

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS SOLO-
CIMENTO-FIBRA: ESTUDO DO EFEITO DAS PROPRIEDADES DOS
MATERIAIS CONSTITUINTES**

JÚLIO PORTELLA MONTARDO

Dissertação apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia**.

Porto Alegre
Março de 1999

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo Curso de Pós-Graduação.



Prof. Nilo Cesar Consoli
Orientador



Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal
Coordenador do CPGEC

BANCA EXAMINADORA

- Prof.^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin
D.Sc., Universidade de São Paulo, Brasil

- Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
D.Sc., COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro

- Prof. Ennio Marques Palmeira
Ph.D., University of Oxford, UK

Dedico este trabalho aos meus pais
Otaliz e Elenita, e aos meus irmãos
Daniel, Sandra, Eliz e Ana Maria.

AGRADECIMENTOS

A realização de um trabalho só é possível se houver a mobilização de um grupo de pessoas disposto a cooperar de forma espontânea e sincera. Para que essa dissertação de mestrado chegasse ao fim, muitas pessoas tiveram participação fundamental em todas as etapas do estudo. A todos que colaboram direta ou indiretamente na elaboração desse trabalho, o meu sincero reconhecimento.

Eu poderia começar meus agradecimentos de várias maneiras, mas optei pelo começo. Na verdade, essa dissertação teve início há quatro anos, quando pelas mãos dos Profs. Rinaldo Pinheiro e José Mario Soares comecei o aprendizado da Mecânica dos Solos e o envolvimento com a Iniciação Científica. Os trabalhos diários no laboratório de solos da UFSM e a participação em congressos de Iniciação Científica trouxeram uma bagagem importante para que a etapa experimental desse trabalho tivesse êxito. Gostaria ainda de registrar meu reconhecimento à generosidade destes professores por terem oportunizado meu ingresso no CPGEC/UFRGS. Portanto amigos, muito obrigado pelo incentivo e pela credibilidade em mim depositados. Fiz o melhor que pude. Espero não tê-los decepcionado. Um abraço.

Um agradecimento especial e merecido ao professor e orientador, mas antes de tudo um amigo, Nilo Cesar Consoli pelo interesse, pela dedicação e disponibilidade, pelo entusiasmo e otimismo, pelas críticas construtivas e pela franqueza sempre presentes em nossas conversas. Obrigado pelo respeito às opiniões divergentes e por sempre permitir o contraditório. Esforcei-me ao máximo para justificar o apoio recebido. Deixo registrado o reconhecimento ao esforço pessoal dispensado pelo “chefe” para o prosseguimento da minha carreira profissional. Muito obrigado, Nilo!

Um agradecimento não menos especial ao colega e amigo Pedro Marques Prietto, a quem tenho como referência de conduta pessoal e profissional, pelo incentivo às novas técnicas e procedimentos, pelo interesse, pela dedicação, pelas sugestões sempre procedentes e inteligentes, pelas longas conversas e pelo constante exemplo. Valeu, Pedro!

Agradeço a todos os professores do CPGEC/Geotecnia: Nilo Cesar Consoli, Jorge Augusto Ceratti, Fernando Schnaid, Adriano Virgílio Bica, Wai Ying Yuk Gehling,

Luiz Antônio Bressani e Carlos Maciel pelos ensinamentos ministrados, pela amizade e pelo cordial relacionamento. Agradeço à Prof^a. Denise Carpena Dal Molin pelos conhecimentos transmitidos e pelo incentivo à utilização da teoria de projeto e avaliação de experimentos que em muito facilitou meu trabalho, mas nem por isso deixou de absorver boa parte do tempo dispensado à realização desta pesquisa.

Desejo externar meus sinceros agradecimentos à bolsista de Iniciação Científica Simone Amador, pela dedicação e responsabilidade com que sempre encarou as tarefas delegadas. Tentei, ao longo do último ano em que tive a Simone como braço direito nas “lidas” do laboratório, estimular seu espírito investigativo. Acho que consegui, pois as vezes fazia perguntas super intrigantes, do tipo: “Mas isso é bom ou ruim?!!!”.

Sou grato à colega e amiga Giovana Pasa pelo tempo dedicado à elaboração do programa experimental, pela ajuda inestimável à análise dos resultados e pelas longas conversas, que por vezes não tinham nenhuma conotação estatística, mas nem por isso deixavam de ser enriquecedoras e interessantes.

Aos funcionários do CPGEC pelo apoio logístico, em especial ao gremista Jair Floriano da Silva pela ajuda indispensável, pelas dicas e macetes durante a realização dos ensaios laboratoriais, mas principalmente pela amizade e pelas risadas, e ao João Diniz pelas idas e vindas, meu muito obrigado.

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro concedido.

Agradeço à Fitesa Fibras e Filamentos S/A, à Betanin Industrial S/A e à Owens Corning Fiberglass Corporation pelas fibras gentilmente cedidas para a realização deste estudo. Obrigado pela colaboração.

Agradeço ao Laboratório de Materiais Cerâmicos e ao Departamento de Engenharia dos Materiais pertencentes à Escola de Engenharia da UFRGS, e ao Centro de Microscopia Eletrônica/UFRGS pelo envolvimento no preparo das amostras e realização dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura.

Sou grato ao colega Pedro Ferreira pela inestimável ajuda que recebi desse excelente profissional e amigo. Mesmo quando estava ocupado com seus compromissos, o Pedro sempre arranjava um tempo para resolver aquelas “encrencas eletrônicas”, absolutamente incompreensíveis aos leigos. Meu reconhecimento e gratidão.

Reservei a última página aos “...meus parceiros desta ronda da vida, sempre de prontidão para me amadrinharem na camperiada mais custosa, ou para matearem comigo na hora do sossego...” (o Word não reconheceu metade destas palavras!). Agradeço aos companheiros tri-cores Carlos Bortoli e Luiz Artur Oliveira e ao adversário a altura Joel Silveira pelas calorosas discussões futebolísticas e geotécnicas, mas principalmente pela amizade sincera. Agradeço pelo companheirismo e amizade da Sirlei Maribel, da Lia Cateri, do Leandro Spinelli e do Luiz Fernando Vanacor. Valeu, colegas!

Sou grato à hospitalidade dos amigos Juan Diaz, Pedro Ferreira, Marcelo Tessari, Marcos Strauss, Dalmar Verdade, Karla Heineck e, em especial, das amigas Ana Paula Martins, Diana Denardi e Mara Regina Bianchini pelos Briques da Redenção, pelas pedaladas no Gasômetro, pelos “xises” do Cavanhas, pelos cinemas e pela felicidade dos momentos comuns.

Obrigado à camaradagem dos parceiros de “baia”: Leandro Lorensi, Ranier Barbieri, Andriei Beber, Branca Oliveira, Jodoé Menger, Giuliana Franca, Luciana Azevedo, Horácio Burbridge, Marcelo Rigo, Giovane Rotta, Marcos Feuerharmel, Tiago Homem, Luciano Specht, Celso Pedreira, Diego Nacci, Fabiana Camargo, Alessandra Dantas, André Rossa e Fernando Pugliero. E aos das “bairas” vizinhas: Pedro Prietto, Antônio Thomé, Márcio Vendruscolo, Rinaldo Pinheiro, Cezar Bastos, Flávia Martins, Luis Angel, Rodney Fakhye e Valdenir de Souza Jr. E ao Fernando Mántaras que não se enquadra em lugar algum, mas se adapta a todos. Muito obrigado pela convivência harmônica e divertida.

Obrigado a todos colegas auxiliares de pesquisa pela cordialidade, principalmente ao Adriano, que na reta final dessa empreitada juntou-se a nós e emprestou seu tempo e dedicação para a realização dos ensaios de compressão diametral.

A todos que me fizeram sentir-me em casa, muitíssimo obrigado.

Falando em casa, obrigado pai e mãe pelo jeito que nos educaram “com ‘papo’ e com exemplos, com amor e dedicação”. Valeu sim mãe, o tempo que ficaste em casa conosco. Emocionado, eu agradeço. Obrigado “mano velho” pela parceria, pelas peraltices e pelas peleias (o Word também não reconheceu esta!) quando guris. Obrigado gurias, pela amizade e cumplicidade, mesmo que as vezes não a externamos. Amo a todos vocês.

Por fim, agradeço a Deus.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xiv
LISTA DE QUDROS.....	xv
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	xvi
RESUMO.....	xviii
ABSTRACT	xix
CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	1
1.2 OBJETIVO	3
1.3 HIPÓTESES TESTADAS	3
1.4 DEFINIÇÕES BÁSICAS	4
1.5 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	5
CAPÍTULO 2.....	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	7
2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS	8
2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS FIBROSOS	9
2.4 TIPOS DE FIBRAS UTILIZADAS EM COMPÓSITOS FIBROSOS	12
2.4.1 Fibras de vidro	13
2.4.2 Fibras de amianto.....	13
2.4.3 Fibras metálicas.....	14
2.4.4 Fibras de polipropileno	14
2.4.5 Fibras de poliéster	14
2.4.6 Fibras de polietileno	15
2.4.7 Fibras Kevlar (poliamida).....	15

2.4.8 Fibras de carbono.....	16
2.4.9 Fibras vegetais	16
2.5 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SOLOS CIMENTADOS	17
2.5.1 Relação entre as propriedades do solo e a eficiência da cimentação	17
2.5.2 Rigidez inicial e módulos de deformação.....	18
2.5.3 Plastificação: quebra das cimentações.....	18
2.5.4 Resistência	19
2.5.5 Deformação volumétrica	20
2.5.6 Modo de ruptura	20
2.5.7 Estado último.....	21
2.6 SOLO REFORÇADO COM FIBRAS	21
2.6.1 Histórico dos solos reforçados.....	22
2.6.2 Solos reforçados com fibras: estudos experimentais.....	23
2.7 RESUMO E ANÁLISE CRÍTICA DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
CAPÍTULO 3.....	37
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	37
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	37
3.2 PROJETO DE EXPERIMENTOS	37
3.3 PROJETO EXPERIMENTAL DESENVOLVIDO PARA ESTA PESQUISA.....	40
3.3.1 Fatores controláveis	40
3.3.2 Variáveis de resposta.....	43
3.3.3 Programa de ensaios	43
3.4 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA	51
3.4.1 Características dos materiais de constituição das matrizes: solo, cimento e água	51
3.4.2 Propriedades geotécnicas das matrizes: solo e solo-cimento	53
3.4.3 Propriedades mecânicas dos elementos de reforço: fibras.....	55
3.5 PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	60
3.6 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS E DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	61
3.6.1 Ensaio de compressão não-confined.....	61
3.6.2 Ensaio de compressão diametral.....	62
3.6.3 Ensaio de compressão triaxial.....	62
3.6.4 Ensaio de microscopia eletrônica de varredura.....	63

CAPÍTULO 4	64
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE PRELIMINAR DOS RESULTADOS ..	64
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	64
4.2 SOLO REFORÇADO COM FIBRAS PET	65
4.2.1 Ensaio de resistência à compressão não-confinada	65
4.2.2 Ensaio de resistência à compressão diametral.....	66
4.2.3 Ensaio drenado de resistência à compressão triaxial.....	68
4.3 SOLO REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO.....	78
4.3.1 Ensaio de resistência à compressão não-confinada	78
4.3.2 Ensaio de resistência à compressão diametral.....	80
4.3.3 Ensaio drenado de resistência à compressão triaxial.....	82
4.4 SOLO REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO	91
4.4.1 Ensaio de resistência à compressão não-confinada	91
4.4.2 Ensaio de resistência à compressão diametral.....	93
4.4.3 Ensaio drenado de resistência à compressão triaxial.....	95
4.5 RESUMO.....	100
CAPÍTULO 5	102
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	102
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	102
5.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS FIBROSOS... 102	
5.2.1 Comportamento de ruptura.....	103
5.2.2 Rigidez inicial	113
5.2.3 Estado último.....	114
CAPÍTULO 6	117
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
6.1 Conclusões	117
6.2 Sugestões para futuros trabalhos.....	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Disposição fibra/fissura idealizada (Taylor, 1994).....	12
Figura 2.2: Características de carregamento em estacas e em elementos de reforço (McGown et al ,1978).	24
Figura 3.1: Projeto composto de segunda ordem ($\alpha=0,71$).....	46
Figura 3.2: Curva granulométrica da areia de Osório/RS (Diaz, 1998).....	52
Figura 3.3: Curvas tensão x deformação axial x variação volumétrica: matriz não-cimentada. ...	54
Figura 3.4: Curvas tensão x deformação axial x variação volumétrica: matriz cimentada (PC = 7%).	56
Figura 3.5: (a) Fibras de vidro cortadas em comprimentos de 25,4 mm (b) Imagem de MEV por elétrons secundários das fibras de vidro (aumento de 230x).	57
Figura 3.6: Curvas tração x deformação das fibras PET para duas velocidades de deformação...	58
Figura 3.7: (a) Fibras PET cortadas em comprimentos de 24 mm (b) Imagem de MEV por elétrons secundários das fibras PET (aumento de 230x).	59
Figura 3.8: (a) Fibras de polipropileno cortadas em comprimentos de 24 mm (b) Imagem de MEV por elétrons secundários das fibras de polipropileno (aumento de 230x).	60
Figura 4.1: Comparação entre resultados experimentais (CF = 24mm) e a previsão de q_u pelo modelo estatístico.....	67
Figura 4.2: Superfície de resposta q_u x PF x PC.....	67
Figura 4.3: Comparação entre resultados experimentais (CF = 24 mm) e a previsão de q_{ult} pelo modelo estatístico.....	68
Figura 4.4: Superfície de resposta q_{ult} x PF x PC.....	68
Figura 4.5: Curvas tensão x deformação axial x deformação volumétrica	70
Figura 4.6: Curvas tensão x deformação axial x deformação volumétrica	71
Figura 4.7: Influência de PC e PF sobre q_{rup} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 36 mm e TC = 60 kPa).	73
Figura 4.8: Influência de PC e CF sobre q_{rup} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 0,5% e TC = 60 kPa).....	73
Figura 4.9: Influência de PC e PF sobre q_{ult} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 36 mm e TC = 60 kPa).	74

Figura 4.10: Influência de PC e CF sobre q_{ult} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 0,5% e TC = 60 kPa).....	74
Figura 4.11: Influência de PC e PF sobre I_f . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 36 mm e TC = 60 kPa).	76
Figura 4.12: Influência de PC e CF sobre I_f . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 0,5% e TC = 60 kPa).....	76
Figura 4.13: Influência de PC e PF sobre $E_{def(10\%)}$. Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF=36 mm e TC=60 kPa).	78
Figura 4.14: Influência de PC e CF sobre $E_{def(10\%)}$. Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF=0,5% e TC=60 kPa).	78
Figura 4.15: Comparação entre resultados experimentais (CF = 24 mm) e a previsão de q_u pelo modelo estatístico.....	80
Figura 4.16: Superfície de resposta q_u x PF x PC (CF = 24 mm).....	80
Figura 4.17: Comparação entre resultados experimentais (PF = 0,5%) e a previsão de q_u pelo modelo estatístico.....	80
Figura 4.18: Superfície de resposta q_u x CF x PC (PF = 0,5%).	80
Figura 4.19: Comparação entre resultados experimentais (CF = 12 mm) e a previsão de q_{ut} pelo modelo estatístico.....	82
Figura 4.20: Superfície de resposta q_{ut} x PF x PC.	82
Figura 4.21: Curvas tensão x deformação axial x deformação volumétrica.	83
Figura 4.22: Curvas tensão x deformação axial x deformação volumétrica.	84
Figura 4.23: Influência de PC e PF sobre q_{rup} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 36 mm e TC = 60 kPa).	86
Figura 4.24: Influência de PC e CF sobre q_{rup} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 0,5 % e TC = 60 kPa).....	86
Figura 4.25: Influência de PC e PF sobre q_{ult} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 36 mm e TC = 60 kPa).	87
Figura 4.26: Influência de PC e CF sobre q_{ult} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 0,5% e TC = 60 kPa).....	87
Figura 4.27: Influência de PC e PF sobre $E_{s(0,01\%)}$. Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 36mm e TC = 60 kPa).	89
Figura 4.28: Influência de PC e CF sobre $E_{s(0,01\%)}$. Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 0,5% e TC = 60 kPa).....	89
Figura 4.29: Influência de PC e PF sobre I_f . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 36mm e TC = 60 kPa).	90

Figura 4.30: Influência de PC e CF sobre I_f . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 0,5% e TC = 60 kPa).....	90
Figura 4.31: Influência de PC e PF sobre E_{def} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 36mm e TC = 60 kPa).	91
Figura 4.32: Influência de PC e CF sobre E_{def} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 0,5% e TC = 60 kPa).....	91
Figura 4.33: Comparação entre resultados experimentais (PF = 1%) e a previsão de q_u pelo modelo estatístico.....	93
Figura 4.34: Superfície de resposta q_u x CF x PC.	93
Figura 4.35: Comparação entre resultados experimentais (CF = 12,8 mm) e a previsão de q_{ut} pelo modelo estatístico.	94
Figura 4.36: Superfície de resposta q_{ut} x PF x PC.	94
Figura 4.37: Curvas tensão x deformação axial x deformação volumétrica.	95
Figura 4.38: Curvas tensão x deformação axial x deformação volumétrica.	96
Figura 4.39: Influência de PC e PF sobre q_{rup} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 25,4 mm e TC = 60 kPa).	98
Figura 4.40: Influência de PC e CF sobre q_{rup} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 1% e TC = 60 kPa).	98
Figura 4.41: Influência de PC e PF sobre $E_{def(10\%)}$. Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 25,4 mm e TC = 60 kPa).	100
Figura 4.42: Influência de PC e CF sobre $E_{def(10\%)}$. Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 1% e TC = 60 kPa).	100
Figura 5.1: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre q_{rup} das matrizes cimentada e não-cimentada reforçadas com as fibras: a) PET; b) polipropileno (PP); c) vidro (VD) (TC = 60 kPa).....	104
Figura 5.2: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre ϕ' das matrizes cimentada e não-cimentada reforçadas com as fibras: a) PET; b) polipropileno (PP); c) vidro (VD).....	105
Figura 5.3: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre c' das matrizes cimentada e não-cimentada reforçadas com as fibras: a) PET; b) polipropileno (PP); c) vidro (VD).	106
Figura 5.4: Comparação entre o efeito das fibras PET sobre q_u e q_{ut} (PC = 5%).....	107
Figura 5.5: Orientação preferencial das fibras PET.....	108
Figura 5.6: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre I_f das matrizes cimentada e não-cimentada reforçadas com as fibras: a) PET; b) polipropileno (PP); c) vidro (VD) (TC = 60 kPa).....	109
Figura 5.7: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre $E_{def(10\%)}$ das matrizes cimentada e não-cimentada reforçadas com as fibras: a) PET; b) polipropileno (PP); c) vidro (VD) (TC = 60 kPa).	111

Figura 5.8: Evolução de E_{def} da matriz cimentada não-reforçada e reforçada com fibras PET, polipropileno e vidro ($TC = 60$ kPa)	112
Figura 5.9: Corpos-de-prova rompidos em ensaios de compressão não-confinada.	113
Figura 5.10: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre q_{ult} das matrizes cimentada e não-cimentada reforçadas com as fibras: a) PET; b) polipropileno (PP); c) vidro (VD) ($TC = 60$ kPa).	115
Figura 5.11: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre ϕ'_{ult} das matrizes cimentada e não-cimentada reforçadas com as fibras: a) PET; b) polipropileno (PP); c) vidro (VD)	115
Figura 5.12: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre c'_{ult} das matrizes cimentada e não-cimentada reforçadas com as fibras: a) PET; b) polipropileno (PP); c) vidro (VD)	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Índices físicos da areia de Osório	52
Tabela 3.2: Características físicas e mecânicas do cimento tipo CP V – ARI	53
Tabela 3.3: Propriedades mecânicas da matriz não-cimentada.	55
Tabela 3.4: Propriedades mecânicas da matriz cimentada (PC = 7%)	56
Tabela 3.5: Composição química do vidro do tipo E.....	57
Tabela 3.6: Resumo das propriedades mecânicas das fibras.....	60
Tabela 4.1: Resultados experimentais dos ensaios de compressão não-confinada para o solo cimentado reforçado com fibras PET.....	65
Tabela 4.2: Resultados experimentais dos ensaios de tração por compressão diametral para o solo cimentado reforçado com fibras PET.	67
Tabela 4.3: Propriedades mecânicas da matriz não-cimentada reforçada com fibras PET	70
Tabela 4.4: Propriedades mecânicas da matriz cimentada reforçada com fibras PET	71
Tabela 4.5: Resultados experimentais dos ensaios de compressão não-confinada para o solo cimentado reforçado com fibras de polipropileno.	79
Tabela 4.6: Resultados experimentais dos ensaios de tração por compressão diametral para o solo cimentado reforçado com fibras de polipropileno.....	81
Tabela 4.7: Propriedades mecânicas da matriz não-cimentada reforçada com fibras de polipropileno.....	84
Tabela 4.8: Propriedades mecânicas da matriz cimentada reforçada com fibras de polipropileno.....	85
Tabela 4.9: Resultados experimentais dos ensaios de compressão não-confinada para o solo cimentado reforçado com fibras de vidro.....	92
Tabela 4.10: Resultados experimentais dos ensaios de tração por compressão diametral para o solo cimentado reforçado com fibras de vidro.	94
Tabela 4.11: Propriedades mecânicas da matriz não-cimentada reforçada com fibras de vidro...	96
Tabela 4.12: Propriedades mecânicas da matriz cimentada reforçada com fibras de vidro.....	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Propriedades mecânicas típicas de algumas fibras (adaptada de Taylor, 1994)...	17
Quadro 2.2: Resumo dos principais fatores que afetam o comportamento dos solos reforçados..	35
Quadro 3.1: Fatores controláveis de interesse: compressão não-confinada e tração por compressão diametral.....	41
Quadro 3.2: Fatores controláveis de interesse: compressão triaxial drenada.....	41
Quadro 3.3: Fatores controláveis mantidos fixos no programa experimental.....	43
Quadro 3.4: Características de qualidade e variáveis de respostas do programa experimental	44
Quadro 3.5: Espaço experimental e pontos experimentados dos ensaios de compressão não-confinada e de tração por compressão diametral.....	45
Quadro 3.6: Níveis dos fatores controláveis utilizados nos ensaios de compressão não-confinada e de tração por compressão diametral com fibra PET.....	47
Quadro 3.7: Níveis dos fatores controláveis utilizados nos ensaios de compressão não-confinada e de tração por compressão diametral com fibra de polipropileno.....	47
Quadro 3.8: Níveis dos fatores controláveis utilizados nos ensaios de compressão não-confinada e de tração por compressão diametral com fibra de vidro	47
Quadro 3.9: Espaço experimental e pontos experimentados dos ensaios drenados de compressão triaxial.....	50
Quadro 4.1: Quadro-resumo dos fatores que exercem influência sobre as variáveis de resposta	100

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
CBR	California Bearing Ratio
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
CID	ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados
TF	tipo de fibra
PF	porcentagem de fibra
CF	comprimento da fibra
PC	porcentagem de cimento
TC	tensão confinante (efetiva)
l/d	relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra
f_s	resistência de aderência fibra-matriz
f_a	resistência à tração da fibra
l^*	comprimento da fibra em que há movimento relativo entre a fibra e a matriz
G	módulo de cisalhamento
D	índice de amortecimento
CI	crack index
G	densidade real dos grãos do solo
e	índice de vazios
e_{min}	índice de vazios mínimo
e_{max}	índice de vazios máximo
γ_d	peso específico aparente seco
D_r	densidade relativa
D_{10}	diâmetro efetivo dos grãos do solo
C_u	coeficiente de uniformidade
w	teor de umidade

R^2_{ajustado}	coeficiente de determinação ajustado
ε_P	erro padrão da estimativa
ε_M	erro absoluto médio
q_u	resistência à compressão não-confinada
q_{ut}	resistência à compressão diametral
q_{rup}	tensão desvio de ruptura
q_{ult}	tensão desvio última
E_s	módulo de deformação secante
$E_{s(0,01\%)}$	módulo de deformação secante medido para 0,01% de deformação axial
$E_{s(0,1\%)}$	módulo de deformação secante medido para 0,1% de deformação axial
I_f	índice de fragilidade
E_{def}	capacidade de absorção de energia de deformação
$E_{def(10\%)}$	capacidade de absorção de energia de deformação calculado para 10% de deformação axial
ϕ'	ângulo de atrito interno de pico
ϕ'_{ult}	ângulo de atrito interno último
c'	intercepto coesivo de pico
c'_{ult}	intercepto coesivo último
$\varepsilon_{a(rup)}$	deformação axial de ruptura

RESUMO

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS SOLO-CIMENTO-FIBRA: ESTUDO DO EFEITO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CONSTITUINTES

Ensaio de resistência à compressão não-confinada, de resistência à tração por compressão diametral e de resistência à compressão triaxial drenada foram realizados para avaliar os efeitos da inclusão de três tipos de fibras e da adição de cimento sobre as propriedades de resistência e deformabilidade de um compósito solo-cimento-fibra. Uma areia fina uniforme, cimento Portland (CP V - ARI), fibras PET (polietileno tereftalato), fibras de polipropileno e fibras de vidro foram utilizados para este fim. Além da natureza da fibra, foi estudado o efeito da porcentagem de fibra, do comprimento da fibra, da porcentagem de cimento e da tensão confinante sobre as propriedades mecânicas do compósito. O presente trabalho busca estabelecer uma relação entre as propriedades dos materiais constituintes — fibras e matriz — e o comportamento mecânico do material compósito originado da sua combinação. Para consecução dos objetivos foi elaborado um extenso programa experimental desenvolvido a partir da teoria do projeto de experimentos. Análises de regressão múltipla permitiram uma leitura mais clara e confiável dos resultados experimentais. Ao término do trabalho concluiu-se que: (1) a influência da inclusão de fibras sobre as propriedades mecânicas do compósito depende fundamentalmente das propriedades mecânicas da fibra e da matriz; (2) fibras relativamente rígidas exercem efeito mais pronunciado na resistência de ruptura; (3) fibras relativamente flexíveis exercem efeito mais pronunciado no modo de ruptura e no comportamento último; (4) a porcentagem de cimento e a tensão confinante exercem forte influência sobre as propriedades mecânicas do compósito; (5) o efeito da inclusão das fibras é mais evidente para maiores comprimentos e porcentagens de fibra.

ABSTRACT

MECHANICAL BEHAVIOR OF SOIL-CEMENT-FIBER COMPOSITES: STUDY OF THE EFFECT OF COMPONENT MATERIALS PROPERTIES

Unconfined compression, splitting tension and drained triaxial compression (CID) tests were carried out to evaluate the effects of three type of fibers and cement inclusion on the response of a soil-cement-fiber composite to load. Glass, PET (polyethylene terephthalate) and polypropylene fibers besides an uniform fine sand were employed for this purpose. The effects of fiber length, fiber content, cement content and confining pressures on the behavior of composite were also investigated. The main objective of this study is to establish the linkage between the component materials properties and the resulting composite behavior. A comprehensive experimental program was developed based on the theory of project of experiments. Multiple regression approach has been carried out to allow a more reliable interpretation of test results. The results indicated that: (1) the influence of fiber inclusion on the behavior of soil-cement-fiber composites depends essentially on the intrinsic properties of fiber and matrix (soil or soil-cement); (2) very high modulus fiber inclusion increased the peak strength of cemented and uncemented composite; (3) very low modulus fiber inclusion changed the mode of rupture and increased the ultimate strength of cemented composite; (4) cement content and confining pressures strongly affected the properties of soil; (5) the effect of fiber inclusion was found to be more pronounced for longer fiber lengths and greater fiber contents.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

O solo natural é um material complexo e variável, porém devido à sua abundância e baixo custo oferece grandes oportunidades de emprego na engenharia. Entretanto, é comum que o solo de uma localidade não preencha parcial ou totalmente as exigências de projeto. A realização de obras de engenharia sobre solos com características geotécnicas pobres, torna-se, na maioria das vezes, inviável economicamente. Uma das alternativas de que o engenheiro geotécnico dispõe para viabilizar técnica e economicamente a construção da obra, é melhorar as propriedades do solo existente, de modo a criar um novo material capaz de preencher da melhor forma possível as exigências do projeto.

O tratamento de solos, visando melhorar suas propriedades geotécnicas, é um recurso que o engenheiro de solos tem em mãos quando se depara com solos de baixa qualidade. Existem inúmeras técnicas para a melhoria dos solos. Mitchell e Katti (1981) relacionam os principais métodos: (1) compactação; (2) consolidação por pré-carregamento e/ou drenos verticais; (3) injeção de materiais estabilizantes; (4) estabilização por processos físico-químicos; (5) reforço de solos com a inclusão de elementos resistentes (geotêxteis, fibras, grelhas, tiras).

A técnica da estabilização de solos por processos físico-químicos tem sido alvo de inúmeros estudos realizados no CPGEC-UFRGS, com ênfase no comportamento mecânico de materiais geotécnicos cimentados artificialmente como o solo-cimento e o solo-cal (Núñez, 1991; Thomé, 1994; Prietto, 1996; Vendruscolo, 1996; Rohlfes Jr., 1996; Fogaça, 1996; Carraro, 1997; Heineck, 1998; Sales, 1998; Tessari, 1998). Estes trabalhos, na sua maioria, visam o emprego da referida técnica em fundações superficiais sobre solos com propriedades geotécnicas desfavoráveis e na execução de bases de pavimentos rodoviários.

A técnica da estabilização por processos físico-químicos é eficiente no aumento da resistência mecânica, permitindo a obtenção de materiais com capacidade de suporte adequada para constituírem o solo de fundação de obras de engenharia geotécnica. Porém, a porção inferior de uma camada artificialmente cimentada executada sobre um solo menos resistente está, invariavelmente, submetida a tensões/deformações de tração, o que pode provocar o seu deterioramento pelo surgimento de trincas de tração, principalmente se o esforço solicitante for de caráter cíclico. Além disto, observa-se que se a rigidez da mistura cimentada for muito elevada (como nos casos de altos teores de cimento) ou se as condições de cura não forem adequadas, deve-se esperar a formação de trincas transversais de retração na camada cimentada, imediatamente após sua construção. O surgimento de trincas, sejam elas de tração ou retração, representa a perda da capacidade de suporte da camada cimentada. As cargas solicitantes, que deveriam ser absorvidas pelo solo estabilizado, são transferidas para o solo subjacente e as deformações plásticas neste são inevitáveis.

Recentemente, uma técnica tem sido desenvolvida para melhorar o desempenho de materiais suscetíveis a problemas derivados do surgimento de fissuras, não só no âmbito da engenharia geotécnica, mas que envolve, de maneira geral, compostos baseados em cimento Portland. Tal técnica consiste na inclusão de fibras sintéticas que atuam como elementos de reforço dos compostos desta natureza. As fibras não impedem a formação das fissuras, porém, atuam diretamente no controle da propagação destas ao longo da massa cimentada, beneficiando as propriedades mecânicas do estado pós-fissuração.

A técnica do reforço de solos pela inclusão de fibra tem sido estudada por vários pesquisadores (Gray e Ohashi, 1983; Gray e Al-Refeai, 1986; Freitag, 1986; Maher e Gray, 1990; Shewbridge e Sitar, 1990; Maher e Woods, 1990; Fatani et al., 1991; Maher e Ho, 1993; Ulbrich, 1997; Consoli et al, 1998). Esta técnica tem demonstrado eficiência quando empregada em solos cimentados e não-cimentados, devido à melhora nas propriedades mecânicas que é capaz de conferir a estes materiais, principalmente o aumento da resistência mecânica, da ductilidade e da tenacidade, e diminuição da queda de resistência pós-pico.

A utilização do solo-cimento na prática da engenharia geotécnica só não é mais difundida porque muitas vezes esbarra nos problemas relacionados ao surgimento das trincas de tração e/ou retração. Espera-se que, com a inclusão das fibras, a camada cimentada/reforçada possa suportar as cargas da solicitação, mesmo que esteja trincada, impedindo que deformações plásticas possam se desenvolver no solo subjacente.

Neste contexto, o presente trabalho tem o objetivo geral de contribuir para uma melhor compreensão do comportamento mecânico dos materiais geotécnicos cimentados e não-cimentados reforçados com fibras. De uma forma geral, o trabalho avalia os mecanismos que levam os materiais cimentados à ruptura, e sugere a inclusão de fibras como uma forma eficaz de aumentar a vida útil das camadas cimentadas.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo geral estudar o comportamento mecânico de um solo arenoso, artificialmente cimentado e não-cimentado, reforçado com fibras sintéticas de diferentes propriedades mecânicas, distribuídas aleatoriamente, sob condições axissimétricas de carregamento estático. Visa ainda contribuir para o estudo de solos reforçados, buscando estabelecer uma relação entre as propriedades individuais das matrizes e das fibras e o comportamento mecânico dos compósitos fibrosos.

Os objetivos específicos da pesquisa são avaliar, sobre as propriedades mecânicas do solo reforçado, a influência dos fatores: tipo de fibra (TF), porcentagem de cimento (PC), porcentagem de fibra (PF), comprimento da fibra (CF) e tensão confinante (TC). Além disso, busca-se verificar a existência de efeitos quadráticos destes fatores e definir as interações entre eles.

1.3 HIPÓTESES TESTADAS

Nesta pesquisa foram testadas as seguintes hipóteses:

- a) as fibras melhoram as propriedades pós-fissuração das misturas cimentadas;
- b) as propriedades mecânicas do solo reforçado dependem fundamentalmente das propriedades mecânicas do solo e do elemento de reforço;
- c) quanto maior a concentração do reforço, maior será sua contribuição para melhorar as propriedades do solo reforçado;
- d) da mesma forma, quanto maior o comprimento do reforço, maior será sua influência sobre as características do solo reforçado;

- e) o solo alvo da pesquisa, o cimento utilizado para composição da matriz cimentada e as fibras utilizadas como elementos de reforço apresentam propriedades mecânicas estáveis;
- f) as misturas solo-cimento-fibra são homogêneas e apresentam propriedades mecânicas estáveis.

1.4 DEFINIÇÕES BÁSICAS

O conceito de solo reforçado consiste em introduzir elementos no solo que apresentam resistência à tração, visto que o solo por si próprio não resiste a este tipo de sollicitação.

Material compósito é aquele originado da combinação de dois ou mais materiais que apresenta propriedades que não são encontradas nos materiais que lhe deram origem.

Material compósito fibroso é aquele compósito em que um dos materiais constituintes tem a forma de fibra (filamentos que apresentam uma das dimensões muito superior as outras duas). A fibra atua como elemento de reforço da matriz do compósito fibroso. A matriz ocupa a maior parte do volume total do compósito, e, no caso específico deste trabalho, é composta de solo (matriz não-cimentada) ou de solo-cimento (matriz cimentada).

Nos Capítulos 3 e 4, aparecem algumas denominações que merecem ser conceituadas:

- a) Efeito principal do fator controlável: o efeito principal refere-se ao efeito individual que cada fator controlável exerce sobre uma determinada variável de resposta;
- b) Efeito quadrático do fator controlável: dentro de uma faixa de variação investigada, o efeito do fator sobre uma variável de resposta não necessariamente é linear. Quando a não-linearidade acontece, diz-se que o efeito é quadrático;
- c) Interação entre fatores controláveis: nem sempre um fator controlável exerce seu efeito sobre uma variável de resposta independentemente da presença de outro. É comum que haja interação entre dois ou mais fatores, ou seja, dependendo do estado de um fator, um outro tem seu efeito maximizado ou minimizado;
- d) Níveis codificados dos fatores controláveis: para as análises de regressão múltipla não é possível utilizar os níveis reais dos fatores controláveis (porcentagem de fibra: 0,10%; 0,22%; 0,50%; 0,78%; 0,90%). Assim sendo, utiliza-se níveis codificados correspondentes (porcentagem de fibra: -1;-0,71; 0; 0,71; 1).

1.5 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A presente pesquisa foi executada de acordo com as sete etapas, a seguir descritas: (1) identificação do problema e objetivos da pesquisa; (2) revisão da literatura existente sobre o assunto; (3) planejamento do programa experimental; (4) realização dos ensaios previstos no programa experimental; (5) análise preliminar dos resultados; (6) discussão dos resultados; (7) redação final.

A primeira etapa consistiu na discussão a respeito dos benefícios e dos problemas relacionados às misturas cimentadas. A partir daí delineou-se um projeto de pesquisa que buscasse as respostas para as principais dúvidas levantadas. A síntese desta discussão, os objetivos, as hipóteses testadas e as etapas deste trabalho são apresentadas no Capítulo 1.

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

A terceira etapa, o planejamento do programa experimental, permitiu que os objetivos fossem alcançados com minimização de tempo e custo, e maximização na obtenção de resultados confiáveis. Nesta etapa, determinou-se quais respostas (características geotécnicas de resistência e deformabilidade) seriam relevantes à verificação da eficácia, ou não, da adição de fibras em misturas cimentadas e não-cimentadas. No Capítulo 3 é apresentada a descrição do programa experimental, além da descrição dos materiais utilizados na pesquisa, dos detalhes da preparação dos corpos-de-prova e das técnicas experimentais adotadas para a realização dos ensaios.

Na quarta etapa, ensaios experimentais foram realizados visando a determinação das características geotécnicas do solo cimentado e não-cimentado reforçado com fibras. Nesta etapa buscou-se medir as respostas julgadas necessárias à avaliação dos efeitos da adição de fibras aos solos.

A quinta etapa consistiu na análise preliminar dos resultados. Nesta etapa utilizou-se análise de regressão múltipla, estudos de sensibilidade e recursos gráficos, como gráficos de sensibilidade, gráficos de superfície de resposta e gráficos de contorno. Com estas ferramentas foi possível a execução de uma análise qualitativa e quantitativa dos resultados. O Capítulo 4 reúne a apresentação dos resultados e a análise preliminar dos mesmos.

A sexta etapa, materializada no Capítulo 5, teve como objetivo a busca da compreensão do mecanismo de interação solo-fibra, e se essa interação está sujeita à influência do tipo de fibra e/ou propriedades do solo.

