

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

**USO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA
MELHORIA DE SOLOS EM PAVIMENTAÇÃO**

PRISCILA FIOCHI BENTO ROQUE

ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.DM-131/17

BRASÍLIA-DF: ABRIL/2017

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

**USO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA MELHORIA
DE SOLOS EM PAVIMENTAÇÃO**

PRISCILA FIOCHI BENTO ROQUE

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

APROVADA POR:

**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**

**MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ANNA KARINA CHAVES DELGADO, DSc (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**EDER CARLOS GUEDES DOS SANTOS, DSc. (UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 11 DE ABRIL DE 2017.

FICHA CATALOGRÁFICA:

BENTO ROQUE, PRISCILA FIOCHI

Uso de Materiais Alternativos para Melhoria de Solos em Pavimentação
xvii, 108 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2017)

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

Departamento de Engenharia Civil

1. Fibras

2. Alvéolos

3. Materiais Alternativos

4. Pavimentação

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BENTO ROQUE, P.F. (2017). Uso de Materiais Alternativos para Melhoria de Solos em Pavimentação. Tese de Doutorado, Publicação nº G.DM 131/17, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Priscila Fiochi Bento Roque

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Uso de Materiais Alternativos para Melhoria de Solos em Pavimentação.

GRAU / ANO: Doutor / 2017

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

Priscila Fiochi Bento Roque

Quadra 205, Lote 4, apto. 402, Bloco B, Residencial Belo Horizonte.

Águas Claras – CEP: 71925-000

Brasília-DF

prifbr@gmail.com

Para **Júlia Fiocchi Bento Roque**. Filha amada, você
está quase para nascer, e foi por você que fiz um
esforço hercúleo e terminei.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por sempre orientar essa serva bastante teimosa, mas que aprendeu bastante nos muitos tropeços que deu. Obrigada Senhor, pela paciência e resignação, me fazendo aceitar o que eu não poderia mudar.

Ao Professor Camapum, pela orientação, trabalho, dedicação e insistência, sobretudo por se empenhar em me fazer terminar. Ao Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília e todos os seus laboratoristas, pelo auxílio prestado nos ensaios de laboratório, em especial ao técnico Tiago Limarcio. A todos os professores do programa de pós-graduação em Geotecnia pelos conhecimentos transmitidos.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa, tanto no Brasil como no exterior.

À FITESA, pelo fornecimento das fibras utilizadas nos ensaios. À Petrobras, por ceder o solo para que eu pudesse dar continuidade à minha pesquisa.

Ao Polytech Clermont-Ferrand, na França, em especial a toda a equipe da geotecnia principalmente os professores Claude Baconet, Oriane Jenck, Pierre Breul e Roland Gourvès. Esse último meu agradecimento especial por ter sido meu orientador, por ter me recebido de braços abertos em seu país, por sempre estar disponível fazendo o melhor que estava ao seu alcance, por ter prestado todo o auxílio durante minha estadia na França. Muito obrigada à empresa Soil Solution, por ceder o material necessário para que eu finalizasse os ensaios aqui no Brasil. Aos estudantes franceses, Benoit e Romain, pela disponibilidade em me auxiliar com a finalização dos ensaios no Brasil.

Ainda na França, quero ressaltar meu muito obrigado aos amigos árabes que fiz, que me mostraram sua cultura e seu verdadeiro olhar diante dos acontecimentos da vida. Em especial merece destaque minha grande amiga libanesa Jinane El Hassan, grande companheira, sempre solidária, disposta a ajudar e realmente muito solícita. Ji, graças a você adquiri a fluência no francês e pude suportar os momentos difíceis que passei quando estava longe do meu país, pois você foi sempre meu ombro amigo. Também merecem destaque nossos amigos brasileiros que fizemos na França, Caio e Camila, Tânia e Edson.

Ao James Dean da Silva, nosso companheiro de muitas jornadas difíceis e realmente grande amigo. Por tudo que passamos no período em que cursamos a pós-graduação, coisas boas e ruins, você foi realmente o nosso alento. James, você merece tudo de bom que Deus te reserva e eu sei que ele lhe reserva muitas surpresas boas.

Aos meus sogros, Osmar Roque e Maria Serrat, que estiveram sempre presentes nos apoiando e nos orientando. Aos meus pais, Antonio Henriques e Maria Aparecida, pelo incentivo, pelo exemplo de vida, por sempre torcerem por mim. Ao meu pai, por ser um exemplo de dedicação profissional e perseverança, diante das dificuldades impostas pela vida.

A minha amiga mais que querida, minha companheira de trabalho e minha chará, Priscila Hoehr Mostardeiro, pela amizade, pelo incentivo e por nunca me deixar esmorecer. Nossa amizade é recente nesse mundo mas tenho certeza que já nos encontramos em outros lugares. Adoro nossas conversas espírito-filosóficas sobre o sentido da vida e das coisas do mundo. Sua amizade foi realmente um presente, diante do momento em que eu atravessava. Muito obrigada por sempre estar presente!

Ao meu marido, Wallace Vargas Roque, sempre, sempre, antes de tudo, meu melhor amigo e companheiro para qualquer coisa. Estamos juntos há tanto tempo, que minha história pessoal se confunde com a sua em mais da metade de nossas vidas. Depois das pedras que tropeçamos, das dificuldades que superamos e de tudo que aprendemos com a vida (e ainda aprenderemos!), fico muito contente em ter certeza que nosso amor cresce e se solidifica a cada dia, ainda mais agora com a chegada do nosso presente mais precioso. Tenho certeza que, no curso as vezes tribulado do rio da vida, nosso barco nos levará a rumos muito promissores. Te amo demais!

RESUMO

USO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA MELHORIA DE SOLOS EM PAVIMENTAÇÃO.

Este trabalho tem como objetivo estudar o uso de materiais alternativos para utilização em pavimentação, tendo em vista regiões com carência de materiais granulares e solos com baixa capacidade de suporte. A área de pesquisa está situada na Província Petrolífera de Urucu, localizada no município de Coari-AM que, aliado aos fatores já mencionados, é caracterizada por chuvas intensas na maior parte do ano, tornando alto o custo para as obras de pavimentação e baixa a sua durabilidade. Desta forma, estudou-se a incorporação de fibras na massa de solo, fixando seu teor em 0,50% e variando seu tipo e comprimento. Foram estudadas as fibras lisas e corrugadas, nos comprimentos de 12 mm e 24 mm, assim como 25 mm e 50 mm, respectivamente. Com o intuito de melhorar a interação solo-fibra, foi estudado um teor de areia a fim de incorporá-la aos ensaios, avaliando a relação entre a sucção e o ganho de resistência à tração. Em relação ao comportamento mecânico, foram realizados ensaios de compressão simples com diferentes formas de umedecimento das amostras. Paralelamente aos ensaios com fibras, foi estudada a utilização de geocélulas com incorporação de solo local, assim como nas camadas de suporte. Primeiramente foram avaliados os ensaios com materiais alternativos, a fim de representar qualitativamente as características do comportamento dos materiais encontrados em campo. Por conseguinte, também foram realizados ensaios com os alvéolos em geossintéticos, tendo os mesmos preenchidos com as misturas de solos já estudadas. De maneira geral os resultados apontaram que as fibras lisas de 12 mm assim como as fibras corrugadas de 25 mm apresentaram melhor comportamento, uma vez que contribuíram para melhora do comportamento em relação à resistência à tração e a sucção. Em relação aos ensaios com os alvéolos em geossintéticos, os resultados mostraram um melhor comportamento para o solo natural como camada de suporte e os alvéolos preenchidos com fibra corrugada, contribuindo para a melhora da interação do sistema.

Palavras-chave: fibras, alvéolos, materiais alternativos, melhoria de solos, pavimentação.

RÉSUMÉ

Ce travail a pour but d'étudier l'utilisation de matériaux alternatifs pour l'application dans oeuvres de chaussées, une fois qu'il y a des régions avec la manque de matériels pierreux et sols avec basse capacité du support. La zone de recherche se trouve dans la province Urucu, située dans la ville de Coari-AM que, en même temps que les facteurs déjà mentionnés, se caractérise par de fortes précipitations la majeure partie de l'année, ce qui rend le coût élevé des travaux de pavage et de faible à sa durabilité. Ainsi, nous avons étudié l'incorporation de fibres dans la masse du sol, définissant sa teneur à 0,50% et en faisant varier sa longueur et le type. Fibre lisse et ondulée ont été étudiés dans le 12 mm et 24 mm de longueur et 25 mm et 50 mm, respectivement. Afin d'améliorer l'interaction sol-fibre, une teneur en sable a été étudiée en vue de l'incorporer à l'essai, l'évaluation de la relation entre l'aspiration et le gain résistance à traction. En ce qui concerne le comportement mécanique, des tests simples de compression avec différentes formes d'amortissement des échantillons ont été effectués. Parallèlement aux tests avec des fibres, à l'aide de géocellules avec incorporation dans le sol locale, ainsi que les couches de support a été étudié. D'abord, ils ont évalué les essais avec des matériaux alternatifs afin de représenter qualitativement les caractéristiques de comportement des matériaux trouvés sur le terrain. Par conséquent, les tests ont été menés aussi avec les puits de géosynthétiques, ayant le même rempli de mélanges de sol ont été étudiés. En général, les résultats ont montré que les 12 mm de fibres plates ainsi que des fibres ondulé de 25 mm ont montré une meilleure performance, car il contribue à l'amélioration des performances par rapport à la résistance à la traction et suction. Dans les essais avec les alvéoles de géosynthétiques, les résultats ont montré un meilleur comportement au sol naturel comme une couche de support et les alvéoles remplis de fibre ondulée, ce qui contribue à l'amélioration de l'interaction du système.

Mots-clé: fibre, alvéoles, matériaux alternatifs, amélioration des sols, pavage.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA.....	1
1.2 OBJETIVOS	4
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 BREVE HISTÓRICO DAS RODOVIAS NO BRASIL E NO MUNDO	6
2.2 SOLOS NÃO SATURADOS	8
2.3 CURVA CARACTERÍSTICA DE SUÇÃO DE SOLOS.....	11
2.4 SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS.....	13
2.4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	13
2.4.2 MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADO COM FIBRAS	14
2.4.3 TIPOS DE FIBRAS UTILIZADAS NOS MATERIAIS COMPÓSITOS.....	16
2.4.4 ESTUDOS EXPERIMENTAIS COM FIBRAS COMO REFORÇO DE SOLOS.	19
2.4.5 ALTERAÇÃO NAS PROPRIEDADES DOS SOLOS PELA INCLUSÃO DE FIBRAS.....	25
2.5 GEOSSINTÉTICOS TRIDIMENSIONAIS	34
2.5.1 REFORÇO DE SOLOS POR ESTRUTURAS ALVEOLARES.....	36
2.5.2 ESTUDO DA INTERAÇÃO ALVEOLAR.....	37
2.5.3 ENSAIOS SOBRE UMA CAMADA DE ALVÉOLOS.....	41
3 MATERIAIS.....	53
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS NO BRASIL	53
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA FRANÇA	56
3.2.1 ESPUMAS	56
3.2.2 AREIA D'ALLIER	56
3.2.3 ALVÉOLOS.....	57
4 METODOLOGIA	59
4.1 METODOLOGIA NO BRASIL	59
4.1.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES.....	59
4.1.2 ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	63

4.1.3 DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA	64
4.2 METODOLOGIA ADOTADA NOS ESTUDOS NA FRANÇA.....	64
4.2.1 ESCOLHA DA ESPUMA	65
4.2.2 CONFECÇÃO DOS ALVÉOLOS.....	66
4.2.3 MONTAGEM DO MODELO	67
4.2.4 ALVÉOLOS EM GEOSSINTÉTICOS	71
5 RESULTADOS OBTIDOS.....	73
5.1 ENSAIOS NO BRASIL.....	73
5.1.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	81
5.1.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	95
5.2 ENSAIOS NA FRANÇA	100
5.2.1 ENSAIOS COM MATERIAIS ALTERNATIVOS.....	100
5.2.2 ENSAIOS COM ALVÉOLOS EM GEOSSINTÉTICO.....	110
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	117
6.1 CONCLUSÕES.....	117
6.2 SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS.....	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Localização da área de estudo (Fonte: www.ondefica.com.br).....	2
Figura 2.1: Resistência à compressão simples para as misturas com cal e fibras: a) PET; b) sintética (Bento, 2006).	22
Figura 2.2: Módulo de deformação secante $E_{s(0,1\%)}$ para: a) argila e b) argila cimentada. (Feuerharmel, 2000).	22
Figura 2.3: Curva tensão-deformação x distorção para o Solo Residual Arenito Botucatu – SRAB (Heineck, 2002).	23
Figura 2.4: Curva tensão-deformação x distorção do SRAB com adição de fibras de 24mm (Heineck, 2002).	23
Figura 2.5: Mecanismo de ruptura obtido para camadas de areia sem fibras: a) vista superior e b) vista lateral. (Donato, 2007).....	24
Figura 2.6: Mecanismo de ruptura obtido para camadas de areia com 0,50% de fibras: a) vista superior e b) vista lateral. (Donato, 2007).....	24
Figura 2.7: Curva de resistência em relação à deformação distorcional para diferentes tensões confinantes e índices <i>as pecto</i> (Festugato, 2008).	27
Figura 2.8: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre I_f das matrizes cimentada e não cimentada reforçada com fibras: a) PET; b) polipropileno; c) vidro para tensão confinante igual a 60 kPa.	28
Figura 2.9: Índice de fragilidade para uma argila com 7% de cimento (Feuerharmel, 2000)..	29
Figura 2.10: Curvas tensão x deformação axial e deformação volumétrica x deformação axial para fibra Tipo I - mais alongável considerando a) matriz cimentada (PC=7%); b) matriz cimentada reforçada com fibra (CF=12mm, PF=0,50%) e c) matriz cimentada reforçada com fibra (CF=36mm, PF=0,50%) (Specht,2000).....	29
Figura 2.11: Curvas tensão x deformação axial e deformação volumétrica x deformação axial para fibra Tipo II - menos alongável considerando a) matriz cimentada (PC=7%); b) matriz cimentada reforçada com fibra (CF=12mm, PF=0,50%) e c) matriz cimentada reforçada com fibra (CF=36mm, PF=0,50%) (Specht,2000).....	30
Figura 2.12: Módulo de deformação secante $E_{s(0,1\%)}$ para a) areia siltosa e b) areia siltosa cimentada (Feuerharmel, 2000).....	32
Figura 2.13: Amostras apresentando formação diferenciada dos planos de ruptura para a) argila com adição de 7% de cimento e b) argila com adição de 7% de cimento e fibra de 12mm (Feuerharmel, 2000).	33

Figura 2.14: Variação das deformações volumétricas das misturas com argila e cimento na ruptura (a) e final (b).(Feuerharmel, 2000).	33
Figura 2.15: Influência da adição de bentonita e fibra nas matrizes estudadas nos testes com $p' = 100\text{kPa}$. (Heineck, 2002).	34
Figura 2.16: Geotêxteis alveolares Armater, Geoweb e Tenweb, respectivamente (Reiffesteck, 1996).	36
Figura 2.17: Envoltórias de resistência para solos reforçados e sem reforço (Bathurst & Karpurapu, 1993).	37
Figura 2.18: Influência do tipo do geotêxtil (Reiffesteck, 1996).	37
Figura 2.19: Influência da densidade dos alvéolos	38
Figura 2.20: Diferentes configurações estudadas para células triaxiais (Rajagopal, 1999).	39
Figura 2.21: Influência do número de alvéolos sobre a coesão aparente (Rajagopal, 1999). ..	39
Figura 2.22: Esquema de ensaio com sete alvéolos (Reiffesteck, 1996)	40
Figura 2.23: Influência do efeito de grupo para ensaio de sete alvéolos (Reiffesteck, 1996)..	40
Figura 2.24: Modo de ruptura (Reiffesteck, 1996).	41
Figura 2.25: Variação da altura do alvéolo (Reiffesteck, 1996).	41
Figura 2.26: Variação da dimensão do lado do alvéolo (Reiffesteck, 1996).	42
Figura 2.27: Variação da capacidade de carga em função da geometria das células (Mhaiskar, 1996).	42
Figura 2.28: Apresentação do experimento inicial para estudo da interação alveolar (Racanas, 2002).	43
Figura 2.29: Caracterização das espumas utilizadas quanto ao Módulo de Elasticidade (Grygiel, 2009).	44
Figura 2.30: Ensaios executados com solo natural compactado na umidade ótima e areia, para a espuma flexível (Grygiel, 2009).	45
Figura 2.31: Ensaios executados com solo natural e areia, para a espuma rígida (Grygiel,2009).	45
Figura 2.32: Ensaios realizados com solo natural e areia como material de preenchimento dos alvéolos, para a espuma flexível (Grygiel,2009).	46
Figura 2.33: Ensaios realizados com solo natural e areia como material de preenchimento dos alvéolos, para a espuma rígida (Grygiel,2009).	47
Figura 2.34: Procedimento de compactação efetuado por Chapelet (2010). Onde: A) Preenchimento dos alvéolos; B) Compactação; C) Material compactado e D) Colocação do material de base.	48

Figura 2.35: Procedimento de compactação efetuado por Chapelet (2010). Onde: E) Inversão da caixa metálica; F) Abertura da caixa; G) Retirada do fundo falso e H) Material pronto para ensaio.....	49
Figura 2.36: Gráfico Pressão x Deslocamento para argila reforçada com alvéolos, em função da energia de compactação (Chapelet, 2010).....	50
Figura 2.37: Gráfico Pressão x Deslocamento para argila reforçada com alvéolos, em função do teor de água (Chapelet,2010).	51
Figura 2.38: Gráfico Pressão x Deslocamento para areia reforçada com alvéolos, variando a energia de compactação (Chapelet, 2010).....	51
Figura 3.1: Granulometria com e sem ultrassom para o solo estudado (Bento, 2006).	54
Figura 3.2: Gráfico de plasticidade com a localização do solo estudado (Bento, 2006).....	54
Figura 3.3: Granulometria das areias onde areia 1 representa a areia fina e a areia 2 representa a areia grossa.	55
Figura 3.4: Fibra lisa (Fitesa, 2005)	55
Figura 3.5: Fibra corrugada (Fitesa, 2005).....	55
Figura 3.6: Curva granulométrica da areia de Allier (Racana, 2002).	56
Figura 3.7: Ensaio de tração em amostras de papel (Racana, 2002).....	57
Figura 3.8: Alvéolos em geossintético.	58
Figura 4.1: Moldes e prensa utilizados na compactação estática.	60
Figura 4.1: Ensaio de compressão efetuado na prensa e manualmente.	65
Figura 4.2: Ensaio de compressão realizados para escolha da espuma.	66
Figura 4.3: Confecção dos alvéolos.	67
Figura 4.4: Desenho esquemático dos ensaios realizados.....	68
Figura 4.5: Montagem do ensaio.....	69
Figura 4.6: Método para verificação da área de influência das espumas.	70
Figura 4.7: Croqui esquemático da disposição dos LVDT's.	70
Figura 4.8: Etapas da preparação do ensaio com os alvéolos.	71
Figura 4.9: Esquema dos ensaios executados com solo natural como camada de suporte (Modificado de Chapelet, 2010).....	72
Figura 5.1: Curva de compactação para o solo natural.	73
Figura 5.2: Curva característica para as amostras de solo natural e para as misturas de solo natural com adição de 20 % de areia.....	74
Figura 5.3: Curva característica modificada para as amostras de solo natural e para as misturas de solo natural com adição de 20 % de areia.	75

Figura 5.4: Pontos da curva característica plotados em função do índice de vazios, para as amostras analisadas.	76
Figura 5.5: Curva característica para as amostras com adição de fibra lisa.	77
Figura 5.6: Índice de vazios em função do grau de saturação para as amostras com adição de fibras lisas.	78
Figura 5.7: Curva característica modificada para amostras com adição de fibra lisa.	79
Figura 5.8: Curva característica para as amostras com adição de fibra corrugada.	79
Figura 5.9: Curva característica modificada para amostras com adição de fibra corrugada.	80
Figura 5.10: Índice de vazios em função do grau de saturação para as amostras com adição de fibras corrugada.	80
Figura 5.11: Resistência à compressão simples em função da sucção para as amostras com adição de areia fina.	81
Figura 5.12: Resistência à compressão em função da sucção e índice de vazios para as amostras com adição de areia fina.	83
Figura 5.13: Curva tensão x deformação para 10% de areia fina.	84
Figura 5.14: Curva tensão x deformação para 20% de areia fina.	84
Figura 5.15: Curva tensão x deformação para 40% de areia fina.	85
Figura 5.16: Curva tensão x deformação para 60% de areia fina.	85
Figura 5.17: Amostras de solo natural (argila) moldadas na umidade ótima.	87
Figura 5.18: Amostras de solo natural (argila) e areia moldadas na umidade ótima.	88
Figura 5.19: Amostras de solo natural (argila) moldadas na umidade ótima e umedecida até o ramo úmido.	88
Figura 5.20: Amostras de solo natural (argila) e areia moldadas na umidade ótima e umedecidas até o ramo úmido.	89
Figura 5.21: Amostras de solo natural (argila) moldadas no ramo úmido.	89
Figura 5.22: Amostras de solo natural (argila) e areia moldadas no ramo úmido.	90
Figura 5.23: Três condições de ensaio estudadas para análise de pF/e	92
Figura 5.24: Deformações correspondentes à resistência máxima para as três condições de ensaio estudadas.	94
Figura 5.25: Gráfico das deformações correspondentes à ruptura em função de $(pF \times e)$	94
Figura 5.26: Resultados de resistência a tração (q_t) em função da umidade para as amostras com adição de fibras lisas.	96
Figura 5.27: Resultados de resistência a tração (q_t) em função de pF/e para as amostras com adição de fibras lisas.	96

Figura 5.28: Resultados de resistência a tração (qt) em função da umidade para amostras com adição de fibras corrugadas.	97
Figura 5.29: Resultados de resistência a tração (qt) em função da umidade para amostras com adição de fibras corrugadas.	98
Figura 5.30: Picos de resistência à tração para amostras de solo natural com adição de areia e fibras corrugadas	99
Figura 5.31: Picos de resistência à tração para amostras de solo natural com fibras corrugadas.	99
Figura 5.32: Alguns exemplos de amostras ensaiadas após a ruptura.	99
Figura 5.33: Resultado dos ensaios para as duas espumas utilizadas.	100
Figura 5.34: Ensaio para a espuma rígida com camada de areia de 50 mm e camada de alvéolos de 25 mm.	101
Figura 5.35: Ensaio para a espuma flexível com camada de areia de 50 mm e camada de alvéolos de 25 mm.	102
Figura 5.36: Detalhe do pistão de carregamento e alvéolos em papel.	102
Figura 5.37: Ensaio realizado para espuma rígida utilizando papel como separador entre as camadas ensaiadas.	104
Figura 5.38: Ensaio realizado para espuma rígida utilizando plástico como separador entre as camadas ensaiadas.	104
Figura 5.39: Ensaio realizado para espuma flexível utilizando papel como separador entre as camadas ensaiadas.	105
Figura 5.40: Ensaio realizado para espuma flexível utilizando plástico como separador entre as camadas ensaiadas.	105
Figura 5.41: Ensaio executado com espuma flexível e alvéolos com 50 mm de altura.	106
Figura 5.42: Ensaio executado com espuma rígida e alvéolos com 50 mm de altura.	107
Figura 5.43: Comparação entre os alvéolos ensaiados tendo como suporte a espuma flexível.	108
Figura 5.44: Comparação entre os alvéolos ensaiados tendo como suporte a espuma rígida.	108
Figura 5.45: Detalhe do pistão de carregamento e alvéolos em geossintético.	110
Figura 5.46: Ensaio realizado tendo o solo natural como camada de base.	111
Figura 5.47: Continuação dos ensaios tendo o solo natural como camada de base.	111
Figura 5.48: Ensaio realizado tendo a mistura de solo natural com areia como base.	114
Figura 5.49: Ensaio realizado tendo a mistura de solo natural com areia como base.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Propriedades mecânicas da matriz não reforçada (Vendruscolo, 2003)	26
Tabela 2.2: Propriedades mecânicas da matriz reforçada com fibras (Vendruscolo, 2003)	26
Tabela 2.3: Propriedades mecânicas da matriz não cimentada com fibras PET (Montardo,1999).	31
Tabela 2.4: Propriedades mecânicas da matriz cimentada com fibras PET (Montardo,1999).	31
Tabela 3.1: Características dos materiais utilizados para ensaio com fibras	53
Tabela 3.2: Tipos de espumas analisados.....	56
Tabela 4.1: Parâmetros para as amostras do ensaio de compactação para determinação do teor de areia fina a ser misturado no solo natural.	62
Tabela 4.2: Amostras estudadas com a mistura de solo natural, areia e fibras.	63
Tabela 4.3: Ensaio realizado com o modelo.	67
Tabela 4.4: Ensaio realizado com solo natural (SN), areia, fibras e alvéolos em geossintéticos.	72

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIACÕES E NOMENCLATURAS.

ABNT – Associação Brasileira de normas Técnicas

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

d – Diâmetro da fibra

e – índice de vazios

ES - Especificação de ensaio

H - Altura do corpo de prova, em cm

L – Comprimento da fibra

NBR – Norma Brasileira Registrada

PETROBRAS – Petróleo Brasileiro

pF – logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água

qt - Resistência à tração por compressão diametral para solos

Sr – grau de saturação

UnB – Universidade de Brasília

winicial – Teor de umidade inicial

EF: espuma flexível

ER: espuma rígida

ALV: alvéolos de 2,5 cm de altura

ALV5: alvéolos de 5,0 cm de altura

AREIA: camada de areia de 5,0 cm de altura

AREIA10: camada de areia de 10,0 cm de altura

σ_t : resistência à tração

P : carga de ruptura

D : diâmetro do corpo de prova

t : espessura do corpo de prova

MR: mousse rigide

MS: mousse souple

Alvé: alvéolos

FC: fibra corrugada

FL: fibra lisa

SN: solo natural

1 INTRODUÇÃO

O solo natural, e em especial o solo tropical, é um material complexo e variável, sendo comum que o mesmo não consiga alcançar, total ou parcialmente, os pré-requisitos necessários para o bom desenvolvimento de um determinado projeto. Por possuir fundamental importância nas obras de engenharia, afinal sobre ele estarão assentes grandes estruturas, é fundamental que o solo atenda às solicitações exigidas. Em alguns casos, como na região Amazônica, fatores externos como altos índices pluviométricos e altas temperaturas durante a maior parte do ano, acabam por potencializar algumas características indesejáveis, tal como a alta sensibilidade dos materiais à variação de umidade. Além disso, na região em questão, há uma grande carência de materiais granulares que possam ser utilizados na construção de estruturas de pavimento.

Devido a essas características, a construção de pavimentos se torna um desafio, pois como o solo se torna muito úmido, há dificuldade para se distinguir uma boa condição de compactação, o que se constitui em uma das causas da rápida deteriorização do pavimento. Outro fator a ser considerado, diz respeito a drenagem do pavimento, fazendo com que os solos, mesmo sendo compactados na umidade ótima, acabem chegando ao ramo úmido devido a drenagem insuficiente. Esses fatores acabam sendo potencializados tendo em vista as características inerentes do solo local, geralmente de natureza argilosa muito fina e altamente expansiva. Por outro lado, devido a carência de materiais granulares para o uso em camadas do pavimento, como é o caso da Região Amazônica, a utilização desses solos como material para pavimentação torna-se impreterível. Sendo assim, o conhecimento de suas propriedades geotécnicas é de fundamental importância, uma vez que podem possibilitar a sua utilização e o consequente emprego de técnicas, a fim de melhorá-lo.

1.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA

A área de estudo da presente pesquisa encontra-se no município de Coari-AM, na Província Petrolífera de Urucu, localizada a 650Km da capital do estado do Amazonas, Manaus. (Figura 1.1)

Antes de ser descoberta, a Província Petrolífera de Urucu era apenas um campo onde se desenvolviam estudos, pesquisas e tentativas de exploração de petróleo na região Amazônica. As primeiras tentativas de encontrar petróleo na Amazônia datam do início do século passado. O primeiro poço foi perfurado em 1917 pelo Serviço Mineralógico do Brasil (SMG), órgão do governo federal criado em 1905 para localizar jazidas de carvão e outros combustíveis. Entretanto, somente em 1948 foram iniciados os primeiros levantamentos sísmicos na Amazônia, com o objetivo de encontrar especificamente gás natural e petróleo. Entretanto, apenas em 1986 todos esses esforços vieram a ser recompensados, com a descoberta de óleo e gás em níveis comerciais na região localizada próximo ao rio Urucu. Depois disso, o desenvolvimento de um projeto para colocar a área rapidamente em produção exigiu grande esforço e capacitação técnica, além de profundo conhecimento da região. Dois anos depois, em 1988, iniciava-se a produção comercial na Província Petrolífera de Urucu (Petrobras, 2006).

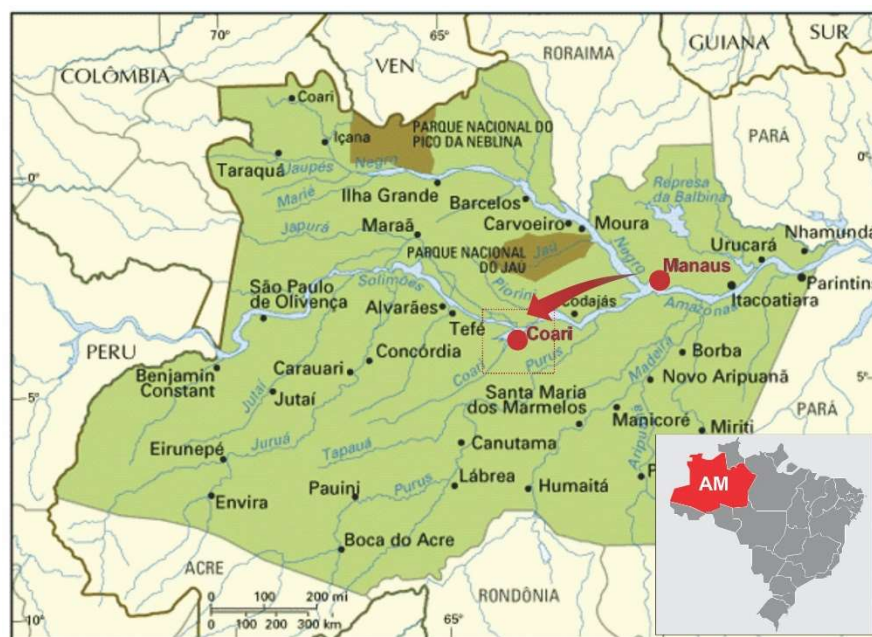


Figura 1.1: Localização da área de estudo (Fonte: www.ondefica.com.br)

A construção rodoviária na região de Urucu encontra-se em uma situação quase extrema em relação à precariedade de materiais para compor a estrutura do pavimento, dispendo apenas, como alternativa para a mesma, de um solo fino geralmente expansivo. Acrescenta-se a tal fato que, em função do elevado nível e constância da precipitação, é freqüente que a compactação do material se dê com o solo no ramo úmido (Camapum de Carvalho, 2006).

Alguns trabalhos vêm sendo realizados na região sob a orientação do Prof. José Camapum de Carvalho do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, tais como o de Pessoa (2004) e Bento (2006), a fim de encontrar uma solução para o problema local. Como resultado da primeira pesquisa, observou-se que a estabilização química com cal apresentou-se satisfatória, aumentando consideravelmente a capacidade de carga dos solos lá utilizados. Porém, em trechos experimentais executados observou-se o aparecimento de trincas, função das grandes deformações que ocorrem nos processos de expansão e retração, aliadas à presença de sucções elevadas. A atuação dos gradientes de sucção nos processos de expansão e retração acaba transferindo para o revestimento tensões de tração que propiciam o surgimento de trincas no revestimento (Camapum de Carvalho, 2006). Definido o mecanismo de surgimento e propagação das trincas passou-se a estudar materiais alternativos para a solução do problema.

Bento (2006), com o objetivo de viabilizar a solução do problema local, estudou-se a inclusão de fibras de PET reciclada e fibras sintéticas na massa de solo, variando seu teor e comprimento, bem como a inclusão de fibras metálicas ao revestimento asfáltico. Os resultados mostraram que não ocorreu melhoria significativa em relação à capacidade de carga. No entanto, foi possível verificar que as fibras sintéticas apresentaram melhor comportamento que as fibras de PET, uma vez que conferiram ao solo uma maior tenacidade. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato das fibras sintéticas apresentarem maiores deformações anteriormente a ruptura, o que indica uma maior capacidade de absorver as deformações causadas pelos fenômenos de expansão e retração do solo.

Com a participação e acompanhamento da autora dessa tese, foram desenvolvidos trabalhos de graduação no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília vinculados à Universidade Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, França. Atuaram no desenvolvimento desses estudos os alunos Romain Chapelet e Benoit Grygiel. Destaca-se ainda que os estudos em modelo reduzido realizados na Universidade Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, França, adotaram como ponto de partida os resultados apresentados na tese de doutorado do engenheiro Phillipe Reifesteck (1996), defendida naquela instituição.

1.2 OBJETIVOS

A fim de dar continuidade à pesquisa desenvolvida por Bento (2006), que busca a solução para o problema da construção de rodovias na região amazônica, esta tese tem como objetivo geral estudar a incorporação de materiais alternativos que possibilitem uma melhoria no comportamento dos solos desta região no que tange a melhoria de resistência dos materiais e seu melhor comportamento quanto a formação e propagação de trincas. Com este intuito, estudou-se a incorporação de fibras, fixando-se o seu teor e se variando apenas o seu tipo e seu comprimento. Ainda, avaliou-se a utilização de alvéolos, também conhecidos como geocélulas, com incorporação do solo local, como elemento de melhoria passível de uso nas camadas de base e sub-base de pavimentos. É necessário ainda destacar que, parte deste trabalho foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil da Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, França.

Diante do exposto, dentro do objetivo geral estão inclusos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar uma mistura de solo natural e areia que possa provocar uma maior interação entre o solo e as fibras, tomando por base os resultados alcançados em Heineck (2002) e Bento (2006);
- Avaliar qual, dentre os tipos e tamanhos de fibra analisados, apresenta o melhor comportamento com a mistura ideal de solo e areia - determinada neste estudo;
- Avaliar o comportamento das misturas com relação à tração, visto que, em função dos altos índices pluviométricos, das altas temperaturas e muitas vezes da drenagem ineficiente, o solo regional encontra-se constantemente nos processos de retração ou expansão;
- Avaliar a relação entre a sucção e o ganho de resistência à tração, uma vez que o solo natural sofreu a adição de areia e fibras; e
- Com relação aos alvéolos, verificar a sua viabilidade quanto ao ganho da capacidade de suporte, tendo como subleito o solo regional

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Essa tese está dividida em seis capítulos. São eles:

- Capítulo 1 – nele encontra-se a introdução, que disserta a respeito da região para a qual foram desenvolvidos os estudos, os trabalhos já realizados e, os objetivos gerais e específicos;

- Capítulo 2 – apresenta a revisão bibliográfica, que destaca informações importantes sobre a avaliação aqui proposta;
- Capítulo 3 – descreve os materiais utilizados, sendo este capítulo dividido entre os materiais utilizados no Brasil e os materiais utilizados na França;
- Capítulo 4 – apresenta a metodologia, em que consta a descrição e motivação para os ensaios realizados. De forma similar ao Capítulo 3, este capítulo também foi dividido entre metodologia no Brasil e metodologia na França;
- Capítulo 5 – disserta a respeito dos resultados obtidos avaliando, ainda, a relação entre os mesmos e
- Capítulo 6 – refere-se às conclusões, onde se apresenta um panorama geral dos resultados dos ensaios efetuados, assim como, descreve a solução de melhor desempenho para o problema em estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BREVE HISTÓRICO DAS RODOVIAS NO BRASIL E NO MUNDO

Tendo em vista que esta tese tem como objetivo tratar de materiais alternativos para utilização em pavimentação, é apresentado, primeiramente, um breve apanhado histórico das rodovias no Brasil e no mundo.

A necessidade de construir estradas com materiais mais resistentes se deu devido à invenção da roda na Mesopotâmia, há cerca de 5000 anos. Sabe-se muito pouco sobre as primeiras estradas construídas, mas elas datam, certamente, de antes do período chamado de período histórico. Foram encontrados vestígios marcantes de estradas antigas na América Central, Norte e Noroeste da América do Sul, planejadas e construídas pelas civilizações dos maias, astecas e principalmente pelos incas [...]. Durante o período compreendido entre 400 anos antes e 200 anos depois de Cristo, os romanos intensificaram a construção de um abrangente sistema de estradas, compreendendo uma extensão total de mais de 75.000 milhas, que cobriam o vasto império.

[...] Depois do declínio do império romano, a construção de estradas não foi retomada até fins do século XVIII, quando ressurgiu na Inglaterra, na França e nos Estados Unidos. A época medieval assinala um grande retrocesso nos sistemas de comunicação. As ruas das cidades eram estreitas a ponto de impedirem o tráfego de veículos com rodas. Somente em 1595, com a descoberta do Lago de Asfalto na Ilha de Trinidad e a invenção da mola, também no final do século VXI, que as viagens começam a ficar mais confortáveis e seguras.

Com o ressurgimento das estradas de rodagem, Tresaguet, em 1764 na França, desenvolveu novos métodos de construção e novas concepções das estradas de rodagem, sendo um dos precursores das rodovias modernas. Reconheceu a importância da umidade na capacidade de suporte do subleito e a necessidade, portanto, de drená-lo convenientemente. Construiu pavimentos bem mais delgados que os romanos, pois admitia que ao subleito cabia, no final, o suporte das cargas impostas às estradas. Com asfalto natural, em 1802, os franceses pavimentaram grandes áreas no Palais Royal. Napoleão reconheceu a importância militar e econômica das estradas, e o atual sistema rodoviário francês teve início no seu império, de 1804 a 1814.

Na Inglaterra, o Engenheiro Telford (1805) e Mac Adam (1815), iniciaram a utilização de pedra marroada e pedra britada na construção de estradas de rodagem. [...] Em 1858 foi inventado o britador mecânico e em 1859 o rolo compressor com autopropulsão movido à lenha e vapor, o que aumentou muito a utilização de brita nas estradas de rodagem, pela diminuição do seu custo de produção.

[...] A descrição da viagem do Príncipe D. Pedro, do Rio de Janeiro a São Paulo, dias antes de proclamar a independência, é um perfeito retrato do que eram as vias terrestres existentes naquela época no Brasil. A roda era uma invenção de uso restrito às cidades, seus arredores e ao interior de algumas fazendas. Durante o primeiro império, foram também, muito pequenas as preocupações da Corte voltadas para os transportes em geral, muito menos, para os terrestres.

[...] No segundo império, no entanto, o fato mais importante no setor de transportes rodoviários foi a concessão feita a Mariano Procópio Ferreira Lage, para a organização da Companhia União e Indústria, com a finalidade de construção e exploração de estradas de rodagem. Isso resultou na construção da estrada que ligava Petrópolis (RJ) e Juiz de Fora (MG), que passou a ser designada “Estrada União e Indústria”. Esta estrada representou, realmente, um marco na história do rodoviarismo brasileiro. Sua construção foi iniciada em Petrópolis, a 12 de abril de 1856, com presença do Imperador. [...] Em 23 de junho de 1861 o Imperador inaugurou a “União e Indústria”, percorrendo-a num total de 140 km. [...] Na construção da “União e Indústria” houve a oportunidade de se utilizar, pela primeira vez no Brasil, o macadame hidráulico. Para a época, as condições técnicas desta estrada eram espetaculares, bastando dizer que, ainda hoje, integra vários trechos da ligação Petrópolis (RJ) - Juiz de Fora (MG).

[...] O Brasil dispunha, no início do século XX, de 500 km de estradas com revestimento em macadame hidráulico ou variantes desta técnica, com tráfego muito reduzido de viaturas, todas de tração animal.

[...] É de 1906 a idéia do Barão do Rio Branco de construir uma estrada para automóveis do Rio de Janeiro (RJ) a Petrópolis (RJ), obra somente iniciada em 1922. O automóvel trouxe à tona um grande problema: as velhas estradas de pedra marroada ou pedra de mão e brita, que até então se adaptavam perfeitamente à tração animal, estavam sendo rapidamente destruídas pelos novos veículos e a proteção delas, por meio da construção de revestimentos betuminosos, foi o primeiro e mais importante passo, tendo em vista o novo tipo de tráfego.

[...] Em 1917, o Brasil já possuía em circulação cerca de 5000 automóveis, sendo que 90% deste total circulavam entre Rio de Janeiro e São Paulo, restringindo seu uso praticamente as áreas urbanas. [...] Até 1924, os únicos estados que possuíam

estradas dignas deste nome eram São Paulo, Santa Catarina, Minas Gerais e Rio de Janeiro.

[...] Em 1931, a Inspetoria de Obras contra as Secas recebe incumbência de elaborar o primeiro planejamento, alicerçado em conhecimentos mais precisos, no conjunto de estradas federais, sendo estabelecido 7 troncos rodoviários e 50 linhas subsidiárias, abrangendo a região sujeita à seca no Nordeste. À esta malha rodoviária, ligou-se, em 1939, a Rio-Bahia, em Feira de Santana da Bahia, onde se entronca com a Feira de Santana-Fortaleza, rumando daí para Teresina, no Piauí.

[...] De maneira geral, várias foram as intervenções do governo e do então recém-criado DNER, tanto por meio de pesquisas como por meio da divulgação de trabalhos em congressos, a fim de se definir os parâmetros e técnicas a serem considerados na construção de rodovias a fim de estender a malha viária brasileira e atender ao tráfego cada vez mais crescente. (Prego, 2001, p. 22-35).

2.2 SOLOS NÃO SATURADOS

Muitas obras de engenharia estão assentes sobre os solos não saturados utilizam o solo no seu estado não saturado como material de construção. Esta condição do solo faz com que o mesmo seja visto como um solo problemático, uma vez que o mesmo muda suas características de estado quando sujeito às variações de umidade, podendo causar expansão, retração, perda de resistência, etc. De acordo com Barden, (1965), tanto os solos naturais como os solos artificiais apresentam-se na condição não saturada. Como exemplo de solos artificiais pode-se citar os solos artificiais compactados, muito utilizados em barragens e aterros assim como em obras rodoviárias, compondo o corpo estradal. Esses solos podem ser considerados como não saturados devido à sua natureza, podendo possuir vazios maiores que os dos solos dessecados, quando compactados no ramo seco. Para Vargas (1985), os solos tropicais lateríticos e saprolíticos, cuja formação está intrinsecamente ligada ao processo de decomposição da rocha matriz, encontram-se frequentemente no estado de não saturação, devido às características de alta permeabilidade e às condições climáticas severas as quais estão expostos.

Delgado (2007) afirma que, quando os vazios de um solo estão ocupados, parcialmente por ar e em parte por água, diz-se que o solo está na condição não saturada. Quando o teor de umidade é baixo, o ar está presente em condutos contínuos, enquanto que a água se concentra principalmente ao redor dos contatos entre as partículas. A interface entre as duas fases está na

forma de meniscos dentro dos vazios do solo. Já quando o teor de umidade é elevado, o ar pode estar ocluído no solo na forma de bolhas isoladas. Os fenômenos envolvidos na saturação geram uma pressão na água do solo abaixo da pressão atmosférica.

De acordo com Lee e Wray (1995) sucção pode ser definida como:

Basicamente, a sucção dos solos é uma quantidade energética para avaliar sua capacidade de reter água. Quando a água livre migra dentro de um solo, ela pode ser adsorvida ou retida por ele. Para desprender esta água adsorvida, energia externa tem que ser aplicada. O valor da energia aplicada por unidade de volume de água para desprende-la é a sucção.

Para Ceratti *et al.* (1996) *apud* Delgado (2007), como os solos têm seus poros preenchidos parcialmente de água, devido às variações ambientais constantes nos países tropicais, a pressão de água nos mesmos será menor que a pressão atmosférica, portanto, negativa. Logo, a secagem nos solos resultaria em um aumento na pressão negativa até valores superiores a 10MPa.

Ainda de acordo com os autores supracitados, a quantidade de energia ou sucção requerida para remover água de um solo depende do tamanho do poro e da tensão superficial entre as partículas de solo e as moléculas de água. Assumindo-se que a tensão superficial seja constante, a sucção requerida para remover a água dependerá apenas da estrutura do solo. Em alguns casos, a estrutura do solo constitui-se de arranjos irregulares de partículas de solo com diferentes tamanhos de poros. Nos solos argilosos, com poros menores, a sucção para iniciar a remoção d'água nos poros será maior que para os solos arenosos, com poros maiores.

Para Lambe e Whitman (1969), um solo não saturado é considerado como um sistema trifásico, isto é, constituído de 3 fases: líquida (água), gasosa (ar) e sólida (partículas de minerais). Para Fredlund e Morgenstern (1977) deve-se considerar, além das três fases, uma quarta fase independente, que corresponde à interface ar-água, conhecida também como membrana contrátil. Sua característica mais importante é a possibilidade da mesma exercer uma tensão de tração nos materiais contíguos, denominada de tensão superficial.

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), do ponto de vista comportamental, o solo não saturado pode ser considerado como um sistema de duas fases que entram em equilíbrio (partículas de solo e membrana contrátil) e outras duas que fluem (ar e água) ao se aplicar um gradiente de

tensão. Nas correlações massa-volume, é possível considera-lo um sistema trifásico, visto que o volume da interface ar-água é muito pequeno e sua massa pode ser considerada como parte da massa de água. Entretanto, quando se analisa o estado de tensão de um sistema multifásico contínuo, é necessário considerar que a interface ar-água se comporte como uma fase independente.

Para Barden (1965) *apud* Delgado (2007), os efeitos da variação no grau de saturação poderiam ser melhores estudados dividindo os intervalos do grau de saturação em um conjunto de 5 elementos. São eles:

1. Extremamente seco ($S_r < 5\%$):

A fase ar é contínua através da massa de solo e alguma água está em forma altamente viscosa absorvida firmemente ao esqueleto sólido. Como os vazios de ar estão interconectados, apenas ar será expelido com o adensamento do solo e, como o grau de saturação é muito pequeno, o valor da tensão efetiva, σ' , pode ser tomado como igual à tensão aplicada menos a pressão do ar ($\sigma - u_a$). Todavia, a pressão do ar é geralmente a pressão atmosférica e, neste caso, pode ser suposta como zero, fazendo $\sigma' = \sigma$.

2. Na condição seca (ramo seco – S_r de 5% a 90%)

Quanto mais água é acrescentada a um solo, mais o comportamento do solo torna-se afetado pela água livre que pela a água adsorvida, numa transição gradual. Com o adensamento, embora o ar seja expulso, o valor de u_w raramente ficará positivo e o valor de sucção ($u_a - u_w$) ainda é suficientemente alto, assegurando que pouca água flua através do solo.

3. Na condição ótima ($S_r = 90\%$)

Para este valor, que é um estágio de transição para a saturação completa, o valor da sucção cai para u_w . Se isso acontece, apenas a água pode drenar do solo.

4. Na condição úmida em relação a ótima ($90\% < S_r < 95\%$)

O ar já não pode existir num estado livre, mas pode estar ocluso, isto é, ocorrer na forma de bolhas isoladas. Não existe meio de medir u_a e o ar remanescente está preso ao esqueleto, sendo incapaz de ser removido

pelo fluxo de água. Todavia, se algum ar permanecer no solo na forma de bolhas, estas podem tornar o fluido do poro altamente compressível, apesar de terem pouco efeito sobre o valor de u_w .

5. Na condição saturada ($S_r > 95\%$)

Para solos argilosos com grau de saturação relativamente alto, o ar neste solo está ocluso. Pode-se, então, supor que este ar tem pouco efeito sobre a poropressão de água. Nesses casos, o solo não saturado tende a se comportar como se fosse saturado e a tensão efetiva pode ser assumida como igual a $\sigma - u_w$.

2.3 CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCCÃO DE SOLOS

Segundo Fredlund e Xing (1994) *apud* Sales (2008), definiu-se como curva característica a relação entre a água presente nos poros e a sucção de um solo. Este volume de água pode ser quantificado em termos de teor de umidade volumétrico (θ), definido como a relação entre o volume de água e o volume total, de teor de umidade gravimétrico (w), cuja magnitude é obtida em função da relação entre pesos de água e de sólidos, ou em termos de grau de saturação. Para altos valores de sucção (acima de 1500 kPa) a sucção mátrica e a total podem ser consideradas equivalentes. A sucção mátrica é estabelecida pela diferença entre as pressões de ar e água e, ao ser incorporada a parcela de sucção osmótica, trabalha-se com sucção total.

