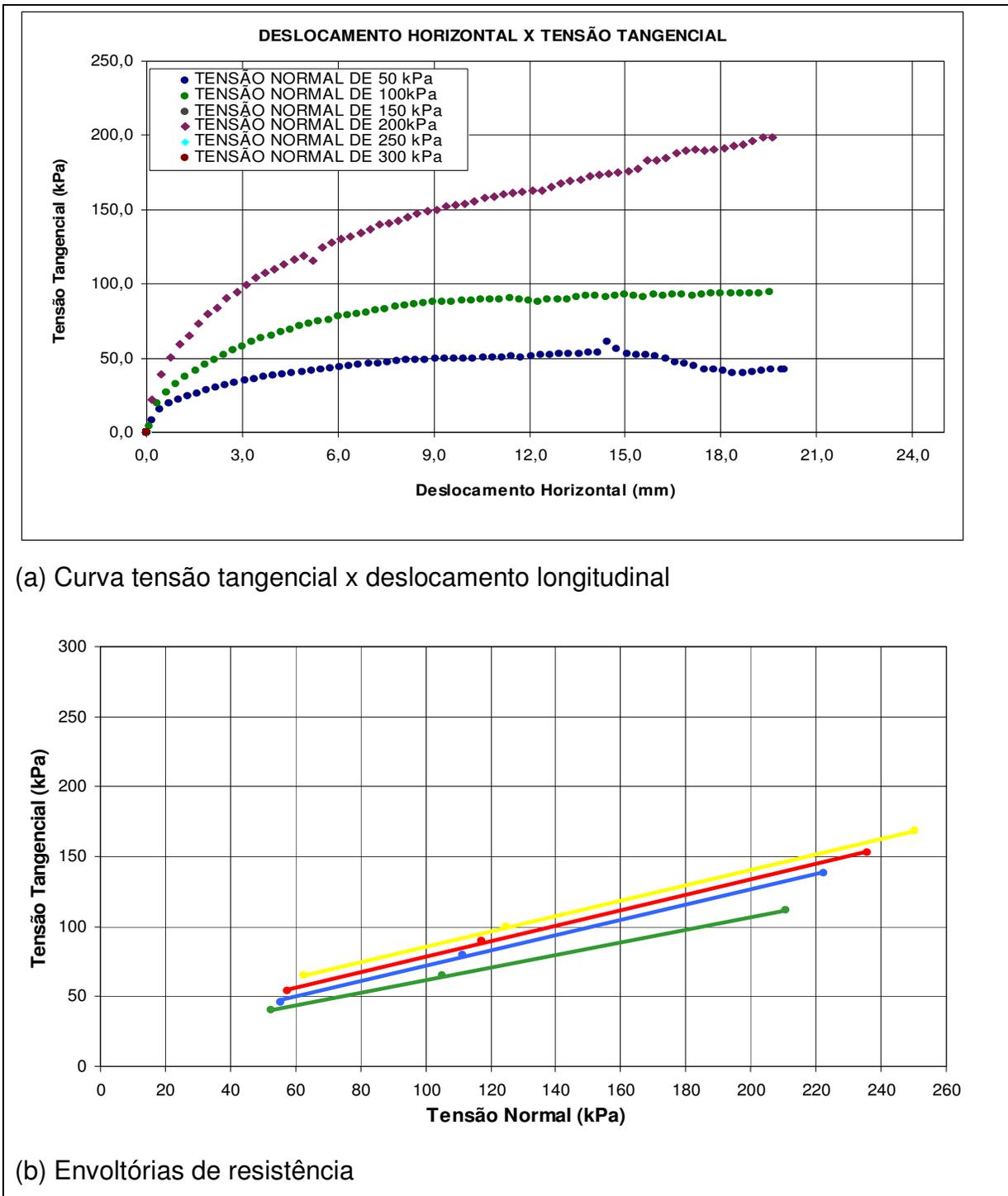
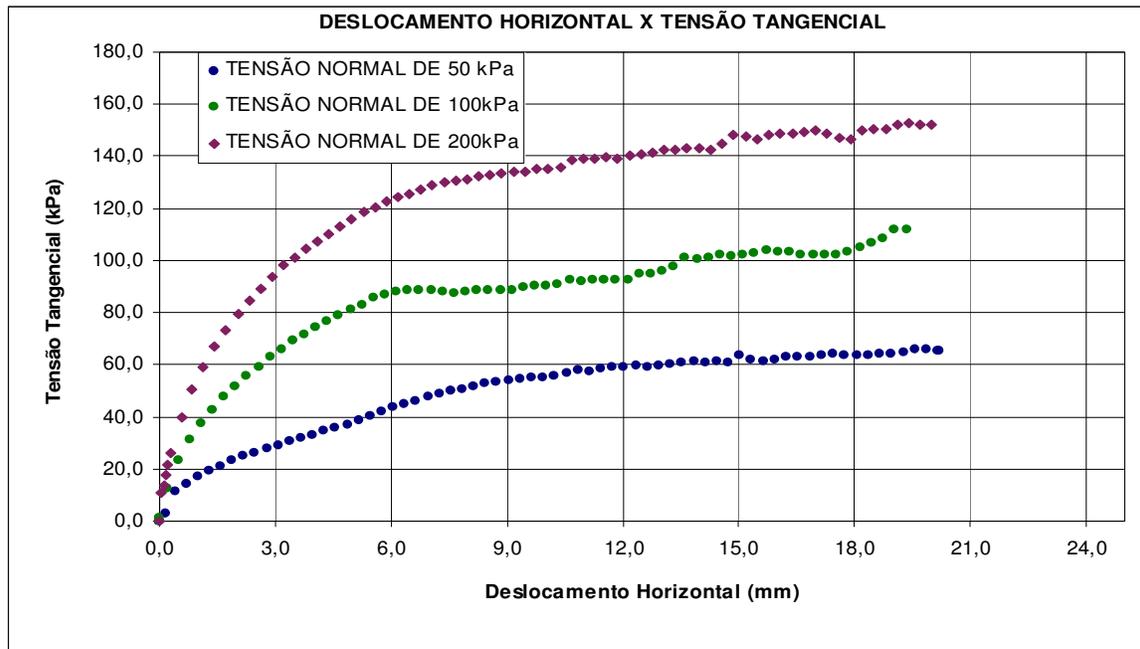
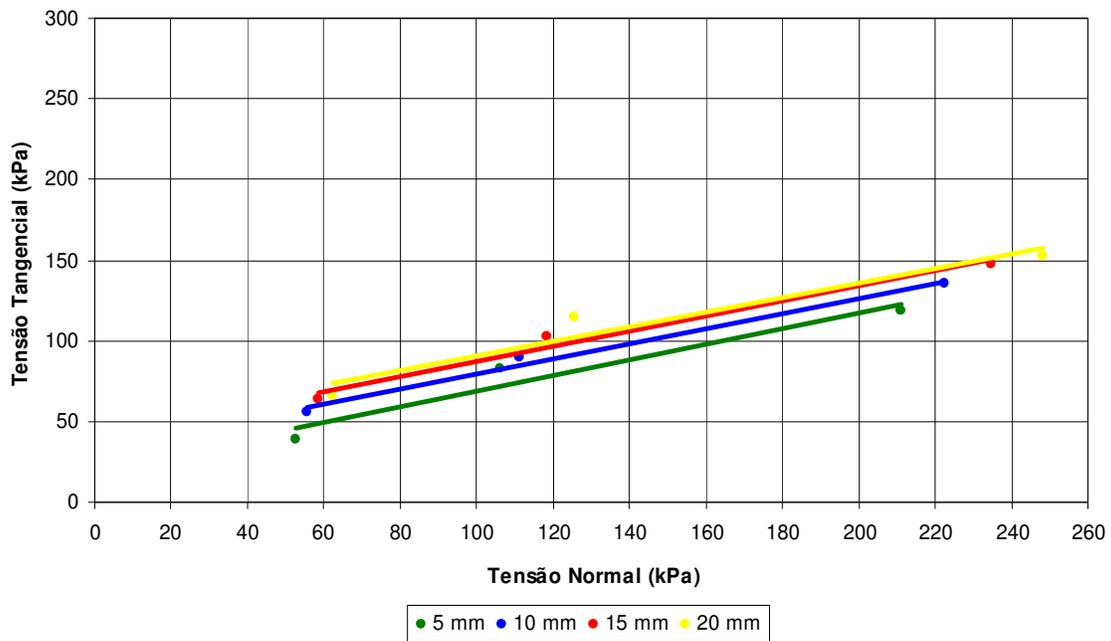


Figura 5.18 – Cisalhamento direto com a adição de 1,16% de Terrazyme e envoltória de resistência

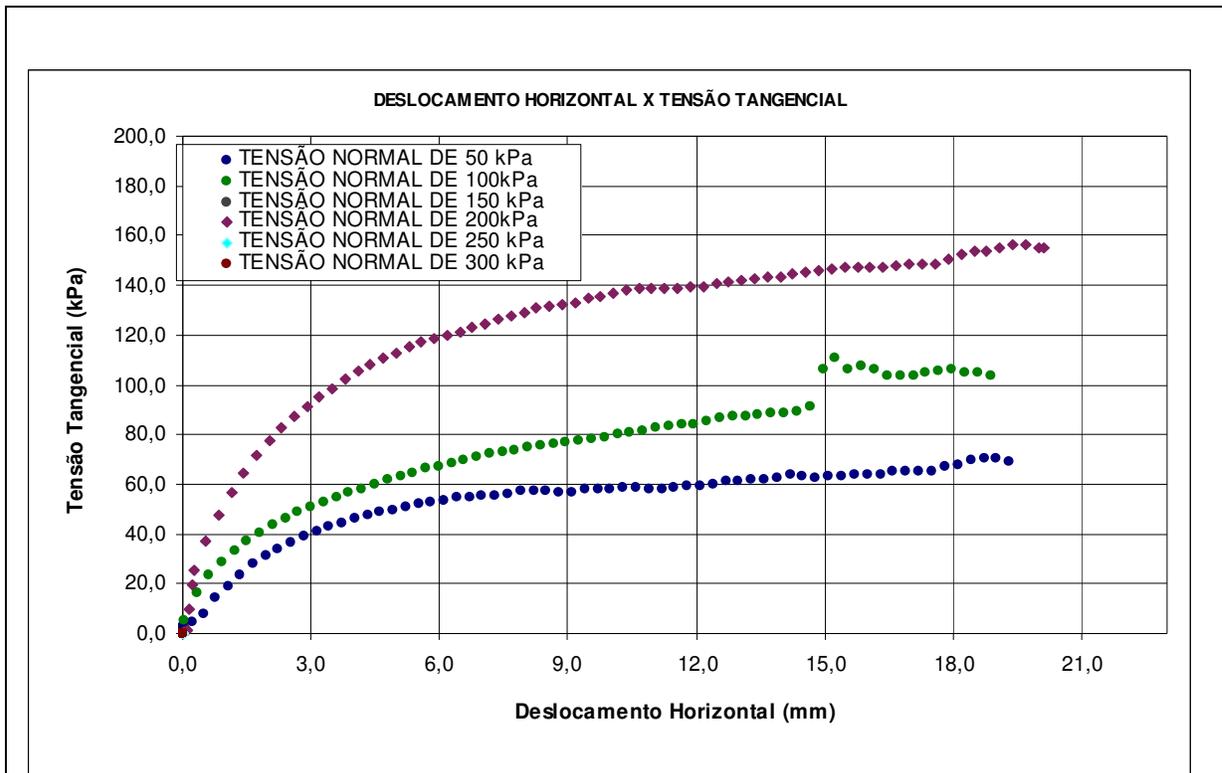


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal

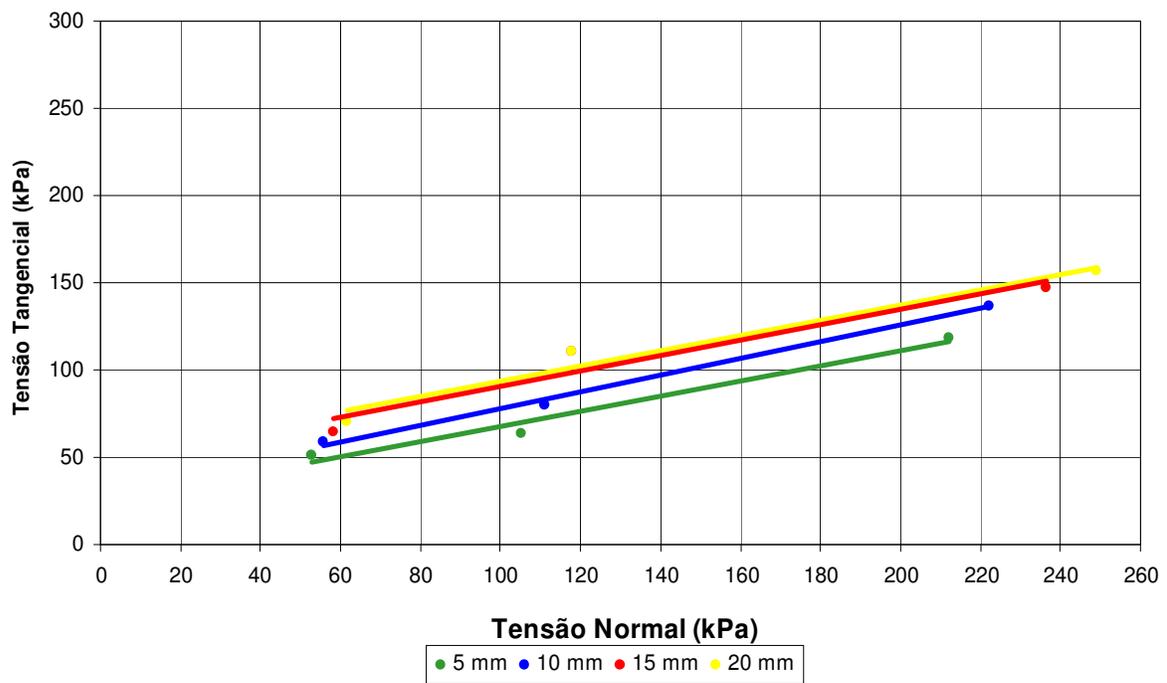


(b) Envoltórias de resistência

Figura 5.19 – Cisalhamento direto com a adição de 0,17% de Dynacal e envoltória de resistência