Finalmente, a sétima etapa representa a formalização de todo o conhecimento adquirido, transmitido e gerado pelas pessoas que trabalharam neste projeto. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e feitas sugestões para as próximas pesquisas, relacionadas ao assunto abordado nesta dissertação.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No decorrer do presente capítulo será apresentada uma revisão da literatura sobre as definições e propriedades gerais dos materiais compósitos e dos materiais compósitos fibrosos. Esta revisão foi baseada em livros de engenharia de materiais de autores como Budinski (1996), Taylor (1994), Hannant (1994), Hollaway (1994), Illston (1994) e Johnston (1994).

Na seqüência, será apresentada uma revisão da literatura a respeito das propriedades químicas, físicas e mecânicas de diversos tipos de fibras que são utilizadas como elementos de reforço de materiais tradicionais empregados na engenharia civil. A natureza das fibras influencia de forma marcante suas propriedades mecânicas e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas do material compósito desenvolvido a partir delas.

Dando continuidade ao capítulo, será apresentada uma breve revisão a respeito do comportamento mecânico dos materiais geotécnicos cimentados. Esta revisão, embora breve, é importante para a devida caracterização das propriedades mecânicas do solo cimentado utilizado nesta pesquisa. Será a partir destes conhecimentos que se poderá aferir os efeitos da adição das fibras como elementos de reforço neste tipo de matriz.

Finalizando, será apresentada uma ampla revisão da literatura sobre solos reforçados com fibras, onde serão abordados, de um modo geral, os estudos realizados com vários tipos de reforços e, em particular, o tema proposto por esta pesquisa: solos artificialmente cimentados e não-cimentados reforçados com fibras sintéticas de diferentes propriedades mecânicas. Apresentar-se-á, ao final deste capítulo, um quadro resumo e uma análise crítica a respeito da revisão bibliográfica, visando apontar aqueles aspectos considerados consolidados pelos estudos anteriores e outros que merecem maior atenção.

2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Atualmente um grande número de materiais tem sido desenvolvidos, geralmente baseados em materiais tradicionais, mas incorporando de alguma forma elementos de reforço. Estes novos materiais são denominados materiais compósitos.

Um material compósito é a combinação de dois ou mais materiais que tem propriedades que os materiais componentes não têm por si próprios. Eles são, portanto, constituídos de duas fases: a matriz e o elemento de reforço e são desenvolvidos para otimizar os pontos fortes de cada uma das fases (Budinski, 1996).

Segundo Budinski (1996) os materiais compósitos mais importantes são combinações de polímeros e materiais cerâmicos. Sob a ótica da ciência dos materiais, os produtos baseados em cimento Portland são considerados como materiais cerâmicos por apresentarem características típicas a este grupo de materiais, como, por exemplo, alta rigidez, fragilidade e baixa resistência a tração. Portanto quando o termo “*cerâmica*” for mencionado neste trabalho, entenda-se, também, materiais cimentados (concreto, argamassa e solo-cimento).

As cerâmicas são os materiais mais baratos utilizados na engenharia civil. Elas tem alta resistência à compressão e são muito rígidas. Contudo, são frágeis e exibem baixa resistência a tração devido as fissuras microscópicas geralmente presentes em sua estrutura. Portanto não podem resistir grandes tensões de tração, flexão ou cargas de impacto (Taylor, 1994).

Os polímeros são caracterizados por terem baixo módulo de elasticidade, ductilidade variável e resistência à tração moderada. São extremamente versáteis e, dentro de certos limites, podem ser modificados para adaptar-se segundo necessidades específicas. Em se tratando de custos, estão tornando-se cada vez mais competitivos (Taylor, 1994).

As cerâmicas e os polímeros podem ser considerados como grupos opostos de materiais, uma vez que as primeiras são mais rígidas e frágeis e os segundos menos rígidos e dúcteis (Taylor, 1994).

Os materiais compósitos, originados da combinação das cerâmicas e dos polímeros, apresentam características mais apropriadas de resistência mecânica, rigidez, ductilidade/fragilidade, capacidade de absorção de energia de deformação e comportamento pós-fissuração, quando comparados com os materiais que lhes deram origem.

Em todas as áreas do conhecimento um grande número de novos materiais podem ser desenvolvidos a partir da combinação de outros. Para tanto, é necessário que se conheça as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais de constituição e como eles podem ser combinados.

Budinski (1996) acredita que “nós conhecemos bastante sobre os porquês que as coisas acontecem e como fazer uma ampla variedade de materiais de engenharia. [No entanto] o desenvolvimento de futuros materiais dependerá de novos conhecimentos de química e de estrutura atômica. Nós provavelmente não encontraremos nenhum outro elemento químico estável; [portanto] deveremos ser mais criativos com o que temos”.

2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS FIBROSOS

A história da utilização de compósitos reforçados com fibras como materiais de construção tem mais de 3000 anos. Há exemplos do uso de palhas em tijolos de argila, mencionados no Êxodo, e crina de cavalo reforçando materiais cimentados. Outras fibras naturais tem sido utilizadas para conferir ductilidade aos materiais de construção essencialmente frágeis (Illston,1994).

Contrastando com estes antigos materiais naturais, o desenvolvimento de polímeros nos últimos 100 anos foi impulsionado pelo crescimento da indústria do petróleo. Desde 1930 o petróleo tem sido a principal fonte de matéria prima para a fabricação de produtos químicos orgânicos, a partir dos quais são fabricados plásticos, fibras, borrachas e adesivos (Illston,1994).

Uma grande quantidade de polímeros, com variadas propriedades e formas, tem sido desenvolvidos desde 1955. Alguns destes materiais são relativamente resistentes, mas tem baixa rigidez. Eles podem ser combinados com fibras de maior rigidez e resistência mecânica, como as fibras de vidro, para formar compósitos com melhores propriedades estruturais (Illston,1994).

Por outro lado, os polímeros podem reforçar matrizes cimentadas buscando um compósito de maior ductilidade, capacidade de absorção de energia de deformação e melhores características mecânicas pós-fissuração da matriz.

Para Taylor (1994) os materiais baseados em cimento Portland são uma opção natural

para a aplicação de materiais fibrosos, uma vez que são baratos, mas apresentam problemas relativos a ductilidade, resistência ao impacto e resistência à tração e flexão.

A diferença básica entre polímeros reforçados com fibras e matrizes cimentadas reforçadas com fibras poliméricas está no mecanismo do reforço. Em se tratando de matrizes cimentadas reforçadas com fibras poliméricas, a maior parte do efeito do reforço deverá ocorrer após a matriz ter fissurado. Isto se deve ao fato de que a deformação necessária para causar fissuras na matriz cimentada é muito inferior à elongação das fibras. As fibras geralmente tem menor módulo de elasticidade que a matriz cimentada e, portanto, pouco ou nenhum aumento na tensão de fissuração é esperado (Illston,1994).

Taylor (1994) só acredita em aumento de resistência pré-fissuração do compósito se as fibras e a matriz estiverem fortemente aderidas, não havendo movimento relativo entre as partes, e se as fibras apresentarem maior rigidez que a matriz.

A elongação de ruptura das fibras é duas ou três ordens de grandeza superior às deformações de ruptura da matriz e, portanto, a matriz deve fissurar antes que a resistência das fibras tenha sido mobilizada. Para Hannant (1994) esta é a razão para que os estudos geralmente se concentrem no comportamento pós-fissuração do compósito.

Por outro lado, o módulo de elasticidade das fibras é geralmente menor que cinco vezes o da matriz cimentada, e isto, combinado com o baixo teor de fibras envolvido na mistura, significa que o módulo de elasticidade do compósito não deve ser muito diferente do módulo da matriz (Hannant, 1994).

Fibras orgânicas de baixo módulo estão sujeitas a fluência. Isto significa que se elas forem utilizadas para suportar tensões altas permanentes em um compósito fissurado, consideráveis elongações e deflexões podem ocorrer ao longo do tempo (Hannant, 1994).

Segundo Johnston (1994), as fibras em uma matriz cimentada podem, em geral, ter dois efeitos importantes. Primeiro, elas tendem a reforçar o compósito sobre todos os modos de carregamento que induzem tensões de tração, isto é, tração direta, flexão e cisalhamento, e, secundariamente, elas melhoram a ductilidade e a tenacidade de uma matriz frágil.

Para Taylor (1994) as fibras não impedem a formação de fissuras no compósito, mas elas são capazes de aumentar resistência à tração pelo controle da propagação das fissuras na matriz. As fibras mantêm as interfaces das fissuras juntas, e isto, segundo Hannant (1994),

beneficia as propriedades mecânicas do estado pós-fissuração, ou seja, aumento da ductilidade. As fibras, ao “atravessarem” as fissuras, contribuem para o aumento da resistência, da deformação de ruptura e da tenacidade dos compósitos.

O desempenho dos compósitos reforçados com fibras é controlado principalmente pelo teor e pelo comprimento da fibra, pelas propriedades físicas da fibra e da matriz e pela aderência entre as duas fases (Hannant, 1994). Johnston (1994) acrescenta o efeito da orientação e distribuição da fibra na matriz. A orientação de uma fibra relativa ao plano de ruptura, ou fissura, influencia fortemente a sua habilidade em transmitir cargas. Uma fibra que se posiciona paralela ao plano de ruptura não tem efeito, enquanto que uma perpendicular tem efeito máximo.

Taylor (1994) apresenta os principais parâmetros relacionados com o desempenho dos materiais compósitos cimentados, assumindo que as variações das propriedades descritas abaixo são atingidas independentemente:

- a) *Teor de fibra*. Um alto teor de fibras confere maior resistência pós-fissuração e menor dimensão das fissuras, desde que as fibras possam absorver as cargas adicionais causadas pela fissura;
- b) *Módulo de elasticidade da fibra*. Um alto valor do módulo de elasticidade causaria um efeito similar ao teor de fibra, mas, na prática, quanto maior o módulo maior a probabilidade de haver o arrancamento das fibras;
- c) *Aderência entre a fibra e a matriz*. As características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos cimentados reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz. Uma alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras e amplia sua distribuição pelo compósito.
- d) *Resistência da fibra*. Aumentando a resistência das fibras aumenta também a ductilidade do compósito, assumindo que não ocorre o rompimento das ligações de aderência. A resistência da fibra, dependerá, na prática, das características pós-fissuração desejadas, bem como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz;
- e) *Comprimento da fibra*. Quanto menor for o comprimento das fibras, maior será a possibilidade delas serem arrancadas. Para uma dada tensão de cisalhamento superficial aplicada à fibra, esta será melhor utilizada se o seu comprimento for suficientemente

capaz de permitir que a tensão cisalhante desenvolva uma tensão de tração igual a sua resistência à tração.

Na verdade não basta raciocinar tão somente em cima do comprimento da fibra. Há de se levar em conta o seu diâmetro. Pois depende também dele a capacidade da fibra desenvolver as resistências ao cisalhamento e à tração. A Figura 2.1 apresenta uma disposição idealizada da fibra em relação à fissura, seguido de um equacionamento onde fica evidente a importância da relação l/d , onde “ l ” é o comprimento e “ d ” é o diâmetro da fibra (Equação 2.1).

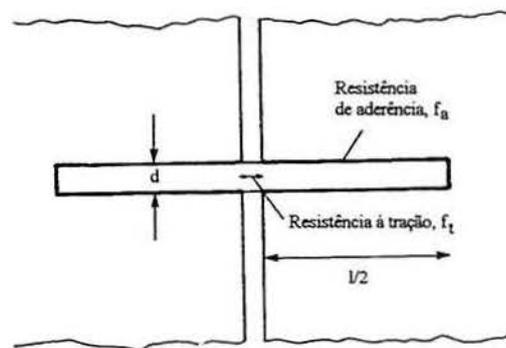


Figura 2.1: Disposição fibra/fissura idealizada.
Fonte: Taylor (1994).

$$\frac{\pi d^2}{4} \times f_t = \pi d \times \frac{l}{2} \times f_a$$

$$\frac{l}{d} = \frac{f_t}{2f_a} \quad (2.1)$$

A relação l/d é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra e a resistência de aderência fibra/matriz, na ruptura. Em grande parte, a tecnologia dos materiais compósitos depende desta simples equação: se a fibra tem uma alta resistência à tração, por exemplo, como o aço, então 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 (Taylor, 1994).

2.4 TIPOS DE FIBRAS UTILIZADAS EM COMPÓSITOS FIBROSOS

Existe uma ampla variedade de fibras utilizadas em compósitos fibrosos. As propriedades químicas, físicas e mecânicas das fibras estão intimamente relacionadas à sua

natureza de constituição e ao seu processo de fabricação. Abaixo são apresentados alguns dos tipos de fibras que são empregadas como elementos de reforço em materiais compósitos fibrosos.

2.4.1 Fibras de vidro

As fibras de vidro são geralmente manufaturadas na forma de “cachos”, ou seja, fios compostos por centenas de filamentos individuais. O diâmetro dos filamentos individuais depende das propriedades do vidro, do tamanho do furo por onde são extrusados e da velocidade de extrusão, mas geralmente são da ordem de 10 μm (Taylor, 1994).

Os fios podem ser combinados para formar tecidos ou podem ser simplesmente cortados em comprimentos variados. Os tecidos conferem altas características de resistência e rigidez na direção das fibras, quando estas são orientadas. As fibras cortadas são comercializadas como “*chopped strand*” e proporcionam uma distribuição aleatória de elementos de reforço no compósito (Hollaway, 1994).

Cerca de 99% das fibras de vidro são produzidas a partir do vidro tipo E. No entanto, este tipo de vidro é atacado pelos álcalis presentes nos materiais baseados em cimento Portland. Uma fibra especial, denominada comercialmente de “*Cem-Fil*”, resistente aos álcalis está sendo desenvolvida para o uso em pastas cimentadas.

2.4.2 Fibras de amianto

Desde que ocorrem naturalmente, seu uso é, talvez, mais tradicional que os outros tipos de fibras. As fibras de amianto apresentam uma resistência à tração média de 1000 MPa. Quanto menores as fibras maior é a resistência esperada. O módulo de elasticidade é de aproximadamente 160 GPa. O diâmetro é muito pequeno, aproximadamente 1 μm . Este pode ser um dos fatores que explica a excelente aderência das fibras com a matriz cimentada (cimento amianto) (Taylor, 1994).

Contudo, as estatísticas têm mostrado o rápido decréscimo do consumo de placas de cimento amianto, devido, principalmente, aos danos à saúde provocados pelas fibras de amianto. Outro problema relacionado a este produto é seu caráter essencialmente frágil e a resistência ao impacto notadamente baixa (Hannant, 1994).

2.4.3 Fibras metálicas

As fibras metálicas mais comuns são as de aço. Elas são relativamente grossas, por exemplo, 300 μm de diâmetro. Desde que não é usual que o material compósito rompa devido à ruptura da fibra de aço (a ruptura do compósito está relacionada com o arrancamento das fibras), não há razão para se aumentar a resistência à tração acima da obtida com aços comuns (baixo teor de carbono). A resistência à tração é de aproximadamente 1100 MPa e o módulo de elasticidade de 200 GPa. As fibras podem ser niqueladas para aumentar sua resistência à corrosão (Taylor, 1994).

Hannant (1994) acrescenta que uma grande variedade de formas e comprimentos podem ser obtidos, dependendo do processo de manufatura. Elas podem sofrer deformação mecânica em várias formas para aumentar a resistência de aderência.

2.4.4 Fibras de polipropileno

As fibras de polipropileno são constituídas de um tipo de plástico denominado de termoplástico. Os polímeros termoplásticos consistem de uma série de longas cadeias de moléculas polimerizadas. Todas as cadeias são separadas e podem deslizar umas sobre as outras (Hollaway, 1994).

Esta característica explica a grande flexibilidade e tenacidade das fibras de polipropileno, que concede substancial aumento de resistência ao impacto aos materiais a que é incorporada. O módulo de elasticidade é menor do que qualquer outra fibra comumente utilizada, aproximadamente 8 GPa. Esta propriedade não a recomenda para ser utilizada com a finalidade de aumentar a resistência pré-fissuração ou rigidez dos materiais. A resistência à tração é de aproximadamente 400 MPa. Fibras de polipropileno são resistentes a uma variedade de produtos químicos e aos álcalis (Taylor, 1994). As fibras de polipropileno podem ser encontradas comercialmente na forma de monofilamentos picados ou na forma de malhas contínuas. Estas últimas apresentam melhor embricamento com a matriz, e por isso, a probabilidade de arrancamento é menor.

2.4.5 Fibras de poliéster

A aparência das fibras de poliéster é similar a aparência das fibras de polipropileno.

Porém, são mais densas, mais rígidas e mais resistentes. Elas podem ser usadas para as mesmas aplicações que as de polipropileno, mas onde a melhora na performance justifique o seu maior custo (Taylor, 1994). Um dos poliéster mais conhecido é o polietileno tereftalato (PET), atualmente utilizado largamente como material de constituição das garrafas plásticas tipo “PET”.

A durabilidade do poliéster em matrizes cimentadas é questionável e controverso. Alguns autores afirmam que há forte deterioração do poliéster na presença do cimento, e isso provoca rápida perda da resistência mecânica da fibra. Outros autores indicam que a inclusão de pozolana reativa pode inibir esta deterioração. O problema da durabilidade das fibras de poliéster é complicado, pois nem todos os poliésteres são sujeitos ao ataque dos álcalis, mas a distinção entre aqueles que são e os que não são é duvidosa no momento (Johnston, 1994).

2.4.6 Fibras de polietileno

As fibras de polietileno de peso molecular normal tem um módulo de elasticidade baixo, são fracamente aderidas à matriz cimentada e são altamente resistentes aos álcalis. Contudo, polietileno com alta densidade tem sido desenvolvido para aumentar o módulo e a aderência com a matriz. Como não sofrem variação volumétrica na presença da água, a durabilidade dos produtos é alta, mas apresentam maiores deformações de fluência quando comparadas com as fibras de polipropileno. Como as fibras de polipropileno, as de polietileno também são encontradas comercialmente na forma de monofilamentos picados ou malhas contínuas (Hannant, 1994).

2.4.7 Fibras Kevlar (poliamida)

É a fibra orgânica comercial de maior sucesso e recebeu o nome comercial de Kevlar. As fibras Kevlar são constituídas de um polímero denominado de poliamida.

Há dois tipos: Kevlar 29, com resistência mecânica da ordem de 3000 MPa e módulo de elasticidade intermediário de aproximadamente 64 GPa; e Kevlar 49, com um alto módulo de elasticidade, 300 GPa, e a mesma resistência mecânica que a Kevlar 29. Kevlar 49 é preferida pela alta performance conferida aos materiais compósitos fibrosos (Hollaway, 1994).

2.4.8 Fibras de carbono

Estes materiais são os mais novos e mais promissores no desenvolvimento de materiais compósitos. São baseados na resistência das ligações carbono-carbono e na leveza do átomo de carbono. As fibras tem aproximadamente 10 μm de diâmetro. Há duas categorias principais: fibras de alta resistência com resistência à tração última de aproximadamente 2400 MPa e módulo de elasticidade de 240 GPa; e fibras de alto módulo com resistência a tração última de 2100 MPa e módulo de 420 GPa. Com resistências desta ordem, é importante que a resistência de ligação com a matriz seja alta, caso contrário estas resistências não serão mobilizados e as fibras serão arrancadas sob cargas menores (Taylor, 1994).

2.4.9 Fibras vegetais

O uso de fibras vegetais em países em desenvolvimento visa geralmente o emprego da mão-de-obra barata para construção de placas, painéis e paredes. As fibras vegetais utilizadas em materiais compósitos podem ser de bambu, juta, capim elefante, malva, coco, piaçava, sisal, linho e cana-de-açúcar. As fibras podem ter até 1 m de comprimento e são manualmente inseridas na matriz de areia e cimento. As placas de dimensões de 1 x 2 x 0,1 m podem ser produzidas com fibras segundo direções preferenciais (Hannant, 1994).

O bambu, quando separado em tiras e tecido em malhas, tem sido usado como reforço para uma variedade de usos. A resistência à tração das fibras é normalmente maior que 100 MPa, com módulo de elasticidade entre 10 e 25 GPa. O objetivo do uso das fibras de bambu é melhorar o desempenho pós-fissuração. Os teores adicionados ficam entre 1,5 e 3% em volume (Hannant, 1994).

Savastano et al. (1997) estudaram a viabilidade técnica e econômica do uso de fibras vegetais e de outros resíduos industriais em sistemas alternativos de cobertura de baixo custo. A pesquisa da disponibilidade de fibras para estes fins abrangeu várias regiões do Brasil. O trabalho está em andamento, mas até o momento as fibras de sisal, malva, coco e polpa de celulose apresentam os melhores resultados em termos de energia de deformação e tração na compressão diametral.

O Quadro 2.1 apresenta um resumo das principais propriedades mecânicas dos diferentes tipos de fibras apresentados nos parágrafos anteriores.

Quadro 2.1: Propriedades mecânicas típicas de algumas de fibras (adaptada de Taylor, 1994).

Tipo de fibra	Densidade relativa	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração última (MPa)	Deformação na ruptura (%)	Compatibilidade com cimento ^(b)
Carbono (alto módulo)	1,90	420	2100	0,5	Boa
Carbono (baixo módulo)	1,90	240	2400	1	Boa
Aço (baixo carbono)	7,80	200	1100	-	Boa
Amianto	2,60	160	200-2000	2	Boa
Kevlar	1,45	130	3000	2-3	Satisfatória
Vidro (E-glass)	2,55	70	3000	5	Pobre
Poliéster	1,38	14	1100	15	Variável
Polipropileno (fibrilada)	0,90	8	400	7	Boa
Polietileno ^(a)	0,96	10	300	4	Boa
Vegetal (Bambu) ^(a)	-	10-25	100	-	-

Fonte: (a) Hannant (1994); (b) Johnston (1994).

2.5 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SOLOS CIMENTADOS

A presença de agentes cimentantes no solo irá provocar mudanças substanciais nas propriedades geotécnicas do material. Estas modificações dependerão das características específicas do solo, do teor de adição, da quantidade de água, do tipo e do grau de compactação, do tipo e do tempo de cura. De maneira geral, a adição de cimento aumentará a resistência e a rigidez, diminuirá a compressibilidade e alterará os limites de consistência; a condutividade hidráulica será reduzida nos solos granulares, mas aumentará nos solos argilosos; a durabilidade medida em ciclos de molhagem e secagem aumentará. Estes aspectos são fundamentais para a discussão dos resultados experimentais, uma vez que para a compreensão do comportamento do material compósito é necessário compreender cada uma das suas fases constituintes.

2.5.1 Relação entre as propriedades do solo e a eficiência da cimentação

Clough et al. (1981), Fanyu et al. (1995) e Chang e Woods (1992) estudaram o comportamento mecânico de areias naturalmente e artificialmente cimentadas sob carregamento estático. Eles observaram que as areias cimentadas com considerável

porcentagem de finos e com melhor distribuição granulométrica são mais resistentes que aquelas com poucos finos e mal graduadas. Eles acreditam que com estas características os pontos de contatos são mais numerosos, permitindo vínculos cimentantes mais numerosos entre os grãos de areia. Os autores também verificaram que para um mesmo teor de cimento, o efeito da cimentação é mais fraco em areias fofas do que em areias densas. Provavelmente a porcentagem de vazios preenchidos pelo cimento é maior para as areias densas.

2.5.2 Rigidez inicial e módulos de deformação

Diversos autores tem estudado o comportamento rígido dos materiais cimentados a pequenas deformações (Clough et al., 1981; Lade e Overton, 1989, Leroueil e Vaughan, 1990; Bressani, 1990; Chang e Woods, 1992; Bressani et al., 1994; Prietto et al., 1997), verificando através da análise dos módulos de deformação, o aumento da rigidez com a cimentação.

Chang e Woods (1992) estudaram o efeito de diversos tipos de cimentação no módulo de cisalhamento das areias. Mostraram que o módulo de deformação cisalhante cresce com o incremento da cimentação. Além do grau da cimentação, o módulo é afetado pelas propriedades do material cimentante e pelas características granulométricas do solo.

Bressani (1990), ao estudar o comportamento de um solo artificial cimentado com diferentes composições, grau de cimentação e índices de vazios, mostrou que o solo artificial exhibe uma queda na rigidez normalizada com a tensão de confinamento que não é comum para solos não-cimentados. A variação do módulo secante é função da tensão confinante, do grau de cimentação, do índice de vazios e da composição mineralógica do solo.

2.5.3 Plastificação: quebra das cimentações

Para Leroueil e Vaughan (1990), o ponto de plastificação é representado por uma descontinuidade no comportamento tensão x deformação e a plastificação da estrutura é representada por uma mudança irreversível na rigidez e resistência do material. Para os autores, a estrutura dos solos é tão importante quanto o índice de vazios inicial e a história de tensões na determinação do seu comportamento. Eles acreditam que os conceitos de plastificação desenvolvidos para descrever os efeitos da história de tensões em depósitos argilosos sedimentares é igualmente aplicável aos efeitos da estrutura.

Vaughan et al. (1988) verificaram que há dois pontos de plastificação nos materiais geotécnicos cimentados. Durante as deformações, um solo cimentado apresenta maior rigidez que o mesmo solo não cimentado. Em algum momento, alguns pontos começam a plastificar e o primeiro ponto de plastificação é observado. Contudo, o solo ainda é mais rígido do que seria o seu similar não cimentado. Em algum outro ponto, o decréscimo da resistência dos vínculos torna-se igual a tensão atuante sobre eles, e o segundo ponto de plastificação aparece. Tipicamente, isto é seguido por grandes deformações e o solo torna-se desestruturado.

Coop e Atkinson (1993) verificaram que os solos cimentados sob compressão isotrópica e uni-direcional apresentam um ponto de plastificação mais pronunciado em relação ao solo não-cimentado, cujo valor aumenta com o aumento da cimentação. A desestruturação após o ponto de plastificação parece ser um longo e contínuo processo, que é completado somente após grandes deformações.

Rotta et al. (1998) investigaram experimentalmente o procedimento usual de obtenção da rigidez de solos cimentados em ensaios triaxiais convencionais, fixando-se na influência da aplicação de tensões confinantes antes e após a cimentação do solo. Os autores verificaram que a degradação da cimentação causou nas amostras curadas sem confinamento, a queda da rigidez inicial com a tensão de confinamento, ao passo que nas amostras curadas sob tensão verificou-se o aumento da rigidez com a tensão de confinamento.

2.5.4 Resistência

Segundo Saxena e Lastrico (1978), o comportamento do solo é compreendido através do entendimento de três componentes da resistência ao cisalhamento: coesão, dilatância e fricção. A coesão inclui qualquer cimentação natural ou artificial ou ligações entre as partículas. A fricção e a dilatância são difíceis de separar, mas são ambas funções diretas da tensão efetiva normal atuante no plano de cisalhamento. No caso de solos cimentados, a parcela da coesão é predominante para baixos níveis de deformação. Além de certa deformação, há uma gradual quebra das cimentações e a resistência friccional começa a predominar. Após grandes deformações, com a quebra total da matriz de cimentação, a resistência ao cisalhamento é de natureza inteiramente friccional.

Clough et al. (1981) observaram que a resistência de pico aumenta com o grau de

cimentação e que a deformação necessária para a mobilização da resistência de pico é menor com a cimentação. Os autores não reconhecem aumento do ângulo de atrito interno. Eles atribuem o aumento da resistência de pico ao aumento do intercepto coesivo.

Outros autores como Lade e Overton (1989) divergem quanto à influência da cimentação no ângulo de atrito interno. Segundos estes autores, o aumento no ângulo de atrito, para baixas tensões de confinamento, é causado pelo maior intertravamento proporcionado pelos grãos maiores formados a partir da cimentação dos grãos menores. O aumento do intertravamento faz com que aumente a taxa de dilatância, que por sua vez aumenta o ângulo de atrito interno. Prietto (1996) também encontrou aumento do ângulo de atrito com a cimentação.

2.5.5 Deformação volumétrica

Yoshinaka e Yamabe (1981) observaram que para a faixa de tensões onde o material cimentado apresenta comportamento frágil, as deformações volumétricas podem ser separadas em dois estágios: (1) uma compressão inicial até um ponto próximo à ruptura e (2) na seqüência, um comportamento expansivo, cuja taxa de dilatância decresce gradualmente à medida que o cisalhamento progride, tendendo finalmente a um estado último onde não há variação volumétrica.

Clough et al. (1981) observaram que quanto maior for o teor de cimento, maior será a variação volumétrica para as deformações axiais iniciais. Lade e Overton (1989) afirmam que a cimentação provocou a ocorrência de dilatância em materiais que originalmente não apresentavam esta característica.

2.5.6 Modo de ruptura

Clough et al. (1981) notaram que independentemente da natureza da cimentação (artificial ou natural), o modo de ruptura para materiais fracamente cimentados é frágil para menores tensões de confinamento e dúctil para maiores tensões de confinamento. Segundo os autores, para baixas tensões de confinamento a contribuição da cimentação é mais significativa que a componente friccional. Para tensões de confinamento maiores, a componente friccional torna-se mais eficiente e o comportamento torna-se dúctil. No caso de areias fortemente cimentadas, a contribuição do cimento é mais significativa mesmo para

maiores tensões de confinamento, e o comportamento é sempre frágil.

Leroueil e Vaughan (1990) afirmam que a cimentação aumenta o domínio de tensões onde o solo apresenta comportamento frágil.

Yoshinaka e Yamabe (1981) avaliaram através de um índice denominado índice de fragilidade (I_f) (Bishop, 1967; citado pelos autores) a maior ou menor fragilidade de rochas sedimentares brandas:

$$I_f = \frac{q_{rup}}{q_{ult}} - 1 \quad (2.2)$$

onde q_{rup} é a tensão de ruptura e q_{ult} é a tensão última. Quanto maior o valor de I_f , maior é a fragilidade do material, ao passo que I_f decresce com o aumento da tensão de confinamento. Quanto maior forem as características de ductilidade do material, menor será o valor de I_f .

2.5.7 Estado último

O estado último define o estado onde tanto a tensão de cisalhamento como a deformação volumétrica não variam com a deformação de cisalhamento. Vários autores relataram dificuldades na caracterização do estado último de materiais cimentados quando se verifica a ruptura frágil (Yoshinaka e Yamabe, 1981; Coop e Atkinson, 1993; Aversa et al., 1993).

2.6 SOLO REFORÇADO COM FIBRAS

Este item apresenta o estado do conhecimento a respeito de solos reforçados com fibras. Primeiramente será apresentado um breve histórico sobre a técnica de reforço de solos. Na seqüência, serão abordados aspectos gerais a respeito de solos reforçados e serão apresentados, resumidamente, 26 trabalhos experimentais publicados na literatura nacional e internacional, abrangendo os últimos 20 anos de estudo sobre a técnica de reforço de solos com fibras. Finalizando este capítulo, os tópicos principais da revisão bibliográfica serão resumidos em um quadro-resumo e será feita uma análise crítica da mesma, onde serão salientados aqueles pontos onde há divergências entre os autores e aspectos julgados interessantes para serem discutidos.

2.6.1 Histórico dos solos reforçados

A técnica de reforço de solos consiste em se introduzir elementos no maciço que possuam resistência à tração relativamente elevada. A prática de reforço de solos é muito antiga. A idéia de associar elementos de reforço, filtração, drenagem, separação e proteção a obras geotécnicas sempre acompanhou a história da humanidade. Por volta de 1000 a.C., hastes de bambu e junco eram empregadas no reforço de tijolos de barro e ainda de solos granulares para auxiliar na construção de diversas obras de terra (Abramento, 1998).

A utilização de inclusões nos solos para melhoria de suas propriedades já era do conhecimento de povos da antiguidade. Uma das várias provas disto, ainda existente nos dias de hoje, são as muralhas de Ziggurat de Agar Quf, na Mesopotâmia (1400 a.C.), construídas utilizando-se camadas intercaladas de solo e mantas de raízes. Partes da Muralha da China foram também construídas com inclusões de mantas de raízes. Os Incas utilizavam lã de lhama misturadas ao solo na construção de estradas que resistem ao tempo até os presentes dias. São também conhecidas aplicações de mantas de folhas e galhos sobre camadas de solos de fundação moles, antes da construção de aterros, no interior do Brasil e em outros países (Palmeira, 1992).

A aplicação pioneira do que mais se aproxima de um geossintético dos dias de hoje foi provavelmente a utilização de mantas de algodão, em 1926, pelo Departamento de Estradas da Carolina do Sul (Estados Unidos) como reforço de camadas asfálticas em pavimentos (Palmeira, 1992).

No contexto atual, entretanto, solos reforçados começaram a ser empregados no início dos anos 70, quando Henry Vidal, Vidal (1966) citado por Abramento (1998), patenteou a técnica denominada "Terra Armada". Neste caso, o reforço do maciço de solo era conseguido através da introdução de tiras metálicas conectadas a painéis de concreto, que constituíam a face do maciço.

No Brasil, o uso de geossintéticos data do início dos anos 70, principalmente em obras de drenagem e filtração. A utilização de geossintéticos no Brasil inicia a sua aceleração no final dos anos 70 e início dos anos 80, com obras não só envolvendo aplicações em drenagem e filtração, mas também com utilização de geossintéticos como reforço de solos. Apesar do substancial crescimento no interesse em geossintéticos no país nos últimos anos, tal interesse ainda pode ser considerado tímido. Para Palmeira (1995), o desenvolvimento da pesquisa

sobre geossintéticos, principalmente nos últimos 6 anos, tem contribuído para alavancar a utilização destes materiais na geotecnia.

Segundo Palmeira (1995), os tipos de geossintéticos disponíveis são denominados como geotêxteis, geogrelhas, geomalhas, geomembranas, tiras, fibras e geocompostos. Os geotêxteis são os mais tradicionalmente conhecidos, sendo compostos de fibras têxteis ordenadas ou dispostas aleatoriamente, e utilizados como elementos de reforço, separação, drenagem, filtração e proteção. As geogrelhas são grelhas plásticas utilizadas como elementos de reforço. As geomalhas são estruturas planas com elevado volume de vazios para utilização como meio drenante. As geomembranas se constituem de elementos de baixíssima permeabilidade para utilização como barreiras impermeáveis em obras de engenharia civil. O geocomposto foi um termo criado para denominar o material originado da combinação de dois ou mais geossintéticos apresentados acima. O fibrosolo consiste na mistura de solo e fibras sintéticas para utilização em pavimentos e aterros de estruturas de contenção.

2.6.2 Solos reforçados com fibras: estudos experimentais

McGown et al. (1978) estudaram os efeitos da inclusão de diferentes elementos de reforço em um solo arenoso nos estados denso e fofo. Eles observaram que o comportamento tensão x deformação do solo reforçado depende fundamentalmente das características de resistência e deformabilidade dos elementos de reforço. Baseado no mecanismo de reforço, os autores propuseram a divisão de reforço de solos em dois tipos: “Reinforced Earth[®]” ou Terra Armada (Vidal, 1966) e “Ply-soil”. No primeiro, os elementos de reforço tem deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração no solo sem reforço, sob uma mesma condição de tensão. Os elementos de reforço, denominados de idealmente não-extensíveis, podem ou não romper dependendo da sua resistência à tração última. No segundo tipo, os elementos de reforço tem deformação de ruptura maior que a máxima deformação de tração no solo sem reforço. Os elementos de reforço, denominados de idealmente extensíveis, não rompem, e a sua resistência última não é importante. Os elementos não-extensíveis conferem ganho de resistência mecânica, mas rupturas catastróficas podem ocorrer se o reforço romper. Os elementos extensíveis conferem algum ganho de resistência, mas a principal função é de aumentar a ductilidade e diminuir a perda de resistência pós-pico quando comparada com o solo somente ou com sistemas onde os elementos são não-extensíveis.

McGown et al. (1978) e Andrawes et al. (1980) comparam o mecanismo de interação

de um sistema estaca de fundação/solo (que pode ser considerado como a inclusão mais antiga e mais empregada no mundo) com o mecanismo de interação de um sistema elemento de reforço/solo. As estacas podem estar submetidas a cargas externas de compressão ou tração, que por sua vez induzem deformações internas no solo. É interessante observar que em sistemas de solos reforçados ocorre exatamente o contrário: cargas externas solicitam o solo e induzem deformações internas no mesmo, que por sua vez acabam por solicitar o elemento de reforço (Figura 2.2). Em resumo, a magnitude e o sinal das forças nas estacas são controlados pela natureza das cargas externas aplicadas, enquanto a magnitude e o sinal das forças em outros sistemas de inclusões são controlados pela magnitude e sinal das deformações do solo. Para os autores, a compreensão do mecanismo de interação reforço/solo é fundamental para o bom desempenho dos elementos de reforço. Outra importante conclusão que emerge destas observações é que uma metodologia de dimensionamento ou um modelo de previsão de comportamento não pode ser baseado unicamente em uma análise de equilíbrio de tensões limites. Assim sendo, os solos reforçados devem ser tratados como materiais compósitos, e, desta forma, o comportamento de cada um dos constituintes e suas interações devem ser conhecidos.