A sucção matricial, ao lado da tensão efetiva, é reconhecida como uma das mais significativas variáveis na descrição das propriedades de resistência, compressibilidade e permeabilidade de um solo (Vilar, 1997). Uma forma de avaliar as variações da sucção de um solo é por meio da curva característica de retenção de água, que representa uma relação gráfica entre a sucção matricial ou total e o teor de umidade (gravimétrico ou volumétrico) ou grau de saturação do solo (Presa, 1982).

De acordo com Gerscovich (2001), existem diversas maneiras de definir a curva característica de retenção de água. A mais utilizada é aquela que relaciona teor de umidade gravimétrica com a sucção mátrica, esta geralmente representada em escala logarítmica. Seu formato depende do tipo de solo, da distribuição e tamanho dos vazios e, conseqüentemente, da distribuição das frações granulométricas presentes no solo. Solos arenosos tendem a apresentar perda brusca de

umidade quando a sucção ultrapassa um determinado valor, correspondente ao valor da pressão de entrada de ar nos poros. Já nos solos argilosos, a curva característica tende a se apresentar mais suave, porém com entrada de ar mais elevada.

A determinação das curvas características de retenção de água é feita em laboratório seguindo trajetórias de secagem – quando uma amostra previamente saturada é exposta a potenciais de sucção gradualmente maiores, com sucessivas medidas desses valores em função do teor de umidade de equilíbrio e porosidade do solo em cada estágio – ou de umedecimento – quando uma amostra seca ao ar tem seu potencial de sucção reduzido gradualmente, também com sucessivas medidas deste potencial em função do teor de umidade de equilíbrio e porosidade em cada estágio.

Para Camapum de Carvalho e Leroueil (2004), a distribuição de poros bem graduados conduzem a variações gradativas de sucção com teor de umidade. Já a distribuição de poros mais uniforme geralmente conduz a curvas mais horizontalizadas. Nos solos tropicais, entretanto, as curvas características fogem a estes formatos gerais e isso também se dá devido à distribuição de poros que é nestes solos marcada pela presença de macro e microporos que originam modelos de curvas características do tipo bimodal.

Assim, a maioria dos autores apresenta a curva característica com os valores de unidade de pressão em função do teor de umidade gravimétrica ou volumétrica ou grau de saturação.

Para Bento (2006), o conhecimento da curva característica de um solo é de fundamental importância para as obras e projetos de engenharia, permitindo prever seu comportamento com a variação de umidade, expansão e demais parâmetros, uma vez que estes influenciam diretamente na sucção mátrica.

Diante da importância da curva para avaliar o comportamento dos solos, Camapum de Carvalho & Lerouiel (2000) desenvolveram um método que simplifica o estudo e a análise do comportamento dos solos não saturados a partir da definição da curva característica do solo transformada em relação ao índice de vazios.

Para um dado solo tem-se as curvas características expressas em termos de sucção e grau de saturação ($pF \times S_r$) variando com o índice de vazios, onde pF significa o logaritmo da sucção em centímetros de coluna d'água e S_r representa o grau de saturação. Quanto menor o índice

de vazios, maior será a sucção para um mesmo grau de saturação. Assim, ao solicitar o solo ocorre a redução do índice de vazios e , conseqüentemente, a mudança de curva característica. Sendo assim, a transformação da curva característica é realizada multiplicando-se a sucção (pF) pelo índice de vazios (e) gerando uma curva característica única, representativa dos diferentes índices de vazios para a mesma distribuição de poros. Assim, o modelo então proposto se torna importante do ponto de vista prático, uma vez que, em se conhecendo a curva característica de um solo, pode-se determinar a sua sucção para diferentes índices de vazios, sem que haja necessidade de se medir ou acompanhar as variações de sucção no solo. No entanto, deve-se observar que a aplicação deste modelo se torna menos precisa à medida que se afasta da distribuição de poros inicial.

Segundo Delgado (2007), vários fatores interferem nas curvas características, tais como as propriedades químicas e mineralógicas, o índice de vazios e a distribuição de poros. Em relação as propriedades químicas e mineralógicas, estas afetam as curvas características de solos distintos, não interferindo em relação ao mesmo solo, quando consideradas as curvas características transformada ou não. Entretanto, quando se observa o índice de vazios e a distribuição de poros o comportamento se inverte, uma vez que são variáveis que traduzem o estado do solo. Assim, a curva característica quando expressa em termos de epF e da variação com a distribuição de poros, pode ser utilizada em aplicações práticas, tendo em vista que no campo trabalha-se com faixas determinadas de umidade e peso específico. Por conseguinte, é possível analisar o comportamento mecânico do solo considerando os parâmetros como índice de vazios e sucção matricial (u_a-u_w) ou (pF).

2.4 SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS

2.4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A técnica de reforçar o solo com fibras já é um processo muito conhecido pela humanidade. De acordo com Palmeira (1992), uma das aplicações que mais se aproxima dos geossintéticos utilizados atualmente data de 1926, quando o Departamento de Estradas da Carolina do Sul utilizou mantas de algodão a fim de reforçar camadas asfálticas de pavimentos. Voltando no tempo, há indícios da aplicação desta técnica em algumas partes da Muralha da China assim como em estradas construídas pelos Incas, no Peru, empregando lã de lhama como reforço. Há também indícios da utilização de fibras nos primórdios da civilização, com emprego no Antigo

Egito e Roma, sendo apenas o século passado realizadas as primeiras tentativas de produção racional desses materiais, inicialmente por misturas de pastas diluídas de cimento com fibras naturais, como as fibras vegetais e de amianto.

Sendo o solo um material da engenharia que nem sempre apresenta características necessárias ao tipo de obra à que se destina, o uso de fibras, tanto naturais como sintética, apresenta-se como uma técnica promissora melhorando alguns de seus parâmetros. Assim, Kerisel (1985) e Yamamuchi (1993) mencionam o uso desta técnica pelos antigos, quando da sua utilização a fim de aumentar a capacidade de carga de fundações rasas assim como da estabilidade de maciços compactados. Os relatos abrangem a utilização de fibras de juta, piaçava e sisal em diversas obras de engenharia. De acordo com Gray (1983), entretanto, com o surgimento e avanço da indústria química, os materiais sintéticos começaram a ser utilizados com a mesma finalidade, tendo em vista sua elevada resistência e durabilidade, assim como sua produção em larga escala.

Segundo Trindade *et al.* (2004), observa-se, nas últimas duas décadas, um crescente número de relatos sobre a utilização de fibras de aço, vidro, borracha e de plástico em pesquisas de laboratório, na área geotécnica. A grande maioria desses trabalhos atesta ganhos de resistência e confirmam a ação de fibras como meio de aumentar a ductibilidade dos solos. Relatos de trabalhos de campo são mais escassos, mas, de modo similar, comprovam a facilidade de execução e de compactação, assim como, o bom desempenho do solo reforçado com a inclusão de fibras. A inclusão aleatória de fibras de polipropileno aos solos gera um material compósito com características peculiares e diferentes daquelas dos materiais que foram originados. Solos reforçados desta forma tem apresentado mudanças em determinados parâmetros de engenharia que os tornam aptos a serem utilizados em obras para as quais, à princípio, não apresentariam serventia. Desta forma, por aumentarem a resistência à tração, assim como melhorarem as outras propriedades geotécnicas do solo, um dos usos mais promissor das fibras como reforço de solos é sua utilização na construção de terraplenos.

2.4.2 MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADO COM FIBRAS

Atualmente, um grande número de novos materiais tem sido desenvolvido, geralmente baseado em materiais tradicionais, mas incorporando de alguma forma elementos de reforço. Estes novos materiais são denominados materiais compósitos (Heineck, 2002). De acordo com

Budinsk (1996), materiais compósitos são misturas de dois ou mais materiais diferentes com características inferiores à do material resultante. São constituídos de duas fases: a matriz e o elemento de reforço, sendo desenvolvidos para otimizar os pontos fortes de cada uma das fases

É consenso entre os pesquisadores, tais como Taylor (1994) e Hannant (1994), que a maior contribuição das fibras em compósitos fibrosos trata-se do estado pós-fissuração, onde as mesmas contribuem para aumentar a capacidade de absorção de energia em tais materiais. Isso se deve ao fato de que a deformação necessária para causar fissuras numa matriz cimentada é muito inferior ao alongamento das fibras, onde se observa pouco ou nenhum aumento da tensão de fissuração.

Taylor (1994) acredita que, para que a contribuição da fibra seja eficaz na resistência pré-fissuração do compósito, é necessária a utilização de uma fibra mais rígida que a matriz, assim como sua aderência com a mesma, a fim de evitar movimento entre as partes. Desta forma, também observa que as fibras não impedem o trincamento do compósito, e sim aumentam a resistência à tração devido ao controle de propagação de fissuras. Jonhston (1994) afirma que as fibras possuem dois efeitos importantes: o primeiro é reforçar o compósito nos carregamentos que levam a criação das tensões de tração e o segundo, é melhorar a ductibilidade e a tenacidade da matriz.

Ainda segundo Taylor (1994), as principais características responsáveis pelo bom desempenho dos materiais compósitos reforçados com fibras são:

- Teor de fibra: um alto teor de fibra proporciona uma maior resistência pós-fissuração, desde que as fibras possam absorver as cargas adicionais causadas pelas fissuras;
- Módulo de elasticidade das fibras: quanto maior o módulo de elasticidade da fibra, maior será a probabilidade de ocorrer o arrancamento da mesma;
- Aderência entre a matriz e a fibra: uma alta aderência entre a fibra e a matriz diminui o tamanho das fissuras. A maior parte das características de resistência e ruptura dos compósitos reforçados com fibra é função da aderência entre a fibra e a matriz;
- Resistência da fibra: o aumento da resistência da fibra contribui para o aumento da ductibilidade do compósito, partindo-se do princípio que não haja rompimento das ligações de aderência. A resistência dependerá, entre outros fatores, do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz;

- Comprimento da fibra: quanto maior o comprimento da fibra, menor será a possibilidade da mesma ser arrancada do compósito.

Já para Festugato (2008), é importante não apenas o comprimento da fibra, como citado por Taylor (1994), mas ainda, seu diâmetro. A relação l/d (comprimento/diâmetro) conhecida como fator de forma ou índice aspecto, é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra (F_t) e a resistência de aderência fibra/matriz (F_a). Se a fibra tem uma alta resistência à tração, como a fibra de aço, ou a resistência de aderência necessária deverá ser alta para impedir o arrancamento antes que a resistência à tração seja totalmente mobilizada, ou fibras de alta relação l/d deverão ser utilizadas, a fim de evitar a propagação de trincas na matriz.

2.4.3 TIPOS DE FIBRAS UTILIZADAS NOS MATERIAIS COMPÓSITOS

Para diversos autores tais como Feuerharmel (2000), Heineck (2002), Casagrande (2005), Festugato (2008), Caldeira (2012), no reforço de solos vários tipos de fibras podem ser utilizados, desde as naturais até as fabricadas pelo homem. Suas características, que também irão afetar diretamente a matriz a que se misturam, são inerentes ao tipo de material que são compostas e seu processo de fabricação. Assim, torna-se de fundamental importância o conhecimento do mecanismo de interação matriz-reforço e da parcela de contribuição de cada um deles para um bom desempenho do conjunto, assim como a definição do tipo de fibra a ser utilizada.

De acordo com Caldeira (2012), deve-se considerar certas características relevantes na escolha das fibras para reforço de materiais de maneira a não comprometer o desempenho do material compósito. A fibra deve ser quimicamente neutra e não deteriorável, não sofrer ataque de fungos, bactérias ou álcalis e não ser prejudicial à saúde humana, assim como também deve apresentar características físicas e mecânicas adequadas a finalidade que se destinam.

De maneira geral as fibras classificam-se em naturais, poliméricas, minerais e metálicas.

2.4.3.1 FIBRAS NATURAIS

De acordo com Bento (2006), as fibras naturais foram as primeiras a serem empregadas como reforço na história da humanidade, sendo sua maioria de origem vegetal destacando-se o

bambu, juta, coco, linho e sisal, sendo esta última a mais utilizada devido a sua alta tenacidade e resistência. Segundo Caldeira (2012), algumas dessas fibras podem atingir grandes resistências como é o caso da fibra de bambu, que chega a atingir uma resistência de 100 MPa com módulo de elasticidade entre 10 e 25 GPa.

Entretanto, Festugato (2008) relata que a durabilidade dos compósitos formados por fibra vegetal deve ser investigado, pois estas fibras podem ser degradadas por ataques de fungos e microorganismos.

2.4.3.2 FIBRAS POLIMÉRICAS

As fibras poliméricas podem ser consideradas como o grupo das fibras com maior variedade, tendo em vista que os polímeros, utilizados como matéria prima para sua confecção, podem apresentar diversos comportamentos, originando diversos tipos de fibras. Segundo Bento (2006), podem apresentar-se na forma fibrilada, constituindo um formato trançado quando esticadas transversalmente ou na forma de laminetes, apresentando-se em um filamento único. Os tipos de fibras poliméricas são descritos a seguir.

- Fibras de polipropileno: devido a sua constituição, essas fibras possuem grande flexibilidade e tenacidade. De acordo com Cladeira (2012), seu módulo de elasticidade está em torno de 8GPa e sua resistência a tração é de aproximadamente 400MPa. Além disso, possuem elevada resistência ao ataque de várias substâncias químicas e álcalis. Tais características, conferem aos materiais nos quais estão incorporadas, uma substancial resistência ao impacto.
- Fibras de polietileno: Segundo Hannant (1994), as fibras de polietileno apresentam alta durabilidade mas maiores deformações de fluência, o que significa que se forem utilizadas para suportar altas tensões permanentes num compósito fissurado, podem ocorrer consideráveis alongamentos e flexões ao longo do tempo. Assim, procurando solucionar o problema de baixa aderência e módulo de elasticidade, a indústria tem desenvolvido o polietileno de alta densidade.
- Fibras de poliéster: Taylor (1994) relata que estes tipos de fibra são bastante similares à fibra de polipropileno e podem ser utilizadas para as mesmas aplicações. Como exemplo, pode-se citar as fibras fabricadas com PET, material oriundo das garrafas de refrigerante, água mineral, óleo de cozinha, entre outros.

- Fibras de poliamida: Segundo Taylor (1994), poliamida são polímeros contendo longas cadeias de moléculas geralmente de baixa resistência e rigidez, uma vez que suas moléculas se dispõem em espiral e dobradas. Entretanto, quando estas moléculas são esticadas e reforçadas durante o processo de manufatura, estas desenvolvem altas resistências e módulos de elasticidade, como é o caso do Kevlar, sendo o exemplo mais conhecido e de maior sucesso.

Alguns trabalhos na literatura relatam a utilização de fibras de PET como reforço de solos. Prietto *et al.* (1999) utilizou essas fibras nos comprimentos de 12, 24 e 36 mm para teores variando de 0,1% a 0,9% de fibras em relação a massa de solo seco. Os resultados não foram influenciados pelo comprimento das fibras, mas sim pelo teor das mesmas, apresentando resultados mais pronunciados para maiores porcentagens de fibras. Já Montardo *et al.* (1998), no estudo de um solo arenoso cimentado, utilizou um teor de fibra de 0,25% e comprimentos de 12, 24 e 36 mm, observando, assim, uma relação positiva, porém não linear, entre a resistência e o comprimento das fibras. Já Bento (2006) variou tanto o comprimento quanto o teor das fibras incorporadas ao solo. Entretanto, os resultados não foram satisfatórios, pois a sua inclusão na massa de solo não contribuiu para uma maior tenacidade das amostras, quando comparada com as outras fibras utilizadas no mesmo estudo.

2.4.3.3 FIBRAS MINERAIS E METÁLICAS

Dentre as fibras minerais destacam-se as fibras de vidro, carbono e amianto que seguem descritas abaixo.

- Fibras de carbono: Segundo Taylor (1994), apresentam alta resistência à tração e módulo de elasticidade em torno de 420 GPa, sendo estas características imprescindíveis para uma maior aderência entre a matriz e as fibras.
- Fibras de vidro: seu processo de manufatura se dá por meio de fios compostos de centenas de filamentos individuais justapostos. O diâmetro dos filamentos individuais é geralmente na ordem de 10 μ m, segundo Taylor (1994). Entretanto, cerca de 99% das fibras de vidro são suscetíveis ao ataque dos álcalis (Caldeira, 2012).
- Fibras de amianto: possui alta resistência à tração e alto módulo de elasticidade, com valores girando em torno de 1GPa e 160 GPa, respectivamente. Possui uma boa aderência com a

matriz composta de cimento. Entretanto, por liberar partículas tóxicas aos alvéolos pulmonares, sua utilização caiu em desuso e foi proibida em muitos países.

Em relação as fibras metálicas, segundo Taylor (1994), sua resistência à tração é da ordem de 1,1 GPa e seu módulo de elasticidade é de 200 GPa. Este tipo de fibra possui uma grande variedade de formatos a fim de aumentar a resistência ao arrancamento. Em função do meio em que estão inseridas, podem apresentar corrosão, sendo o banho de níquel uma técnica utilizada para minimizar este problema.

2.4.4 ESTUDOS EXPERIMENTAIS COM FIBRAS COMO REFORÇO DE SOLOS

A maioria dos estudos sobre a inclusão de fibras como reforço de solos tem como objetivo estudar a contribuição da inclusão de fibras na massa de solo, analisando parâmetros como resistência e deformabilidade em comparação com os solos não reforçados. Diante disto, pode-se afirmar que as características de resistência e deformabilidade do elemento de reforço têm uma influência significativa no comportamento tensão-deformação do solo reforçado, uma vez que vão interagir diretamente com a massa de solo que estão incluídas.

McGrow *et al.* (1978) propuseram a classificação do reforço de solos em inclusões extensíveis e não extensíveis. Assim, o reforço extensível tem deformações de ruptura maior do que a máxima deformação de tração do solo sem o reforço. Seu objetivo é aumentar a ductibilidade e diminuir a perda de resistência pós-pico, além de contribuir para o acréscimo de resistência mecânica. Já o reforço não extensível tem deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração do solo sem o reforço, contribuindo para o ganho de resistência mecânica, entretanto, provoca rupturas catastróficas quando o reforço se rompe.

Segundo Festugato (2008), as fibras somente passam a exercer uma ação efetiva dentro da massa de solo quando esta, submetida a esforços externos, sofre deformações. O funcionamento das fibras como elemento de reforço é então comandado pelas características de deformabilidade do solo e pela forma de distribuição destas deformações, que dependem do tipo de solicitação ao qual o material está submetido.

De acordo com Caldeira (2012), um dos primeiros efeitos provocados pela adição de fibras ocorre já na fase de compactação, formando uma estrutura distinta daquela do solo sem a

inclusão de fibras. Mantendo-se constante a energia de compactação, o efeito provocado é identificado pelo aumento do índice de vazios do solo. Este efeito depende do atrito desenvolvido entre o solo e o reforço.

Segundo Maher&Gray (1990), a técnica de reforço de solos que tem como alvo grande parte dos trabalhos recentes, trata-se da inclusão de fibras aleatoriamente distribuídas, uma vez que possuem duas vantagens em relação aos solos reforçados com inclusões orientadas, contínuas ou não. Assim, minimizam o surgimento de qualquer anisotropia assim como não induz planos preferenciais de fraqueza. É importante salientar que nem sempre é esperado a melhora das características, tais como, por exemplo, o aumento da capacidade de suporte do material. Outros aspectos também são relevantes, tais como: i) a maior capacidade de absorção de energia, ii) queda na redução de resistência pós-pico, iii) maior capacidade de absorver deformações até atingir a resistência última, etc.

Maher &Ho (1994) estudaram as propriedades mecânicas de um compósito constituído de caulinita e fibra - utilizando fibras de polipropileno, vidro e celulose -, por meio de ensaios de compressão não confinada, compressão diametral e de flexão. Foi observado que a inclusão aleatória de fibras aumentou consideravelmente a resistência e a ductibilidade do compósito, sendo este comportamento mais relevante para amostras com baixo teor de umidade. Outro aspecto a considerar foi que as fibras curtas se tornaram mais numerosas dentro da matriz e podem estar mais presentes na zona de ruptura, contribuindo, assim, para o aumento da resistência. Entretanto, por serem mais curtas, podem ser arrancadas mais facilmente da matriz, fato este que pode ser contornado pela utilização das fibras mais longas, quando se deseja melhorar a ductibilidade e a capacidade de absorção de energia.

Silva *et al.* (1995) realizaram ensaios de compactação, compressão não-confinada e ensaios de placa, a fim de verificar a influência da inclusão de fibras em um solo argiloso e arenoso. Foi observado que não há mudanças nos parâmetros de compactação quando da adição das fibras, muito embora não se tenha constatado quaisquer problemas ao compactar as amostras estudadas. Para o solo argiloso, verificou-se um aumento da resistência à compressão não confinada, não importante o teor e o comprimento das fibras utilizadas. Já para o solo arenoso, observou-se que as duas variáveis (teor e comprimento) em questão podem determinar um comportamento melhor ou pior em relação ao solo sem a inclusão de fibras.

Ulbrich (1997) e Consoli *et al.* (1998) estudaram o efeito da inclusão de fibras de vidro em um solo artificialmente cimentado e outro não cimentado, por meio de ensaios de compressão não confinada, diametral e triaxiais drenados. Foi verificado que fibras mais rígidas, como a de vidro e PET, exerceram efeito mais pronunciado na resistência de pico. Já para as fibras mais flexíveis, como a de polipropileno, exercem um efeito mais pronunciado no modo de ruptura e comportamento último. Este fato também foi observado por Bento (2006), quando dos estudos de um solo argiloso estabilizado com cal e adição de fibras sintéticas, que proporcionaram um aumento da deformabilidade sem, no entanto, afetar a resistência de pico. Já para as fibras de PET foi observado um pequeno aumento na deformabilidade e redução da resistência de pico (Figura 2.1).

Montardo (1999) avaliou o efeito da inclusão de fibras de PET distribuídas aleatoriamente em um solo adicionado com cimento, a fim de estudar suas propriedades de resistência e deformabilidade. O autor observou que a inclusão de fibras proporcionou uma grande influência nas propriedades mecânicas do solo cimentado, aumentando a resistência à compressão não-confinada e à tração por compressão diametral, sendo este aumento mais pronunciado para maiores porcentagens de fibra, não importando a variação do seu comprimento. Também foi observado que o reforço com fibras de PET resultou na melhoria do comportamento pós-pico. Entretanto, não ocorreu uma alteração significativa no modo de ruptura do material. Para o caso analisado, não se verificou a mudança da rigidez inicial das amostras, quando da inclusão das fibras de PET, sendo esta propriedade ligada ao nível de cimentação das mesmas.

Feuerhamel (2000) estudou uma argila caulinitica cimentada artificialmente e reforçada com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente na massa de solo. O Estudo comparou o comportamento observado com outros dois tipos de solo, com características arenosas e areno-siltosas. Foi observado que a adição das fibras de polipropileno provocou reduções no módulo de deformação inicial do solo, sendo que a intensidade das alterações depende do tipo e das características de cada solo (Figura 2.2). Para os solos não cimentados, cujas deformações se distribuem ao longo de toda a amostra, verificou-se que as fibras impõem uma resistência às deformações radiais na amostra, aumentando assim as deformações de compressão no solo, sendo este efeito comandado pela adesão entre o solo e as fibras.

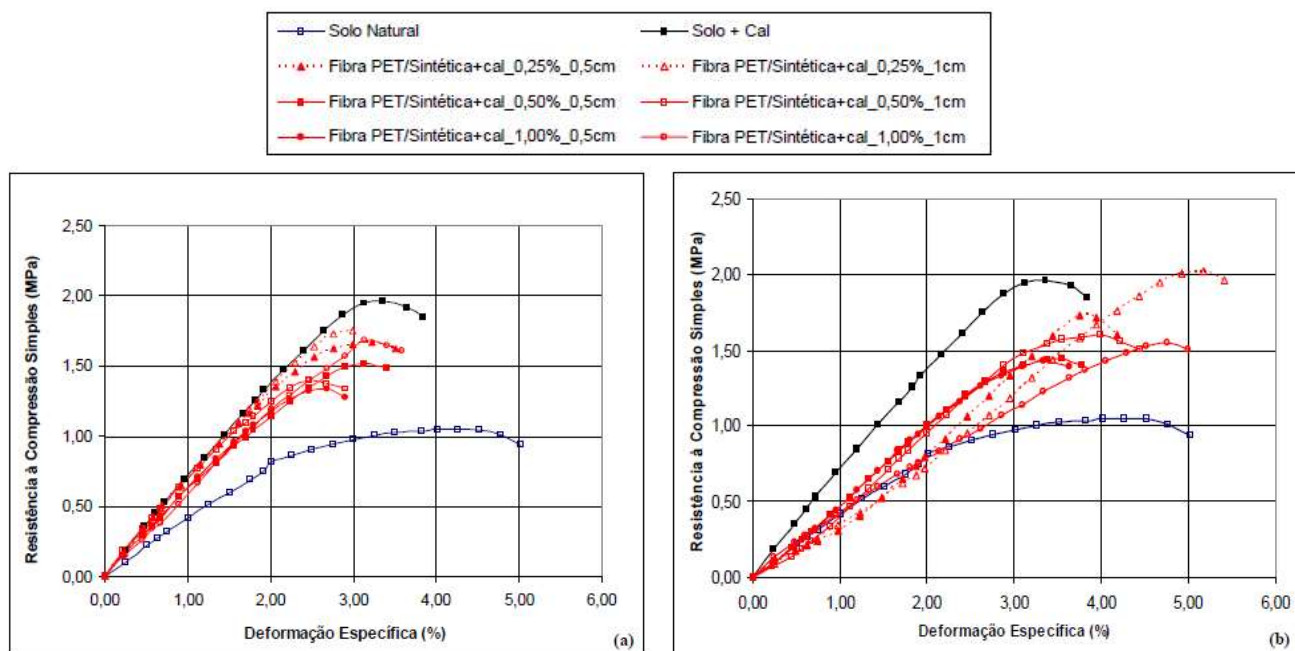


Figura 2.1: Resistência à compressão simples para as misturas com cal e fibras: a) PET; b) sintética (Bento, 2006).

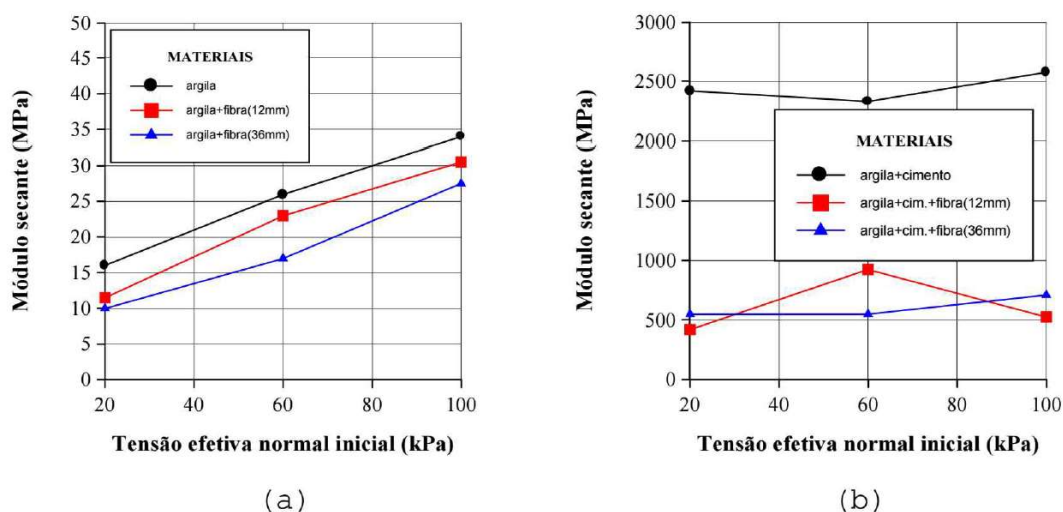


Figura 2.2: Módulo de deformação secante $E_{s(0,1\%)}$ para: a) argila e b) argila cimentada. (Feuerhamel, 2000).

Heineck (2002) estudou o comportamento hidráulico e mecânico de novos materiais geotécnicos a fim de utilizá-los em barreiras hidráulicas, por meio da adição de bentonita e fibras de polipropileno em amostras compactadas de solo, cinza, areia e caulim. Os ensaios de condutividade hidráulica indicaram a utilização do material composto de caulim e fibras como liners de cobertura ou de fundo, mesmo em caso de resíduos perigosos. Dando continuidade aos estudos, observou-se que a influência do reforço fibroso nos solos continua após grandes deformações de cisalhamento, não havendo perda de resistência assim como a introdução de

fibras de polipropileno não influenciou a rigidez inicial dos materiais estudados (Figuras 2.3 e 2.4).

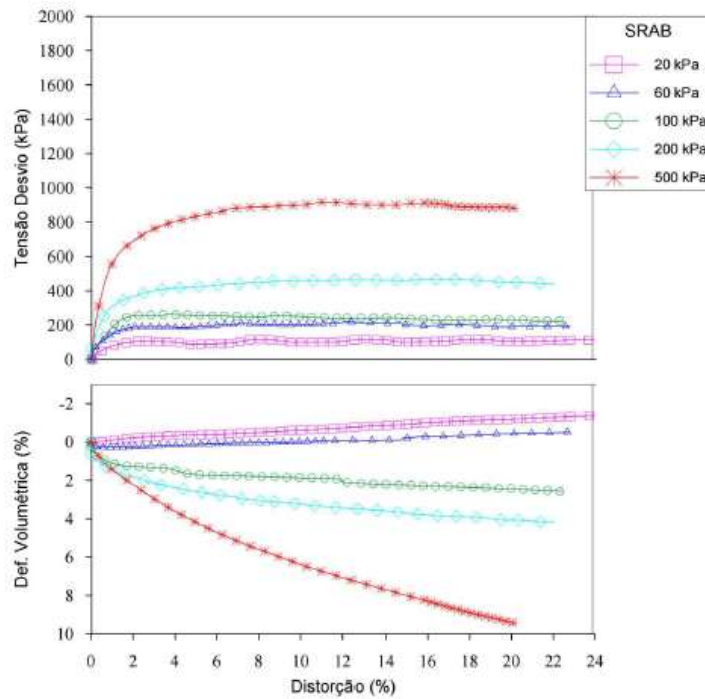


Figura 2.3: Curva tensão-deformação x distorção para o Solo Residual Arenito Botucatu – SRAB (Heineck, 2002).

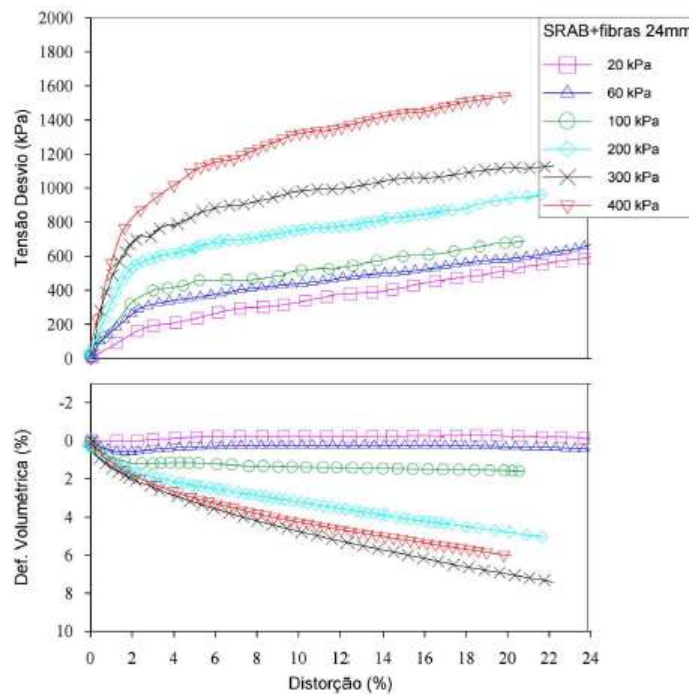


Figura 2.4: Curva tensão-deformação x distorção do SRAB com adição de fibras de 24mm (Heineck, 2002).

Casagrande (2005) estudou a contribuição das fibras de polipropileno na mobilização da resistência de um solo arenoso fino, para diferentes níveis de densidade de compactação, por meio de ensaios de prova de carga em placas. Foi observado que a inclusão do reforço com fibras melhorou a resposta do solo e a variação de densidade realtiva das camadas teve um forte efeito sobre a resistência do material reforçado com fibras, onde o ganho de resistência era mais pronunciado quanto mais densa fosse a mistura. Verificou-se que as fibras inibiram a propagação de fissuras distribuindo as tensões em uma área maior. Assim, o acréscimo de resistência pela adição das fibras ao solo se deve à inibição da formação e propagação das possíveis bandas de cisalhamento.

Donato (2007) estudou a distribuição de tensões em um solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno por meio de prova de carga em placa circular. Nos ensaios pode ser observado que o comportamento carga-recalque do solo arenoso é muito influenciado pela adição de fibras, aumentando sua capacidade de suporte e alterando os mecanismos de ruptura, sendo que as medidas de tensões mostram uma mudança na distribuição de tensões com a inclusão do reforço (Figuras 2.5 e 2.6).

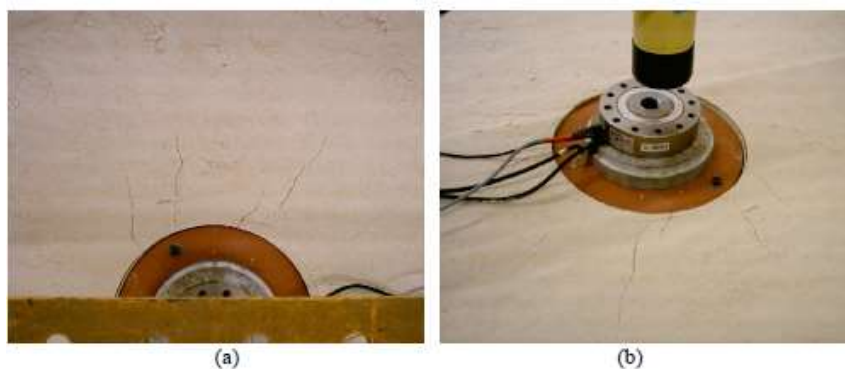


Figura 2.5: Mecanismo de ruptura obtido para camadas de areia sem fibras: a) vista superior e b) vista lateral. (Donato, 2007).



Figura 2.6: Mecanismo de ruptura obtido para camadas de areia com 0,50% de fibras: a) vista superior e b) vista lateral. (Donato, 2007).

2.4.5 ALTERAÇÃO NAS PROPRIEDADES DOS SOLOS PELA INCLUSÃO DE FIBRAS

Diversos autores relatam sobre a mudança de comportamento do solo reforçado com fibra quando comparado com o solo sem o referido reforço. Essas mudanças, geralmente estão associadas ao comportamento mecânico e relacionam-se com a compactação, a resistência, a deformabilidade, o modo de ruptura, a variação volumétrica, a rigidez inicial e a condutividade hidráulica.

- **Resistência ao Cisalhamento de Pico**

De acordo com Festugato (2008), as fibras inibem a amplitude das fissuras associadas à ruptura do compósito. Este fato leva a um aumento nas áreas sob as curvas tensão-deformação. Essa propriedade é comumente referida como tenacidade e representa o trabalho da fratura ou a capacidade de absorção de energia do compósito.

Bueno *et. al* (1996) estudaram um material granular e um coesivo por meio de ensaios triaxiais, demonstrando que os solos coesivos são menos sensíveis ao aumento do comprimento das fibras. Também foi verificado um acréscimo no ângulo de atrito com adição de reforço, sendo este crescente com o aumento da quantidade de fibra.

Teodoro (1999) observou um aumento de resistência de uma areia siltosa em função do comprimento das fibras de polipropileno. Entretanto, o aumento desta propriedade se deu até um comprimento de 30 mm. Para um solo argiloso, este aumento se verificou para o comprimento de 15 mm.

Montardo *et al.* (1999) observou o aumento do ângulo de atrito interno de uma areia com e sem cimentação artificial, reforçada com diferentes tipos de fibras. Em relação ao intercepto coesivo, o autor encontrou um aumento para a areia não cimentada reforçada com fibras de polipropileno. Vendruscolo (2003) observou que as fibras possuem a característica de conferir um intercepto coesivo ao solo arenoso, proporcionando também um aumento do ângulo de atrito. Já para o solo cimentado, as fibras têm uma influência maior sobre a coesão última e o ângulo de atrito último (Tabelas 2.1 e 2.2).

Tabela 2.1: Propriedades mecânicas da matriz não reforçada (Vendruscolo, 2003)

Ensaio	q_{rup} (kPa)	q_{ult} (kPa)	$E_{s(0,01\%)}$ (Mpa)	$E_{s(0,1\%)}$ (Mpa)	$E_{def(10\%)}$ (kJ/m ³)	I_f	c' (kPa)	ϕ' (°)	c'_{ult} (kPa)	ϕ'_{ult} (°)
Matriz não cimentada PC=0; PF=0; TC=20	78	68	89	34	7	0,14	0	36	0	34
Matriz não cimentada PC=0; PF=0; TC=60	183	156	195	81	17	0,17				
Matriz não cimentada PC=0; PF=0; TC=100	298	280	217	100	28	0,06				
Matriz cimentada PC=1; PF=0; TC=20	126	81	824	116	9	0,55	19	35	5	35
Matriz cimentada PC=1; PF=0; TC=60	247	221	916	114	23	0,12				
Matriz cimentada PC=1; PF=0; TC=100	342	321	941	229	33	0,06				

Nota: PC (%)=porcentagem de cimento; PF(%)= porcentagem de fibra; CF(mm)= comprimento da fibra; TC(kPa)= tensão confinante.

Tabela 2.2: Propriedades mecânicas da matriz reforçada com fibras (Vendruscolo, 2003)

Ensaio	q_{rup} (kPa)	q_{ult} (kPa)	$E_{s(0,01\%)}$ (Mpa)	$E_{s(0,1\%)}$ (Mpa)	$E_{def(10\%)}$ (kJ/m ³)	I_f	c' (kPa)	ϕ' (°)	c'_{ult} (kPa)	ϕ'_{ult} (°)
Matriz não cimentada PC=0; PF=0,50; CF=24; TC=20	279	279	47	28	21	0	25	45	25	45
Matriz não cimentada PC=0; PF=0,50; CF=24; TC=60	388	388	89	68	32	0				
Matriz não cimentada PC=0; PF=0,50; CF=24; TC=100	653	653	117	95	50	0				
Matriz cimentada PC=1; PF=0,50; CF=24; TC=20	290	290	180	65	25	0	48	43	48	43
Matriz cimentada PC=1; PF=0,50; CF=24; TC=60	534	534	729	162	44	0				
Matriz cimentada PC=1; PF=0,50; CF=24; TC=100	621	621	604	141	52	0				

Nota: PC (%)=porcentagem de cimento; PF(%)= porcentagem de fibra; CF(mm)= comprimento da fibra; TC(kPa)= tensão confinante.

Festugato (2008) realizou ensaios triaxiais numa areia reforçada com fibras de polipropileno com vários índices aspecto (l/d). Os ensaios demonstraram que houve um acréscimo de resistência em relação ao solo sem reforço, para todos os tipos de fibras analisados. Também foi observado que a areia reforçada unicamente com fibra não apresenta resistência de pico e que a taxa de ganho de resistência do solo reforçado, a partir de determinada deformação, é constante e tende a aumentar com a tensão de confinamento (Figura 2.7).

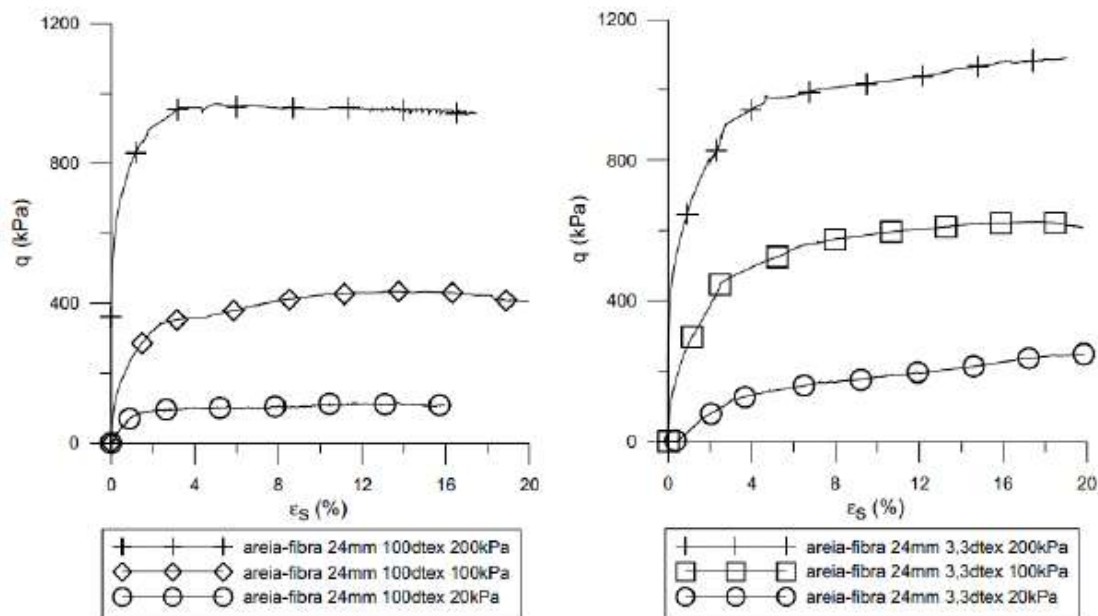


Figura 2.7: Curva de resistência em relação à deformação distorcional para diferentes tensões confinantes e índices as pecto (Festugato, 2008).

- **Resistência ao Cisalhamento Pós-pico**

Entre os diferentes autores é praticamente unânime que o comportamento dos solos reforçados com fibras reduz a queda de resistência pós-pico (Gray & Ohashi, 1983; Consoli et al., 1999; Casagrande, 2005), o que é essencial para efetivar uma ruptura abrupta de uma estrutura de pavimento.

- **Compactação**

Hoare (1979) *apud* Caldeira (2012) estudou a influência da adição de fibras de polipropileno na compactação de um cascalho com areia. Observou-se que as fibras proporcionaram certa resistência à compactação resultando em porosidades maiores da mistura, quando considerada a mesma energia de compactação. Este resultado apresentou-se de maneira linear em relação à quantidade de fibra e independente do tipo de compactação empregada.

Bueno et al. (1996) avaliaram os efeitos da inclusão de vários teores de fibra na compactação de um solo arenoso, concluindo que não houve alterações na umidade ótima e que a massa específica máxima também não sofreu alterações com a inclusão de fibras.

• **Modo de Ruptura**

Montardo (1999) observou que a inclusão de fibras de polipropileno altera significativamente o modo de ruptura de uma matriz cimentada, quando reforçada de fibras. Assim, o comportamento do material que era frágil passa a ser dúctil. Em relação as fibras PET, concluiu que a mesma reduziu o índice de fragilidade da matriz. Entretanto, não foi suficiente para modificar seu modo de ruptura. Já para as fibras de vidro, não foi observada nenhuma mudança significativa no modo de ruptura do material analisado (Figura 2.8).

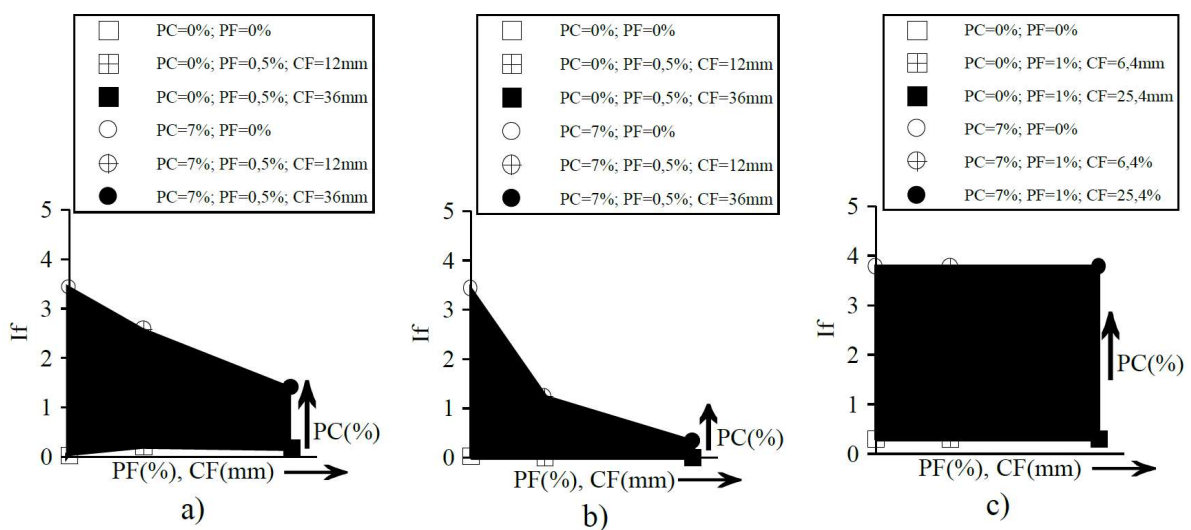


Figura 2.8: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre I_f das matrizes cimentada e não cimentada reforçada com fibras: a) PET; b) polipropileno; c) vidro para tensão confinante igual a 60 kPa.

Feuerharmel (2000), a forma de ruptura do solo é alterada pela inclusão das fibras de polipropileno, reduzindo a fragilidade dos solos. Essa característica pode ser potencializada em função da adesão solo-fibra, que pode ser atingida pela ação de um agente cimentante, formando uma estrutura resistente. Outro fator que pode contribuir esta característica é a combinação apropriada dos fatores tais como o comprimento das fibras e as tensões efetivas normais atuantes. O índice de fragilidade (I_f) é um indicador que representa uma medida de fragilidade do material, sendo ele mais frágil quanto maior o I_f . (Figura 2.9)

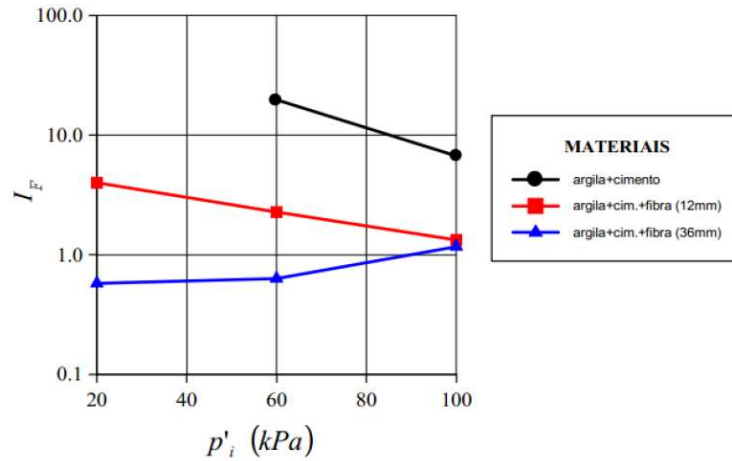


Figura 2.9: Índice de fragilidade para uma argila com 7% de cimento (Feuerharmel, 2000).