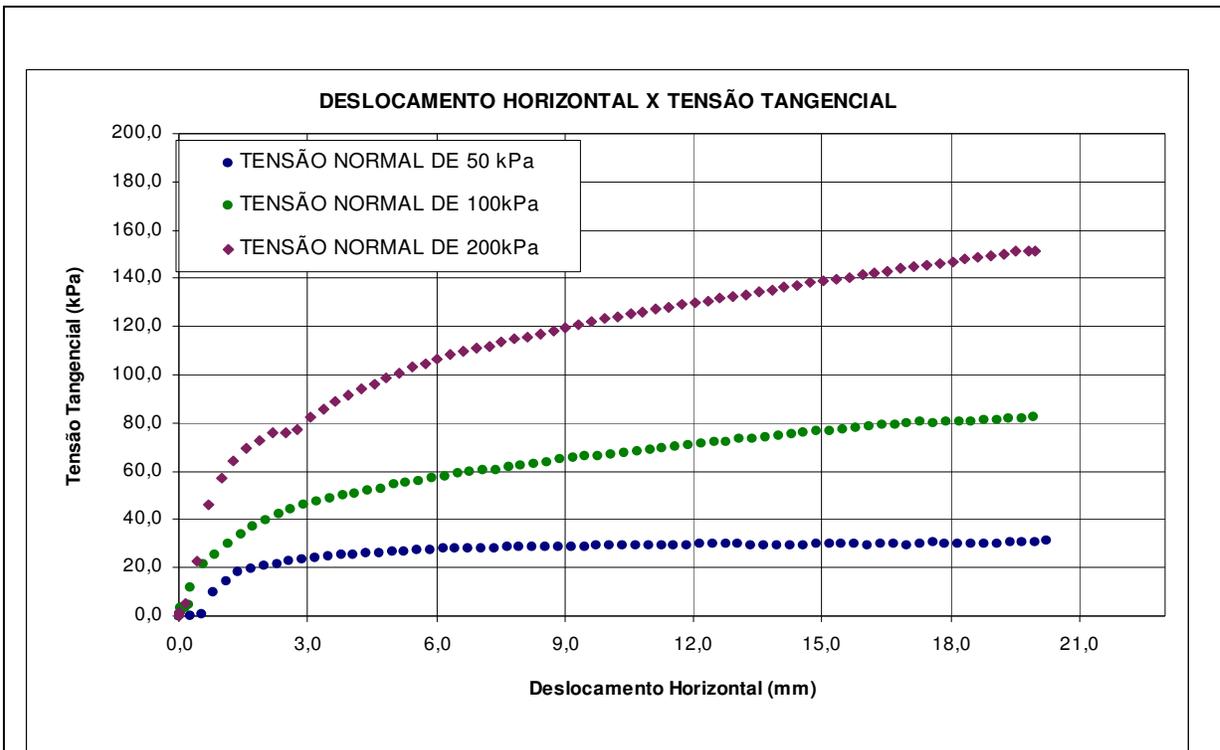


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal

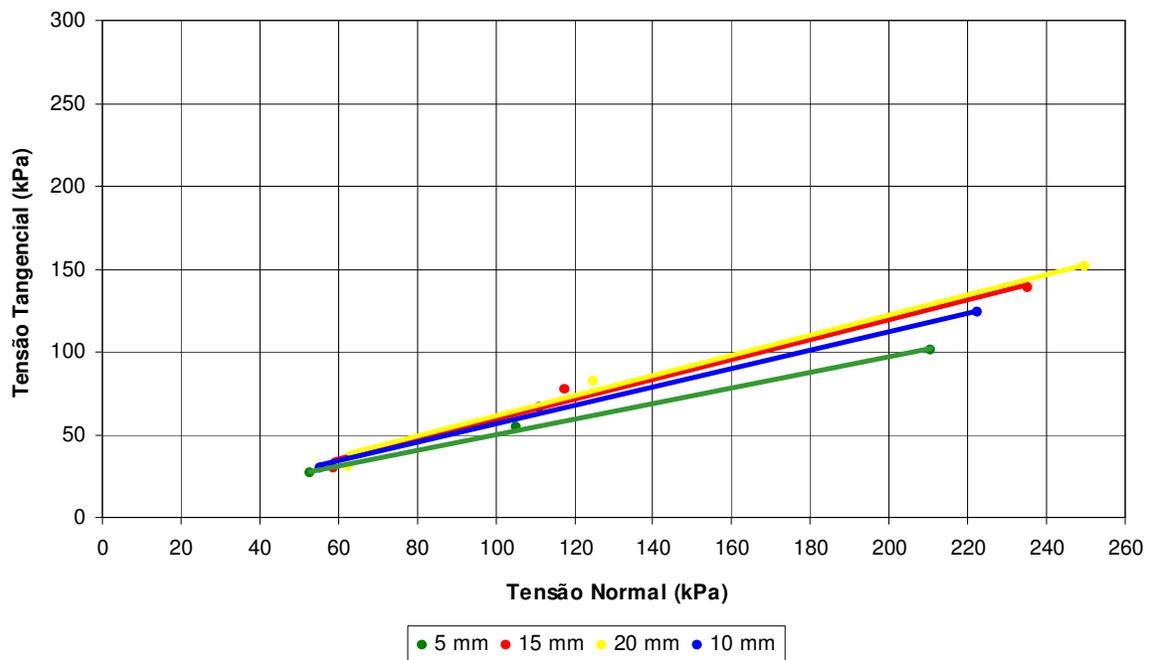


(b) Envoltórias de resistência

Figura 5.20 – Cisalhamento direto com a adição de 0,67% de Dynacal e envoltória de resistência

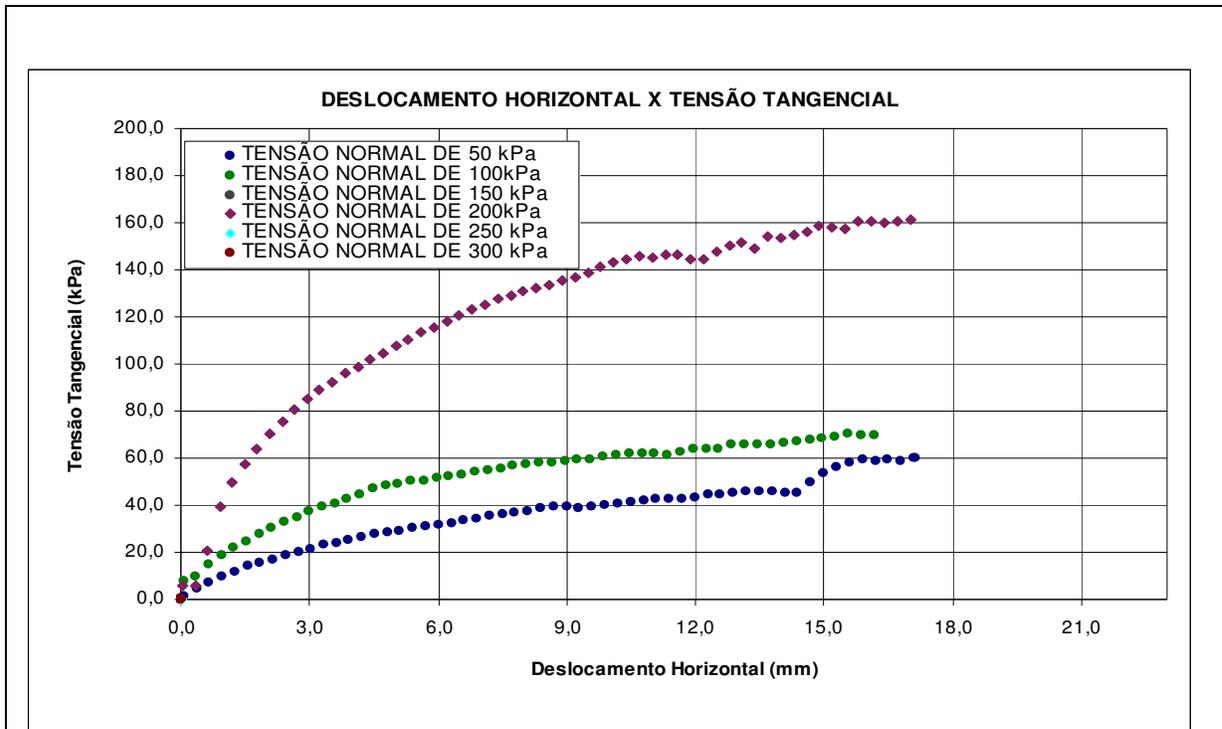


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal

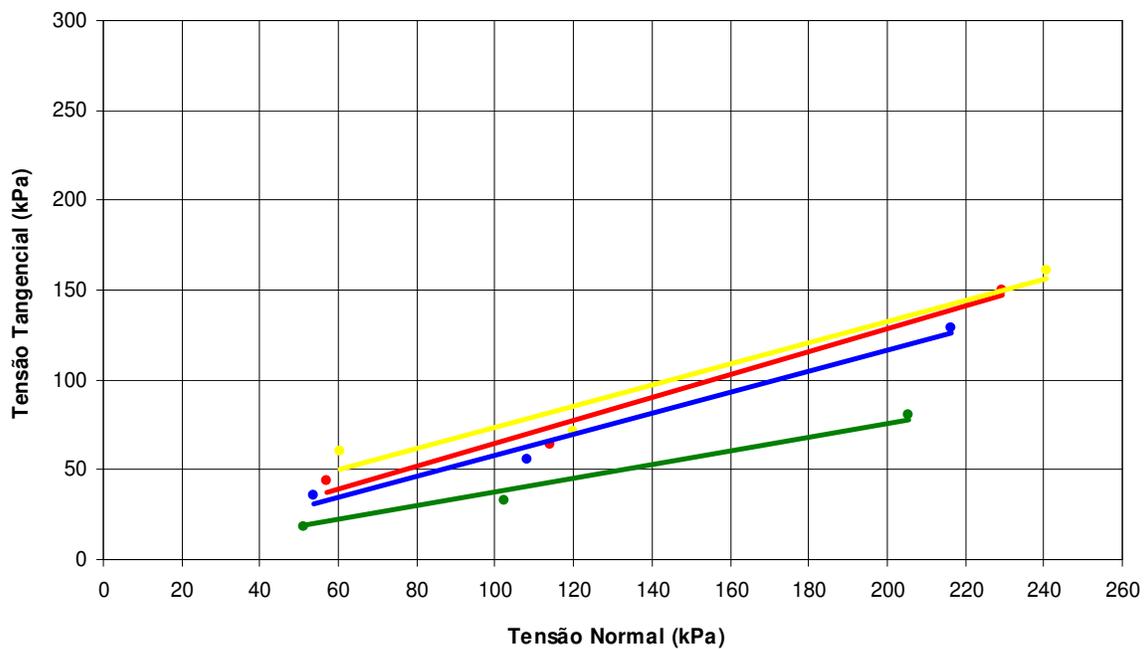


(b) Envoltórias de resistência

Figura 5.21 – Cisalhamento direto com a adição de 2% de Lignosulfonato e envoltória de resistência

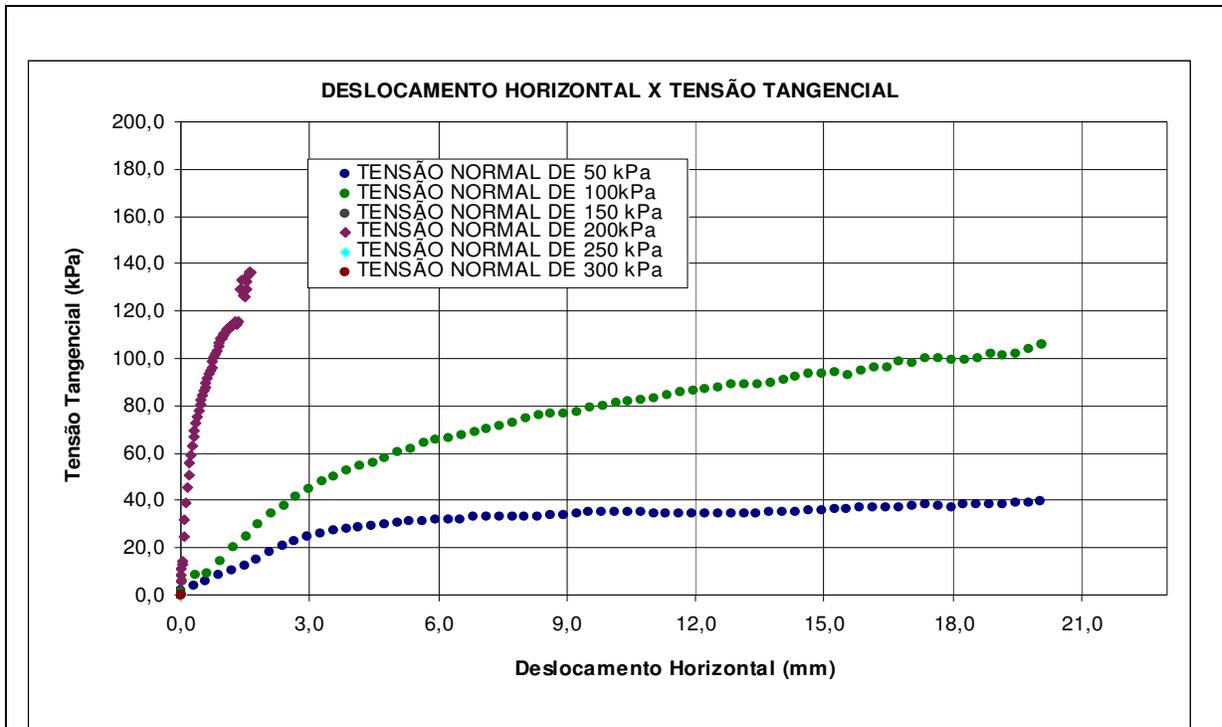


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal

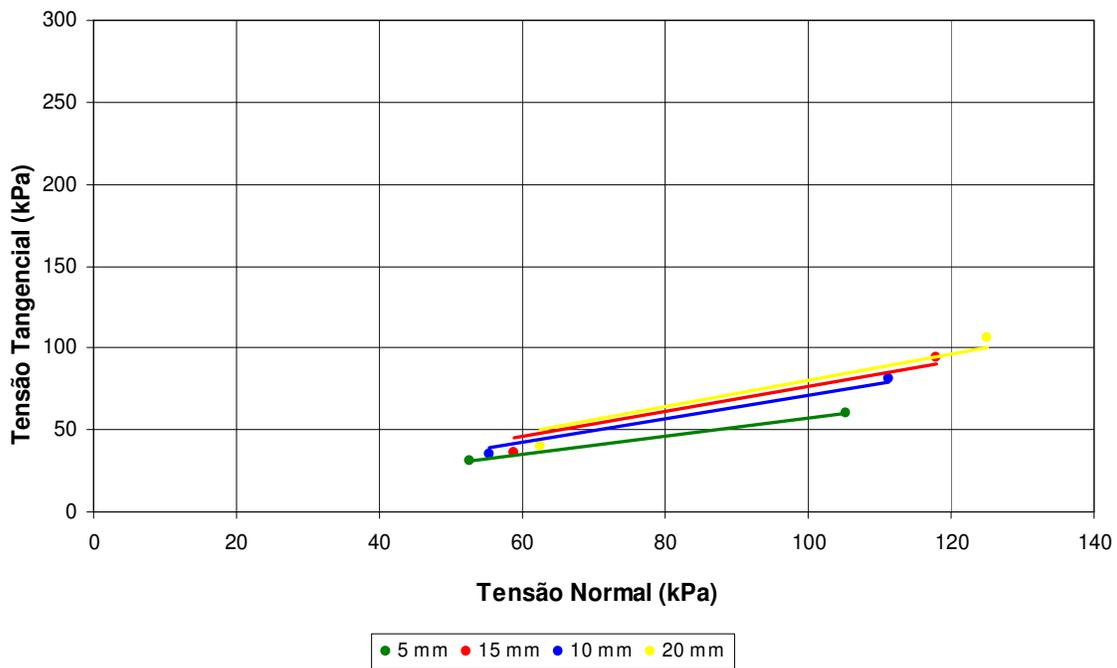


(b) Envoltórias de resistência

Figura 5.22 – Cisalhamento direto com a adição de 4% de Lignosulfonato e envoltória de resistência