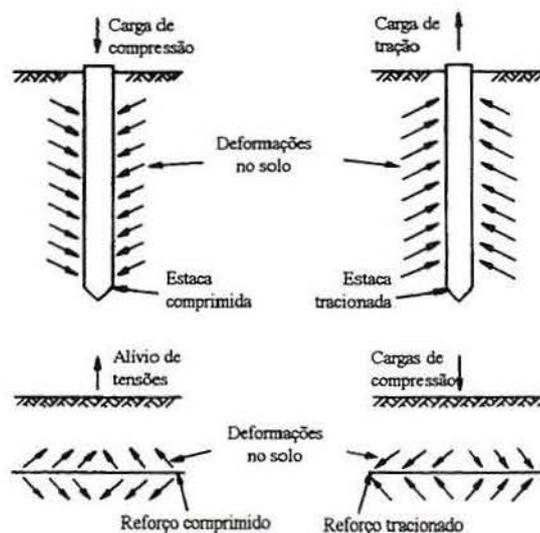


Figura 2.2: Características de carregamento em estacas e em elementos de reforço.
Fonte: McGown et al (1978)

Gray e Ohashi (1983) afirmam que o reforço de solos é uma técnica eficaz para aumentar a resistência e estabilidade dos solos. A técnica é usada hoje em uma variedade de aplicações variando desde estruturas de contenção até aterros para estabilização de sub-leito de fundações e pavimentos. Os elementos de reforço podem variar na forma (tiras, placas, malhas, barras ou fibras), textura (lisa ou rugosa), e rigidez relativa (alta como aço ou baixa

como as materiais poliméricos). Para Gray e Ohashi o reforço de fibras é importante tanto na prática de engenharia quanto na natureza. O reforço de solos com raízes de plantas contribui de forma marcante para a resistência ao cisalhamento dos solos e é responsável pela estabilidade de alguns taludes naturais. Os autores estudaram o efeito da inclusão de fibras (naturais e sintéticas) e arames metálicos na resistência ao cisalhamento de areia (nos estados fofo e denso) através de ensaios de cisalhamento direto. As conclusões foram: (1) fibras com baixo módulo de elasticidade comportam-se como elementos idealmente extensíveis (McGown et al., 1978) e não rompem durante o ensaio; (2) há uma tensão de confinamento crítica (σ_{crit}) abaixo da qual as fibras parecem ser arrancadas; (3) acima da σ_{crit} as fibras são esticadas, mas nenhuma delas rompeu durante o ensaio; (4) as fibras não alteram o ângulo de atrito interno de areias; (5) o aumento do comprimento das fibras aumenta a resistência ao cisalhamento das areias, mas só até um ponto, a partir do qual não é mais observado este efeito; (6) quanto maior o teor de fibra adicionado maior é a resistência ao cisalhamento; (7) fibras orientadas à 60° da superfície de ruptura são mais efetivas para o aumento da resistência ao cisalhamento.

McGown et al. (1988) estudaram a influência de elementos de reforço na forma de malhas poliméricas distribuídas aleatoriamente na resistência de um solo granular. Foram realizados vários ensaios triaxiais drenados, e verificou-se que há aumento da tensão desvio para todas as tensões de confinamento usadas e para todos os níveis de deformação com a inclusão das malhas. Observou-se também que houve uma resposta positiva por parte da tensão desvio quando o teor de malhas na mistura foi aumentado.

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

Gray e Al-Refeai (1986) realizaram um estudo, baseado em ensaios triaxiais, que

objetivava avaliar as diferenças no comportamento tensão x deformação de uma areia reforçada com geotêxteis orientados em camadas em contraposição à fibras discretas distribuídas aleatoriamente. Neste estudo verificou-se que há similaridades e diferenças entre os dois tipos de reforços. Similaridades: (1) o aumento da quantidade de reforço aumenta a resistência de pico e reduz a perda de resistência pós-pico; (2) para ambos os sistemas existe uma tensão crítica, acima da qual as envoltórias de ruptura são paralelas à envoltória da areia não reforçada. Diferenças: (1) com reforços orientados ocorre ruptura por inchamento entre as camadas, enquanto a ruptura com fibras é clássica (superfície plana); (2) para baixos níveis de deformação há diminuição da rigidez para sistemas de reforços orientados, enquanto para fibras ocorre aumento da rigidez para todos os níveis de deformação.

Gray e Maher (1989) e Maher e Gray (1990) argumentam que uma massa de solo estabilizada com fibras distribuídas aleatoriamente assemelha-se a reforços tradicionais de solos em suas propriedades, mas imitam, na sua preparação, os solos estabilizados com cimento, cal e outros aditivos. Uma das principais vantagens de fibras distribuídas aleatoriamente é a manutenção da resistência isotrópica e a ausência de planos de fraqueza que podem ser desenvolvidos em sistemas de reforço orientado. Neste trabalho foram analisados a influência de diversos parâmetros das fibras e dos solos sobre o comportamento tensão x deformação das misturas. Os autores concluíram que as envoltórias de ruptura são curvas ou bi-lineares configurando a existência de uma tensão de confinamento crítica (σ_{crit}) abaixo da qual as fibras são arrancadas sob carregamento. O aumento da relação l/d resulta na redução da σ_{crit} , e torna mais efetivo o efeito da contribuição da fibra para o aumento da resistência ao cisalhamento. A resistência ao cisalhamento aumenta linearmente com o teor de fibra até um limite, a partir do qual o efeito não parece ser significativo. Fibras com baixo módulo de elasticidade não contribuíram para o aumento de resistência. A superfície de ruptura em ensaios de compressão triaxial de areias reforçadas com fibras distribuídas aleatoriamente é plana e orientada segundo a teoria de Mohr-Coulomb. Estes resultados sugerem uma ação isotrópica do reforço, sem desenvolvimento de planos de fraqueza.

Shewbridge e Sitar (1989) examinaram o mecanismo de desenvolvimento da zona de cisalhamento em um solo reforçado. Para tanto foi utilizado uma máquina de cisalhamento direto cujas dimensões eram maiores que as convencionais. Os autores concluíram que as zonas de cisalhamento são mais largas nos solos reforçados e que a largura da zona de cisalhamento aumenta com a concentração e rigidez do reforço e com a aderência solo/reforço.

Shewbridge e Sitar (1990) propuseram um modelo baseado na deformação de solos reforçados. Eles estudaram o efeito da concentração e rigidez do reforço e da aderência areia/reforço no comprimento do reforço, l^* , onde há mobilização total da resistência friccional. O modelo assume a hipótese de que qualquer deslocamento relativo entre o solo e o elemento de reforço gera mobilização total da resistência friccional, e por consequência, arrancamento do reforço. Os resultados indicam que o aumento da concentração de reforço e da aderência areia/reforço provoca a diminuição de l^* , ou seja, diminui a região onde há deslocamento relativo areia/reforço, indicando materiais compatíveis quanto a características de deformação, reduzindo a tendência de arrancamento do reforço. Em contrapartida, o aumento do módulo de rigidez do reforço provoca aumento de l^* , ou seja, aumento da região onde há deslocamento relativo, fazendo com que os materiais seja menos compatíveis e favorecendo o arrancamento do reforço.

Maher e Woods (1990) estudaram o comportamento de areias reforçadas com fibras distribuídas aleatoriamente sob cargas dinâmicas. Os autores concluíram que a inclusão das fibras influencia significativamente as respostas dinâmicas das areias através das medidas do módulo cisalhante (G) e do índice de amortecimento (D). Quanto maior a amplitude da deformação cisalhante mais efetiva é a contribuição das fibras para G , mas reduz a contribuição para D . A contribuição das fibras para G é mais marcante para baixas tensões de confinamento (21-48 kPa) e é indiferente para D . Um aumento na relação l/d e no teor de fibras resulta em uma mais efetiva contribuição das fibras nas respostas dinâmicas da areia. Um aumento do módulo de elasticidade, E , contribui apenas para o aumento de G , mas é nulo para D .

Shewbridge e Sousa (1991) realizaram uma série de ensaios de cisalhamento dinâmico em amostras de areia reforçadas e não-reforçadas para avaliar a influência dos reforços nas propriedades dinâmicas da areia. As amostras tinham formato de cilindros vazados e possuíam 0,457 m de altura, 0,229 m de diâmetro externo e 0,025 m de espessura. Os elementos de reforço consistiam em barrotos de aço orientados uniaxialmente e biaxialmente. Os resultados indicaram que a pressão de confinamento e o nível de deformação afetam o módulo de cisalhamento dinâmico e o amortecimento de areias reforçadas e não-reforçadas, e a frequência de aplicação da carga não afeta estas variáveis de resposta. Os resultados mostraram ainda que os reforços alteram o modo de deformação da areia, inibindo a formação de bandas de cisalhamento para níveis altos de deformação, resultando em um material de maior ductilidade com características de deformação volumétrica alteradas (não há colapso,

apenas dilatância). Estes resultados indicam que o efeito dos reforços nas propriedades dinâmicas de solos reforçados pode ser ignorado para baixos níveis de deformação, mas devem ser considerados quando os níveis de deformação são altos.

Fatani et al. (1991) realizaram ensaios de cisalhamento direto para avaliar o comportamento de resistência de uma areia siltosa reforçada. Os elementos de reforço consistiam em fibras metálicas flexíveis, semi-rígidas e rígidas. A influência da orientação das fibras segundo o plano de cisalhamento foi investigada. As principais conclusões deste trabalho foi: (1) de um modo geral, inclusões rígidas, semi-rígidas e flexíveis melhoram a resistência ao cisalhamento de ruptura e última quando inclinadas em determinadas orientações em relação ao plano de cisalhamento; (2) reforços posicionados a 90° do plano de cisalhamento são mais efetivos no aumento da resistência ao cisalhamento, enquanto fibras posicionadas no plano de cisalhamento reduzem a resistência do compósito; (3) fibras adicionadas aleatoriamente também aumentaram as resistências de pico e última, embora a contribuição para o aumento da resistência mecânica seja menos efetiva quando comparada com as fibras orientadas a 90° ; (4) a limitação da redução de resistência ao cisalhamento pós-pico é uma importante consideração no projeto de estruturas de solo reforçado onde a perda de resistência repentina conduziria a efeitos catastróficos.

Al Wahab e El-Kedrah (1995) publicaram um trabalho que avaliou a eficiência de fibras de polipropileno para reduzir as fissuras de tração que surgem quando os solos argilosos são submetidos a ciclos de secagem/umidecimento. O solo utilizado para este estudo foi uma argila siltosa altamente plástica, inorgânica, marrom escura. Para tanto foi definido um índice de fissura (CI) (o aumento de CI reflete o aumento da degradação do material), que é função da largura, comprimento e número de fissuras por unidade de área superficial da amostra. Os autores verificaram que CI aumenta com o ciclo de secagem/umidecimento, embora a maioria das fissuras ocorram nos três primeiros ciclos. Em todos os ciclos, a adição de fibras de polipropileno (0,2 % do peso do solo seco) reduziu o CI de 25 a 49 % no solo estudado.

Maher e Ho (1993) realizaram um estudo que descreve os efeitos da inclusão de fibras de vidro distribuídas aleatoriamente no comportamento de uma areia artificialmente cimentada sobre carregamento estático e cíclico. Foram realizados 120 ensaios triaxiais drenados, 60 ensaios de compressão diametral e 10 ensaios de compressão cíclica para analisar a influência do comprimento e teor de fibras em misturas cimentadas. Quanto aos ensaios sob carregamento estático os autores observaram que: (1) quanto maior o

comprimento e o teor de fibra, maior é a contribuição das fibras na resistência a compressão triaxial (principalmente para baixos valores de tensão confinante); (2) o índice de fragilidade (I_f), aumenta com o acréscimo do teor e do comprimento das fibras, e reduz com o acréscimo da tensão de confinamento; (3) a inclusão das fibras aumenta a capacidade de absorção de energia de areias cimentadas, e o aumento é tanto maior quanto maior for o comprimento e o teor de fibras; (4) a adição de fibras aumenta o intercepto coesivo e o ângulo de atrito interno das areias cimentadas, principalmente para comprimentos maiores de fibra; (5) as fibras proporcionam aumento da resistência à tração de areias cimentadas. Quanto aos ensaios sob carregamento cíclico, os autores concluíram que a adição de fibras aumenta significativamente o número de ciclos e a magnitude das deformações necessárias para causar ruptura em areias cimentadas.

De acordo com Benson e Khire (1994), nos últimos anos, frascos plásticos feitos de polietileno de alta densidade (HDPE) tem sido utilizados cada vez mais para armazenar vários líquidos, como leite, óleo e detergentes. Estes recipientes geralmente tem uma curta vida útil e são descartados depois de usados. Como resultado, os aterros sanitários estão recebendo quantidades enormes destes materiais. Em algumas comunidades o polietileno de alta-densidade está sendo coletado para reciclagem. Estes autores estudaram a viabilidade do reforço do solo com fibras (tiras) de polietileno de alta-densidade originadas de garrafas de leite, de 0,6 cm de largura em comprimentos de 2,4; 4,8 e 7,2 cm. Os teores usados foram de 0, 1, 2, 3, e 4% em relação ao peso da areia. Para medir o desempenho destes reforços foram realizados ensaios de CBR, módulo resiliente e cisalhamento direto. A inclusão das fibras aumentou o valor do CBR, o módulo resiliente e a resistência de pico e última. De maneira geral, o teor ótimo de inclusões está entre 3 e 4% e a relação l/d mais apropriada é de 8 (correspondente ao comprimento de 4,8 cm). As envoltórias de ruptura foram similares às apresentadas por Gray e Ohashi (1983) e Maher e Gray (1990).

Maher e Ho (1994) investigaram as propriedades mecânicas de um compósito solo (caolinita)/fibra por meio de uma série de ensaios de compressão não-confinada, compressão diametral, tração na flexão e condutividade hidráulica. Foram avaliados a influência do comprimento e teor de fibra e do teor de umidade do compósito sobre a resistência à compressão, tração e flexão, e ainda sobre o coeficiente de condutividade hidráulica. Os autores concluíram que as fibras aumentam a resistência à compressão de pico e a ductilidade do solo argiloso estudado, com o aumento sendo mais pronunciado para baixos teores de umidade. O efeito do teor de fibra é sempre positivo para a resistência à compressão e a

absorção de energia. O aumento do comprimento das fibras reduz a contribuição das mesmas para a resistência à compressão de pico, enquanto aumenta a contribuição para a absorção de energia e ductilidade. A inclusão das fibras aumenta a resistência à tração, principalmente para baixos teores de umidade. O aumento do teor de fibra aumenta a contribuição para resistência à tração, enquanto o aumento do comprimento reduz esta contribuição. Para os autores, a explicação do insucesso do comprimento das fibras no aumento da resistência à compressão e à tração é a seguinte: para um mesmo teor de fibra, fibras mais curtas serão mais numerosas dentro da massa estabilizada, e por isso, existe uma maior probabilidade destas estarem presentes junto as superfícies de ruptura. É claro que após o pico de resistência, fibras mais curtas serão mais facilmente arrancadas, e por isso, sua contribuição para as propriedades pós-pico são minimizadas. A adição de fibras aumenta o coeficiente de condutividade hidráulica do solo, com o aumento sendo mais pronunciado para teores de fibras mais elevados. Em situações práticas, contudo, onde ambas, propriedades mecânicas e baixa condutividade hidráulica sejam desejados, um teor de fibra pode ser utilizado para aumentar a resistência mecânica do solo sem que haja extrapolação dos limites de condutividade hidráulica estabelecido pelas legislações locais.

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

Tomasi et al. (1995) apresentam o estudo preliminar de laboratório sobre a eficiência da estabilização de um solo argiloso, inicialmente com cal hidratada e posteriormente com cal hidratada e fibra sintética de polipropileno. Foram realizados ensaios de compressão não-confinada e compressão diametral. A principal conclusão dos autores foi de que a adição de cal hidratada leva a ganhos de resistência à compressão e à tração, mas a relação entre estas

resistências diminuí substancialmente quando as fibras são adicionadas. Isto evidencia a influência benéfica da adição das fibras em misturas solo-cal no sentido de melhorar as características de tração.

Nataraj et al. (1996) apresentaram os resultados de uma série de ensaios de laboratório em um solo arenoso e outro argiloso reforçados com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente. O programa de ensaios incluiu compactação, cisalhamento direto, compressão não-confinada e CBR. Em relação ao solo arenoso, as conclusões foram: (1) a adição das fibras não alteraram significativamente o comportamento de compactação, mantendo-se aproximadamente o mesmo peso específico aparente seco máximo e o teor de umidade ótimo, para ambos os solos estudados; (2) a inclusão das fibras aumenta a resistência ao cisalhamento das areias, sendo o aumento mais pronunciado para maiores teores de fibras, e diminui a perda de resistência pós-pico. Independentemente do solo estudado, foi observado que a inclusão das fibras aumenta o ângulo de atrito interno e o intercepto coesivo; (3) a adição das fibras aumenta a resistência à compressão não-confinada, para os dois tipos de solos; (4) tanto o solo arenoso quanto o argiloso apresentaram valores de CBR maiores com a inclusão das fibras.

Ranjan e Charan (1996) realizaram uma série de ensaios de compressão triaxial em solos granulares reforçados com fibras naturais e sintéticas, distribuídas aleatoriamente, para estudar a influência das características das fibras (teor, relação l/d , superfície de fricção) e das propriedades dos solos na resistência ao cisalhamento dos solos reforçados. Com base nos resultados obtidos os autores concluíram que: (1) as envoltórias de ruptura para os solos reforçados com fibras são curvas ou bi-lineares, sendo a tensão confinante de transição denominada de tensão confinante crítica, abaixo da qual as fibras tendem a ser arrancadas durante a sollicitação. Aumentando a relação l/d a tensão confinante crítica reduz de valor, ou seja, as fibras serão suscetíveis ao arrancamento somente em um intervalo menor de tensão confinante; (2) a inclusão de fibras causa um aumento na resistência de cisalhamento de pico e última e reduz a perda de resistência pós-pico quando comparada com solo não-reforçado; (3) o aumento da resistência ao cisalhamento é aproximadamente linear com o aumento do teor de fibra até 2% (em peso), além do qual o ganho de resistência é pequeno.

Omine et al. (1996) preocupados com a quantidade de resíduos plásticos e a necessidade de fazer uso deles, investigaram as propriedades mecânicas de um solo argiloso cimentado reforçado com pedaços de plástico e com pedaços de garrafas PET, por meio de ensaios de compressão não-confinada. Foi avaliado basicamente o efeito da esbelteza dos

pedaços de plásticos e o efeito do teor de cimento. Os autores concluíram que a adição de pedaços plásticos aumenta a resistência a compressão não-confinada para um teor de cimento equivalente a 100 kg/m^3 , sendo o aumento mais pronunciado para pedaços plásticos mais esbeltos. No entanto, para um teor de 300 kg/m^3 observou-se que a adição das fibras diminui a resistência. Os autores verificaram também que a adição dos plásticos aumenta a capacidade de absorção de energia de deformação.

Ulbrich (1997) e Consoli et al. (1998) avaliaram o efeito da inclusão de fibras de vidro em um solo arenoso artificialmente cimentado e não-cimentado através de ensaios de compressão não-confinada, compressão diametral e triaxiais drenados. Para tanto, amostras foram preparadas, através da adição de cimento Portland ao solo em teores variando entre 0 e 5%, e curadas por um período de 7 dias. Os comprimentos de fibra utilizados foram 3,2 mm, 6,4 mm e 12,8 mm, em teores que variaram de 0 a 3% em relação ao peso seco da mistura solo-cimento. Através deste estudo foi possível concluir que: (1) a resistência à compressão não-confinada aumentou em até aproximadamente 20% e que o aumento é proporcional ao comprimento da fibra e ao teor de fibra adicionado; (2) os ensaios triaxiais drenados indicaram aumento das resistências de pico e última devido a inclusão de fibras, diminuição da rigidez inicial, alteração do comportamento do solo cimentado reforçado em todos os níveis de cimentação, para um comportamento notadamente mais dúctil; (3) o ângulo de atrito de pico não é significativamente afetado pelo grau de cimentação, mas aumenta com a inclusão de fibras; (4) o intercepto coesivo de pico não é afetado pela inclusão de fibras, sendo uma função somente do grau de cimentação; (5) o acréscimo da capacidade de absorção de energia relativa, devido a inclusão de fibras, é mais pronunciado para a tensão de confinamento mais baixa, onde as fibras inibem o progresso da ruptura, sustentando a matriz dos compósitos.

Morel e Gourc (1997) apresentam um estudo de resistência ao cisalhamento de areias reforçadas com malhas de polipropileno alinhadas verticalmente e distribuídas aleatoriamente. Neste estudo foi utilizado um equipamento biaxial, uma caixa de cisalhamento direto com área de $0,3 \times 0,3 \text{ m}$ e altura de $0,18 \text{ m}$ e um método de estereofotogrametria para determinar as deformações localizadas na amostra. Bandas de cisalhamento em areias reforçadas e não-reforçadas têm aproximadamente as mesmas características. Nas amostras não-reforçadas, o surgimento de bandas de cisalhamento (deformações localizadas na amostra) correspondem ao nível de deformação axial de ruptura. Contudo, o surgimento das bandas de cisalhamento, nas amostras reforçadas, não correspondem a uma ruptura do compósito. Pelo contrário, a

tensão aplicada é continuamente aumentada como resultado do progressivo aumento de sollicitação dos elementos do reforço que interseccionam estas bandas. Os autores concluíram que as malhas de polipropileno melhoram o comportamento mecânico dos solos até que um teor ótimo de inclusão seja atingido. Até o teor ótimo, a resistência é altamente modificada pelo acréscimo do teor de inclusão, enquanto as características de deformabilidade não são alteradas. Através dos ensaios de cisalhamento direto, Morel e Gourc verificaram que, em relação à tensão normal, existem dois tipos de comportamento. No primeiro tipo, onde a tensão normal é menor que a tensão crítica, ocorre o deslizamento do reforço em relação a areia porque a tensão normal não é suficiente para ancorar os elementos de reforço. A resistência ao arrancamento é menor que a resistência à tração das malhas. Este fenômeno implica que o solo reforçado comporta-se como um material puramente friccional, com um ângulo de atrito interno maior que o solo não-reforçado. Quando a tensão normal for maior que a tensão crítica, os elementos de reforço estarão devidamente ancorados no solo e haverá mobilização da resistência à tração dos elementos de reforço. As cargas de tração absorvidas pelo reforço conferem uma coesão aparente à amostra, enquanto o ângulo de atrito permanece o mesmo. Por fim, os autores verificaram que os reforços, quando verticalmente alinhados (perpendiculares ao plano de cisalhamento), conferem maior efetividade no ganho de resistência.

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

2.7 RESUMO E ANÁLISE CRÍTICA DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o intuito de expor o estado do conhecimento a respeito dos materiais compósitos fibrosos/cimentados da forma mais realista e fidedigna possível, optou-se, como prática da revisão da literatura, pela abdicação de qualquer tipo de comentário ou interpretação de

resultados além daqueles apresentados pelos autores dos trabalhos. Procurou-se em cada uma das citações, além de apresentar as conclusões, identificar os materiais utilizados, os objetivos almejados e os ensaios realizados, apenas havendo interferência no sentido de uniformizar a linguagem e a simbologia.

No entanto, embora haja muitos pontos em concordância, nota-se algumas divergências entre os autores, e por isso, esta análise faz-se necessária. O objetivo desta análise é resumir os pontos considerados unânimes e por em perspectiva aqueles que merecem maior atenção. Cabe salientar que alguns dos critérios adotados no programa experimental tiveram origem desta discussão.

O bom desempenho de materiais compósitos fibrosos quando submetidos a carregamentos cíclicos ou carregamentos que induzem a algum tipo de tensão de tração é evidente. Este tipo de material já vem sendo utilizado há algum tempo na construção civil, mas na geotecnia, somente nos últimos 15 anos vem sendo tema de pesquisa. Trabalhos de pesquisa de campo ou mesmo relatos de casos históricos a respeito da utilização destes materiais em obras de engenharia geotécnica são escassos, para não dizer nulos.

Mas mesmo os trabalhos de laboratório sugerem o emprego destes materiais em obras de pavimentação, estabilização de taludes, aterros e fundações superficiais, principalmente quando se cogita a utilização, também, de materiais com características frágeis. As fibras desempenham um papel de inibidoras de propagação rápida e ilimitada de fissuras, ou seja, as fissuras são inevitáveis, porém, elas serão menores e melhores distribuídas no corpo do maciço.

Alguns aspectos referentes ao mecanismo do reforço, como aqueles que tratam da compatibilidade entre as fases envolvidas (matriz e elemento de reforço), devem sempre ser levados em consideração quando se projeta um material compósito. Por exemplo, o emprego de fibras com alta resistência à tração e alto módulo de elasticidade serão totalmente ineficientes se a aderência solo/reforço não for suficiente para mobilizar estas propriedades. Nestas situações a ruptura pode ser tão frágil quanto a do solo sem o reforço. Outra questão de compatibilidade de extrema importância é a durabilidade do compósito quando se vislumbra a possibilidade de uma aplicação prática do produto. Resistência a ataques químicos, intemperismo e características de fluência devem ser considerados.

Após o estudo de vários trabalhos que analisaram o efeito da inclusão de diversas

fibras em diferentes tipos de solos, pode-se, de uma maneira geral, sintetizar que as fibras aumentam as resistências de pico e última do compósito, fazendo com que resista a deformações muito superiores às que poderiam ser sustentadas por uma matriz não reforçada. As fibras tornam os materiais mais dúcteis e aumentam a capacidade de absorção de energia de deformação. Alguns autores verificaram que as respostas das areias reforçadas a carregamentos cíclicos também foram melhoradas com a adição das fibras.

O melhoramento de todas as propriedades relacionadas ao comportamento resistência x deformação dos solos reforçados com fibras depende dos parâmetros das fibras (resistência à tração, módulo de elasticidade, rugosidade, orientação do reforço, comprimento e teor), dos parâmetros dos solos (grau de cimentação, tamanho, forma e granulometria das partículas), da tensão de confinamento e do modo de carregamento. O Quadro 2.2 apresenta resumidamente os parâmetros que exercem influência no comportamento de resistência e de deformabilidade dos solos reforçados com fibras.

Observando o Quadro 2.2 percebe-se, de maneira geral, que os autores concordam na maioria dos pontos. Existe apenas um ponto de absoluta contradição verificado entre os trabalhos de Maher e Ho (1993) e Ulbrich (1997) que trabalharam com solos artificialmente cimentados. Enquanto Maher e Ho afirmam que as fibras tornam o material compósito com características mais frágeis, Ulbrich afirma que a inclusão das fibras confere maior ductilidade ao solo reforçado.

Quadro 2.2: Resumo dos principais fatores que afetam o comportamento dos solos reforçados.

Fatores	Efeitos	Referências
Teor de fibra	- quanto maior o teor de fibra maior é o acréscimo de resistência mecânica, até um limite, a partir do qual este efeito não é mais observado;	Gray e Ohashi (1983) McGown et al. (1986) Gray e Al-Refeai (1986) Benson e Khire (1994) Maher e Ho (1994) Ranjan e Charan (1996) Ulbrich (1997) Morel e Gourc (1997)
	- o aumento do teor de fibra provoca aumento do índice de fragilidade e da capacidade de absorção de energia de deformação;	Maher e Ho (1993)
	- a inclusão de fibras diminui o índice de fragilidade e aumenta a capacidade de absorção de energia de deformação.	Ulbrich (1997)

Quadro 2.2: (continuação).

Fatores	Efeitos	Referências
Comprimento da fibra	<ul style="list-style-type: none"> - quanto maior o comprimento da fibra maior é o ganho de resistência mecânica, até um limite assintótico; - aumentando a relação l/d a tensão de confinamento crítica diminui; - o aumento do comprimento da fibra provoca o aumento do índice de fragilidade e da capacidade de absorção de energia; - o aumento do comprimento da fibra provoca a diminuição da resistência de pico e o aumento da capacidade de absorção de energia. 	<p>Gray e Ohashi (1983) Benson e Khire (1994) Ulbrich (1997)</p> <p>Gray e Maher (1989, 1990) Ranjan e Charan (1996)</p> <p>Maher e Ho (1993)</p> <p>Maher e Ho (1994)</p>
Orientação das fibras	<ul style="list-style-type: none"> - os elementos de reforço devem estar posicionados na direção das deformações de tração do solo; - Fibras distribuídas aleatoriamente mantém a resistência isotrópica, não sendo observados planos potenciais de fragilidade. 	<p>McGown et al. (1978) Andrawes et al. (1980) Fatani et al. (1991) Morel e Gourc (1997)</p> <p>Gray e Al-Refeai (1986) Gray e Maher (1989, 1990)</p>
Rugosidade	<ul style="list-style-type: none"> - as fibras devem estar bem aderidas a matriz do compósito para que a sua resistência à tração seja mobilizada. 	Taylor (1994)
Módulo de elasticidade da fibra	<ul style="list-style-type: none"> - fibras com módulo de deformação baixo comportam-se como reforços idealmente extensíveis; - fibras com baixo módulo de deformação não contribuem para o aumento da resistência mecânica; - quanto maior for o módulo do reforço mais facilmente as fibras poderão ser arrancadas. 	<p>Gray e Ohashi (1983)</p> <p>Gray e Maher (1989, 1990)</p> <p>Shewbridge e Sitar (1990)</p>
Tensão confinante	<ul style="list-style-type: none"> - Foi verificado uma tensão de confinamento crítica abaixo da qual os elementos de reforço são arrancados. 	<p>Gray e Ohashi (1983); Gray e Al-Refeai (1986); Gray e Maher (1989, 1990) Benson e Khire (1994) Ranjan e Charan (1996) Morel e Gourc (1997) Teodoro e Bueno (1998)</p>
Modo de carregamento	<ul style="list-style-type: none"> - o número de ciclos e a magnitude das deformações necessárias para causar ruptura em areias cimentadas aumenta com a inclusão das fibras. 	Maher e Ho (1993)

CAPÍTULO 3

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental teve como objetivo identificar o efeito da adição de três tipos de fibras nas propriedades mecânicas de um solo arenoso artificialmente cimentado e não- cimentado.

Para a consecução dos objetivos foram empregadas diversas técnicas. Na etapa de planejamento do estudo, utilizou-se a teoria de projeto de experimentos. Na análise dos resultados, utilizaram-se análises de regressão múltipla, estudos de correlação e estudos de sensibilidade. Além disso, na apresentação dos resultados, fez-se o uso de diversos recursos gráficos, como gráficos de sensibilidade, gráficos de superfície de resposta e gráficos de contorno.

No entender do autor, a forma de condução deste trabalho traz duas contribuições. A primeira são as conclusões técnicas do estudo a respeito do efeito sobre as características do solo causado pela adição de fibras. A segunda contribuição é a utilização, pouco usual em estudos geotécnicos, da teoria do planejamento de experimentos. O tema é relevante e a sua difusão pode trazer largos benefícios a todas as áreas de pesquisa pela redução do tempo de experimentação, pela redução dos custos e pela maximização da obtenção de resultados confiáveis estatisticamente.

3.2 PROJETO DE EXPERIMENTOS

O propósito da realização de um projeto de experimentos é aprofundar o conhecimento sobre o comportamento de um determinado processo, de forma a adquirir um maior domínio sobre o mesmo.

Para que seja efetivo, um projeto de experimento precisa contemplar três etapas. A primeira etapa consiste da definição dos objetivos do trabalho e da identificação do objeto de estudo. A identificação do produto/processo consiste em, inicialmente, reunir e organizar todo o conhecimento já disponível sobre o mesmo. A seguir, é estabelecido o grau de confiança que se tem em cada informação e separa-se o conhecido consolidado das informações questionáveis. Quanto mais se sabe a respeito de um determinado assunto, menor será o programa experimental necessário para levantar as informações ainda não disponíveis. Com isto economiza-se tempo e recursos financeiros.

Procura-se, então, definir todos os elementos em estudo que estarão presentes no experimento. Estes são: características de qualidade, variáveis de resposta, fatores controláveis e fatores não controláveis.

As características de qualidade são aquelas características do produto ou processo que refletem a qualidade do mesmo.

As variáveis de resposta são grandezas mensuráveis que possuem uma forte correlação com as características de qualidade, de tal forma que, medindo-se aquelas, sabe-se como está o desempenho destas. Muitas vezes são necessárias várias variáveis de resposta para representarem uma só característica de qualidade.

Os fatores, controláveis ou não, são os elementos que geram influências nas variáveis de resposta e, por conseguinte, nas características de qualidade do objeto de estudo.

A segunda etapa de um projeto experimental é o desenvolvimento do projeto propriamente dito, que consiste no planejamento estatístico dos pontos a serem experimentados. Através das técnicas de projeto de experimentos, as informações desejadas sobre o assunto pesquisado são obtidas com a precisão necessária e com os custos experimentais e tempo de execução mínimos.

Procuram-se informações que permitam estabelecer relações de causa-efeito entre, respectivamente, os fatores controláveis de interesse e as variáveis de resposta. Ou seja, dentre o conjunto dos fatores controláveis, apenas alguns têm seu efeito pesquisado sobre as variáveis de resposta.

Para pesquisar o efeito de um fator controlável sobre uma variável de resposta, são realizados ensaios. Em cada ensaio, faz-se o fator controlável ter um determinado valor e

mede-se a variável de resposta. Os diversos valores que um fator controlável assume num experimento são os níveis do fator controlável no experimento. Em projetos de experimentos, o espaço experimental é restrito pelas faixas de variação e pelos níveis realizáveis para cada fator controlável. Os demais fatores controláveis, que não estão sendo pesquisados para não aumentarem o tamanho do experimento, são mantidos constantes, para reduzir o erro experimental.

Além dos fatores controláveis, os produtos também estão sujeitos aos efeitos de fatores não-controláveis, também chamados de fatores de ruído. Como o próprio nome diz, não se pode controlar o efeito dos fatores não-controláveis. Então, o que se procura fazer é evitar que os efeitos dos fatores não controláveis sobre as variáveis de resposta fiquem confundidos com os efeitos dos fatores pesquisados. Para evitar que os efeitos fiquem confundidos, é necessário fazer com que o efeito dos fatores não-controláveis sobre as variáveis de resposta seja aleatório. Os fatores não-controláveis geram o erro experimental, ou seja, a parte dos efeitos que são sentidos nas variáveis de resposta e que não são explicados pelos fatores controláveis investigados pela pesquisa.

Na terceira etapa dos projetos experimentais, realizam-se o tratamento e a análise dos dados obtidos na etapa 2. Através de diversas técnicas, entre elas, análise de regressão múltipla, tornam-se conhecidas as relações causais entre os fatores controláveis pesquisados e as variáveis de resposta. Pode-se, então, ajustar os fatores controláveis de forma a obter produtos/processos com as características de qualidade desejadas (características, estas, que estarão sendo avaliadas por intermédio das variáveis de resposta).

Antes de escolher dentre os possíveis projetos experimentais padrão e de consolidar o seu próprio planejamento, o experimentador necessita:

- a) conhecer as restrições experimentais de natureza física, como, por exemplo, a impossibilidade de se realizar um determinado ensaio;
- b) conhecer as restrições experimentais de natureza econômica, como, por exemplo, uma limitação dos recursos monetários disponíveis, que pode significar um determinado número máximo de ensaios;
- c) conhecer as restrições temporais;
- d) conhecer as faixas de variação possíveis e os níveis viáveis de serem experimentados;

- e) conhecer o ponto central de interesse da região a ser experimentada;
- f) conhecer todas as informações coletadas de identificação do produto/processo, identificar os objetivos específicos do trabalho e determinar os fatores controláveis e as variáveis de resposta que serão estudados.

Maiores detalhes à cerca de projeto de experimentos podem ser encontrados em publicações específicas (Montgomery, 1984; Nanni e Ribeiro, 1992; Box e Draper, 1987; Pasa, 1996).

3.3 PROJETO EXPERIMENTAL DESENVOLVIDO PARA ESTA PESQUISA

Como foi visto no item 3.2, todo projeto de experimento deve ter início na definição clara dos objetivos a serem alcançados e na identificação do objeto de estudo. Os objetivos deste trabalho foram apresentados no Capítulo 1. A identificação do objeto de estudo, ou seja, solo reforçado com fibras, foi realizada por meio da revisão da literatura apresentada no Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica. Portanto, neste item, será dada ênfase à definição dos fatores controláveis, das características de qualidade, das variáveis de resposta a serem medidas para cada tipo de ensaio e do programa de ensaios necessários para alcançar os objetivos deste trabalho.

3.3.1 Fatores controláveis

Os fatores controláveis investigados e os fatores controláveis mantidos fixos foram determinados a partir dos objetivos deste estudo.

a) Fatores controláveis investigados

Os fatores controláveis que mereceram ter sua influência sobre as variáveis de resposta medida são dependentes do tipo de ensaio. Nos ensaios de compressão não-confinada e de tração por compressão diametral, os fatores controláveis de interesse são: tipo de fibra, comprimento de fibra, porcentagem de fibra e porcentagem de cimento. Nos ensaios triaxiais drenados repetem-se todos os fatores controláveis de interesse dos ensaios acima mencionados, e acrescenta-se mais um: tensão de confinamento.

As faixas de variação possíveis para os fatores controláveis contínuos e os níveis viáveis de serem experimentados para os fatores controláveis discretos são apresentados no Quadro 3.1 para os ensaios de compressão não-confinada e de tração por compressão diametral e no Quadro 3.2 para os ensaios triaxiais drenados.

Quadro 3.1: Fatores controláveis de interesse: compressão não-confinada e tração por compressão diametral.

Fator controlável	Faixa de variação ou níveis realizáveis
Tipo de fibra	PET, polipropileno, vidro
Comp. da fibra PET (mm)	contínuo
Comp. da fibra de polipropileno (mm)	12, 24, 36
Comp. da fibra de vidro (mm)	6,4; 12,8; 25,4
Porcentagem de fibra PET (%)	0 a 0,90
Porcentagem de fibra de polipropileno (%)	0 a 0,90
Porcentagem de fibra de vidro (%)	0 a 1,90
Porcentagem de cimento (%)	3 a 7

Quadro 3.2: Fatores controláveis de interesse: compressão triaxial drenada.

Fator controlável	Faixa de variação ou níveis realizáveis
Tipo de fibra	PET, polipropileno, vidro
Comp. da fibra PET (mm)	contínuo
Comp. da fibra de polipropileno (mm)	12, 24, 36
Comp. da fibra de vidro (mm)	6,4; 12,8; 25,4
Porcentagem de fibra PET	0 a 0,90
Porcentagem de fibra de polipropileno (%)	0 a 0,90
Porcentagem de fibra de vidro (%)	0 a 1,90
Porcentagem de cimento (%)	0 a 7
Tensão de confinamento (kPa)	20, 60, 100

Nos Quadros 3.1 e 3.2, os seguintes aspectos devem ser observados:

- O fator controlável comprimento de fibra está aninhado no fator controlável tipo de fibra. Isto quer dizer o seguinte: as faixas de variação ou níveis realizáveis de comprimento de fibra dependem do tipo de fibra;
- O fator controlável porcentagem de fibra está aninhado no fator controlável tipo de fibra;
- A faixa de variação da porcentagem de cimento é dependente do tipo de ensaio;
- Os ensaios triaxiais drenados, pela sua natureza, exigem um quinto fator controlável: a tensão de confinamento.