Specht (2000) estudou a inclusão de fibras poliméricas de diferentes propriedades mecânicas, uma em forma de filamentos e outra fibrilada, num solo artificialmente cimentado. Foi observado que, no caso das fibras mais alongáveis (em forma de filamento), o comportamento do material que era frágil tornou-se dúctil. Entretanto, para o outro tipo de fibra analisado, não foram observadas modificações no modo de ruptura do material (Figuras 2.10 e 2.11)

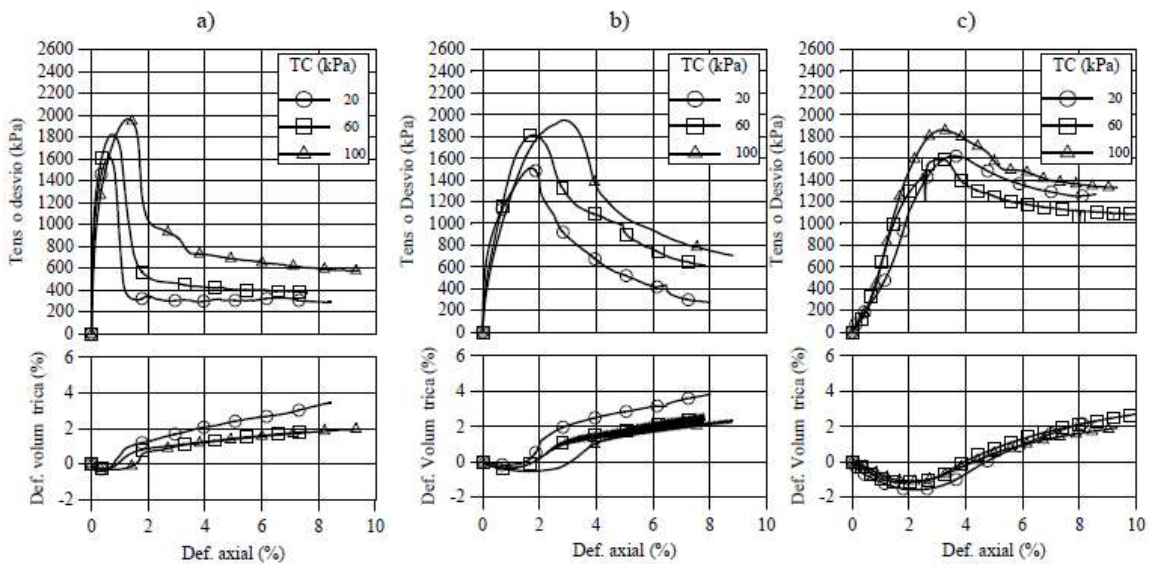


Figura 2.10: Curvas tensão x deformação axial e deformação volumétrica x deformação axial para fibra Tipo I - mais alongável considerando a) matriz cimentada (PC=7%); b) matriz cimentada reforçada com fibra (CF=12mm, PF=0,50%) e c) matriz cimentada reforçada com fibra (CF=36mm, PF=0,50%) (Specht,2000).

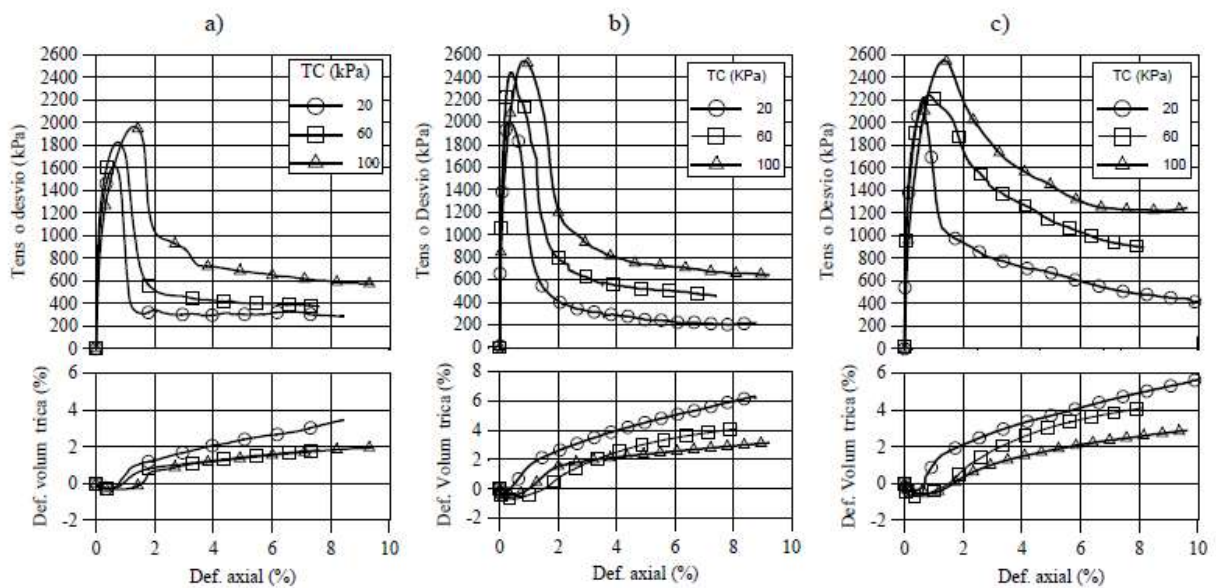


Figura 2.11: Curvas tensão x deformação axial e deformação volumétrica x deformação axial para fibra Tipo II - menos alongável considerando a) matriz cimentada (PC=7%); b) matriz cimentada reforçada com fibra (CF=12mm, PF=0,50%) e c) matriz cimentada reforçada com fibra (CF=36mm, PF=0,50%) (Specht,2000).

• Deformabilidade

Alguns autores observaram um aumento no módulo de deformabilidade tanto maior quanto maior quantidade de fibras inclusas no solo estudado. Foi o que observou McGrow *et al.* (1988) para as areias e Maher&Ho (1994) e Nataraj (1996) para as argilas. Entretanto, Ulbrich (1997) obteve uma redução do módulo com a inclusão das fibras, para as areias cimentadas e não cimentadas. Esta diferença pode estar associada as características da matriz (tipo de solo) e sua maior interação com o reforço utilizado (tipo de fibra, cimentação).

• Rigidez Inicial

Montardo (1999) observou uma queda na rigidez inicial de uma areia cimentada reforçada com fibras de polipropileno. No entanto, para as fibras de PET e de vidro, não foi observada mudança nestas características. Assim, a rigidez inicial de uma matriz de solo reforçada por fibras depende das características do reforço. A influência das variáveis investigadas (porcentagem de cimento-PC, porcentagem de fibra-PF, comprimento da fibra-CF e tensão confinante-TC) sobre a rigidez inicial dos compósitos foi avaliada por meio da análise dos módulos de

deformação secante (E_s) calculado para 0,01 e 0,1% de deformação axial, conforme demonstrado nas Tabelas 2.3 e 2.4.

Tabela 2.3: Propriedades mecânicas da matriz não cimentada com fibras PET (Montardo,1999).

Ensaio	q_{rup} (kPa)	q_{ult} (kPa)	$E_{s(0,01\%)}$ (MPa)	$E_{s(0,1\%)}$ (MPa)	$E_{def(10\%)}$ (kJ/m ³)	I_f	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ'_{ult} (°)	c'_{ult} (kPa)
Matriz não-reforçada PC=0; PF=0; TC=20	72	63	97	38	7	0,1	37	0	36	0
Matriz não-reforçada PC=0; PF=0; TC=60	174	168	114	68	16	0,0				
Matriz não-reforçada PC=0; PF=0; TC=100	311	299	297	132	30	0,0				
Matriz reforçada PC=0; PF=0,5; CF=12; TC=20	72	57	79	37	7	0,3	40	0	37	0
Matriz reforçada PC=0; PF=0,5; CF=12; TC=60	228	198	247	109	21	0,1				
Matriz reforçada PC=0; PF=0,5; CF=12; TC=100	383	319	258	130	34	0,2				
Matriz reforçada PC=0; PF=0,5; CF=36; TC=20	76	62	109	42	7	0,2	43	0	40	0
Matriz reforçada PC=0; PF=0,5; CF=36; TC=60	319	270	275	118	28	0,2				
Matriz reforçada PC=0; PF=0,5; CF=36; TC=100	420	366	253	135	38	0,1				

Tabela 2.4: Propriedades mecânicas da matriz cimentada com fibras PET (Montardo,1999).

Ensaio	q_{rup} (kPa)	q_{ult} (kPa)	$E_{s(0,01\%)}$ (MPa)	$E_{s(0,1\%)}$ (MPa)	$E_{def(10\%)}$ (kJ/m ³)	I_f	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ'_{ult} (°)	c'_{ult} (kPa)
Matriz não-reforçada PC=7; PF=0; TC=20	985	171	3895	920	24	4,8	43	200	38	15
Matriz não-reforçada PC=7; PF=0; TC=60	1225	300	2440	964	41	3,1				
Matriz não-reforçada PC=7; PF=0; TC=100	1308	380	1361	844	56	2,4				
Matriz reforçada PC=7; PF=0,5; CF=12; TC=20	1065	79	2398	750	25	12,5	46	196	46	0
Matriz reforçada PC=7; PF=0,5; CF=12; TC=60	1301	378	2118	861	54	2,4				
Matriz reforçada PC=7; PF=0,5; CF=12; TC=100	1465	493	1699	854	69	2,0				
Matriz reforçada PC=7; PF=0,5; CF=36; TC=20	1098	312	2661	781	43	2,5	49	184	52	26
Matriz reforçada PC=7; PF=0,5; CF=36; TC=60	1442	753	1405	935	87	0,9				
Matriz reforçada PC=7; PF=0,5; CF=36; TC=100	1564	860	2687	1143	102	0,8				

Complementarmente, Feuerhamel (2000) observou que a rigidez inicial não depende somente das características do reforço, mas também da natureza do material. Para obter tais resultados, o autor realizou ensaios com argila, areia siltosa e areias reforçadas com fibras de polipropileno. O resultado dos ensaios nas argilas e areias siltosas indicaram uma grande redução do módulo, enquanto que nas areias não foram observadas grandes modificações. Entretanto, considerando misturas cimentadas reforçadas com fibras, as reduções do módulo foram bastante acentuadas para os três solos analisados (Figura 2.12).

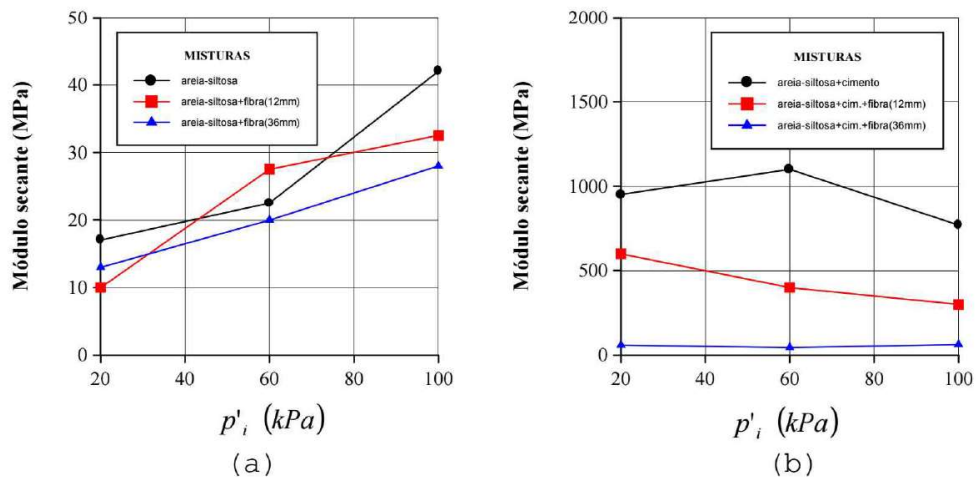


Figura 2.12: Módulo de deformação secante $E_{s(0,1\%)}$ para a) areia siltosa e b) areia siltosa cimentada (Feuerhamel, 2000).

Consoli *et al.* (2002) e Festugato (2008), quando compararam uma areia reforçada com fibras de polipropileno e uma areia não reforçada, concluindo que a inclusão de fibras não altera a rigidez do compósito. Consequentemente, o índice aspecto também não influencia nesta propriedade. No entanto, outros autores, como Ahmed *et al.* (2011), perceberam um aumento na rigidez do material estudado, quando analisado um solo com inclusão de tiras de resíduos plásticos.

• Variação Volumétrica

De acordo com Feuerhamel (2000), os efeitos provocados pela inclusão de fibras de polipropileno sobre a variação volumétrica podem ser bastante diferentes e dependem, sobretudo, da forma como ocorre o colapso da matriz e como se distribuem as deformações provocadas pelo corte da amostra. Assim, os efeitos são bastante distintos para os solos cimentados e não cimentados, havendo, portanto, a contribuição e interação da cimentação na matriz. Observou-se que, para as amostras não reforçadas, ocorreu a formação de uma cunha

na parte superior do corpo de prova. Já para a amostra reforçada, verificou-se a formação de dois planos de ruptura orientados de forma perfeitamente simétrica, em relação ao eixo do corpo de prova (Figura 2.13).



Figura 2.13: Amostras apresentando formação diferenciada dos planos de ruptura para a) argila com adição de 7% de cimento e b) argila com adição de 7% de cimento e fibra de 12mm (Feuerharmel, 2000).

Ainda segundo o mesmo autor, para os solos não cimentados, a estrutura das fibras impõe uma resistência às deformações radiais, aumentando assim as deformações de compressão da amostra. Para os solos cimentados, as deformações concentram-se apenas na superfície de ruptura. Assim, as fibras ou atuam de forma a ancorar as duas superfícies, o que tende a reduzir a dilatação, ou têm como função redistribuir os esforços, que causam a expansão da superfície de corte, tendendo a aumentar as deformações volumétricas (Figura 2.14).

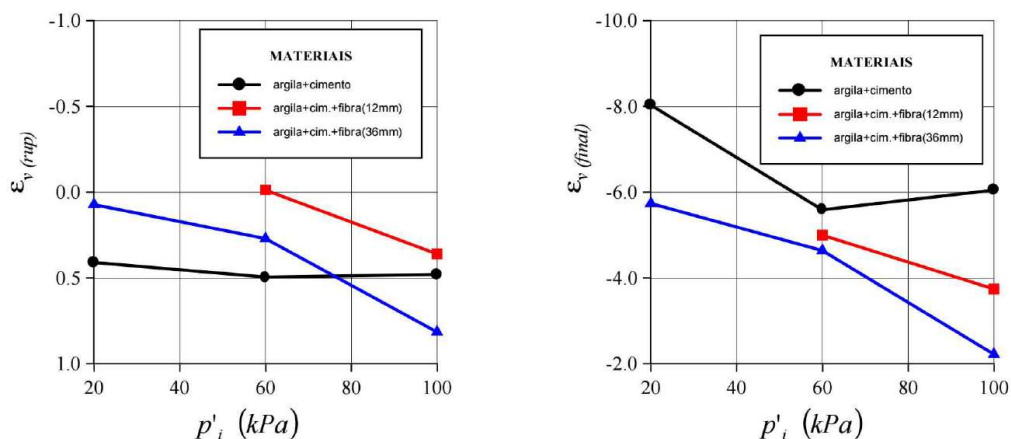


Figura 2.14: Variação das deformações volumétricas das misturas com argila e cimento na ruptura (a) e final (b).(Feuerharmel, 2000).

- **Condutividade Hidráulica**

Feuerhamel (2000) observou que foram obtidos valores de condutividade hidráulica bem mais elevados no momento em que são adicionadas as fibras e cimento no material argiloso, pois, com a flocculação das partículas de argila estas, que antes aderiram as fibras, passam a aglomerar-se ao redor de partículas de cimento, propiciando a segregação de fibras.

Para Heineck (2002), estudou o comportamento de materiais compósitos quando da inclusão de fibras de polipropileno em amostras compactadas de solo, cinza, areia e caulim. Os resultados mostraram que, para todas as matrizes estudadas, que a adição de 0,50% de fibra de 24mm não influenciou a condutividade hidráulica (Figura 2.15).

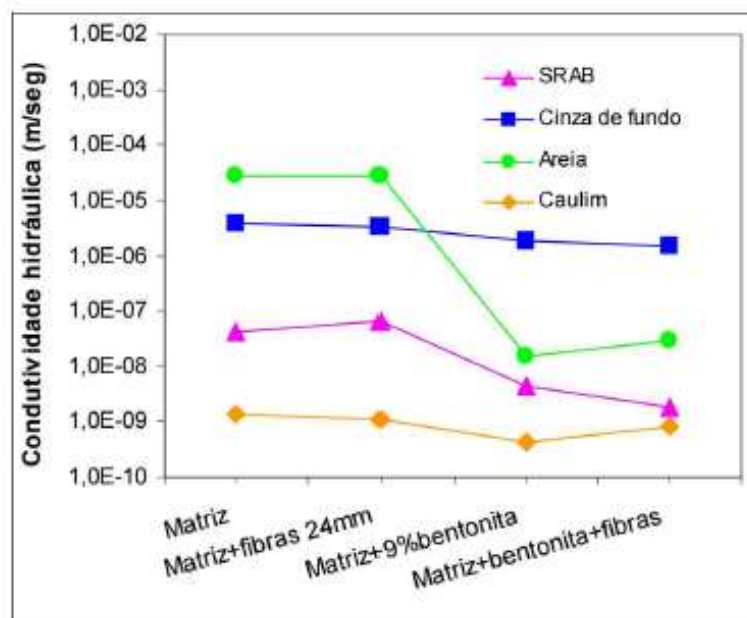


Figura 2.15: Influência da adição de bentonita e fibra nas matrizes estudadas nos testes com $p' = 100\text{kPa}$. (Heineck, 2002).

2.5 GEOSSINTÉTICOS TRIDIMENSIONAIS

Segundo Meneses (2004), as geocélulas são estruturas tridimensionais usadas para o confinamento do solo, constituídas de um conjunto de células interligadas conferindo um aspecto semelhante ao de “favos de mel”. Podem ser encontradas em diferentes configurações variando de acordo com o fabricante ou com a finalidade a que se destina. O material utilizado para a confecção das geocélulas pode ser polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno (PE)

ou polipropileno (PP – geocélulas formadas a partir de tiras de geotêxteis). As células são ligadas entre si por meio de sonda ultrassônica (PE e PEAD) ou por meio de costuras, quando confeccionadas a partir de tiras de geotêxtil. Foram desenvolvidas inicialmente para aplicações militares, a fim de encontrar uma alternativa para a construção de estradas em solos moles, numa região onde a estação chuvosa se prolongava por vários meses reduzindo o ritmo da obra, ou até mesmo paralisando-a. Atualmente, são utilizados para a proteção de taludes contra a erosão, para a proteção de aterros com forte inclinação, reforço de pavimentos assim como a construção de muros em solos reforçados.

De acordo com Reiffsteck (1996), os geossintéticos podem ser classificados como tridimensionais quando possuem o tamanho da célula próximo ou superior a 100 mm e cujo o funcionamento está intimamente ligado à combinação alvéolo-solo. Os produtos mais conhecidos que permitem esta classificação são (Figura 2.16):

- **Armater:** criado por J. F. Vignon em 1978. Os alvéolos são de forma hexagonal. O material de base é um geossintético não tecido em filamentos de polyester. Uma impregnação de resina pode conferir uma semi-rigidez, porém conservando as boas características de permeabilidade.
- **Geoweb:** desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers Waterway Experiment Station*. Os alvéolos apresentam a forma entre um losango e um hexágono. O material de base é um polietileno de alta densidade. A ligação entre as células é obtida por dois ou mais pontos de solda.
- **Tenweb:** os alvéolos são de forma idêntica do Geoweb. O material de base é o polietileno extrudado. Apresenta cor preta ou verde sendo a ligação entre as células obtida por dois pontos de solda, seja qual for a altura das faixas.

A dimensão dos alvéolos é adaptada à cada tipo de obra realizada, sendo o tamanho da abertura dos alvéolos variável de 100 a 400 mm. As variáveis são o lado e a altura do alvéolo. Essas características são dimensionadas em função de vários parâmetros tais como a natureza e a forma dos grãos, o tipo de compactação, as características do geossintético utilizado, etc.

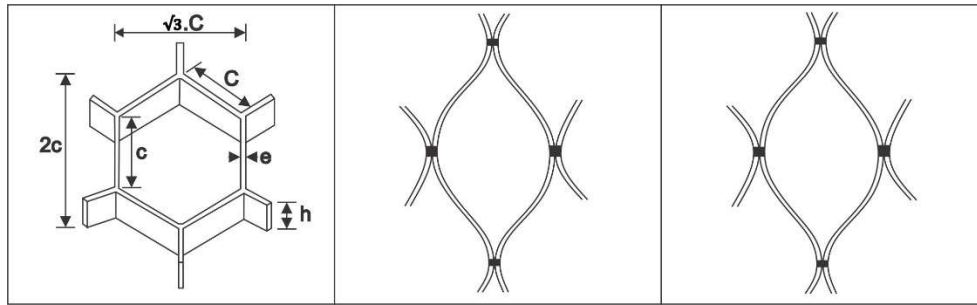


Figura 2.16: Geotêxteis alveolares Armater, Geoweb e Tenweb, respectivamente (Reiffesteck, 1996).

2.5.1 REFORÇO DE SOLOS POR ESTRUTURAS ALVEOLARES

Para as técnicas clássicas, as inclusões interagem por atrito com o meio granular. Para as estruturas de reforço alveolares, o princípio de funcionamento reside no confinamento do solo e sua interação com os alvéolos. Assim, os princípios gerais do reforço de solo por estruturas alveolares são inerentes à noção de confinamento do solo. Essa interação é estudada em vários trabalhos (Reiffesteck, 1996; Racanas, 2002; Meneses, 2004) efetuados sobre a utilização de camadas celulares, permitindo limitar o estado de tensões e de deformações do solo suporte para, por exemplo, um aterro rodoviário.

Bathurst e Karpurapu (1993) realizaram ensaios com a ajuda de uma grande célula triaxial com amostras reforçadas e não reforçadas por um geotêxtil, possuindo dimensões de 200 mm no diâmetro e na altura. Os autores descreveram o ganho de resistência gerado e o atribuí a uma coesão aparente, gerada pelo confinamento do solo (Figura 2.17). Reiffesteck (1996) estudou o confinamento colocando em evidência o ganho de resistência a partir de ensaios de carregamento sobre um alvéolo. A fim de verificar a relação entre o módulo do geotêxtil utilizado e as amostras confinadas, utilizou três tipos de geotêxteis diferentes em ensaios de compressão vertical, verificando que a rigidez da amostra confinada está diretamente relacionada ao módulo do geotêxtil utilizado. (Figura 2.18).

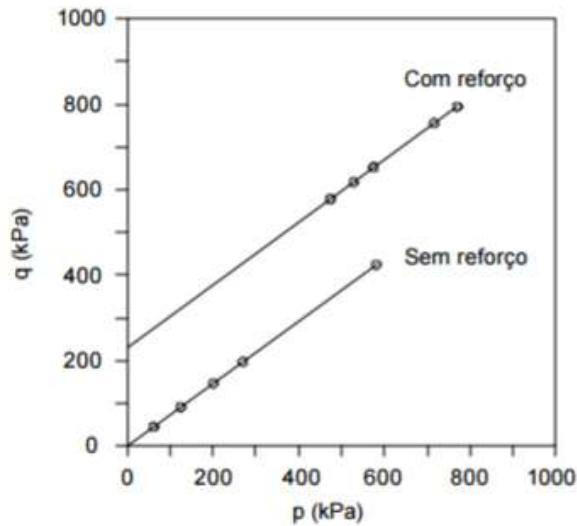


Figura 2.17: Envoltórias de resistência para solos reforçados e sem reforço (Bathurst & Karpurapu, 1993).

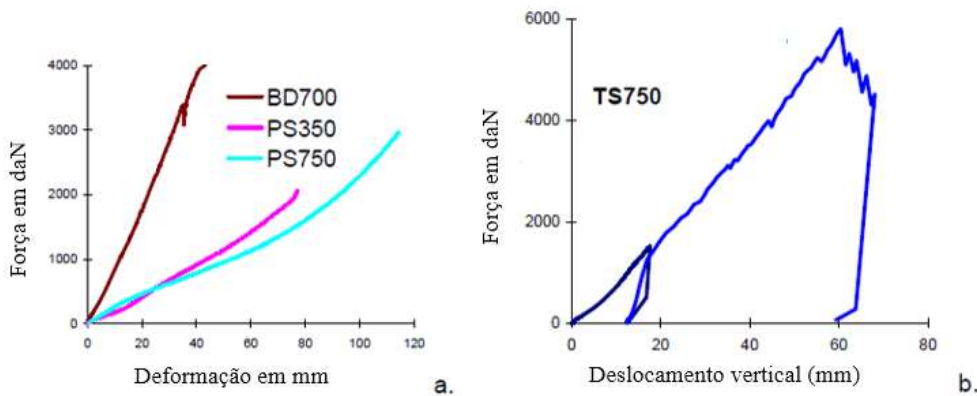


Figura 2.18: Influência do tipo do geotêxtil (Reiffesteck, 1996).

2.5.2 ESTUDO DA INTERAÇÃO ALVEOLAR

Reiffsteck (1996) realizou ensaios de compressão simples para caracterizar as estruturas alveolares, por meio de ensaios em modelos de escala reduzida. Seu objetivo foi verificar a influência do tamanho dos alvéolos no ganho de resistência do conjunto, variando-se a densidade do geotêxtil sobre o maciço por meio da variação do diâmetro inscrito nos alvéolos (30, 50 e 75 mm) (Figura 2.19). Os ensaios foram realizados sobre uma prensa, onde eram efetuados a medida do deslocamento da placa de apoio superior por um leitor de deslocamentos. Essa placa corresponde a um hexágono em metal de 200 mm de lado, que cobre uma área mínima referente a 3 alvéolos. Todos os modelos reduzidos testados têm as mesmas dimensões

exteriores de 450 mm de altura e 700 mm de lado. Os resultados mostraram que o ganho de resistência foi proporcional à densidade dos alvéolos. Em um conjunto de alvéolos a ruptura de um entre eles não tem uma importância preponderante, ao passo que se a ruptura se propaga até um alvéolo situado no limite da amostra, a ruína torna-se inevitável. Assim, o comportamento de um grupo de alvéolos não é fundamentalmente diferente daquele de um alvéolo isolado em termos de ganho de resistência, sendo que a presença dos mesmos proporciona uma coesão aparente função do confinamento oferecido.

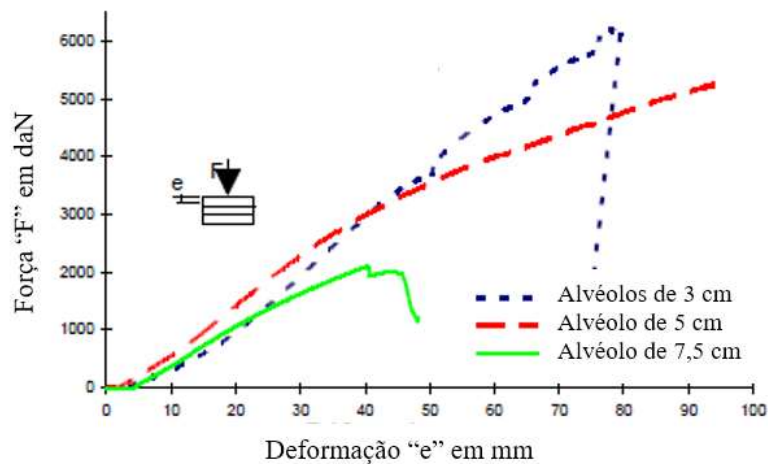


Figura 2.19: Influência da densidade dos alvéolos

A interação entre as células foi estudada por Rajagopal *et al.* (1999) por meio de ensaios triaxiais realizados com areia confinada em uma ou várias células, a fim de analisar o ganho de resistência gerado (Figura 2.20). Para o conjunto de amostras testadas, o ângulo de atrito permaneceu sem mudanças. O ganho de resistência observado é assimilado a uma coesão aparente, sendo o mesmo diretamente ligado à rigidez do reforço. Em seguida, testou-se a influência do número de alvéolos. O ganho de resistência entre 3 e 4 alvéolos não é significativo, podendo afirmar que o mesmo não pode ser atribuído à evolução do imbricamento entre os alvéolos, mostrando que a interação entre 3 alvéolos representa o mecanismo mais eficaz (Figura 2.21).

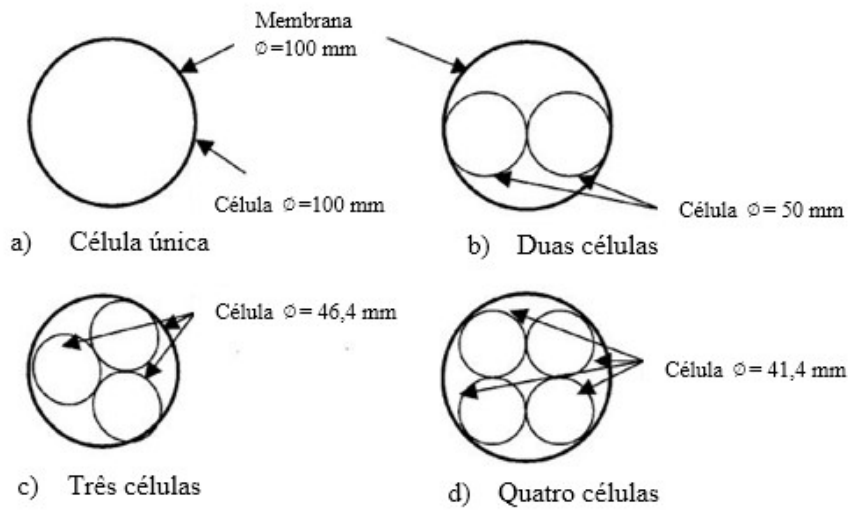


Figura 2.20: Diferentes configurações estudadas para células triaxiais (Rajagopal, 1999).

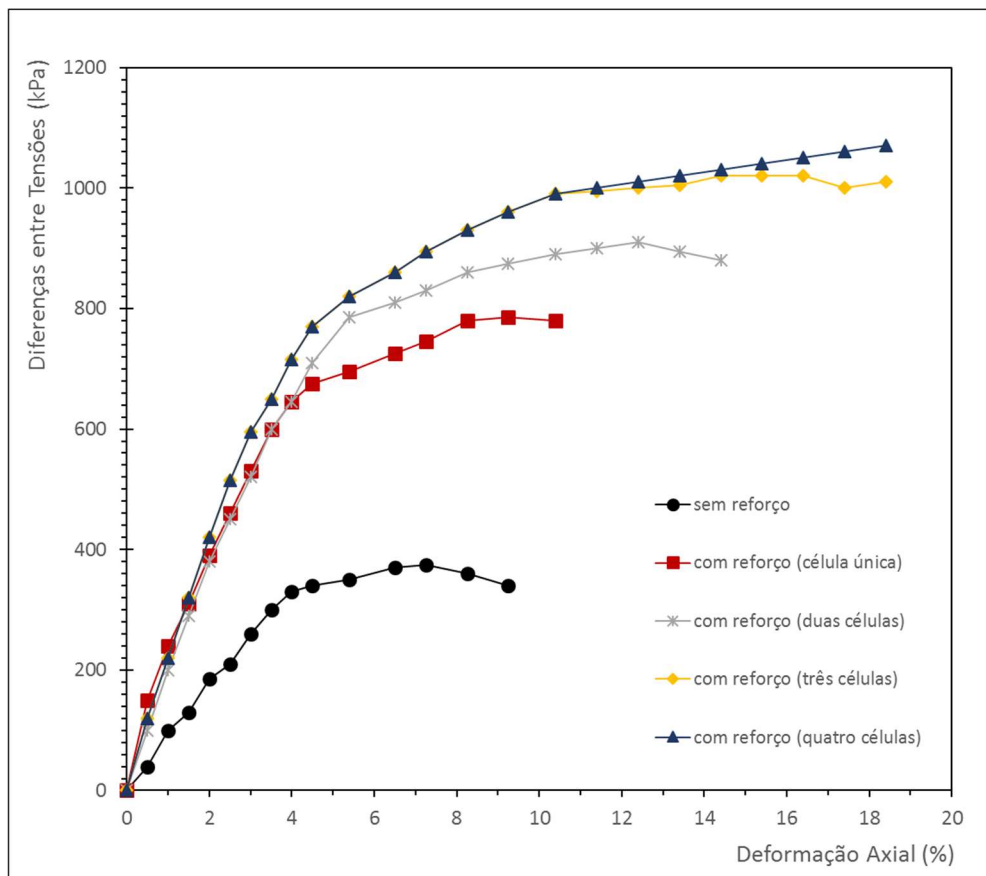


Figura 2.21: Influência do número de alvéolos sobre a coesão aparente (Rajagopal, 1999).

Porém comportamento obtido não pode ser explicado simplesmente pela noção de confinamento, sendo o estudo complementado por Reiffesteck (1996) sobre um grupo de sete alvéolos em escala real, com o objetivo de conhecer o efeito de grupo e a influência dos alvéolos vizinhos sobre o confinamento. O esquema dos ensaios pode ser visualizado na (Figura 2.22).

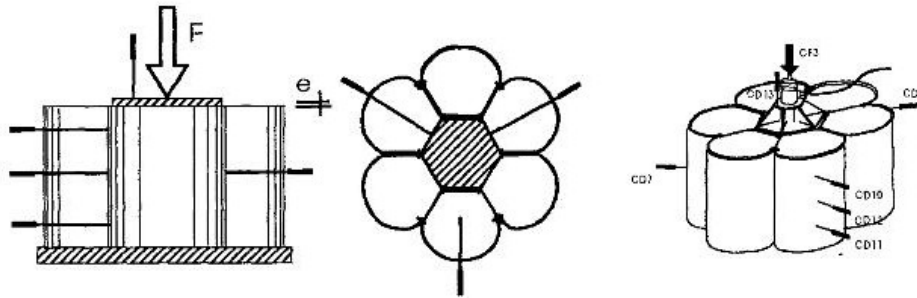


Figura 2.22: Esquema de ensaio com sete alvéolos (Reiffesteck, 1996)

Os ensaios de compressão simples realizados sobre o alvéolo central permitiram visualizar a influência do confinamento lateral. Isso se traduz numa maior resistência à ruptura e aumento do módulo. No momento da ruptura, a expansão do solo se efetuou até a mobilização da faixa de geotêxtil periférico, não ocorrendo nenhuma variação brusca quando da ruptura do alvéolo central. Esta observação prova que a ruptura de um alvéolo no meio de um maciço não apresenta incidente preponderante sobre o comportamento estrutural, sendo esta característica atribuída ao confinamento lateral (Figuras 2.23 e 2.24).

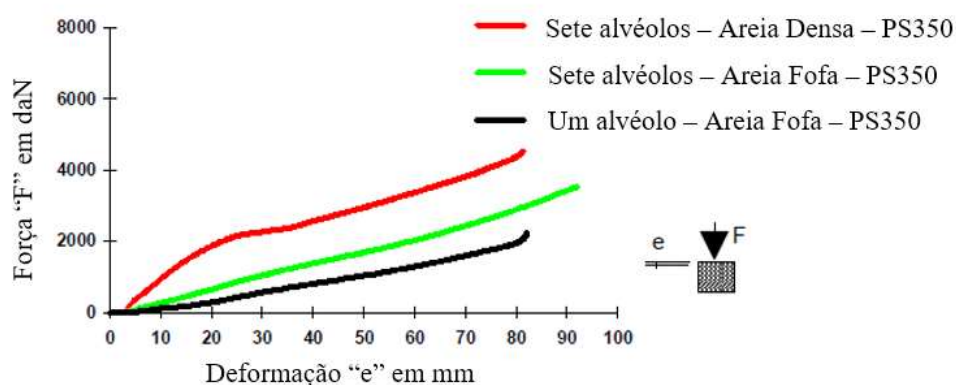


Figura 2.23: Influência do efeito de grupo para ensaio de sete alvéolos (Reiffesteck, 1996).

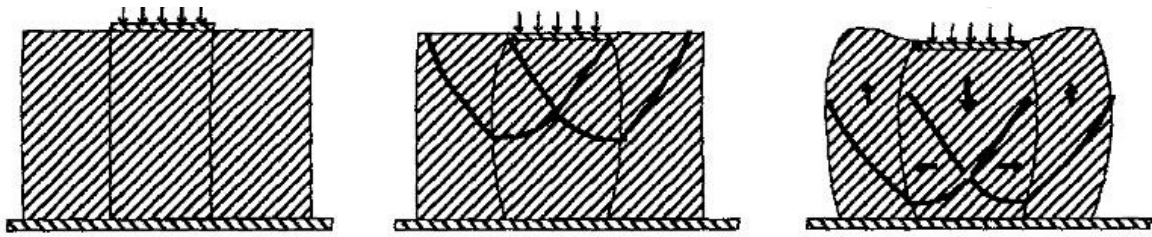


Figura 2.24: Modo de ruptura (Reiffesteck, 1996).

2.5.3 ENSAIOS SOBRE UMA CAMADA DE ALVÉOLOS

Um primeiro estudo foi realizado por Jeuneau (1991) permitindo conhecer, de maneira qualitativa, o papel do reforço do complexo alveolar. Para isso, utilizou um maciço análogo com cilindros de PVC onde foi inserido um geotêxtil simulando os alvéolos. Por meio de seus ensaios provou-se que o efeito de ganho de capacidade de carga assim como o efeito repartidor de pressão é máximo quando o complexo é colocado na superfície.

Reiffsteck (1996) completou suas experiências estudando o tamanho das células (diâmetro e altura) sobre o comportamento ao puncionamento de camadas de alvéolos, por meio de um modelo reduzido. A amostra testada era constituída de uma camada de alvéolos preenchidos com areia compactada colocados sobre uma camada de solo mole, sendo o carregamento efetuado diretamente sobre a camada de alvéolos. Em relação à altura, percebeu-se que a mesma é diretamente proporcional ao aumento da resistência ao puncionamento e a distribuição das tensões (Figura 2.25). Para o diâmetro, pode-se dizer que o mesmo se comporta de maneira inversamente proporcional em relação ao tamanho do pistão de carregamento, ou seja, quanto menor o tamanho dos alvéolos em relação àquele, maior será a resistência e a homogeneidade do comportamento (para os tamanhos analisados, que foram: 15, 30 e 50 mm para o diâmetro e para a altura de 50, 100 e 150 mm) (Figura 2.26).

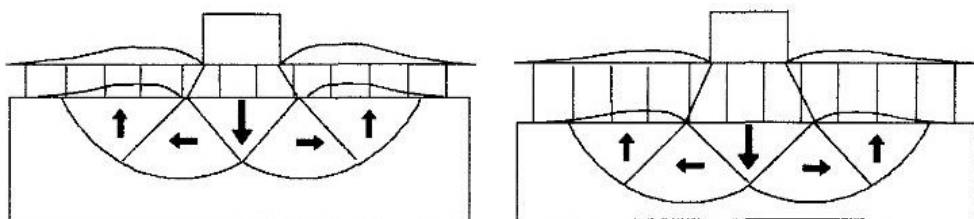


Figura 2.25: Variação da altura do alvéolo (Reiffsteck, 1996).

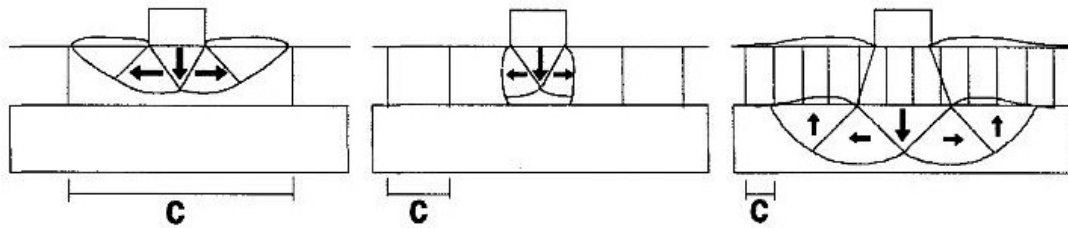


Figura 2.26: Variação da dimensão do lado do alvéolo (Reiffesteck, 1996).

Mhaiskar *et al.* (1996) trabalhou igualmente na relação das células (diâmetro/altura) sobre a capacidade de carga de estruturas constituídas de camadas de alvéolos. Seus experimentos constituíram-se em uma camada de argila mole com coesão de 10kPa sobre a qual assentava-se uma camada de alvéolos. As conclusões mostram que os experimentos estão de acordo com Reiffesteck (1996) confirmando que uma camada de alvéolos produz um melhor efeito repartidor de tensão, aumentando a capacidade de carga do sistema (Figura 2.27).

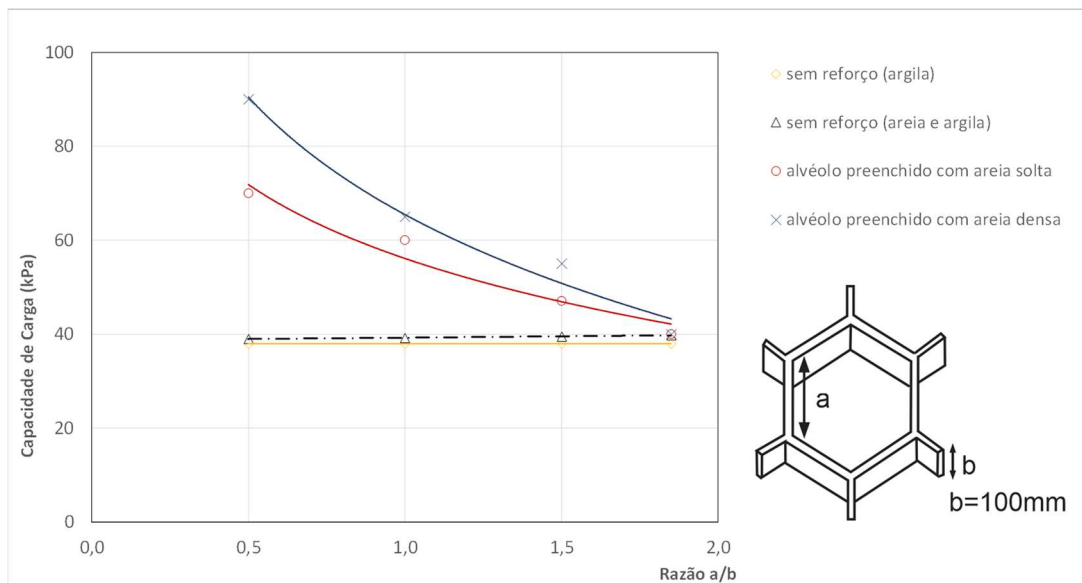


Figura 2.27: Variação da capacidade de carga em função da geometria das células (Mhaiskar, 1996).

Assim, o confinamento gerado pelos alvéolos é então aumentado para o caso onde se utiliza uma camada dos mesmos, devido à presença das células vizinhas. Essa interação leva a um fenômeno de transmissão dos esforços da célula solicitada para as células vizinhas. O conhecimento do fenômeno de confinamento lateral coloca em evidência a possibilidade de

utilizar este tipo de estrutura para criar várias camadas permitindo aumentar a capacidade de carga do solo de fundação e de diminuir os recalques (Racanas, 2002).

A fim de estudar mais a fundo a interação celular, Racanas (2002) estudou uma camada de alvéolos desprovidos de ligação entre eles, observando seu comportamento sob um plano inclinado submetido à gravidade (Figura 2.28). Nesta primeira fase dos ensaios pode-se observar a importância da compactação do material na rede dos alvéolos. A falta da mesma dá uma maior liberdade para o movimento dos grãos. Se os mesmos são bem compactados, os alvéolos podem ser assimilados a blocos rígidos que se estabilizam uns em relação aos outros.

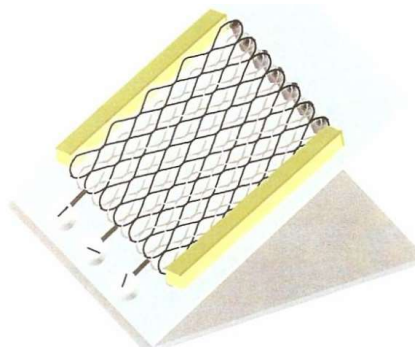


Figura 2.28: Apresentação do experimento inicial para estudo da interação alveolar (Racanas, 2002).

Essa falta de ligação celular também foi analisada num modelo de escala reduzida, confeccionando dois ensaios com materiais de reforço diferentes, usando-se papel e saco plásticos, a fim de simular dois materiais de rigidez diferente e oposta. Esse princípio teve como finalidade analisar a influência do material do reforço no modo de ruptura do modelo. Apesar da diferença entre os dois tipos de reforço, os mecanismos de ruptura observados são similares e em concordância com aqueles encontrados em estruturas alveolares com ligações intercelulares. O reforço alveolar gera um ganho de resistência atribuído a uma coesão aparente, que é diretamente ligada à densidade e a resistência dos elementos de reforço.

Grygiel (2009), em seu estágio final de curso na Universidade de Brasília, desenvolveu ensaios utilizando alvéolos em geossintéticos preenchidos com solo natural, solo natural na umidade higroscópica e areia grossa, sendo estes materiais provenientes da cidade de Urucu, estado do Amazonas.

Os ensaios foram realizados tendo como suporte uma camada de espuma rígida e, posteriormente, uma camada de espuma flexível, a fim de verificar o desempenho dos alvéolos em camadas de baixa capacidade de suporte, sendo a caracterização deste material quanto ao módulo de elasticidade expresso na Figura 2.29. Paralelamente, foram realizados ensaios com as mesmas espumas já mencionadas, sendo a camada superior ensaiada constituída de solo com altura correspondente ao dobro da altura dos alvéolos em geossintético. Tal aspecto objetivando verificar a eficácia dos alvéolos quando da diminuição da altura da camada superior.

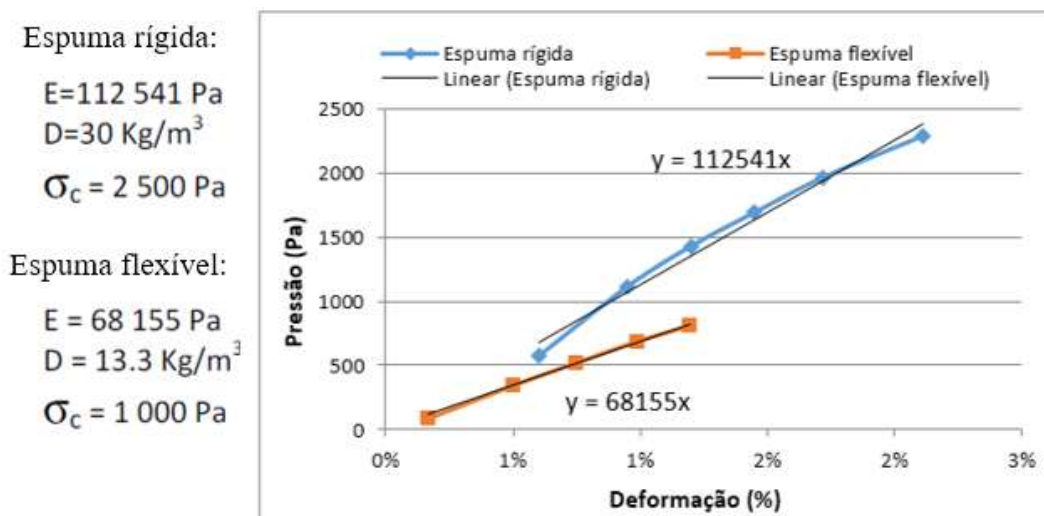


Figura 2.29: Caracterização das espumas utilizadas quanto ao Módulo de Elasticidade (Grygiel, 2009).

As Figuras 2.30 e 2.31 mostram os resultados dos ensaios executados com alvéolos constituídos por geossintético com suporte em espumas flexível e rígida, utilizando-se solo natural na umidade higroscópica e na umidade ótima, assim como areia grossa. Para a compactação do solo na umidade ótima utilizou-se o artifício de compactar o solo e invertê-lo colocando sob ele a espuma.

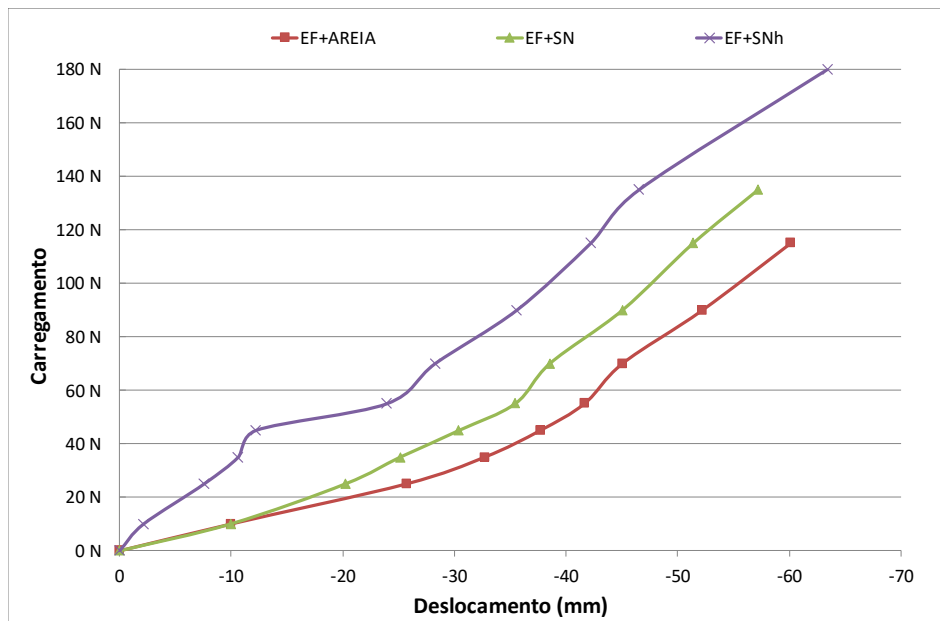


Figura 2.30: Ensaio executado com solo natural compactado na umidade ótima e areia, para a espuma flexível (Grygiel, 2009).