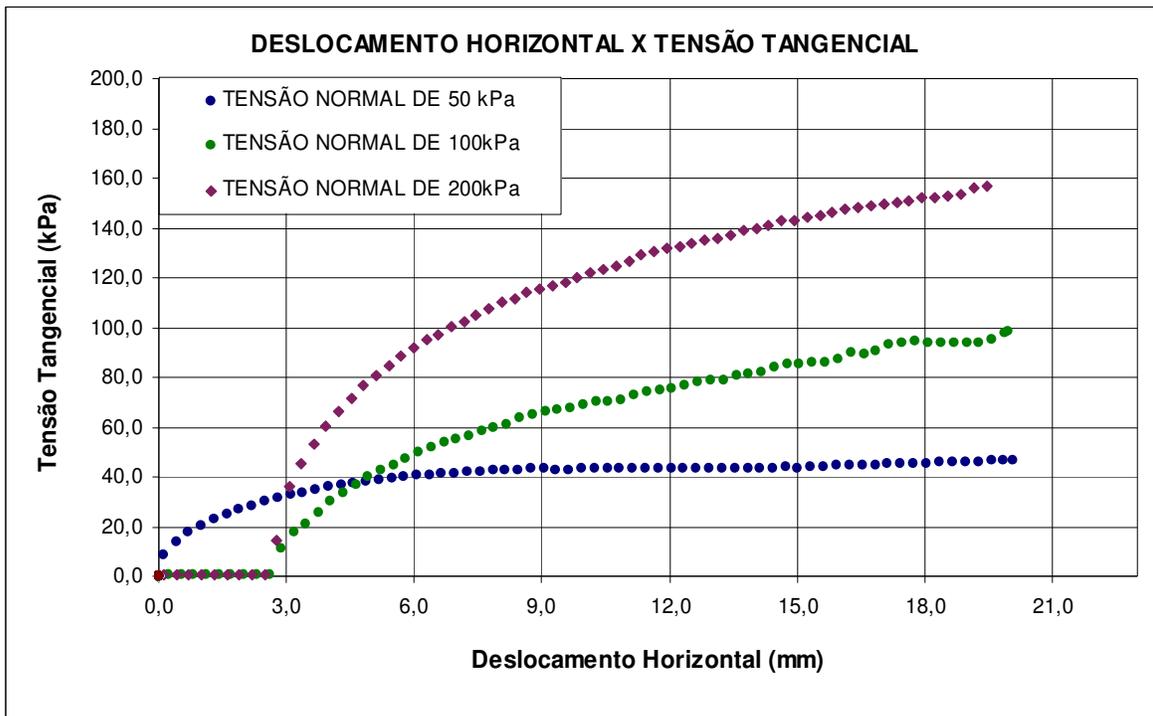


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal

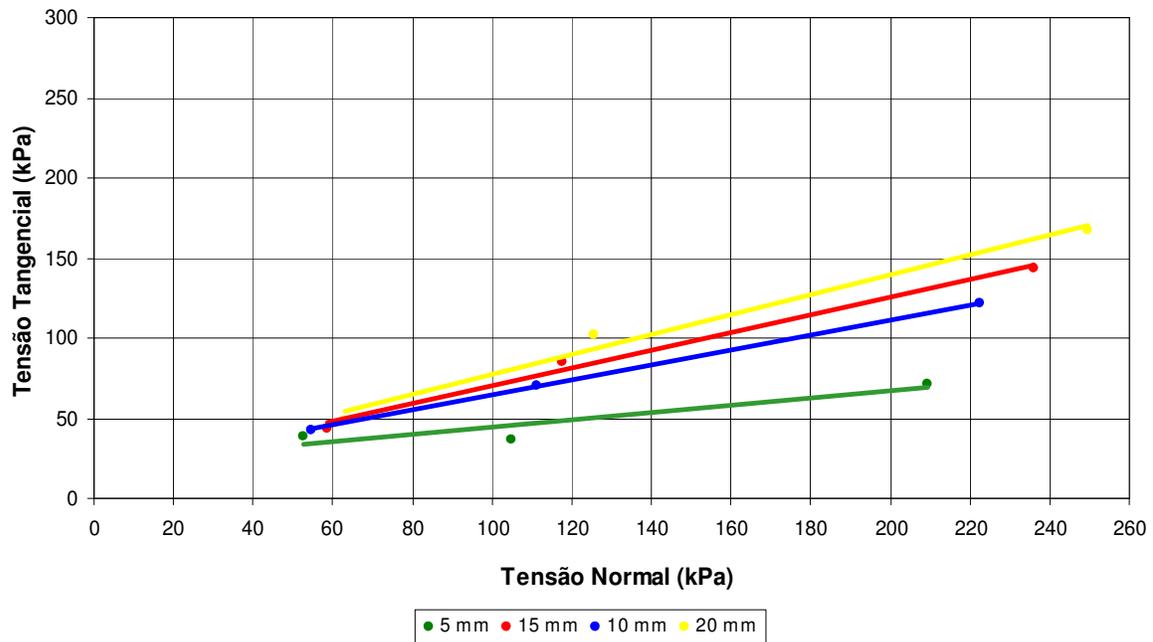


(b) Envoltórias de resistência

Figura 5.23 – Cisalhamento direto com a adição de 1,63% de EMC² e envoltória de resistência

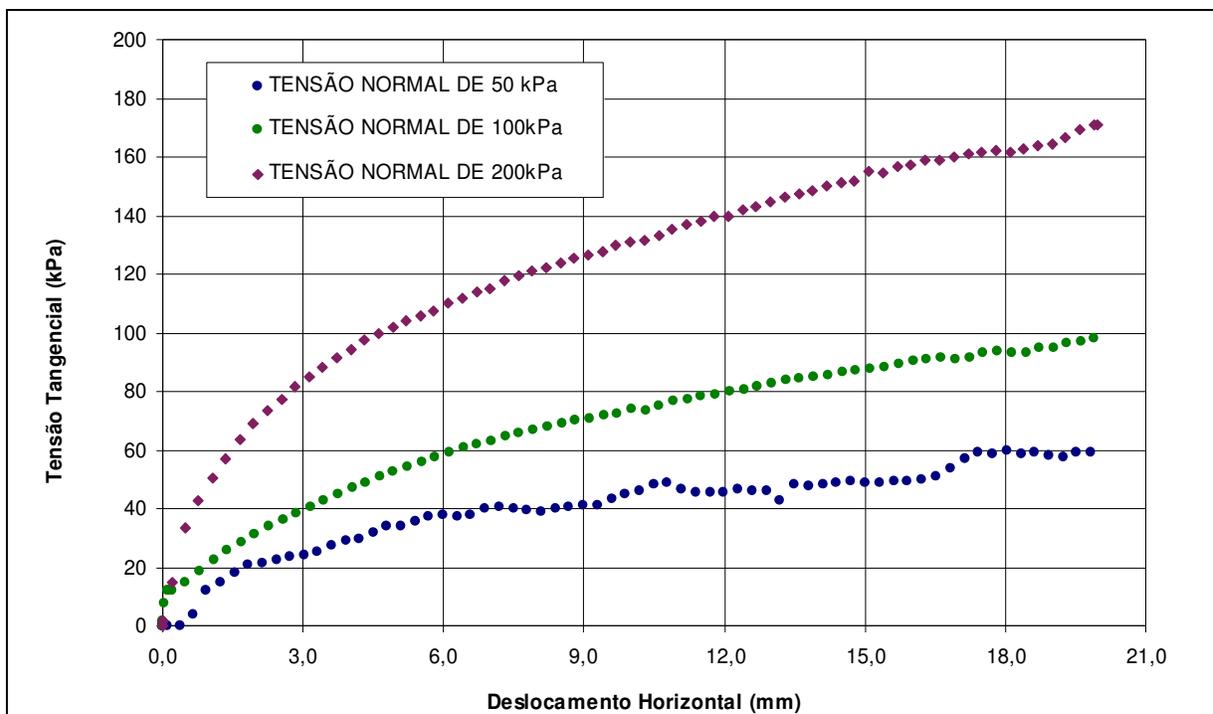


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal

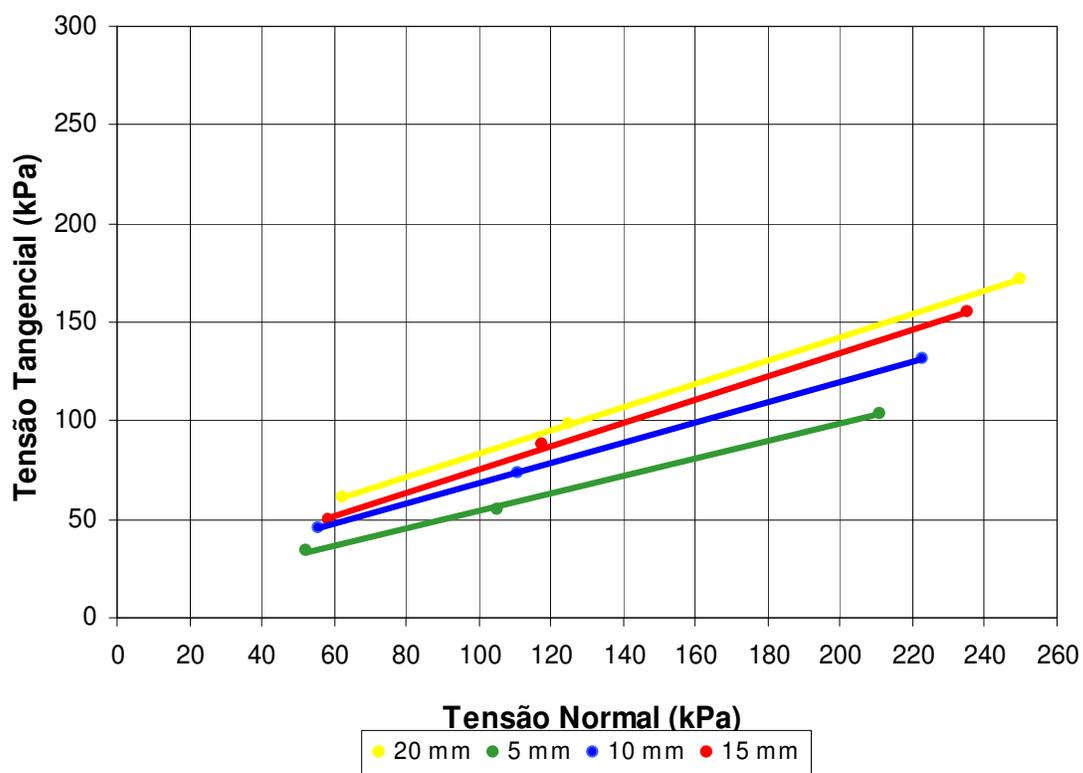


(b) Envoltórias de resistência

Figura 5.24 – Cisalhamento direto com a adição de 0,67% de EMC² e envoltória de resistência

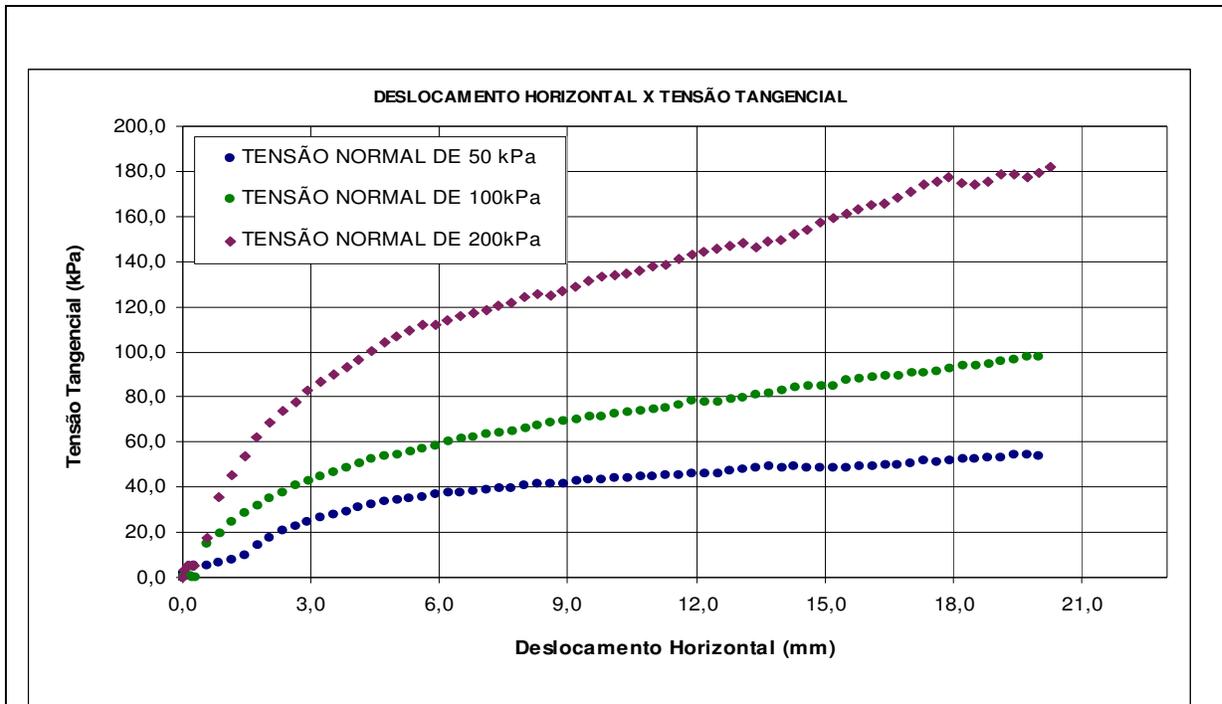


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal

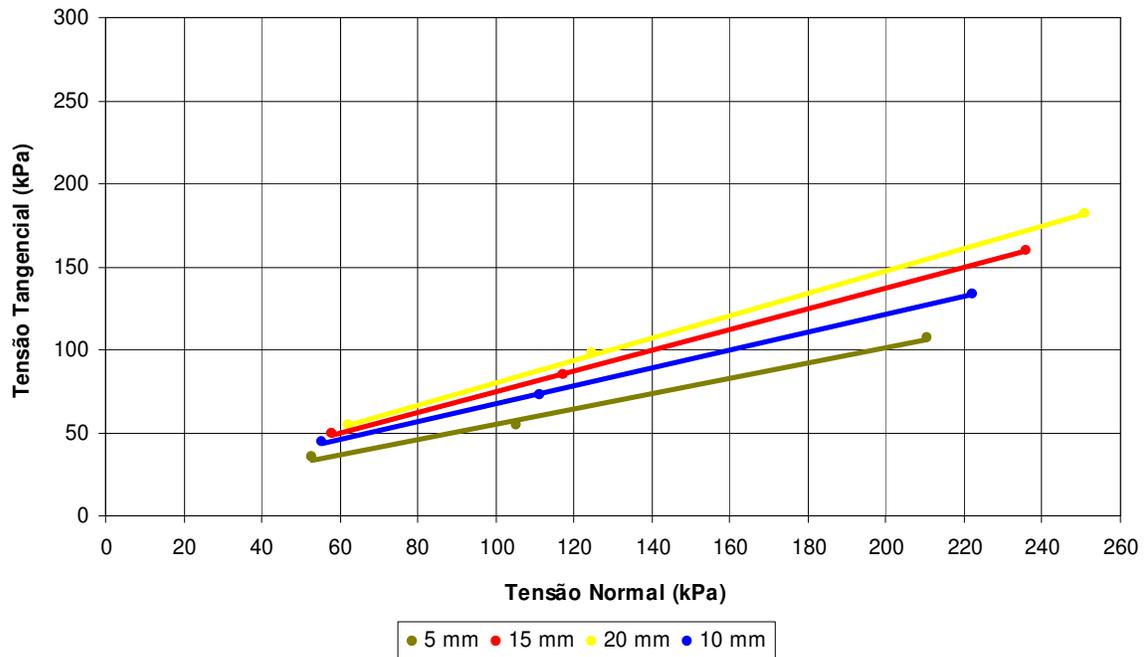


(b) Envoltórias de resistência

Figura 5.25 – Cisalhamento direto com a adição de 0,67% de Ecolopavi e envoltória de resistência