As fibras utilizadas neste estudo foram de vidro, polipropileno e PET (polietileno tereftalato). Estes tipos de fibras foram escolhidos pois apresentam comprimentos e diâmetros

uniformes e propriedades físicas e químicas especificadas pelo fabricante (exceto as fibras PET que tiveram suas propriedades mecânicas medidas em laboratório). Mas além destas vantagens, estas fibras foram escolhidas por apresentarem propriedades mecânicas diferentes entre si, e, por isso, serem adequadas aos objetivos deste estudo.

Os comprimentos das fibras de vidro e polipropileno adotados no projeto experimental foram aqueles fabricados pelas empresas que cederam os materiais para esta pesquisa. Exceção, novamente, para as fibras PET que foram cedidas em longos filamentos, e então cortadas manualmente segundo os comprimentos especificados no projeto experimental.

A porcentagem de fibra adicionada à mistura foi determinada em relação à massa do solo seco. As fibras de vidro apresentam uma densidade muito maior que as fibras de polipropileno e as fibras PET. Ou seja, para uma dada porcentagem de fibra, em massa, as de vidro representam uma quantidade em número de fibras ou em volume muito menor. Por isso, uma vez que a porcentagem máxima foi adotada como sendo um limite a partir do qual não era mais possível moldar os corpos-de-prova, as fibras de vidro apresentam uma faixa de variação de porcentagem de fibra superior.

A porcentagem de cimento foi determinada em relação a soma entre a massa do solo seco e a massa da fibra. Desta forma garantiu-se que a relação, em massa, entre a massa do cimento e a massa do solo e da fibra fosse sempre a mesma para uma dada porcentagem de cimento. A faixa de variação das porcentagens de cimento são diferentes para os três tipos de ensaios. Nos ensaios triaxiais drenados: 0% a 7%. Nos ensaios de compressão não-confinada e de tração por compressão diametral: 3% a 7%. Isto ocorre devido a uma restrição oferecida pelos últimos que não podem ser realizados em corpos-de-prova que não contenham no mínimo 3% de cimento para o solo arenoso utilizado neste estudo, caso contrário os corpos-de-prova desmanchavam ao serem desmoldados.

Foram adotados três níveis de tensão de confinamento efetiva: 20, 60 e 100 kPa. O limite máximo de 100 kPa foi adotado pois o tema deste trabalho é melhoramento de solos superficiais, e, nesse sentido, as tensões geostáticas atuantes não são superiores a 100 kPa.

b) Fatores controláveis mantidos fixos

Os fatores controláveis que foram mantidos fixos no programa experimental são listados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3: Fatores controláveis mantidos fixos no programa experimental

Fator controlável	Nível fixado
Índice de vazios (e)	0,65
Peso específico aparente seco (γ_d)	15,9 kN/m ³
Densidade relativa (D_r)	70%
Diâmetro efetivo (D_{10})	0,16 mm
Coefficiente de Uniformidade (C_u)	1,9
Teor de umidade (w)	10%
Tempo de cura	3 dias
Trajectoria de tensões (ensaios triaxiais)	CID
Tipo de cimento	Tipo CP V – ARI

3.3.2 Variáveis de resposta

Variáveis de resposta são grandezas mensuráveis utilizadas para representar as características de qualidade do objeto de estudo, com as quais possuem forte correlação.

Nos ensaios de compressão não-confinada e de tração por compressão diametral as variáveis de respostas medidas são, respectivamente, a resistência à compressão não-confinada, q_u , e a resistência à tração por compressão diametral, q_{ut} .

Nos ensaios de compressão triaxial as variáveis de resposta são tensão desvio de ruptura (q_{rup}), tensão desvio última (q_{ult}), módulo de deformação secante inicial (E_s) (para uma deformação axial de 0,01% e 0,1%), capacidade de absorção de energia de deformação (E_{def}) (para uma deformação axial de 10%) e índice de fragilidade (I_f).

No Quadro 3.4 são apresentadas as características de qualidade dos solos reforçados com fibras e suas respectivas variáveis de resposta. São apresentadas também as unidades de medida e os ensaios realizados para avaliar cada característica de qualidade.

3.3.3 Programa de ensaios

As respostas dos efeitos da adição das fibras nas matrizes foram medidas a partir da realização de três tipos de ensaios: compressão não-confinada, tração por compressão diametral e compressão triaxial drenada. Para todos os ensaios a carga aplicada é de caráter compressivo e estático. Porém, nos ensaios de compressão não-confinada e triaxial drenada a resistência mobilizada do solo é de cisalhamento e nos ensaios de tração por compressão diametral a resistência mobilizada é de tração. A necessidade da realização dos ensaios de

compressão não-confinada e compressão triaxial, uma vez que ambos mobilizam o mesmo tipo de resistência (cisalhamento), se justifica porque os primeiros são mais rápidos, mais baratos e menos trabalhosos, mas fornecem apenas característica de resistência. Os ensaios triaxiais drenados são mais demorados, mais caros, mais trabalhosos, porém fornecem características de resistência e deformabilidade.

A ordem de execução dos pontos experimentais, para cada tipo de ensaio, foi aleatorizada, utilizando-se números randômicos gerados por calculadora de bolso. O procedimento de aleatorização é importante, pois não é possível controlar algumas variáveis que exercem seu efeito sobre as variáveis de resposta, como por exemplo pessoal e equipamento, e, portanto, deve-se evitar que os efeitos confundidos destas variáveis com as variáveis principais mascarem os resultados da pesquisa.

Quadro 3.4: Características de qualidade e variáveis de respostas do programa experimental

Característica de qualidade	Variável de resposta	Unidade	Ensaio realizado
Resistência à compressão de ruptura	Resistência à compressão não-confinada (q_u)	kPa	Compressão não-confinada
Resistência à tração de ruptura	Resistência à tração por compressão diametral (q_{ut})	kPa	Tração por comp. diametral
Resistência à compressão triaxial de ruptura	Tensão desvio de ruptura (q_{rup})	kPa	Triaxial drenado
Resistência à compressão triaxial última	Tensão desvio última (q_{ult})	kPa	Triaxial drenado
Rigidez inicial	Módulo de deformação secante inicial (E_s)	MPa	Triaxial drenado
Tenacidade	Capacidade de absorção de energia de deformação (E_{def})	$\frac{kJ}{m^3}$	Triaxial drenado
Ductilidade	Índice de fragilidade (I_f)	adimens.	Triaxial drenado

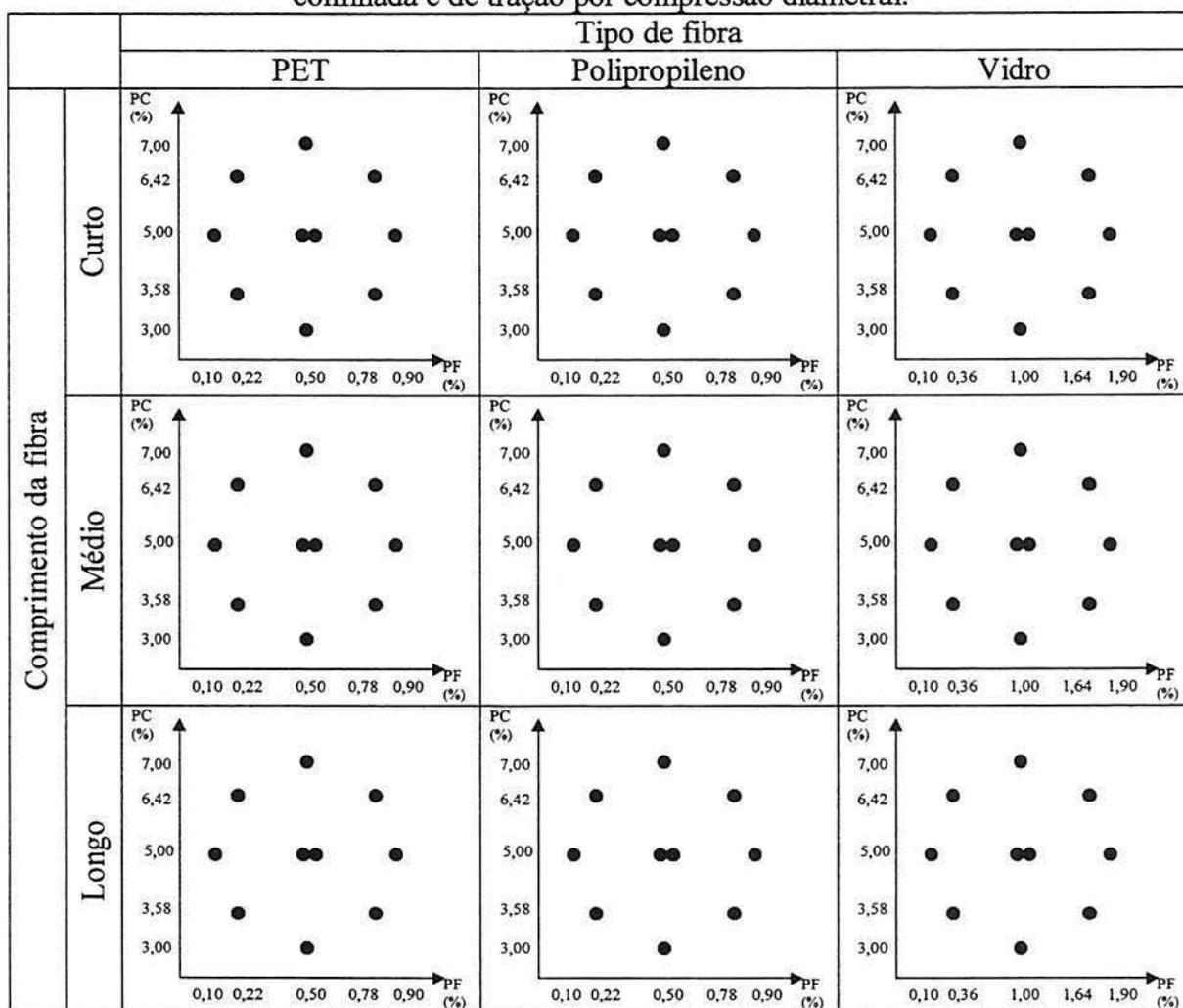
a) Projeto experimental dos ensaios de compressão não-confinada e de tração por compressão diametral

Ensaio de compressão não-confinada e de tração por compressão diametral, por sua menor complexidade e custo, podem ser realizados em maior número, quando comparados com ensaios triaxiais. Para cada um destes ensaios foram testados 90 pontos experimentais.

O planejamento dos ensaios de compressão não-confinada e de tração por compressão diametral é uma composição de dois tipos de projetos de experimentos: um projeto com fatores aninhados e um projeto composto de segunda ordem.

O projeto com fatores aninhados foi rodado com dois fatores controláveis: tipo de fibra (TF) e comprimento da fibra (CF), os quais foram ensaiados em três níveis cada um. Para cada um dos nove tratamentos do projeto com fatores aninhados foi rodado um projeto composto de segunda ordem. No projeto composto de segunda ordem foram ensaiados os fatores controláveis porcentagem de fibra (PF) e porcentagem de cimento (PC). Os pontos experimentais localizados no espaço experimental são apresentados no Quadro 3.5.

Quadro 3.5: Espaço experimental e pontos experimentados dos ensaios de compressão não-confinada e de tração por compressão diametral.



PC = porcentagem de cimento; PF = porcentagem de fibra.

Na Figura 3.1 é apresentado, em detalhe, o projeto composto de segunda ordem para os fatores controláveis PC e PF. O projeto composto de segunda ordem consiste de um projeto fatorial a dois níveis (cujos pontos são os vértices do quadrado inscrito na circunferência, os quais permitem estimar os efeitos principais de PC e PF e a interação PC.PF). Ao projeto fatorial são acrescidos um ponto central e quatro pontos mais externos. Estes últimos são chamados de pontos em estrela e permitem que efeitos quadráticos puros também sejam

estimados. Para que o projeto composto de segunda ordem apresente a característica de rotatibilidade, é necessário que, tanto os pontos do fatorial, como os pontos da estrela estejam localizados a uma mesma distância “ α ” do centro. A característica de rotatibilidade assegura a simetria esférica, ou seja, os fatores controláveis PC e PF tiveram o mesmo grau de investigação dentro do experimento. No projeto da Figura 3.1, como os pontos extremos da “estrela” estão distanciados de 2, então, o valor de “ α ”, para compor o quadrado do fatorial, que assegura a rotatibilidade é 0,71.

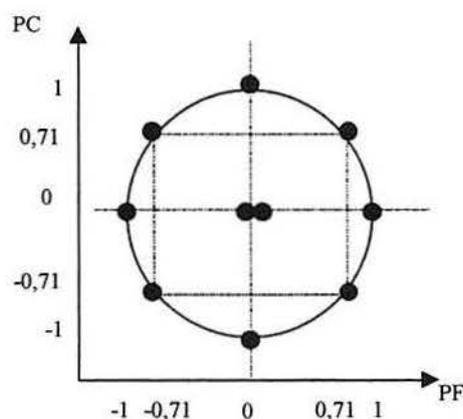


Figura 3.1: Projeto composto de segunda ordem ($\alpha=0,71$).

Nos Quadros 3.6, 3.7 e 3.8 são apresentados os níveis reais dos fatores controláveis que foram efetivamente utilizados nos ensaios de compressão não-confinada e de tração por compressão diametral, respectivamente para os tipos de fibra PET, polipropileno e vidro. Entre parênteses, são apresentados os níveis codificados de -1 a +1. Os níveis codificados são, na realidade, os dados de entrada do programa computacional STATGRAPHICS FOR WINDOWS utilizado para avaliar o experimento.

O fator controlável tipo de fibra (TF) foi ensaiado em três níveis: PET, polipropileno e vidro.

O fator controlável comprimento da fibra (CF) foi ensaiado em três níveis: curto, médio e longo. Ressalta-se que os valores em milímetros dos níveis curto, médio e longo foram diferentes para os três tipos de fibras. Ou seja, os níveis do fator controlável comprimento da fibra estavam aninhados nos níveis do tipo de fibra.

O fator controlável porcentagem de fibra (PF) foi estudado em cinco níveis, codificados como -1; -0,71; 0; 0,71; 1. Ressalta-se que os cinco níveis reais de porcentagem de fibra eram diferentes para os três tipos de fibras, conforme mostrado nos Quadros 3.6 a 3.8. Ou seja, os níveis da porcentagem de fibra estão aninhados nos níveis do tipo de fibra.

Quadro 3.6: Níveis dos fatores controláveis utilizados nos ensaios de compressão não-confinada e de tração por compressão diametral com fibra PET.

Tipo de fibra: PET					
Fator controlável	Níveis realizados				
Comprimento da fibra (mm) - CF	12 (-1)		24 (0)		36 (1)
Porcentagem de fibra (%) - PF	0,10 (-1)	0,22 (-0,71)	0,50 (0)	0,78 (0,71)	0,90 (1)
Porcentagem de cimento (%) - PC	3,00 (-1)	3,58 (-0,71)	5,00 (0)	6,42 (0,71)	7,00 (1)

Quadro 3.7: Níveis dos fatores controláveis utilizados nos ensaios de compressão não-confinada e de tração por compressão diametral com fibra de polipropileno.

Tipo de fibra: polipropileno					
Fator controlável	Níveis realizados				
Comprimento da fibra (mm) - CF	12 (-1)		24 (0)		36 (1)
Porcentagem de fibra (%) - PF	0,10 (-1)	0,22 (-0,71)	0,50 (0)	0,78 (0,71)	0,90 (1)
Porcentagem de cimento (%) - PC	3,00 (-1)	3,58 (-0,71)	5,00 (0)	6,42 (0,71)	7,00 (1)

Quadro 3.8: Níveis dos fatores controláveis utilizados nos ensaios de compressão não-confinada e de tração por compressão diametral com fibra de vidro

Tipo de fibra: vidro					
Fator controlável	Níveis realizados				
Comprimento da fibra (mm) - CF	6,4 (-1)		12,8 (0)		25,4 (1)
Porcentagem de fibra (%) - PF	0,10 (-1)	0,36 (-0,71)	1,00 (0)	1,64 (0,71)	1,90 (1)
Porcentagem de cimento (%) - PC	3,00 (-1)	3,58 (-0,71)	5,00 (0)	6,42 (0,71)	7,00 (1)

Pode ser observado, então, que os fatores controláveis comprimento da fibra (CF) e porcentagem de fibra (PF) tem seus níveis aninhados nos níveis do tipo de fibra. Isto quer dizer que para cada nível de tipo de fibra (PET, polipropileno e vidro), mudam os níveis dos fatores controláveis porcentagem de fibra e comprimento da fibra.

O fator controlável porcentagem de cimento (PC) foi estudado em cinco níveis: 3%, 3,58%, 5%, 6,42% e 7%, assim codificados: -1; -0,71; 0; 0,71; 1, respectivamente.

Através deste projeto de experimentos, que resultou de uma combinação de projeto fatorial aninhado com projeto composto de segunda ordem, foi possível concluir-se a respeito da existência ou não dos seguintes efeitos:

- a) efeito principal do tipo de fibra;
- b) efeito principal do comprimento da fibra;
- c) efeito principal da porcentagem de fibra;
- d) efeito principal da porcentagem de cimento;
- e) efeito quadrático do comprimento da fibra;
- f) efeito quadrático da porcentagem de fibra;
- g) efeito quadrático da porcentagem de cimento;
- h) interação entre porcentagem de fibra e porcentagem de cimento;
- i) interação entre comprimento de fibra e porcentagem de fibra;
- j) interação entre comprimento da fibra e porcentagem de cimento;
- k) interação entre comprimento de fibra, porcentagem de fibra e porcentagem de cimento.

b) Projeto experimental dos ensaios drenados de compressão triaxial

Os ensaios drenados de compressão triaxial oferecem uma maior restrição quanto ao número de ensaios possíveis de serem realizados. Foram executados no total 42 ensaios triaxiais. Esta restrição reflete o menor número de níveis realizados para cada fator controlável.

O planejamento dos ensaios drenados de compressão triaxial é uma composição de dois tipos de projetos de experimentos: um projeto com fatores aninhados e um projeto fatorial de segunda ordem.

O projeto com fatores aninhados foi rodado com dois fatores controláveis: tipo de fibra (TF) e comprimento da fibra (CF), os quais foram ensaiados em três e dois níveis, respectivamente. Para cada um dos seis tratamentos do projeto com fatores aninhados foi rodado um projeto fatorial de segunda ordem. Neste último, foram ensaiados os fatores controláveis porcentagem de fibra (PF) e porcentagem de cimento (PC) em dois níveis cada um. Os pontos experimentais localizados no espaço experimental são apresentados no

Quadro 3.9. Para cada vértice do quadrado, que representa o projeto fatorial, foram executados 3 ensaios triaxiais, um para cada tensão confinante (TC). Chama-se atenção para o fato de que os ensaios correspondentes a $PF = 0\%$ são os mesmos para os três tipos de fibras.

As características de aninhamentos para este projeto são exatamente as mesmas já comentadas na descrição do projeto dos ensaios de compressão não-confinada e diametral.

O fator controlável tipo de fibra (TF) foi ensaiado em três níveis: PET, polipropileno e vidro.

O fator controlável tensão confinante (TC) foi ensaiado em três níveis: 20, 60 e 100 kPa. Para este fator os níveis codificados são: -1, 0 e 1, respectivamente.

O fator controlável comprimento da fibra (CF) foi ensaiado em dois níveis: 12 e 36 mm para as fibras PET e polipropileno, e 6,4 e 25,4 mm para as fibras de vidro. Os níveis codificados para CF é -1 e 1 para o menor e maior nível real, respectivamente.

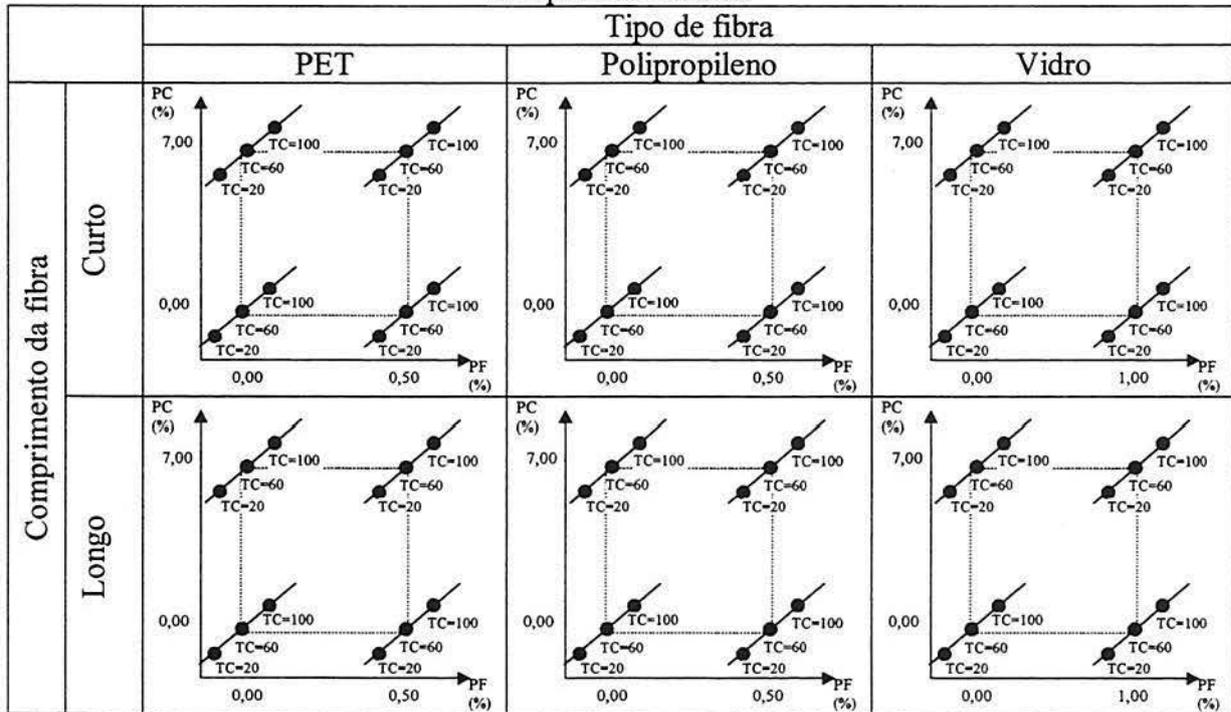
A porcentagem de fibra (PF) foi ensaiada em dois níveis: 0 e 0,5% para as fibras PET e polipropileno, e 0 e 1% para as fibras de vidro. A porcentagem de cimento (PC) também foi ensaiada em dois níveis: 0 e 7%, independentemente do tipo de fibra. Para cada um destes dois fatores controláveis, os níveis codificados são -1 e 1, para o menor e maior nível real, respectivamente. De fato, estes níveis representam a ausência ou presença de fibra e cimento.

A partir dos ensaios triaxiais é possível avaliar a influência dos seguintes efeitos sobre as variáveis de respostas medidas:

- a) efeito principal do tipo de fibra;
- b) efeito principal do comprimento da fibra;
- c) efeito principal da porcentagem de cimento (presença ou ausência de cimento);
- d) efeito principal da porcentagem de fibra (presença ou ausência da fibra);
- e) efeito principal da tensão confinamento;
- f) efeito quadrático da tensão de confinamento;
- g) interação entre porcentagem de fibra e porcentagem de cimento;
- h) interação entre comprimento da fibra e porcentagem de cimento;

- i) interação entre tensão confinante e porcentagem de cimento;
- j) interação entre tensão confinante e porcentagem de fibra;
- k) interação entre tensão confinante e comprimento da fibra;
- l) interação entre comprimento de fibra, tensão confinante e porcentagem de cimento;
- m) interação entre porcentagem de fibra, tensão confinante e porcentagem de cimento.

Quadro 3.9: Espaço experimental e pontos experimentados dos ensaios drenados de compressão triaxial.



PC = porcentagem de cimento; PF = porcentagem de fibra; TC = tensão confinante.

É interessante observar que de acordo com o projeto apresentado acima, torna-se inviável a avaliação da interação entre comprimento e porcentagem de fibra, nem mesmo os efeitos principais destes fatores podem ser avaliados concomitantemente. A explicação para esta limitação é que $PF = 0\%$ implica na inexistência do fator CF. Nem mesmo a alternativa de se adotar, nestes casos, um valor de $CF = 0$ mm teria efeito, pois sempre que PF fosse igual a 0% o comprimento CF seria 0 mm, e isto implica na impossibilidade do programa STATGRAPHICS FOR WINDOWS reconhecer quais dos dois fatores estariam atuando sobre as variáveis de resposta, uma vez que ambos fatores variam sempre juntos. A análise destes resultados é feita em duas etapas: primeiramente são avaliados os efeitos da presença de fibras e, num segundo momento, a influência do comprimento das mesmas.

c) Ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para complementar a pesquisa, e avaliar de forma qualitativa a influência da adição de fibras à mistura solo-cimento, foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), primeiramente das fibras, e num segundo momento das fibras inseridas no solo cimentado. Porém, a preparação das amostras das fibras inseridas no solo cimentado não foi adequadamente executada e, portanto, os resultados não foram satisfatórios.

3.4 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

Os materiais utilizados nesta pesquisa serão apresentados sob a perspectiva dos materiais compósitos fibrosos. Como foi visto anteriormente, os materiais compósitos fibrosos são compostos de duas fases: a matriz e o elemento de reforço. Por isso, julgou-se apropriado apresentar, neste capítulo, as propriedades mecânicas de cada uma das fases, ou seja, as características de resistência e deformabilidade das matrizes e das fibras utilizadas neste trabalho. Antes disso, porém, serão apresentadas as características do solo, do cimento e da água que combinados constituem as matrizes dos compósitos fibrosos estudados.

3.4.1 Características dos materiais de constituição das matrizes: solo, cimento e água

Abaixo são apresentadas as características gerais de classificação do solo, do cimento e da água, que ao serem combinados segundo o projeto experimental dão origem às matrizes dos compósitos fibrosos estudados.

a) Solo

O solo utilizado neste estudo foi extraído de uma jazida localizada no município de Osório/RS. O solo caracteriza-se por ser uma areia fina, limpa e de granulometria uniforme, o que faz deste material uma matriz simples e com propriedades mecânicas bem definidas e estáveis, facilitando a interpretação dos resultados.

Spinelli (1999), ao realizar uma análise composicional deste solo, verificou que o quartzo responde por 99% da composição mineralógica da areia de Osório, sendo o restante composto por glauconita, ilmenita, turmalina e magnetita. Não foi observado presença de

matéria orgânica.

Diaz (1998) realizou ensaios de distribuição granulométrica e determinação de índices físicos neste solo. A Figura 3.2 e a Tabela 3.1 apresentam, respectivamente, a curva granulométrica e os índices físicos do solo utilizado como matriz do compósito desenvolvido neste trabalho.

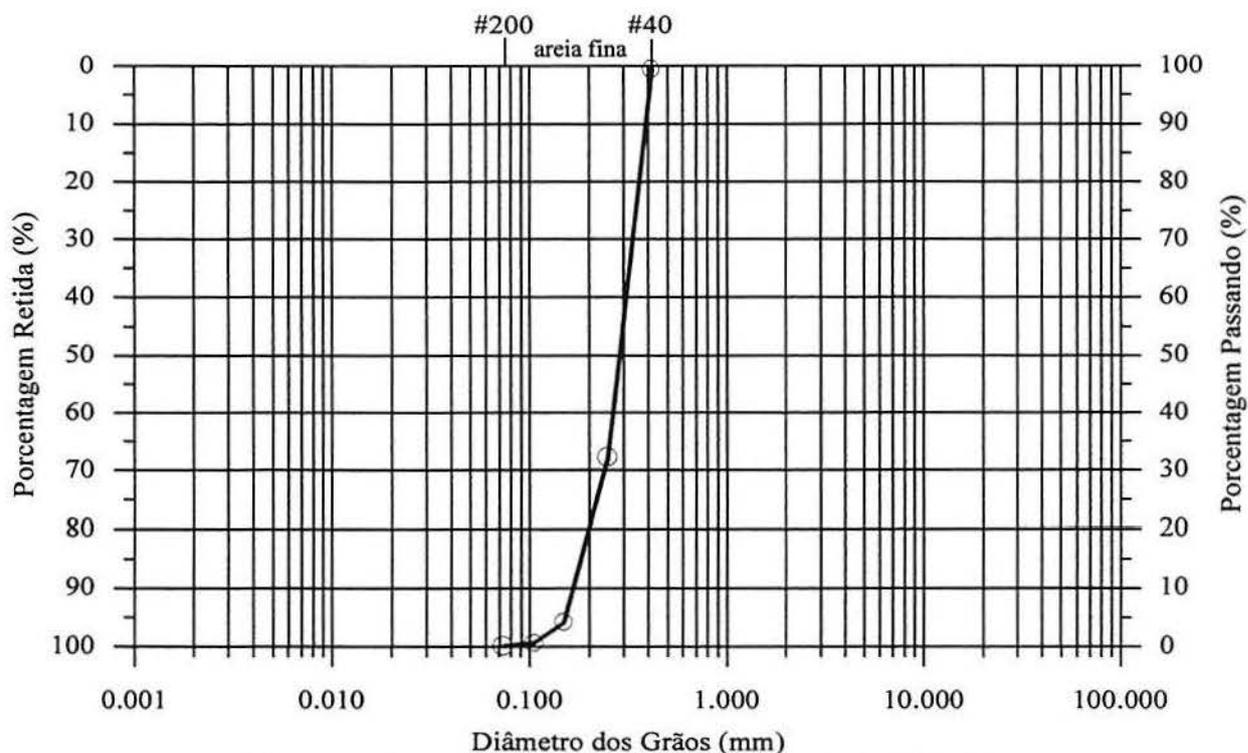


Figura 3.2: Curva granulométrica da areia de Osório/RS.
Fonte: Diaz (1998)

Tabela 3.1: Índices físicos da areia de Osório

Índices físicos	Areia de Osório
Densidade real dos grãos, G	2,62
Coefficiente de uniformidade, C_u	1,9
Coefficiente de curvatura, C_c	1,2
Diâmetro efetivo, D_{10}	0,16 mm
% areia fina (ABNT) (0,075 < diâmetro dos grãos < 0,425 mm)	100%
Índice de vazios, e_{min}	0,57
Índice de vazios, e_{max}	0,85

Fonte: Diaz (1998)

b) Cimento

Como agente cimentante foi utilizado o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (ARI), tipo CP – V. Utilizou-se este tipo de cimento porque ele confere em poucos dias uma resistência mecânica compatível com a sensibilidade dos aparelhos de medida de carga empregados neste trabalho, sejam células de carga ou anéis dinamométricos. Esta propriedade do cimento foi importante para que se pudesse realizar, em tempo hábil, o extenso programa de ensaios.

A Tabela 3.2 apresenta as características físicas e mecânicas do cimento tipo CP V – ARI através do certificado de análise número 277/98.

Tabela 3.2: Características físicas e mecânicas do cimento tipo CP V – ARI

	Finura Massa específica (kg/m ³)	Tempo de pega		Resistência à compressão			
		Início (min)	Fim (min)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
Média	3,11	195	296	23,5	39,2	45,2	53,3
Mínimo	3,11	165	258	22,1	37,8	41,6	51,4
Máximo	3,11	218	365	25,2	41,8	47,2	53,6
Desvio padrão	0,00	14	27	0,9	0,9	1,2	1,3

Fonte: Camargo Corrêa Industrial S.A. (1998).

c) Água

A água utilizada na preparação de todos os corpos de prova foi água potável, sem qualquer tratamento adicional.

3.4.2 Propriedades geotécnicas das matrizes: solo e solo-cimento

Este estudo teve como objetivo avaliar a influência da adição fibras em dois tipos de matrizes. A primeira matriz é composta somente do solo, e a segunda matriz é originada da combinação de solo e cimento. As propriedades geotécnicas destas matrizes são completamente diferentes devido, fundamentalmente, à presença do cimento. Esta seção visa caracterizar as matrizes para futuras análises dos resultados. Detalhes da preparação e características dos corpos de prova são descrito no próximo item. No entanto, para melhor compreensão das propriedades geotécnicas das matrizes, adianta-se que as mesmas foram

obtidas de ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados e que todos os corpos de prova tinham 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura e foram compactados estaticamente segundo uma densidade relativa (D_r) de 70% com um teor de umidade (w) de 10%. No caso de matrizes cimentadas a porcentagem de cimento foi de 7%.

a) Matriz não-cimentada

A Figura 3.3 apresenta o comportamento tensão x deformação axial x deformação volumétrica da matriz não-cimentada. As curvas de variação volumétrica confirmam uma matriz no estado denso representado pelo seu comportamento dilatante (valores positivos no eixo de deformação volumétrica significam aumento de volume).

As curvas tensão x deformação, mesmo para tensões confinantes relativamente baixas e corpos-de-prova com $D_r = 70\%$, não apresentam pico de resistência. O motivo provável é a inexistência de intertravamento entre as partículas de areia devido a sua granulometria uniforme.

Ainda no sentido de caracterizar a matriz não-cimentada e definir seus parâmetros geotécnicos, a Tabela 3.3 apresenta algumas propriedades mecânicas obtidas dos ensaios triaxiais.

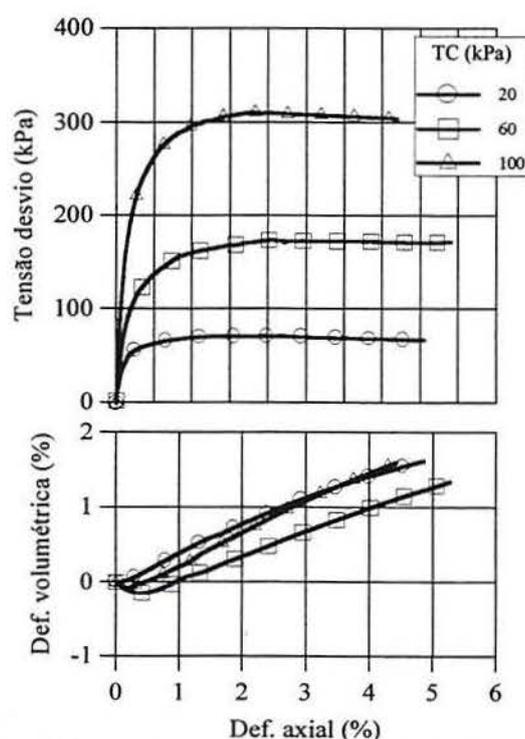


Figura 3.3: Curvas tensão x deformação axial x variação volumétrica: matriz não-cimentada.

Tabela 3.3: Propriedades mecânicas da matriz não-cimentada.

Propriedades mecânicas	Tensão confinante efetiva (kPa)		
	20	60	100
Tensão desvio de ruptura, q_{rup} (kPa)	72	174	311
Tensão desvio última, q_{ult} (kPa)	63	168	299
Ângulo de atrito interno de pico, ϕ' (°)	37		
Intercepto coesivo de pico, c' (kPa)	0		
Ângulo de atrito interno último, ϕ'_{ult} (°)	36		
Intercepto coesivo último, c'_{ult} (kPa)	0		
Módulo secante, $E_{s(0,01\%)}$ (MPa)	97	114	297
Módulo secante, $E_{s(0,1\%)}$ (MPa)	38	68	132
Capacidade de Absorção de Energia de Deformação, $E_{def(10\%)}$ (kJ/m ³)	7	16	30
Índice de fragilidade, I_f	0,1	0,0	0,0

b) Matriz cimentada

A Figura 3.4 mostra o comportamento tensão x deformação axial x deformação volumétrica do material utilizado como matriz cimentada neste estudo. Estes ensaios foram realizados em corpos de prova com uma porcentagem de cimento de 7%.

A análise das curvas tensão x deformação evidencia, para todos os níveis de tensão confinante, uma matriz com fortes características de fragilidade. As mesmas curvas indicam o caráter bastante rígido deste material.

Tipicamente, estes materiais apresentam uma leve diminuição de volume até um ponto próximo à deformação de ruptura, e após, um comportamento expansivo. A taxa de dilatação é bastante acentuada logo após a ruptura e decresce gradualmente a medida que o cisalhamento progride.

A Tabela 3.4 apresenta as principais características mecânicas da matriz cimentada obtidas nos ensaios triaxiais.

3.4.3 Propriedades mecânicas dos elementos de reforço: fibras

Neste estudo foram utilizadas, como elementos de reforço, três tipos de fibras sintéticas de diferentes natureza de constituição. Como visto no Capítulo 2, materiais com diferentes natureza de constituição originam fibras com propriedades físicas, químicas e mecânicas distintas. Estas diferenças são apresentadas nas próximas seções.

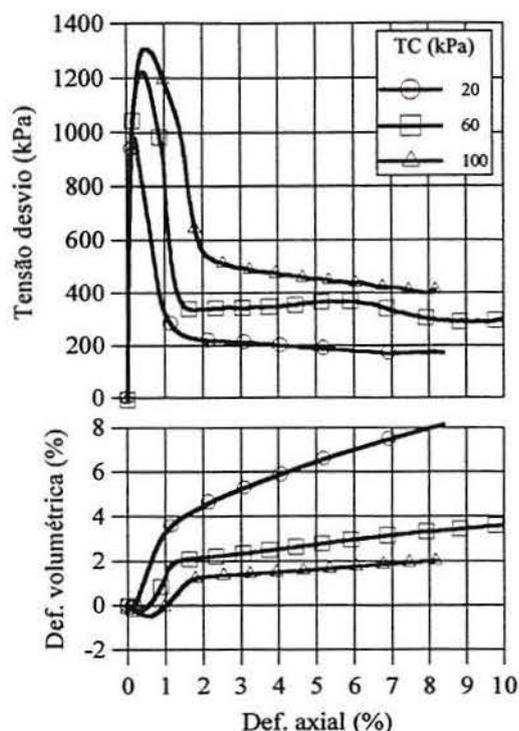


Figura 3.4: Curvas tensão x deformação axial x variação volumétrica: matriz cimentada (PC = 7%).