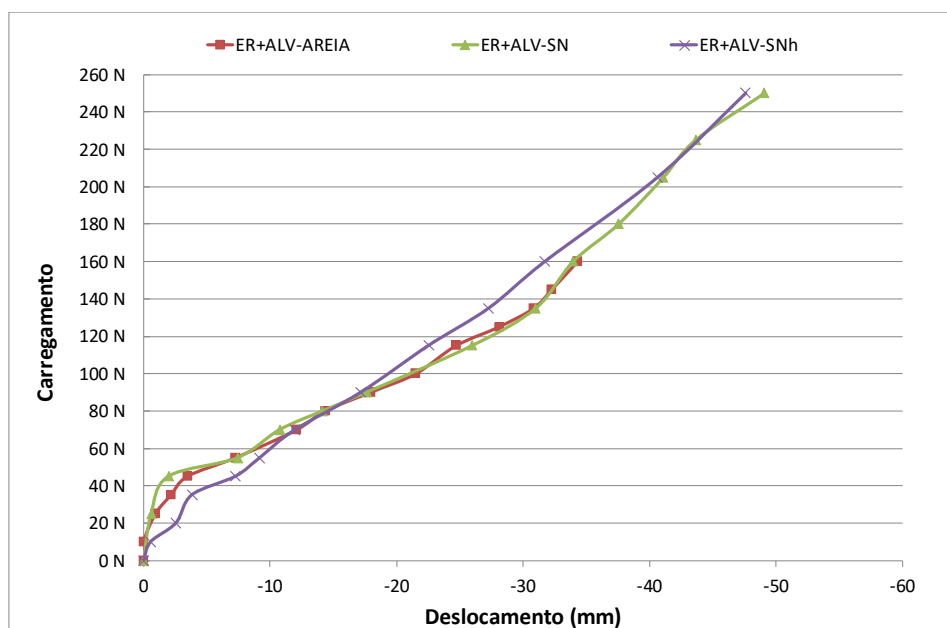


Figura 2.31: Ensaio executado com solo natural e areia, para a espuma rígida (Grygiel, 2009).

Na Figura 2.30 observa-se que a camada de solo natural sobre a espuma, de maneira geral, ofereceu melhor comportamento do que a areia local. É provável que uma melhor compactação da areia utilizada promovesse um melhor comportamento. Porém, a coesão presente no solo natural torna o resultado mais promissor, sendo que os comportamentos da areia e do solo natural apresentam semelhanças, para carregamentos de até 10N, havendo um maior ganho de

resistência do solo natural em relação à areia a partir deste ponto. Já o solo natural na umidade ótima apresenta um ganho substancial em relação tanto ao próprio solo na umidade higroscópica com em relação à areia. A partir da sollicitação de 40 N (deslocamento de aproximadamente 12 mm) as curvas do solo compactado na umidade ótima segue paralela à do solo compactado na umidade ótima. A melhoria do comportamento certamente está atrelada à menor porosidade e maior efetividade da contribuição da sucção para o comportamento do solo.

Para a espuma rígida (Figura 2.31), inicialmente observa-se um melhor comportamento para a areia seguido do solo na umidade higroscópica, no entanto, a partir de 5mm de deslocamento em relação ao solo na umidade higroscópica e de 12mm em relação à areia o comportamento do solo compactado na umidade natural passa a oferecer melhor desempenho. Porém, em relação ao solo natural seco e a areia, o ganho de resistência com o deslocamento tende a ser menor, quando se analisa a espuma rígida em relação à flexível. Entretanto, quando se observa o solo na umidade ótima, verifica-se que o ganho de resistência com o deslocamento é maior na espuma rígida. Esse aumento representou, em alguns casos, até três vezes a resistência em relação a areia local. Isso não se verificou com a espuma flexível, onde os gráficos seguiram praticamente paralelos, ou seja, mantendo a diferença de resistência com o acréscimo do carregamento até a ruptura. A fim de manter a comparação, esses materiais foram utilizados para o preenchimento dos alvéolos, sendo os gráficos representados nas Figuras 2.32 e 2.33 que se seguem.

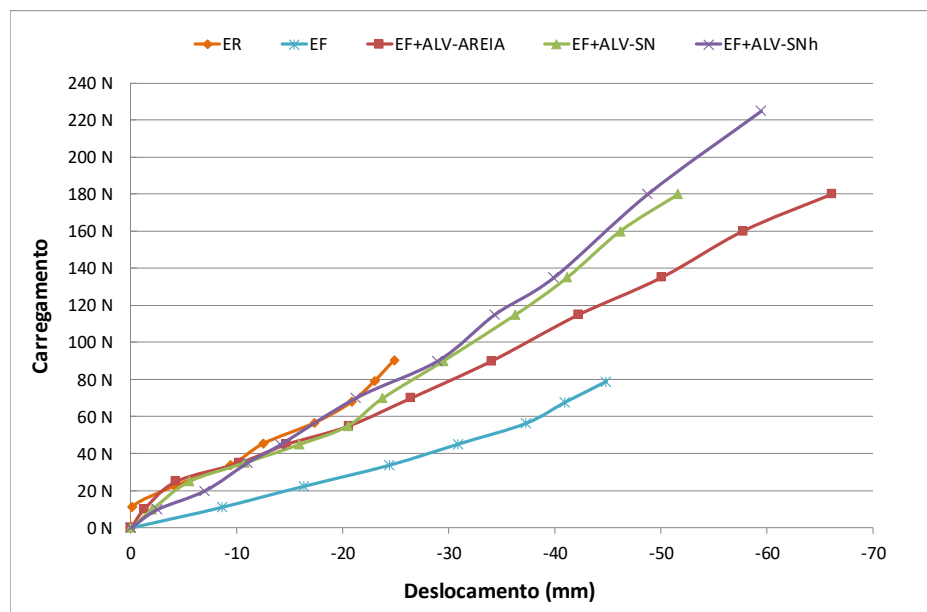


Figura 2.32: Ensaio realizado com solo natural e areia como material de preenchimento dos alvéolos, para a espuma flexível (Grygiel,2009).

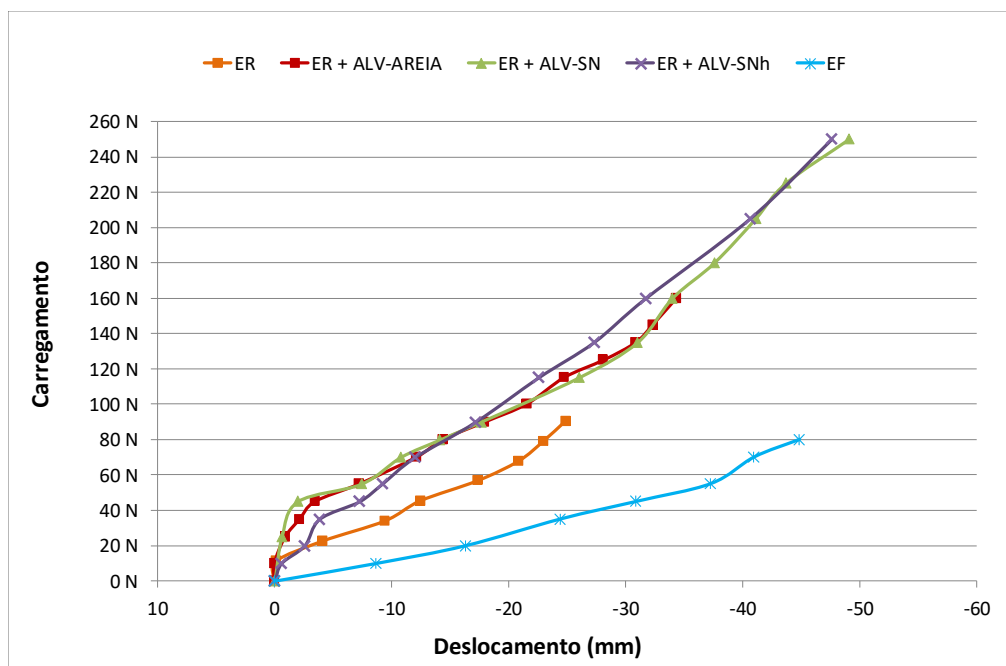


Figura 2.33: Ensaio realizados com solo natural e areia como material de preenchimento dos alvéolos, para a espuma rígida (Grygiel,2009).

A introdução dos alvéolos com diferentes materiais de preenchimento, no ensaio para a espuma flexível da Figura 2.32, demonstra que, até um carregamento de aproximadamente 50 N (deslocamento de aproximadamente 20 mm), os comportamentos são semelhantes. A partir deste ponto, observa-se uma melhora no comportamento tanto do solo na umidade higroscópica como do solo natural na umidade ótima, em relação ao comportamento obtido para o caso dos alvéolos preenchidos com areia.

Para a espuma rígida, na Figura 2.33, observa-se que o comportamento para as três hipóteses é quase o mesmo fazendo sobressair a importância dos alvéolos em relação ao tipo de solo. Quando se observa a curva correspondente à espuma rígida em relação ao comportamento dos sistemas alvéolo espuma flexível (Figura 2.32) e alvéolo espuma rígida, verifica-se que a camada suporte tem grande influência sobre o comportamento do sistema como um todo.

Dando continuidade aos ensaios de Grygiel (2009), Chapelet (2010) utilizou o mesmo sistema de ensaio já supracitado, porém utilizando apenas a espuma rígida como camada de base e os alvéolos em geossintéticos. Foi utilizado o sistema de compactação invertida, onde os alvéolos são colocados no fundo falso da caixa metálica de ensaio para serem preenchidos e compactados. A compactação se deu por meio de uma placa metálica e um soquete. Após a

compactação, foi colocada a espuma rígida e a caixa metálica era invertida. Assim, era retirado o fundo falso onde o solo havia sido compactado e o material estava pronto ser ensaiado. As Figuras 2.34 e 2.35 ilustram os procedimentos descritos.



Figura 2.34: Procedimento de compactação efetuado por Chapelet (2010). Onde: A) Preenchimento dos alvéolos; B) Compactação; C) Material compactado e D) Colocação do material de base.



Figura 2.35: Procedimento de compactação efetuado por Chapelet (2010). Onde: E) Inversão da caixa metálica; F) Abertura da caixa; G) Retirada do fundo falso e H) Material pronto para ensaio.

A pesquisa de Chapelet (2010) teve por princípio avaliar o comportamento mecânico frente as influências das condições de obra, analisando dois teores de umidade (25% e 28%) e variando o grau de compactação. Inicialmente foram analisados os ensaios com a argila como preenchimento dos alvéolos para uma umidade de 25%. A Figura 2.36 mostra os resultados desses ensaios.

De maneira geral, observou-se que os deslocamentos diminuíram quando da utilização dos alvéolos. Para a argila reforçada compactada com alta energia de compactação (BC), uma primeira ruptura se produziu por volta de 30 kPa, podendo ser explicada pela ruptura da argila no interior dos alvéolos. Em seguida, há uma elevação na curva mostrando o início do trabalho

dos alvéolos, mantendo um comportamento linear para as pressões de 60 kPa a 140 kPa. Para a argila com baixa energia de compactação (MC) o comportamento foi semelhante. Entretanto, a linearidade do seu comportamento foi percebida para valores de pressão menores.

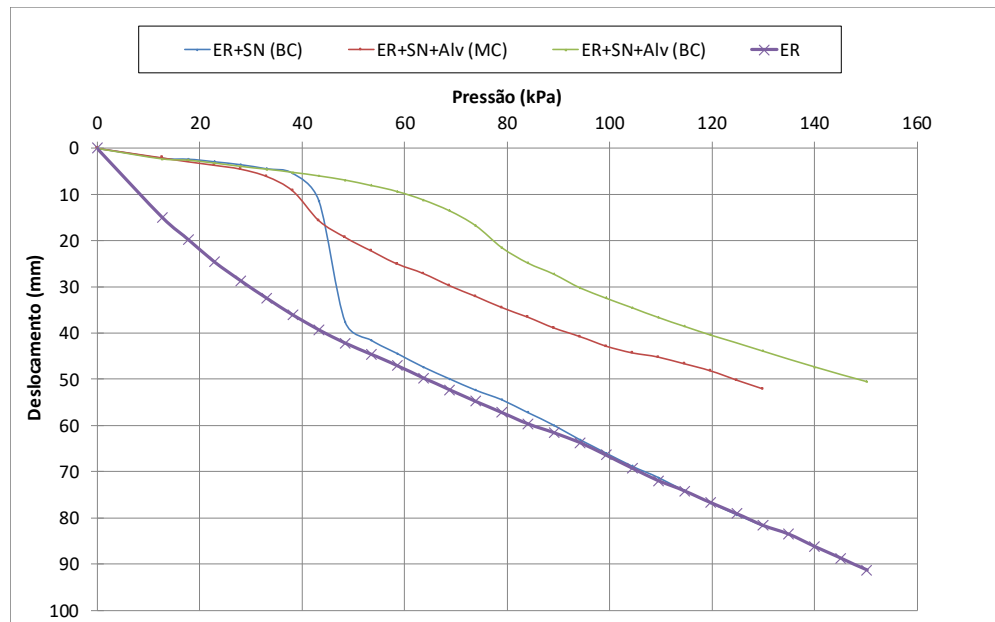


Figura 2.36: Gráfico Pressão x Deslocamento para argila reforçada com alvéolos, em função da energia de compactação (Chapelet, 2010).

Observando o gráfico da Figura 2.37, que trata dos mesmos ensaios, porém com uma umidade correspondente a 28%. Verifica-se que, para a argila compactada com alta energia de compactação (BC), a umidade não influencia as amostras para os primeiros carregamentos. Entretanto, a partir de pressões de 60kPa aproximadamente, observa-se um comportamento idêntico para as duas curvas com um deslocamento de 7mm entre as curvas. Isso pode explicar o fato de que, contrariamente às análises anteriores, o solo desempenha um papel importante no comportamento mecânico, seja pela sua capacidade mecânica no interior dos alvéolos ou sua capacidade de ancorar os alvéolos

Para a argila compactada com baixa energia de compactação (MC), o comportamento geral é idêntico. Entretanto, para os deslocamentos correspondentes as pressões compreendidas entre os intervalos de 0 a 50 kPa, os mesmos são mais importantes.

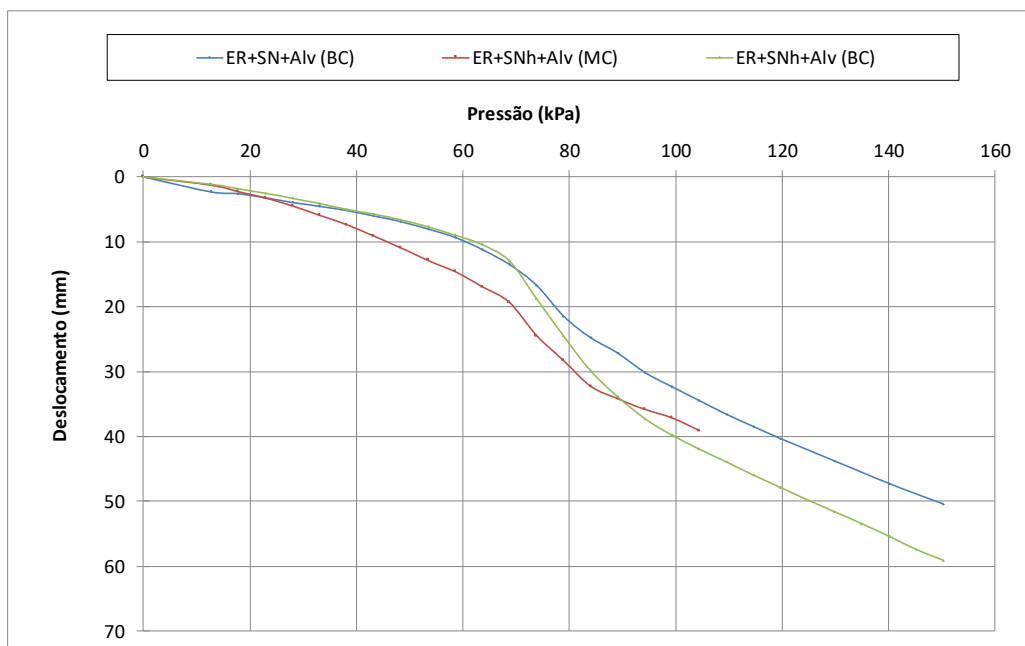


Figura 2.37: Gráfico Pressão x Deslocamento para argila reforçada com alvéolos, em função do teor de água (Chapelet,2010).

Outro material ensaiado por Chapelet (2010) para o preenchimento dos alvéolos foi a areia com umidade higroscópica correspondente a 7%. Seu intuito também foi avaliar a influência da energia de compactação nas amostras reforçadas com alvéolos em geossintéticos preenchidos com areia. O gráfico da Figura 2.38 mostra os resultados dos ensaios em questão.

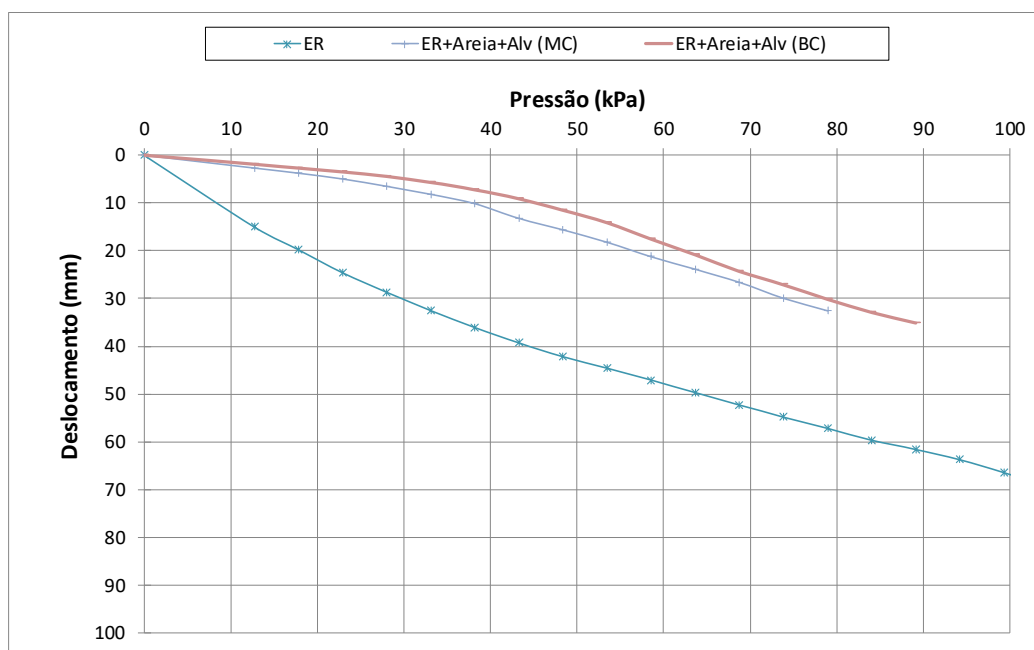


Figura 2.38: Gráfico Pressão x Deslocamento para areia reforçada com alvéolos, variando a energia de compactação (Chapelet, 2010).

Observa-se, no gráfico, duas partes distintas. A primeira parte se mostra linear para as pressões compreendidas entre o intervalo de 0 a 30 kPa, permitindo colocar em evidência o comportamento elástico do complexo areia – alvéolo, ficando no domínio das pequenas deformações, compreendidas entre 0 a 8mm.

Para as pressões superiores a 40 kPa, observa-se um aumento da curvatura, mostrando a ruptura da areia no interior dos alvéolos. Uma vez vencida a resistência da areia, os alvéolos se encarregam de suportar os esforços aplicados. Observa-se que a energia de compactação não traz ganhos significativos de resistência conforme avaliado nos demais casos observados. Entretanto, a utilização dos alvéolos provoca um ganho de cerca de 3 vezes maior em termos de deslocamentos.

3 MATERIAIS

Em se tratando de duas soluções diferentes para a resolução de um problema existente, essa tese foi dividida em duas partes, tanto no que tange aos materiais, como no que se refere à metodologia, visando desenvolver os mesmos para os trabalhos realizados no Brasil e na França.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS NO BRASIL

Os materiais utilizados para os ensaios com fibras são provenientes da região de Urucu, estado do Amazonas, e oriundos das jazidas destinadas à construção de bases rodoviárias. Esses materiais foram caracterizados previamente por Bento (2006) e suas propriedades estão descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Características dos materiais utilizados para ensaio com fibras

Material	Parâmetro	Valor
Solo Local	Peso específico dos grãos	26,70 kN/m ³
	Limite de Liquidez - LL	41%
	Índice de Plasticidade - IP	16%
Areia Fina - Rio Urucu	Peso específico dos grãos	25,43 kN/m ³
	Equivalente de Areia	97%
Areia Grossa - Coari	Peso específico dos grãos	26,38 kN/m ³
	Equivalente de Areia	95%

Em relação ao solo local, as Figuras 3.1 apresenta a granulometria efetuada com granulômetro a laser. A Figura 3.2 apresenta a classificação do mesmo de acordo com a metodologia MCT, caracterizando-o, portanto, como solo argiloso não laterítico. Para as areias utilizadas, a Figura 3.3 apresenta a granulometria executada conforme norma DNER- ME-083/98.

As fibras: fibras lisas e corrugadas de polipropileno foram doadas pela FITESA. Para ambas as fibras o teor utilizado foi de 0,50% em relação a massa de solo seco, variando-se apenas o tamanho das mesmas. Para as fibras lisas (Figura 3.4) os tamanhos empregados foram de 12 e 24 mm, já confeccionados de fábrica. Para as fibras corrugadas (Figura 3.5) os tamanhos utilizados foram de 25 e 50 mm. O tamanho de 50 mm foi fornecido comercialmente. Já o tamanho de 25 mm foi confeccionado manualmente cortando-se a fibra de 50 mm ao meio com tesoura. O teor de 0,50% foi baseado nos estudos de Feuerharmel (2000), Heineck (2002) e

Bento (2006), que mostraram ser este teor o que apresentou resultados mais satisfatórios em relação a interação solo-fibra, maior ductibilidade e aumento da resistência de pico.

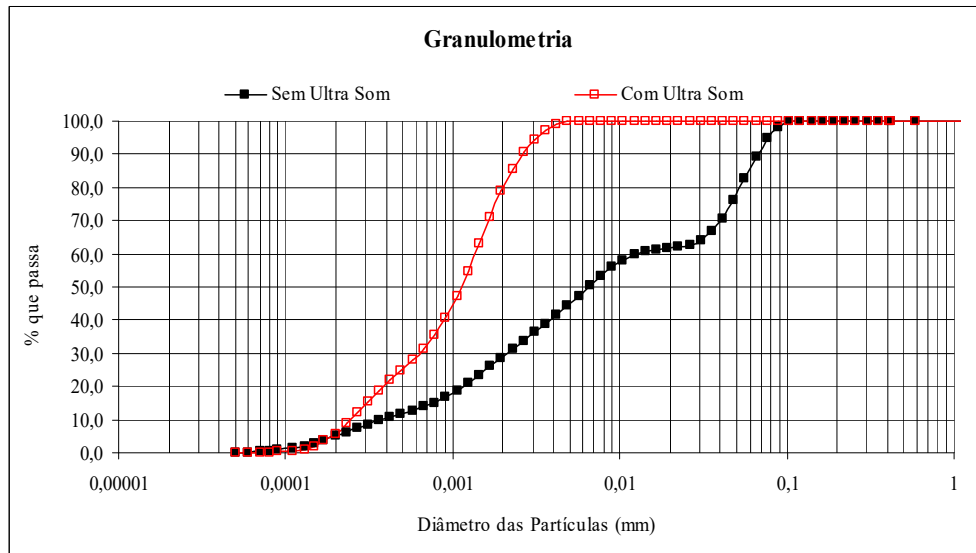


Figura 3.1: Granulometria com e sem ultrassom para o solo estudado (Bento, 2006).

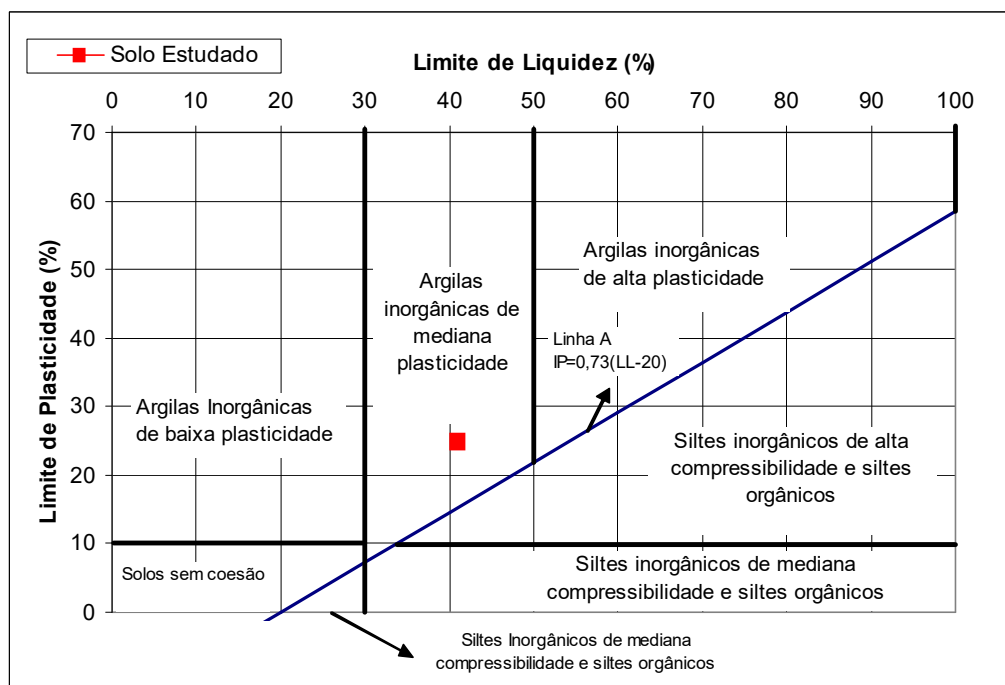


Figura 3.2: Gráfico de plasticidade com a localização do solo estudado (Bento, 2006).

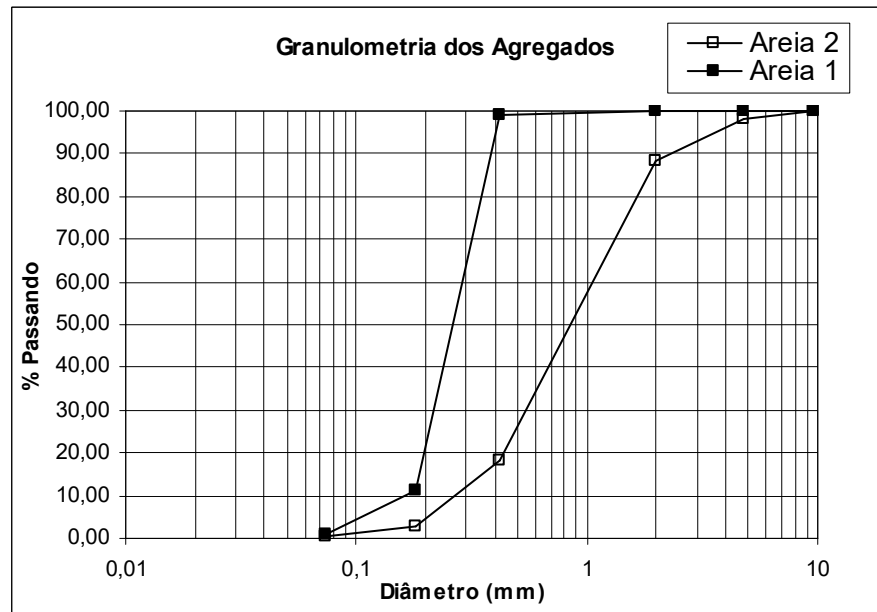


Figura 3.3: Granulometria das areias onde areia 1 representa a areia fina e a areia 2 representa a areia grossa.



Figura 3.4: Fibra lisa (Fitesa, 2005)



Figura 3.5: Fibra corrugada (Fitesa, 2005).

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA FRANÇA

3.2.1 ESPUMAS

O princípio da seleção das espumas para a montagem do modelo, baseou-se no fato de encontrar dois tipos de espumas que pudessem variar desde a mais rígida à mais flexível. Partindo desta premissa foram encontrados no mercado francês local os tipos disponíveis apresentados na Tabela 3.2. Destas, optou-se, por avaliação técnica, por utilizar as espumas B26 e B60 por representarem os dois extremos, a mais rígida e a mais flexível.

Tabela 3.2: Tipos de espumas analisados

Espuma	Densidade (kg/m ³)
B26	26
B38	38
D28	28
B60	60

3.2.2 AREIA D'ALLIER

O preenchimento dos alvéolos foi feito com a areia de Allier, cuja curva granulométrica é apresentada na Figura 3.6, tendo um ângulo de atrito de 41°.

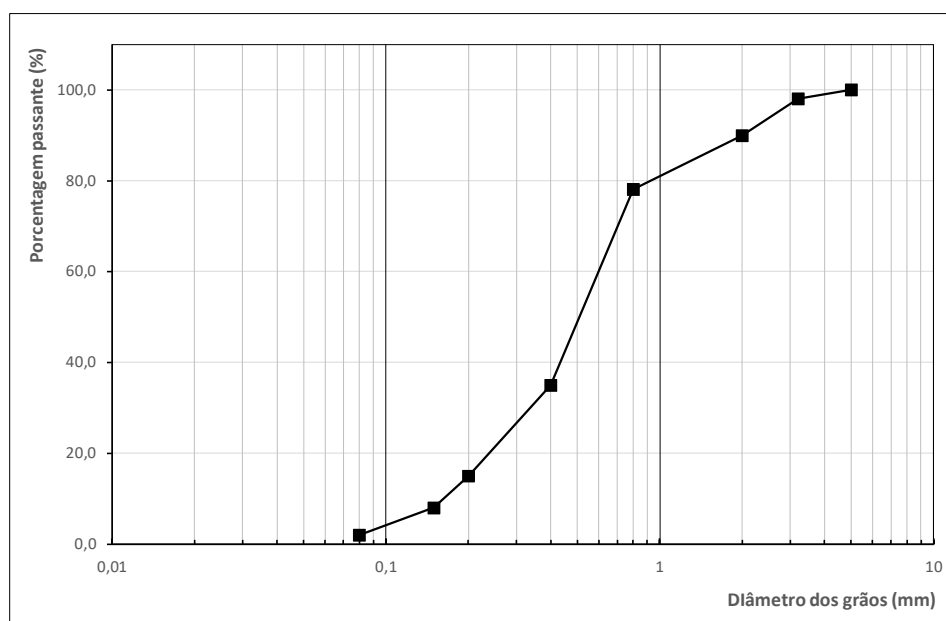


Figura 3.6: Curva granulométrica da areia de Allier (Racana, 2002).

3.2.3 ALVÉOLOS

O material escolhido para a confecção dos alvéolos foi o papel, a fim de analisar o mecanismo de ruptura diante da rigidez desse material. O papel apresentou uma gramatura de 65 g/m^2 e uma espessura de $8,5 \times 10^{-5} \text{ m}$. Foram realizados ensaios de tração e a Figura 3.7 mostra seu resultado. O módulo inicial foi da ordem de 3 GPa com uma força máxima de 90 N para uma largura de 37 mm, portanto apresentando uma resistência de 2,4 kN/m (Racana, 2002).

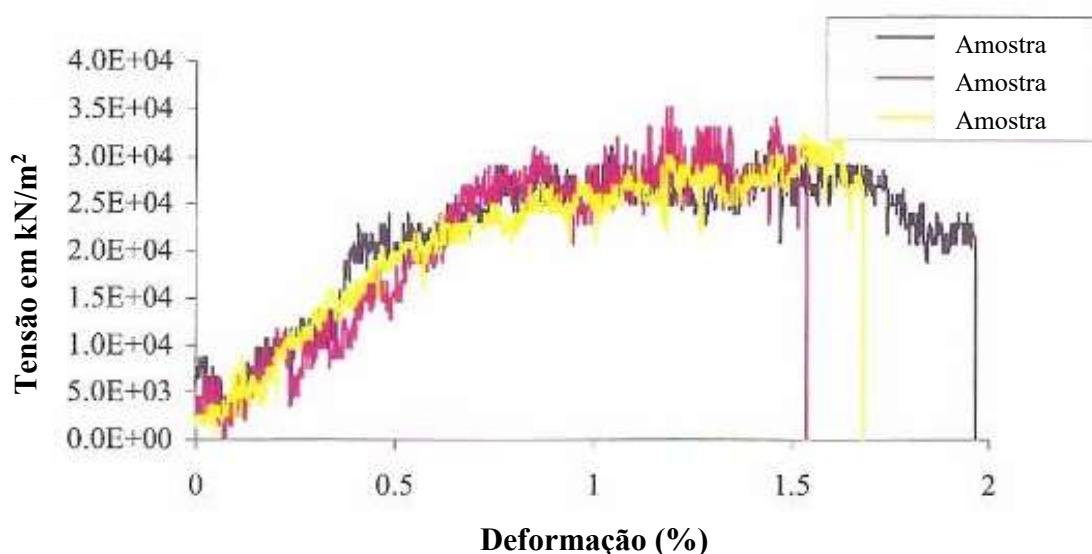


Figura 3.7: Ensaio de tração em amostras de papel (Racana, 2002)

O estudo com a utilização do papel se baseou no fato da utilização de um material que, quando solicitado, apresentasse pouca resistência à tração, tendo em vista as deformações limitadas e o nível de esforço ao qual estariam submetidos. Essa metodologia teve como objetivo entender os mecanismos de ruptura frente as solicitações à que estavam submetidos, gerando resultados qualitativos a respeito do comportamento dos materiais em questão. O efeito de escala deve, no entanto, com base nas observações qualitativas desse trabalho, serem implementados em estudos considerando modelos físicos representativos de situações a serem adotadas na elaboração de projetos para execução de obras.

Dando continuidade aos ensaios realizados por Grygiel (2009) e Chapelet (2010) - já descritos no item referente a Revisão Bibliográfica -, foram realizados ensaios com alvéolos em geossintéticos. Entretanto, foi utilizado como camada de suporte o próprio solo compactado ao invés de uma camada de espuma.

A Figura 3.8 mostra os alvéolos em geossintéticos que foram utilizados nesta Tese. O material é o mesmo utilizado por Racana (2002), Grygiel (2009) e Chapelet (2010). Seu módulo de elasticidade é igual a 115 MPa e espessura igual a 17×10^{-4} mm com as ligações entre os mesmos coladas. Os alvéolos possuem uma altura de 25 mm e um círculo inscrito de 50 mm de diâmetro assim como no caso dos alvéolos de papel que foram utilizados nos primeiros ensaios e serão descritos no item referente à metodologia.



Figura 3.8: Alvéolos em geossintético.

4 METODOLOGIA

4.1 METODOLOGIA NO BRASIL

O estudo desenvolvido neste trabalho visa analisar materiais alternativos para base de pavimentos, uma vez que não há disponibilidade de material pétreo na região de Urucu a custo aceitável. Com o objetivo de encontrar alternativas para o bom desempenho dos materiais disponíveis, o programa de ensaios executados visa investigar o comportamento mecânico desses materiais frente às solicitações à que estão submetidos, assim como, às condições climáticas especiais da região tais como altos índices pluviométricos na maior parte do ano e elevada umidade. Partindo deste princípio, de acordo com os trabalhos desenvolvidos por Heineck (2002) e dando continuidades aos trabalhos desenvolvidos por Bento (2006), para a metodologia desenvolvida no Brasil utilizando solo com fibras foram realizados os ensaios de compressão simples, tração por compressão diametral e ensaio de sucção para determinação da curva característica de cada mistura analisada.

4.1.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de compressão simples foi utilizado com o objetivo de determinar a porcentagem de areia que deveria ser adicionada ao solo natural, visto que a interação solo-fibra depende do tamanho dos grãos de solo (Heineck, 2002) ao mesmo tempo em que a areia contribui para a diminuição da coesão. Como deveria ser avaliada a contribuição das fibras para a resistência do solo e elas, como no caso da coesão, tendem a ampliar a resistência a tração, optou-se pelo uso do ensaio de compressão simples nas avaliações de comportamento. O uso de ensaios triaxiais no presente caso seria inviável em relação ao tempo necessário devido a amplitude do estudo, no entanto, uma vez feitos esses estudos preliminares, a realização de ensaios triaxiais é desejável em novas pesquisas de trabalhando com teores de areia e fibra ideais. Para o desenvolvimento deste ensaio foi utilizada a norma NBR 12770/92.

Com o objetivo de estudar a interferência da areia na resistência a compressão simples e, portanto, na coesão do solo, foram realizados ensaios para os teores de areia fina de 10%, 20%, 40%, com variação do grau de saturação para cada mistura. Os aspectos analisados foram o melhor comportamento tensão-deformação. A areia utilizada foi aquela existente em abundância na região do estudo, aqui determinada como areia fina. Como a interação solo-fibra

depende do teor de areia, embora ela contribua para a diminuição da coesão tendo em vista a redução no teor de argila, e, sendo o estudo voltado para a região amazônica, na qual o solo naturalmente já apresenta perda de sucção em período chuvoso, devido ao excesso de precipitação, optou-se por priorizar a melhoria do comportamento do solo devido a incorporação de fibras adotando-se também, o teor de 60% de areia.

As amostras foram compactadas por meio da prensa de compactação, utilizando a compactação estática. Para isso foram utilizados moldes cilíndricos de 5 cm de diâmetro por 15 cm de altura (Figura 4.1). O processo de preparação e moldagem foi realizado da seguinte maneira:

- Separação da quantidade de solo seco e fibras a serem utilizados para o ensaio;
- Homogeneização do solo, fibra e água nas quantidades pré-determinadas dos ensaios;
- A partir do material homogeneizado, o mesmo era guardado em sacos plásticos e colocados na câmara úmida por um período de 24h;
- Após o período de 24h, o material era retirado da câmara úmida e dava-se início ao processo de compactação. As amostras foram compactadas em camadas de 2 cm cada, perfazendo um total de 5 camadas e uma altura total de 10 cm;
- Ao término da compactação de uma camada era efetuada sua escarificação, a fim de proporcionar melhor ligação entre elas;
- Uma vez fixados o diâmetro e a altura das amostras, foi obtido seu volume e, de posse do conhecimento da umidade, foi calculado a massa específica seca de cada corpo de prova.



Figura 4.1: Moldes e prensa utilizados na compactação estática.

O estudo destinou-se a avaliar alternativas de melhoria do desempenho das vias em urucu, rodovias com baixíssimo nível de tráfego e tráfego em sua quase totalidade leve. Por apresentarem os solos regionais certa expansão e por não ser a estrutura de pavimento muito solicitada, optou-se por realizar os estudos compactando o solo na energia Proctor normal. Cabe destacar que os estudos realizados servirão de base para estudos voltados para rodovias convencionais, onde o comportamento do solo deve ser avaliado considerando geralmente a energia Proctor intermediário.

Para a determinação do teor de areia a ser misturado ao solo natural, todas as amostras foram compactadas na umidade ótima e massa específica seca máxima, obtendo o seu grau de saturação correspondente. Após essa etapa, os corpos de prova foram submetidos, alguns à molhagem e outros à secagem, fazendo variar seu grau de saturação dos teores de +5%, -5%, -10%, -20% em relação ao grau de saturação correspondente à umidade ótima. A Tabela 4.1 mostra os índices físicos que caracterizam os corpos de prova ensaiados objetivando a determinação do teor de areia ideal para a mistura solo-areia-fibra.

Uma vez determinado o teor de areia a ser acrescentado ao solo natural, foram realizados ensaios de compressão simples com as misturas do solo natural e do solo-areia com fibras de diferentes tipos e comprimentos. A Tabela 4.2 apresenta a composição das amostras estudadas no ensaio de compressão simples. Como a região geográfica em estudo encontra-se em clima predominantemente úmido com precipitações na maior parte do ano, as operações de compactação e mistura em umidades menores ou iguais à umidade ótima são de difícil realização. Analisando este aspecto, foram realizados ensaios de compressão simples nesta fase considerando as amostras de três maneiras distintas:

- a) Amostras moldadas na umidade ótima;
- b) Amostras moldadas na umidade ótima, porém umedecidas até chegarem ao ramo úmido e
- c) Amostras moldadas no ramo úmido.

Para a análise do comportamento mecânico, também foram determinadas as sucções presentes nas misturas, uma vez que a adição de areia tende a diminuir a sucção atuante no solo argiloso. Após a moldagem foi colocado papel filtro nas amostras e as mesmas foram envolvidas em filme plástico, a fim de efetuar as determinações das sucções. Passado o período de repouso correspondente a 15 dias, foram realizados os rompimentos das mesmas.

Tabela 4.1: Parâmetros para as amostras do ensaio de compactação para determinação do teor de areia fina a ser misturado no solo natural.

Material	Amostra	$W_{inicial}$ (%)	Variação do Sr (%)	γ_d (g/cm ³)	e	Sr (%)
Solo Natural	CP1	15,45	0	1,78	0,503	81,9
	CP2	15,42		1,8	0,487	84,5
	CP3	15,34		1,79	0,493	83,1
Solo Natural +10% de Areia fina	CP1	15,20	0	1,84	0,445	90,2
	CP2	15,33		1,83	0,451	90,7
	CP1	15,60	+ 5	1,8	0,474	87,5
	CP2	15,30		1,86	0,425	95,2
	CP3	15,60		1,85	0,438	94,9
	CP1	15,48	-5	1,82	0,46	89,4
	CP2	15,55		1,82	0,461	89,6
	CP3	15,31		1,82	0,463	87,9
	CP1	15,21	-10	1,85	0,437	92,5
	CP2	15,22		1,82	0,458	88,4
	CP3	15,67		1,84	0,446	93,5
	CP1	15,32	-20	1,83	0,449	90,7
	CP2	15,38		1,84	0,443	92,4
	CP3	15,59		1,84	0,442	93,7
	Solo Natural +20% de Areia fina	CP1	14,41	0	1,87	0,421
CP2		14,79	1,88		0,409	94,7
CP1		15,30	+ 5	1,85	0,428	94,5
CP2		15,62		1,85	0,426	97,0
CP3		15,57		1,83	0,444	92,8
CP1		15,36	-5	1,85	0,431	94,5
CP2		15,20		1,85	0,426	94,5
CP3		15,14		1,85	0,427	93,7
CP1		15,10	-10	1,86	0,424	94,0
CP2		15,20		1,85	0,43	93,3
CP3		15,20		1,85	0,426	94,2
CP1		14,68	-20	1,87	0,416	93,3
CP2		14,67		1,86	0,421	92,3
CP3		14,67		1,86	0,416	93,2
Solo Natural +40% de Areia fina		CP1	14,23	0	1,89	0,408
	CP2	14,41	1,86		0,432	90,1
	CP1	15,25	+ 5	1,85	0,413	96,6
	CP2	15,19		1,84	0,419	94,8
	CP3	15,49		1,84	0,419	9,7
	CP1	15,00	-5	1,86	0,41	94,3
	CP2	15,01		1,85	0,411	95,4
	CP3	15,00		1,86	0,406	94,0
	CP1	14,58	-10	1,86	0,407	93,7
	CP2	14,90		1,85	0,411	94,8
	CP3	14,97		1,85	0,412	95,1
	CP1	14,93	-20	1,86	0,41	95,3
	CP2	14,63		1,86	0,405	94,6
	CP3	14,61		1,86	0,407	94,0
	Solo Natural +60% de Areia fina	CP1	14,25	0	1,82	0,408
CP2		14,25	1,82		0,425	96,1
CP1 CP2 CP3		Corpos de prova partiram antes da execução do ensaio				
CP1		14,59	-5	1,8	0,437	86,5
CP2		14,51		1,81	0,433	86,8
CP3		14,55		1,81	0,433	8,2
CP1		14,42	-10	1,82	0,427	87,6
CP2		14,59		1,81	0,432	87,6
CP3		14,81		1,81	0,433	88,7
CP1		14,92	-20	1,8	0,436	88,7
CP2		14,64		1,81	0,433	87,8
CP3		14,49		1,81	0,429	87,6

Tabela 4.2: Amostras estudadas com a mistura de solo natural, areia e fibras.

Solo Natural
Solo Natural + Fibra Lisa de 12 mm
Solo Natural + Fibra Lisa de 24 mm
Solo Natural + Fibra Corrugada de 25 mm
Solo Natural + Fibra Corrugada de 50 mm
Solo Natural (80%) + Areia (20%)
Solo Natural (80%) + Areia (20%) + Fibra Lisa de 12 mm
Solo Natural (80%) + Areia (20%) + Fibra Lisa de 24 mm
Solo Natural (80%) + Areia (20%) + Fibra Corrugada de 25 mm
Solo Natural (80%) + Areia (20%) + Fibra Corrugada de 50 mm

4.1.2 ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Este ensaio consiste na aplicação de uma carga de compressão uniformemente distribuída ao longo da geratriz da amostra com a geração de um estado de tensões formado por tensões de tração, na região do plano que contém a carga aplicada.

A carga de ruptura foi identificada por meio de um pico de carga na curva carga x deslocamento ou para a carga estabilizada para seguidos deslocamentos, obtendo-se o valor da resistência à tração por meio da Equação 4.1.

$$\sigma_t = \frac{2 * P}{\pi * D * t} \quad (4.1)$$

Onde:

σ_t = resistência à tração (kgf/cm²);

P = carga de ruptura (Kgf);

D = diâmetro (cm);

t = espessura (cm).

Após o ensaio, a umidade da amostra era retirada e também realizado o ensaio de peso específico utilizando-se o método da balança hidrostática, de acordo com a norma NBR-10838/1988. Os corpos de prova utilizados para esse ensaio foram os mesmos utilizados na determinação da curva característica. Também se objetivou correlacionar esse parâmetro com

a sucção, uma vez que os fenômenos de aparecimento de trincas por tração devido às variações de sucção são muito frequentes na região de estudo.

4.1.3 DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

Para a execução deste ensaio foram efetuadas curvas características para as amostras constantes da Tabela 4.1, efetuando trajetórias de secagem e molhagem, a partir da umidade ótima de compactação das amostras. Esta técnica é conhecida como de trajetória mista, pois parte-se de uma determinada umidade em direção ao umedecimento e à secagem. A execução da curva característica para o material com fibras se torna importante, pois a sua adição na massa de solo provoca uma modificação no índice de vazios (Bento, 2006). Desta forma, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 25 mm de altura e 50 mm de diâmetro. Após a moldagem, fez-se os ajustes de umidade, e em seguida foi colocado sobre cada amostra três papéis filtro. Posteriormente as amostras foram enroladas num filme plástico de PVC e deixadas em repouso, na câmara úmida, por um período de 15 dias à temperatura constante. Após esse prazo, os papéis filtro eram retirados da amostra e pesados em balança com precisão de 4 dígitos. Posteriormente, os papéis filtro eram colocados em estufa para secagem e pesados novamente, determinando-se assim a umidade de cada um deles para a partir da curva de calibração do papel filtro, se obter a sucção atuante em cada corpo de prova. Terminado esse processo, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral e, em seguida, determinados os índices de vazios pelo método da parafina e o teor de umidade com o auxílio da estufa.

4.2 METODOLOGIA ADOTADA NOS ESTUDOS NA FRANÇA

A metodologia utilizada baseou-se em um protótipo montado com materiais alternativos que buscavam representar qualitativamente as características do comportamento dos materiais encontrados no campo. Esse procedimento foi efetuado a fim apenas de entender melhor o comportamento do sistema, uma vez que em relação ao campo esses dados são qualitativos e não quantitativos, não podendo ser extrapolados para medidas reais. De maneira geral, o ensaio consistiu na superposição dos materiais escolhidos em uma caixa metálica com dimensões de 0,74 m x 0,96 m x 0,50 m (largura x comprimento x altura) e posterior carregamento. Os procedimentos efetuados para isso são explicados nos itens a seguir.

4.2.1 ESCOLHA DA ESPUMA

A escolha entre as espumas foi feita por meio de ensaio de compressão, a fim de avaliar a sua deformabilidade, escolhendo-se assim entre os dois extremos encontrados no mercado local, a espuma mais rígida e a menos rígida. Não se tratando de um material utilizado na mecânica dos solos, o ensaio de compressão foi realizado de duas maneiras: i) por meio de prensas de compressão e ii) manualmente, fato este devido à falta de sensibilidade dos equipamentos, uma vez que a amostra de espuma é muito mais deformável do que a amostra de solo.