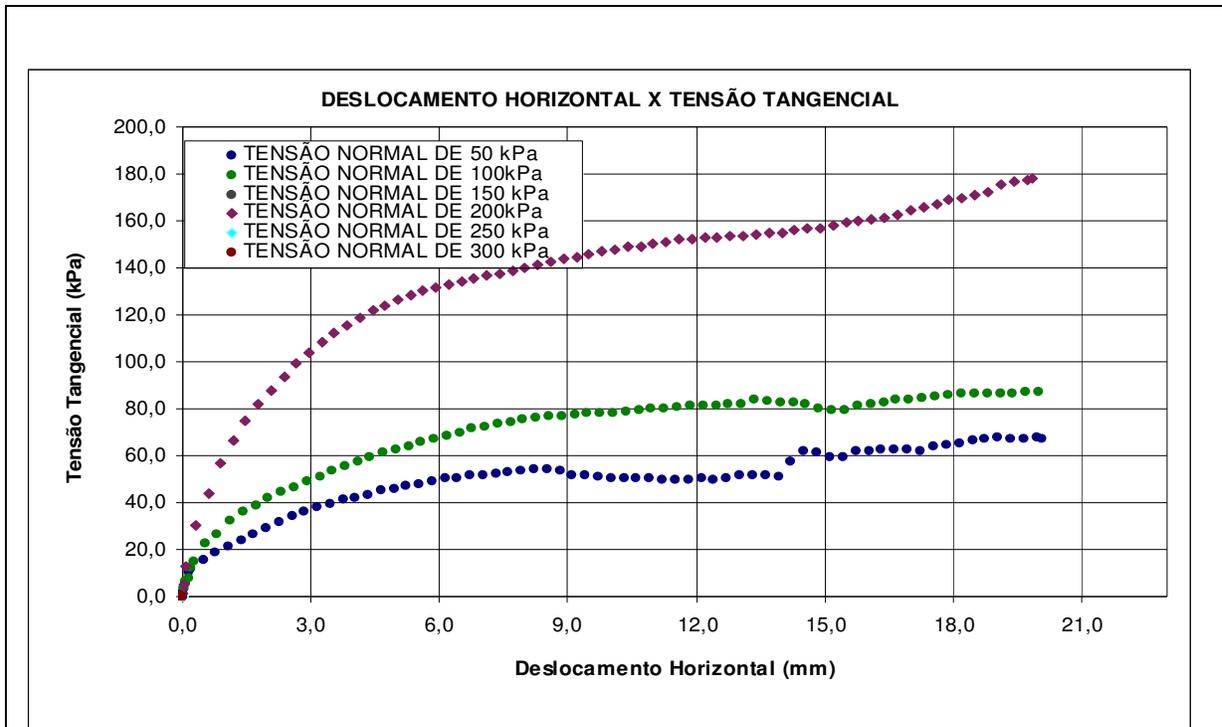


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal

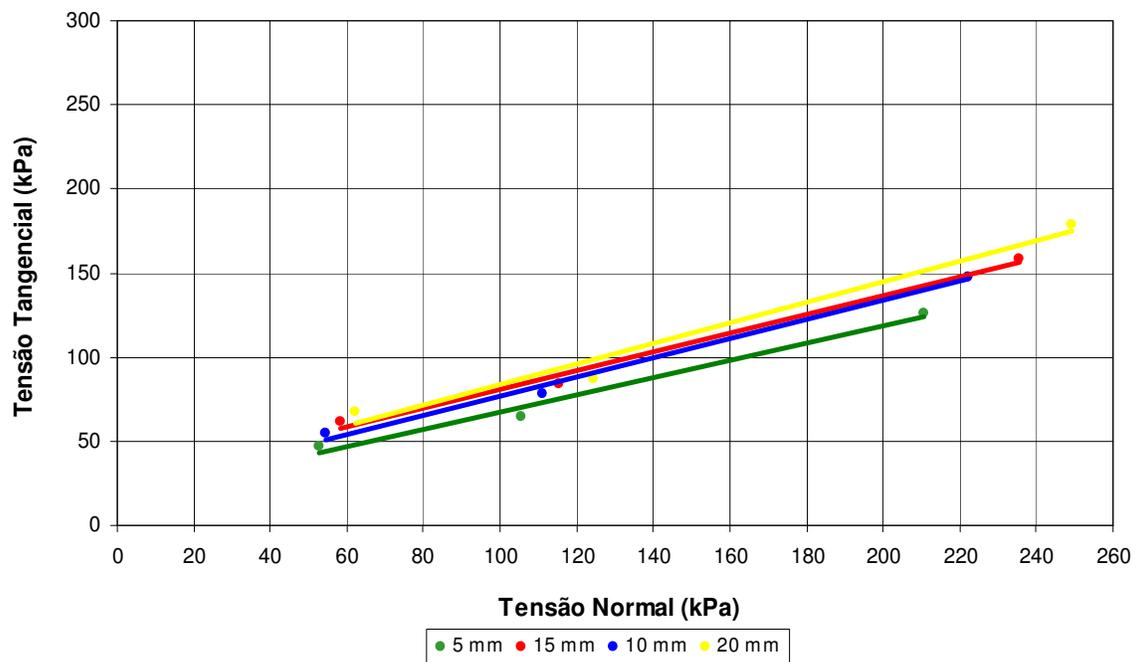


(b) Envoltórias de resistência

FIGURA 5.26 – Cisalhamento direto com a adição de 1,52% de Ecolopavi e envoltória de resistência

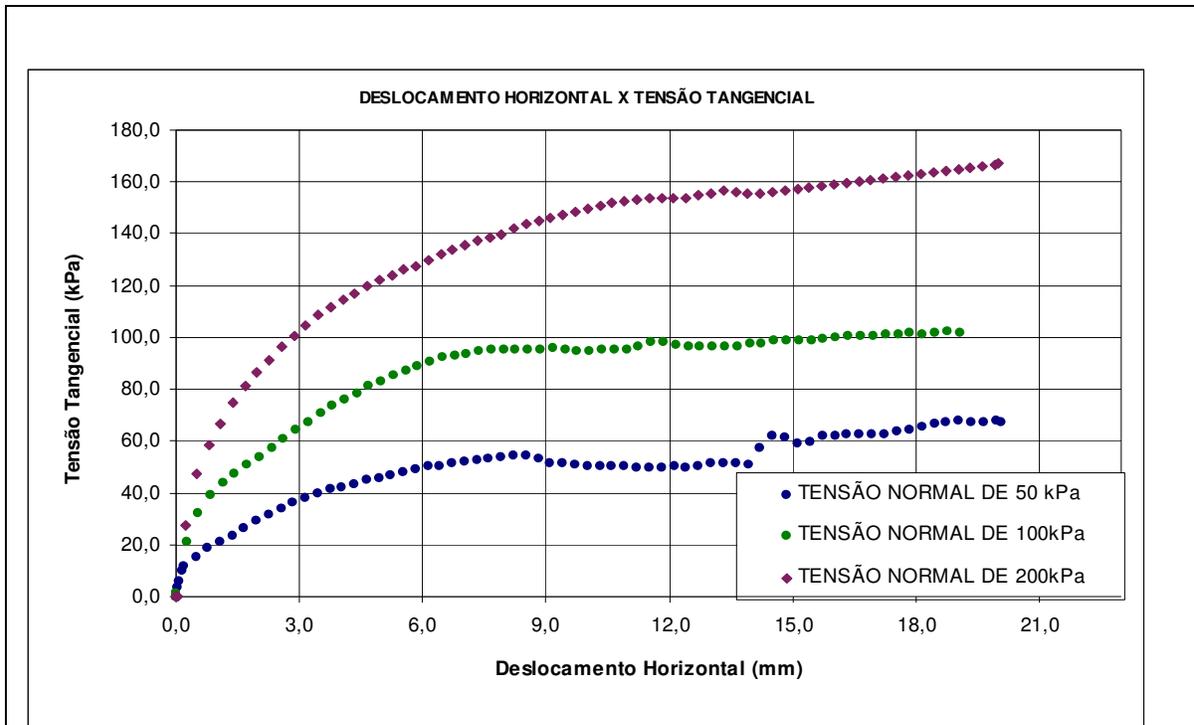


(a) Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal

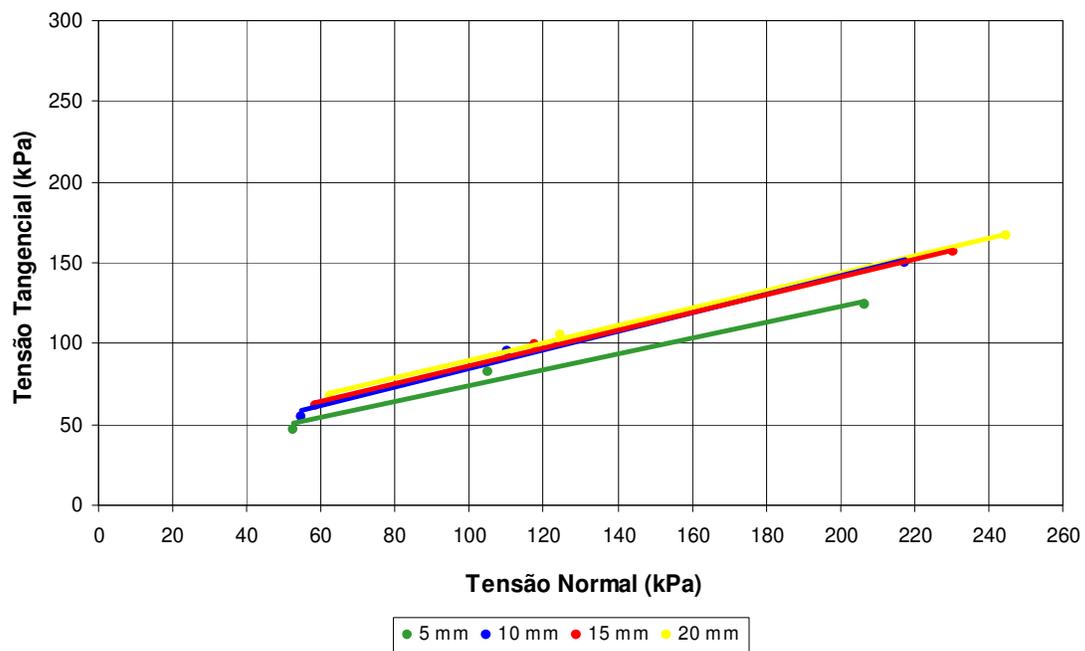


(b) Envoltórias de resistência

Figura 5.27 – Cisalhamento direto com a adição de 0,67% de Homy solo e envoltória de resistência



(a) Curva tensão tangencial x deslocamento longitudinal



(b) Envoltórias de resistência

Figura 5.28 – Cisalhamento direto com a adição de 0,17% de DS-328 e envoltória de resistência

O Quadro 24 mostra uma comparação entre os parâmetros de resistência obtidos no ensaio de cisalhamento direto com os aditivos utilizados.

Quadro 24 – Comparação entre os parâmetros de resistência obtidos com os aditivos

Aditivo	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Solo puro	8,82	28,1
Cimento 2%	4,98	26,53
Cimento 4%	23,1	24,7
Cal 2%	13,82	27,64
Cal 4%	29,19	27,39
Terrazyme 0,05%	19,00	25,7
Dynacal 0,17%	20,5	25,8
Dynacal 0,67%	23,6	23,6
Lignosulfonato 2%	4,81	30,25
Lignosulfonato 4%	4,81	30,25
EMC ² 1,63%	1,2	29,3
Ecolopavi 0,67%	4,87	25,15
Ecolopavi 1,52%	8,81	24,71
Homy solo 0,67%	15,60	27,34
DS – 328 0,17%	25,26	26,01

3) Compressão Simples

Para a realização do ensaio de compressão simples utilizou-se a Norma ASTM D 5102/96. Foram rompidos quatro corpos de prova com as respectivas adições de Cimento e Cal. Três corpos de prova para Cimento, cal, Terrazyme, Dynacal, Lignosulfonato, EMC², Ecolopavi, Homy solo e DS-328. Dois para o teor de Ecolopavi 0,67% as quais são mostradas no Quadro 25 a seguir.

Quadro 25 – Resultados obtidos no ensaio de compressão simples

Material	Resistência (kPa)	Deformação específica (%)	Umidade (%)	Peso Específico (kN/m³)
Cimento 2%	530	2,65	23,9	1,62
	530	2,4	23,9	1,66
	370	1,15	23,9	2,43
	330	1,48	23,9	1,65
Média	440	1,92	23,9	1,84
Cimento 4%	900	2,48	14,7	1,50
	920	3,07	14,7	1,53
	1320	3,07	14,7	1,57
Média	1046,67	2,87	14,7	1,53
Cal 2%	417	1,74	23,7	1,55
	398	1,5	23,7	1,67
	409	1,72	23,7	1,59
Média	408	1,65	23,7	1,60
Cal 4%	137	0,56	25,3	1,55
	217	1,63	25,3	1,49
	305	2,82	25,3	1,58
	95	1,06	25,3	1,52
Média	188,5	1,52	25,3	1,54
Terrazyme 0,05%	829	2	27,3	1,91
	749	2	27,3	1,91
	677	3,25	27,3	1,67
Média	751,67	2,42	27,3	1,83
Terrazyme 1,16%	1317	3,25	18,9	1,71
	1167	2,75	18,9	1,56
	1008	4	18,9	1,63
Média	1164,00	3,33	18,9	1,63
Dynacal 0,17%	603	1,73	33,7	1,66
	491	1,48	33,7	2,00
	292	1,97	33,7	1,61
Média	462,00	1,73	33,7	1,76
Dynacal 0,67%	591	1,2	28,5	1,69
	957	2,4	28,5	1,75
	929	2,64	28,5	1,93
Média	825,67	2,08	28,5	1,79
Lignosulfonato VIXIL I 2%	820	6,5	27,5	1,80
	712	5	27,5	1,92
	679	4,25	27,5	1,68
Média	737	5,25	27,5	1,80
Lignosulfonato VIXIL I 4 %	1164	3,25	26,1	2,50
	768	2	26,1	2,36
	716	2	26,1	2,41
Média	882,67	2,42	26,1	2,42

Material	Resistência (kPa)	Deformação específica (%)	Umidade (%)	Peso Específico (kN/m³)
Emc² 0,67%	623	2,25	30,6	1,84
	605	2,75	30,6	1,57
	236	2,25	30,6	1,59
Média	488,00	2,42	30,6	1,67
Emc² 1,63%	1035	4,25	18,6	1,89
	974	4	18,6	1,86
	846	4	18,6	1,78
Média	951,67	4,08	18,6	1,84
Ecolopavi 0,67%	602	1,75	23,6	1,76
	356	2,5	23,6	1,75
Média	479,00	2,13	23,6	1,76
Ecolopavi 1,52%	2227	3,42	21,0	2,62
	1597	2,29	21,0	1,28
	1199	3,51	21,0	2,07
Média	1674,33	3,07	21,0	1,99
Homy Solo 0,67%	1980	3,25	22,9	1,70
	1707	3	22,9	1,74
	1465	2,75	22,9	1,68
Média	1717,33	3,00	22,9	1,70
DS - 328 0,17%	2224	3,19	25,3	1,68
	1357	2,75	25,3	1,69
	1088	2,47	25,3	1,64
Média	1556,33	2,80	25,3	1,67

CAPÍTULO 6

DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Discussão e análise dos resultados obtidos na mistura solo - fibras

- Compactação

As curvas obtidas nos ensaios de compactação do solo puro A e com os respectivos reforços são apresentadas na figura 6.1. De modo geral percebe-se que ocorreu uma redução no teor de umidade ótima e um aumento da massa específica aparente seca. Apenas para as adições de 0,5% de sisal, 0,5% de PET, 1,0% de polipropileno e 5% de pneu é que ocorreu uma redução da massa específica aparente seca.