Tabela 3.4: Propriedades mecânicas da matriz cimentada (PC = 7%)

Propriedades mecânicas	Tensão confinante efetiva (kPa)		
	20	60	100
Tensão desvio de ruptura, q_{rup} (kPa)	985	1225	1308
Tensão desvio última, q_{ult} (kPa)	171	300	380
Ângulo de atrito interno de pico, $\phi'(^{\circ})$	43		
Intercepto coesivo de pico, c' (kPa)	200		
Ângulo de atrito interno último, $\phi'_{ult} (^{\circ})$	38		
Intercepto coesivo último, c'_{ult} (kPa)	15		
Módulo secante, $E_{s(0,01\%)}$ (MPa)	3895	2440	1361
Módulo secante, $E_{s(0,1\%)}$ (MPa)	920	964	844
Capacidade de Absorção de Energia de Deformação, $E_{def(10\%)}$ (kJ/m ³)	24	41	56
Índice de fragilidade, I_f	4,8	3,1	2,4

a) Fibras de vidro

As fibras de vidro foram cedidas pela Owens Corning Fiberglass Corporation em comprimentos de 6,4; 12,8 e 25,4 mm. Elas são do tipo “*chopped strand*”, ou seja, são mechas formadas por centenas de filamentos unidos por uma resina. Cada filamento tem aproximadamente 13 μm . As fibras de vidro são originadas do vidro tipo E. A composição química do vidro tipo E é apresentada na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Composição química do vidro do tipo E.

Composição química	Peso (%)
SiO ₂	55,2
Al ₂ O ₃	14,8
B ₂ O ₃	7,3
MgO	3,3
CaO	18,7
Na ₂ O	0,3
K ₂ O	0,2
Fe ₂ O ₃	0,3
Fe ₂	0,3

Fonte: Ulbrich (1997)

As fibras de vidro cortadas em comprimentos de 25,4 mm são mostradas na Figura 3.5a. A Figura 3.5b apresenta um detalhe das fibras obtido das imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) por elétrons secundários.

Segundo o fabricante, as propriedades físicas e mecânicas das fibras de vidro são: densidade relativa de 2,62; resistência à tração entre 870 e 1800 MPa; módulo de elasticidade 73 GPa e alongamento na ruptura entre 1,2 e 2,5%.

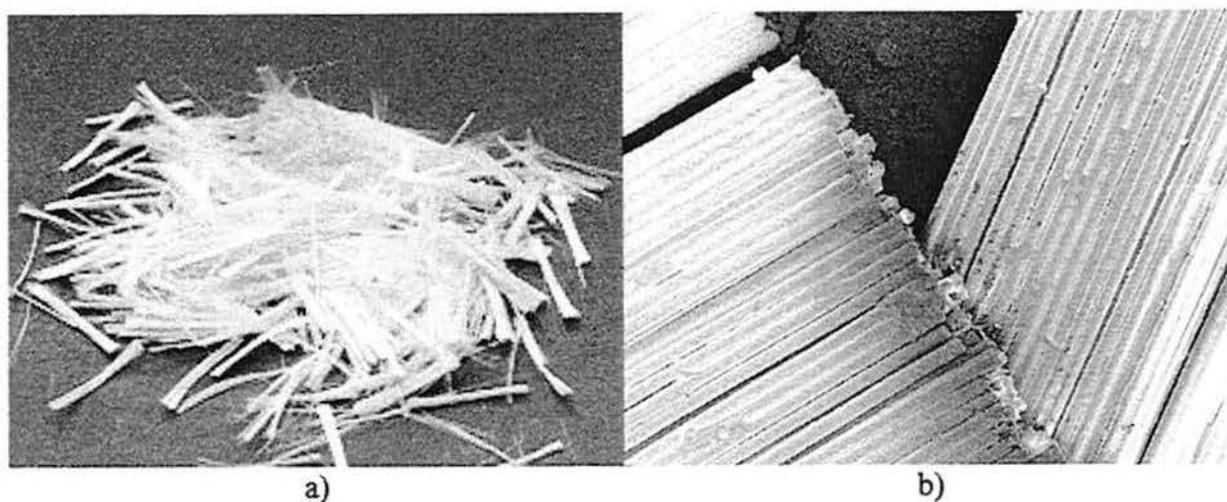


Figura 3.5: (a) Fibras de vidro cortadas em comprimentos de 25,4 mm.
(b) Imagem de MEV por elétrons secundários das fibras de vidro (aumento de 230x).

b) Fibras PET (polietileno tereftalato)

As fibras PET são originadas de um processo de reciclagem de garrafas plásticas de refrigerantes realizado pela Bettanin Industrial S/A. Esta empresa compra fardos de 1,5 x 1,5 x 1,5 m de garrafas de refrigerantes tipo PET junto aos aterros sanitários da região

metropolitana de Porto Alegre. As garrafas passam por um processo de limpeza inicial e então são picadas na forma de flocos. Os flocos são novamente lavados e, após um processo de revalorização, são transformados em longos filamentos. Na verdade, no final do processo, os filamentos são compostos de 85% de polietileno tereftalato e 15% de poliolefina.

A Bettanin Industrial S/A. forneceu os filamentos deste material, que posteriormente, foram cortados manualmente nos comprimentos de 12, 24 e 36mm. O diâmetro dos filamentos varia entre 0,18 e 0,20 mm. Diferentemente das demais fibras, estas tiveram suas propriedades mecânicas medidas no Laboratório de Mecânica dos Solos/UFRGS. A Figura 3.6 mostra curvas de ensaios de tração em fibras PET com medidas de deformação. Como os materiais poliméricos são sujeitos à fluência, as fibras foram ensaiadas em duas velocidades de deformação para verificação desta variável no comportamento das fibras. Foi realizada uma série de ensaios para as duas velocidades de deformação e os resultados médios indicam que as fibras PET rompem a deformações maiores que 20%, e apresentam uma resistência à tração última entre 207 e 230 MPa (para velocidades de deformação de 1,14 e 5,70 mm/min, respectivamente). O módulo de elasticidade máximo medido foi de 7GPa. A densidade relativa das fibras PET é de 1,06.

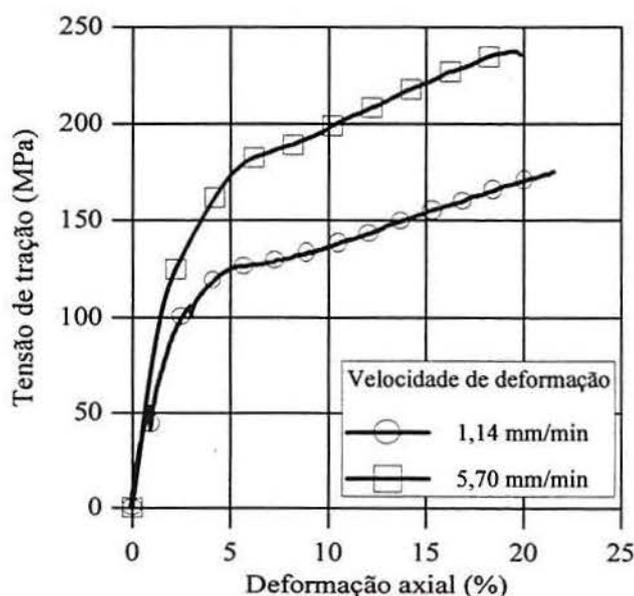


Figura 3.6: Curvas tração x deformação das fibras PET para duas velocidades de deformação.

A Figura 3.7a mostra uma visão geral das fibras PET e a Figura 3.7b mostra, em detalhe, uma imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) por elétrons secundários das fibras PET.

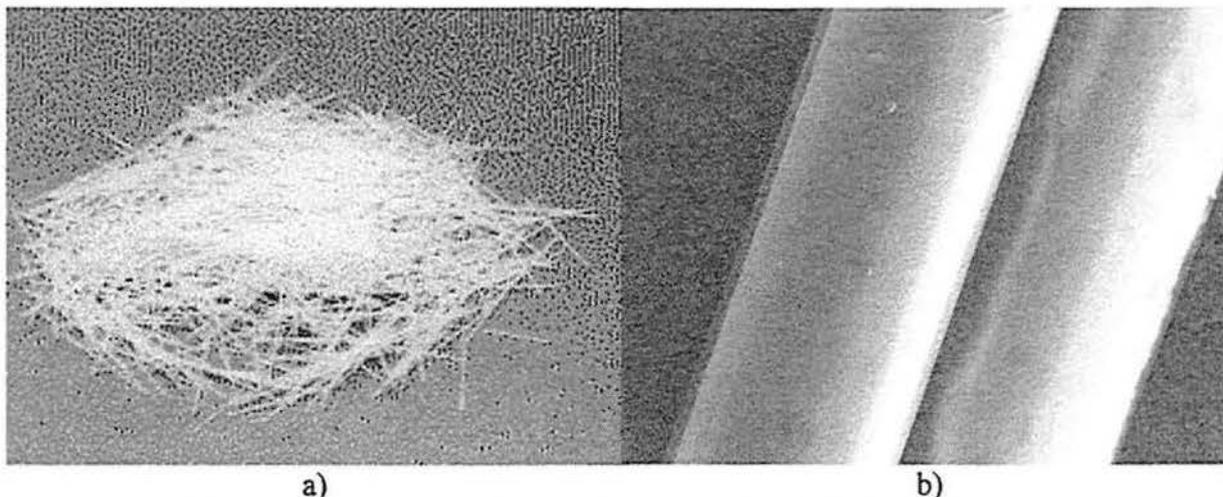


Figura 3.7: (a) Fibras PET cortadas em comprimentos de 24 mm.
 (b) Imagem de MEV por elétrons secundários das fibras PET (aumento de 230x).

c) Fibras de polipropileno

As fibras de polipropileno são fabricadas pela Fitesa Fibras e Filamentos S/A. Elas são as fibras de menor diâmetro utilizadas neste trabalho. Na indústria têxtil, a grandeza que representa a espessura dos filamentos é o título. A unidade do título é o dtex (1 dtex = 1 g/10000 m). As fibras de polipropileno tem um título de 3,3 dtex (dado fornecido pela empresa). Baseado na definição de dtex e na densidade relativa das fibras de polipropileno, 0,91, e, também, nas imagens de microscopia eletrônica, estima-se que o diâmetro médio destas fibras seja de 23 μm .

Cada fibra de 3,3 dtex suporta uma carga de tração de 0,05 N (dado fornecido pela empresa), ou seja, estima-se que a resistência à tração na ruptura seja de 120 MPa. O alongamento de ruptura é de 80%.

A Figura 3.8a apresenta as fibras de polipropileno de 24 mm de comprimento. A Figura 3.8b mostra um detalhe das fibras de polipropileno obtido de uma imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A Tabela 3.6 resume as principais propriedades mecânicas dos três tipos de fibras, mostrando claramente as diferenças entre as fibras. Os dados apresentados na Tabela 3.6, juntamente com a parte da revisão bibliográfica, apresentada no Capítulo 2, que trata desse assunto (Seção 2.4), serão tomados como referência na análise dos resultados.



Figura 3.8: (a) Fibras de polipropileno cortadas em comprimentos de 24 mm.
 (b) Imagem de MEV por elétrons secundários das fibras de polipropileno (aumento de 230x).

Tabela 3.6: Resumo das propriedades mecânicas das fibras

Tipo de fibra	Densidade relativa	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração última (MPa)	Deformação na ruptura (%)
Vidro	2,62	73	870-1800	1,2-2,5
PET	1,06	7	207-230	>20
Polipropileno	0,91	-	120	80

3.5 PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

A preparação dos corpos-de-prova foi realizada em três fases: mistura dos componentes, moldagem, armazenamento e cura.

Os componentes eram adicionados em um recipiente na seguinte seqüência: solo, cimento, água e fibra. Esta seqüência é a mais apropriada pois permite que o cimento seja misturado com o solo seco e isto garante maior homogeneização da matriz. A adição das fibras foi feita somente após a água ter sido acrescentada. Esta técnica é adequada para evitar segregação das fibras, que certamente ocorreria se a matriz estivesse seca. A ação de mistura era feita manualmente até ser obtida a homogeneização, que era verificada visualmente.

A quantidade de fibra adicionada à mistura foi determinada em relação à massa do solo seco. A quantidade de cimento foi determinada em relação a soma da massa do solo seco e a massa da fibra. Desta forma garante-se que a relação, em massa, entre a massa do cimento e a massa do solo e da fibra fosse sempre a mesma para uma dada porcentagem de cimento. O peso de água foi calculado em relação à massa total de matéria seca (solo + cimento + fibra).

Os corpos-de-prova foram moldados de tal forma que tivessem uma densidade relativa (D_r) de 70%, ou um equivalente peso específico aparente seco (γ_d) de 15,9 kN/m³ e um teor de umidade (w) de 10%. A compactação da mistura foi do tipo estática. Os moldes tinham 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Os corpos-de-prova eram moldados em três camadas de igual altura. O controle de qualidade dos corpos-de-prova era feita em função da verificação do γ_d .

Os corpos-de-prova eram mantidos dentro dos moldes por 24 horas. Este tempo era suficiente para que as reações de cimentação conferissem uma resistência mínima aos corpos-de-prova para que estes fossem desmoldados com segurança, minimizando o risco de se quebrarem.

Nos ensaios de compressão não-confinada e diametral os corpos-de-prova eram imersos em água por 24 horas antes da ruptura visando aproximá-los da saturação. No terceiro dia de cura os corpos-de-prova eram rompidos.

Os corpos-de-prova moldados para realização dos ensaios triaxiais foram moldados de duas maneiras distintas dependendo da presença ou não de cimento. Em misturas cimentadas utilizou-se o mesmo procedimento descrito para os ensaios de compressão não-confinada e diametral, exceto que os corpos-de-prova não permaneciam imersos em água por 24 horas. Em misturas não-cimentadas aplicava-se vácuo de 40 kPa na base do corpo-de-prova após a realização da compactação, que era feita diretamente sobre o pedestal da prensa triaxial, utilizando-se um cilindro bi-partido próprio para este tipo de moldagem.

3.6 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS E DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Abaixo serão descritos os procedimentos básicos de cada ensaio e as características gerais dos equipamentos utilizados.

3.6.1 Ensaio de compressão não-confinada

A realização dos ensaios de resistência à compressão não-confinada seguiu os procedimentos descritos na norma NBR 12777 (ABNT, 1992). Para esta etapa do programa experimental foi utilizada uma prensa da marca Wykeham Farrance com capacidade máxima de 50kN. A prensa foi instrumentada com uma célula de carga com capacidade de 2 kN da

marca Kratos, modelo KM, e um transdutor de deslocamento linear, marca Wykeham Farrance, modelo HS25B, com resolução de 0,001mm. A velocidade de deformação utilizada foi de 1,14%/min.

3.6.2 Ensaio de tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral foi desenvolvido pelo professor Fernando Lobo Carneiro (Carneiro, 1943), e é conhecido internacionalmente como “ensaio brasileiro”. A realização destes ensaios seguiu os procedimentos descritos na norma NBR-7222 (ABNT, 1983), que prescreve o método para determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de argamassa e concreto.

3.6.3 Ensaio de compressão triaxial

O comportamento mecânico do material foi descrito mediante a realização de ensaios triaxiais convencionais do tipo CID (consolidado isotropicamente drenado) conduzidos sob carregamento estático. Foram adotados três níveis de tensão confinante efetiva conforme o programa experimental: 20, 60 e 100 kPa. A seguir, serão citadas as principais características do equipamento triaxial:

- (a) Prensa: marca Wykeham Farrance, modelo WF 10056 Trittech 50, com capacidade máxima de 50 kN;
- (b) Câmara triaxial: marca Wykeham Farrance, modelo WF 11144;
- (c) Sistema de aplicação de pressão: células de pressão com interface ar/água, onde o nível máximo de pressão aplicado era de 700 kPa;
- (d) Aquisição de dados: conversor analógico/digital (data-logger) da Helwett Packard e um microcomputador PC/AT 386;
- (e) Medidores de pressão confinante e poro-pressão: transdutor de pressão da marca Druck, modelo PDCR 810, capacidade de 700 kPa;
- (f) Medidores de variação volumétrica: para medição externa da variação volumétrica do corpo-de-prova utilizou-se um transdutor tipo Imperial College (Maswoswe, 1985, citado por Ferreira, 1998);

- (g) Medidores de deformação: as medidas internas de deformação foram feitas por meio de sensores de efeito Hall (Clayton e Khatrush, 1986; Clayton et al., 1989; Soares et al., 1994). As medidas externas foram feitas através de um transdutor de deslocamento linear da marca Gefran, modelo LTM 50Sm;
- (h) Medidores de força axial: célula de carga da marca Kratos, modelo KM, carga nominal de 5 kN.

Os procedimentos gerais adotados na preparação e execução destes ensaios seguem os princípios gerais descritos por Bishop e Henkel (1962), Head (1980) e pelos procedimentos de ensaios já consolidados pelo Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRGS. Após a montagem do corpo-de-prova na câmara triaxial e o ajuste dos sensores de efeito Hall, iniciava-se a fase de saturação da amostra que constituiu de duas etapas. Na primeira etapa percolou-se água, da base para o topo do corpo-de-prova, sob um gradiente hidráulico de aproximadamente 5 kPa. Nesta etapa o corpo-de-prova era submetido a uma tensão confinante na câmara de 30 kPa para impedir que houvesse fluxo preferencial entre o corpo-de-prova e a membrana. A segunda etapa compreendia o aumento, em incrementos de 50 kPa, na tensão confinante e na contra-pressão. A tensão confinante era mantida em um nível ligeiramente superior. Quando a poro-pressão monitorada na base do corpo-de-prova equalizava-se com contra-pressão aplicada em seu topo, um novo incremento de pressão era aplicado. O processo repetia-se até chegar ao valor de 450 kPa de contra-pressão no topo do corpo-de-prova, mantido constante durante todo o ensaio. A velocidade de deformação adotada para a fase de cisalhamento foi de 1,8 %/hora. Esta velocidade assegurou uma boa condição de drenagem, monitorada através da medição da poro-pressão na base do corpo-de-prova durante o ensaio.

3.6.4 Ensaios de microscopia eletrônica de varredura

Foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura, com obtenção de imagens por elétrons secundários, em amostras das fibras utilizadas como elementos de reforço. O equipamento utilizado é da marca Jeol, modelo JSM – 5800, pertencente ao Centro de Microscopia Eletrônica/UFRGS.

A preparação das amostras de fibras é bastante simples. Elas foram simplesmente coladas em uma superfície plana por meio de uma fita adesiva dupla-face e revestidas por uma fina película metálica (processo denominado de metalização).

CAPÍTULO 4

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE PRELIMINAR DOS RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos em todos os ensaios realizados para avaliar a influência das variáveis investigadas no comportamento de resistência e deformação do solo reforçado com fibras.

Devido à grande quantidade de resultados a serem apresentados neste capítulo, houve a necessidade de segmentar a apresentação dos mesmos. Por isso, optou-se por apresentá-los e analisá-los separadamente para cada tipo de fibra. No próximo capítulo estes resultados são confrontados para buscar uma interpretação do mecanismo de funcionamento solo-fibra.

O objetivo desta análise é mostrar quais dos fatores controláveis influenciam de forma significativa as variáveis de resposta. Para tanto, foram realizadas análises de regressão múltipla para cada variável de resposta. As análises de regressão são importantes pois fornecem, além do grau de relação entre variáveis dependentes e independentes, uma equação entre elas que pode ser usada para estimação ou previsão de resultados. No jargão de projetos e avaliação de experimentos estas equações são denominadas de modelos. Para se estimar o valor de uma determinada variável de resposta a partir dos modelos apresentados abaixo deve-se utilizar níveis codificados para os fatores controláveis (Quadros 3.6 a 3.8). Foram realizadas também análises de variância (ANOVA), que permitiram determinar o nível de confiança dos modelos gerados pelas regressões. O nível de confiança mínimo aceito, tanto para os modelos quanto para a verificação se um determinado fator controlável influencia significativamente a uma variável de resposta, foi de 95%. Ou seja, ao se aceitar a hipótese de que o modelo representa significativamente os pontos experimentais, ou que um fator controlável influencia a variável de resposta, há, no máximo, uma probabilidade de 5% (nível de significância) desta hipótese não ser verdadeira.

4.2 SOLO REFORÇADO COM FIBRAS PET

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de compressão não-confinada, tração por compressão diametral e compressão triaxial drenada para o solo reforçado com fibras PET.

4.2.1 Ensaios de resistência à compressão não-confinada

Os resultados dos ensaios de compressão não-confinada, cujos valores são apresentados na Tabela 4.1, permitiram investigar a existência de efeitos dos fatores principais (PC, PF e CF), de efeitos quadráticos dos fatores principais e de interações entre fatores na resistência do solo cimentado reforçado com fibras PET.

Tabela 4.1: Resultados experimentais dos ensaios de compressão não-confinada para o solo cimentado reforçado com fibras PET.

		Resistência à compressão não-confinada, q_u (kPa)					
		Porcentagem de fibra, PF (%)					
		0,10	0,22	0,50	0,78	0,90	
Comprimento da fibra, CF (mm)	12	Porcentagem de cimento, PC (%)	3,00		217		
			3,58	295		355	
			5,00	489		540 511	640
			6,42		853		1030
			7,00			1072	
	24	Porcentagem de cimento, PC (%)	3,00		312		
			3,58		297		403
			5,00	458		639 577	632
			6,42		909		929
			7,00			1191	
	36	Porcentagem de cimento, PC (%)	3,00		256		
			3,58		330		330
			5,00	441		646 639	662
			6,42		868		945
			7,00			1104	

A análise de regressão múltipla, a partir dos resultados apresentados na Tabela 4.1, indicou o modelo

$$\frac{q_u}{(\text{kPa})} = 572 + 422.PC + 71.PF + 118.PC^2 \quad (4.1)$$

como sendo o mais apropriado para previsão da resistência à compressão não-confinada (q_u) do solo cimentado reforçado com fibras PET. Para previsão de q_u deve-se utilizar os níveis codificados dos fatores controláveis (Quadro 3.6, página 47). Este modelo apresenta um nível de confiança superior a 99%. O coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajustado}) é igual a 0,975, ou seja, 97,5% da variabilidade de q_u é explicada pelo modelo. O R^2_{ajustado} é indicado para comparar modelos com diferentes variáveis independentes. O erro padrão da estimativa, ε_p , é 45,0 kPa. O ε_p é definido como sendo o desvio padrão dos resíduos (resíduo é a diferença entre o valor estimado pelo modelo e o valor observado no ensaio). Este parâmetro é útil quando se deseja definir os limites máximos e mínimos para novas observações.

O modelo indica que, dos fatores principais, apenas a porcentagem de cimento (PC) e a porcentagem de fibra (PF) têm efeitos significativos e positivos sobre q_u . O terceiro termo do modelo sugere a existência de um efeito quadrático da porcentagem de cimento (PC) sobre q_u . O comprimento da fibra (CF) e todas as demais interações entre fatores não contribuem significativamente para a variabilidade de q_u .

A Figura 4.1 confronta curvas iso- q_u geradas a partir do modelo com resultados experimentais. Para tanto, apresenta-se os últimos na legenda da figura (conferir com a Tabela 4.1). Observa-se que as curvas ajustam-se adequadamente aos valores de q_u obtido nos ensaios. A inclinação das curvas em relação aos eixos de PC e PF indica a influência dos dois fatores sobre q_u , embora o efeito da cimentação seja mais evidente.

A Figura 4.2 mostra a superfície de resposta para q_u quando PF e PC variam concomitantemente. A superfície de resposta também é gerada a partir do modelo experimental. Observa-se a forte influência do cimento no aumento de q_u , inclusive o efeito quadrático deste fator. A adição de fibras também aumenta q_u , porém este aumento é menor, quando comparado com a influência do cimento, e linear.

4.2.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

A Tabela 4.2 apresenta os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral realizados em amostras de solo cimentado reforçado com fibras PET.

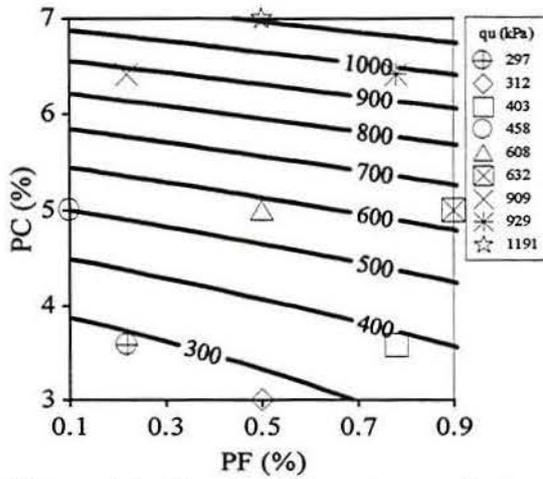


Figura 4.1: Comparação entre resultados experimentais ($CF = 24\text{mm}$) e a previsão de q_u pelo modelo estatístico.

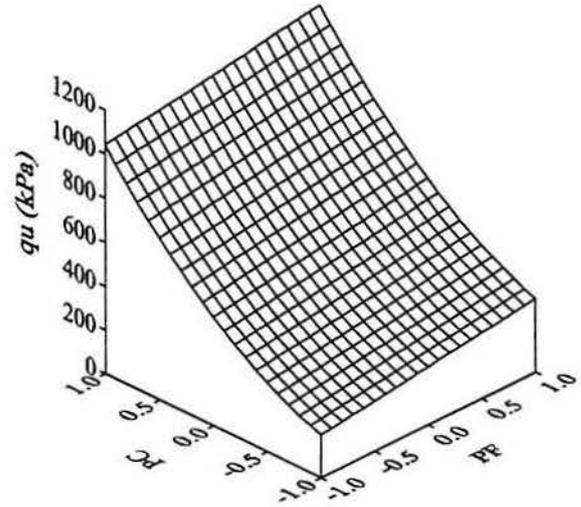


Figura 4.2: Superfície de resposta $q_u \times PF \times PC$.

Tabela 4.2: Resultados experimentais dos ensaios de tração por compressão diametral para o solo cimentado reforçado com fibras PET.

		Resistência à compressão diametral, q_{ut} (kPa)					
		Porcentagem de cimento, PC (%)	Porcentagem de fibra, PF (%)				
			0,10	0,22	0,50	0,78	0,90
Comprimento da fibra, CF (mm)	12	3,00		35			
		3,58		32	45		
		5,00	56		62	94	
		6,42		129		130	
		7,00			167		
	24	3,00			33		
		3,58		40		61	
		5,00	74		83	111	
		6,42		126		185	
		7,00			157		
	36	3,00			38		
		3,58		32		60	
		5,00	61		83	131	
		6,42		125		172	
		7,00			99		

A análise de regressão múltipla, a partir dos resultados apresentados na Tabela 4.2, indicou o modelo

$$\frac{q_{ut}}{\text{(kPa)}} = 90 + 62.PC + 22.PF \quad (4.2)$$

como adequado para representar os pontos experimentais dos ensaios de tração por compressão diametral. Este modelo apresenta um nível de confiança superior a 99%. O R^2_{ajustado} é igual a 0,858. O erro padrão da estimativa (ϵ_p) é 17,0 kPa.

Assim como na resistência à compressão não-confinada (q_u), apenas a porcentagem de cimento (PC) e a porcentagem de fibra (PF) influenciam significativamente a resistência à tração por compressão diametral (q_{ut}). A variação do comprimento da fibra, de 12 para 36 mm, não influenciou esta variável de resposta.

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram graficamente a influência de PC e PF sobre q_{ut} . Estas figuras indicam o aumento linear de q_{ut} com o aumento de PC e PF.

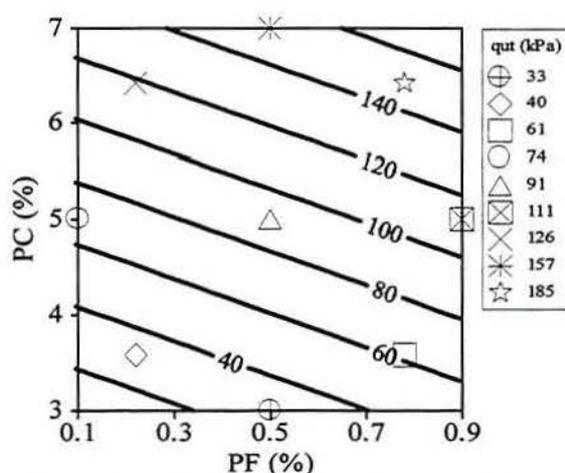


Figura 4.3: Comparação entre resultados experimentais (CF = 24 mm) e a previsão de q_{ut} pelo modelo estatístico.

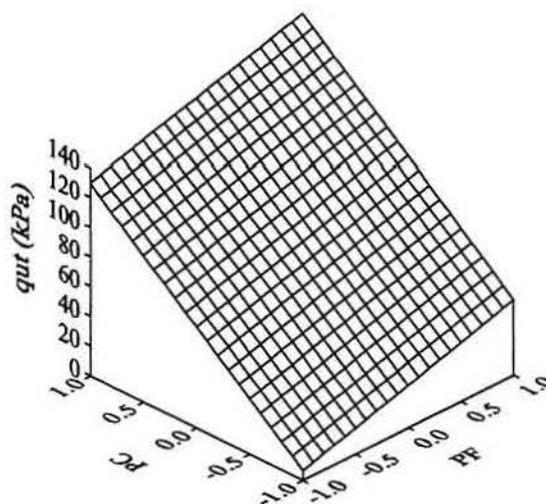


Figura 4.4: Superfície de resposta $q_{ut} \times PF \times PC$.

4.2.3 Ensaios drenados de resistência à compressão triaxial

Devido à grande quantidade de informações geradas pelos ensaios triaxiais e ao elevado número de variáveis investigadas optou-se por, primeiramente, tecer comentários gerais a respeito da influência da inclusão de fibras nas matrizes em estudo, fundamentados na comparação direta entre as curvas tensão x deformação das matrizes não-reforçadas e das matrizes reforçadas. Posteriormente, com a finalidade de facilitar a leitura dos resultados, são avaliados, separadamente, a influência dos fatores investigados sobre cada uma das variáveis de resposta.

Foram 12 ensaios triaxiais drenados executados em amostras de solo reforçado com fibras PET que, juntamente com os 6 ensaios triaxiais realizados para caracterização das matrizes não-cimentada e cimentada, permitiram avaliar a influência da porcentagem de fibra (PF), comprimento da fibra (CF), porcentagem de cimento (PC) e tensão confinante (TC) sobre as características de resistência e deformabilidade dos solos reforçados com fibras PET.

As curvas tensão x deformação axial x deformação volumétrica obtidas nos ensaios de compressão triaxial para a matriz não-cimentada (PC = 0%) reforçada com fibras PET são apresentadas na Figura 4.5. Com a finalidade de comparar o comportamento mecânico do solo reforçado com o solo não reforçado, são mostrados, também nesta figura, as curvas tensão x deformação da matriz não-cimentada. Na Tabela 4.3 é apresentado um resumo dos resultados obtidos, onde pode-se verificar a influência das fibras PET nas variáveis de resposta medidas. De maneira geral, percebe-se que a inclusão de fibras PET modificaram timidamente o comportamento de resistência e deformabilidade do solo. As características de variação volumétrica permaneceram essencialmente as mesmas para todos os níveis de deformação axial. Da Tabela 4.3 observa-se modificações erráticas no módulo de deformação secante inicial, mas de maneira geral não há uma interferência determinante. Quanto à tenacidade, pode-se dizer que as fibras PET aumentam a capacidade de absorção de energia. Percebe-se que, em matrizes não-cimentadas, a inclusão das fibras provoca um leve acréscimo de I_f , mas não o suficiente para caracterizar um material frágil.

A Figura 4.6 apresenta as curvas tensão x deformação axial x deformação volumétrica da matriz cimentada (PC = 7%) reforçada com fibras PET de 12 e 36 mm de comprimento (PF = 0,5%). São apresentadas na mesma figura as curvas de tensão x deformação da referida matriz não reforçada. A Tabela 4.4, que apresenta uma síntese destes resultados, evidencia a contribuição das fibras PET no aumento de q_{rup} e um aumento ainda mais pronunciado de q_{ult} , principalmente para CF = 36 mm. As curvas de deformação volumétrica acusam comportamentos similares quanto à variação volumétrica: há uma leve compressão para níveis pequenos de deformação axial, seguida de uma forte dilatação próximo ao pico, que aos poucos tende a estabilizar-se. Salienta-se no entanto que, mesmo com a diminuição de I_f , as fibras PET não alteraram o caráter frágil da matriz cimentada, pois observa-se claramente a existência de um pico na resistência e um comportamento dilatante típico de materiais frágeis.

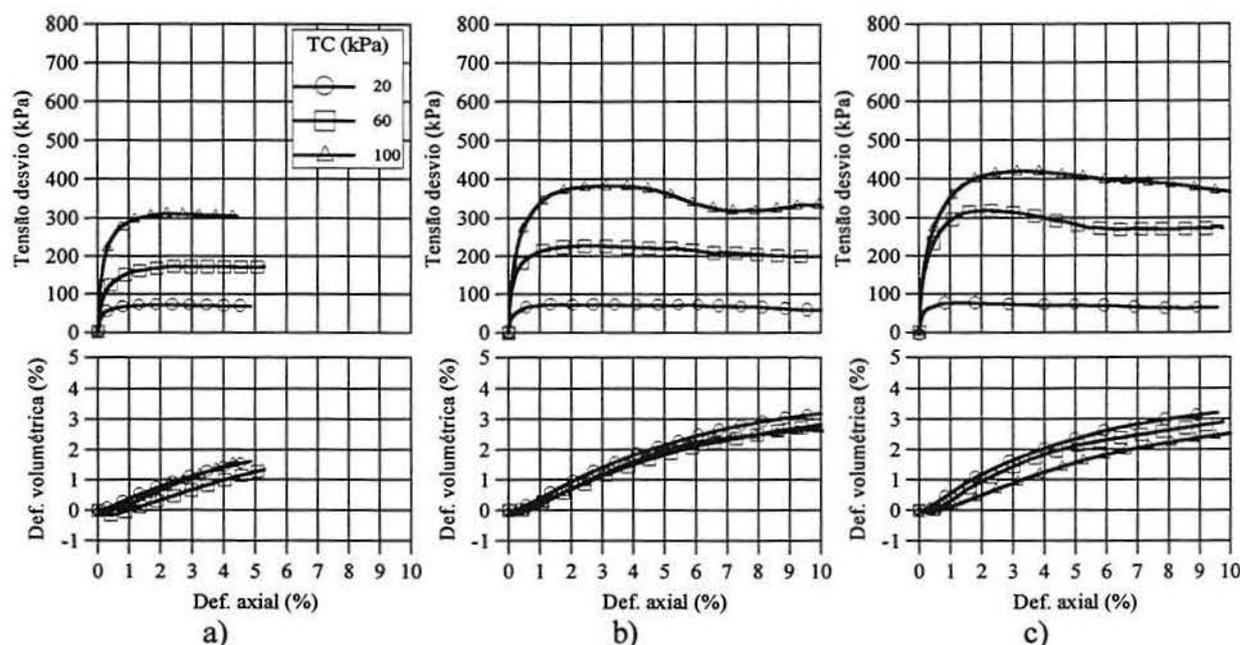


Figura 4.5: Curvas tensão x deformação axial x deformação volumétrica

- a) matriz não-cimentada;
 b) matriz não-cimentada reforçada com fibras PET (CF = 12 mm; PF = 0,5%);
 c) matriz não-cimentada reforçada com fibras PET (CF = 36 mm; PF = 0,5%).

Tabela 4.3: Propriedades mecânicas da matriz não-cimentada reforçada com fibras PET

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				

Nota: PC(%), PF(%), CF(mm), TC(kPa)

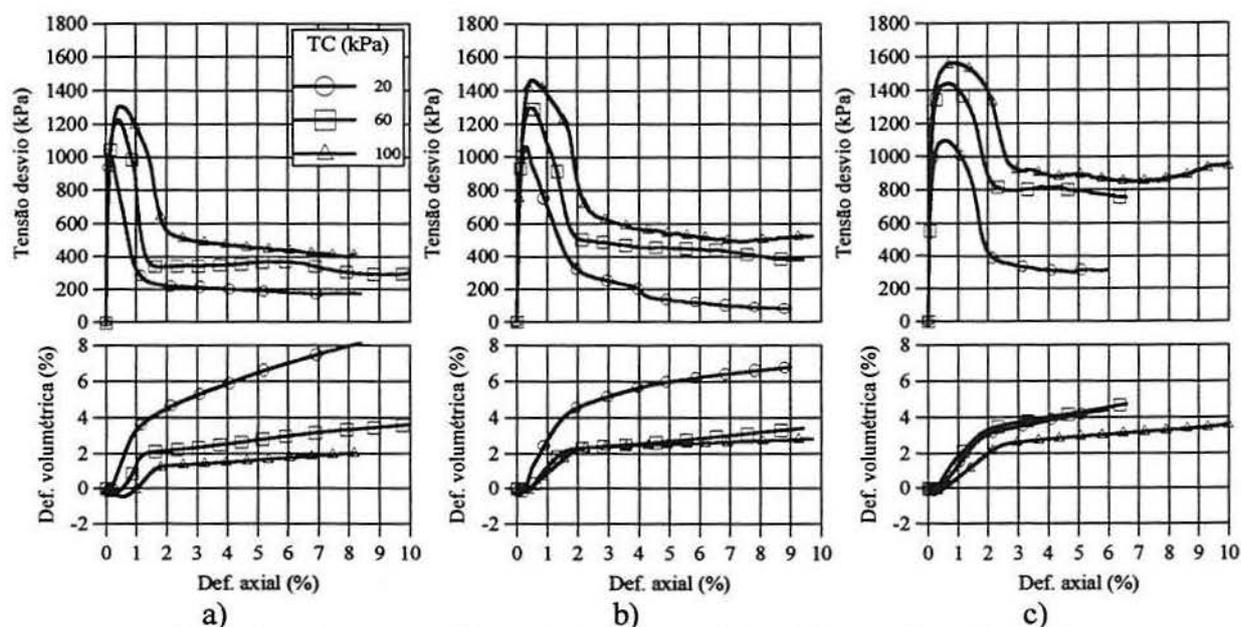


Figura 4.6: Curvas tensão x deformação axial x deformação volumétrica

a) matriz cimentada (PC = 7%);

b) matriz cimentada reforçada com fibras PET (CF = 12 mm; PF = 0,5%);

c) matriz cimentada reforçada com fibras PET (CF = 36 mm; PF = 0,5%).