O ensaio na prensa de compressão foi possível apenas para a espuma mais densa e também serviu como uma forma de validar os ensaios feitos manualmente. Para esses, o procedimento efetuado foi:

- Utilização de amostras cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura;
- Carregamento da amostra por meio de pesos e posterior medida do diâmetro e altura após cada carregamento. Para as espumas mais flexíveis o ensaio ficou limitado a uma quantidade de pesos diferente das espumas mais rígidas, que, devido ao carregamento, acabavam tombando ou deformando-se completamente (Figura 4.1).



Figura 4.2: Ensaio de compressão efetuado na prensa e manualmente.

As espumas escolhidas para a confecção do modelo foram a B60 e a B26, por se apresentarem nos dois extremos em termos de comportamento. Os resultados dos ensaios podem ser

observados na Figura 4.2, para os ensaios na prensa e manuais. Observou-se que o resultado para a espuma B60 para o ensaio manual se aproximou do ensaio efetuado na prensa.

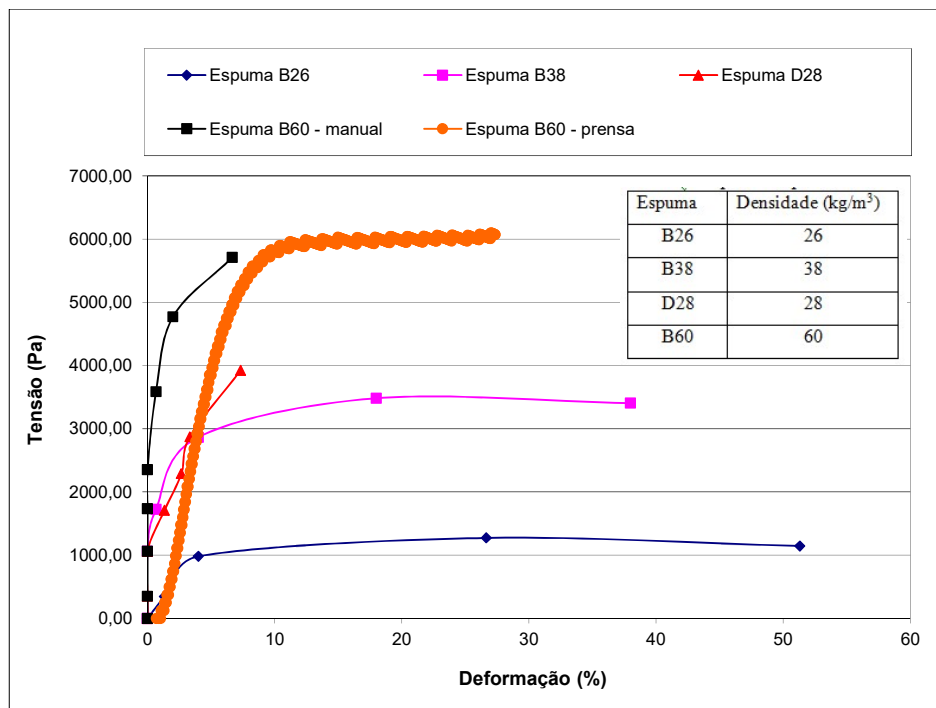


Figura 4.3: Ensaio de compressão realizados para escolha da espuma.

4.2.2 CONFECÇÃO DOS ALVÉOLOS

Os alvéolos foram confeccionados com faixas contínuas de papel de 25 mm de altura, a fim de diminuir o número de ligações. Primeiramente o papel foi moldado de maneira que os alvéolos pudessem conter um círculo inscrito de 50 mm de diâmetro. A ligação entre os alvéolos foi feita primeiramente com um clipe e, após a moldagem, eles foram retirados e as ligações foram coladas. Esse procedimento foi realizado para cada fileira e, uma vez pronta, as mesmas foram coladas entre si até o tamanho necessário para o ensaio. A Figura 4.3 mostra o procedimento realizado.

Racana (2002) realizou ensaios com e sem ligações entre os alvéolos verificando que a falta das mesmas não apresentou influência significativa para o resultado final dos ensaios, por isso decidiu-se pela realização dos ensaios com as ligações descoladas entre os alvéolos.



Figura 4.4: Confeção dos alvéolos.

4.2.3 MONTAGEM DO MODELO

Os ensaios de carregamento com o modelo foram realizados para as combinações de materiais constantes na Tabela 4.3:

Tabela 4.3: Ensaio realizados com o modelo.

1	Espuma rígida (h=300 mm)
2	Espuma flexível (h=300 mm)
3	Espuma rígida (h=300 mm) + Areia (h=50 mm)
4	Espuma flexível (h=300 mm) + Areia (h=50 mm)
5	Espuma rígida (h=300 mm) + Alvéolos (h=25 mm) preenchidos com areia
6	Espuma flexível (h=300 mm) + Alvéolos (h=25 mm) preenchidos com areia
7	Espuma rígida (h=300 mm) + Areia (h=10 mm)
8	Espuma flexível (h=300 mm) + Areia (h=100 mm)
9	Espuma rígida (h=300 mm) + Alvéolos (h=50 mm) preenchidos com areia
10	Espuma flexível (h=30cm) + Alvéolos (h=50 mm) preenchidos com areia

A montagem do ensaio consistiu, basicamente, na colocação do material a ser ensaiado no interior da caixa metálica, posterior fixação do acessório responsável pela leitura dos deslocamentos - denominados LVDT – e disposição do sistema de aquisição de dados. Após a montagem, era efetuado o carregamento por meio de pesos, fixando-se um punção máximo do pistão de carga no material ensaiado de 50 mm. De acordo com Reiffsteck (1992), essa medida representa a deformação permanente máxima permitida na França para as vias não pavimentadas com baixo volume de tráfego.

A Figura 4.4 mostra um corte esquemático para as combinações ensaiadas, e a Figura 4.5 apresenta o modelo completo durante a realização de um ensaio.

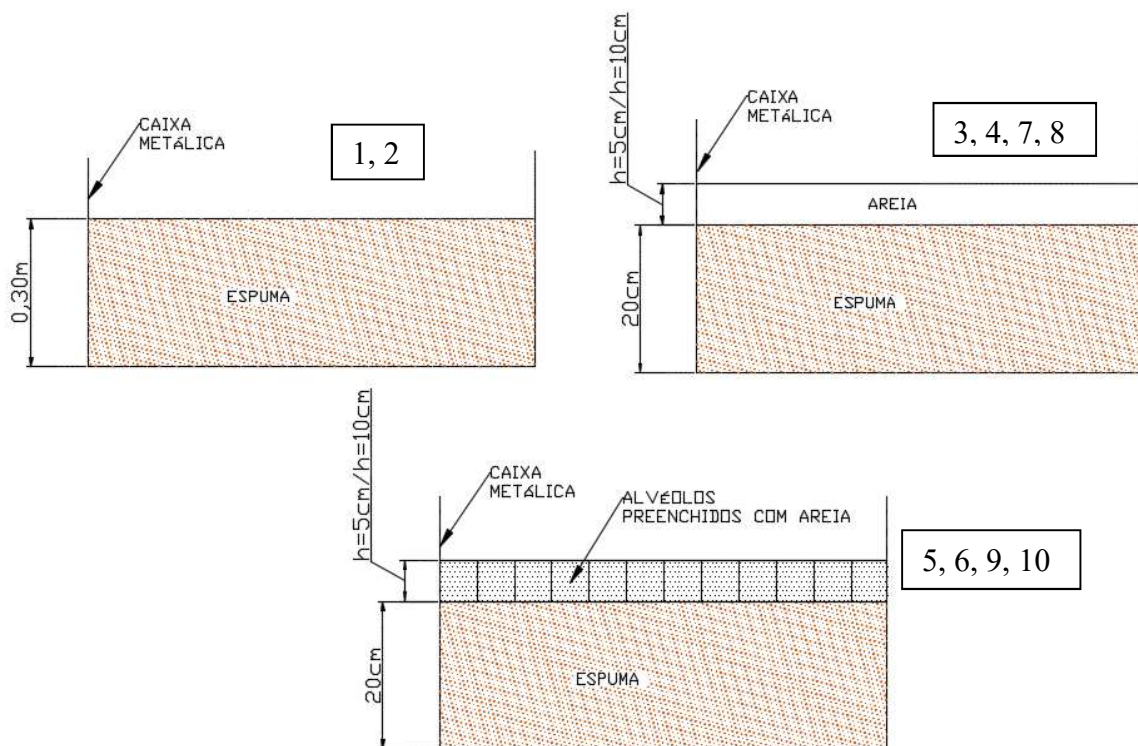


Figura 4.5: Desenho esquemático dos ensaios realizados.

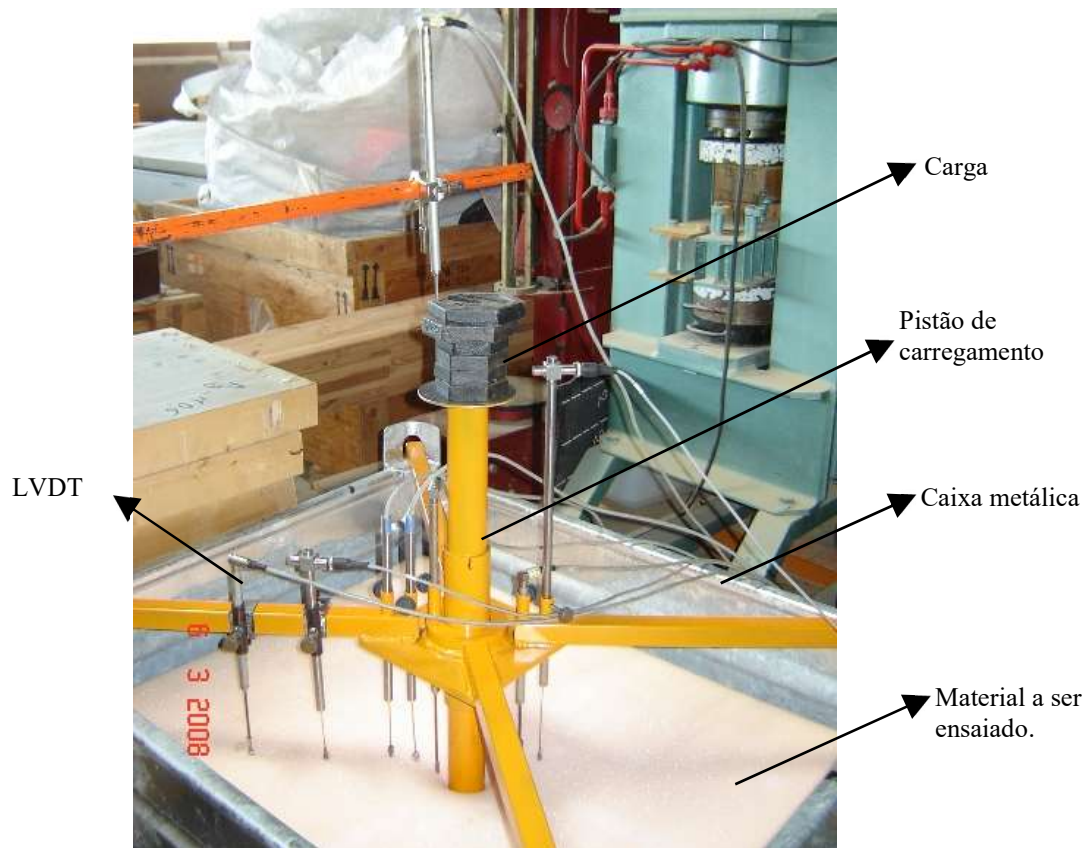


Figura 4.6: Montagem do ensaio

Para a disposição dos captores no suporte metálico, foi efetuado um ensaio teste com pequenos carregamentos a fim de verificar a zona de influência na espuma, ou seja, após efetuado um carregamento, verificava-se até onde seria possível ocorrer algum deslocamento. Essa verificação foi efetuada com um sistema de câmera conectado ao computador (Figura 4.6). Após o ensaio verificou-se uma zona de influência de 280 mm seguindo-se diagonalmente a partir do centro do ponto de carregamento.

Ao todo foram utilizados 8 (oito) LVDT sendo um posicionado na base do pistão de carga, cinco posicionados à esquerda do pistão de carga e dois à direita do mesmo, baseando-se no princípio de que a curva gerada devido ao carregamento se apresentasse de maneira simétrica. A Figura 4.7 mostra o esquema da localização dos LVDT.

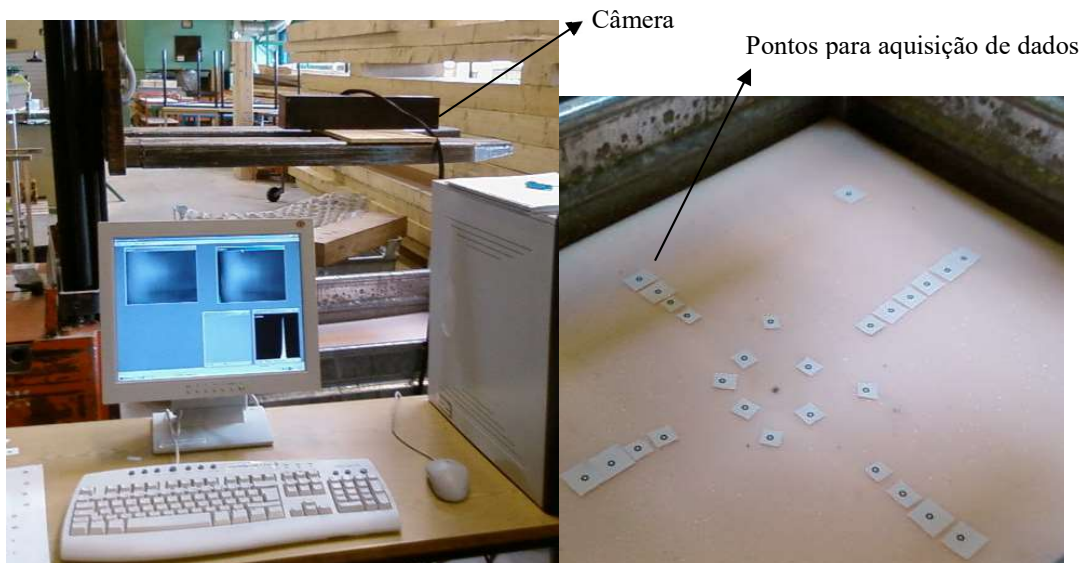


Figura 4.7: Método para verificação da área de influência das espumas.

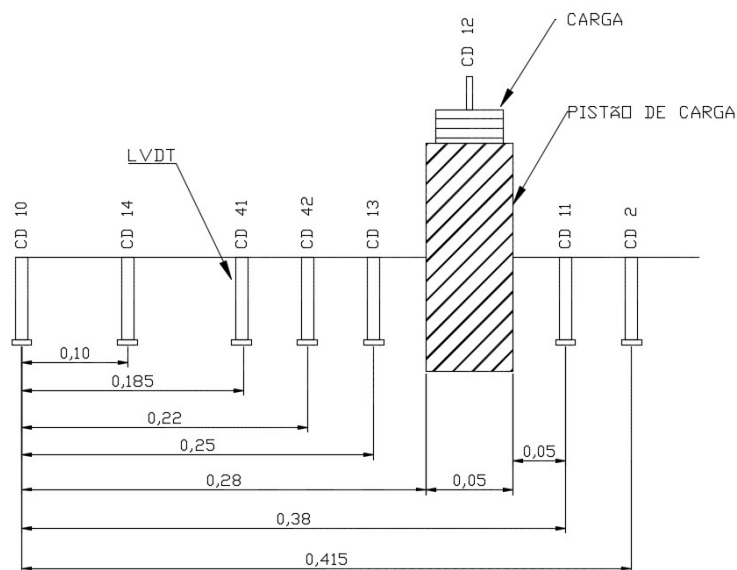


Figura 4.8: Croqui esquemático da disposição dos LVDT's.

Para o ensaio com os alvéolos, a metodologia de preenchimento dos mesmos foi efetuada de acordo com Reiffsteck (1996). Os alvéolos foram posicionados em cima da espuma e o seu preenchimento foi efetutado com a areia seca a partir do centro da caixa metálica, manualmente, avançando radialmente até o completo preenchimento da área. Após esta etapa, foi efetuada

uma compactação por meio de uma placa de madeira e um martelo (Figura 4.8). O mesmo procedimento de compactação foi efetuado para o ensaio com a areia.



Figura 4.9: Etapas da preparação do ensaio com os alvéolos.

4.2.4 ALVÉOLOS EM GEOSSINTÉTICOS

Dando continuidade aos ensaios Chapelet (2010), utilizou-se o mesmo sistema de ensaios já descrito na Revisão Bibliográfica, porém utilizando o solo natural como camada de suporte, a fim de melhor aproximar o modelo da realidade. Desta forma, os ensaios foram realizados com uma camada de 200 mm de solo natural compactada na umidade ótima, com a densidade seca máxima e energia Proctor normal, em subcamadas de 5 cm cada, totalizando, portanto, 4 subcamadas de preenchimento. Sobre esta camada de solo, executou-se um ensaio com uma camada de areia seca de 25 mm e uma camada de alvéolos de mesma altura preenchidos com areia. A Figura 4.9 mostra um croqui esquemático dos ensaios realizados.

Em virtude dos demais materiais utilizados neste estudo, como as fibras lisas e corrugadas, foram também realizados ensaios com esses materiais e os alvéolos, tendo como camada de base o solo natural e a mistura de solo natural e areia na energia Proctor normal, já utilizadas nos demais ensaios descritos anteriormente. O processo de compactação foi o mesmo efetuado por Chapelet (2010), tendo a camada suporte a espessura de 200 mm e a camada de material sobreposto igual a 25 mm.

Para a camada sobreposta constituída apenas de solo natural foi utilizada a fibra lisa na mistura. Quando a mesma era constituída da mistura com areia foi utilizada a fibra corrugada. A escolha do tipo de fibra deveu-se aos resultados apresentados anteriormente nos demais ensaios, sendo o seu tamanho limitado ao mínimo utilizado devido ao tamanho dos alvéolos. A Tabela 4.4 apresenta o resumo dos ensaios realizados.

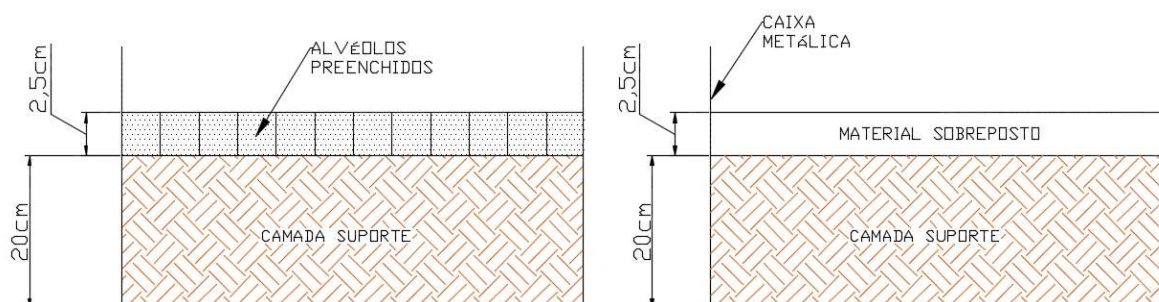


Figura 4.10: Esquema dos ensaios executados com solo natural como camada de suporte (Modificado de Chapelet, 2010).

Tabela 4.4: Ensaios realizados com solo natural (SN), areia, fibras e alvéolos em geossintéticos.

Ensaio	Camada Suporte	Material sobreposto
1	SN	-
2	SN	AREIA
3	SN	ALVÉOLOS+AREIA
4	SN	ALVÉOLOS+SN
5	SN	ALVÉOLOS+(80%SN+20%AREIA)
6	80%SN+20%AREIA	-
7	80%SN+20%AREIA	SN
8	80%SN+20%AREIA	ALVÉOLOS+AREIA
9	80%SN+20%AREIA	ALVÉOLOS+SN
10	80%SN+20%AREIA	ALVÉOLOS+(80%SN+20%AREIA)
11	SN	ALVÉOLOS+(80%SN+20%AREIA+FC25)
12	SN	ALVÉOLOS+(SN+FL12)
13	80%SN+20%AREIA	ALVÉOLOS+(80%SN+20%AREIA+FC25)
14	80%SN+20%AREIA	ALVÉOLOS+(SN+FL12)

5 RESULTADOS OBTIDOS

5.1 ENSAIOS NO BRASIL

Primeiramente apresenta-se a curva de compactação para o solo natural e para a mistura de solo natural com areia, respectivamente (Figuras 5.1). Observa-se que, para o solo natural, a umidade ótima está em torno de 15% e o peso específico aparente seco máximo é igual a 17,9 kN/m³.

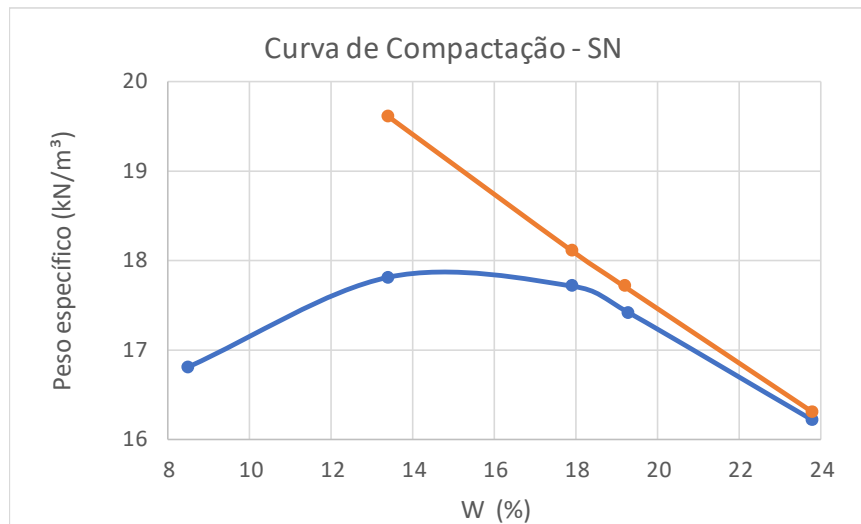


Figura 5.1: Curva de compactação para o solo natural.

Embora se saiba que tanto a incorporação de areia quanto de fibras a um solo argiloso pode proporcionar alteração na curva de compactação, buscou-se, no presente estudo, comparar o comportamento do solo puro com o solo misturado com areia e assim como com areia e fibra, mantendo-se a umidade e peso específico aparente seco de compactação, o que implicou na determinação apenas da curva de compactação do solo puro.

5.1.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS

Embora a adição de areia proporcione uma maior interação entre o solo e a fibra, esta tende, para uma mesma umidade e porosidade, devido à menor atividade da areia e maior tamanho dos grãos, a diminuir a sucção/capilaridade atuante em relação ao solo argiloso puro e, por consequência, a resistência do solo. Entretanto, quando ocorre o aumento da umidade, a variação da sucção é geralmente menor. Desta forma, a perda de resistência nos solos tende a diminuir na medida em que se aumenta o teor de areia, o que pode contribuir positivamente.

Foi usada também, nessa tese, a avaliação da sucção por meio da curva característica transformada pelo índice de vazios, conforme proposto por Camapum de Carvalho & Leroueil (2004). As curvas características convencionais são apresentadas em função do grau de saturação (S_r) *versus* sucção, colocando-se a sucção em kPa e em pF (pF corresponde ao logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água). Considerando-se a proposta de curva característica transformada (Camapum de Carvalho e Leroueil, 2004), os resultados apresentados estão expressos plotando-se e.pF em função do grau de saturação (S_r).

As siglas FC e FL referem-se às fibras corrugadas e às fibras lisas respectivamente, assim como os números 12, 24, 25 e 50, referem-se aos comprimentos das mesmas em mm. A sigla SN refere-se ao solo argiloso, representando o solo natural sem incorporação de fibra ou areia.

As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam respectivamente as curvas características e as curvas características transformadas pelo índice de vazios conforme proposto por Camapum de Carvalho & Leroueil (2004), para as amostras de solo natural e de solo natural com a adição de 20 % de areia. Destaca-se que as curvas características foram elaboradas tendo as amostras compactadas na umidade ótima e realizados os procedimentos de secagem e molhagem. A Figura 5.5 representa os pontos das curvas características plotados em função do índice de vazios e do grau de saturação, para as misturas analisadas.

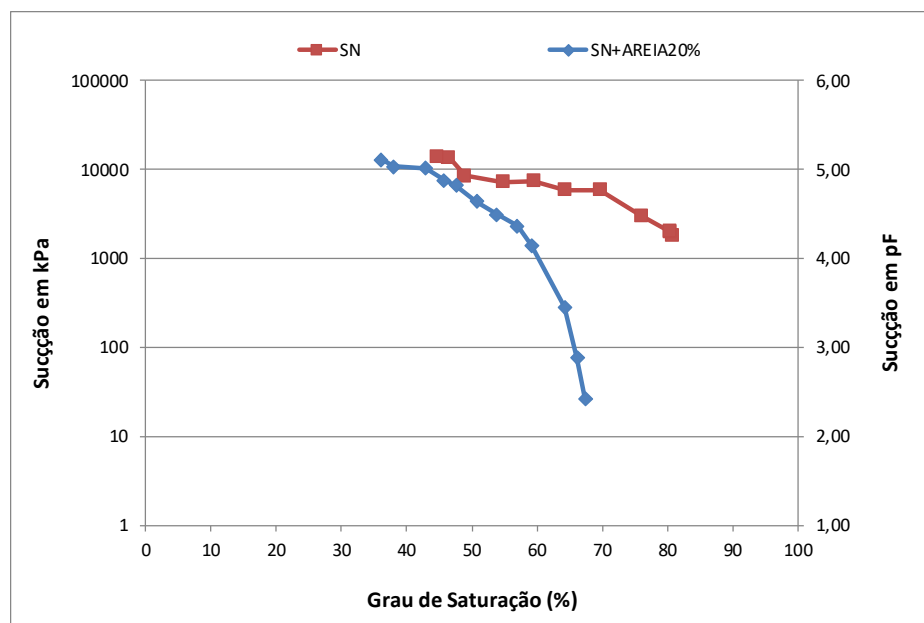


Figura 5.2: Curva característica para as amostras de solo natural e para as misturas de solo natural com adição de 20 % de areia.

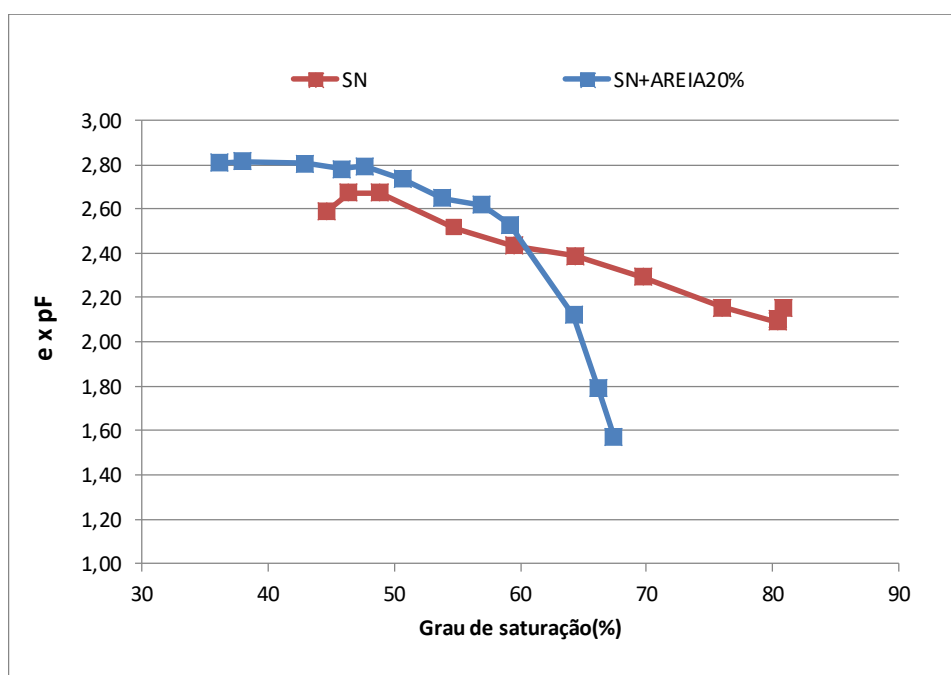


Figura 5.3: Curva característica modificada para as amostras de solo natural e para as misturas de solo natural com adição de 20 % de areia.

De acordo com a Figura 5.2, observa-se que para a mistura com areia existe uma queda brusca de sucção a partir de um determinado grau de saturação, o que não ocorre nas amostras de solo natural que produziu curva característica com declínio suave da sucção com o aumento do grau de saturação. Observa-se ainda nessa figura que a areia incorporada ao solo além de gerar uma redução significativa na sucção, apesar de não se ter determinado as sucções para elevados graus de saturação ($S_r > 68\%$), tende, o que se depreende pelo formato da curva, à formação ou ampliação da macroporosidade no solo o que geralmente caracteriza um sistema bimodal de distribuição de poros. Verifica-se que no solo puro até 80% de grau de saturação o comportamento se mantém uniforme, ou seja, o solo pode apresentar macroporosidade, mas para valores de grau de saturação superiores a 80 %. Além disso, tendo em vista que a saturação do solo da região é elevada, a adição de areia pode conduzir a sucções mais baixas, deixando de influir em campo e, por sua vez, pode sobressair o efeito das fibras, como será mostrado mais adiante.

A Figura 5.3 mostra que, após a transformação da sucção pelo índice de vazios as curvas apresentam-se paralelas para graus de saturação inferiores a 58%. Para valores de grau de saturação maiores que esse observa-se uma significativa redução em $e.pF$ para a mistura do solo com areia em relação ao solo puro, tendo em vista o aumento da sucção (Figura 5.4).

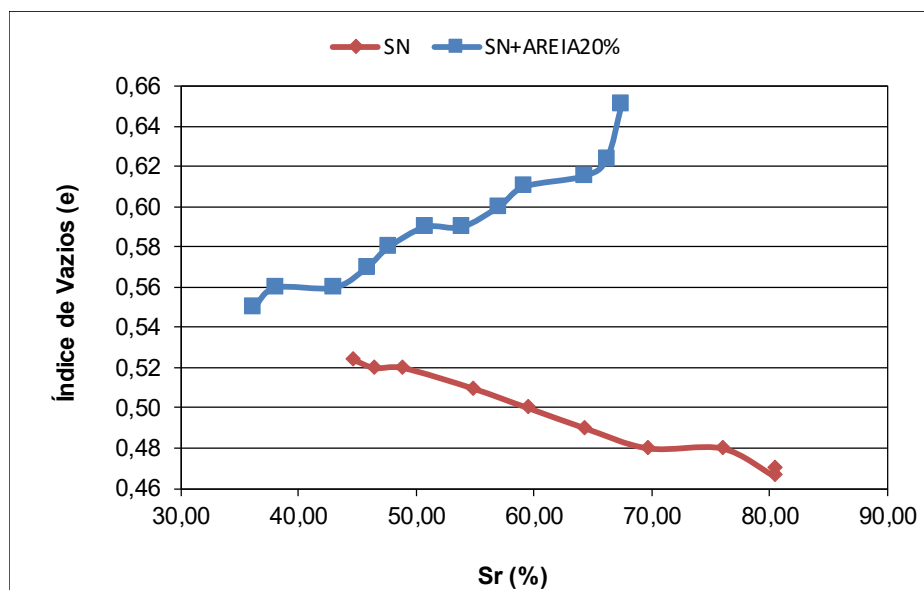


Figura 5.4: Pontos da curva característica plotados em função do índice de vazios, para as amostras analisadas.

Considerando-se esses dois materiais (solo puro e solo contendo 20 % de areia) procedeu-se à determinação das curvas características e curvas características transformadas fazendo-se a incorporação das fibras FL12 e FL 24. A Figura 5.5 mostra, considerando-se os valores máximos de grau de saturação atingidos, que com a presença de areia as curvas características obtidos com e sem fibras foram semelhantes, no entanto, sem sua presença a incorporação de fibras conduziu a uma redução da sucção, redução essa que foi maior quando da incorporação da fibra FL12. Essa redução de sucção ou mesmo a preservação da mesma nas curvas com a adição de areia pode estar ligada a variações na porosidade, o que torna relevante a análise dos resultados em função da sucção transformada em relação ao índice de vazios.

Analisando-se as curvas obtidas para o solo natural e solo natural mais fibras, observa-se que tanto para a FL12 como para a FL24 não é possível verificar mudança no comportamento das curvas características na região dos microporos. Porém, esta mudança já se torna relevante na região dos meso e macroporos, sendo que a curva da mistura de solo natural com adição de FL12 foi a que apresentou um maior deslocamento em relação a curva obtida para o solo puro, refletindo em menores valores de sucção para o mesmo grau de saturação a se incorporar as fibras

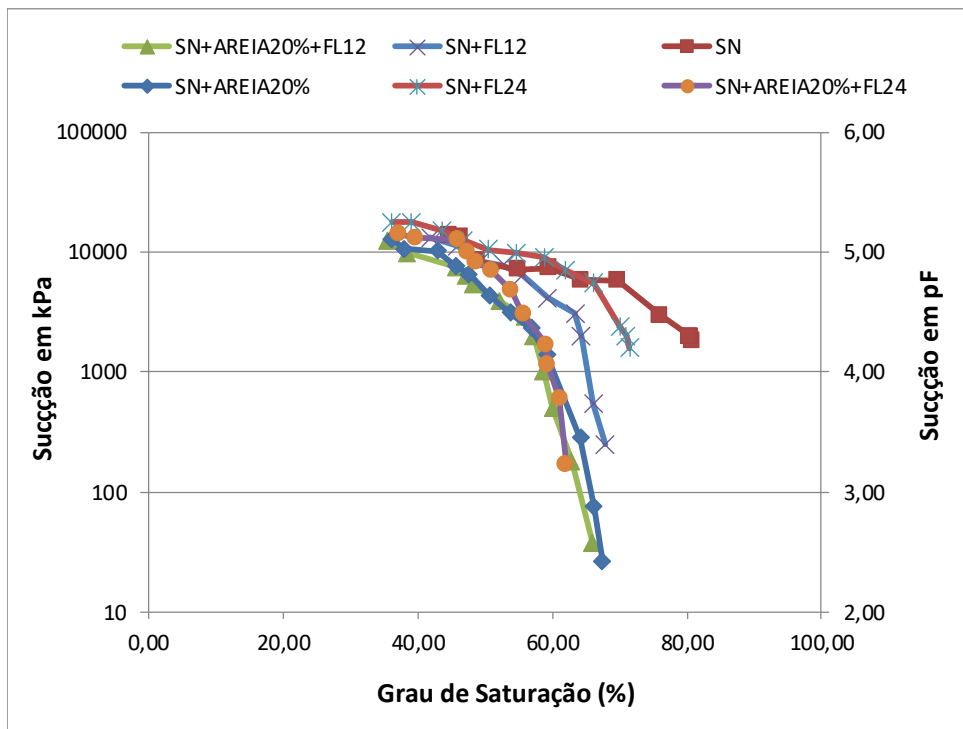


Figura 5.5: Curva característica para as amostras com adição de fibra lisa.

Analisando-se as curvas obtidas para o solo natural e solo natural mais fibras, observa-se que tanto para a FL12 como para a FL24 não é possível verificar mudança no comportamento das curvas características na região dos microporos. Porém, esta mudança já se torna relevante na região dos meso e macroporos, sendo que a curva da mistura de solo natural com adição de FL12 foi a que apresentou um maior deslocamento em relação a curva obtida para o solo puro, refletindo em menores valores de sucção para o mesmo grau de saturação a se incorporar as fibras

Em relação ao índice de vazios, para as amostras de solo natural, observa-se curvas semelhantes. Entretanto, para a FL12, considerando um mesmo grau de saturação, os índices de vazios são maiores do que a FL24. Já as amostras com adição de areia, quando analisados o mesmo parâmetro, observa-se uma tendência inversa (Figura 5.6).

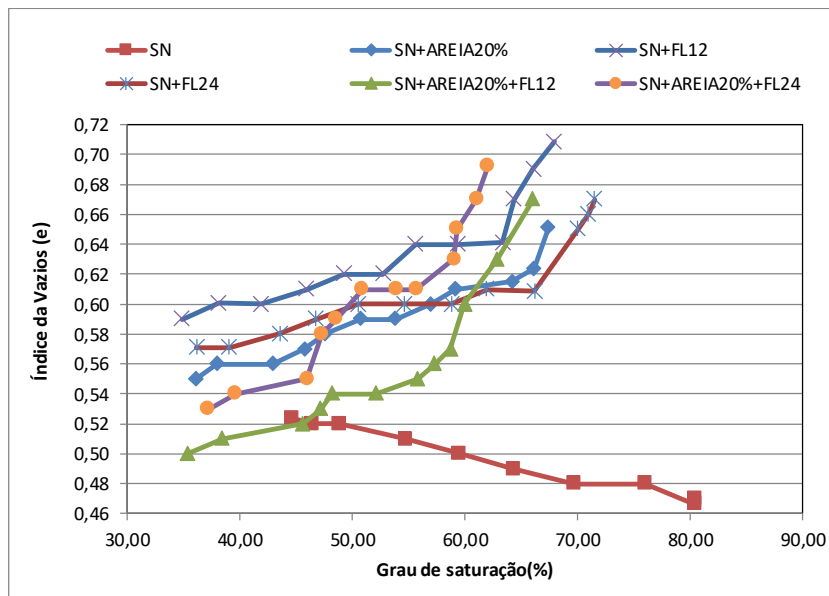


Figura 5.6: Índice de vazios em função do grau de saturação para as amostras com adição de fibras lisas.

A Figura 5.7 apresenta as curvas características transformadas obtidas para o solo natural (SN), solo natural mais fibra FL12 (SN+FL12), solo natural mais fibra FL24 (SN+FL24), solo natural mais areia (SN+AREIA20%), solo natural mais areia e fibra FL12 (SN+AREIA20%+FL12) e solo natural mais areia e fibra FL24 (SN+AREIA20%+FL24). Observa-se a mesma tendência para as misturas de solo natural com as fibras FL12 e FL24, apesar de ter apresentado relevante diferença no índice de vazios da amostra quando comparada com a FL12, o que não ocorreu com as amostras moldadas apenas com o solo natural. Esse comportamento reflete a maior interação da fibra com a mistura de solo natural com areia, mesmo apresentando maior índice de vazios.

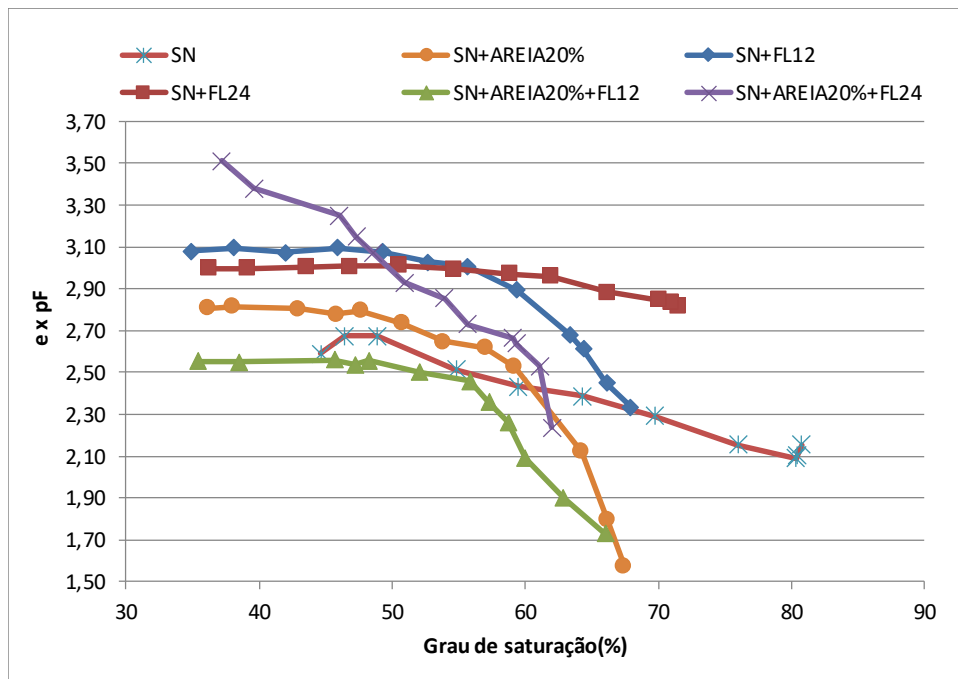


Figura 5.7: Curva característica modificada para amostras com adição de fibra lisa.

As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam os resultados das amostras com adição das fibras corrugadas, mostrando as curvas características em função da sucção, assim como a curva característica transformada.

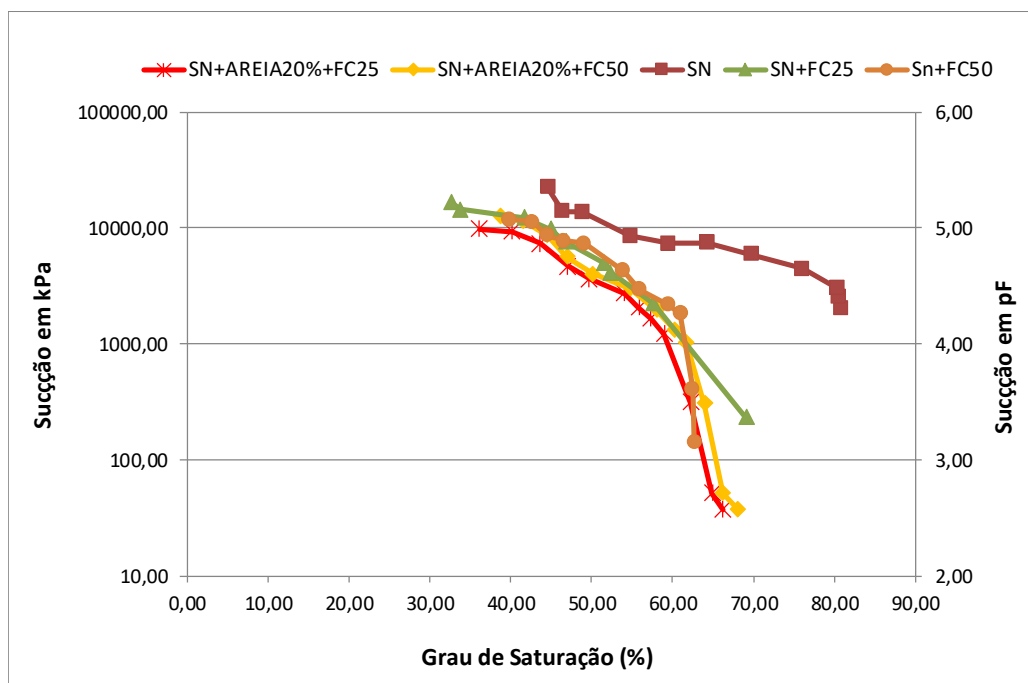


Figura 5.8: Curva característica para as amostras com adição de fibra corrugada.

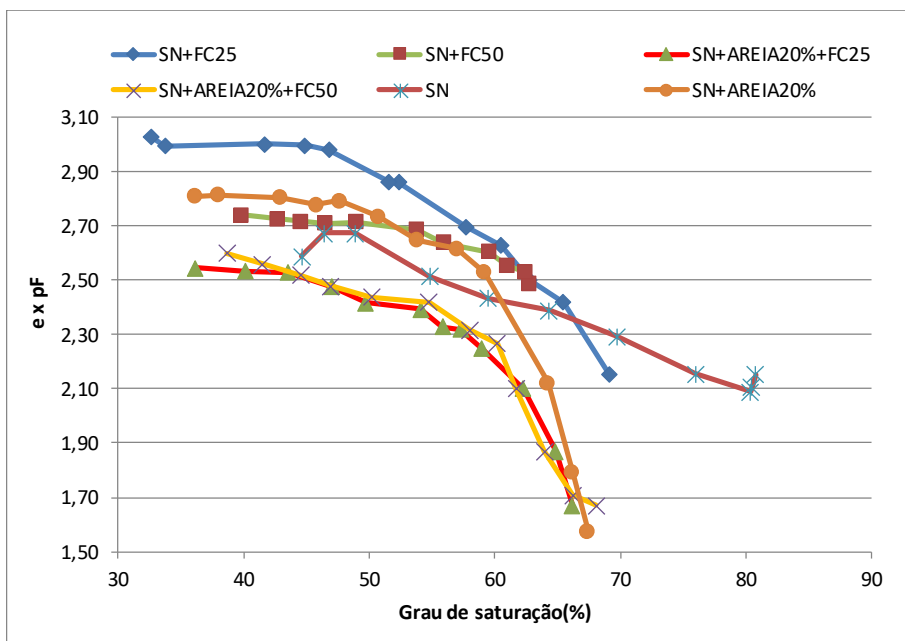


Figura 5.9: Curva característica modificada para amostras com adição de fibra corrugada.

Na Figura 5.8 não se observa grande diferença nos valores de sucção tanto para a região de microporos como na região dos macroporos, quando se analisa todas as misturas, tanto com adição de areia como de fibras. Porém, quando se observa o gráfico da Figura 5.9, percebe-se que as amostras de solo natural com adição da FC50 apresentaram menor índice de vazios do que as amostras com adição da FC25. Para as amostras com adição de areia, no gráfico da Figura 5.11, não se observou grandes variações do índice de vazios, tanto para as amostras com adição de FC25 como para as amostras com adição da FC50 (Figura 5.10).

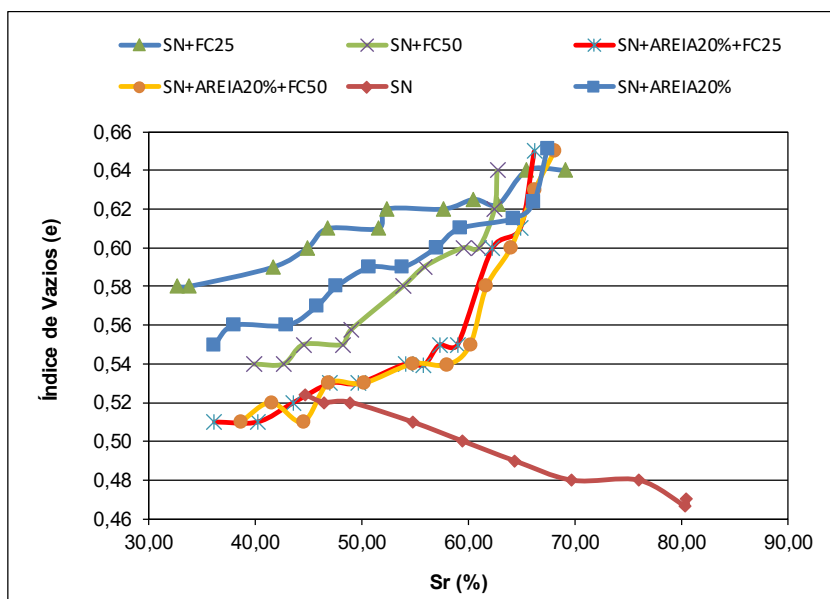


Figura 5.10: Índice de vazios em função do grau de saturação para as amostras com adição de fibras corrugada.

5.1.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Inicialmente foram realizados ensaios de resistência à compressão simples nas misturas com as fibras para a definição da porcentagem de areia fina a ser adicionada ao solo argiloso. Conjuntamente, isto é, para os mesmos corpos de prova, foram realizadas as medições de sucção por meio do papel filtro.

Considerando-se que a incorporação da areia altera a curva característica e, por consequência, a sucção atuante no solo, são apresentados na Figura 5.11 os resultados de resistência à compressão simples em função da sucção atuante nas misturas solo-areia analisadas. AS amostras foram compactadas na energia Proctor normal partindo-se da umidade ótima.