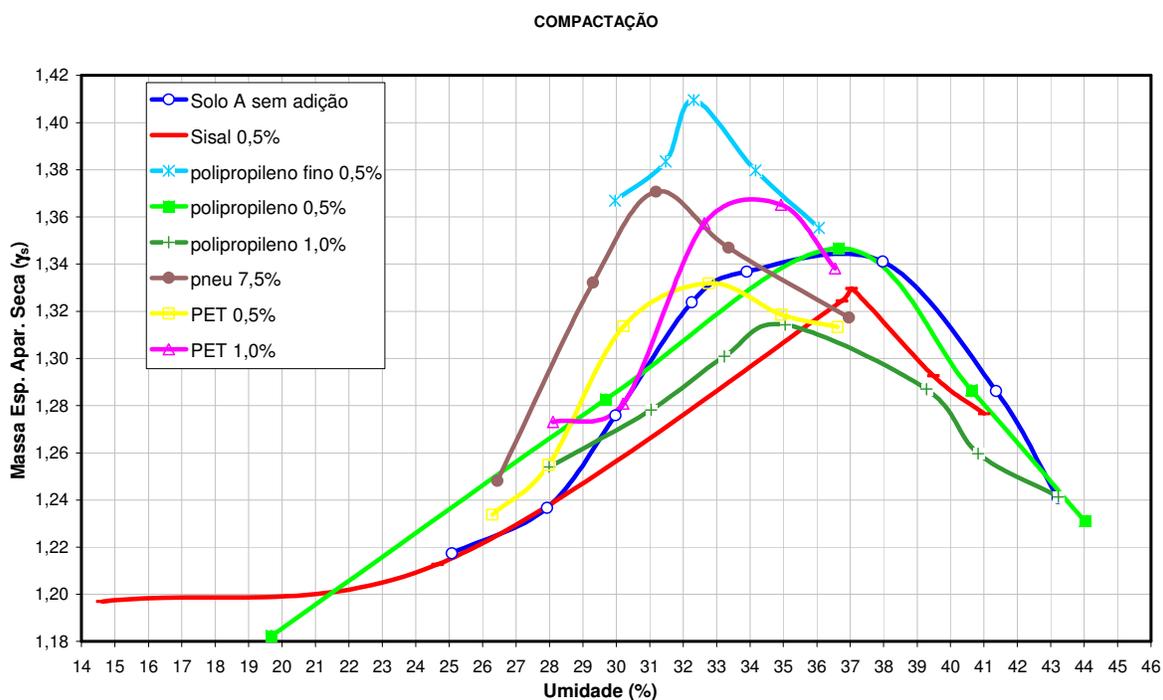


Figura 6.1 – Curvas de compactação

- Expansibilidade e ISC

No Quadro 26 está registrado um resumo dos ensaios onde são apresentados os resultados de expansão e ISC para os solos A e B no estado puro moldados na umidade ótima assim como para os solos com as respectivas adições.

O solo A puro apresentou uma expansão de 0,52% e ICS de 12,03%. As adições de 0,5% e 1,0% de polipropileno concrefil proporcionaram um melhor Índice de Suporte Califórnia 1,94 % e 1,66 %, respectivamente.

O solo B puro apresentou ISC de 16,09% e expansão de 3,31%. Para ele as adições representaram menor expansão e a adição de 2 de PET apresentou maior ISC (29,28%).

Quadro 26 – Resumo dos ensaios CBR

Solo	Umidade (%)	Massa específica Aparente seca (g/cm ³)	Expansão (%)	ISC (%)
A	36,5	1,322	0,52	12,03
A + 0,5% SISAL	36,7	1,328	0,72	12,18
A + 0,5% PET	32,5	1,427	0,66	17,04
A + 1,0% PET	32,1	1,415	0,78	14,67
A + 0,5% polipropileno fino	32,3	1,445	0,33	18,39
A + 0,5% polipropileno	36,2	1,329	1,94	12,54
A + 1,0% polipropileno	34,1	1,286	1,66	15,24
B	32,4	1,460	3,31	16,09
B + 2,0% PET	30,8	1,450	0,27	29,28
B + 7,5% pneu	31,2	1,385	0,17	11,52

- Resistência ao Cisalhamento

No Quadro 27 são mostrados os resultados da coesão e do ângulo de atrito obtidos com o reforço realizado no solo tipo A e tipo B assim como com os próprios solos no estado puro. Dessa forma, pode-se realizar uma comparação dos desempenhos obtidos.

Quadro 27 – Comparação dos resultados de coesão e ângulo de atrito

Reforço	Coesão (KPa)	Ângulo de atrito (°)
Solo A sem reforço	35,8	23,9
Sisal 0,5%	0	31,2
PET 0,5%	13,3	21,7
PET 1%	34,8	24,5
Polipropileno Polycrret MF 0,5%	0	39,2
Polipropileno Concrefil 0,5%	34,5	37,6
Polipropileno Concrefil 1%	0	35,5
Pneu 5%	15,3	31,6
Pneu 7,5 %	0	28,1
Solo B sem reforço	15,1	27,4
PET 2%	2,8	28,8
Polipropileno Polycrret MF 0,5%	20,4	19,3

Pelos resultados apresentados no Quadro 27 percebe-se que em relação ao solo A não houve aumento de coesão, sendo que apenas as adições de 1% de PET e 0,5% de polipropileno Concrefil mantiveram um valor de coesão próximo do solo puro. Com relação ao solo B, o polipropileno Polycrret MF apresentou uma coesão maior em comparação com o solo puro.

No que diz respeito ao ângulo de atrito, praticamente em todas as adições, ele foi superior. Apenas na adição de 0,5% de PET é que ficou abaixo de 23,9°.

Na figura 6.2 são apresentadas comparações de resistência entre o material sem adição (solo A) e o material melhorado com fibras de sisal. O solo reforçado com fibras de sisal apresentou um acréscimo de resistência para tensões confinantes acima de 220 kPa. Por outro lado, o reforço provocou uma diminuição do parâmetro coesivo e um aumento do ângulo de atrito do material.

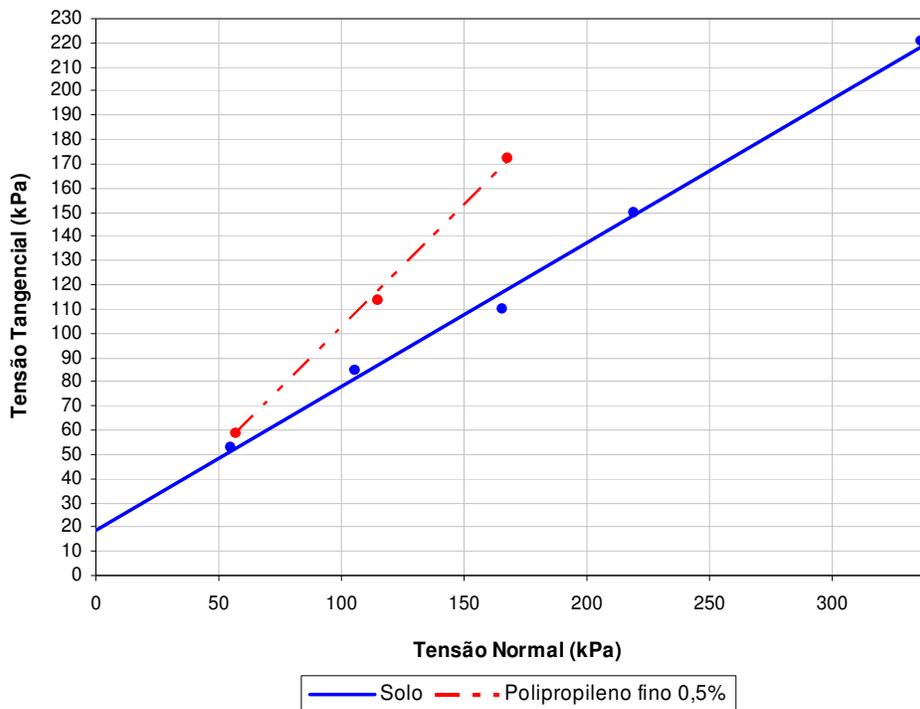


Figura 6.2 – Comparação da envoltória de resistência ao cisalhamento do sisal e do solo puro

Na Figura 6.3 são apresentados os resultados obtidos com a adição de fibras de PET ao solo nos teores 0,5%, 1,0% e 2,0%. A adição de fibras de 0,5% de PET não representou nenhum acréscimo de resistência ao solo, o ângulo de atrito não se alterou a adição apresentou uma menor coesão em relação ao solo puro. Para o teor de 1,0% os parâmetros de resistência permaneceram iguais.

Com relação à dosagem de 2%, a mesma apresentou uma menor coesão, mas um maior ângulo de atrito, havendo o indicativo de tensões confinantes acima de 280 kPa a resistência excederia a do solo puro.

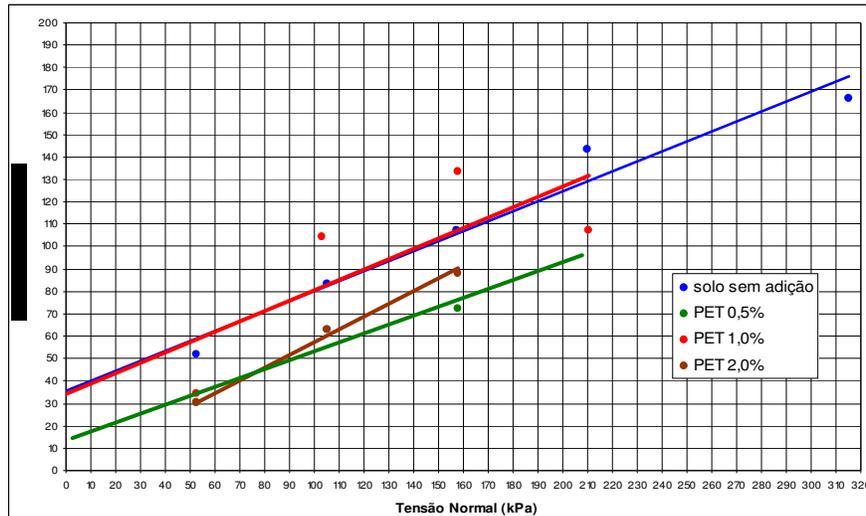


Figura 6.3 - Comparação da envoltória de resistência ao cisalhamento entre PET e solo puro

Os estudos com adição de polipropileno mostraram que, apenas a adição de 0,5% de polipropileno concrefil apresentou ganho de resistência, em relação ao solo puro, e as adições de 0,5% de polipropileno fino (Polycrret MF) e 1% de polipropileno Concrefil não mostraram melhorias no que diz respeito ao cisalhamento, como pode ser visto nas Figuras 6.4 e 6.5.

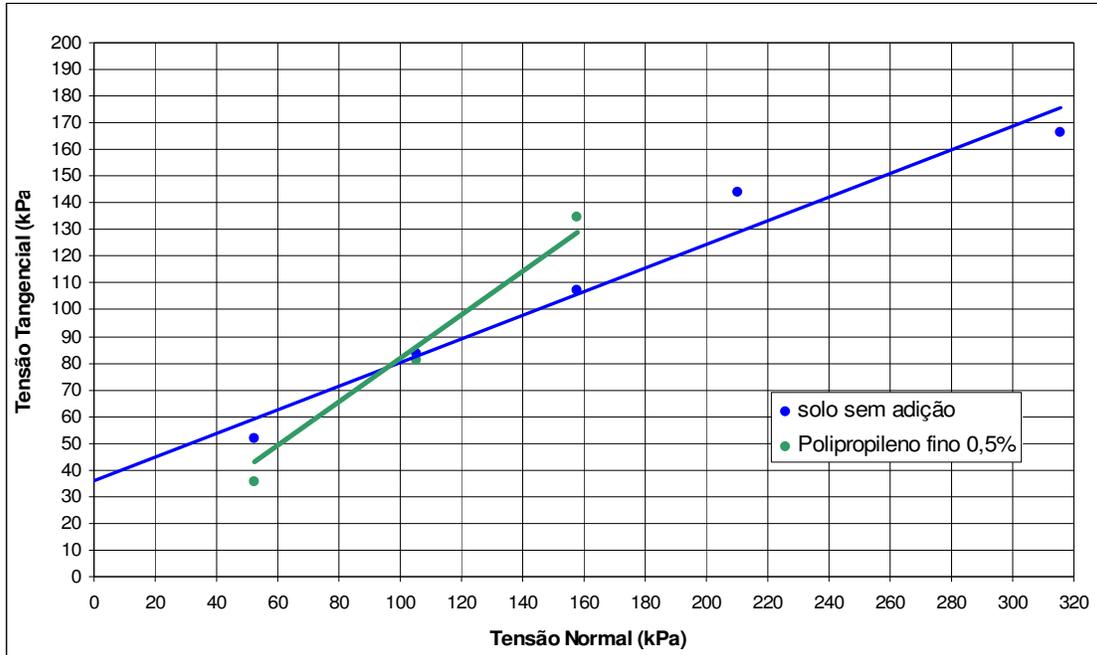


Figura 6.4 – Comparação da envoltória de resistência ao cisalhamento entre polipropileno fino e solo puro

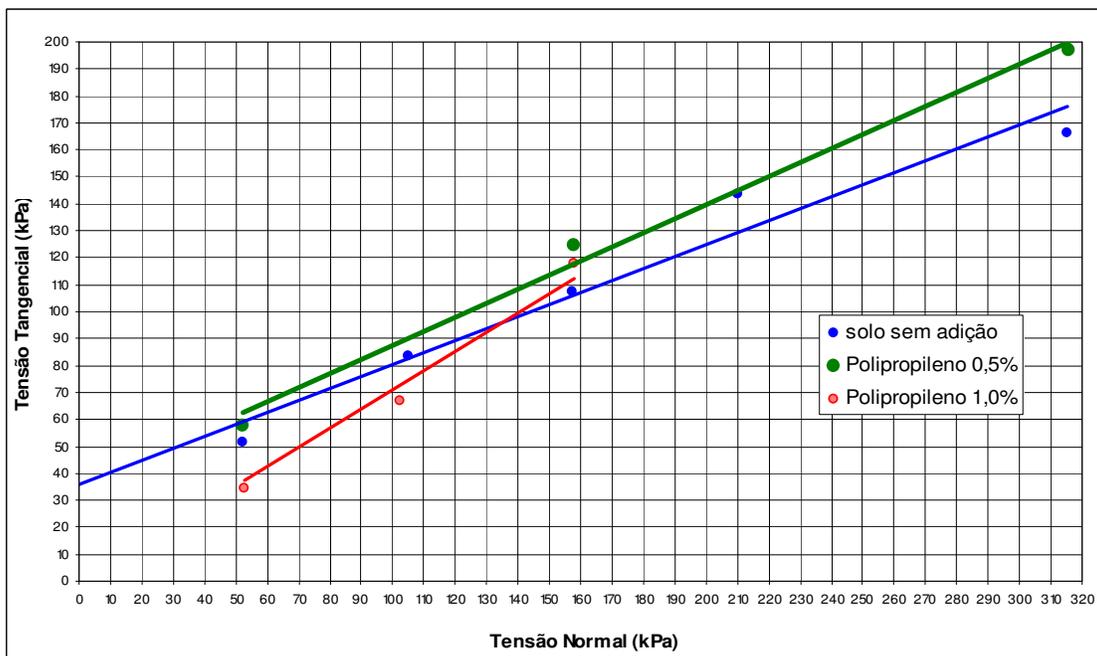


Figura 6.5 - Comparação da envoltória de resistência ao cisalhamento entre polipropileno e solo puro

No que diz respeito aos ensaios realizados com as raspas de pneu, a adição de 5,0% ao solo resultou em menor coesão e maior ângulo de atrito em relação ao solo sem adição. Com esse teor a resistência ao cisalhamento do solo tende a ser maior quando a tensão normal ultrapassa 120 kPa. A adição de 7,5% resultou em resistências menores (Figura 6.6).