Tabela 4.4: Propriedades mecânicas da matriz cimentada reforçada com fibras PET

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				

Nota: PC(%), PF(%), CF(mm), TC(kPa)

a) Tensão desvio de ruptura (q_{rup})

A tensão desvio de ruptura (q_{rup}) foi a variável de resposta escolhida para avaliar a influência de PC, PF, CF e TC sobre a resistência triaxial dos compósitos reforçados com fibras PET. A tensão desvio de ruptura foi adotada como sendo a máxima tensão desvio medida ao longo de todo o ensaio.

Como foi explicado no Capítulo 3, não foi possível analisar a influência conjunta de PF e CF. Por isso, foram realizadas duas análises de regressão múltipla: a primeira para avaliar o fator PF, e a segunda para avaliar o fator CF. Aliás, neste momento cabe uma observação que vale para o restante do capítulo: para avaliar a influência de PF sobre qualquer variável de resposta utilizou-se os dados experimentais referentes ao maior dos níveis de CF, ou seja, a fibra mais longa.

A Figura 4.7 mostra a superfície de resposta e as linhas iso- q_{rup} , obtidas do modelo

$$\frac{q_{rup}}{\text{(kPa)}} = 749 + 521.PC + 70.PF + 171.TC \quad (4.3)$$

que permite avaliar a influência de PC e PF sobre q_{rup} , para TC = 60 kPa. O modelo apresenta um nível de confiança superior a 99%, $R^2_{ajustado} = 0,985$ e $\epsilon_T = 68,9$ kPa. O erro absoluto médio (ϵ_M) é igual a 49,8 kPa. ϵ_M representa a média dos resíduos (diferença entre o valor previsto pelo modelo e o valor medido no ensaio).

Os pontos experimentais plotados juntamente com a superfície de resposta e as linhas de contorno permitem avaliar graficamente a eficiência do modelo. Observa-se que a cimentação é o grande responsável pelo aumento de q_{rup} . A inclusão das fibras também aumenta esta variável de resposta, embora esta contribuição seja menos evidente.

De maneira análoga, a Figura 4.8 mostra a superfície de resposta e as linhas de contorno, obtidas do modelo

$$\frac{q_{rup}}{\text{(kPa)}} = 786 + 536.PC + 34.CF + 190.TC \quad (4.4)$$

que permite avaliar a influência de PC e CF sobre q_{rup} , para TC = 60 kPa e que apresenta $R^2_{ajustado} = 0,992$, $\epsilon_T = 51,2$ kPa, $\epsilon_M = 34,9$ kPa e um nível de confiança superior a 99%. Novamente percebe-se, como era de se esperar, a forte influência da porcentagem de cimento

sobre q_{rup} . A variação do comprimento das fibras, representada pelo fator CF, influencia positivamente q_{rup} .

Finalizando, pode-se afirmar que as fibras PET ao serem adicionadas a uma matriz cimentada ou não-cimentada aumentam levemente a resistência de ruptura do compósito. Acrescenta-se ainda que quanto maior for o comprimento das fibras mais pronunciado é este efeito, considerando os comprimentos investigados neste trabalho.

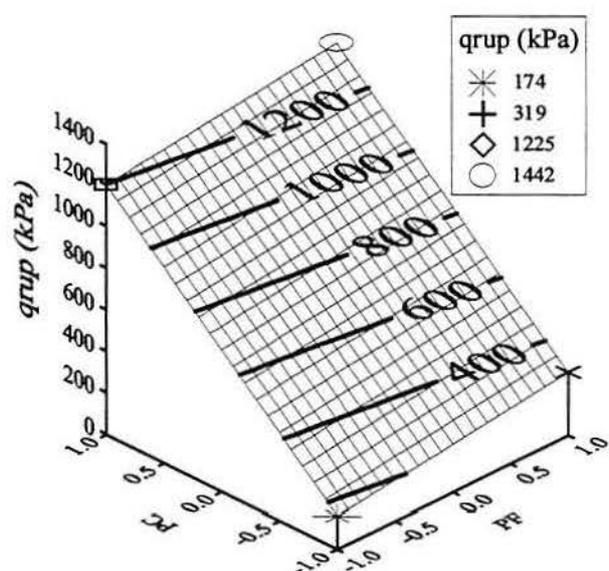


Figura 4.7: Influência de PC e PF sobre q_{rup} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 36 mm e TC = 60 kPa).

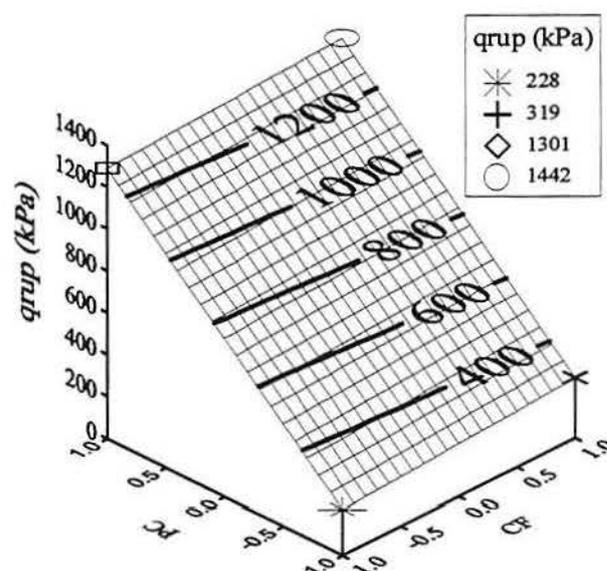


Figura 4.8: Influência de PC e CF sobre q_{rup} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 0,5% e TC = 60 kPa).

b) Tensão desvio última (q_{ult})

A variável de resposta medida para avaliar a resistência à compressão triaxial última foi a tensão desvio última (q_{ult}). A q_{ult} foi adotada como sendo a tensão desvio medida para 10% de deformação axial. Para os ensaios que, eventualmente, não foram conduzidos até este nível de deformação, a q_{ult} foi estimada.

Da regressão realizada para avaliar a influência de PC, PF e TC, bem como as possíveis interações entre estes fatores sobre q_{ult} , resultou o modelo

$$\frac{q_{ult}}{\text{(kPa)}} = 334 + 129 \cdot PC + 103 \cdot PF + 162 \cdot TC + 75 \cdot PC \cdot PF \quad (4.5)$$

que apresenta um nível de confiança superior a 99% e responde por 86,5% da variabilidade de

q_{ult} ; $\varepsilon_T = 90,2$ kPa e $\varepsilon_M = 53,2$ kPa. A Figura 4.9 mostra a influência de PC e PF sobre q_{ult} , para TC = 60 kPa. Diferentemente do que ocorre com q_{rup} , a presença da fibra é tão importante quanto a do cimento. Além disso, existe uma forte interação entre estes fatores, uma vez que a contribuição das fibras é mais efetiva quando na presença do cimento. Esta figura mostra de forma clara o significado da interação entre dois fatores.

A Figura 4.10 apresenta a influência de PC e CF sobre q_{ult} a partir do modelo

$$\frac{q_{ult}}{\text{(kPa)}} = 346 + 134 \cdot PC + 91 \cdot CF + 191 \cdot TC + 71 \cdot PC \cdot CF \quad (4.6)$$

que tem um nível de confiança superior a 99%, $R^2_{ajustado} = 0,888$, $\varepsilon_T = 85,3$ kPa e $\varepsilon_M = 53,5$ kPa. O fator CF aumenta significativamente o valor de q_{ult} . Assim como ocorre com PF, existe uma interação entre CF e PC, que se traduz em uma maior eficiência do comprimento da fibra em mobilizar a resistência última quando há presença de cimento.

Generalizando, pode-se dizer que tanto o fator PF quanto o fator CF exercem uma forte influência sobre q_{ult} , e que esta influência depende da presença do cimento. A capacidade das fibras PET mobilizarem q_{ult} é maior quando a matriz é cimentada.

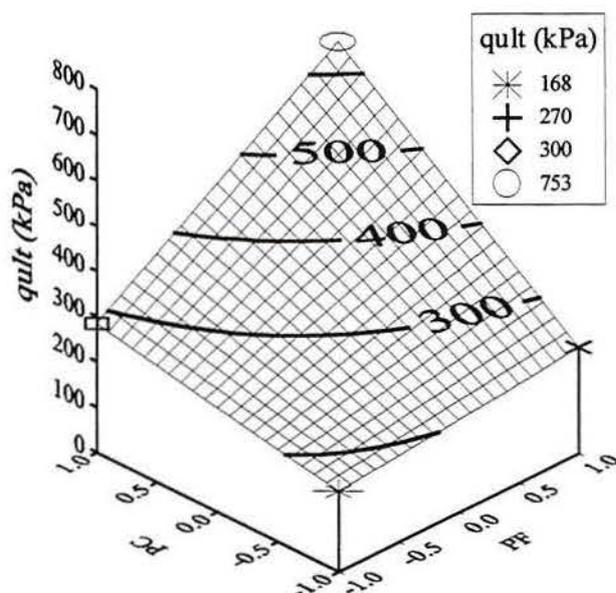


Figura 4.9: Influência de PC e PF sobre q_{ult} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 36 mm e TC = 60 kPa).

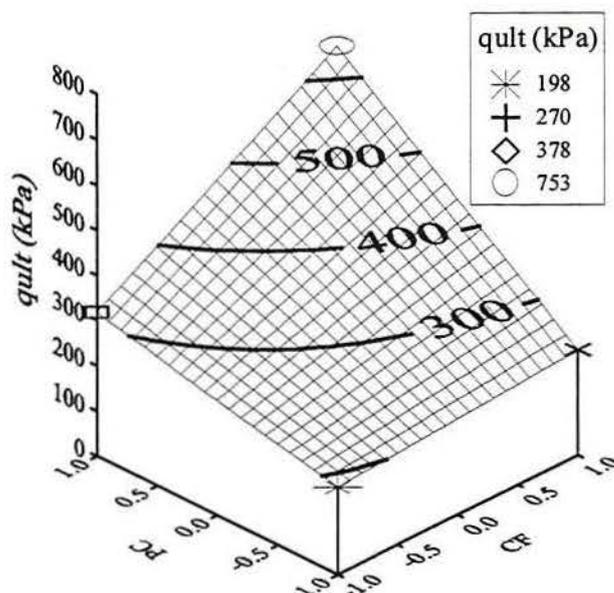


Figura 4.10: Influência de PC e CF sobre q_{ult} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 0,5% e TC = 60 kPa).

c) Módulo de deformação secante inicial (E_s)

A influência das variáveis investigadas (PC, PF, CF e TC) sobre a rigidez inicial dos compósitos foi avaliada através da análise dos módulos de deformação secante (E_s) calculada para 0,01 e 0,1% de deformação axial, apresentada nas Tabelas 4.3 e 4.4.

Das análises de regressão múltipla resultou que o único fator que exerce influência sobre E_s é PC. A presença do cimento aumenta de forma marcante os valores de $E_{s(0,01\%)}$ e $E_{s(0,1\%)}$, enquanto que a presença da fibra, seja ela representada por PF ou CF, não tem qualquer influência.

Apesar das análises de regressão terem se mostrado uma poderosa ferramenta para análise dos resultados aqui apresentados, elas não dispensam uma interpretação crítica por parte de quem as utiliza. Por exemplo, o fato destas análises terem acusado o fator PC como sendo o único responsável pela variabilidade de E_s merece ser aprofundado. Uma coisa é afirmar que PF e CF não influenciam estas variáveis de resposta quando as medidas de $E_{s(0,01\%)}$ ou $E_{s(0,1\%)}$ são iguais, independente da presença de fibras ou do comprimento empregado. Outra coisa é afirmar que PF e CF não influenciam estas variáveis de resposta devido a erraticidade dos resultados medidos. E foi isto que aconteceu. Uma rápida comparação entre os resultados apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4 leva a esta conclusão. Por outro lado, a erraticidade dos resultados nos permite concluir que: se existe alguma influência de PF ou CF sobre E_s , a mesma é muito pequena, caso contrário seria evidenciada. O fator PC, por exemplo, apareceu em todas as análises, e é do conhecimento geral que a influência da cimentação sobre a rigidez inicial é muito forte.

d) Índice de fragilidade (I_f)

O índice de fragilidade (I_f) é um índice que representa a perda de resistência após o pico. Conforme a definição apresentada no Capítulo 2, materiais com I_f próximo a zero podem ser denominados como dúcteis, enquanto que valores crescentes de I_f indicam materiais cada vez mais frágeis.

Para verificar quais fatores controláveis influenciam o I_f das matrizes em questão foram realizadas análises de regressão múltipla a partir dos resultados obtidos nos ensaios triaxiais. O modelo

$$I_f = 1,26 + 1,16.PC - 0,47.PF - 0,54.TC - 0,54.PC.PF - 0,49.PC.TC \quad (4.7)$$

utilizado para representar a influência de PF e dos demais fatores sobre I_f , apresenta um nível de confiança de 99% e responde por 95,5% da variabilidade desta variável. O erro padrão da estimativa é de 0,33 e o erro absoluto médio de 0,15.

A Figura 4.11 apresenta graficamente a contribuição de PC e PF no valor de I_f , para $TC = 60$ kPa. Observa-se claramente que a adição de cimento produz um acréscimo em I_f , ou seja, torna a matriz mais frágil. O fato mais notável, no entanto, é a forte diminuição de I_f quando as fibras PET são introduzidas na matriz cimentada.

A Figura 4.12 apresenta graficamente a influência de CF e PC sobre I_f . A superfície de resposta e as linhas de contorno foram geradas a partir do modelo

$$I_f = 1,09 + 0,90.PC - 0,30.CF - 0,40.TC - 0,29.PC.CF - 0,35.PC.TC \quad (4.8)$$

que apresenta um nível de confiança de 99%, $R^2_{\text{ajustado}} = 0,896$, $\varepsilon_T = 0,30$ e $\varepsilon_M = 0,15$. O índice de fragilidade verificado para a matriz cimentada reforçada com fibras de 12 mm de comprimento, para uma tensão confinante de 20 kPa, foi de 12,5. Acredita-se que este valor possa ser considerado como um valor espúrio, pois diverge de forma marcante dos demais. Para que fosse possível gerar um modelo confiável estatisticamente e que representasse adequadamente os pontos experimentais, optou-se por excluir este valor da análise de regressão.

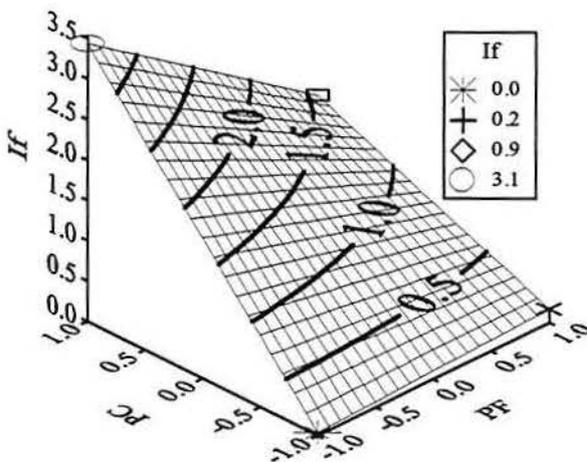


Figura 4.11: Influência de PC e PF sobre I_f . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais ($CF = 36$ mm e $TC = 60$ kPa).

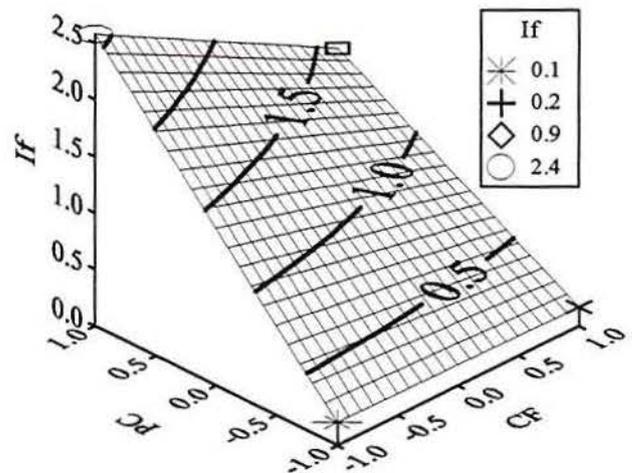


Figura 4.12: Influência de PC e CF sobre I_f . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais ($PF = 0,5\%$ e $TC = 60$ kPa).

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram claramente que a presença de cimento torna a matriz frágil. Em matrizes cimentadas, quanto maior o comprimento da fibra PET menor é o valor de I_f . Embora haja diminuição de I_f com o aumento do comprimento da fibra em matrizes cimentadas, este ainda é suficientemente elevado para caracterizar um compósito frágil. Em matrizes não-cimentadas o efeito do comprimento da fibra (CF) é nulo.

e) Capacidade de absorção de energia de deformação (E_{def})

A tenacidade é a propriedade do material que expressa a energia consumida, ou absorvida, por este ao deformar-se. A variável de resposta adotada para medir a tenacidade dos compósitos fibrosos foi a capacidade de absorção de energia de deformação (E_{def}). A E_{def} , por unidade de volume, é uma grandeza numericamente igual a área abaixo da curva tensão x deformação axial. Para avaliar a influência de PC, PF, CF e TC sobre esta variável de resposta, considerou-se a área total abaixo da curva tensão x deformação, ou seja, E_{def} refere-se a energia absorvida pelo compósito para atingir 10% de deformação. Para expressar esta condição utilizar-se-á a simbologia $E_{def(10\%)}$.

O modelo

$$\frac{E_{def(10\%)}}{(\text{kJ} / \text{m}^3)} = 40 + 19.PC + 11.PF + 18.TC + 8.PC.PF \quad (4.9)$$

tem um nível de confiança de 99%, $R^2_{ajustado} = 0,912$, $\varepsilon_T = 8,7 \text{ kJ/m}^3$ e $\varepsilon_M = 5,1 \text{ kJ/m}^3$. Este modelo representa a influência de PC, PF e TC sobre $E_{def(10\%)}$.

Da mesma forma, o modelo

$$\frac{E_{def(10\%)}}{(\text{kJ} / \text{m}^3)} = 43 + 20.PC + 8.CF + 20.TC + 6.PC.CF \quad (4.10)$$

representa a influência de PC, CF e TC sobre $E_{def(10\%)}$. Este modelo tem um nível de confiança de 99%, $R^2_{ajustado} = 0,921$, $\varepsilon_T = 8,4 \text{ kJ/m}^3$ e $\varepsilon_M = 5,3 \text{ kJ/m}^3$.

É fácil perceber que todos os fatores contribuem individualmente para o aumento de $E_{def(10\%)}$. Percebe-se também que o grau de contribuição das fibras é maximizado na presença de cimento, devido às interações PC.PF e PC.CF. Estas considerações são ilustradas nas Figuras 4.13 e 4.14.

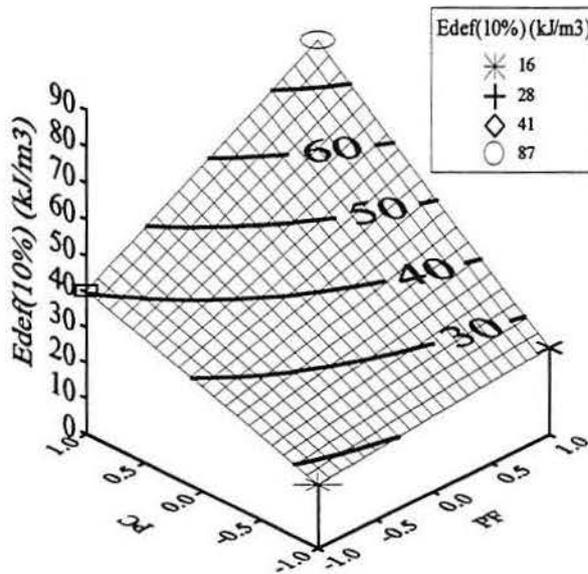


Figura 4.13: Influência de PC e PF sobre $E_{def(10\%)}$. Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF=36 mm e TC=60 kPa).

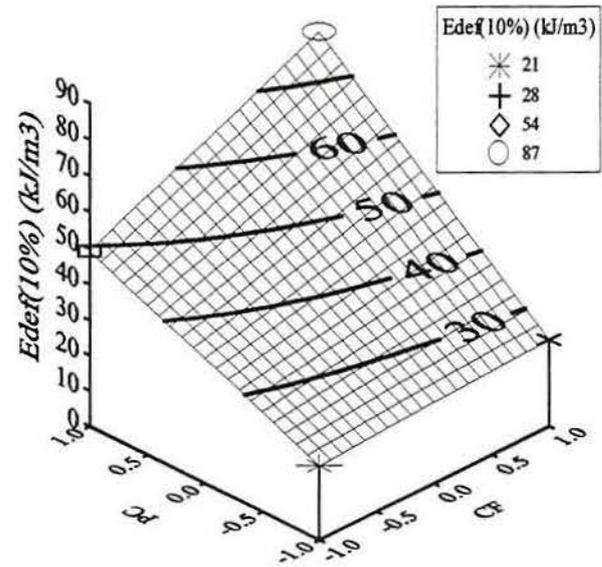


Figura 4.14: Influência de PC e CF sobre $E_{def(10\%)}$. Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF=0,5% e TC=60 kPa).

4.3 SOLO REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO

Esta seção concentra os resultados dos ensaios de compressão não-confinada, compressão diametral e compressão triaxial envolvendo o solo reforçado com fibras de polipropileno.

4.3.1 Ensaios de resistência à compressão não-confinada

A Tabela 4.5 apresenta os resultados dos ensaios de compressão não-confinada do solo cimentado reforçado com fibras de polipropileno para todos os níveis realizados de PC, PF e CF.

Baseado nestes resultados foi realizada uma análise de regressão múltipla que indicou o modelo

$$\frac{q_u}{(\text{kPa})} = 505 + 234.PC + 53.PF + 29.CF + 51.PF.CF \quad (4.11)$$

como sendo adequado para representar os resultados dos ensaios realizados. O modelo apresentado acima tem um nível de confiança 99% e responde por 93,9% da variabilidade de q_u ($R^2_{ajustado} = 0,939$). Ao modelo está associado um erro padrão (ϵ_p) de 40,4 kPa.

Tabela 4.5: Resultados experimentais dos ensaios de compressão não-confinada para o solo cimentado reforçado com fibras de polipropileno.

Comprimento da fibra, CF (mm)		Resistência à compressão não-confinada, q_u (kPa)						
		Porcentagem de cimento, PC (%)	Porcentagem de fibra, PF (%)					
			0,10	0,22	0,50	0,78	0,90	
12	3,00			280				
		3,58		273		322		
		5,00	454		453 493		412	
		6,42		696		647		
		7,00			745			
	24	3,00			316			
			3,58		255		350	
			5,00	467		474 445		658
			6,42		623		701	
			7,00			721		
36	3,00			287				
		3,58		287		492		
		5,00	488		501 520		629	
		6,42		639		754		
		7,00			763			

Todos os fatores principais investigados mostraram ter influência sobre a variável de resposta q_u . Como era de se esperar, a porcentagem de cimento é o fator mais influente, seguido da porcentagem e do comprimento da fibra, respectivamente. O modelo ainda acusa a existência de uma interação entre PF e CF, ou seja, além da contribuição individual destes fatores, existe uma interferência entre eles no sentido de aumentar ainda mais o valor de q_u .

A Figura 4.15 e a Figura 4.17 comparam os resultados experimentais com os valores de q_u estimados pelo modelo. A Figura 4.15 mostra a influência de PC e PF sobre q_u para CF = 24mm, e a Figura 4.17 mostra a influência de PC e CF sobre q_u para PF = 0,5%. As Figuras 4.16 e 4.18 mostram a influência de PC, PF e CF na resistência à compressão não-confinada na forma de superfícies de resposta. A análise destas figuras evidencia, além da boa representatividade do modelo, que o grau de influência de PF e CF sobre q_u são similares frente a forte influência de PC.

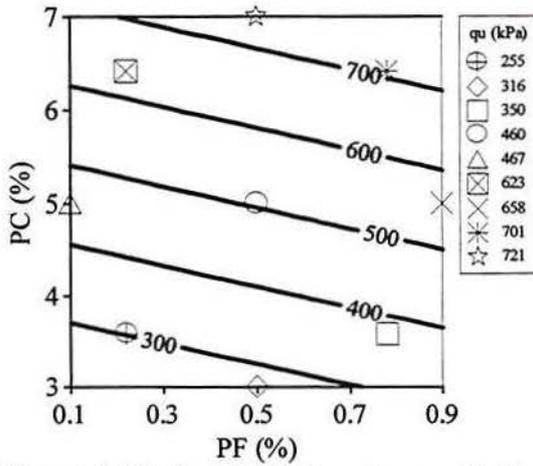


Figura 4.15: Comparação entre resultados experimentais (CF = 24 mm) e a previsão de q_u pelo modelo estatístico.

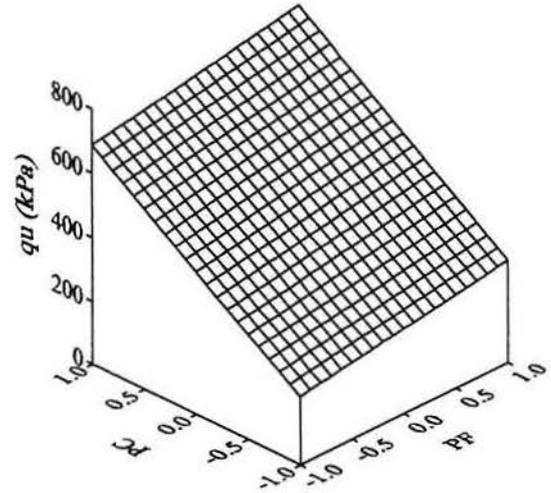


Figura 4.16: Superfície de resposta q_u x PF x PC (CF = 24 mm).

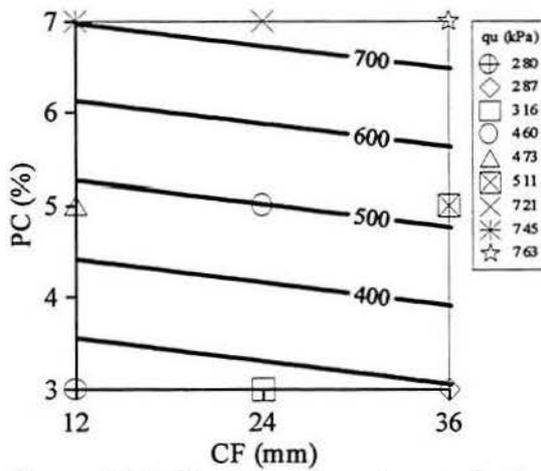


Figura 4.17: Comparação entre resultados experimentais (PF = 0,5%) e a previsão de q_u pelo modelo estatístico.

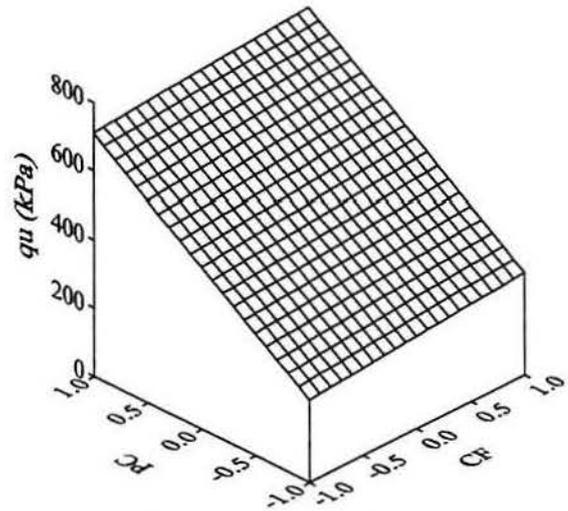


Figura 4.18: Superfície de resposta q_u x CF x PC (PF = 0,5%).

4.3.2 Ensaios de resistência à tração por compressão diametral

A Tabela 4.6 apresenta os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral realizados em amostras de solo cimentado reforçado com fibras de polipropileno.

A análise de regressão múltipla indicou o modelo

$$\frac{q_u}{(\text{kPa})} = 72 + 41.PC - 7.CF.PF \quad (4.12)$$

para previsão de q_{ut} da matriz cimentada reforçada com fibras de polipropileno. Este modelo apresenta um nível de confiança de 99% e justifica 93,9% da variabilidade de q_{ut} . O erro padrão da estimativa é de 6,9 kPa.

Tabela 4.6: Resultados experimentais dos ensaios de tração por compressão diametral para o solo cimentado reforçado com fibras de polipropileno.

Comprimento da fibra, CF (mm)		Resistência à compressão diametral, q_{ut} (kPa)					
		Porcentagem de cimento, PC (%)	Porcentagem de fibra, PF (%)				
			0,10	0,22	0,50	0,78	0,90
12	3,00	3,58			38		
		5,00	57		73		74
		6,42		108		120	
		7,00			110		
	3,58	5,00					
		6,42		41		48	
		7,00					
	5,00	6,42					
		7,00					
24	3,00	3,58			33		
		5,00	74		72		58
		6,42		110		89	
		7,00			110		
	3,58	5,00					
		6,42		41		43	
		7,00					
	5,00	6,42					
		7,00					
36	3,00	3,58			30		
		5,00	76		70		60
		6,42		105		96	
		7,00			108		
	3,58	5,00					
		6,42		42		40	
		7,00					
	5,00	6,42					
		7,00					

As Figuras 4.19 e 4.20 mostram as linhas de contorno (ou curvas iso- q_{ut}) e a superfície de resposta para q_{ut} , para CF = 12 mm.

Observa-se que o aumento de q_{ut} depende apenas de PC. Nota-se também que a inclusão das fibras de polipropileno não contribui para o aumento de q_{ut} . É interessante perceber que embora não tenha sido verificada a influência de CF e PF sobre esta variável de resposta, há uma interação entre estes fatores no sentido de reduzir q_{ut} .

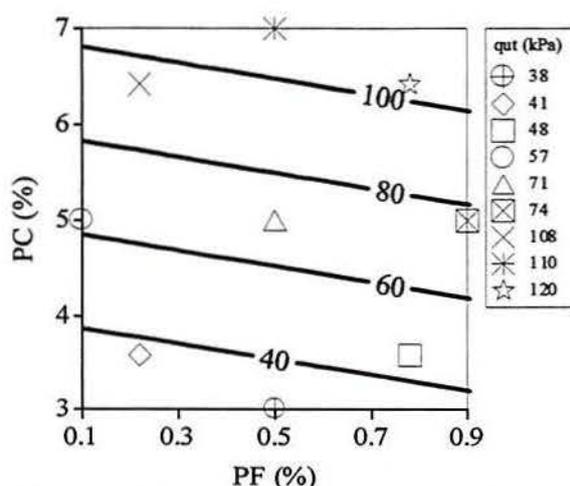


Figura 4.19: Comparação entre resultados experimentais ($CF = 12$ mm) e a previsão de q_{ut} pelo modelo estatístico.

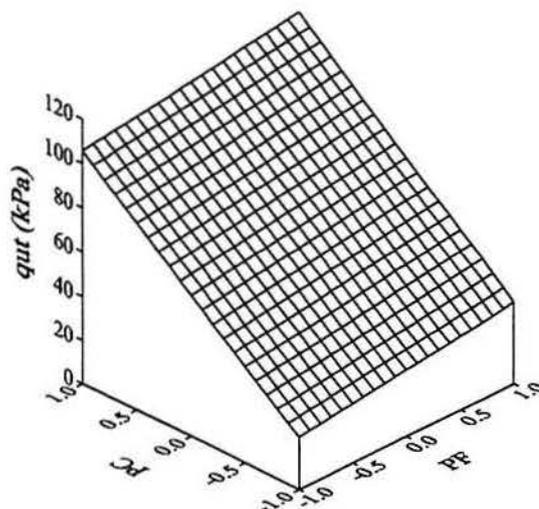


Figura 4.20: Superfície de resposta q_{ut} x PF x PC.

4.3.3 Ensaios drenados de resistência à compressão triaxial

Os resultados obtidos nos ensaios drenados de compressão triaxial realizados para avaliar a influência das fibras de polipropileno nas características mecânicas dos compósitos estudados são apresentados na Figura 4.21 e na Tabela 4.7, para a matriz não-cimentada, e na Figura 4.22 e na Tabela 4.8, para a matriz cimentada.

Estes resultados indicam que as fibras de polipropileno quando adicionadas ao solo, seja ele cimentado ou não, altera de forma marcante e definitiva as suas propriedades de resistência e deformabilidade.

Observa-se na Figura 4.21 (matriz não-cimentada) um ganho de resistência mecânica contínuo até o final do ensaio, com deformações axiais de aproximadamente 10%. Isto mostra a capacidade deste compósito de mobilizar resistência mesmo quando submetido a grandes níveis de deformação.

Ainda referindo-se a Figura 4.21, nota-se que o solo reforçado apresenta uma maior taxa de variação volumétrica, mas o comportamento geral é o mesmo, ou seja, contração inicial e, na seqüência, acréscimo de volume contínuo até o nível de deformação axial de 10%. Novamente, a análise da rigidez inicial a partir dos módulos apresentados na Tabela 4.7 fica difícil, pois os mesmos não apresentam um padrão de variação. A melhora na propriedade de tenacidade é representada pelo largo acréscimo de $E_{def(10\%)}$.

As fibras de polipropileno conferem coesão à matriz não-cimentada. Durante o

processo de mistura do solo com a fibra, notava-se claramente que as fibras proporcionavam um emaranhado que envolvia e, de certa forma “amarrava” os grãos do solo. Esta observação foi traduzida no aumento do intercepto coesivo, e comprovada pelos dados apresentados na Tabela 4.7.

A Figura 4.22 mostra a eficiência das fibras de polipropileno em modificar, também, certas propriedades geotécnicas da matriz cimentada. Quanto à resistência mecânica, percebe-se uma leve diminuição de q_{rup} . O fato mais notável, no entanto, é a mudança do comportamento global tensão x deformação da matriz cimentada. Sem reforço ela é essencialmente frágil. Com a adição de fibras de polipropileno, o comportamento é o de um material dúctil, principalmente com fibras de 36 mm de comprimento. As características de ductilidade e tenacidade podem ser quantificadas pela comparação entre os valores de I_f e $E_{def10\%}$, respectivamente, das matrizes não-reforçada e reforçada (Tabela 4.8).

Em se tratando de características de deformabilidade, observa-se o aumento significativo, da ordem de 2 a 3%, da deformação axial de ruptura. O comportamento de variação volumétrica é bem mais “suave”, não sendo verificado o comportamento dilatante tão acentuado característico da matriz não-reforçada. A análise dos módulos de elasticidade apresentados na Tabela 4.8 indica perda da rigidez inicial com a adição das fibras.

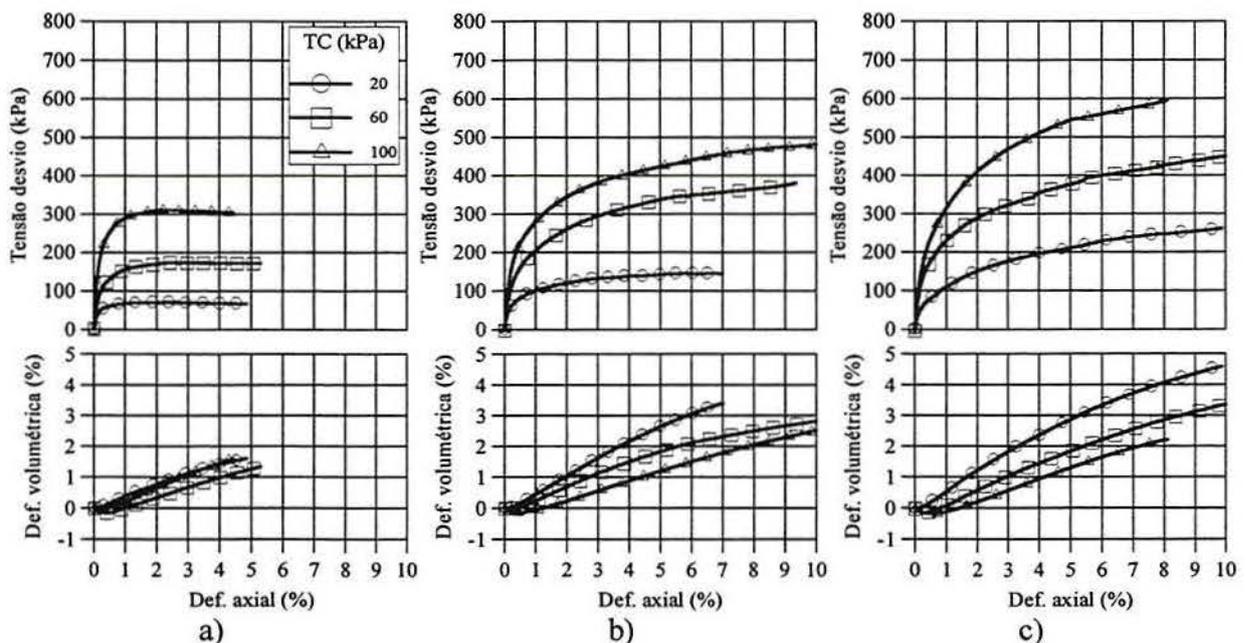


Figura 4.21: Curvas tensão x deformação axial x deformação volumétrica

- a) matriz não-cimentada;
- b) matriz não-cimentada reforçada com fibras de polipropileno (CF = 12 mm; PF = 0,5%);
- c) matriz não-cimentada reforçada com fibras de polipropileno (CF = 36 mm; PF = 0,5%).