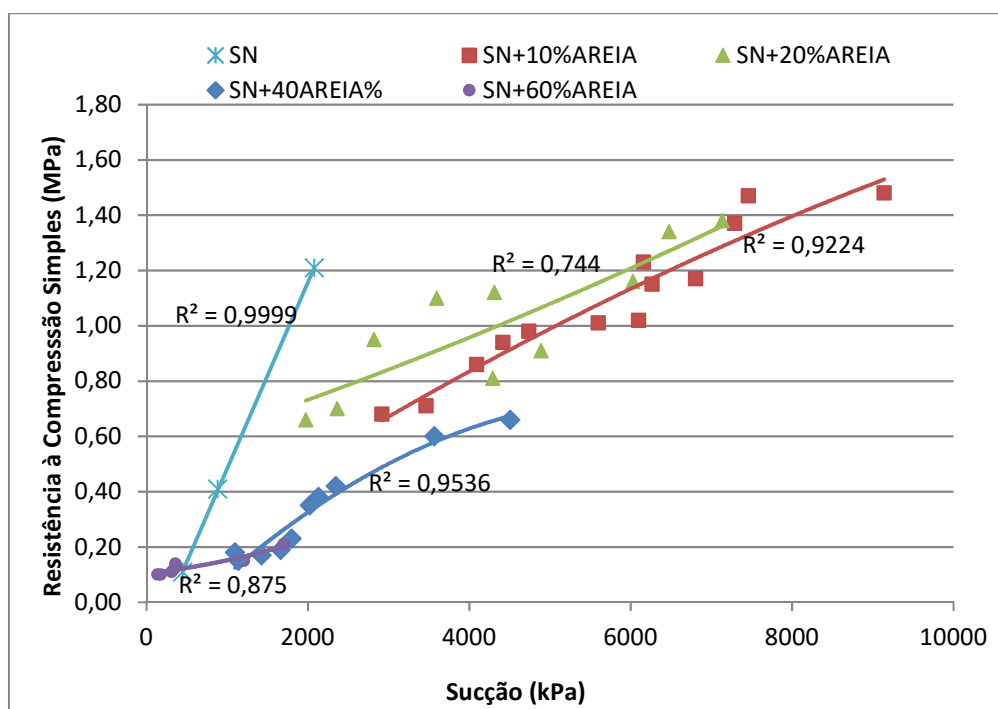


Figura 5.11: Resistência à compressão simples em função da sucção para as amostras com adição de areia fina.

Observa-se, de maneira geral, que há um aumento da resistência com o aumento da sucção, sendo estes valores mais expressivos quanto menor o teor de areia fina incorporada à argila. Para os teores de areia analisados o valor da resistência mantém-se crescente com a sucção, sendo observada, como esperado (Camapum de Carvalho, 1985), certa tendência à estabilização da resistência com o aumento da sucção, tendência que é mais clara para o solo com incorporação de 40% de areia fina. Essa tendência à estabilização pode ocorrer em função de

alguns fatores tais como o eventual surgimento de trincas de retração no solo e a perda do efeito da sucção entre as partículas, uma vez que a mesma tende a diminuir com a adição de areia. É importante observar que, para os casos estudados, a incorporação dos teores de 40% e 60% de areia às diferentes misturas, seguem a mesma tendência de variação com a sucção, ou seja, para estas porcentagens o conjunto de resultados tende a enquadrar-se em uma tendência única.

A Figura 5.12 mostra os mesmos resultados de resistência à compressão simples, apresentados na Figura 5.11, em função da sucção normalizada em relação ao índice de vazios. Essa análise se fundamenta na proposta de Camapum de Carvalho e Pereira (2001 e 2002) que mostraram que a resistência de um mesmo solo apresentando variações de índice de vazios plotada como uma função da sucção em pF (pF corresponde ao logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água) normalizada em relação ao índice de vazios tende a um comportamento único..

Observa-se na Figura 5.12 que, para a manutenção de uma mesma resistência à compressão simples, ao se passar do solo argiloso puro para as misturas contendo 10%, 20% e 40% de areia, faz-se necessário sucessivamente que se aumente a sucção ou diminua o índice de vazios do solo. Ao se passar de 40% de areia para 60% de areia, extrapolando-se os resultados com base nas tendências obtidas verifica-se que o aumento do teor de areia na mistura tende a tornar o comportamento menos dependente da sucção e do índice de vazios e mais dependente da natureza do contato, ou seja, provavelmente ao se passar de 40% para 60% de teor de areia se amplia os contatos areia-areia. Finalmente, esta figura mostra que para uma mesma relação pF/e , ou seja, considerando-se a mesma sucção (pF) e o mesmo índice de vazios (e), a incorporação da areia afeta diretamente a resistência à compressão simples do solo tendendo a diminuí-la até a incorporação de 40% de areia.

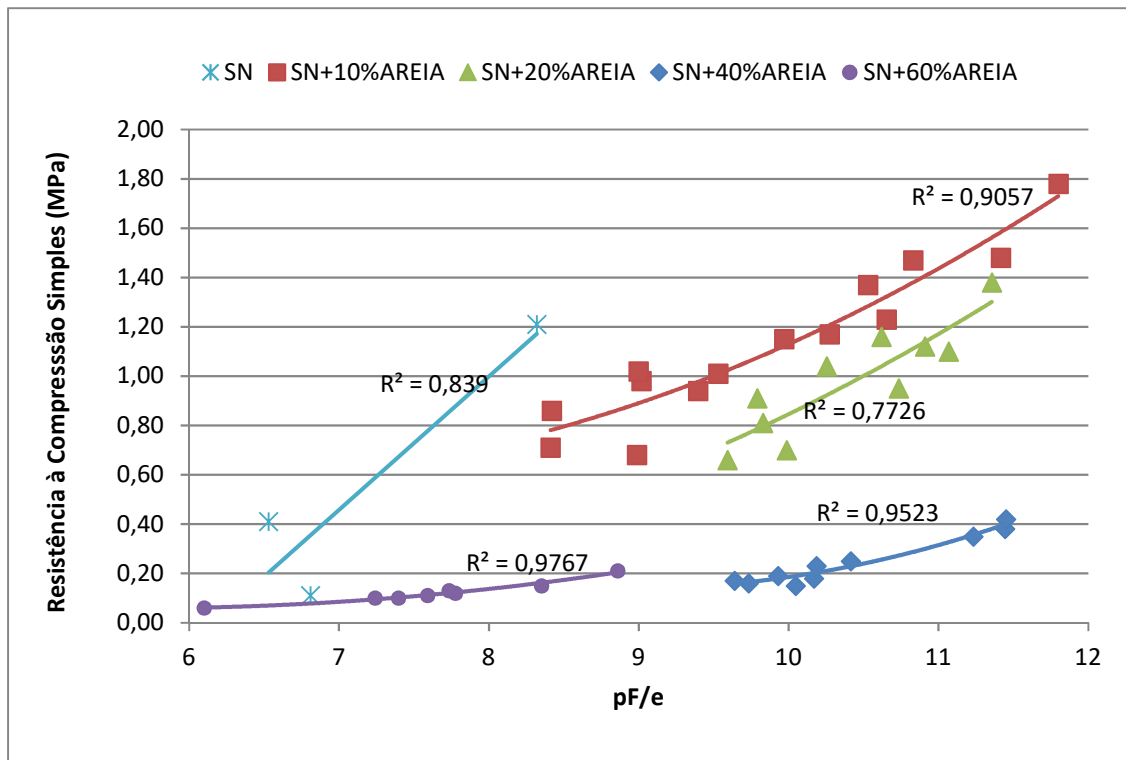


Figura 5.12: Resistência à compressão em função da sucção e índice de vazios para as amostras com adição de areia fina.

As Figuras 5.13 a 5.14 apresentam as curvas tensão x deformação para as misturas analisadas, de acordo com a variação do grau de saturação. Verifica-se nestas figuras comportamentos distintos em relação ao grau de saturação segundo o teor de areia incorporado ao solo.

Na Figura 5.13 obtida considerando-se o solo com incorporação de 10% de areia verifica-se, para a faixa de graus de saturação analisada (81,2% a 84%), que embora a rigidez praticamente não varie com S_r para pequenas deformações, a resistência aumenta de modo significativo indicando assim a relevância da sucção no comportamento mecânico do solo.

Em termos de deformabilidade, a Figura 5.14, obtida para amostras com incorporação de 20 % de areia e graus de saturação variando entre 74,7 % e 86,3 %, aponta para alterações de estrutura do solo conforme indicam Camapum de Carvalho *et al.* (1987) ao estudar amostras de solo compactado. Observa-se que, para aproximadamente 0,3 % de deformação específica, as amostras com S_r igual a 83,9 % e 86,7 % apresentam uma inflexão na curva de resistência a compressão simples, o que não ocorre para a amostra com grau de saturação igual a 74,7 %. Verifica-se ainda um aumento na resistência com a diminuição do grau de saturação.

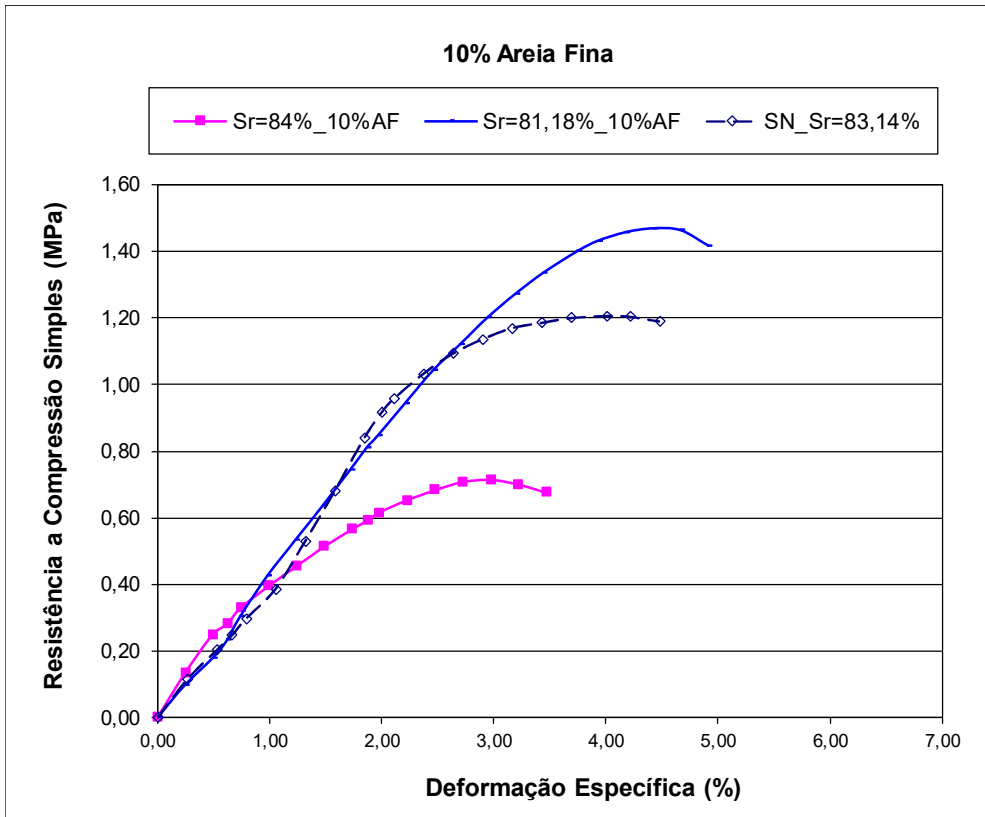


Figura 5.13: Curva tensão x deformação para 10% de areia fina.

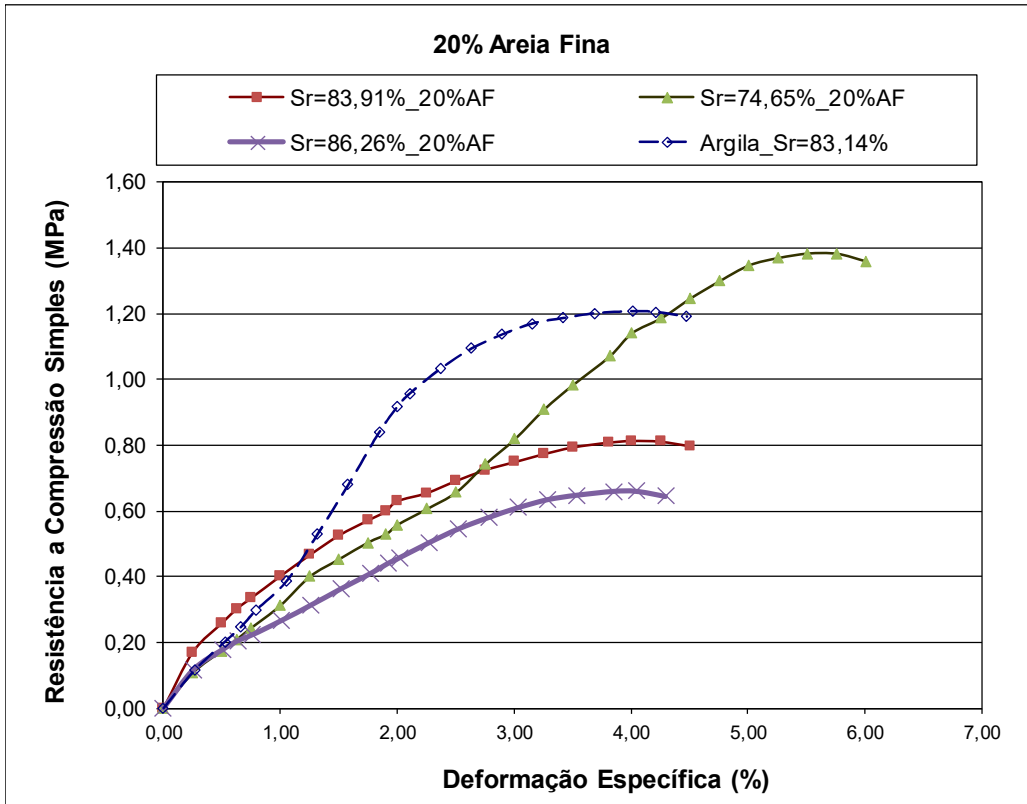


Figura 5.14: Curva tensão x deformação para 20% de areia fina.

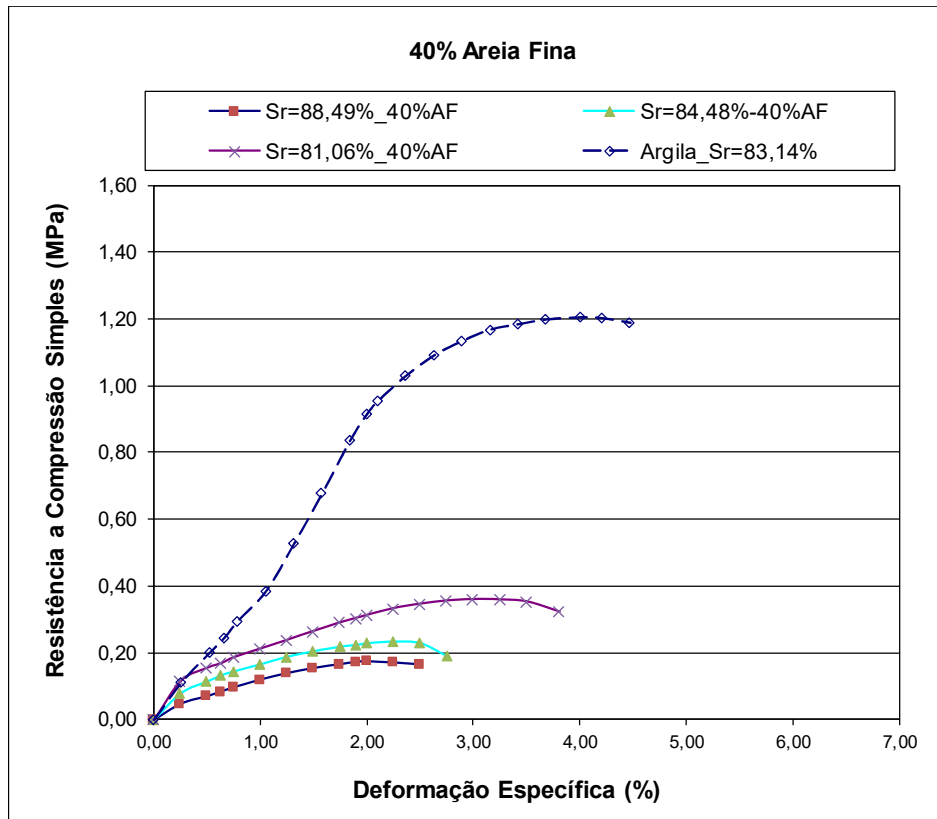


Figura 5.15: Curva tensão x deformação para 40% de areia fina.

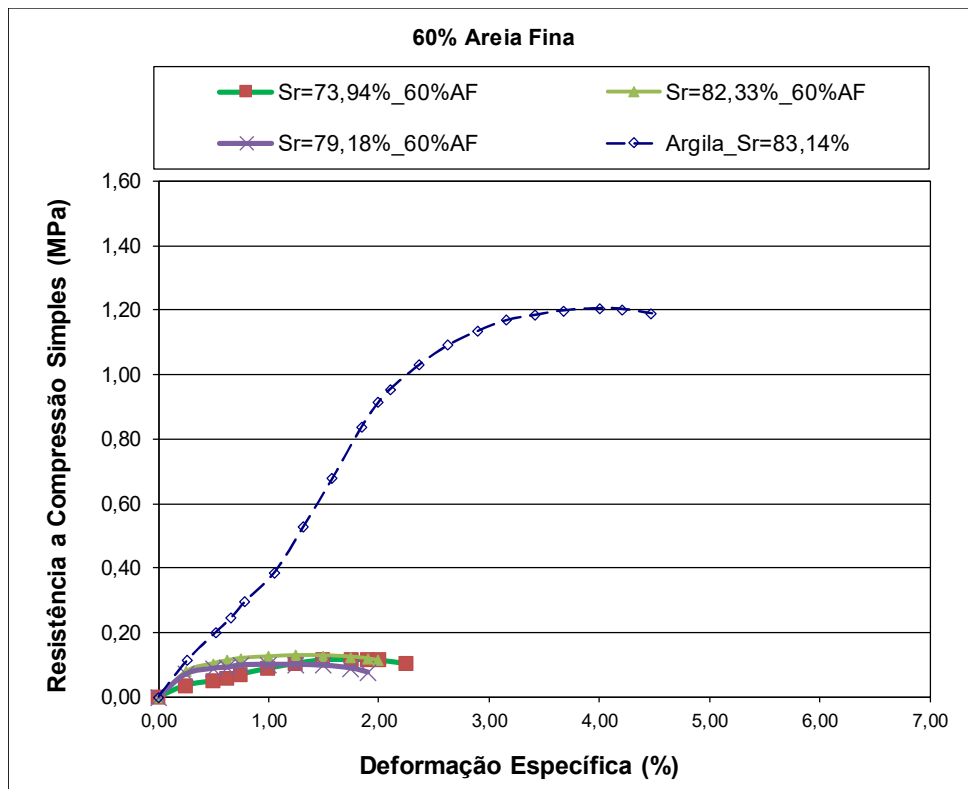


Figura 5.16: Curva tensão x deformação para 60% de areia fina.

Estas figuras mostram que, de um modo geral, a adição da areia tende a reduzir a resistência à compressão simples do solo e a diminuir a sua rigidez. Grande parte deste comportamento pode estar associado à sucção que é maior nas argilas. Esta sucção interfere diretamente na rigidez do solo como aparece nas figuras, tendo em vista que este parâmetro tende a diminuir com o aumento do grau de saturação.

Nota-se que, para o teor de 10% de areia, as amostras apresentaram-se praticamente com a mesma rigidez da amostra de argila pura, apresentando ligeiro aumento para a resistência de pico. Com o aumento do teor de areia para 20% observou-se uma maior tenacidade das amostras, mesmo para menores graus de saturação. Já para o teor de 40%, apesar da grande diferença de rigidez em comparação à amostra de argila, observa-se pequena diferença em relação à deformabilidade, porém grande redução da resistência de pico. Para 60% de areia fina, a resistência apresentou-se muito inferior à amostra de argila, sendo que a variação do grau de saturação pouco influenciou o seu comportamento quanto à resistência, mostrando a influência da predominância da fração areia, em relação à fração argila. Cabe lembrar que nas argilas predomina o fenômeno da sucção enquanto nas areias predomina o fenômeno capilar.

De maneira geral, pela execução do ensaio e os resultados obtidos, pode-se observar que:

- a sucção promoveu um aumento da resistência do solo, sendo a mesma crescente até um determinado valor, a partir do qual a resistência tende a estabilizar-se;
- o provável aparecimento de trincas de retração no solo para altos valores de sucção pode propiciar a queda nos valores de resistência como observado para as amostras com 10% e 20% de areia fina;
- das misturas analisadas, as maiores resistências foram obtidas para amostras com menores teores de areia, evidenciando a influência das maiores sucções presentes nestes solos, devido à maior porcentagem de argila presente nas misturas.

Optou-se para a continuidade do estudo fazendo-se a inclusão de fibras, por se utilizar a mistura composta por 20% de areia e 80% de solo natural (argila) cujo comportamento se apresentou mais estável se apresentou de maneira prejudicial vindo a contribuir para a interação solo-fibra, devido ao aumento do diâmetro dos grãos da mistura.

Uma vez definido o teor de areia a ser misturado nas amostras, foram realizados ensaios de compressão simples tendo em vista avaliar a influência na resistência da adição de fibras lisas

e corrugadas. Nos gráficos a seguir serão mostradas as comparações entre as amostras moldadas apenas com o solo natural (argiloso) e fibras e as amostras moldadas com a mistura de solo argiloso, 20 % de areia e fibras. Para cada combinação, foram executados os procedimentos de moldagem e umedecimento já descritos anteriormente.

As Figuras 5.17 e 5.18 apresentam os resultados obtidos para as amostras moldadas na umidade ótima, peso específico aparente se co máximo e energia Proctor normal. Nas Figuras 5.19 e 5.20 apresentam-se os resultados obtidos para as amostras moldadas na umidade ótima e umedecidas até atingir o ramo úmido e, por fim, as Figuras 5.21 e 5.22 mostram os resultados obtidos para as amostras moldadas no ramo úmido.

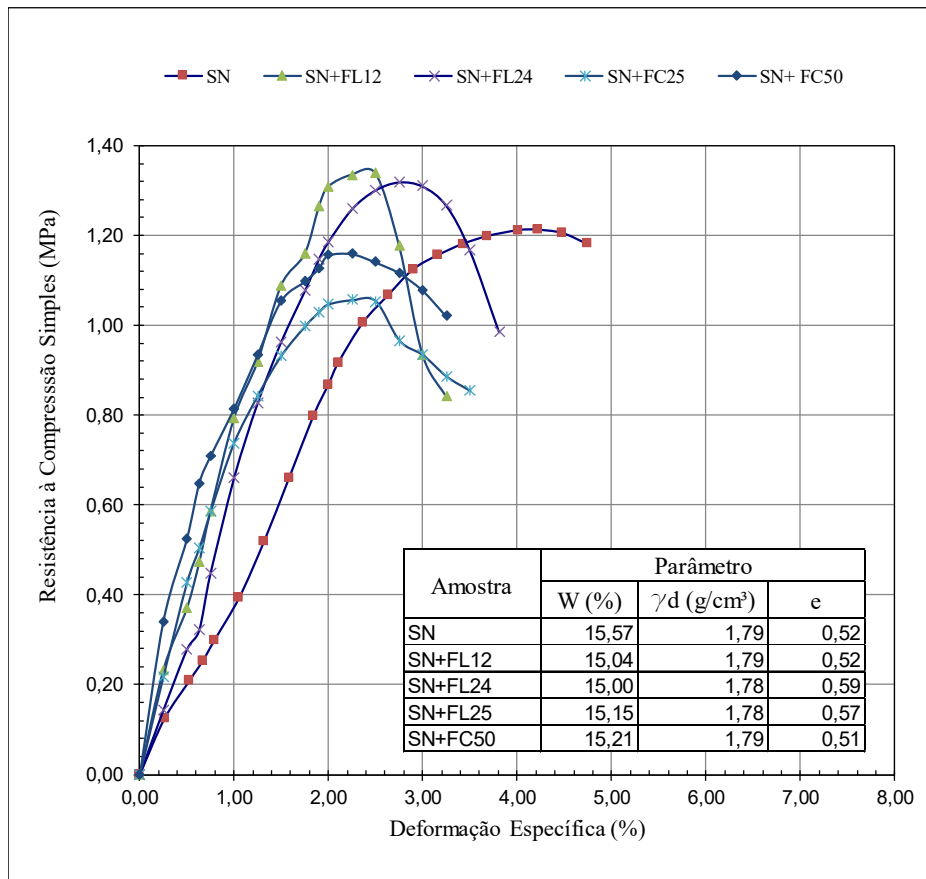


Figura 5.17: Amostras de solo natural (argila) moldadas na umidade ótima.

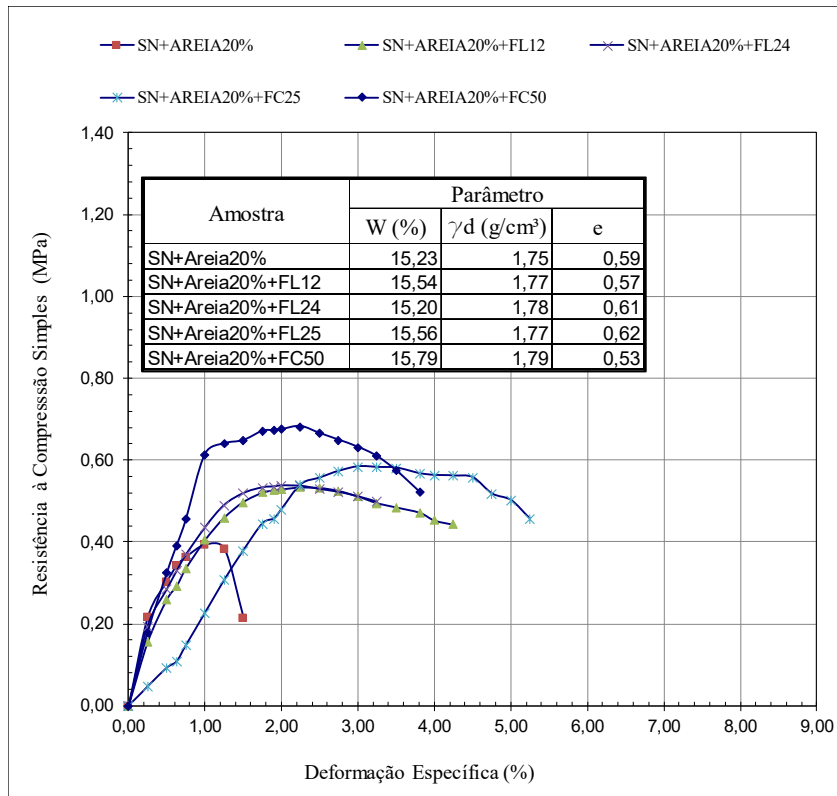


Figura 5.18: Amostras de solo natural (argila) e areia moldadas na umidade ótima.

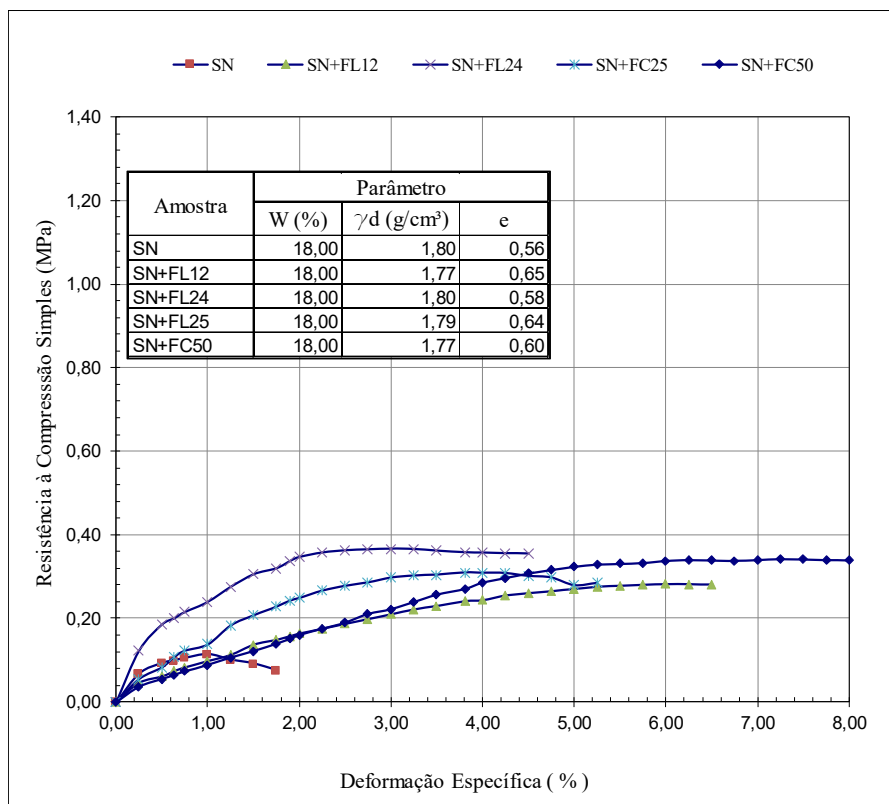


Figura 5.19: Amostras de solo natural (argila) moldadas na umidade ótima e umedecida até o ramo úmido.

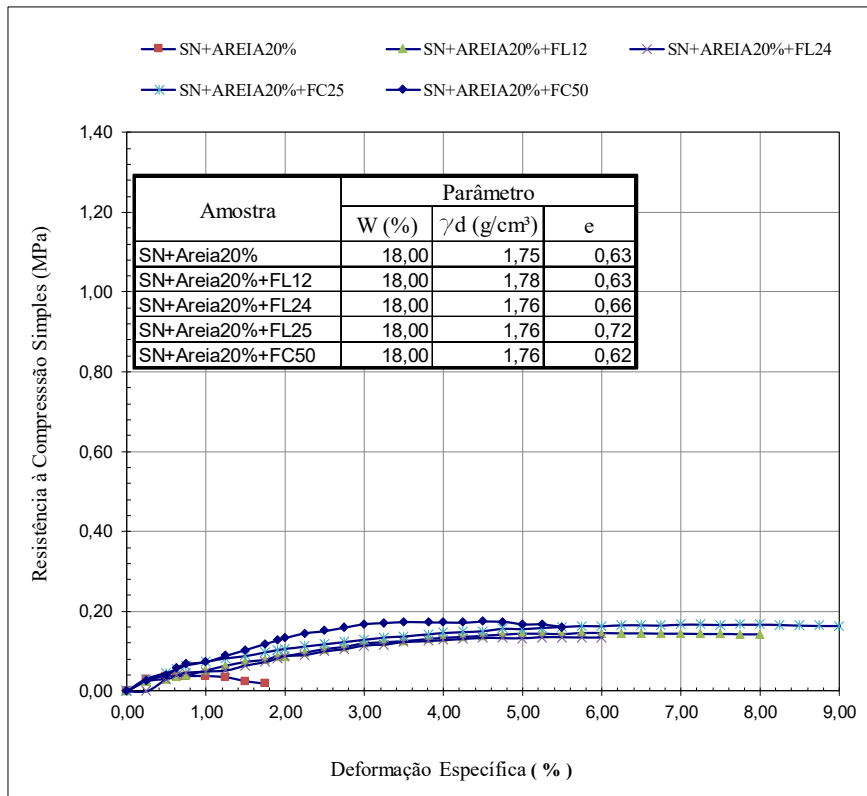


Figura 5.20: Amostras de solo natural (argila) e areia moldadas na umidade ótima e umedecidas até o ramo úmido.

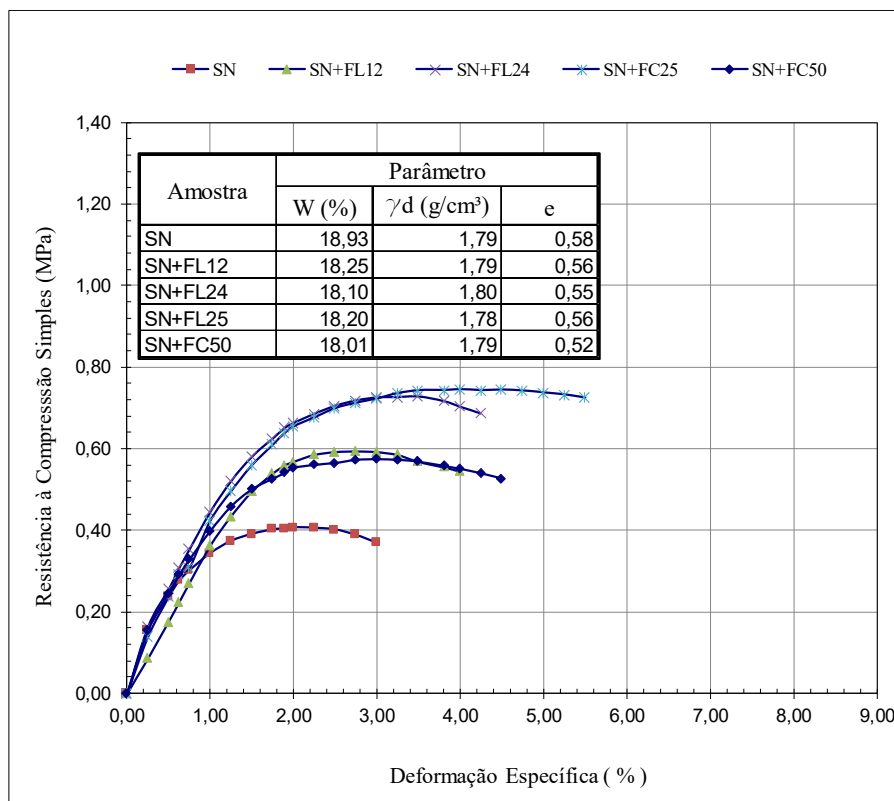


Figura 5.21: Amostras de solo natural (argila) moldadas no ramo úmido

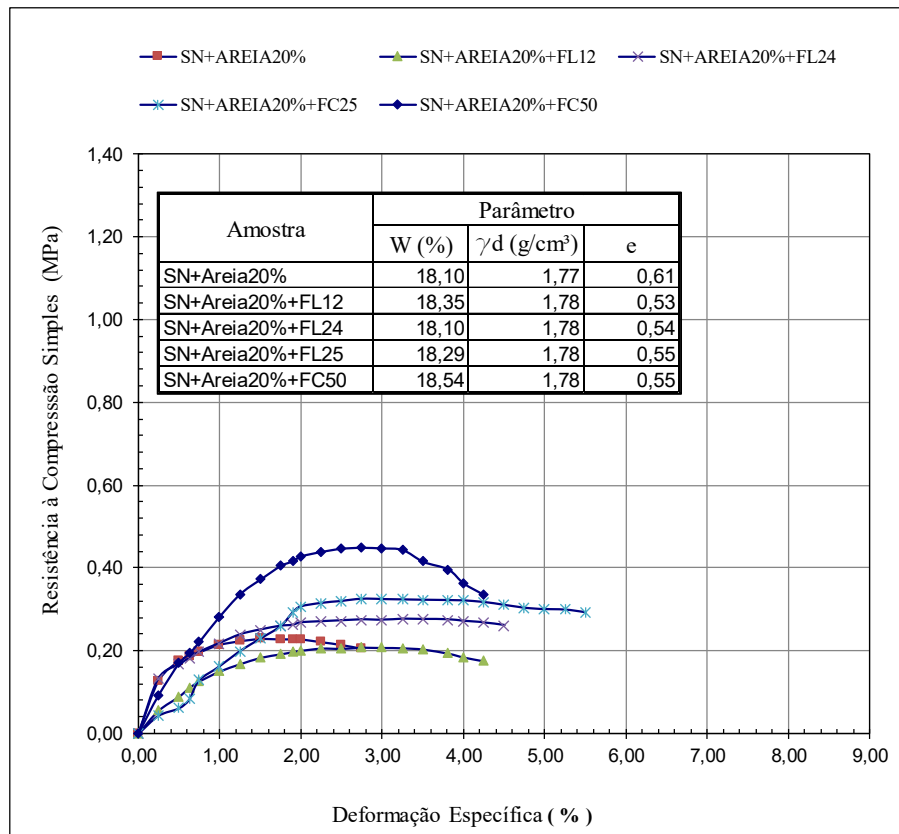


Figura 5.22: Amostras de solo natural (argila) e areia moldadas no ramo úmido

A análise dessas figuras permite as seguintes observações:

- o solo natural compactado e rompido na umidade ótima apresentou pico quando puro ou misturado às diferentes fibras. Tais picos, exceto para o solo natural, tendem a desaparecer quando da compactação na umidade ótima e umedecimento posterior e quando da compactação no ramo úmido. Este comportamento faz sobressair a grande importância da sucção para o comportamento do solo natural.
- a adição de areia provoca, como esperado, a redução da resistência não confinada. O pico, mesmo para as misturas compactadas e rompidas na umidade ótima, tende a ser menos relevante fazendo sobressair a importância da areia na redução da sucção e na maior importância da fibra para o comportamento.
- a tendência ao desaparecimento do pico nas amostras com fibra levadas ou compactadas no ramo úmido reflete a contribuição da fibra para a manutenção da resistência limite, sendo a mesma de menor influência para o solo compactado e rompido na umidade ótima.
- o comprimento e tipo de fibra mostraram-se relevantes para o comportamento dos solos compactados ou levados ao ramo úmido, sendo que as fibras corrugadas, principalmente as de 50 mm, apontam para uma maior contribuição para a resistência à compressão simples.

Notou-se que o fato de as amostras já serem moldadas no ramo úmido altera a resistência à compressão, aumentando esse valor em relação às amostras que foram moldadas na umidade ótima e umedecidas até o ramo úmido. Porém, esse valor continua inferior ao das amostras moldadas na umidade ótima. As diferenças de comportamento podem estar associadas ao próprio reflexo da condição de compactação como a diferença nos índices de vazios e/ou na sucção no momento da ruptura devendo ser melhor analisado, o que se fará na continuidade deste item. Observou-se também que o melhor comportamento apresentado foi para a fibra corrugada de 25 mm, mostrando maior resistência (Figura 5.21). Outro fato observado foi que a deformação específica diminuiu em relação às amostras que foram induzidas a saturação (Figuras 5.19 e 5.21). Para as amostras de argila verificou-se um aumento de quase o dobro na resistência a compressão em relação às amostras que sofreram indução da saturação. Para as amostras moldadas na umidade ótima, o melhor comportamento foi apresentado pelas fibras de 50 mm (Figura 5.18).

Nos resultados obtidos interferem, além do próprio solo e da condição de compactação, a porosidade e a umidade em que se encontra ou foi conduzido o corpo de prova no momento da ruptura. Para melhor evidenciar as observações supracitadas, foram então elaborados os gráficos de resistência à compressão simples x grau de saturação (%) e de resistência à compressão simples x pF/e para as amostras moldadas nas três condições anteriormente mencionadas.

A Figura 5.23 contém a síntese de todos os resultados de resistência à compressão simples em função de pF/e para as três condições de ensaios de compactação. Quando se avalia a grande dispersão de pontos para os gráficos de resistência à compressão simples do solo compactado e rompido na umidade ótima, observa-se que, a sucção e alguns parâmetros como grau de saturação e índice de vazios, quando tratados separadamente, não permitem traduzir a real contribuição das fibras para o comportamento mecânico do solo. Isso se deve ao fato de que, com a introdução de novos materiais como areia e fibra, há uma alteração física no solo assim como na curva característica, uma vez que modificam o índice de vazios. Porém, quando da análise considerando-se conjuntamente a sucção e o índice de vazios, gráficos da resistência à compressão simples em função de pF/e , sobressai claramente que apenas as fibras de comprimento 24 mm e 25 mm estão efetivamente contribuindo, e contribuindo de modo significativo para a resistência à compressão simples do solo natural e da mistura solo natural-areia na umidade de compactação correspondente. É importante destacar que o uso da areia, no

caso da fibra lisa de 24 mm, não apresenta a mesma contribuição para a resistência que nos demais casos.

Verifica-se, ainda na Figura 5.23, que os resultados tendem a seguir comportamento globalmente melhor definido. De modo a facilitar a análise plotou-se uma linha pontilhada unindo os pontos obtidos para os solos sem incorporação de fibras. Considerando-se esta linha, verifica-se que a contribuição positiva das fibras para a resistência à compressão simples das misturas é mais evidente para valores de pF/e inferiores a 6,5, ou seja, para menores valores de sucção ou maiores valores de índice de vazios. Para valores desta relação superiores a 6,5 tende a predominar o efeito da sucção e /ou do índice de vazios sendo que em alguns casos a incorporação das fibras refletiu negativamente no comportamento do solo. Nesse sentido, destaca-se que as fibras com 12 mm e 50 mm foram as que mais contribuíram para a piora do comportamento. É importante destacar nesta figura o enquadramento da grande maioria das misturas em uma tendência única de comportamento da resistência em função de pF/e , fazendo sobressair assim, a importância deste modelo de análise do comportamento mecânico proposto por Camapum de Carvalho e Pereira (2002) no estudo e entendimento do comportamento dos solos não saturados.

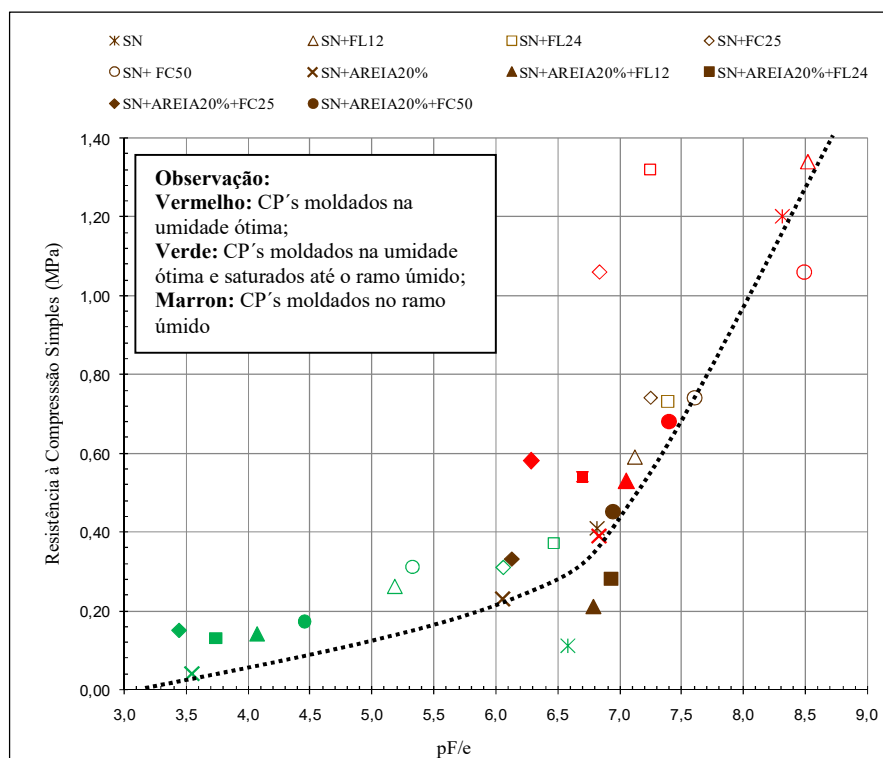


Figura 5.23: Três condições de ensaio estudadas para análise de pF/e .

Um dos aspectos positivos da incorporação de fibras ao solo tem sido o de possibilitar maiores deformações antes que o solo se rompa. A Figura 5.25 apresenta as deformações correspondentes à resistência máxima obtidas para o conjunto de ensaios realizados em função de pF/e . Para facilitar a análise delimitou-se os comportamentos referentes ao solo natural e solo natural mais areia. Invariavelmente as misturas com fibra passaram a suportar maiores deformações de ruptura que o solo natural, no entanto, a melhoria foi mais significativa para valores de pF/e inferiores a 6,5, limite este semelhante ao observado no que diz respeito à melhoria da resistência à compressão simples.

Interessante observar que, em relação à resistência, os que apresentaram melhor comportamento foram os moldados na ótima. Já em relação à deformação, são aqueles moldados na ótima e aqueles moldados no ramo úmido, que apresentaram as menores deformações. Tal variabilidade de comportamento é complexa de ser administrada em campo; no entanto, pode indicar que a compactação no ramo úmido não seria problema com a incorporação de fibras, o que é torna este fato muito importante, tendo em vista que a compactação por vezes ocorre no ramo úmido.

Segundo as análises apresentadas por Camapum de Carvalho e Guimarães (2002) e Camapum de Carvalho *et al.* (2002), o comportamento mecânico é respectivamente proporcional a $(pF \times e)$ ou a pF/e se o parâmetro aumenta ou diminui com o aumento do índice de vazios. No presente caso, a deformação correspondente à ruptura para uma mesma sucção presente no solo tende a aumentar com o aumento do índice de vazios e o apropriado seria, portanto, plotar os resultados de deformação em função de $(pF \times e)$. No entanto, para efeito de comparação com o gráfico relativo às variações de resistência apresentou-se inicialmente o gráfico em termos de pF/e .

Na Figura 5.25 apresenta as deformações correspondentes à resistência máxima em função de pF/e obtidas para o conjunto de ensaios realizados. Verifica-se nessa figura que as maiores deformações específicas ocorrem para o solo compactado na umidade ótima e umedecido o que aponta para o fato de que o umedecimento gerou a expansão do solo permitindo a maior deformação até que fosse atingida a ruptura. O mais relevante, no entanto, é o fato de que a incorporação das fibras permite maiores deformações do solo até que se atinja a sua ruptura.

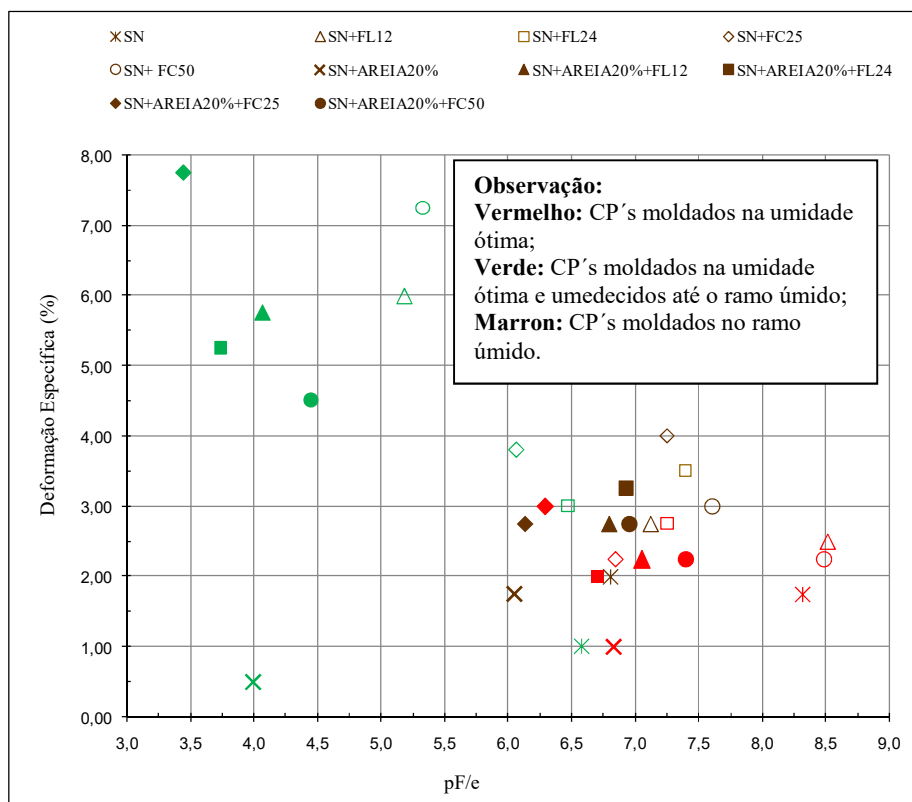


Figura 5.24: Deformações correspondentes à resistência máxima para as três condições de ensaio estudadas.