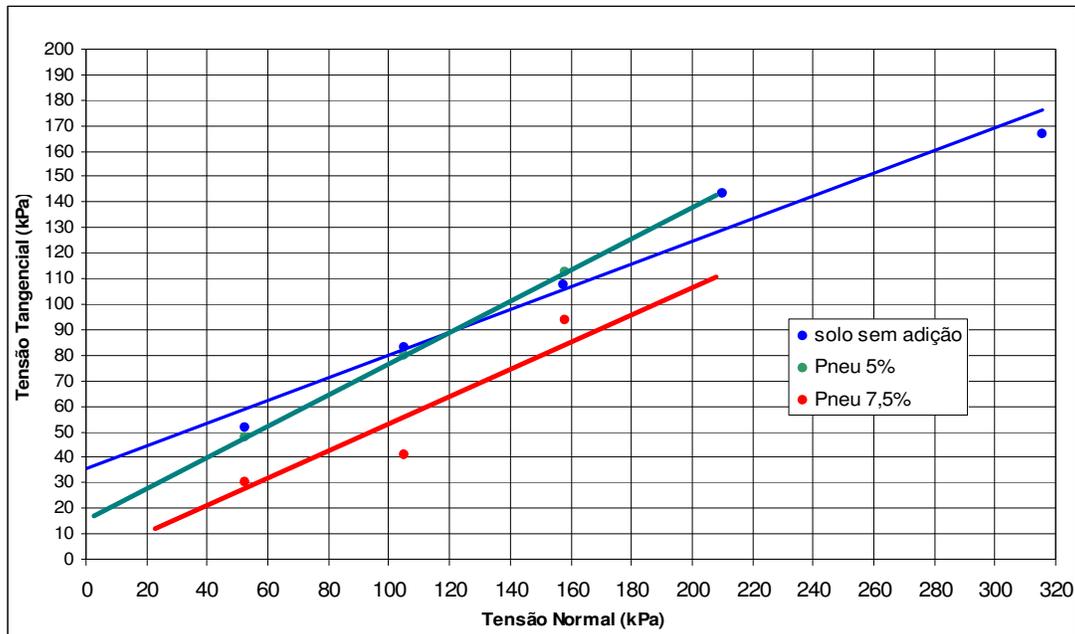


Figura 6.6 - Comparação da envoltória de resistência ao cisalhamento do pneu e do solo puro

Com o objetivo de avaliar melhor a contribuição das fibras nos parâmetros de resistência dos solos em função da deformação, fez-se um estudo da razão entre a coesão e o ângulo de atrito do solo com adição e do solo sem adição, para diferentes níveis de deslocamento no ensaio de cisalhamento direto.

Na Figura 6.7 é apresentada a variação da razão coesão do solo com fibra / coesão do solo sem fibra *versus* deslocamento. Observa-se que o aumento da coesão devido à adição de fibra é maior para pequenos deslocamentos, sendo que os maiores ganhos na coesão ocorrem para a adição de 0,5% de polipropileno e de 1,0% de PET. Para as demais adições ocorreu um decréscimo no valor da coesão (razão entre coesões menor do que 1).

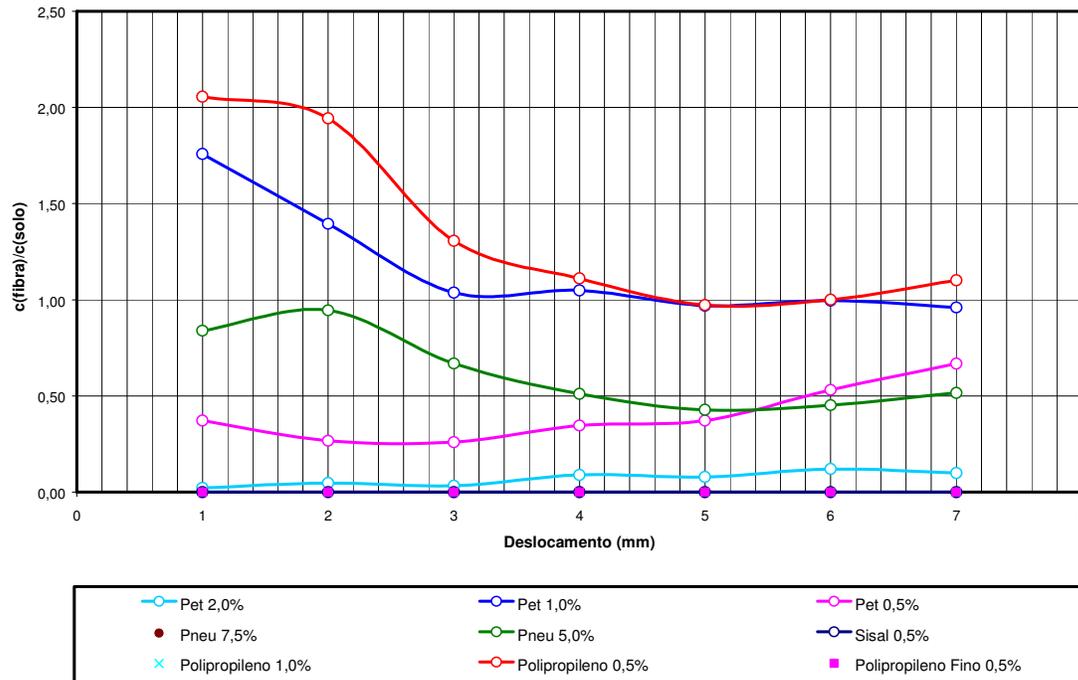


Figura 6.7 – Variação da coesão do solo reforçado em função do solo puro

Para a Figura 6.8, que mostra a variação da razão ângulo de atrito do solo com fibra / ângulo de atrito do solo puro *versus* deslocamento, observa-se que um aumento do ângulo de atrito devido à adição de fibra ocorre para quase todas as adições, com exceção de 0,5 % de polipropileno em deslocamentos abaixo de 3,2 mm e 0,5 % de PET em deslocamentos acima de 3,2 mm. A adição de 1,0 % de PET não trouxe nenhum aumento no ângulo de atrito, para as demais adições o aumento ficou entre 20 % e 75 %.

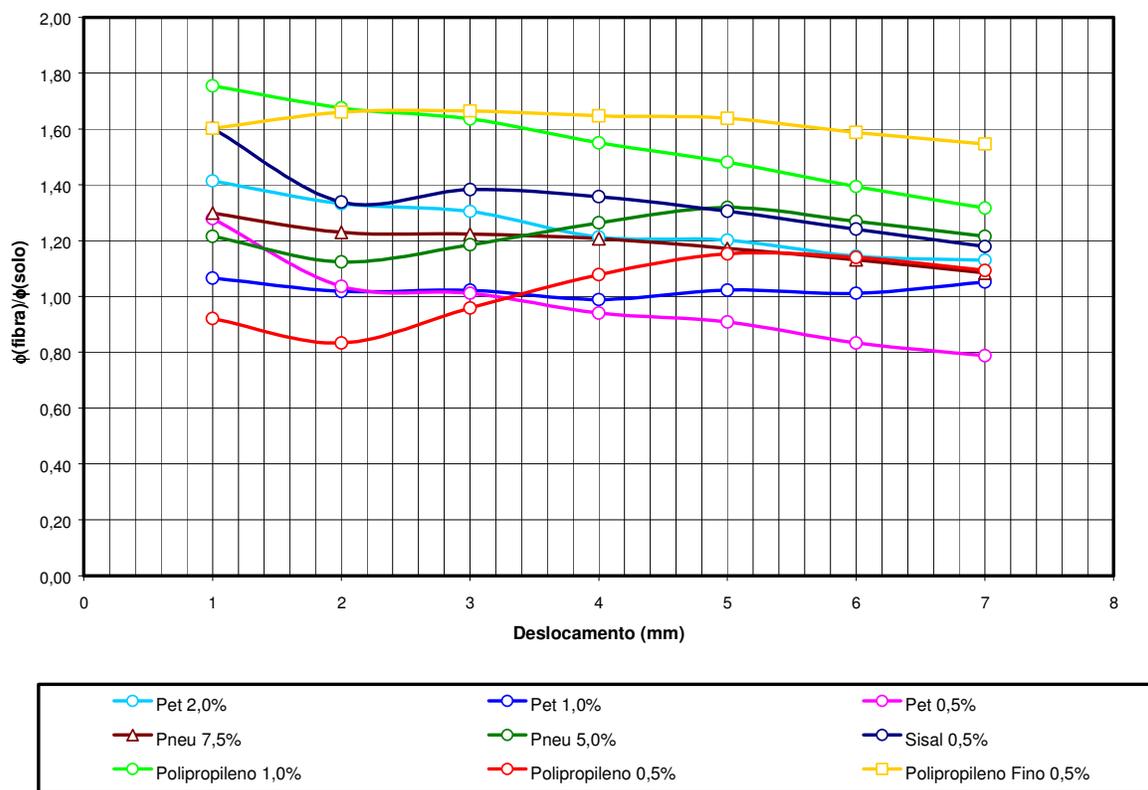


Figura 6.8 – Variação do ângulo de atrito do solo reforçado em função do solo puro

- Resistência à Compressão Simples

Os ensaios de compressão simples foram todos realizados com o Solo B. As maiores resistências foram atingidas com o solo reforçado com polipropileno 1,0% e com o polipropileno fino 0,5%.

Na figura 6.9 estão mostradas as resistências máximas atingidas nos ensaios com o deslocamento necessário para atingi-las. Observa-se que o solo reforçado com polipropileno 1,0% apresenta maior resistência do que o solo sem adição, como já comentado anteriormente, no entanto, o corpo-de-prova tornou-se mais rígido, rompendo com menores deslocamentos.

Já o polipropileno fino (Polycrét MF) com a dosagem de 0,5%, além de aumentar a resistência do solo por compressão simples, também aumenta a sua ductilidade. Não foi possível executar ensaios de compressão simples com adição de pneu porque os corpos-de-prova não apresentavam coesão suficiente para se

manterem íntegros sem confinamento. As adições de 0,5% e 1,0% de PET também proporcionaram uma melhoria na resistência. Da mesma forma que 0,5% de polipropileno concrefil e 0,5% de sisal, mas de forma menos considerável em comparação aos outros.

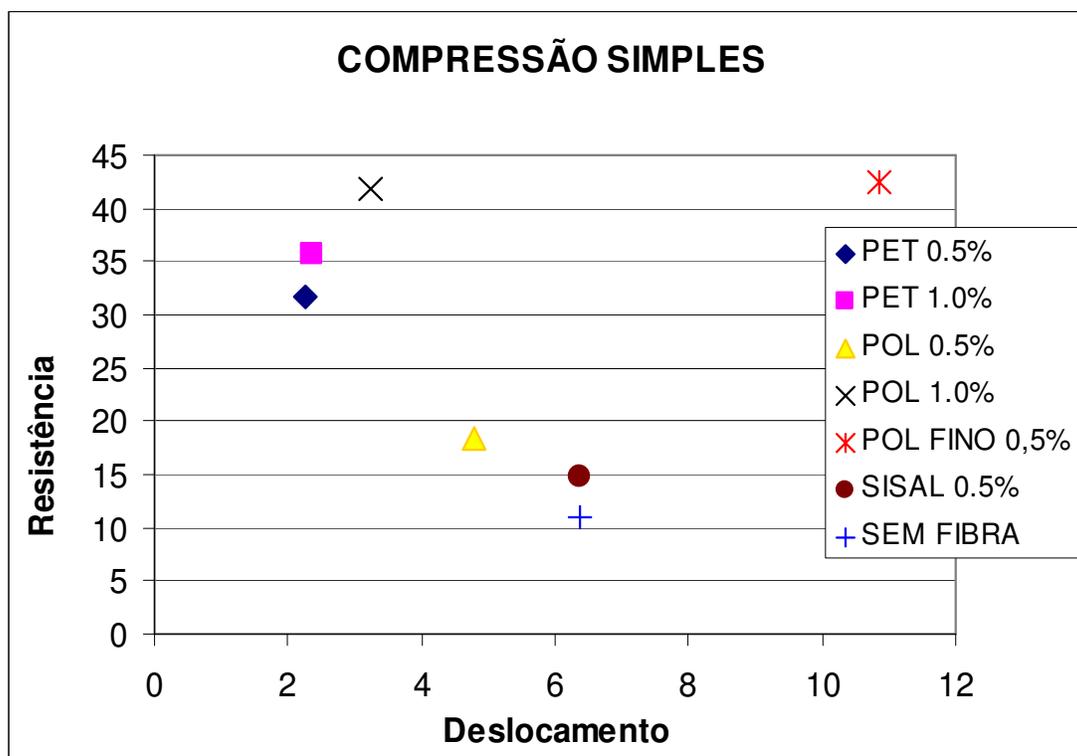


FIGURA 6.9 – Comparação dos resultados obtidos no ensaio de compressão simples

6.2 Discussão e análise dos resultados obtidos na mistura solo-aditivo

A presente discussão foi realizada tomando-se por base os dados obtidos nos ensaios realizados com o solo misturado aos respectivos aditivos.

Os resultados obtidos serão comparados com aqueles adquiridos nos ensaios com o solo no estado puro, tornando-se possível, com isso, a verificação das possíveis melhorias adquiridas pelo solo quando aditivado.

Granulometria

O ensaio de granulometria permitiu quantificar a influência dos aditivos na modificação das dimensões das partículas quando comparadas ao solo puro.

Na Figura 5.12 do item 5.4 foram apresentadas as curvas granulométricas dos solos puro e aditivados que foram estudadas neste trabalho. Observa-se que de modo geral a inclusão dos aditivos provocou uma maior aglomeração de partículas em todas as faixas de diâmetros.

b) Resistência ao Cisalhamento

Na Figura 6.10 é apresentado um resumo das envoltórias de ruptura para deslocamentos de 5 mm relativas ao solo puro e às adições estudadas

Os aditivos que não provocaram o aumento da coesão foram: cimento 2%, Ecolopavi 0,67%, EMC² 1,63% e Lignosulfonato nas duas dosagens 2% e 4%. Percebe-se que as adições provocam no solo a aglomeração de partículas e o aumento do intercepto coesivo

Da mesma maneira como as adições provocaram o aumento da coesão, praticamente todas diminuíram a resistência em relação ao ângulo de atrito. A exceção, que teve o valor do ângulo de atrito aumentado foi a dosagem de 1,63% de EMC².

Avaliando o ganho de resistência geral, as adições que tiveram o melhor desempenho neste tipo de solo foram: 4% de cal e 0,17% de DS-328.

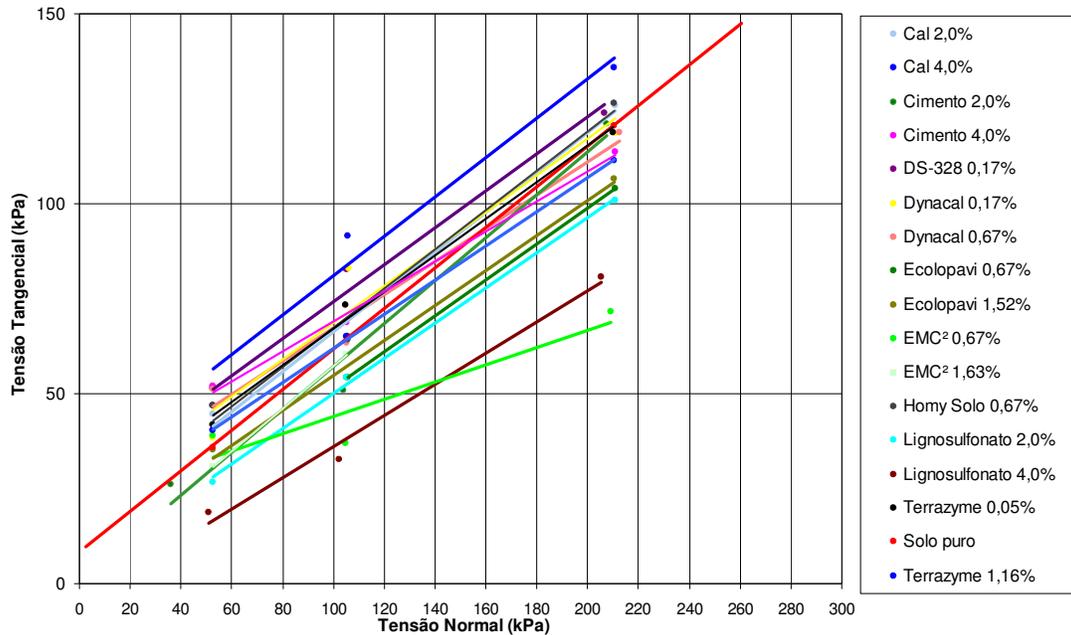


Figura 6.10 – Envoltórias de ruptura para deslocamento de 5 mm.