Tabela 4.7: Propriedades mecânicas da matriz não-cimentada reforçada com fibras de polipropileno

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	145	144	137	44	13	0,0	43	12	43	12
Matriz reforçada PC=0; PF=0,5; CF=12; TC=60	387	387	114	72	31	0,0				
Matriz reforçada PC=0; PF=0,5; CF=12; TC=100	481	481	178	102	40	0,0				
Matriz reforçada PC=0; PF=0,5; CF=36; TC=20	263	263	67	38	20	0,0	44	32	44	32
Matriz reforçada PC=0; PF=0,5; CF=36; TC=60	450	450	143	78	35	0,0				
Matriz reforçada PC=0; PF=0,5; CF=36; TC=100	615	615	169	99	50	0,0				

Nota: PC(%), PF(%), CF(mm), TC(kPa)

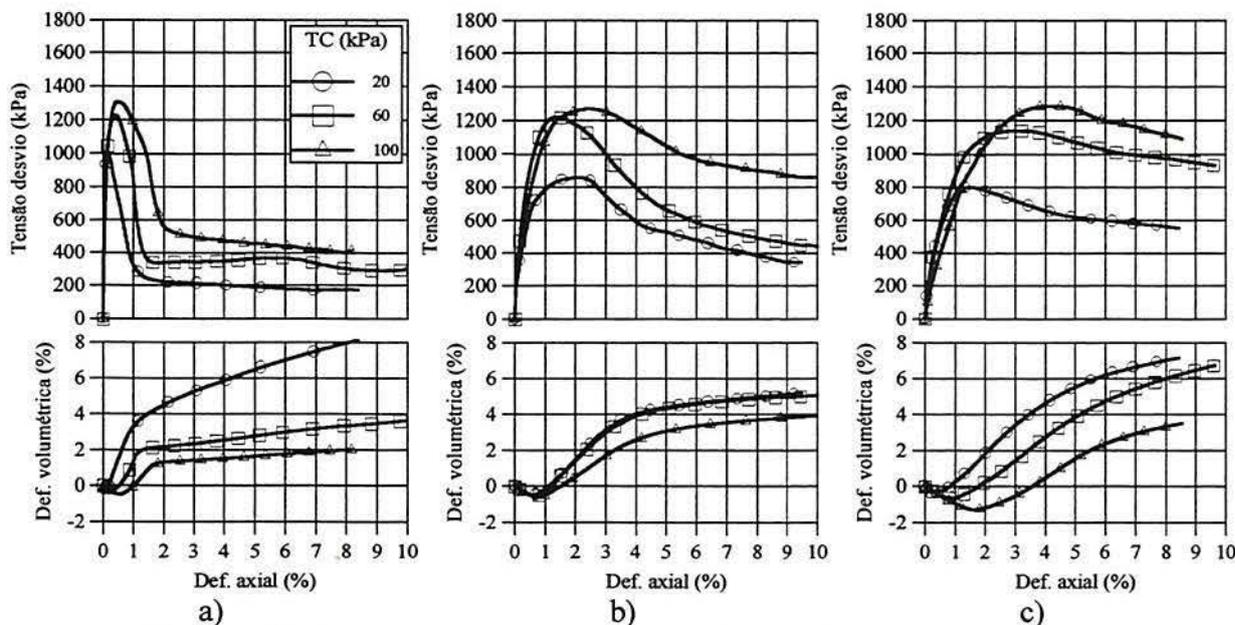


Figura 4.22: Curvas tensão x deformação axial x deformação volumétrica

- a) matriz cimentada (PC = 7%);
 b) matriz cimentada reforçada com fibras de polipropileno (CF = 12 mm; PF = 0,5%);
 c) matriz cimentada reforçada com fibras de polipropileno (CF = 36 mm; PF = 0,5%).

Tabela 4.8: Propriedades mecânicas da matriz cimentada reforçada com fibras de polipropileno

Ensaio	q_{rup} (kPa)	q_{ult} (kPa)	$E_{s(0,01\%)}$ (MPa)	$E_{s(0,1\%)}$ (MPa)	$E_{def(10\%)}$ (kJ/m ³)	I_r	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	860	338	1128	268	55	1,5	48	146	52	12
Matriz reforçada PC=7; PF=0,5; CF=12; TC=60	1219	440	1128	372	74	1,8				
Matriz reforçada PC=7; PF=0,5; CF=12; TC=100	1268	860	900	294	101	0,5				
Matriz reforçada PC=7; PF=0,5; CF=36; TC=20	782	520	527	187	62	0,5	49	126	51	66
Matriz reforçada PC=7; PF=0,5; CF=36; TC=60	1139	927	-	212	99	0,2				
Matriz reforçada PC=7; PF=0,5; CF=36; TC=100	1284	1020	233	118	107	0,3				

Nota: PC(%), PF(%), CF(mm), TC(kPa)

a) Tensão desvio de ruptura (q_{rup})

A partir dos resultados dos ensaios triaxiais realizados, foram executadas análises de regressão para avaliar quais dos fatores estudados influenciam a tensão desvio de ruptura (q_{rup}).

O modelo obtido para previsão de q_{rup} , quando buscou-se a contribuição de PF, foi

$$\frac{q_{rup}}{\text{(kPa)}} = 717 + 403 \cdot PC + 177 \cdot TC - 90 \cdot PC \cdot PF \quad (4.13)$$

Este modelo apresenta um nível de confiança de 99% e responde por 97,2% da variabilidade de q_{rup} . O erro padrão da estimativa é de 76,9 kPa e o erro absoluto médio 56,6 kPa. A Figura 4.23 mostra as linhas de contorno e as superfícies de resposta geradas a partir do modelo. Pode-se afirmar que a inclusão das fibras de polipropileno, em uma matriz não-cimentada aumenta q_{rup} . Porém quando são adicionadas a uma matriz cimentada há um pequeno decréscimo na resistência, justificando a interação PC.PF, incluída no modelo acima apresentado. Novamente, PC aparece como sendo o fator mais importante no aumento de q_{rup} .

Para avaliar o efeito de CF sobre q_{rup} , foi realizada uma nova análise de regressão que indicou o modelo

$$\frac{q_{rup}}{\text{(kPa)}} = 799 + 351.PC + 200.TC - 38.PC.CF - 87.TC^2 \quad (4.14)$$

com uma representatividade de 98,4% da variabilidade de q_{rup} . Este modelo apresenta um nível de confiança de 99%, $\varepsilon_T = 51,0$ kPa e $\varepsilon_M = 36,5$ kPa. A Figura 4.24 ilustra a influência de PC e CF sobre q_{rup} . Nota-se que o fator CF não é um fator que influencia significativamente q_{rup} . O aumento do comprimento das fibras de polipropileno de 12 para 36 mm só é eficiente na matriz não-cimentada. Se a matriz é cimentada, o efeito é inverso, havendo uma leve diminuição de q_{rup} , resultado da interação PC.CF incluída no modelo de regressão.

Finalizando esta abordagem, conclui-se que as fibras de polipropileno aumentam q_{rup} quando a matriz é não-cimentada, e que este aumento é proporcional ao comprimento das fibras. Por outro lado, quando a matriz é cimentada, a inclusão das fibras acarreta uma breve diminuição de q_{rup} .

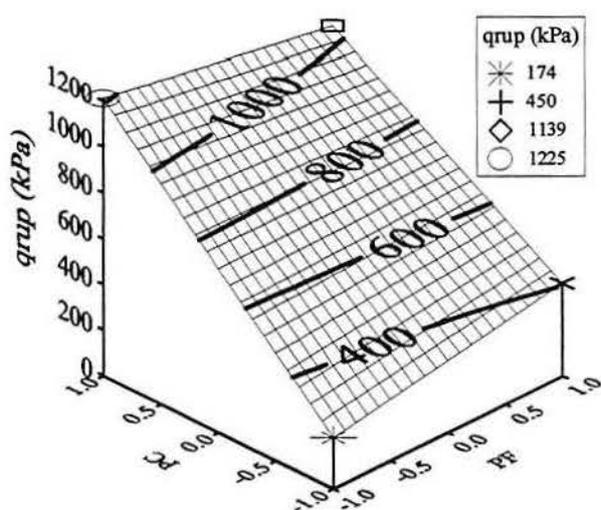


Figura 4.23: Influência de PC e PF sobre q_{rup} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 36 mm e TC = 60 kPa).

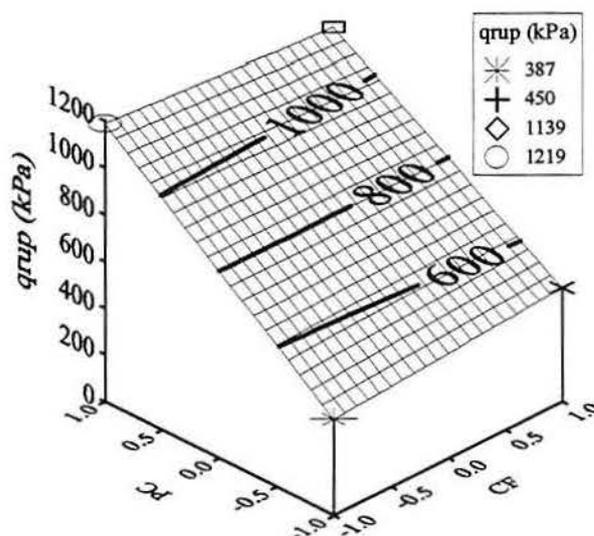


Figura 4.24: Influência de PC e CF sobre q_{rup} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 0,5 % e TC = 60 kPa).

b) Tensão desvio última (q_{ult})

As Figuras 4.25 e 4.26 mostram como os fatores PC, PF e CF modificam a tensão desvio última (q_{ult}), dos solos reforçados com fibras de polipropileno. A Figura 4.25 foi construída a partir do modelo

$$\frac{q_{ult}}{\text{(kPa)}} = 431 + 122.PC + 201.PF + 162.TC + 68.PC.PF + 51.TC.PF \quad (4.15)$$

que tem um nível de confiança de 99%, $R^2_{ajustado} = 0,957$, $\epsilon_T = 61,5$ kPa e $\epsilon_M = 28,8$ kPa.

A Figura 4.26, por sua vez, foi construída a partir do modelo

$$\frac{q_{ult}}{\text{(kPa)}} = 537 + 147.PC + 95.CF + 214.TC \quad (4.16)$$

que é sensível a 87,5% da variabilidade de q_{ult} , apresenta um nível de confiança de 99%, $\epsilon_T = 95,5$ kPa e $\epsilon_M = 64,5$ kPa

Da análise da Figura 4.25 percebe-se que o fator PF aumenta q_{ult} de forma definitiva, e que este aumento é ainda mais pronunciado quando a matriz é cimentada. Isto se deve à interação existente entre PC e PF. O fator PC também afeta q_{ult} , mas este efeito é menor do que o efeito proporcionado por PF. Do modelo verifica-se que existe também uma interação entre TC e PF, ou seja, quanto maior for a tensão de confinamento maior será a eficiência das fibras de polipropileno em mobilizar a resistência última dos compósitos fibrosos.

A Figura 4.26 mostra a influência de CF e PC sobre q_{ult} . A influência de CF sobre q_{ult} independe da presença de cimento.

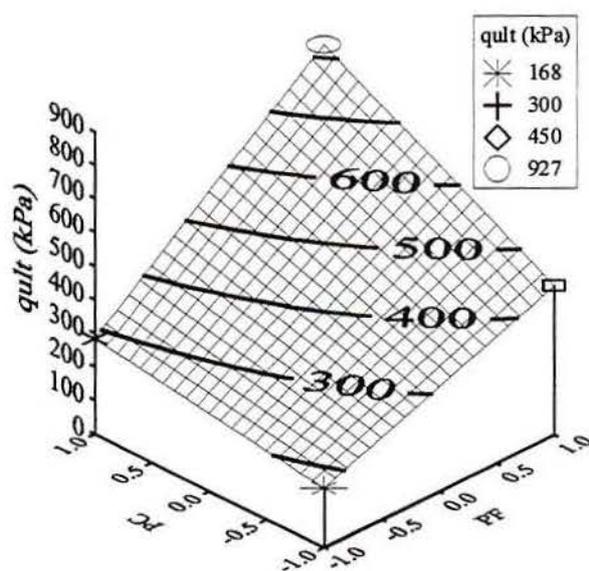


Figura 4.25: Influência de PC e PF sobre q_{ult} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 36 mm e TC = 60 kPa).

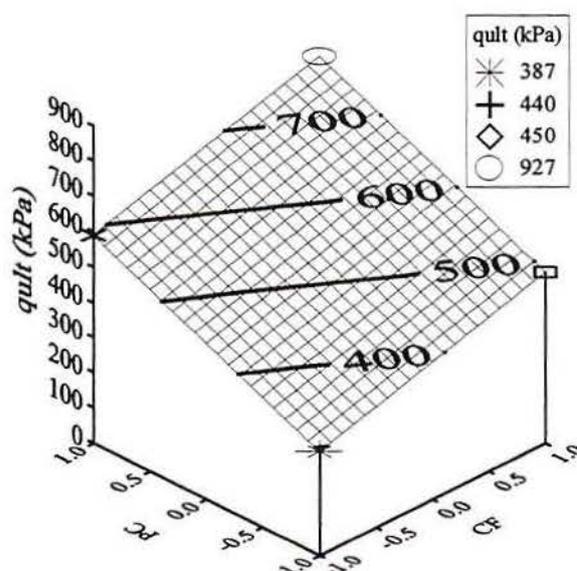


Figura 4.26: Influência de PC e CF sobre q_{ult} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 0,5% e TC = 60 kPa).

De maneira geral pode-se afirmar que PF e, numa escala pouco inferior, CF, aumentam significativamente q_{ult} . A contribuição de PF é mais pronunciada pois, além do efeito principal, há duas interações, PC.PF e TC.PF, que intensificam ainda mais a influência deste fator na variabilidade de q_{ult} . Os fatores PC e TC, como é esperado, também afetam positivamente esta variável de resposta.

c) Módulo de deformação secante inicial (E_s)

A Figura 4.27 mostra a influência de PC e PF sobre $E_{s(0,01\%)}$. A superfície de resposta e as linhas de contorno foram geradas a partir da análise de regressão múltipla que indicou o modelo

$$\frac{E_{s(0,01\%)}}{\text{(MPa)}} = 810 + 662.PC - 557.PF - 536.PC.PF \quad (4.17)$$

para representar os dados experimentais. Este modelo tem um nível de confiança de 99%, responde por 69,6% da variabilidade de $E_{s(0,01\%)}$, $\varepsilon_T = 687,4$ MPa e $\varepsilon_M = 302,5$ MPa.

A Figura 4.28 mostra a influência de PC e CF sobre $E_{s(0,01\%)}$. O modelo que deu origem a figura é

$$\frac{E_{s(0,01\%)}}{\text{(MPa)}} = 394 + 259.PC - 204.CF - 196.PC.CF \quad (4.18)$$

com um nível de confiança de 99%, $R^2_{\text{ajustado}} = 0,871$, $\varepsilon_T = 150,7$ MPa e $\varepsilon_M = 86,6$ MPa.

A análise destas figuras indica, como era de se esperar, a forte influência de PC sobre $E_{s(0,01\%)}$. A inclusão das fibras, por sua vez, não afeta $E_{s(0,01\%)}$ quando a matriz é não-cimentada. O fator CF também não exerce qualquer efeito neste tipo de matriz. Por outro lado, quando a matriz é cimentada, as fibras de polipropileno provocam uma diminuição considerável de $E_{s(0,01\%)}$. Tanto PF quanto CF exercem seus efeitos no sentido de reduzir esta variável de resposta.

O mesmo procedimento adotado para avaliar os efeitos dos fatores PC, PF, CF e TC sobre $E_{s(0,01\%)}$ foi utilizado para avaliar $E_{s(0,1\%)}$. As análises de regressão indicaram que estas variáveis de resposta são igualmente influenciadas pelos mesmos fatores. Portanto, as considerações a respeito de $E_{s(0,01\%)}$ podem ser transcritas para $E_{s(0,1\%)}$.

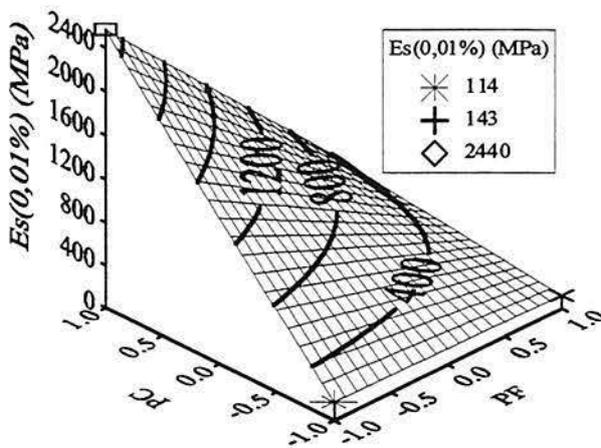


Figura 4.27: Influência de PC e PF sobre $E_{s(0,01\%)}$. Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 36mm e TC = 60 kPa).

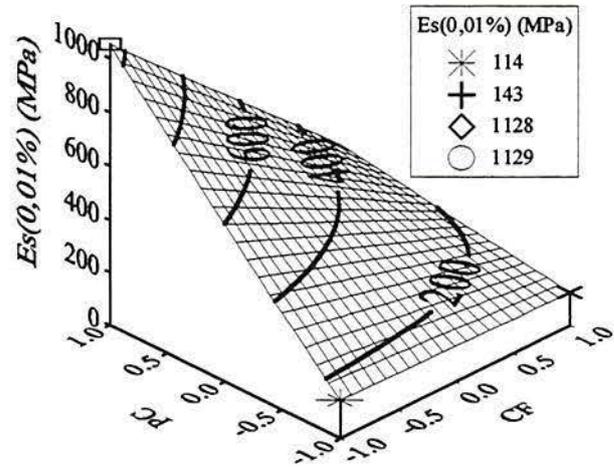


Figura 4.28: Influência de PC e CF sobre $E_{s(0,01\%)}$. Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 0,5% e TC = 60 kPa).

d) Índice de fragilidade (I_f)

A Figura 4.29 mostra a influência de PC e PF sobre o índice de fragilidade (I_f) para as matrizes reforçadas com as fibras de polipropileno. Para a construção destas figuras utilizou-se o modelo

$$I_f = 0,95 + 0,93.PC - 0,78.PF - 0,76.PC.PF \quad (4.19)$$

pois o mesmo representa adequadamente os dados experimentais. Este modelo apresenta um nível de confiança de 99%, $R^2_{ajustado} = 0,847$, $\varepsilon_T = 0,62$ e $\varepsilon_M = 0,26$.

Já a Figura 4.30 mostra a influência de PC e CF sobre o índice de fragilidade (I_f) para as matrizes reforçadas com as mesmas fibras. Esta figura foi gerada a partir do modelo

$$I_f = 0,39 + 0,39.PC - 0,23.CF - 0,23.PC.CF \quad (4.20)$$

que tem um nível de confiança de 99%, $R^2_{ajustado} = 0,669$, $\varepsilon_T = 0,35$ e $\varepsilon_M = 0,16$.

Observa-se nestas figuras que o fator PC, que aumenta drasticamente o valor de I_f , tornando a matriz com acentuadas características de fragilidade, encontra forte oposição por parte de PF no sentido de reduzir este valor. A inclusão das fibras de polipropileno foi capaz de mudar o comportamento essencialmente frágil da matriz cimentada para um comportamento dúctil. A influência do fator CF indica que fibras de maior comprimento

contribuem ainda mais para conferir à matriz cimentada propriedades dúcteis, conforme mostra a análise das curvas tensão x deformação (Figura 4.22).

Chama-se a atenção para um fato interessante. A influência de PF e CF é tão forte sobre I_f , no sentido de tornar dúcteis os compósitos cimentados, que o fator TC, que é tradicionalmente um fator que reduz I_f , não apareceu como sendo significativo nos modelos acima apresentados. Uma rápida verificação na Tabela 4.8 confirma esta afirmação, e mostra a eficiência das análises de regressão em facilitar a leitura dos resultados experimentais.

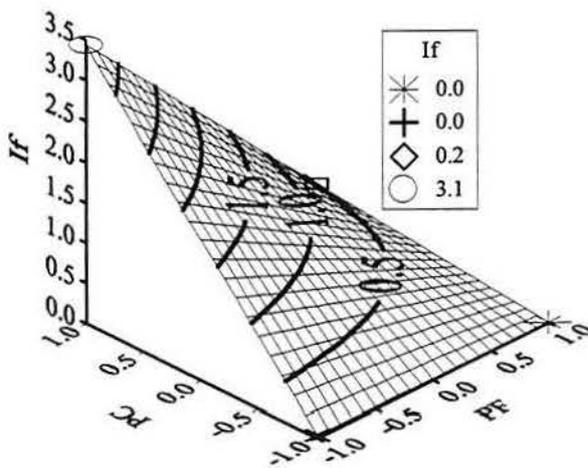


Figura 4.29: Influência de PC e PF sobre I_f . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 36mm e TC = 60 kPa).

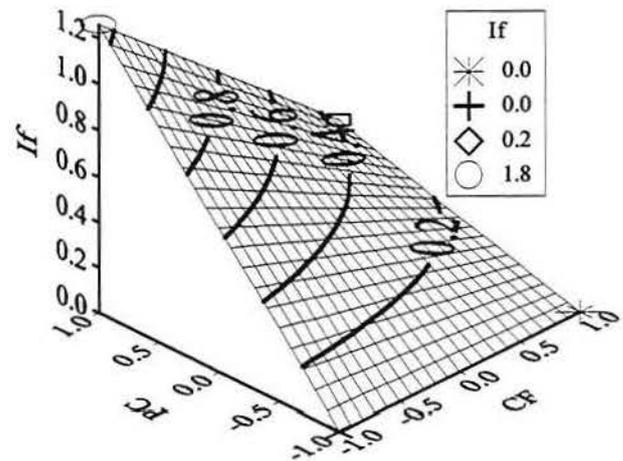


Figura 4.30: Influência de PC e CF sobre I_f . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 0,5% e TC = 60 kPa).

e) Capacidade de absorção de energia de deformação (E_{def})

As Figuras 4.31 e 4.32 mostram a influência de PC, PF, CF sobre a capacidade de absorção de energia de deformação ($E_{def(10\%)}$) dos materiais compósitos fibrosos.

A Figura 4.31 foi gerada a partir do modelo

$$\frac{E_{def(10\%)}}{(\text{kJ} / \text{m}^3)} = 46 + 19.PC + 17.PF + 16.TC + 8.PC.PF \quad (4.21)$$

que apresenta um nível de confiança de 99%, $R^2_{ajustado} = 0,960$, $\varepsilon_T = 6,2 \text{ kJ/m}^3$ e $\varepsilon_M = 3,1 \text{ kJ/m}^3$.

A Figura 4.32 foi gerada a partir do modelo

$$\frac{E_{\text{def}(10\%)}}{(\text{kJ} / \text{m}^3)} = 57 + 26. \text{PC} + 5. \text{CF} + 18. \text{TC} \quad (4.22)$$

que apresenta um nível de confiança de 99%, $R^2_{\text{ajustado}} = 0,960$, $\varepsilon_T = 6,3 \text{ kJ/m}^3$ e $\varepsilon_M = 4,5 \text{ kJ/m}^3$.

Estas figuras indicam que todos os fatores em questão aumentam a capacidade de absorção de energia ($E_{\text{def}(10\%)}$). No entanto, a interação existente entre PC e PF indica que, na matriz cimentada, a influência de PF na capacidade deste compósito de absorver energia é ainda mais pronunciada. O fator CF mostrou-se significativo no aumento de $E_{\text{def}(10\%)}$ e a sua contribuição independe da presença do cimento.

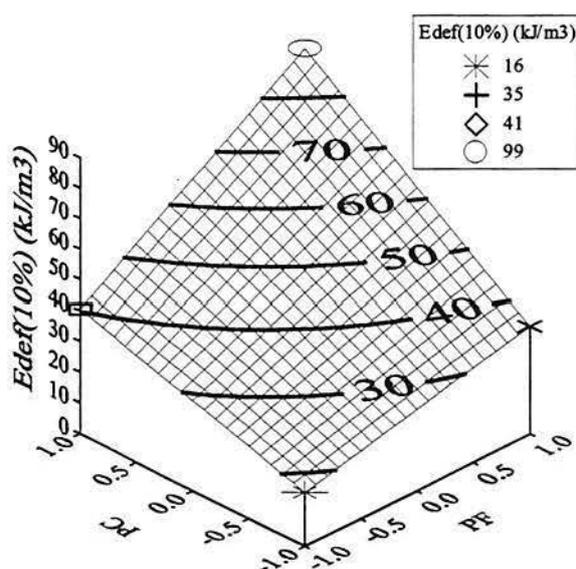


Figura 4.31: Influência de PC e PF sobre E_{def} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 36mm e TC = 60 kPa).

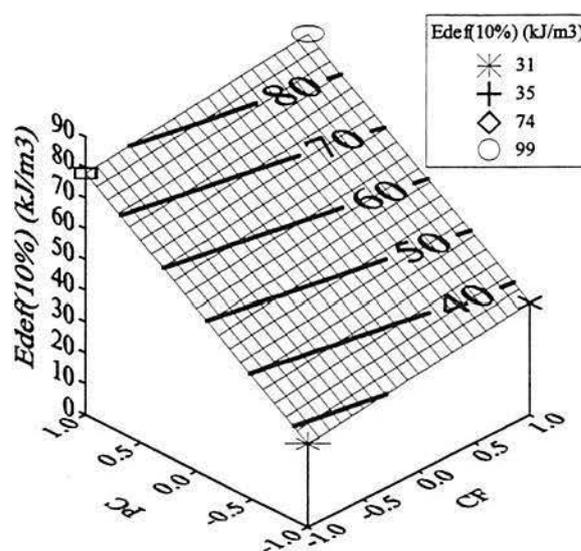


Figura 4.32: Influência de PC e CF sobre E_{def} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 0,5% e TC = 60 kPa).

4.4 SOLO REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO

A Seção 4.4 apresenta os resultados envolvendo o solo reforçado com fibras de vidro.

4.4.1 Ensaios de resistência à compressão não-confinada

A Tabela 4.9 sintetiza os resultados dos ensaios de compressão não-confinada realizados para avaliar a influência de PC, PF e CF sobre a resistência à compressão não-

confinada (q_u) do solo cimentado reforçado com fibras de vidro.

Tabela 4.9: Resultados experimentais dos ensaios de compressão não-confinada para o solo cimentado reforçado com fibras de vidro.

Comprimento da fibra, CF (mm)		Resistência à compressão não-confinada, q_u (kPa)					
		Porcentagem de cimento, PC (%)	Porcentagem de fibra, PF (%)				
			0,10	0,36	1,00	1,64	1,90
6,4	3,00			197			
	3,58		248		197		
	5,00	316		427 465		459	
	6,42		698		661		
	7,00			768			
12,8	3,00			241			
	3,58		258		245		
	5,00	533		581 504		610	
	6,42		730		700		
	7,00			907			
25,4	3,00			239			
	3,58		253		365		
	5,00	635		621 643		527	
	6,42		898		903		
	7,00			997			

Da análise de regressão múltipla resultou o modelo

$$\frac{q_u}{(\text{kPa})} = 527 + 344 \cdot \text{PC} + 82 \cdot \text{CF} + 47 \cdot \text{PC} \cdot \text{CF} \quad (4.23)$$

para estimar a resistência à compressão não-confinada do solo cimentado reforçado com fibra de vidro. O modelo experimental apresenta um nível de confiança de 99% e responde por 95,6% da variabilidade de q_u ($R^2_{\text{ajustado}} = 0,956$). O erro padrão da estimativa é de 49,8 kPa.

Como esperado, PC foi o fator de maior influência sobre q_u . A contribuição das fibras no aumento de q_u resulta do efeito do fator CF, uma vez que a porcentagem de fibra mostrou-se ser insignificante. O modelo apresenta ainda uma interação significativa entre CF e PC, ou seja, além da contribuição individual destes fatores, há uma interferência de CF sobre PC, e vice-versa, de tal modo a aumentar ainda mais q_u .

As Figuras 4.33 e 4.34 mostram graficamente a influência de PC e CF sobre q_u . Observa-se a contribuição principal de PC e uma contribuição secundária de CF. As curvas de iso- q_u apresentadas na Figura 4.33, plotadas contra os pontos experimentais, mostram o bom desempenho do modelo em estimar q_u .

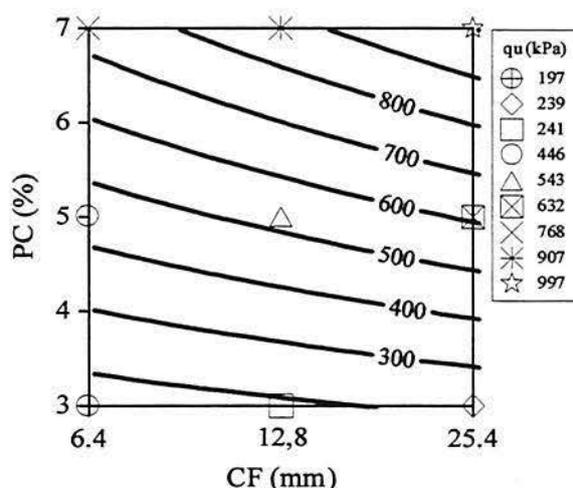


Figura 4.33: Comparação entre resultados experimentais (PF = 1%) e a previsão de q_u pelo modelo estatístico.

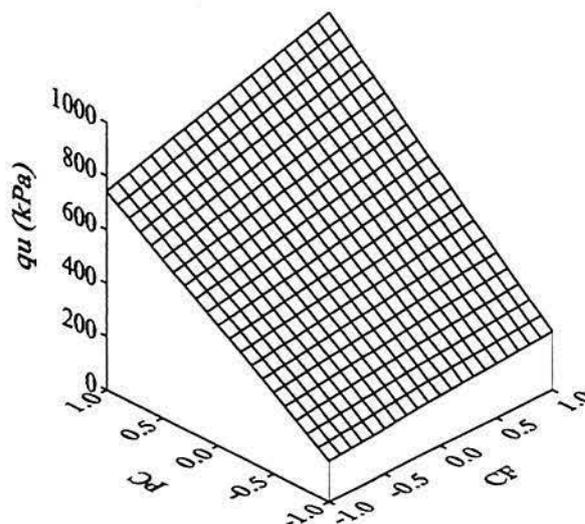


Figura 4.34: Superfície de resposta $q_u \times CF \times PC$.

4.4.2 Ensaios de resistência à tração por compressão diametral

Os resultados dos ensaios executados para avaliar a influência da adição de fibras de vidro na resistência à tração por compressão diametral (q_{ut}) do solo arenoso cimentado artificialmente são apresentados na Tabela 4.10.

A partir destes resultados realizou-se uma análise de regressão múltipla e constatou-se que o modelo

$$\frac{q_{ut}}{(\text{kPa})} = 96 + 72.PC + 13.PF \quad (4.24)$$

representa os dados experimentais com um nível de confiança de 99%. Este modelo explica 88,2% da variabilidade de q_{ut} com um erro experimental associado de 17,2 kPa.

PC e PF são os fatores que influenciam positivamente a resistência à tração por compressão diametral. O comprimento da fibra (CF) não altera q_{ut} . A representação gráfica da influência destes fatores sobre q_{ut} é apresentada nas Figuras 4.35 e 4.36.

Tabela 4.10: Resultados experimentais dos ensaios de tração por compressão diametral para o solo cimentado reforçado com fibras de vidro.

Comprimento da fibra, CF (mm)		Resistência à compressão diametral, q_{ut} (kPa)						
		Porcentagem de cimento, PC (%)	Porcentagem de fibra, PF (%)					
			0,10	0,36	1,00	1,64	1,90	
6,4	Porcentagem de cimento, PC (%)	3,00			28			
		3,58		29		34		
		5,00	78		93		101	
		6,42		112		132		
		7,00			184			
		Porcentagem de cimento, PC (%)	3,00			46		
			3,58		43		57	
			5,00	54		108		126
			6,42		150		197	
			7,00			175		
25,4	Porcentagem de cimento, PC (%)	3,00			26			
		3,58		47		65		
		5,00	101		74		100	
		6,42		152		136		
		7,00			183			
		Porcentagem de cimento, PC (%)	3,00			26		
			3,58		47		65	
			5,00	101		74		100
			6,42		152		136	
			7,00			183		

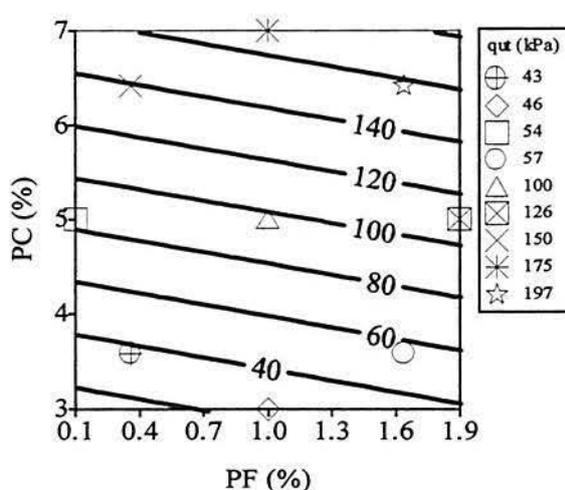


Figura 4.35: Comparação entre resultados experimentais (CF = 12,8 mm) e a previsão de q_{ut} pelo modelo estatístico.

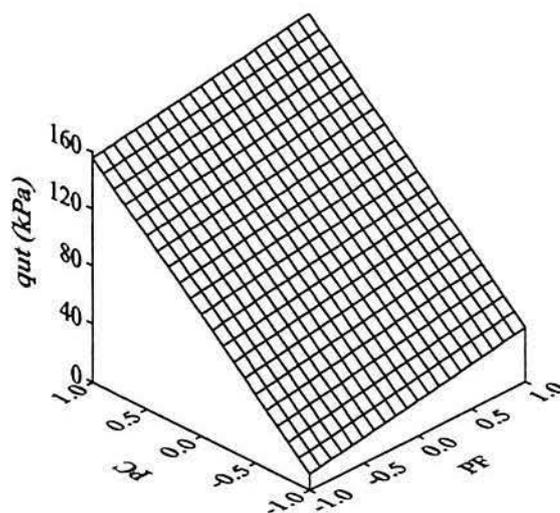


Figura 4.36: Superfície de resposta q_{ut} x PF x PC.

4.4.3 Ensaio drenados de resistência à compressão triaxial

A Figura 4.37 apresenta as curvas tensão x deformação da matriz não-cimentada reforçada com fibras de vidro. Fibras de vidro com 6,4 mm de comprimento produziram resultados insignificantes. As fibras de 25,4 mm de comprimento aumentaram q_{rup} , mas não aumentaram q_{ult} na mesma magnitude, o que explica o acréscimo de I_f . A capacidade de absorção de energia de deformação ($E_{def(10\%)}$) foi aumentada com a adição das fibras de 25,4 mm. O comportamento de variação volumétrica não é modificado pela presença das fibras. A Tabela 4.11 apresenta as variáveis de resposta obtidas nestes ensaios.

A Figura 4.38 mostra a influência das fibras de vidro sobre as propriedades mecânicas da matriz cimentada. A inclusão das fibras de vidro não surtiu efeito significativo. Apenas observa-se um razoável aumento em q_{rup} , mas somente para a fibra de 25,4 mm e para a tensão confinante de 100 kPa. Fato comum aos dois comprimentos é o aumento de I_f para a tensão confinante de 20 kPa, principalmente para a fibra de 25,4 mm. As curvas deformação axial x deformação volumétrica mostram comportamentos semelhantes, típico de materiais que apresentam ruptura frágil. A Tabela 4.12 apresenta um resumo dos parâmetros geotécnicos medidos nestes ensaios.

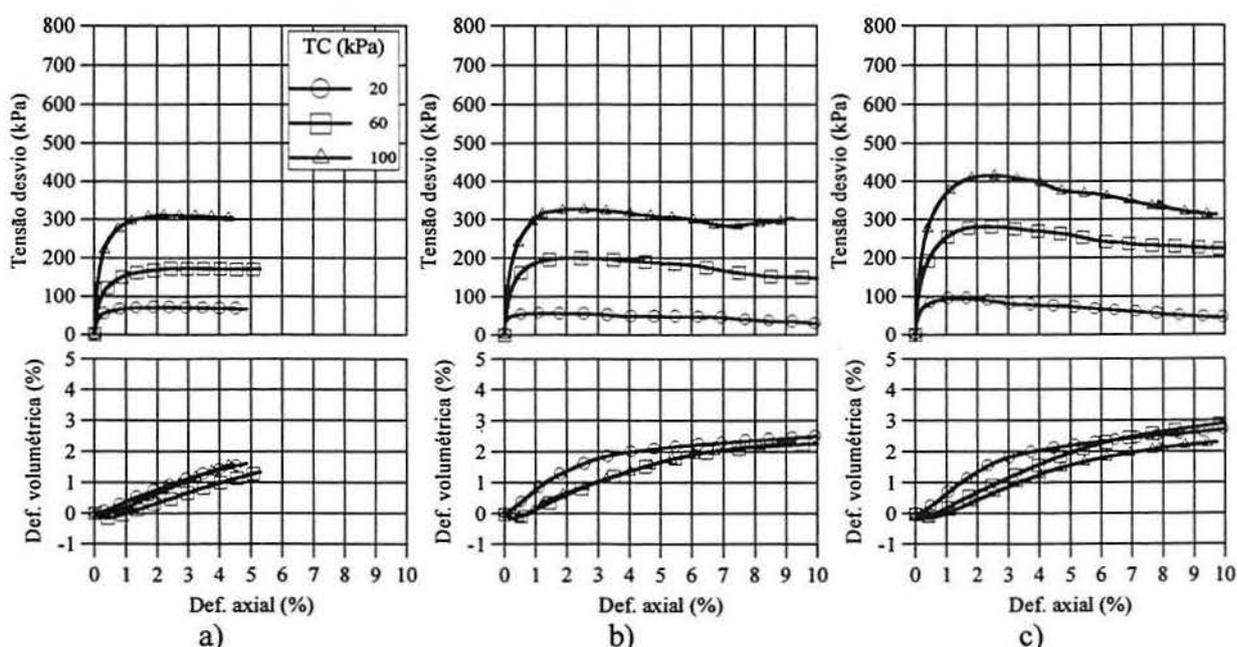


Figura 4.37: Curvas tensão x deformação axial x deformação volumétrica

- a) matriz não-cimentada;
 b) matriz não-cimentada reforçada com fibras de vidro (CF = 6,4 mm; PF = 1%);
 c) matriz não-cimentada reforçada com fibras de vidro (CF = 25,4 mm; PF = 1%).