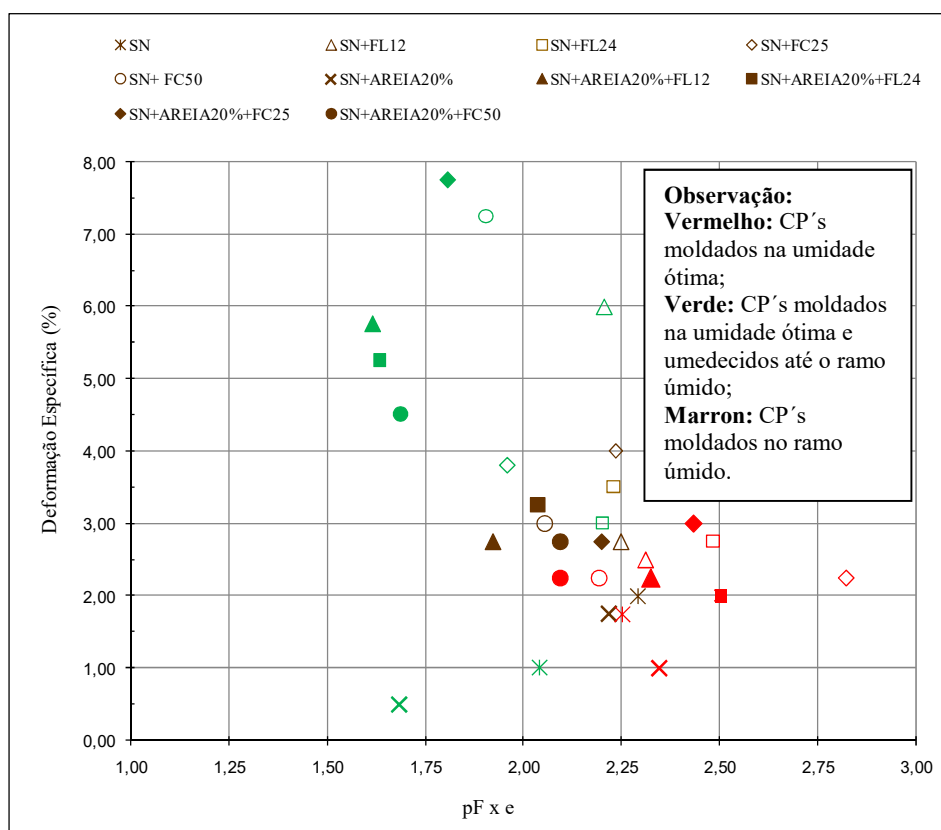


Figura 5.25: Gráfico das deformações correspondentes à ruptura em função de (pF x e).

5.1.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Destaca-se, que em termos experimentais, que todos os corpos de prova foram compactados aproximadamente na mesma umidade (umidade ótima) e sempre com a mesma energia (Proctor normal). Embora a energia de compactação seja a mesma, a inclusão das fibras termina alterando o índice de vazios de compactação, corroborando com os estudos de Hoare (1979) *apud* Caldeira (2012), Heinech (2002), Bento (2006). Observou-se que a influência na compactação é comandada pela interação entre o solo e o reforço, tendo atenção para os aspectos como granulometria do solo, a forma das partículas, a textura e a área superficial do reforço.

As Figuras 5.26 e 5.27 mostram os resultados de resistência à tração calculados a partir dos ensaios de compressão diametral em função da umidade e de pF/e , respectivamente, para a adição de fibras lisas, sem e com adição de areia. Na Figura 5.26, quando observado o comportamento do solo natural, verifica-se que a resistência à tração é maior do que a do solo com adição de areia, apresentando um pico de aproximadamente 160kPa para uma umidade de cerca de 13%. Já para o solo natural com adição de areia, observa-se um pico de resistência à tração de aproximadamente 70kPa, atingindo, assim, menos da metade da resistência à tração do solo natural. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de os solos apresentarem, com a diminuição do teor de argila, menor coesão e menor sucção, o que reflete diretamente no comportamento relativo à resistência à tração.

Em relação aos ensaios com adição de fibras lisas, ainda na mesma figura supracitada, verifica-se que, enquanto para o solo natural só ocorreu melhoria do comportamento com a adição de fibras lisas para umidades superiores a 13%, para as misturas solo-areia ocorreu melhoria para todos os casos.

Destaca-se ainda, que enquanto para o solo natural não ficou clara a importância do comprimento das fibras, para as misturas com areia, a fibra de 24 mm, de maneira geral, tendeu a apresentar comportamento melhor que a de 12 mm. Entretanto verifica-se que, em torno da umidade de 11%, a mistura com a fibra de 12 mm apresenta melhor comportamento que a fibra de 24 mm e já atinge seu pico de resistência enquanto que, para a fibra de 24 mm, sua resistência ainda encontra-se crescente e, mesmo com o aumento da umidade, ainda pode mobilizar mais resistência. Este fato pode ser explicado pela maior atuação das fibras, conferindo ao material

uma maior resistência mesmo quando a sucção pode atuar de maneira mais discreta, em função do aumento da umidade e sua consequente redução.

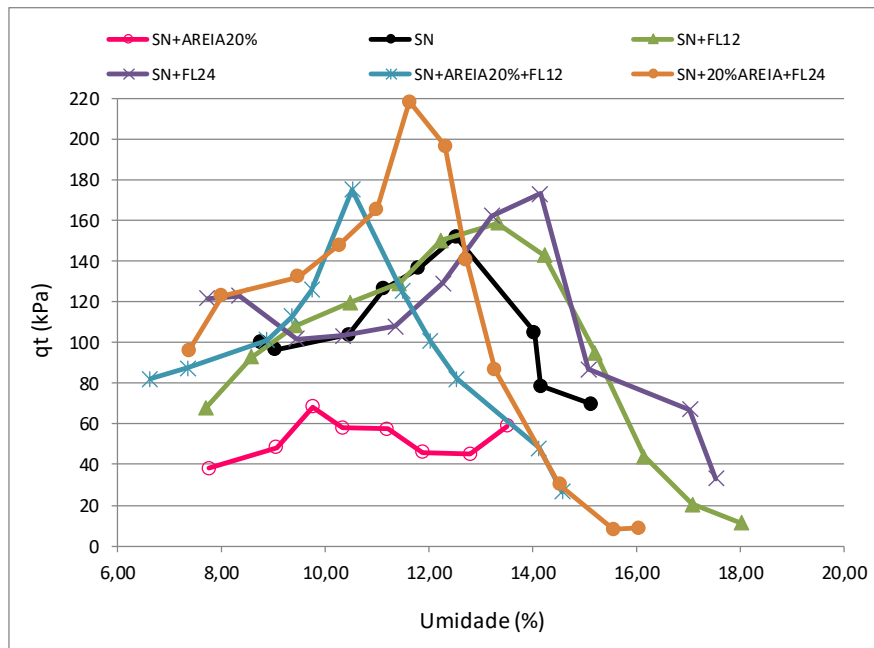


Figura 5.26: Resultados de resistência a tração (q_t) em função da umidade para as amostras com adição de fibras lisas.

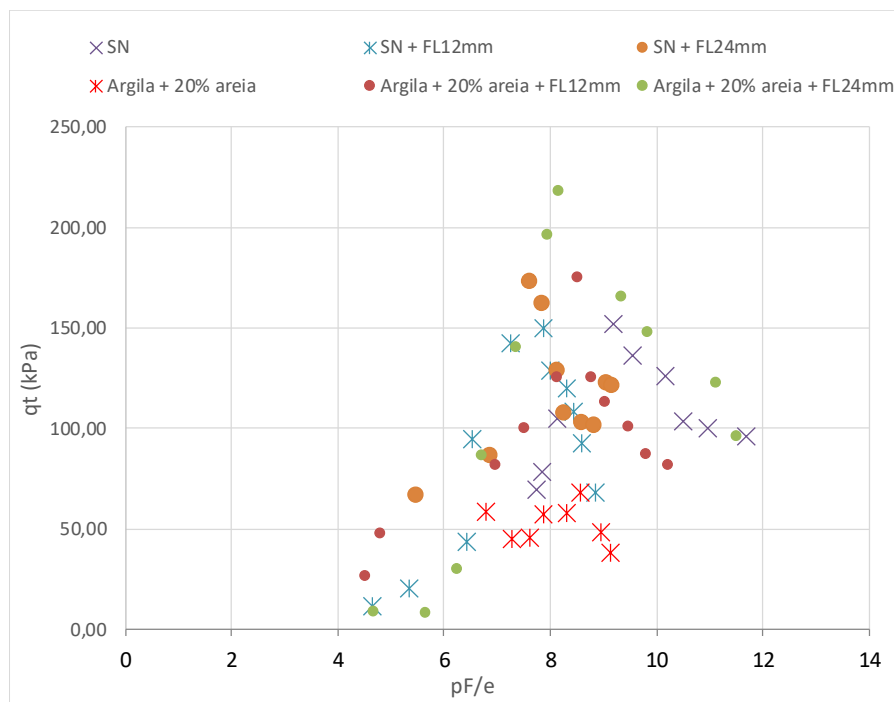


Figura 5.27: Resultados de resistência a tração (q_t) em função de pF/e para as amostras com adição de fibras lisas.

As Figuras 5.28 e 5.29 mostram os resultados de resistência à tração calculados a partir dos ensaios de compressão diametral em função da umidade e de pF/e , respectivamente, para a adição de fibras corrugadas. Verificou-se, destes resultados, que enquanto para o solo natural só ocorreu melhoria do comportamento com a adição de fibras corrugadas para umidades inferiores a 13%, para as misturas solo-areia ocorreu melhoria para todos os casos. Verificou-se, portanto, comparando-se as Figuras 5.26 e 5.27 que no solo sem incorporação de areia o comportamento quanto à influência do tipo de fibra se inverte, ou seja, enquanto para as fibras lisas o comportamento era melhor para valores de umidade superiores a 13% para as fibras corrugadas a melhoria se dá para umidades inferiores a este patamar.

Ressalta-se ainda que, enquanto para o solo natural a incorporação de fibras corrugadas com tamanho de 50 mm foi melhor para os menores teores de umidade invertendo-se com as de 25 mm para os maiores teores de umidade, nas misturas contendo areia este comportamento apresentou tendência a ser o contrário. Observa-se também que a contribuição da fibra, para as misturas com areia foi muito mais pronunciada do que para as misturas com solo natural, apresentando maiores valores de resistência à tração.

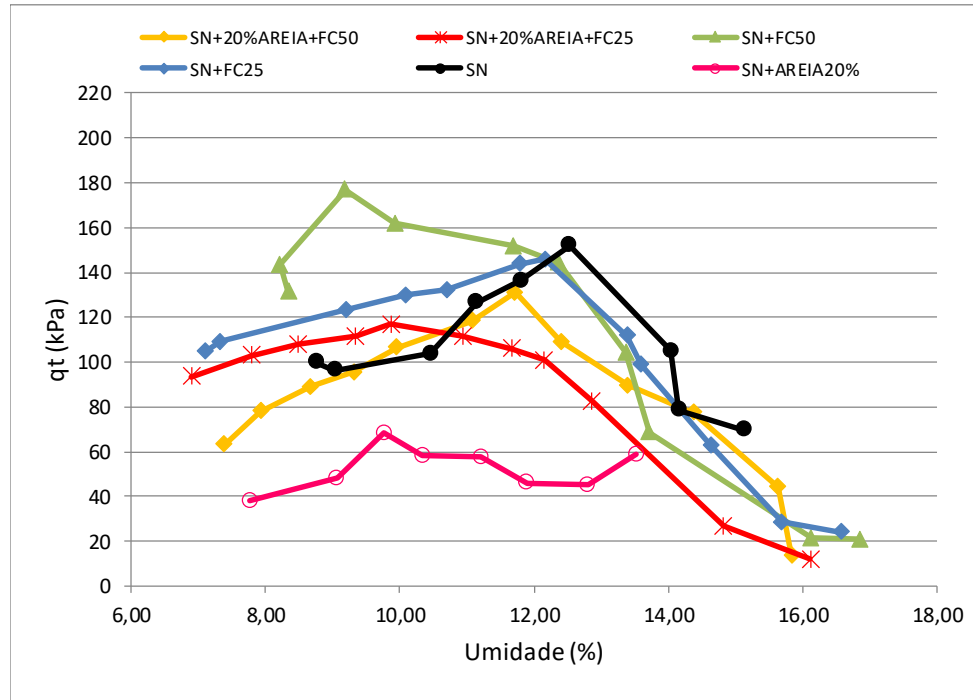


Figura 5.28: Resultados de resistência a tração (q_t) em função da umidade para amostras com adição de fibras corrugadas.

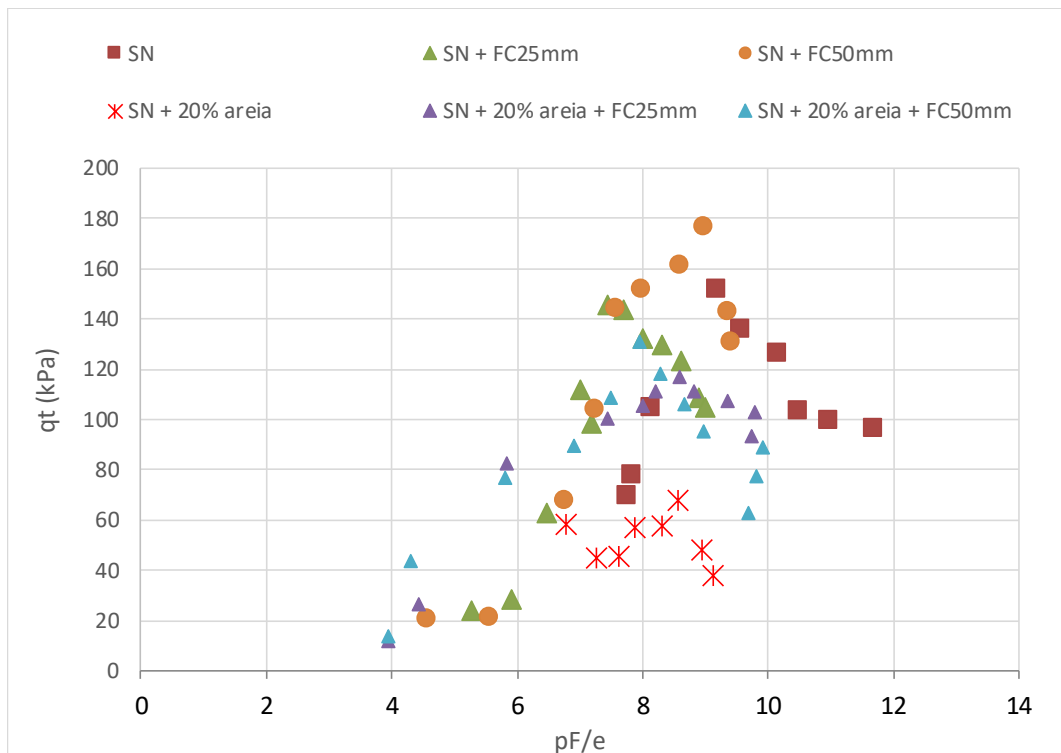


Figura 5.29: Resultados de resistência a tração (qt) em função da umidade para amostras com adição de fibras corrugadas.

Nos ensaios de resistência à tração observaram-se duas características relevantes para o comportamento dos solos em pavimentação: a incorporação das fibras aumentou a ductibilidade e a resistência residual. Isso indica que mesmo após a ruptura da matriz de solo as fibras continuam contribuindo para a resistência à tração do solo. Segundo Aguiar *et al.* (2009), este mesmo fenômeno foi encontrado nas amostras ensaiadas com fios de cabelo, ressaltando que, do ponto de vista prático, essa é uma característica muito relevante, pois garante a resistência a tração última para maiores deformações.

Em relação ao tipo de fibra, destaca-se que este fenômeno ocorreu apenas com as fibras corrugadas, não sendo relevante para as fibras lisas. Isso pode ser explicado pelo fato da rugosidade presente nas fibras corrugadas oferecer um maior travamento com as partículas de solo.

Observou-se, também, que a resistência à tração última foi maior para as amostras confeccionadas com a mistura de areia do que para as amostras que continham apenas solo natural, sendo dentro deste grupo o comportamento mais expressivo obtido para as FC25 (Figura 5.30). Portanto, é provável que para as misturas de solo natural e areia com FC25 há

um ganho maior de resistência à tração devido à interação do conjunto, o que não foi verificado para as fibras FC50, provavelmente devido ao seu tamanho em relação às amostras moldadas, o que dificultou sua homogeneização dentro da massa de solo (Figuras 5.31 e 5.32).

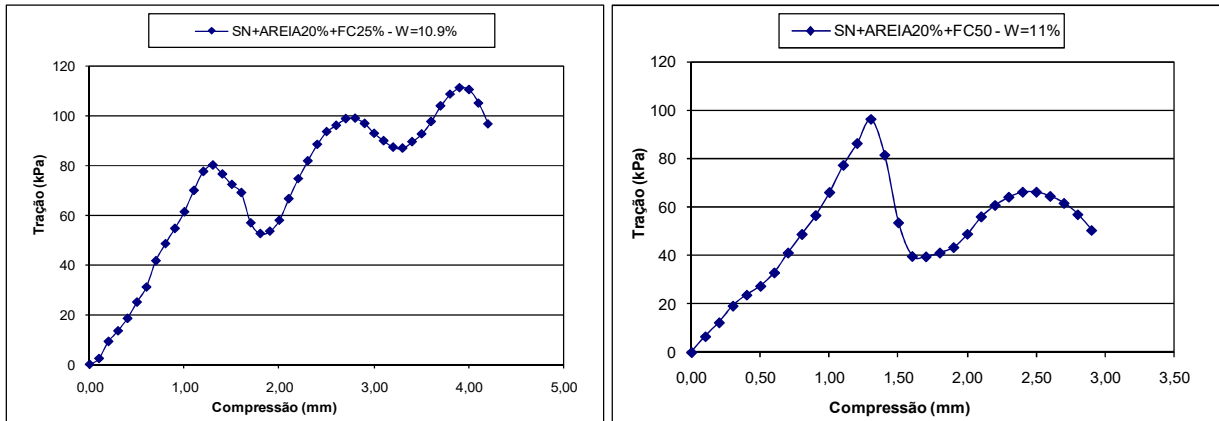


Figura 5.30: Picos de resistência à tração para amostras de solo natural com adição de areia e fibras corrugadas

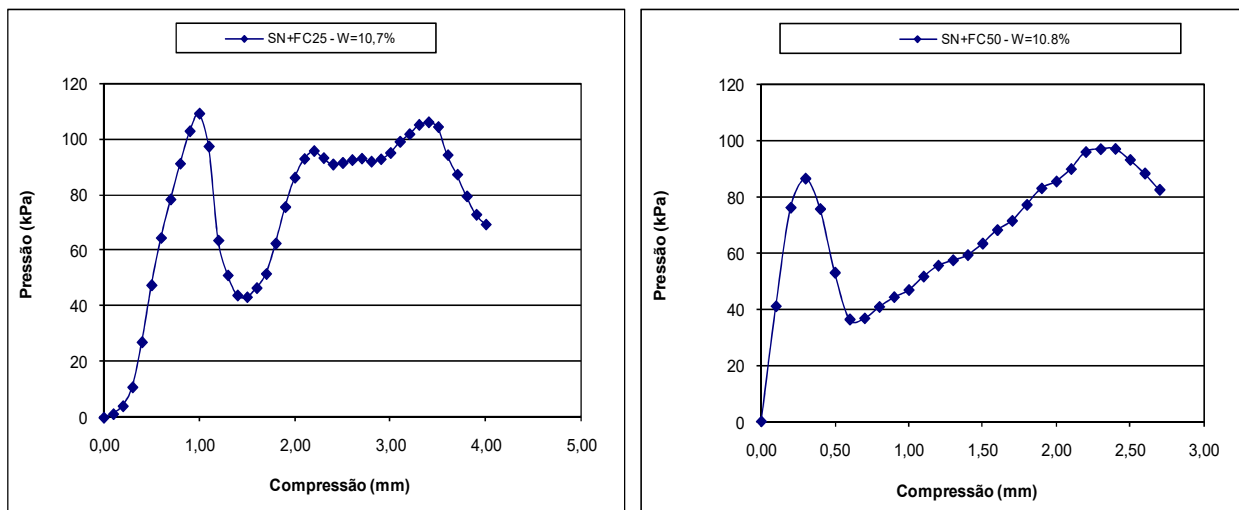


Figura 5.31: Picos de resistência à tração para amostras de solo natural com fibras corrugadas.

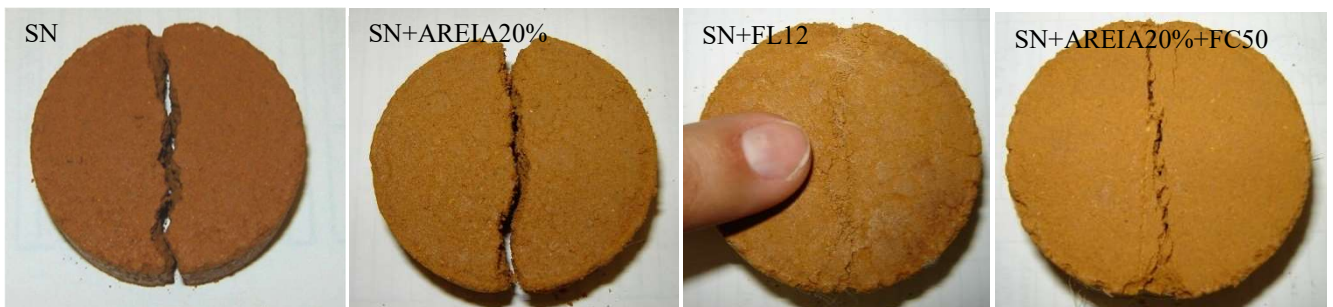


Figura 5.32: Alguns exemplos de amostras ensaiadas após a ruptura.

5.2 ENSAIOS NA FRANÇA

5.2.1 ENSAIOS COM MATERIAIS ALTERNATIVOS

Os resultados a seguir se referem aos ensaios realizados com a espuma, a fim de caracterizá-la quanto à sua capacidade de suporte, bem como os ensaios com areia e os alvéolos preenchidos de areia. A fim de simplificar a legenda foram adotadas as seguintes nomenclaturas:

- EF: espuma flexível
- ER: espuma rígida
- ALV: alvéolos de 25 mm de altura
- ALV50: alvéolos de 50 mm de altura
- AREIA: camada de areia de 50 mm de altura
- AREIA100: camada de areia de 100 mm de altura

A Figura 5.33 mostra os resultados dos ensaios de solicitação axial obtidos para os dois tipos de espuma utilizados.

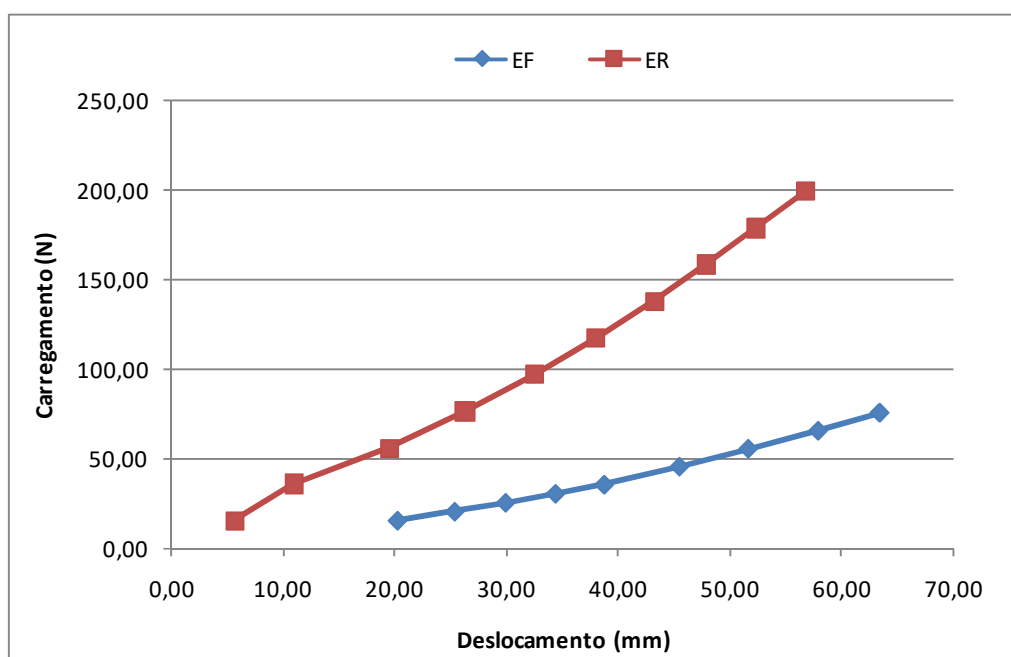


Figura 5.33: Resultado dos ensaios para as duas espumas utilizadas.

Foi analisado separadamente o comportamento das duas espumas escolhidas, a fim de poder avaliar a suas contribuições ou não após a colocação do reforço sobre as mesmas. Para os ensaios realizados, a espuma representa qualitativamente o solo encontrado na região, ou seja,

baixa capacidade de suporte e muito deformável. Observou-se que, de maneira geral, a espuma rígida apresentou um melhor comportamento, mostrando menores deslocamentos para um mesmo carregamento. Ao analisar, sobretudo, a colocação dos alvéolos sobre a espuma flexível, é importante observar se os mesmos contribuíram positivamente para o aumento da sua capacidade de carga, o que será analisado nos gráficos que se seguem.

As Figuras 5.34 e 5.35 representam os ensaios realizados para a espuma rígida e flexível respectivamente, com a colocação de uma camada de areia sobre as mesmas. Primeiramente será avaliada a camada de areia de 50 mm juntamente com os alvéolos de 25 mm. Quando se refere aos alvéolos entenda-se que a referência é a eles preenchidos com a mesma areia utilizada no experimento apenas com areia sobre a espuma. Ainda em relação aos alvéolos de papel, os mesmos foram confeccionados tendo um círculo inscrito de 5 cm de diâmetro, correspondendo a uma área de 2500 mm². O pistão utilizado no ensaio possuía diâmetro igual a 50 mm, totalizando uma área igual a 1.963 mm² e perfazendo, portanto, uma relação de 0,7 entre as áreas em questão, conforme mostra a Figura 5.36.

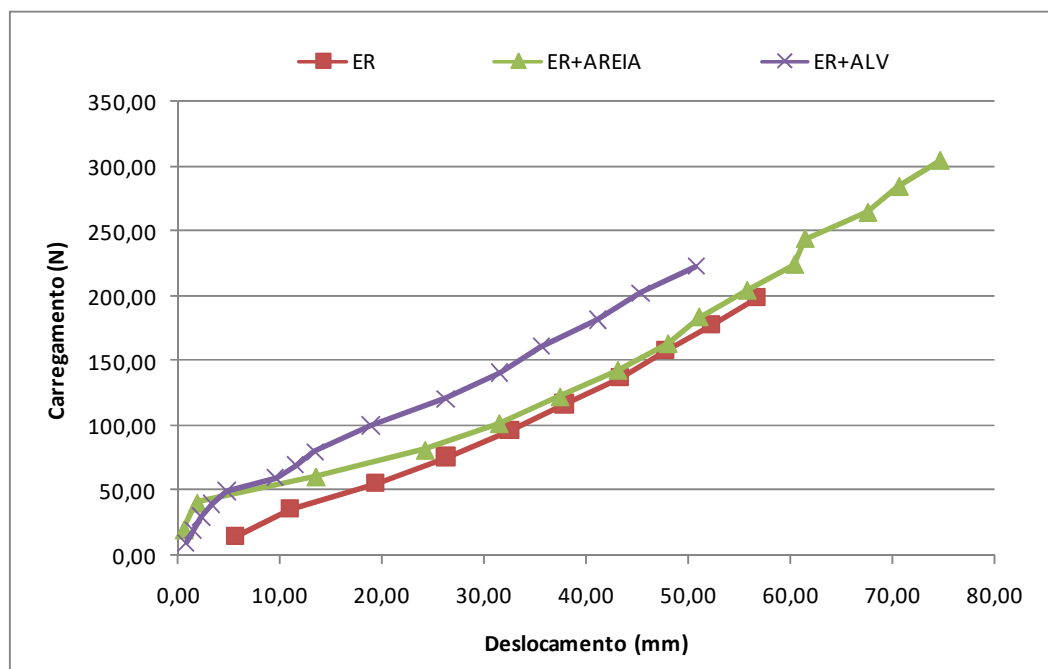


Figura 5.34: Ensaios para a espuma rígida com camada de areia de 50 mm e camada de alvéolos de 25 mm.

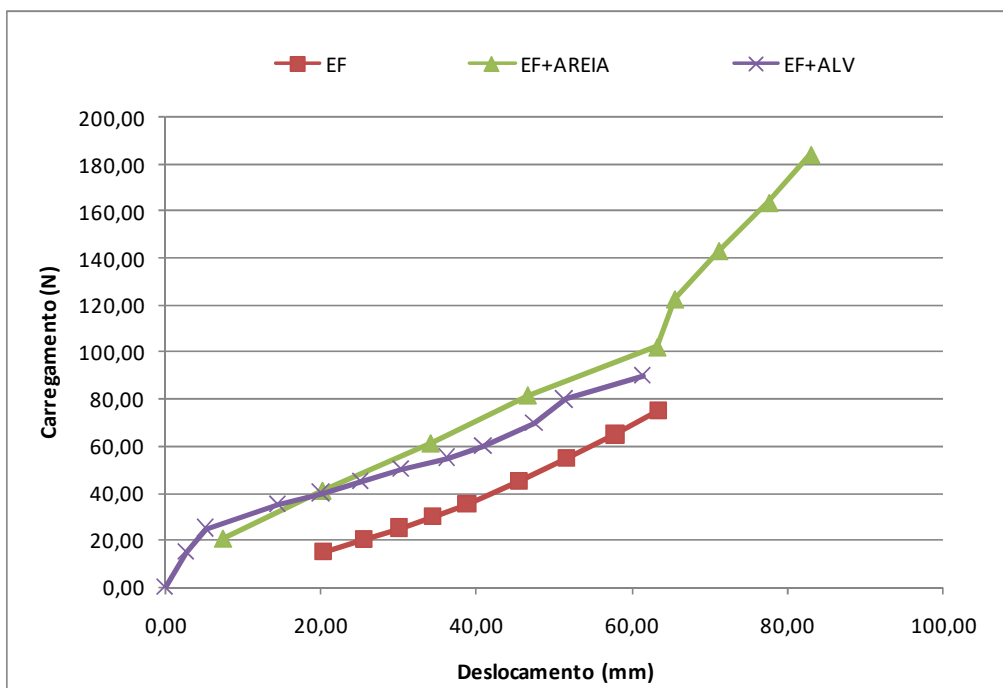


Figura 5.35: Ensaio para a espuma flexível com camada de areia de 50 mm e camada de alvéolos de 25 mm.



Figura 5.36: Detalhe do pistão de carregamento e alvéolos em papel.

Na Figura 5.34, obtida para a espuma rígida, observou-se que, quando da colocação da camada de areia ocorre um ganho inicial de resistência, ganho este perdido com o aumento da carga imposta ao sistema areia-espuma. Este ganho torna-se praticamente inexistente a partir do deslocamento vertical de 25 mm correspondente a um carregamento de aproximadamente 70

N, quando os comportamentos se tornam semelhantes, ou seja, apresentam o mesmo deslocamento para uma mesma carga aplicada.

Com a colocação dos alvéolos, é nítida a melhora do comportamento para os carregamentos a partir de 50 N e aproximadamente 5 mm de deslocamento, sendo que até esta carga os alvéolos e a camada de areia apresentaram comportamento semelhante. A curva obtida para o alvéolo se situa aproximadamente paralela à da espuma e a partir de um certo momento à da espuma com areia. Isso mostra a atuação positiva dos alvéolos suportando parte da carga aplicada sem transferi-las verticalmente para a espuma. Assim, por exemplo, enquanto o conjunto areia-espuma deslocou-se aproximadamente 32 mm para a carga de 100 N, para esta mesma carga, o sistema espuma-areia-alvéolo deslocou-se aproximadamente 19 mm. Nessas análises dos sistemas areia-espuma e areia-espuma-alvéolo é necessário que se considere ainda que a areia no primeiro sistema tinha 50 mm de espessura e o alvéolo no segundo tinha apenas 25 mm, ou seja, considerando-se este aspecto pode-se imaginar uma ampliação do ganho oriundo da presença dos alvéolos.

Em relação à espuma flexível, observa-se na Figura 5.35, um ganho de resistência devido à presença da camada de areia sobre a camada de espuma. Este ganho tende no caso da espuma flexível a superar o ganho oriundo da presença do alvéolo após um deslocamento de aproximadamente 20mm. Este fato pode ser explicado devido à contaminação da espuma pelo solo no momento do carregamento, fazendo com que o mesmo penetrasse nos orifícios da espuma mascarando os resultados. Verificou-se que para um carregamento de 30 N a tendência era de uma melhora no comportamento, quando, a partir desse ponto, observou-se um decréscimo da resistência dos alvéolos. Chama-se, no entanto, a atenção para o fato da espessura da camada contendo os alvéolos ser apenas a metade da espessura da camada de areia sem os mesmos.

Em virtude do comportamento apresentado pela espuma flexível, devido à contaminação da mesma pelo solo, foram realizados ensaios com uma película separadora colocada entre a espuma e o material ensaiado na camada superior, a fim de evitar a contaminação do material de suporte (Figuras 5.37 a 5.40).

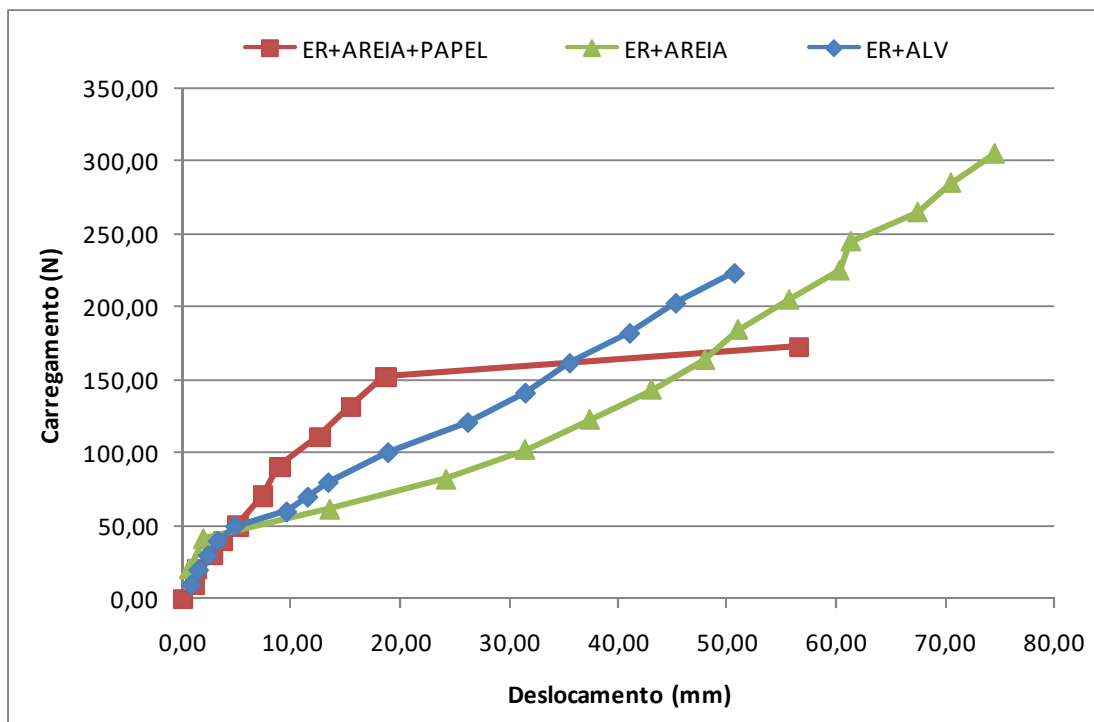


Figura 5.37: Ensaios realizados para espuma rígida utilizando papel como separador entre as camadas ensaiadas.

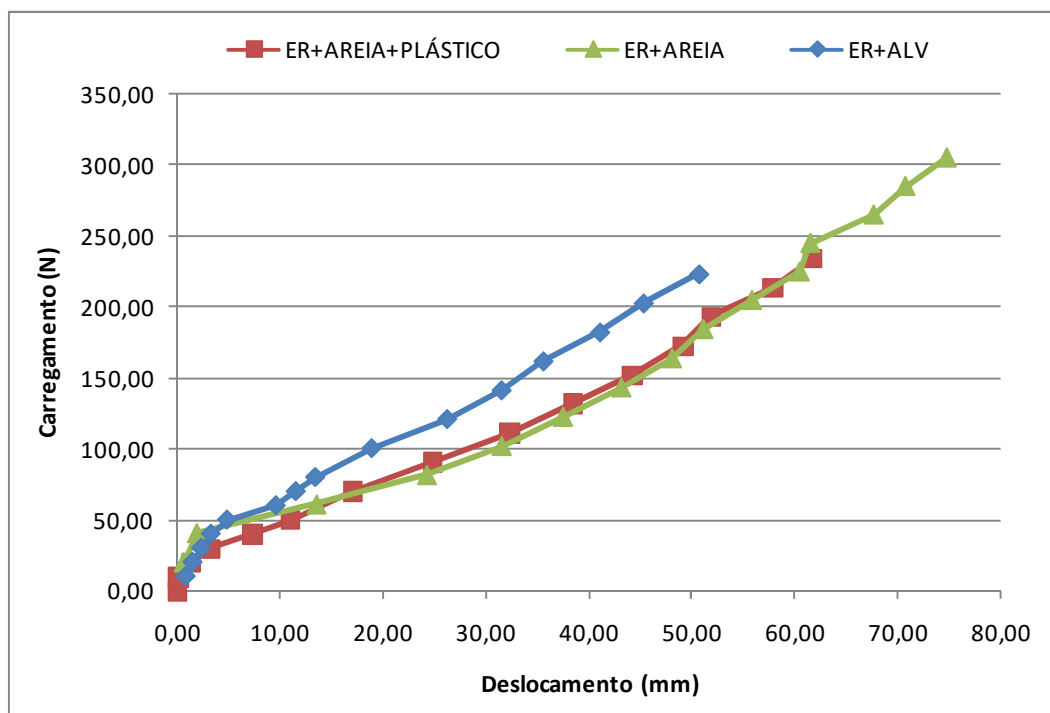


Figura 5.38: Ensaios realizados para espuma rígida utilizando plástico como separador entre as camadas ensaiadas.

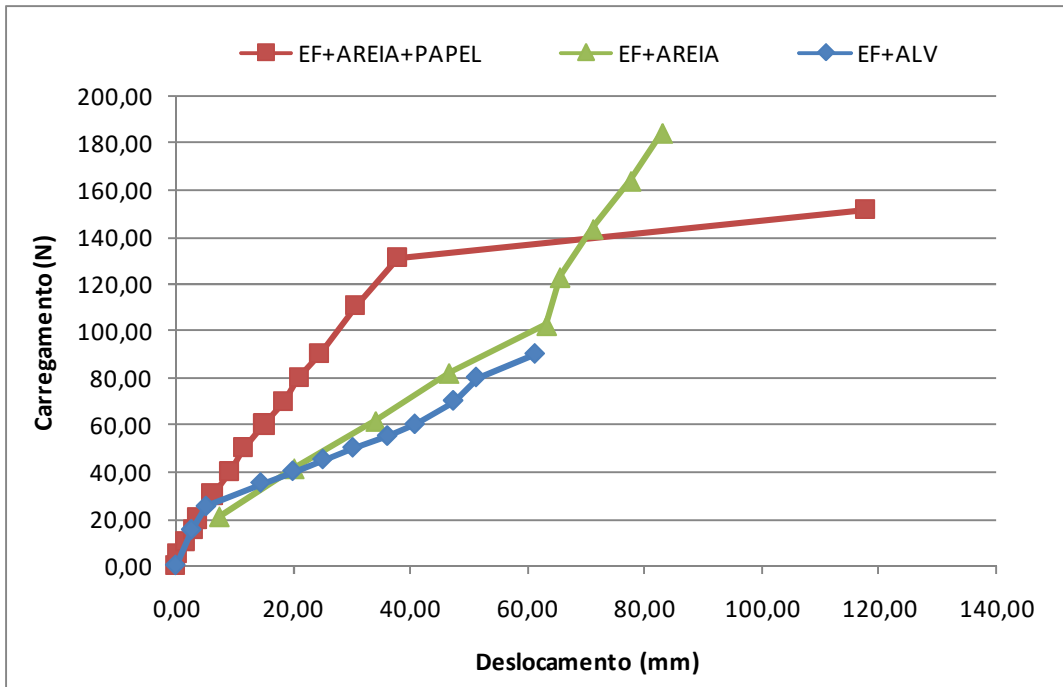


Figura 5.39: Ensaios realizados para espuma flexível utilizando papel como separador entre as camadas ensaiadas.

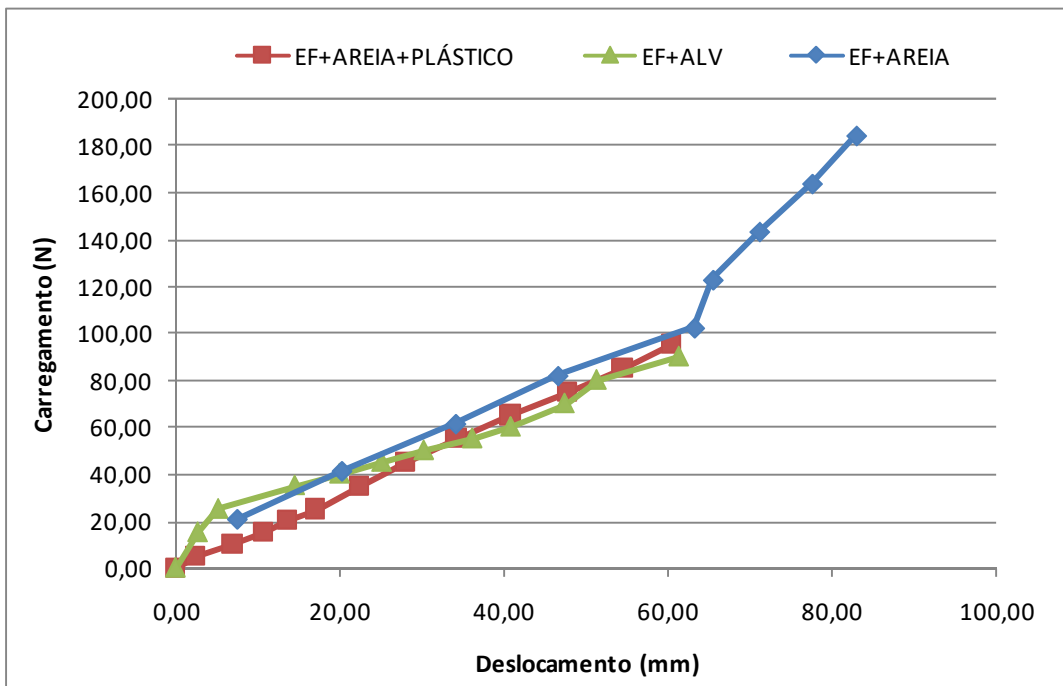


Figura 5.40: Ensaios realizados para espuma flexível utilizando plástico como separador entre as camadas ensaiadas.

Estes ensaios foram realizados utilizando plástico e papel de gramatura 80g/m², que foram colocados entre a espuma e a camada de areia. A princípio a escolha desses dois materiais se deveu ao fato de ensaiar um material rígido e outro mais flexível.

Analisando o papel, de maneira geral, tanto para a espuma rígida como para a espuma flexível, observa-se um ganho de resistência em relação à camada de areia com posterior ruptura abrupta. Para o plástico houve uma piora do comportamento na fase inicial do ensaio. Observa-se que, quando da utilização do papel, os ensaios mostraram uma ruptura brusca do material, ocasionando a ausência de medições de deslocamento até a ruptura do papel (Figuras 5.37 e 5.39). Entretanto, isso não foi observado com a utilização do plástico, que, devido ao fato de ser mais flexível que o papel, suporta melhor os esforços sem se romper bruscamente (Figuras 5.40 e 5.38).

A fim de aumentar a altura de contribuição da camada de alvéolos, foram efetuados os ensaios com alvéolos de altura igual a 50 mm, mantendo o mesmo círculo inscrito de 50 mm. Analogamente aos ensaios mostrados anteriormente, devido ao aumento da altura dos alvéolos, os ensaios realizados apenas com a camada de areia foram efetuados com uma altura de 100 mm em lugar de 50 mm, guardando a proporção entre o reforço e uma camada de areia equivalente descrita em Racana (2002) e Reffeisteck (1996). As Figuras 5.41 e 5.42 apresentam os resultados desses ensaios. Nestes ensaios não houve a colocação dos filmes separadores de papel ou plástico.

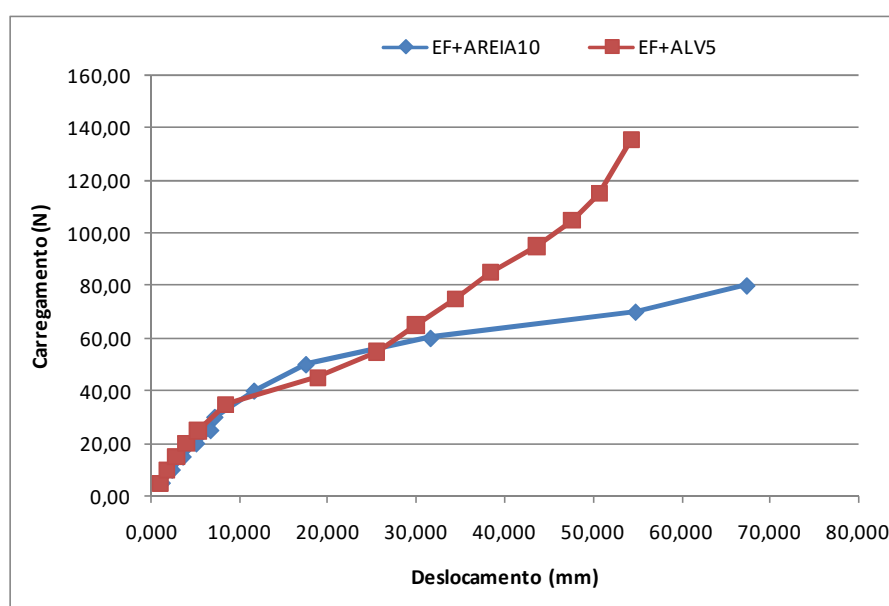


Figura 5.41: Ensaios executados com espuma flexível e alvéolos com 50 mm de altura.

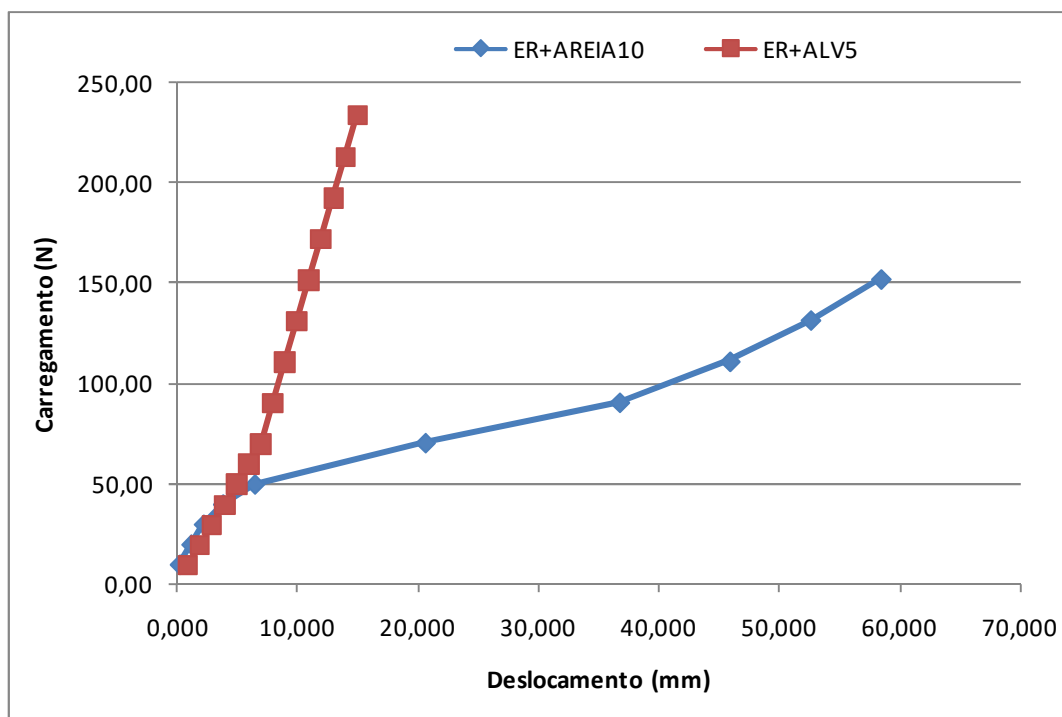


Figura 5.42: Ensaios executados com espuma rígida e alvéolos com 50 mm de altura.