- Cal e cimento

Na Figura 6.11 é feita uma comparação entre os aditivos cal e cimento. Observa-se que a adição de 2% de cimento não forneceu bons resultados. A inclusão 4% de cimento apresentou um aumento da coesão, no entanto, a mistura tornou-se frágil, pois com o aumento da tensão normal sobre a amostra ocorreu uma perda de resistência. Com relação à cal, a mistura mostrou bom desempenho, sendo que para os teores de 2% e 4% o ângulo de atrito praticamente não se alterou e houve um acréscimo no intercepto coesivo proporcional ao teor de cal adicionado.

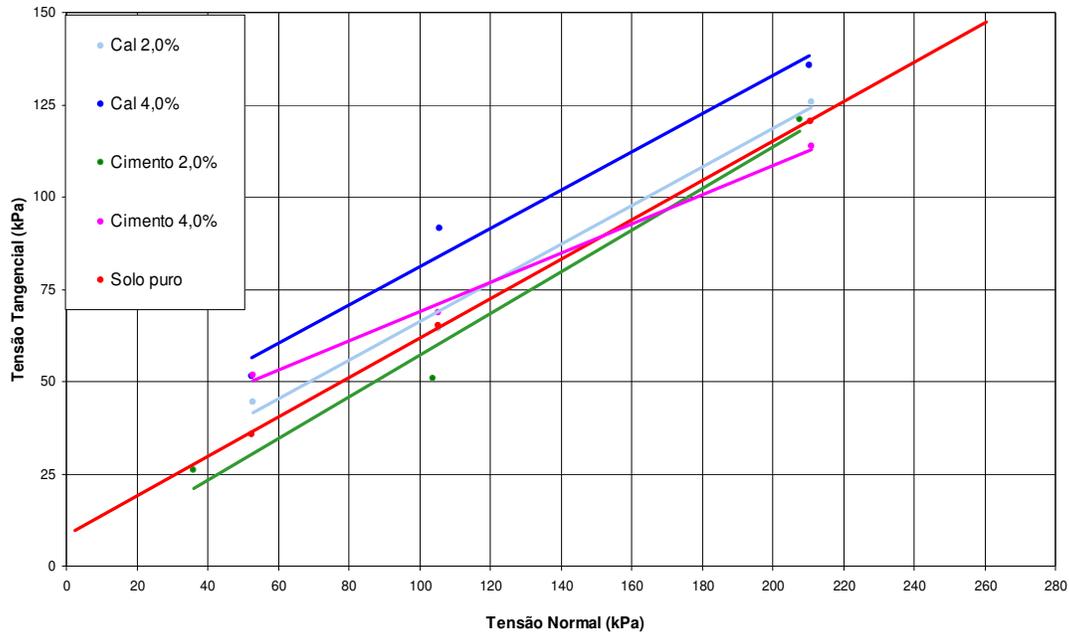


Figura 6.11 – Envoltória de ruptura para deslocamento de 5 mm nas adições de cal e cimento.

- Aditivos que reagem com cal

Na Figura 6.12 abaixo são apresentadas as envoltórias para deslocamento de 5 mm dos solos aditivados com produtos que tem a cal como reagente, além da própria adição com cal virgem.

Além da cal 4%, do DS-328 e do Homy solo observa-se que nenhum outro composto apresentou melhora na resistência do solo puro. Em geral, houve um acréscimo no intercepto coesivo e um decréscimo no ângulo de atrito.

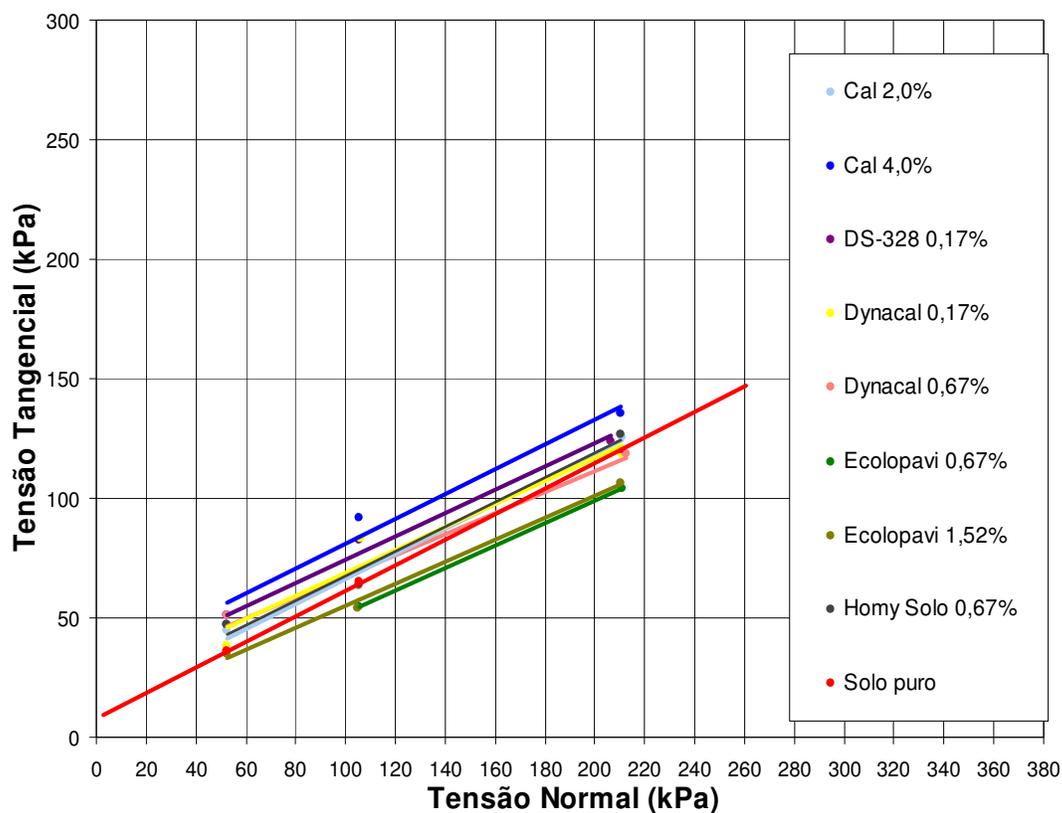


Figura 6.12 – Envoltória de resistência para deslocamento de 5 mm de aditivos que levam a cal como reagente.

- Lignosulfonato

Na Figura 6.13 são apresentadas as envoltórias de resistência para deslocamento de 5 mm do aditivo Lignosulfonato Vixil nos teores de 2% e 4%. Essa adição não forneceu ganho de resistência ao solo analisado.

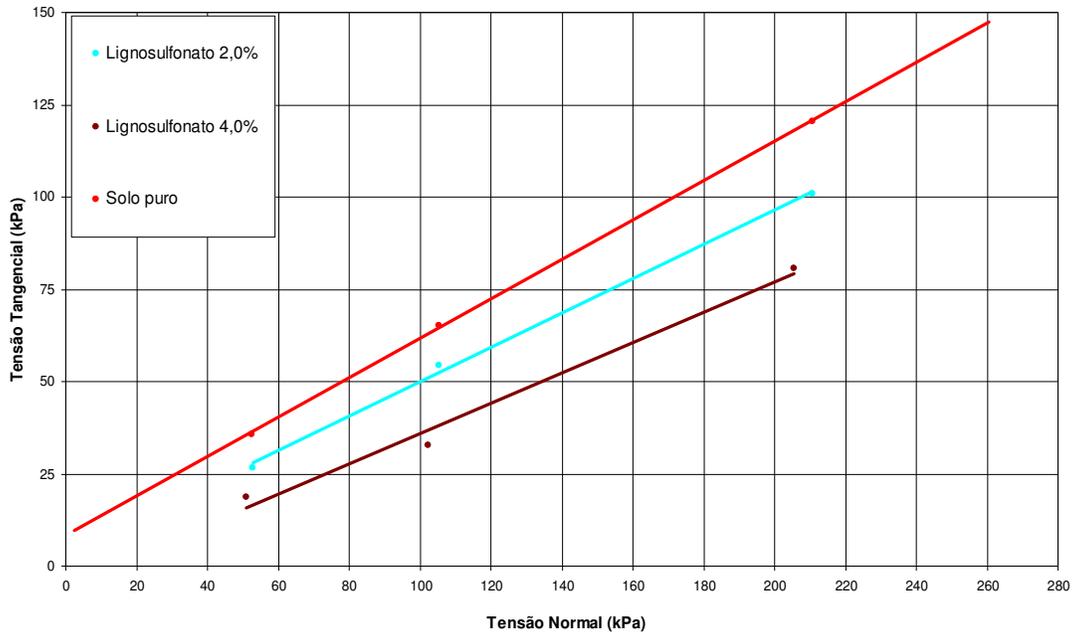


Figura 6.13 – Envoltória de resistência para deslocamento de 5 mm do aditivo Lignosulfonato.

- Terrazyme e EMC²

As envoltórias de resistência para deslocamento de 5 mm dos aditivos EMC² e Terrazyme são mostradas na Figura 6.14. Em geral, houve um pequeno acréscimo no intercepto coesivo e um decréscimo no ângulo de atrito. No entanto, esse acréscimo da coesão não é suficiente para aumentar a significativamente a resistência da mistura.

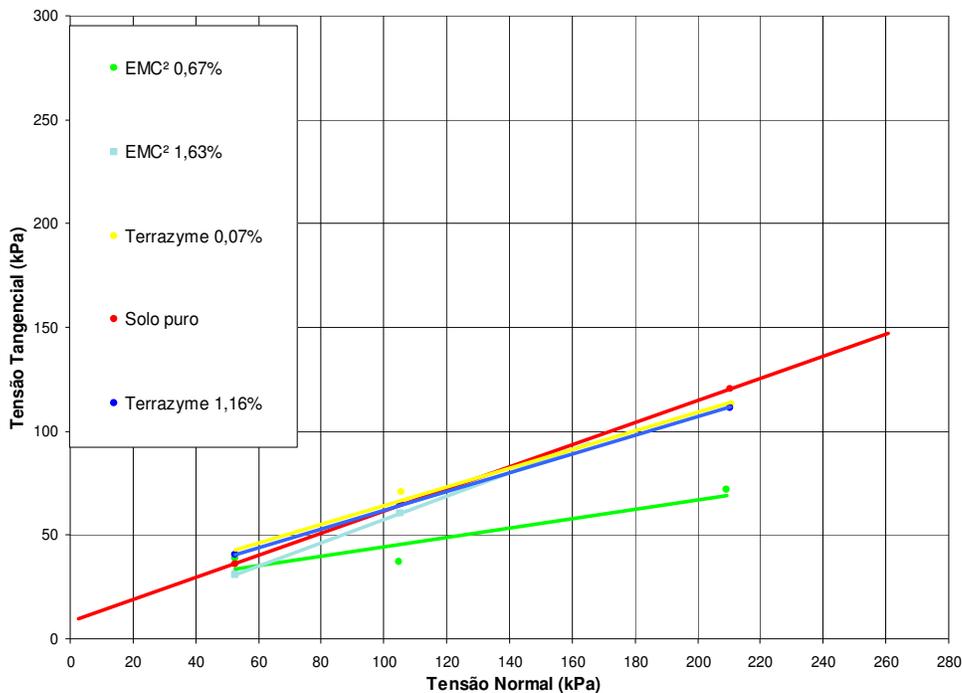


Figura 6.14 – envoltória de resistência para deslocamento de 5 mm dos aditivos EMC² e Terrazyme.

Resistência à Compressão Simples

Nos ensaios de resistência à compressão simples, observa-se que os melhores desempenhos foram obtidos com os aditivos Homy Solo 0,67%, Ecolopavi 1,52%, DS-328 0,17%, Terrazyme 1,16%, Cimento 4% e EMC² 1,63%, pois com as referidas adições, o solo obteve resistência superior ao puro com 724,25 KPa (Quadro 28).

As adições realizadas com a cal 2 e 4%, cimento 2%, EMC² 0,16%, ecolopavi 0,67% e dynacal 0,67% não mostraram melhorias de resistência das características apresentadas pelo solo sem adição.

Quadro 28 – Resumo das resistências obtidas nas aditivações

MATERIAL	RESISTÊNCIA (kPa)	DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA (%)
Homy Solo 0,67%	1717,33	3,00
Ecolopavi 1,52%	1674,33	3,07
DS-328 0,17%	1556,33	2,80
Terrazyme 1,16%	1164,00	3,33
Cimento 4,0%	1046,67	2,87
EMC ² 1,63%	951,67	4,08
Lignosufonato Vixil 4,0%	882,67	2,42
Dynacal 0,67%	825,67	2,08
Terrazyme 0,05%	751,67	2,42
Lignosufonato Vixil 2,0%	737,00	5,25
Homy Solo 1,11%	733,33	1,83
Solo puro	724,25	2,74
Terrazyme 0,07%	599,00	2,50
EMC ² 0,67%	488,00	2,42
Ecolopavi 0,67%	479,00	2,13
Dynacal 0,17%	462,00	1,73
Cimento 2,0%	440,00	1,92
Ecolopavi 0,33%	413,50	1,89
Cal 2,0%	408,00	1,65
Cal 4,0%	188,50	1,52

Para melhor facilitar a visualização do desempenho dos aditivos em comparação ao solo no que diz respeito às resistências obtidas, mostra-se a Figura 6.15 na qual é apresentado um resumo das resistências à compressão simples média dos aditivos estudados e do solo puro.

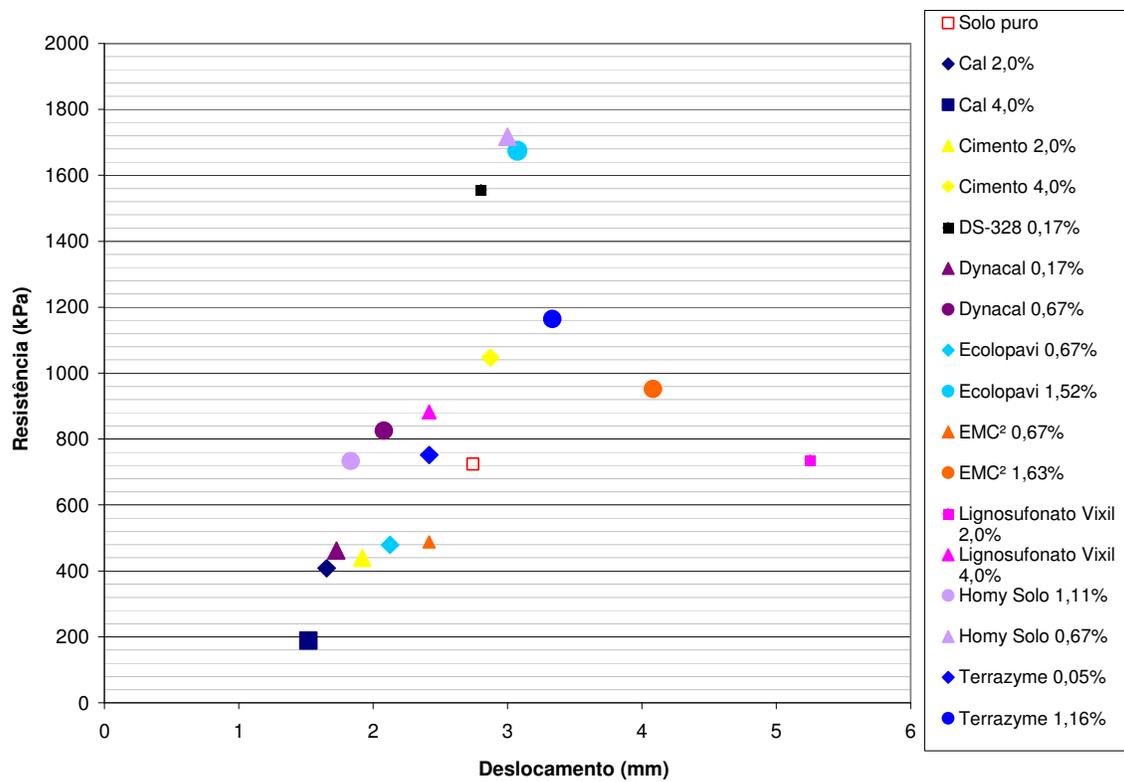


Figura 6.15 - Resumo das resistências à compressão simples média dos aditivos estudados em comparação com o solo puro.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O presente capítulo traz inicialmente as conclusões a respeito dos ensaios realizados objetivando a possível melhoria do solo em questão proporcionada pelo reforço com fibras e raspas de pneu assim como com os aditivos. Após isso são feitas algumas sugestões para futuras pesquisas.

7.1 Conclusões

Com base nos estudos realizados nesta pesquisa, podem-se tirar algumas conclusões a respeito das adições feitas no intuito de melhorar as características do solo em questão.

7.1.1 Reforço de solos com fibras

No que diz respeito à adição de fibras a solos siltosos (solos A e B), os resultados disponíveis sugerem que a expansão do material compactado seria pouco afetada. No ensaio CBR, o uso de fibras PET e de polipropileno fino mostrou uma melhoria no suporte do material, medida através do Índice de Suporte Califórnia. Em relação ao solo puro, o peso específico aparente seco do solo compactado pode variar para mais ou para menos, conforme a quantidade e tipo de fibra empregada.

Nas envoltórias de resistência ao cisalhamento, pôde-se notar uma tendência com a adição de fibras em reduzir a tensão cisalhante máxima obtida para níveis baixos de tensão normal. Entretanto, à medida que aumenta o confinamento do material, com incrementos de tensão normal, a resistência das diversas misturas solo - fibras tende a crescer. Nas envoltórias de resistência do solo reforçado com fibras, esse comportamento se traduz através da redução do

parâmetro coesivo e do aumento do ângulo de atrito. Dentre os materiais analisados, os ensaios de cisalhamento direto mostraram potencial de uso para as fibras de polipropileno fino (Polycrét MF). Os ensaios de compressão simples realizados com o solo B indicaram a possibilidade de se obter ganhos de resistência com a utilização de fibras de polipropileno grosso (Concrefil) ou o polipropileno fino (Polycrét MF) e PET.

Portanto, com relação à utilização destas fibras e das raspas de pneu, como reforço no tipo de solo analisado pode-se relatar que as fibras de polipropileno foram as que apresentaram os melhores desempenhos mediante os ensaios realizados.

7.1.2 Melhoramento de solos com aditivos

No caso dos aditivos químicos, em linhas gerais tem-se um efeito de aumento da resistência ao cisalhamento para os níveis mais baixos de tensão, e de redução da resistência para tensões elevadas. Esse efeito, oposto ao observado com a adição de fibras, implica no aumento da coesão e redução do ângulo de atrito dos solos tratados.

O aumento da coesão mostrou-se consistente com os resultados de análises granulométricas realizadas com o solo puro e aditivado, as quais indicaram uma tendência dos agentes químicos provocarem a aglomeração de partículas. É possível que a queda de resistência para níveis mais altos de tensão efetiva esteja associada a uma destruição das ligações entre partículas, devido à compressão do material.

Nas análises granulométricas realizadas percebeu-se que, de um modo geral os aditivos tiveram um comportamento semelhante entre si.

Com relação à resistência ao cisalhamento, pode-se concluir que os aditivos Cal (2 e 4%), DS-328 (0,17%), Ecolopavi (1,52%) Dynacal (0,17%) e EMC² (1,63%) foram os que apresentaram os melhores resultados mediante comparação com o solo puro.

No ensaio de resistência à compressão simples pode-se concluir que as adições com 0,67 % de Homy solo, 1,52% de Ecolopavi, 0,17% de Dynacal, 4% de Cimento, 1,16% de Terrazyme e 1,63% de EMC² apresentaram os melhores desempenhos em relação ao solo puro.

Finalmente, não se pode descartar qualquer um dos aditivos que não apresentaram bons desempenhos, pois muitos fatores devem ser levados em conta como, por exemplo, a dosagem utilizada, visto a dificuldade em poder conceber uma parametrização de utilização de todos os aditivos, já que cada fabricante sugere uma forma de utilização diferente.

Todavia, dentre todos os aditivos estudados em laboratório durante o período da pesquisa, de um modo geral, pode-se concluir que mostraram potencial de melhorar as características do solo siltoso em questão, dentro das condições citadas acima, a cal e o DS-328.

7.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestão para futuros trabalhos, podem-se apresentar as seguintes proposições:

- analisar o comportamento de outros tipos de solos misturados a esses aditivos.
- verificar o comportamento dos solos quando melhorados com aditivos e reforçados com fibras.
- realizar um estudo a respeito do comportamento de diversos tipos de solos com outras dosagens de aditivos.
- realização de provas de carga em fundações superficiais em verdadeira grandeza sobre camadas de solo-fibra e solo - cimento - fibra.
- buscar alternativas de reforço utilizando fibras de processos industriais como escórias de aciaria, alto forno e cobre.

- estudar o comportamento de solo-cimento ou solo-cal reforçado com fibras de diferentes espécies.
- estudar o baixo desempenho do solo-cal e do solo-cimento observados.
- Relacionar com mais cuidado a situação de laboratório/especificação para os produtos com a realidade de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solos - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR-6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR-7181**: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR-7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986

ABEPET. Disponível em < www.abepet.com.br > acesso em 29/08/2005.

AGOPYAN, V. Materiais de construção reforçados por fibras. **A construção**, São Paulo, n. 2080/2081, P. 43, 1987.

AGOPYAN, V.; SAVASTRANO JR. A experiência brasileira com as fibras vegetais. Artigo técnico, **Tèchne**. São Paulo. N 32, P. 38 – 43, 1998.

BERALDO, A.L.; VIEIRA, F. F. Argamassa com adição de fibras de sisal. V SBTA SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA EM ARGAMASSAS. São Paulo, **Anais...** 2003, p. 467- 477.

BRANDI J. L. G. **Previsibilidade e controle de recalques em radiers sobre solo mole**. Curitiba, 2004. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná.

BRAZETTI, R. **Considerações sobre a influência de distintos aditivos orgânicos nas características micromorfológicas, mineralógicas, físicas, mecânicas e hidráulicas de um solo laterítico.** São Paulo, 1998. 275 p. Tese (doutorado em Engenharia). Escola Politécnica de São Paulo.

BUENO, B. S. **Uso de fibras plásticas para reforço de solos compactados.** Porto Alegre, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BUSSAMRA, H. R. V. Estabilização química de solos com emprego de aditivos químicos líquidos, tipo DS-328 e seus reagentes, publicação, 2006.

CARBONERI, A. M.; TONELI, G. A.; LOBO, A. S. Reciclagem de garrafas PET: utilização em forma de fibra para reforço de solo. Artigo técnico. 10 p. 1999. Faculdade de Engenharia UNESP. Bauru, SP.

CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais.** Porto Alegre, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CAPPI, D. M. **Recuperação ambiental de áreas erodidas como alternativa de destino final de pneus inservíveis.** Piracicaba, 2004. 74 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola superior de agricultura Luiz de Queirós, Universidade de São Paulo.

CARBONIERI, A. M.; TONELI, G.A. LOBO, A. S. Reciclagem de garrafas PET: utilização em forma de fibra para reforço de solo. Artigo técnico, UNESP, São Paulo, 1999.

CASAGRANDE, M. D. T.; CONSOLI, N.C.; THOMÉ, A.; PRIETTO, P. D. M. Comportamento em campo e laboratório de um solo reforçado com fibras. Artigo técnico. **Solos e Rochas**. São Paulo. 25. p. 247-255, 2002.

CEMPRE. Disponível em < <http://www.cempre.ogr.br> > Acesso em 13/06/2005.

CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento – Utilização de fibras vegetais no fibro-cimento e no concreto-fibra. BNH – DEPEA. Rio de Janeiro. 72 p. 1982.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. **Metodologia científica**. 4. ed., São Paulo: Makron Books, 1996

CONAID. Disponível em < http://www.conaid.com.ar/port_caracteristicas.php > Acesso em 25/05/2006.

CRISTELO, N. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal. Dissertação**. Portugal, 2001. (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Minho, Portugal

CUNHA, L. C.; REZENDE, D. M. L.; COSTA, M. H.; ODA, S. Utilização de borracha de pneus como material de pavimentação asfáltica. Artigo técnico, Maringá. Universidade Federal de Maringá, 2002.

DEGUSSA. Disponível em: < www.degussa.com.br > acesso em 06 de julho de 2005.

EMBRAPA. Disponível em < <http://www.cnpa.embrapa.br/sisal.html> > acesso em 08 de julho de 2006.

ENVENENADO. Disponível em: < <http://www.envenenado.com.br/acessorios/pneus/pneus2.html> >

ESPÍRITO SANTO, A. **Delineamentos de metodologia científica**. São Paulo: edições Loyola, 1992.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. Porto Alegre, 2000. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.

FERREIRA, R. C. FREIRE, W. J. Resistência à compressão simples de um solo arenoso, tratado com aditivo químico (DS-328), avaliada através de método não destrutivo. **Anais**. XXX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA 2001. Foz do Iguaçu. 4 p.

FITESA. Disponível em: <www.fitesa.com.br> acesso em 30 de junho de 2005.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V.; PRADO, T.A. Durabilidade de compósitos de cimentos e fibras vegetais. Artigo técnico. USP. 11p. 1999.

KAMIMURA, E. **Potencial de utilização dos resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil**. Florianópolis, 2002. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSC.

KLEUBER, R.; ALMEIDA, M. O.; FERRARI JÚNIOR, M. J.; ATHAYDE, G. B.; SONCIM, S. P. Utilização da areia de PET em substituição a areia natural na dosagem de concretos estruturais convencionais. **Anais**, 46^º IBRACON. Florianópolis, SC, p. 1686 – 1694. 2004.

KÖCHE, J. C. **Fundamentos de metodologia científica: teoria e prática da pesquisa**. 14. ed. Revisada e ampliada. Petrópolis, Rj: Vozes, 1997.

LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. Estabilização de solos II – Técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 1993. 32 p.

LIMA, A. M. F. **Estudo da cadeia produtiva do PET na região metropolitana de Salvador como subsídio para análise do ciclo de vida.** Monografia do Curso de Especialização em Gerenciamento em Tecnologias Ambientais na Indústria. Salvador, BA. 94 p. 2001 Universidade Federal da Bahia.

ORPEC. Disponível em: < www.orpecengenharia.com.br > acesso em 03 de julho de 2005.

PESSOA, F. H. C. **Análise dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário.** Brasília, 2004. 151 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade de Brasília.

RAUCH, A. F.; KATZ, L. E.; LILJESTRAND, H. M. An analysis of the mechanisms and efficacy of three liquid chemical soil stabilizers. Research Report. Universidade do Texas, 2003.

RECICLÁVEIS. Disponível em < www.reciclaveis.com.br/mercado/casplas.htm > acesso em 18/08/2005.

RESENDE, F. M. **Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concretos de resistência normal e de alto desempenho.** Rio de Janeiro, 2003. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) COPPE/UFRJ. 98 P.

SANTOS, A. R. **Metodologia científica: a construção do conhecimento.** Rio de Janeiro: DP&A, 1999.

SANTOS, A. C.; BARBOZA, A. S.R.; GOMES, P. C. C.; LIMA, F.B. Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir da reciclagem de pneus para aplicação em elementos pré-moldados. **Anais** In: I conferência Latino - Americana de construção sustentável – X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente construído. São Paulo, 2004.

SILVA, F. A. **Tenacidade de materiais compósitos não convencionais**. Rio de Janeiro, 2004. 234 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Rio de Janeiro, PUCRJ.

SILVA, G.; SILVA, M. G.; AGOPYAN, V. Avaliação de edifícios no Brasil: da avaliação ambiental para a avaliação da sustentabilidade. Artigo técnico. Ambiente Construído – **Revista do ANTAC**, 2003. Artigo técnico, 18 p. Porto Alegre.

SONCIM, S. P.; ATHAIDE JUNIOR, G. B.; FERRARI JUNIOR, M. J.; ALMEIDA, M. O.; ALMEIDA, S. G.; VIDAL, F. X. R. O emprego do resíduo da reciclagem de garrafas PET como agregado em reforço de subleitos de rodovias. Artigo técnico. Universidade de Engenharia Vale do Rio Doce. 6 p, 2000.

SPECHT, L. P. **Comportamento de misturas Solo-cimento-fibras submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. Porto Alegre, 2000. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), CPGEC/UFRGS.

TANESI, J.; FIGUEREDO, A.D.; NINCE, A. A. Fissuração por retração em concretos reforçados com fibras de polipropileno (CRFP). São Paulo. 1999, 25p.

TANESI, J.; FIGUEREDO, A.D.; NINCE, A. A. Concreto com fibras de polipropileno. Artigo. **Tèchne**. São Paulo. 2002. N. 66, p. 48 – 51.

TECPAR. Disponível em < <http://www.sbrt.ibict.br> > Acesso em 17/10/2006.

TEIXEIRA, S. H. C.; BUENO, B. S.; LIMA, D. C. Estudo do comportamento de solos reforçados com fibras aleatórias. **Relatório parcial PIBIC CNPQ/ UFV**, Viçosa, 1995.

TEODORO, J. M.; BUENO, B. S. Estudo do comportamento dos solos reforçados com fibras plásticas de polipropileno. **Anais**. In: Congresso Brasileiro de mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 11. Brasília, 1998. Anais. V. 2.

TRINDADE, T. P.; LASBIK, I.; LIMA, D. C.; SILVA, C. H. C.; BARBOSA, P. S. A. Latossolo vermelho – amarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória: estudo em laboratório. Minas Gerais, 2004. **REM**. 6 p.

TRINDADE, T. P.; LIMA, D.C.; MACHADO, C. C.; CARVALHO, A. B.; SCHAEFER, C. E. G. R. ; FONTES, M. P. F.; CANESCHI, F.P. Compactação na resistência mecânica de misturas solo - RBI Grade 81. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, nº. 4 – Minas Gerais, 2005.

UTSUMI. Disponível em < <http://www.utsumi.com.br/pet/filetador/principal.html> > Acesso em 14/06/2005.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para a aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. Porto Alegre, 2003. 224 p. Tese (Doutorado em engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VULCAN DO BRASIL. Disponível em: < www.vulkan-brasil.com.br > acesso em 06 de julho de 2005.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. Tradução Daniel Grassi. 2. ed., Porto Alegre: Bookman, 2001.