Para a espuma flexível observou-se que até o carregamento de 57 N (aproximadamente 25 mm de deslocamento) os comportamentos são semelhantes, tanto para a camada de areia de 100 mm como para a camada de alvéolos de 50 mm de altura. Porém a partir deste carregamento, observa-se a plastificação da estrutura com areia, alcançando grandes deslocamentos para pequenos carregamentos. Já em relação aos alvéolos, observou-se justamente o contrário, ou seja, tem-se início à plastificação da estrutura para um deslocamento de aproximadamente 8 mm, mas em seguida, a partir do deslocamento de 17 mm o sistema volta a trabalhar eliminando-se a plastificação da estrutura. Evidencia-se, assim, o efeito dos alvéolos em retardar a ruptura da areia, transferindo para os mesmos os esforços de tração na areia. Isso ocorre até que os alvéolos não suportem e ocorra a sua ruptura. Vale destacar que, para o deslocamento máximo suportado pelos alvéolos, há um ganho de resistência de 100% em relação à camada de areia sem alvéolos, apesar de se trabalhar com o dobro da espessura para a areia pura.

Na Figura 5.42, os ensaios realizados para a espuma rígida demonstram que até o carregamento correspondente a 50 N (5 mm de deslocamento), o comportamento para as duas condições analisadas (camada de 100 mm de areia e camada de 50 mm de alvéolo preenchido por areia) é praticamente o mesmo. A partir deste ponto o sistema areia – espuma rígida passa a plastificar. Entretanto, com a colocação dos alvéolos, houve um ganho substancial de resistência, fazendo

com que, para um deslocamento de 10 mm, os alvéolos alcançassem um carregamento máximo de aproximadamente 240 N. A contribuição do alvéolo retomando o ganho substancial de resistência com o deslocamento se deu de modo mais rápido para a espuma rígida (a partir de 5 mm de deslocamento, Figura 5.42) que para a flexível (a partir de 20 mm de deslocamento, Figura 5.41). As Figuras 5.43 e 5.44 mostram a comparação entre os alvéolos de 25 mm 50 mm de altura para as espumas flexível e rígida, respectivamente.

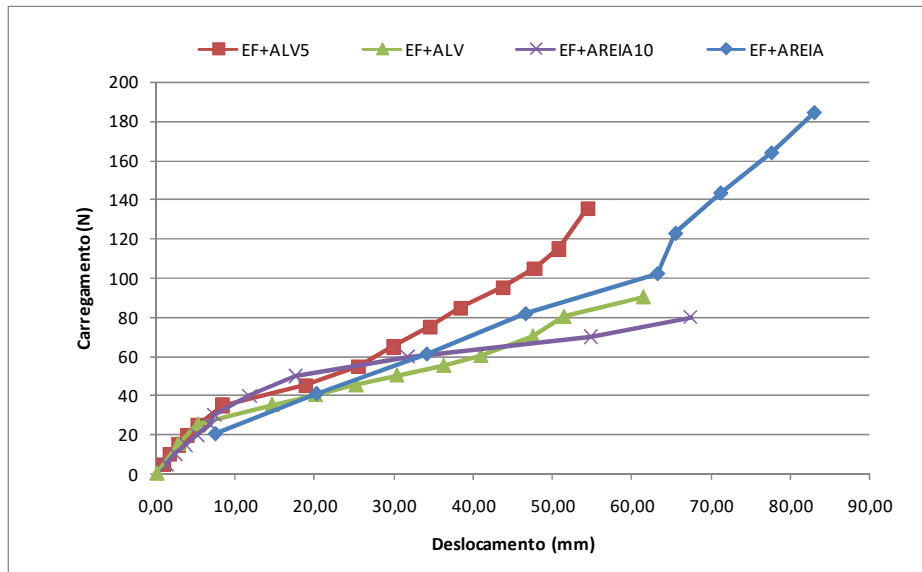


Figura 5.43: Comparação entre os alvéolos ensaiados tendo como suporte a espuma flexível.

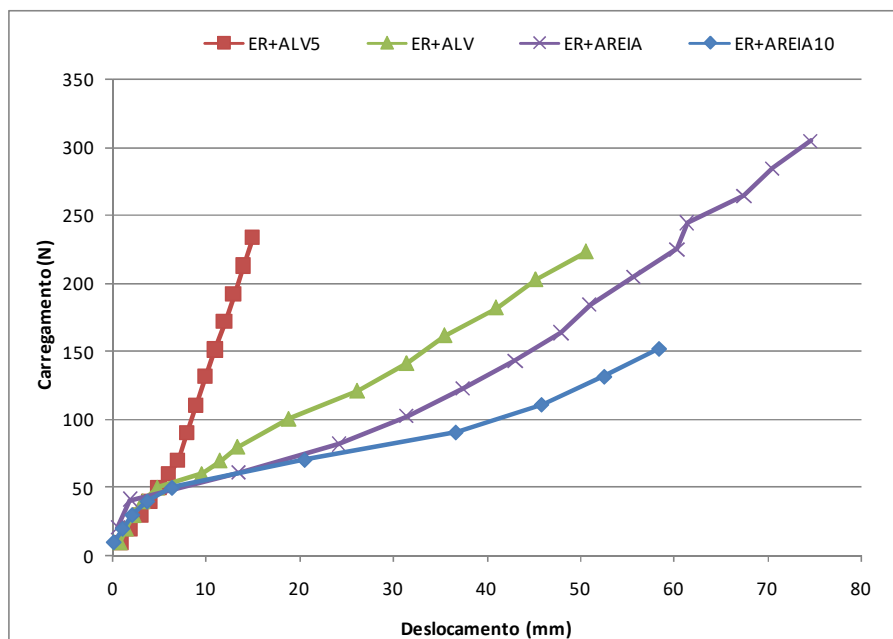


Figura 5.44: Comparação entre os alvéolos ensaiados tendo como suporte a espuma rígida.

Na Figura 5.43 referente à espuma flexível, observou-se que para os alvéolos de 25 mm de altura não foi verificada uma melhora do comportamento em relação à camada de areia com o dobro de sua espessura. No entanto, considerando-se que com o uso do alvéolo com 25 mm de altura o consumo de areia reduziu-se à metade, há que se considerar que houve uma melhoria do comportamento em consequência da sua presença. Quando da incorporação de alvéolos com 50 mm de altura ocorreu mesmo em relação à camada de areia com 10 cm de altura uma melhoria do comportamento para níveis mais elevados de deslocamento.

Quando do uso da espuma rígida como camada suporte, verifica-se que mesmo para alvéolos com 25 mm de espessura ocorreu uma melhoria de comportamento, inclusive em relação a camada de areia de 100 cm. Para alvéolos com 5 cm de altura o ganho foi substancial. Analisando apenas os ensaios com alvéolos, e considerando-se o fato de que naqueles com $h = 25$ mm a relação h/c é igual a 0,5 (c é o diâmetro do círculo inscrito no alvéolo) e nos alvéolos com $h = 50$ mm, esta relação passou a ser igual a 1, pode-se afirmar que o aumento da relação h/c proporcionou melhoria do comportamento aumentando a resistência o que está em acordo com o mostrado por Reiffesteck (1996). Em seu trabalho, Reiffesteck (1996) mostra que, com o aumento da altura do alvéolo, há o aumento em no mínimo 1,6 vezes a resistência do conjunto. Esse fenômeno se explica pelo fato de um melhor espraçamento das cargas no solo suporte, produzindo, portanto, um aumento da superfície de reação.

Para o caso da espuma rígida, na Figura 5.44, observou-se em relação aos alvéolos um comportamento semelhante, porém com contribuições mais significativas dos mesmos. Com o aumento da relação h/c , há um ganho de resistência superior a duas vezes em relação à camada de areia.

Comparando-se os resultados obtidos para a camada suporte em espuma flexível com aqueles obtidos para a espuma rígida conclui-se que a contribuição do alvéolo aumentará com a melhoria do comportamento do solo de suporte. Destaca-se, porém, que em ambos os casos a espuma não deixa de representar um solo suporte de má qualidade como aquele que se busca analisar na presente pesquisa.

5.2.2 ENSAIOS COM ALVÉOLOS EM GEOSSINTÉTICO

Os ensaios com alvéolos em geossintéticos também foram realizados com as misturas analisadas neste trabalho assim como as fibras até então estudadas. Utilizou-se um modelo reduzido multicamadas onde os carregamentos foram aplicados no topo da estrutura por meio de um pistão e o uso de uma prensa. Como nos alvéolos em papel, os alvéolos em geossintéticos também tinham tamanho cuja área possuía um círculo inscrito de 50 mm de diâmetro. Desta forma, a área correspondente do alvéolo foi de aproximadamente 2500 mm². O pistão utilizado no ensaio possuía diâmetro igual a 5 cm, totalizando uma área igual a 1.963 mm². Portanto, a relação entre a área do pistão e do alvéolo ficou na ordem de 0,7, conforme observa-se na Figura 5.45.



Figura 5.45: Detalhe do pistão de carregamento e alvéolos em geossintético.

As Figuras a seguir mostram os ensaios realizados tendo como camada de suporte o solo natural e uma camada de material sobreposto de acordo com o item 4.2.4 já descrito anteriormente. O ensaio correspondente ao solo natural e a mistura de solo natural com areia foram os únicos cuja realização teve apenas a camada de base ensaiada, a fim de compará-la com as demais combinações efetuadas. A fim de facilitar o entendimento, os gráficos foram separados em grupos de dois a fim de mostrar primeiramente os ensaios que foram realizados tendo o solo natural como camada de base e, posteriormente, tendo a mistura de solo natural com areia com a mesma função. Desta forma, as Figuras 5.46 e 5.47, nas quais plotou-se os deslocamentos verticais em função da carga aplicada, apresentam o primeiro grupo de ensaios supracitados.

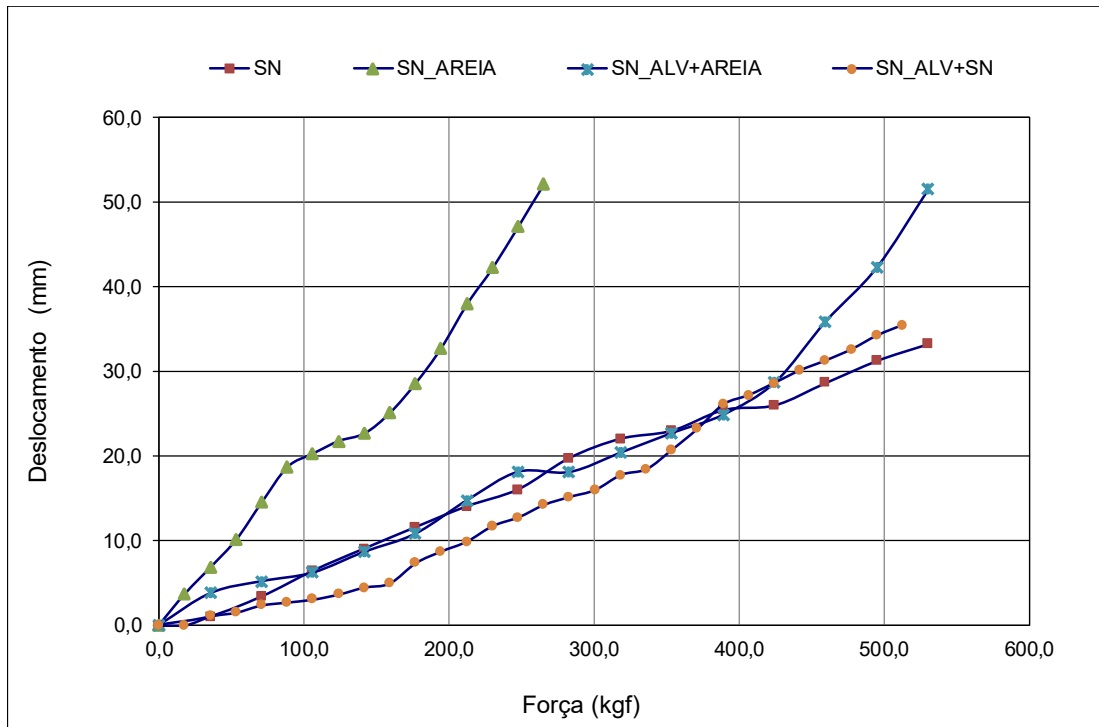


Figura 5.46: Ensaios realizados tendo o solo natural como camada de base.

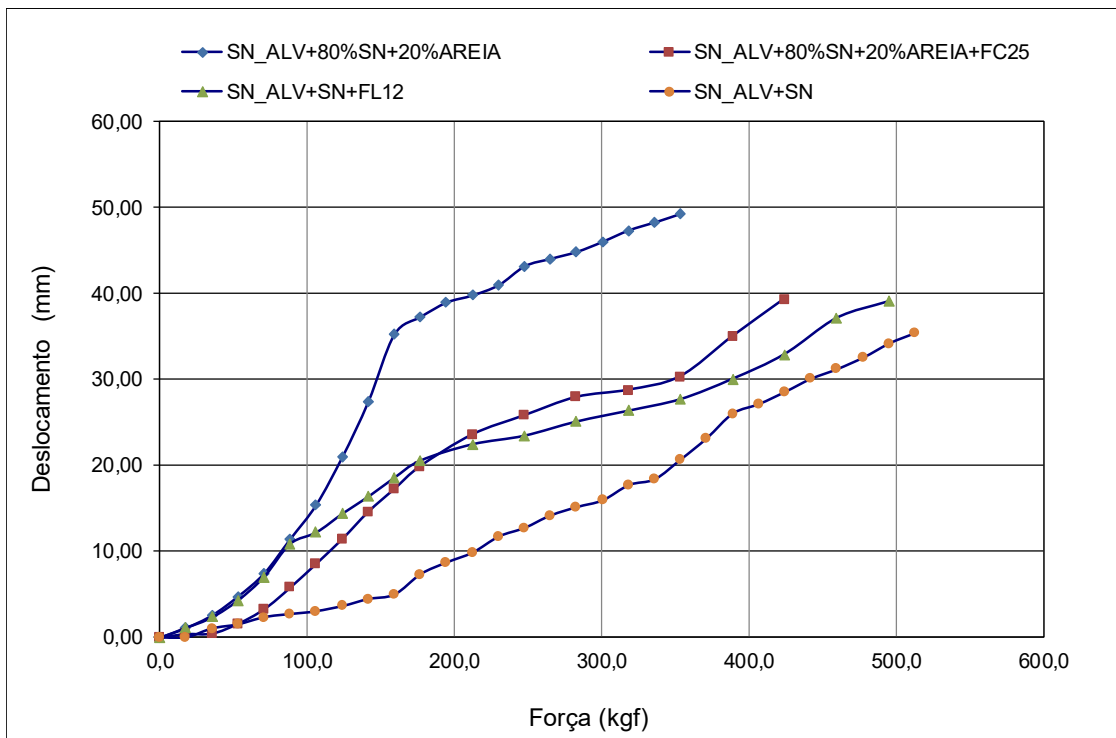


Figura 5.47: Continuação dos ensaios tendo o solo natural como camada de base.

Analisando-se a Figura 5.47, é possível verificar, primeiramente, a influência dos alvéolos preenchidos com areia, em detrimento do ensaio realizado tendo apenas a areia como camada sobreposta. Observou-se que, a partir de determinado deslocamento as curvas se tornam

paralelas, vindo o conjunto a romper-se com a aplicação de forças bem distintas. Verificou-se que o deslocamento máximo de ruptura foi praticamente o mesmo, por volta de 51 mm. Entretanto, a força correspondente à este deslocamento foi cerca de 35% maior quando comparado com o sistema dos alvéolos preenchidos com areia. Este fato demonstra o ganho de resistência fornecido pelos alvéolos, uma vez que ele não permite que o sistema se rompa devido ao confinamento do solo no seu interior. Desta forma, acaba por fornecer uma coesão aparente ao conjunto que se torna maior do que a do solo quando analisado separadamente.

Verifica-se que o comportamento dos alvéolos preenchidos com solo natural é pior do que o daqueles preenchidos com areia. Tanto o deslocamento quanto a força correspondente foram divergentes em ambos os casos, sendo que a força correspondente a ruptura para o alvéolo preenchido com solo natural foi quase a mesma para o alvéolo preenchido com areia. Entretanto, o deslocamento correspondente para este último foi cerca de 68% maior, demonstrando que a areia interage melhor com o sistema dos alvéolos do que o solo natural, predominantemente argiloso. Uma constatação que faz corroborar com este fato é que, quando analisado o sistema do solo natural e da areia, observa-se que o ganho de resistência para o sistema com a areia foi muito superior ao do sistema de solo natural.

É importante observar que o estudo da interação do geossintético com o material de preenchimento dos alvéolos não foi realizado nesta tese, uma vez que o mesmo foi estudado por Reiffesteck (1996) e Racana (2002). Desta forma, a caracterização da interface solo-geossintético foi realizada a partir de uma caixa de cisalhamento de grandes dimensões. Os ensaios foram realizados para a Areia d'Allier seca, mantendo a velocidade constante e obtendo um ângulo de atrito residual de 38°. A relação entre os ângulos de atrito solo-solo e solo-geossintético obtida foi da ordem de 0,9, colocando em evidência uma boa interação entre o solo e o reforço.

A Figura 5.47 apresenta a continuação dos ensaios tendo como camada de suporte o solo natural. Entretanto, o material de preenchimento dos alvéolos é diferente daquele indicado na Figura anterior, tendo, ainda assim como preenchimento, além da mistura de solo natural com areia, também a presença de fibras lisas e corrugadas utilizadas em outros ensaios desta tese.

Semelhante ao caso do preenchimento dos alvéolos com areia, observa-se que a adição de fibras no material de preenchimento dos mesmos significou uma melhora no comportamento do

conjunto. Para o caso de adição de fibras corrugadas, verifica-se que o deslocamento na ruptura foi menor e que a força correspondente a mesma foi maior, quando comparado com o sistema com preenchimento da mistura de solo natural com areia sem adição de fibras. Este fato pode demonstrar que a inclusão das fibras melhora a interação do sistema como um todo, colaborando com o aumento da coesão do conjunto, proporcionando menores deformações para forças maiores. Ressalta-se que, em função do objetivo que se deseja alcançar em relação à melhoria do solo, é importante avaliar do ponto de vista econômico o uso conjunto das fibras com os alvéolos, tendo em vista que a adição das mesmas pode significar um aumento nos custos previstos que não compense a melhoria do desempenho mecânico.

Outro sistema a ser comparado é o do preenchimento dos alvéolos com solo natural e fibra lisa. Observou-se, para este caso, que diferentemente do ensaio realizado com as fibras corrugadas, a força correspondente a ruptura para os alvéolos com e sem fibra foi praticamente a mesma, considerando o deslocamento máximo por volta de 50mm como critério de parada dos ensaios. Entretanto, quando analisado o deslocamento, observa-se que o sistema composto com os alvéolos preenchidos com fibra lisa apresentou maiores deformações para um mesmo carregamento, quando comparados ao sistema sem fibras (Figura 5.47). Este fato deve ser bem avaliado, uma vez que o sistema alcançou um maior deslocamento para uma mesma força de ruptura, fato este que, à princípio, não pode ser considerado benéfico. Entretanto, em função do fim à que se destina, pode significar uma melhora do comportamento quando consideradas outras características, tais como a tenacidade do sistema. É importante ressaltar que, quando analisados os sistemas globalmente, o conjunto representado pelo preenchimento dos alvéolos com fibras corrugadas e mistura de solos, apresentou melhor comportamento em relação ao sistema com preenchimento de solo argiloso e fibras lisas

Dando continuidade às análises, a Figura 5.48 demonstra os ensaios que foram realizados tendo como camada de base a mistura de solo natural com areia, já utilizada nos ensaios demonstrados nos itens anteriores desta tese.

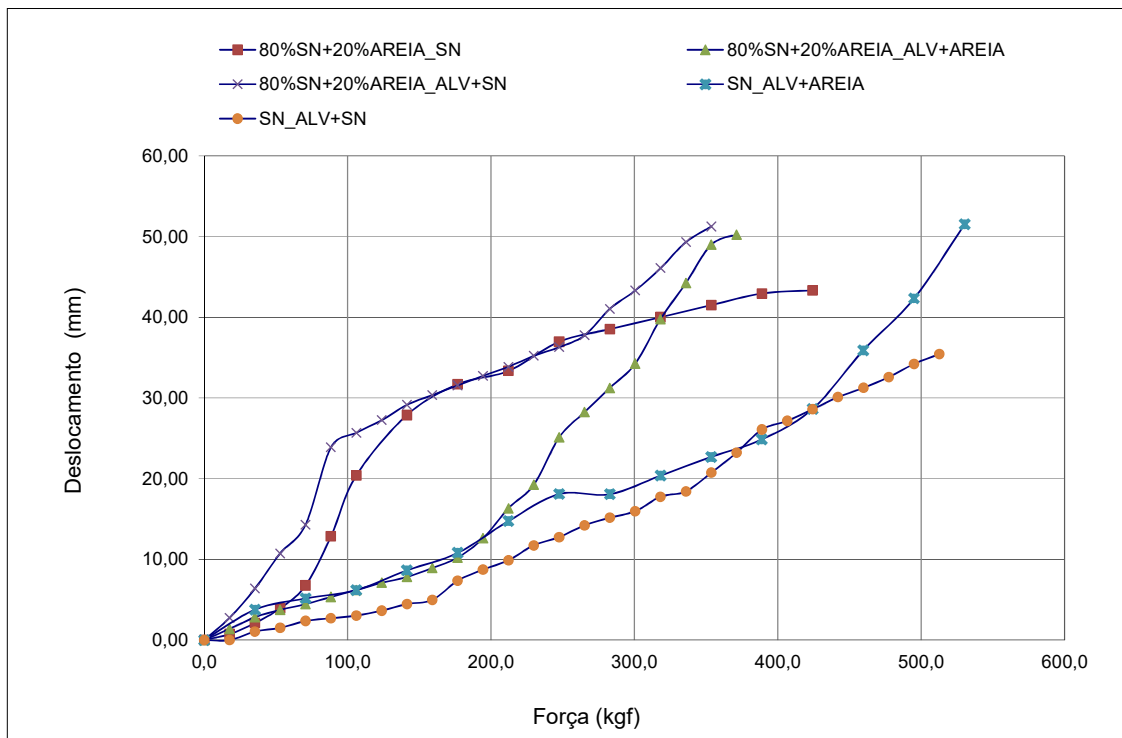


Figura 5.48: Ensaios realizados tendo a mistura de solo natural com areia como base.

Afim de avaliar a influência do material de preenchimento dos alvéolos, a Figura supracitada apresenta os gráficos referentes aos ensaios tendo os alvéolos preenchidos com solo natural e areia. Paralelamente, a fim de avaliar o papel do material utilizado na base, esses resultados são comparados com os ensaios tendo o mesmo preenchimento dos alvéolos, entretanto com a base de solo natural, que já foram mostrados na Figura 5.46.

Primeiramente, em relação ao material de preenchimento dos alvéolos, observa-se que, até um carregamento aproximado de 250 kgf, as curvas para os alvéolos preenchidos com areia e solo natural possuem um comportamento bem distinto (Figura 5.48). Considerando-se a mesma força aplicada, os alvéolos preenchidos com areia apresentaram um menor deslocamento em relação a amostra com alvéolos preenchidos com solo natural, ressaltando a melhor contribuição da areia com o sistema em questão. Entretanto, a partir do carregamento supracitado, os comportamentos tendem a igualar-se, ocorrendo a ruptura dos dois materiais com praticamente o mesmo carregamento e a mesma força correspondente.

Em relação ao material utilizado como base, quando se avalia os alvéolos preenchidos com solo natural, verifica-se que, para a base constituída de solo natural, o rompimento do sistema se dá para uma força cerca de 70% maior do que para o ensaio que teve como base a mistura de solo

natural com areia, sendo esta ruptura correspondente a um deslocamento 74% menor (Figuras 5.47 e 5.48). Desta forma, constata-se que o sistema constituído pelo solo natural como base rompeu com um carregamento 70% maior tendo um deslocamento 74% menor que o sistema constituído da mistura de solo natural com areia como base.

Para os alvéolos preenchidos com areia, quando observados os diferentes materiais utilizados como base, observa-se que os comportamentos das duas curvas representadas no ensaio seguem de maneira paralela, ocorrendo a ruptura do sistema com carregamentos praticamente iguais. Entretanto, para o sistema que utilizou o solo natural como base, o carregamento correspondente a ruptura foi cerca de 67% maior do que o sistema que utilizou a mistura de solo como base. Desta forma, pode-se afirmar que o sistema que possui o solo natural como base suportou carregamentos maiores do que o sistema constituinte da mistura de solos, rompendo com o mesmo carregamento.

A Figura 5.49 a seguir apresenta a continuação dos ensaios tendo como camada de suporte a mistura de solo natural com areia. Entretanto o material de preenchimento dos alvéolos difere da figura anterior, tendo com preenchimento também a presença de fibras na mistura de solo.

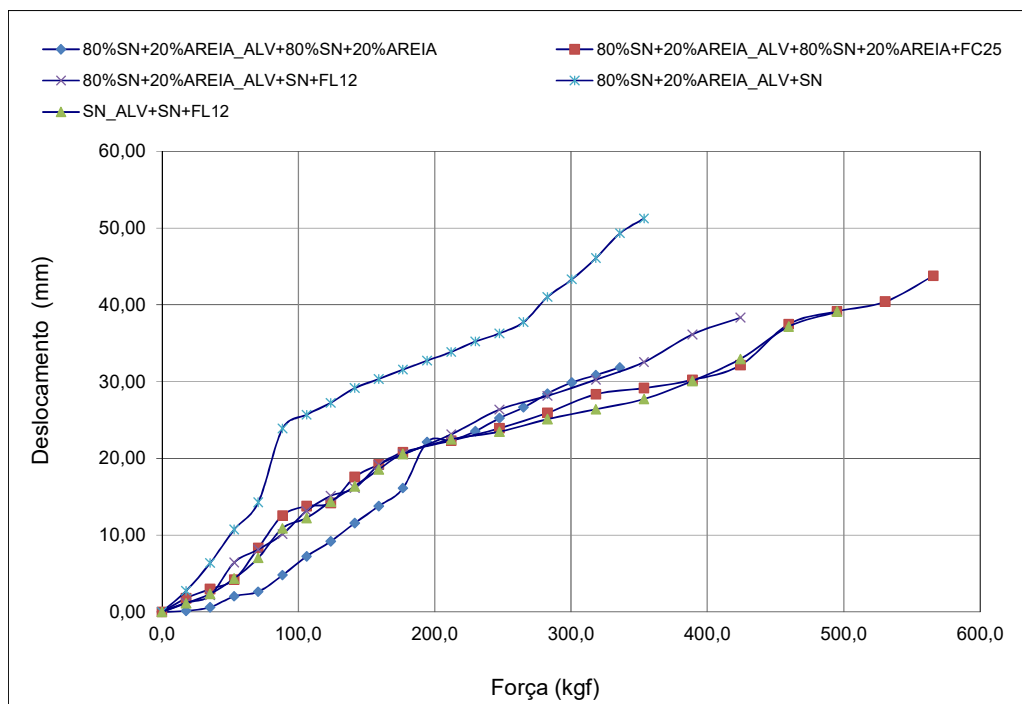


Figura 5.49: Ensaio realizados tendo a mistura de solo natural com areia como base.

À princípio, quando se analisa o material de preenchimento dos alvéolos tendo em vista o solo natural e a base com mistura de solo natural e areia, observou-se que o comportamento das duas curvas é quase paralelo. Entretanto, para os alvéolos preenchidos com fibra lisa observou-se um melhor comportamento em relação a ruptura do conjunto, uma vez que o deslocamento do mesmo para a carga final foi cerca de 73% menor para um carregamento maior. Este fato pode explicar a contribuição da fibra para o sistema, proporcionando maiores deslocamentos para cargas maiores de ruptura.

Para as fibras corrugadas, quando se compara o preenchimento dos alvéolos com a mistura de solo natural e areia verificou-se que, até determinado carregamento, o comportamento do sistema sem a presença de fibra apresentou-se ligeiramente melhor, uma vez que conseguiu atingir menores deslocamentos quando considerada a mesma carga. Porém, para carregamentos a partir de 200 kgf, o comportamento se inverte, vindo o sistema com alvéolos preenchidos sem a fibra romper-se com carregamentos cerca de 60% inferiores ao sistema formado com a presença de fibras nos alvéolos. Outro fato verificado foi que, uma vez que a carga de ruptura foi bem maior para o sistema com fibras, os deslocamentos finais também se apresentaram 60% maiores, quando considerado o sistema com fibras. Tal comportamento pode explicar a contribuição das fibras para o conjunto, uma vez que atinge maiores deslocamentos sem a ruptura, conferindo certa tenacidade para o conjunto.

Em relação ao material utilizado como suporte, verificou-se que até o carregamento correspondente a 200 kgf, o comportamento dos dois materiais foi idêntico, quando analisadas as amostras dos alvéolos preenchidos com solo natural e fibra lisa, tendo os dois materiais diferentes como preenchimento da camada de suporte. Assim, a partir deste carregamento, os comportamentos começam a divergir, sendo que o sistema que utilizou o solo natural como base suporta maiores carregamentos. Para os deslocamentos na ruptura, ambas as possibilidades analisadas apresentaram deslocamentos semelhantes, não divergindo quanto à esse aspecto. Desta forma, é possível afirmar que o sistema com solo natural como base ofereceu maior suporte ao conjunto, suportando maiores carregamentos.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados nessa tese permitem concluir que:

- Em relação ao acréscimo do teor de areia no solo natural, observou-se, para os teores de 10% e 20% de areia que a sucção promoveu um aumento da resistência do solo até um determinado valor e que a partir deste ponto, essa resistência é decrescente. As amostras com maiores teores de argila apresentaram maiores resistências, tendo em vista seu melhor comportamento em consequência do aumento da sucção. Desta forma, tendo em vista a melhor interação solo-fibra, foi escolhido o teor de 20% de areia;
- Em relação às amostras compactadas na umidade ótima, no ramo úmido e umedecidas até atingirem o ramo úmido, observou-se que a adição de areia provocou uma redução da resistência não confinada. O pico de resistência tende a ser menos relevante, ressaltando a importância da areia na redução da sucção e na maior influência da fibra no comportamento mecânico. Notou-se uma tendência ao desaparecimento do pico nas amostras com fibras levadas ou compactadas no ramo úmido, destacando-se o comportamento das fibras corrugadas de 50mm. Essa observação torna-se importante uma vez que as operações de compactação na região que objetivou o estudo são realizadas, na maioria dos casos, no ramo úmido, tendo em vista as condições climáticas da região;
- Já nas análises que consideram a sucção e o índice de vazios, observou-se que as fibras contribuíram positivamente para amostras com menores valores de sucção e maiores índices de vazios. Dentro deste contexto, destacam-se as fibras de 12 mm e 50 mm de comprimento que contribuíram, contrariamente ao esperado, para uma piora do comportamento geral;
- Para os ensaios de tração por compressão diametral, verificou-se que, em relação ao solo natural, a modificação no comportamento foi observada apenas para teores de umidade superiores a 13%. Já para as misturas solo natural-areia, observou-se uma melhora no comportamento em relação a todos os teores de umidade analisados. Em geral, a fibra lisa de 24 mm apresentou melhor comportamento quando comparada à fibra lisa de 12 mm. Para as fibras corrugadas, observou-se um melhor comportamento para as fibras de 25 mm mantendo-se os menores teores de umidade analisados. Em relação ao comportamento global, a fibra corrugada de 25 mm proporcionou um maior ganho de resistência à tração devido à uma maior interação do conjunto fibra-solo. Para a fibra corrugada de 50 mm este comportamento não foi

observado, o que foi provavelmente devido ao seu tamanho que dificultou o processo de homogeneização da mistura;

- Para a sucção, não se observou mudança de comportamento das curvas características para a região dos microporos diante da adição de fibras lisas. Entretanto, para a mistura com solo natural com adição de fibra lisa de 24 mm observou-se maiores valores de sucção para o mesmo grau de saturação. Esse comportamento se refletiu nos resultados observados dos ensaios de resistência à tração, tendo em vista que as amostras em questão apresentaram uma resistência à tração de pico ligeiramente maior do que para as amostras com adição de fibra lisa de 12 mm. Já em relação as fibras corrugadas, o mesmo comportamento não foi observado, podendo-se concluir que, neste caso, a sucção não contribuiu para o parâmetro de resistência à tração, sendo sua melhora no comportamento atribuída à interação solo-fibra;

- Quanto aos ensaios com alvéolos de 25 mm de altura, observou-se que a curva de carregamento obtida situou-se aproximadamente paralela à curva do ensaio efetuado somente com a espuma simulando a camada de base. Isso mostra que os alvéolos podem suportar parte da carga aplicada sem transferi-las verticalmente para a espuma. Em relação aos alvéolos de 50 mm de altura, observou-se que os mesmos tendem a retardar a ruptura da areia, transferindo para os mesmos os esforços de tração na mesma. Para o solo como camada de suporte, observou-se que a contribuição dos alvéolos aumentou com a melhoria do comportamento do solo de suporte. Ressalta-se, porém que, para os casos analisados nesta pesquisa, o material utilizado para simular a camada de suporte representou um solo de baixa capacidade, assim como o encontrado na região em estudo;

-Ao analisar os ensaios com alvéolos em geossintéticos, quando avaliado o solo natural como camada de base, observou-se a influência da colocação dos alvéolos preenchidos de areia, em detrimento somente da camada de areia sobreposta. Pode-se observar que a força correspondente a um mesmo deslocamento apresentou-se cerca de 35% maior. Assim, demonstrou-se que o ganho de resistência devido ao uso dos alvéolos, não permitindo que o sistema se rompesse devido ao confinamento oferecido pelos mesmos;

- Em relação ao material de preenchimento dos alvéolos, observou-se que a areia interagiu melhor com o sistema em questão do que o solo argiloso, podendo ser observado que o ganho de resistência do sistema com a areia foi superior ao do sistema com o solo natural;

- Quando observada a colocação das fibras corrugadas na mistura adicionada aos alvéolos, verificou-se um menor deslocamento na ruptura para uma força maior correspondente, evidenciando a melhora da interação do sistema como um todo. Desta forma, a adição das mesmas colabora para o aumento da coesão do conjunto. Entretanto, para a adição de fibras

lisas não foi observado o mesmo fenômeno, uma vez que o sistema apresentou maiores deformações para um mesmo deslocamento. Este fato deve ser bem avaliado quando se analisa não apenas o ganho de resistência do conjunto, mas quando se deve considerar uma maior tenacidade do sistema. Globalmente, as fibras corrugadas apresentaram melhor comportamento do que as fibras lisas;

- Já para os ensaios realizados tendo a mistura de solo natural com areia como camada de base, observou-se que os alvéolos preenchidos com areia apresentaram menor deslocamentos em relação ao preenchimento com solo natural. Entretanto, a partir de determinado carregamento, os comportamentos tendem a igualar-se, ocorrendo a ruptura do sistema com a mesma força correspondente;

- Quando se avaliou o material sobreposto tendo o solo natural como elemento de preenchimento dos alvéolos, verificou-se que o sistema constituído com o mesmo apresentou um melhor comportamento, uma vez que a ruptura deu-se para um carregamento 70% maior;

- Em relação à adição de fibras corrugadas, verificou-se que, até determinado carregamento, o sistema se comporta um pouco melhor sem as fibras. Entretanto, a partir de certo carregamento, o comportamento do sistema se inverte, sendo que os alvéolos preenchidos com fibras a romper-se com carregamentos superiores ao sistema sem fibras. De maneira geral, observou-se que, com a adição de fibras, o sistema apresentou maiores deslocamentos para a ruptura, fato este que confere maior tenacidade ao sistema.

6.2 SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS

Dando continuidade aos estudos deste trabalho, propõe-se como pesquisas futuras:

- Realizar estudos por meio de ensaios triaxiais, a fim de melhor avaliar o comportamento tensão-deformação;

- Execução de pequenos trechos experimentais a fim de avaliar os resultados obtidos em laboratório, a fim de avaliar, também, as dificuldades da homogeneização as misturas solo-fibra para obras em grande escala;

- Estudar o comportamento tensão-deformação para as fibras com diferentes índices aspecto (relação l/d);

- Verificar a influência da porosidade na resistência à compressão simples para diferentes tipos de fibra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. NBR 10838 (1988). Solo – Determinação da Massa Específica Aparente de Amostras indefromadas com o Emprego de Balança Hidrostática, Rio de Janeiro, RJ, 4p.
- ABNT. NBR 12770 (1992). Solo Coesivo – Determinação da Resistência à Compressão não Confinada, Rio de Janeiro, RJ, 4p.
- Ahmed, A. Ugai, K. Kamei, T. (2010). Investigation of Recycled Gypsum in Conjunction with Waste Plastic Trays for Ground Improvement. *Construction and Building Materials*. P: 2108-217.
- Aitchison, G.D. (1973). The Strengt of Quasi-Saturated and Insaturated Soils in Relation to the Pressure Deficiency in the Pore Water. *University of Melbourne, Victoria, Austrália*. p. 135-139.
- Barden, L. (1968). Consolidation of Compacted and Unsaturated Clays. *Géotechnique*. V. 15, n.3, p. 267-286.
- Bathrust, R.J.; Karpuraru, R. (1993). Large-Scale Triaxial Compression Testing of Geocell-Reinforced Granular Soils. *Geotechnical testing Journal*, Vol. 16, No. 3, p: 296-303.
- Bento, P.F. (2006). Uso de Cal e Fibra na Melhoria de Materiais para Utilização em Estruturas de Pavimentos. *Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF*. 132p.
- Bucio, M.B. (2002). Experimental Study of Behavior Hydromechanical Colapsibles Soils (In Spanish). *Tese de Doutorado. Universitat Politècnica de Catalunya*. 450p.
- Bueno, B.S., Lima, D.C., Teixeira, S.H.C., Ribeiro, N.J. (1996). Soil Fiber Reinforcement: Basic Understanding. *International Conference on Soil Mechanics na Foundation Engeneerings v.1*, p: 878-884.
- Caldeira, I. M. G. (2012). Resistência e Deformabilidade de uma Areia Estabilizada com Cimento e Fibras de Polipropileno. *Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia, Porto, Portuga*, 125p.
- Camapum de Carvalho, J. & Leroueil, S. (2000). Modelo de Normalização da Curva Característica. *32ª Reunião Anual de Pavimentação, Brasília*. p: 96-106.
- Camapum de Carvalho, J. & Leroueil, S. (2004). Curva Característica de Sucção Transformada. *Solos e Rochas – Revista Brasileira de Geotecnia*. São Paulo, SP, V. 27, p. 231-242.
- Camapum de Carvalho, J. (2006) Análise de problemas Relativos à Construção Rodoviária na Região Amazônica. *XIII COBRAMSEG, Curitiba-PR*, 6p.
- Camapum de Carvalho, J., Leroueil, S. (2004). Curva Característica de Sucção Transformada. *Revista Solos e Rochas, São Paulo, SP, 27 (3)*, p. 231-242.

- Caproni Junior, N., Palocci, A., Bueno, B.S. (1999). Estudo de Solo-Cimento Reforçado com Fibras de Polipropileno. *Geossintéticos* 99, Rio de Janeiro – RJ, p.183-188.
- Casagrande, M.D.T. (2005). Comportamento de Solos reforçados com Fibras Submetidos a Grandes Deformações. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 217p.
- Ceratti, J.A., Gehling, W.Y.Y., Bica, A.V.D., Rodrigues, M.R (1996). Influência da Sucção no Módulo de Resiliência de um Solos típico do Rio Grande do Sul. 30ª Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, 2: 541-555.
- Chapelet, R. (2010). Renforcement de Chaussee par Geosynthetic Alveolaire. Mémoire presente em vue de l'obtention du diplôme d'Ingenieur. Polytech Clermont-Ferrand, Clermont-Ferrand, França, 84p.
- Consoli, N., Montardo, J., Prietto, P., Pasa, G. (2002). Engineering Behavior of a Sand Reinforced with Plastic Waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. p: 462-472.
- Consoli, N., Prietto, P.D.M., Ulbrich, L.A. (1999). The Behavior of a Fiber-reinforced Cement Soil. *Ground Improvement, ISSMGE*. V. 3. p: 21-30.
- Consoli, N.C., Prietto, P.D.M., Ulbrich, L.A. (1998). Influence of fiber and Cement Addition on Behavior of Sandy Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. New York, v. 124, p: 1211-1214.
- Delgado, A.K. C. (2007). Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Tropicais Característicos do Distrito Federal para Uso na Pavimentação Rodoviária. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 411p.
- Donato, M. (2007). Medidas Diretas de Tensão em Solos Reforçados com Fibras de Polipropileno. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Festugato, L. (2008). Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Micro-reforçado com Fibras de Distintos Índices Aspecto. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 146p.
- Feuerharmel, M.R. (2000). Comportamento de Solos Reforçados com Fibras de Polipropileno. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 152p.
- Fitesa (2005). Ficha Técnica do Produto. Fibra de Polipropileno Corrugada.
- Fitesa (2005). Ficha Técnica do Produto. Microfibra de Polipropileno.
- Fredlund, D.G. & Xing, A. (1994). Equation for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 31, p. 521-532.
- Fredlund, D.G.; Morgenstern, N.R. (1976). Constitutive Relations for Volume Change in Unsaturated Soils. *Can. Geotech J.*, 13, p. 261-276.

- Gerscovich, D.M.S. (2001). Equações para Modelagem da Curva Característica Aplicada a Solos Brasileiros. Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Porto Legre, v.1, p. 76-92.
- Gray, D.H., Ohashi, H. (1983). Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand. Journal of Geotechnical Engineering. New York, v. 109, p: 335-353.
- Grygiel, B. (2009). Renforcement De Chaussee Par Geosynthetic Alveolaire Dans Les Regions Tropicale Et Amazonienne. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur Option Génie Civil. Polytech Clermont-Ferrand, Clermont-Ferrand, França, 85p.
- Grygiel, B. (2009). Renforcement de Chaussee par Geosynthetic Alveolaire dans les Régions Tropicale et Amazonienne. Mémoire presente em vue de l'obtention du diplome d'Ingenieur. Polytech Clermont-Ferrand, Clermont-Ferrand, França, 84p.
- Hannant, L. (1994). Polymers and Polymers Composities. Construction Materials: their Nature and Behavior, 2ª edição. p: 359-403.
- Heineck, K. S. (2002). Estudo do Comportamento Hidráulico e Mecânico de Materiais Geotécnicos para Barreiras Horizontais Impermeáveis. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 275p.
- Heineck, K.S. (2002). Estudo do Comportamento Hidráulico e Mecânico de Materias Geotécnicos para Barreiras Horizontais. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Hoare, D.J. (1979). Laboratory Study of Granular Soil Reinforced with Randomly Oriented Discrete Fibres. Internacional CONference on Soil Reinforcement. Paris, França. p: 47-52.
- Jeaneau, C. (1991). Approche du fonctionnement d'un Géotextile Alvéolaire en Renforcement des Chaussées. Mémoire d'ingénieur, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, França.
- Johnston, C.D. (1994). Fiber-Reinforced Cement and Concrete. Advances in Concrete Technology. 2ª edição. p: 603-673.
- Kerisel, J. (1985). The History og Geotechnical Engineering up Until 1700. Golden Jubilee Book on History of Geomechanics. p: 11-62.
- Lambe, T.W., Whitman, R.V. (1976). Soils Mechanics (in Spanish). Editorial Limusa, México.
- Maher, M.H., Gray, D.H. (1990). Estatic Reponse of Sands Reinforced with Randomly Distributed Fibers. Journal of Geotechnical Engineering. New York, v. 116, p: 1661-1667.
- Maher, M.H., Ho, Y. C. (1994). Mechanical Properties of Kaolinite/Fiber Soil Composite. Journal of Geotechnical Engineering. Nova Iorque, Estados Unidos. V. 120, n. 3, p: 327-346.
- McGrown, A. Andrawes, K.Z., Hytiris, N., Mercer, F.B. (1988). Soil Strengtning Using Randomly Distributed Mesh Elements. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, São Francisco, Estados Unidos. V.3, p: 1745-1738.

- McGrown, A., Andrawes, K.Z. Al-Hasani, M.M. (1978). Effect of Inclusion Properties on the Behavior of Sand. *Géotechnique*, London, v. 28. p: 327-346.
- Mhaiskar, S.Y., Mandal, J.N. (1996). Investigations on Soft Clay Subgrade Strengthening Using Geocells – *Construction and Building Material*, Vol. 10, No.4, p: 281-286.
- Miguel, M.G. (2002). Caracterização geotécnica do subsolo da cidade de Londrina/PR. *Anais do X Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*. Ouro Preto/MG.
- Montardo, J. P. (1999). Comportamento Mecânico de Compósitos de Solo-Cimento-Fibra: Estudo do Efeito das Propriedades dos Materiais Constituintes. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Montardo, J. P., Vendruscolo, M.A., Consoli, N.C., Prietto, P.D.M. (1998). Características da Resistência e Deformação de um solo Cimentado Reforçado com Fibras PET: Estudo Preliminar. *XI COBRANSEG*, Brasília-DF, p.1163-1167.
- Nataraj, M.S., Addula, H. R., Mcmanis, K.L. (1996). Strength and Deformation Characteristics of Fiber Reinforced Soil. *International Symposium on Environmental Geotechnology*. San Diego, Estados Unidos. V. 1, p: 826-835.
- Pessoa, F.H.C. (2004). Análise dos Solos de Urucu para Fins Uso Rodoviário. *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 151p.
- PETROBRAS. <<http://www2.petrobras.com.br>>. Acesso em 27/07/2010.
- Prego, A.S.S. (2001). *A Memória da Pavimentação no Brasil*. Associação brasileira de Pavimentação. Rio de Janeiro, RJ, 640p.
- Presa, E.P.(1982). Deformabilidade de las Arcilas Espansivas bajo Succión Controlada. *Tese Doutorado*, E. T. S. de Ing. de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
- Prietto, P.D. Montardo, J. P., Consoli, N.C. (1999). Comportamento Mecânico de uma Areia Cimentada Reforçada com Fibras PET. *Geossintéticos 99*, Rio de Janeiro – RJ, p.199-206.
- Racana, N.; Gourvés, R.; Grediac, M. (2002). Experimental Study of the Mechanical Behaviour of Soil Reinforced by Geocell. *Geosynthetics -7th ICG*, p: 1349-1352.
- Racanas, N. (2002). *Etude du Comportement Mecanique d'un Massif en Sol Renforce par Geotextile Cellulaire*. These du doctorat. Ecole Doctorale Sciences pour L'Ingenieur de Clermont-Ferrand, Université Blaise Pascal – Clermont II. Clermont-Ferrand, França, 152p.
- Rajagopal, K.; Kirshnaswamy, G.; Latha, G.M. (1999). Behaviour of Sand Confined with Single and Multiple Geocell. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 17, p: 171-184.
- Reiffsteck, P. (1992). Consolidation des Sols Supports de Chaussees par un Geotextile Tridimensionnel Alveolaire. *Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies*. Université Blaise Pascal – Clermont II. Clermont-Ferrand, França, 109p.

- Reiffsteck, P. (1996). Etude du Comportement Mecanique du Geotextile Tridimensionnel Alveolaire ARMATER : Analyse Numerique et Experimentale. These du doctorat. Ecole Doctorale Sciences pour L'Ingenieur de Clermont-Ferrand, Université Blaise Pascal – Clermont II. Clermont-Ferrand, França, 157p.
- Silva, M.A., Bueno, B.S., Lima, D.C. (1995). Estabilização de Solos com Inclusões Curtas Aleatórias. Simpósio Brasileiro Sobre Aplicações de Geossintéticos. p: 327-335.
- Specht, L.P. (2000). Comportamento de Misturas de Solo-Cimento-Fibra submetidos a carregamentos estáticos e dinâmicos. Dissertação de Mestrado, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Taylor, G.D. (1994). Materials in Construction. 2ª edição, London: Longman Scientific&Technical, 284p.
- Teodoro, L. M. (1999). Resistência ao Cisalhamento de Solos Reforçados com Fibras Plásticas. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Trindade, T.P., Iasbik, I. Lima, D.C., Silva, C.H.C., Barbosa, P.S.A. (2004). Latossolo Vermelho-amarelo Reforçado com Fibras de Polipropileno de Distribuição Aleatória: Estudo em Laboratório. Revista da Escola de Minas de Ouro Preto, 57(1): p: 53-58.
- Ulbrich, L.A. (1997). Aspectos do Comportamento Mecânico de um Solo Reforçado com Fibras. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 122p.
- Vendruscolo, M.A. (2003). Comportamento de Ensaio de Placa em Camadas de Solo Melhoradas com Cimento e Fibras de Polipropileno. Dissertação de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Vilar, O.M. (1997). Ensaio de Campo em Solos não Saturados. Anais do III Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Rio de Janeiro: Editora Freitas Bastos, v. 2, p. 491.
- Yamamuchi, T. (1985). Historical Review of Geotextiles for reinforcement of Earth Works in Asia. Earth Reinforcement Practice. P: 737-751.