Tabela 4.11: Propriedades mecânicas da matriz não-cimentada reforçada com fibras de vidro

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=1; CF=6,4; TC=20	56	30	251	42	5	0,8	38	0	34	0
Matriz reforçada PC=0; PF=1; CF=6,4; TC=60	201	148	150	79	18	0,4				
Matriz reforçada PC=0; PF=1; CF=6,4; TC=100	327	282	232	123	30	0,2				
Matriz reforçada PC=0; PF=1; CF=25,4; TC=20	95	44	136	49	7	1,1	43	0	38	0
Matriz reforçada PC=0; PF=1; CF=25,4; TC=60	281	223	209	101	25	0,3				
Matriz reforçada PC=0; PF=1; CF=25,4; TC=100	416	311	132	139	36	0,3				

Nota: PC(%), PF(%), CF(mm), TC(kPa)

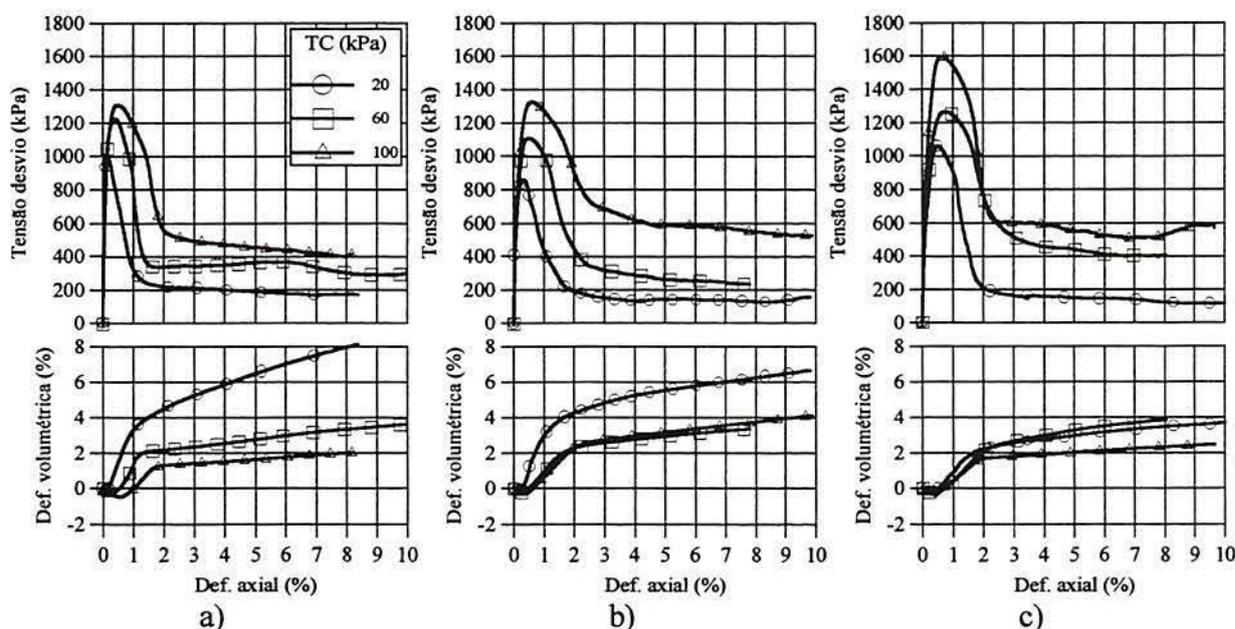


Figura 4.38: Curvas tensão x deformação axial x deformação volumétrica

- a) matriz cimentada (PC = 7%);
 b) matriz cimentada reforçada com fibras de vidro (CF = 6,4 mm; PF = 1%);
 c) matriz cimentada reforçada com fibras de vidro (CF = 25,4 mm; PF = 0,5%).

Tabela 4.12: Propriedades mecânicas da matriz cimentada reforçada com fibras de vidro

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=1; CF=6,4; TC=20	860	132	2516	660	21	5,5	48	140	45	0
Matriz reforçada PC=7; PF=1; CF=6,4; TC=60	1107	228	1531	626	38	3,9				
Matriz reforçada PC=7; PF=1; CF=6,4; TC=100	1326	526	1035	716	71	1,5				
Matriz reforçada PC=7; PF=1; CF=25,4; TC=20	1059	117	2262	570	25	8,1	50	160	47	0
Matriz reforçada PC=7; PF=1; CF=25,4; TC=60	1265	400	1028	602	57	2,2				
Matriz reforçada PC=7; PF=1; CF=25,4; TC=100	1597	516	2008	797	72	2,1				

Nota: PC(%), PF(%), CF(mm), TC(kPa)

a) Tensão desvio de ruptura (q_{rup})

A partir dos resultados dos ensaios triaxiais realizados nas matrizes reforçadas com as fibras de vidro, foi possível investigar a influência de PC, PF, CF e TC sobre a resistência à compressão triaxial, medida pela variável de resposta q_{rup} . Para facilitar a leitura destes resultados foram realizadas análises de regressão múltipla. A primeira análise resultou no modelo

$$\frac{q_{rup}}{\text{(kPa)}} = 732 + 507.PC + 53.PF + 178.TC + 38.PC.TC + 37.TC.PF \quad (4.25)$$

que apresenta um nível de confiança de 99%, $R^2_{ajustado} = 0,993$, $\varepsilon_T = 44,6$ kPa e $\varepsilon_M = 25,5$ kPa. Este modelo é adequado para representar os dados experimentais quando se analisa a influência de PC, PF e TC (Figura 4.39).

A segunda análise de regressão realizada teve como objetivo investigar os efeitos de PC, CF e TC. O modelo gerado foi

$$\frac{q_{rup}}{\text{(kPa)}} = 716 + 486.PC + 70.CF + 199.TC + 35.PC.CF + 51.TC.PC \quad (4.26)$$

com um nível de confiança de 99%, $R^2_{ajustado} = 0,997$, $\epsilon_T = 29,5$ kPa e $\epsilon_M = 16,9$ kPa.

A análise dos modelos e das Figuras 4.39 e 4.40 indicam que o cimento é o principal fator responsável pelo aumento de q_{rup} . As contribuições de PF e CF no sentido de aumentar q_{rup} , tanto para a matriz cimentada como não-cimentada, são tímidas. Observa-se que devido à interação existente entre CF e PC, a contribuição de CF em matrizes cimentadas é mais pronunciada que em matrizes não-cimentadas.

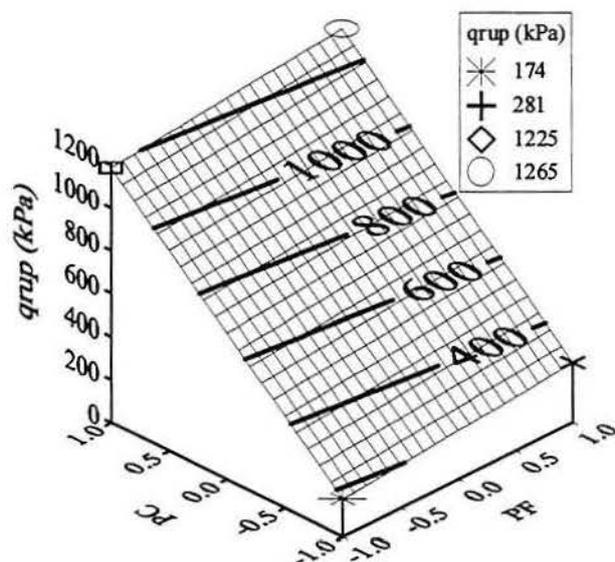


Figura 4.39: Influência de PC e PF sobre q_{rup} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 25,4 mm e TC = 60 kPa).

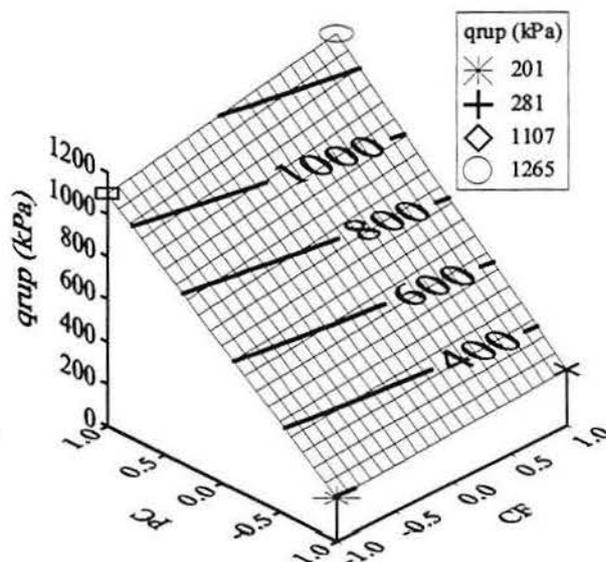


Figura 4.40: Influência de PC e CF sobre q_{rup} . Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 1% e TC = 60 kPa).

b) Tensão desvio última (q_{ult})

Como as demais variáveis de resposta, a tensão desvio última (q_{ult}) também foi submetida à análises de regressão para verificação de quais fatores influenciam esta variável de resposta. No entanto, a inclusão de fibras de vidro de 6,4 mm ou 25,4 mm de comprimento, não surtiu efeito. Apenas a porcentagem de cimento (PC) e a tensão confiante (TC) afetam positivamente q_{ult} .

c) Módulo de deformação secante inicial (E_s)

Como observado para as fibras PET, a rigidez inicial não foi afetada pela presença das fibras de vidro. Valores medidos de $E_{s(0,01\%)}$ indicam apenas que o fator PC exerce forte efeito sobre a rigidez dos compósitos ensaiados. Valores medidos de $E_{s(0,1\%)}$ indicam, além da

influência do cimento, a tensão confinante (TC) como outro fator que provoca aumento na rigidez. Os fatores PF e CF não afetaram a rigidez dos compósitos.

d) Índice de fragilidade (I_f)

O índice de fragilidade (I_f), variável de resposta adotada para avaliar os efeitos da inclusão das fibras nas propriedades de ductilidade dos compósitos fibrosos, também não foi sensível aos fatores PF e CF. Nas análises de regressão múltipla realizadas, o fator PC exerce forte influência sobre I_f no sentido de intensificar a fragilidade das matrizes, ao passo que TC é o único fator significativo no sentido de reduzir os efeitos do cimento.

e) Capacidade de absorção de energia de deformação (E_{def})

As Figuras 4.41 e 4.42 exibem a influência de PC, PF e CF sobre a capacidade de absorção de energia de deformação ($E_{def(10\%)}$), das matrizes reforçadas com fibras de vidro.

A Figura 4.41 foi gerada a partir do modelo

$$\frac{E_{def(10\%)}}{(\text{kJ} / \text{m}^3)} = 33 + 13. \text{PC} + 4. \text{PF} + 16. \text{TC} \quad (4.27)$$

que apresenta um nível de confiança de 99%, $R^2_{ajustado} = 0,926$, $\varepsilon_T = 5,5 \text{ kJ/m}^3$ e $\varepsilon_M = 3,5 \text{ kJ/m}^3$.

A Figura 4.42 foi gerada a partir do modelo

$$\frac{E_{def(10\%)}}{(\text{kJ} / \text{m}^3)} = 34 + 14. \text{PC} + 3. \text{CF} + 19. \text{TC} + 5. \text{PC} \cdot \text{TC} \quad (4.28)$$

que apresenta um nível de confiança de 99%, $R^2_{ajustado} = 0,968$, $\varepsilon_T = 3,9 \text{ kJ/m}^3$ e $\varepsilon_M = 2,3 \text{ kJ/m}^3$.

Nota-se que $E_{def(10\%)}$ é aumentada tanto pela adição do cimento como pela inclusão das fibras e pelo incremento do seu comprimento. Percebe-se também que não existe interação entre PC e PF ou PC e CF, que, por isso, a contribuição de cada fator se dá de forma independente.

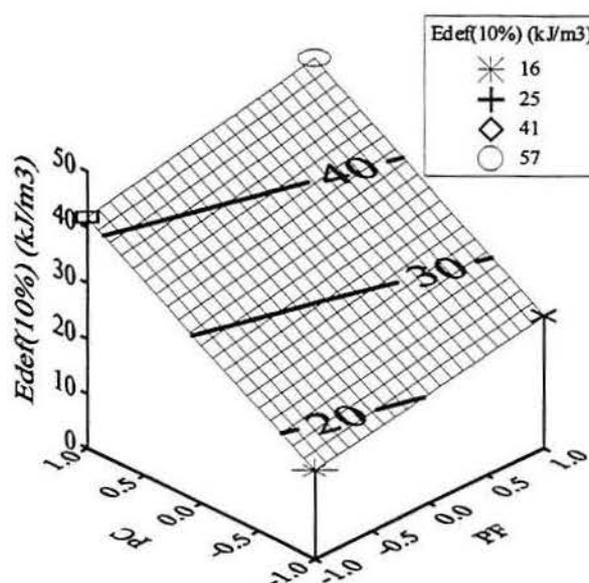


Figura 4.41: Influência de PC e PF sobre $E_{def(10\%)}$. Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (CF = 25,4 mm e TC = 60 kPa).

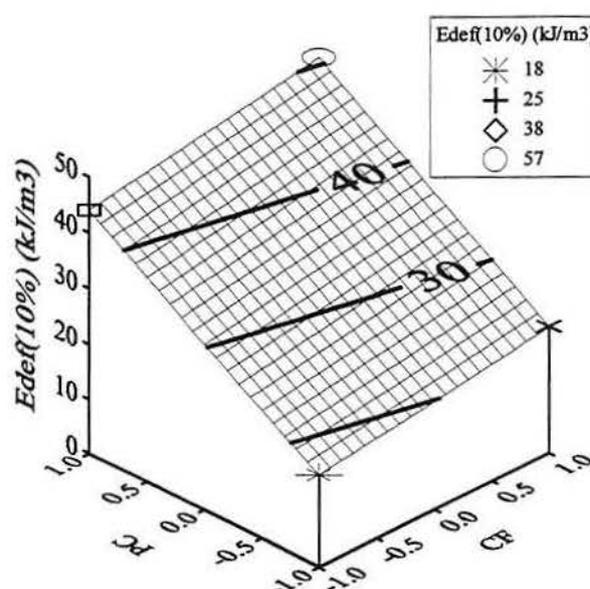


Figura 4.42: Influência de PC e CF sobre $E_{def(10\%)}$. Comparação entre o modelo e os pontos experimentais (PF = 1% e TC = 60 kPa).

4.5 RESUMO

Dada a quantidade de informações apresentadas no Capítulo 4, julgou-se necessário montar um quadro-resumo dos principais fatores que exercem influência sobre as variáveis de resposta medidas, e, por conseqüência, sobre as propriedades de resistência e deformabilidade das matrizes reforçadas (Quadro 4.1).

Quadro 4.1: Quadro-resumo dos fatores que exercem influência sobre as variáveis de resposta

Variável de resposta	Tipo de fibra	Fatores/Efeitos
q_u (kPa)	PET	- PC é o fator mais importante; - PF exerce efeito secundário.
	Polipropileno	- PC é o fator mais importante; - PF, CF e PF.CF exercem efeito secundário.
	Vidro	- PC é o fator mais importante; - CF e PC.CF exercem efeito secundário.
q_{ut} (kPa)	PET	- PC é o fator mais importante; - PF também exerce algum efeito.
	Polipropileno	- PC é o fator mais importante; - CF.PF exerce fraco efeito no sentido de reduzir q_{ut} .
	Vidro	- PC é o fator mais importante; - PF também exerce algum efeito.

Quadro 4.1: (continuação).

Variável de resposta	Tipo de fibra	Fatores/Efeitos
q_{rup} (kPa)	PET	- PC é o fator mais importante; - TC exerce forte efeito; - PF e CF exercem efeito secundário; - a contribuição de PF e CF independe da natureza da matriz.
	Polipropileno	- PC é o fator mais importante; - TC exerce forte efeito; - as interações PC.PF e PC.CF indicam que estas fibras aumentam a resistência da matriz não-cimentada e diminuem a resistência da matriz cimentada.
	Vidro	- PC é o fator mais importante; - TC exerce forte efeito; - PF, CF, PC.TC, TC.PF e PC.CF exercem algum efeito.
q_{ult} (kPa)	PET	- TC, PC, PF e CF exercem praticamente o mesmo grau de influência; - há duas interações: PC.PF e PC.CF, ou seja, para matrizes cimentadas o efeito é mais pronunciado.
	Polipropileno	- PF é o fator mais importante; - PC, TC e CF exercem influência considerável; - as interações PC.PF e TC.PF indicam que o efeito da inclusão das fibras pode ser ainda mais forte se a matriz for cimentada e a tensão de confinamento for alta.
	Vidro	- somente PC e TC afetam q_{ult} ;
E_s (MPa)	PET	- apenas PC exerce forte efeito.
	Polipropileno	- PC exerce forte efeito no sentido de aumentar a rigidez inicial; - PF e CF exercem forte efeito no sentido de reduzir a rigidez inicial quando a matriz é cimentada.
	Vidro	- apenas PC exerce efeito sobre a rigidez inicial;
$E_{def(10\%)}$ (kJ/m ³)	PET	- PC, PF, CF, TC, PC.PF e PC.CF exercem efeito positivo.
	Polipropileno	- PC, PF, CF, TC e PC.PF exercem efeito positivo.
	Vidro	- PC, PF, CF, TC e PC.TC exercem efeito positivo.
I_f	PET	- PC exerce efeito no sentido de aumentar I_f ; - PF, CF e TC exercem efeito no sentido de reduzir I_f , quando a matriz é cimentada.
	Polipropileno	- PC exerce efeito no sentido de aumentar I_f ; - PF e CF exercem efeito no sentido de reduzir I_f , quando a matriz é cimentada;
	Vidro	- PC exerce efeito no sentido de aumentar I_f ; - TC exerce algum efeito no sentido de reduzir I_f .

PC = porcentagem de cimento; PF = porcentagem de fibra; CF = comprimento da fibra; TC = tensão confinante; PC.CF = interação entre os fatores PC e CF; PC.PF = interação entre os fatores PC e PF; PC.TC = interação entre os fatores PC e TC; TC.PF = interação entre os fatores TC e PF; PF.CF = interação entre os fatores PF e CF.

CAPÍTULO 5

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No capítulo anterior, os resultados foram apresentados juntamente com uma análise preliminar que teve o objetivo de verificar quais dos fatores investigados exercem influência significativa sobre as propriedades de resistência e deformabilidade dos materiais compósitos fibrosos. Além disso, a análise buscou aferir o grau de influência destes fatores sobre as variáveis de resposta, bem como as possíveis interações existentes entre eles.

No entanto, análises de caráter estatística, como as realizadas no Capítulo 4, não dispensam uma interpretação física dos resultados. Assim faz-se necessária uma discussão que concatene as informações reunidas na revisão bibliográfica com os resultados experimentais desta pesquisa, para que haja, de fato, uma contribuição ao desenvolvimento do estudo dos solos reforçados com fibras. Portanto, a tônica do Capítulo 5 será a busca da compreensão do mecanismo de interação matriz-fibra. Será dada ênfase à comparação de resultados envolvendo os três tipos de fibra, almejando identificar a relação existente entre as propriedades mecânicas das matrizes e das fibras e o comportamento mecânico dos compósitos fibrosos.

5.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS FIBROSOS

No entender do autor, três aspectos devem ser abordados para que haja a definição do comportamento mecânico dos compósitos fibrosos: comportamento de ruptura, rigidez inicial e comportamento último.

5.2.1 Comportamento de ruptura

Dois aspectos são considerados relevantes na avaliação do comportamento de ruptura dos compósitos fibrosos: resistência e modo de ruptura.

a) Resistência de ruptura

Para avaliar a resistência de ruptura dos materiais compósitos fibrosos utilizou-se, como parâmetros de medida, a resistência não-confinada (q_u) e a tensão desvio de ruptura (q_{rup}) para esforços de caráter compressivo, e a resistência à tração por compressão diametral (q_{ut}) para esforços de tração.

A Figura 5.1 compara o efeito dos fatores PC, PF e CF sobre q_{rup} das matrizes cimentada e não-cimentada reforçadas com fibras PET, polipropileno e vidro. Independentemente da fibra utilizada como elemento de reforço, fica clara a influência predominante do cimento sobre a resistência de ruptura dos compósitos fibrosos. De acordo com essa figura e com o Quadro 4.1, confirmam-se os resultados relatados na literatura por outros autores, para solos cimentados não-reforçados (e.g. Saxena e Lastrico, 1978; Clough et al., 1979; Chang e Woods, 1992; Prietto et al., 1997), nos quais fica evidenciado que a tensão desvio de ruptura do solo cimentado aumenta com incrementos da tensão de confinamento e com o grau de cimentação.

A contribuição das fibras no aumento da resistência de ruptura da matriz em que são inseridas depende da natureza das fibras e da natureza da matriz. As fibras PET, por exemplo, proporcionam praticamente o mesmo ganho de resistência, independentemente da natureza da matriz. Portanto, a presença do cimento não proporciona qualquer alteração no grau de influência das fibras PET sobre q_{rup} (Figura 5.1). Ou seja, a cimentação não garante maior ancoragem às fibras PET, como era de se supor.

Na matriz não-cimentada, as fibras de vidro aumentam a resistência de ruptura. Porém, na matriz cimentada só há acréscimo da resistência se $CF = 25,4$ mm. Os modelos indicaram a existência da interação CF.PC e TC.PF sobre q_{rup} . Portanto, diferentemente do que ocorre com as fibras PET, o aumento do grau da cimentação e da tensão de confinamento melhora a aderência fibra-matriz, proporcionando, às fibras de vidro, reação necessária para que haja mobilização da sua resistência à tração.

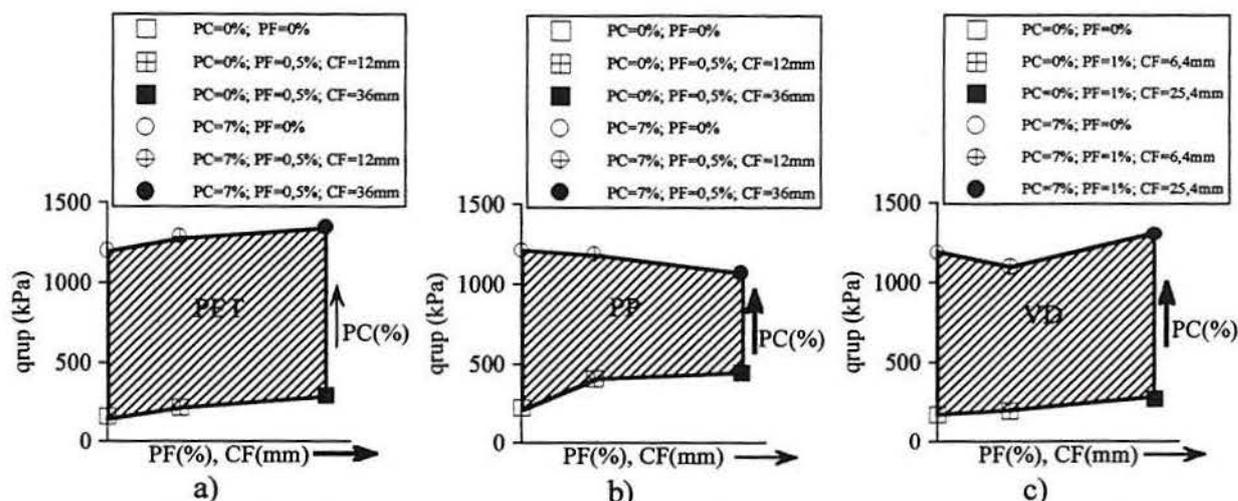


Figura 5.1: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre q_{rup} das matrizes cimentada e não-cimentada reforçadas com as fibras: a) PET; b) polipropileno (PP); c) vidro (VD) ($T_C = 60$ kPa).

As fibras de polipropileno apresentam a peculiaridade de conferir à matriz não-cimentada a maior resistência de ruptura, quando comparada com o desempenho das demais fibras. Porém, na matriz cimentada há decréscimo da resistência com a inclusão das fibras de polipropileno. As interações PC.PF e PC.CF existentes nos modelos de previsão de q_{rup} indicam perda da resistência de ruptura da matriz cimentada com a inclusão das fibras, e a perda é mais acentuada quanto maior for o comprimento da fibra. O que ocorre na verdade, é que as fibras de polipropileno são as mais leves, apresentando uma densidade relativa de 0,91. Conseqüentemente, para um mesmo PF, as fibras de polipropileno ocupam maior volume dentro da matriz. Por isso, a eficiência da compactação não é a mesma. Os corpos-de-prova do solo cimentado e não cimentados reforçado com tais fibras, apresentam, em média, uma densidade relativa (D_r) de 60%, ou seja, 10% a menos do que a densidade relativa fixada no programa experimental. É provável que este seja o real motivo da diminuição de q_{rup} da matriz cimentada. Poderia-se argumentar também, que a forte presença das fibras de polipropileno, em volume, impede, em parte, a continuidade dos vínculos de cimentação.

De maneira geral, pode-se dizer que quanto maior o comprimento da fibra maior será sua contribuição para o aumento da resistência de ruptura. Maher e Gray (1990) ao estudarem o efeito da variável CF em solos arenosos, constataram que o primeiro mecanismo que ocorre quando o solo reforçado é solicitado, é uma transferência da carga do solo à fibra, através do atrito na interface solo-fibra. Portanto, o aumento do comprimento da fibra resultará em uma maior superfície de contato e, assim, em uma maior resistência resultante do atrito entre o solo e a fibra.

A Figura 5.2 apresenta a influência de PC, PF e CF sobre o ângulo de atrito interno de pico (ϕ') das matrizes reforçadas com fibras PET, polipropileno e vidro. Percebe-se claramente que, além do aumento de ϕ' com adição de cimento, há aumento da resistência friccional devido à inclusão das fibras. Vale ressaltar que o aumento da resistência friccional é mais acentuado para as fibras mais longas.

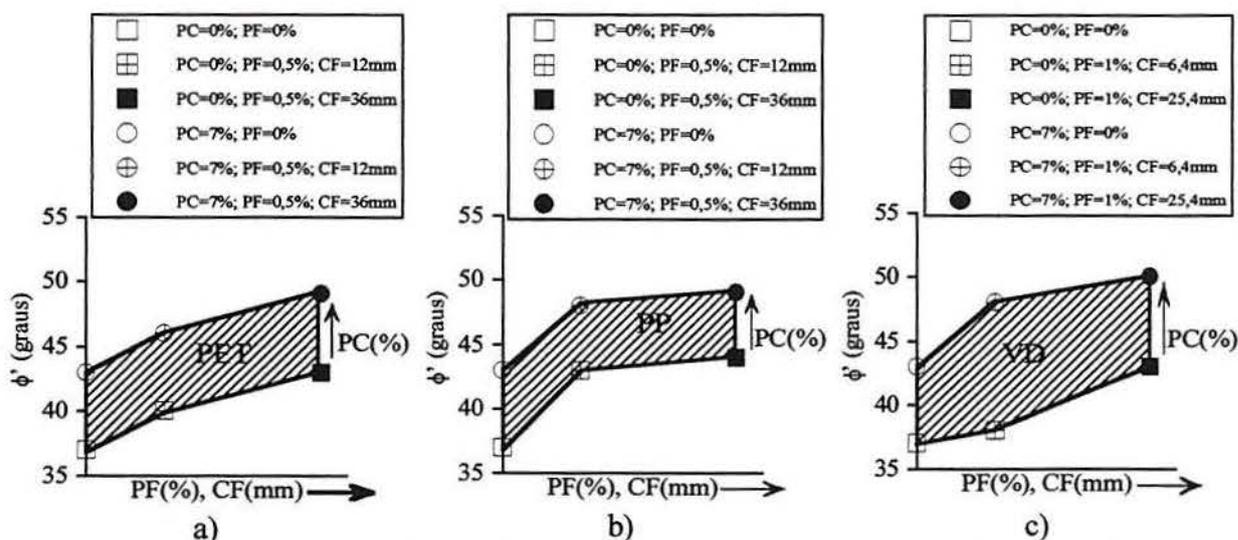


Figura 5.2: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre ϕ' das matrizes cimentada e não-cimentada reforçadas com as fibras: a) PET; b) polipropileno (PP); c) vidro (VD)

A Figura 5.3 mostra a influência de PC, PF e CF sobre o intercepto coesivo de pico (c'). O fator PC exerce forte efeito sobre c' no sentido de aumentar a coesão dos compósitos. Generalizando, pode-se dizer que a inclusão de qualquer uma das fibras reduz a coesão da matriz cimentada. Essa redução é intensificada com o aumento do comprimento da fibra. Na matriz não-cimentada, fibras PET e vidro não alteram c' , porém, as fibras de polipropileno conferem aumento da coesão nesse tipo de matriz. A provável explicação para este comportamento é o “emaranhado” formado entre os grãos do solo e as fibras de polipropileno, visualmente observado durante o processo de mistura e preparação dos corpos-de-prova.

Traçando um paralelo entre as Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 conclui-se que o aumento da resistência de ruptura promovido pela inclusão das fibras PET e vidro deve ser creditado exclusivamente ao aumento da resistência friccional, independentemente na natureza da matriz. Autores como Maher e Ho (1993), Nataraj et al. (1996) e Consoli et al. (1998) concordam que a inclusão de fibras aumenta a resistência friccional dos solos. Já o aumento da resistência de ruptura devido a inclusão das fibras de polipropileno na matriz não-

cimentada deve ser creditado à soma do aumento da resistência friccional com o aumento da coesão.

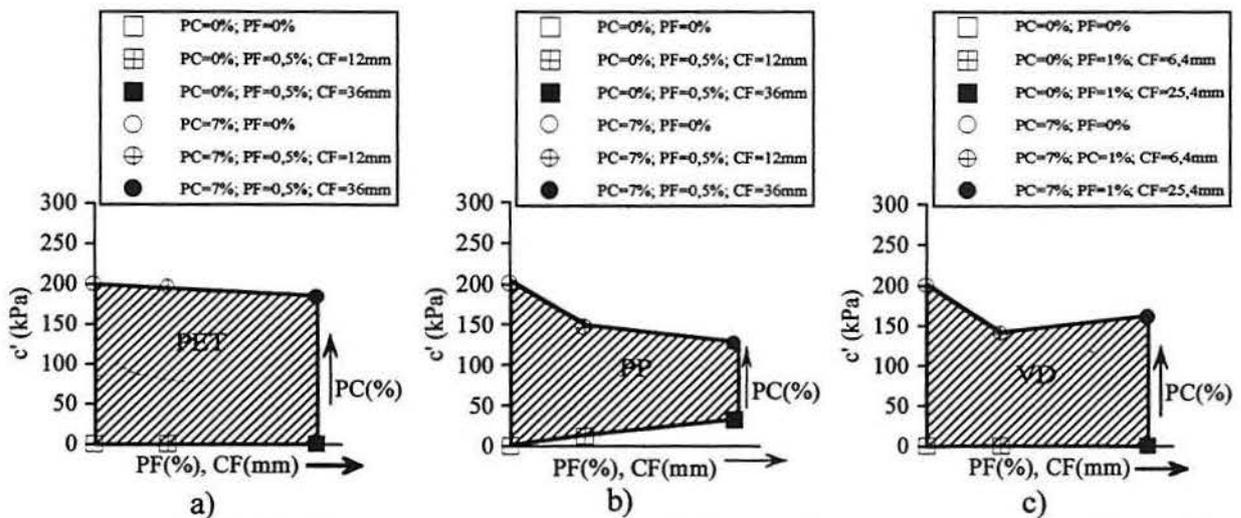


Figura 5.3: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre c' das matrizes cimentada e não-cimentada reforçadas com as fibras: a) PET; b) polipropileno (PP); c) vidro (VD).

McGown et al. (1978) e Andrawes et al. (1980) argumentam que a resistência à tração dos elementos de reforço só será mobilizada se houver deformação do solo envolto ao reforço. Obviamente, a parcela da resistência à tração a ser mobilizada dependerá da magnitude das deformações do solo e, também, da rigidez dos reforços. Ora, as fibras de vidro e as fibras PET são mais rígidas que as fibras de polipropileno. A maior rigidez daquelas fibras permite o desenvolvimento de resistência à tração para níveis baixos de deformação e, conseqüentemente, o aumento de q_{rup} . Na matriz cimentada, quando o cimento governa as características de resistência e deformação, as fibras de polipropileno, por serem bem menos rígidas, não conseguem mobilizar resistência à tração para níveis baixos de deformação e, por isso, não contribuem para o aumento de q_{rup} . Porém, quando a matriz é não-cimentada, e as fibras de polipropileno podem produzir seus efeitos, mesmo que para grandes deformações, q_{rup} aumenta.

Embora os argumentos apresentados no parágrafo anterior façam referência tão somente à influência das inclusões das fibras sobre q_{rup} , as mesmas considerações valem para q_u e q_{ut} . Aliás, a análise comparativa entre q_u e q_{ut} reforça estas idéias. Se, nos ensaios de compressão, a deformação de ruptura dos compósitos cimentados é suficientemente pequena a ponto de reprimir a contribuição das fibras de polipropileno no aumento da resistência, nos ensaios de tração, em que a deformação de ruptura é ainda menor, tal contribuição é nula (Quadro 4.1).

Autores como Gray e Ohashi (1993), McGown et al. (1986), Benson e Khire (1994) e Consoli et al. (1998) verificaram que quanto maior a porcentagem e o comprimento da fibra, maior é o acréscimo de resistência mecânica, até um limite assintótico a partir do qual esse efeito não é mais observado. O programa experimental desenvolvido para investigar os efeitos dos fatores PF e CF sobre q_u e q_{ut} , contemplava a possibilidade de haver, também neste estudo, comportamento similar ao observado por aqueles autores. A existência do efeito quadrático de um fator controlável sugere que há uma relação não-linear entre este fator e a variável de resposta investigada. No entanto, efeitos quadráticos de PF e CF sobre as variáveis de resposta q_u e q_{ut} não foram observados. Portanto, a influência destes fatores, quando existentes, se dá de forma linear, pelo menos dentro do espaço amostral investigado.

A Figura 5.4 apresenta uma comparação entre os efeitos das fibras PET sobre a resistência à compressão não-confinada (q_u) e sobre a resistência à tração por compressão diametral (q_{ut}). Essa figura avalia o aumento relativo de q_u e q_{ut} da matriz cimentada (PC = 5%) reforçada com as fibras PET. Para a matriz cimentada não-reforçada, $q_u = 522$ kPa e $q_{ut} = 76$ kPa, respectivamente. Como pode ser visto, as fibras PET são mais eficientes no aumento relativo de q_{ut} . A Figura 5.5 mostra o interior de um corpo-de-prova onde observa-se que aparentemente há uma orientação preferencial das fibras PET. Talvez esta orientação preferencial proporcione às fibras a maior eficiência em aumentar q_{ut} . Esta é uma questão que não está fechada, e investigações mais detalhadas devem ser realizadas para avaliar se realmente as fibras estão orientadas e, caso estejam, se existe uma relação entre a orientação e o aumento relativo de q_u e q_{ut} . Mesmo que a hipótese da orientação preferencial seja confirmada, para que haja maior eficiência das fibras no aumento de q_{ut} , elas devem ser suficientemente rígidas para mobilizar resistência à tração para baixos níveis de deformação, o que não ocorre com as fibras de polipropileno, que são ineficientes no aumento de q_{ut} .

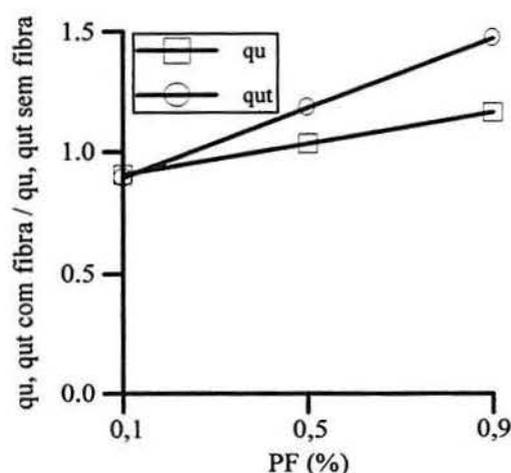


Figura 5.4: Comparação entre o efeito das fibras PET sobre q_u e q_{ut} (PC = 5%).

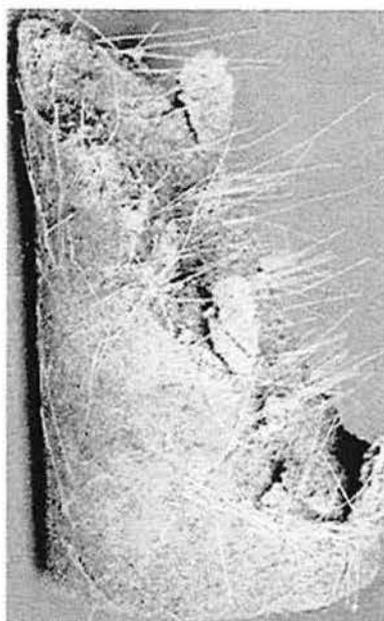


Figura 5.5: Orientação preferencial das fibras PET

b) Modo de ruptura

O modo de ruptura pode ser distinguido entre dois tipos básicos:

- Ruptura frágil: observa-se uma queda brusca da resistência após a ruptura e a formação de planos de falha bem definidos, além de um comportamento fortemente dilatante que pode ser verificado nas curvas de variação volumétrica. A ruptura do tipo frágil é característica de materiais muito rígidos, como os materiais baseados em cimento Portland;
- Ruptura dúctil: não apresenta queda significativa de resistência após a resistência de ruptura nem a formação de planos definidos de ruptura. As curvas de variação volumétrica são mais “suaves”, não indicando comportamento dilatante acentuado.

O parâmetro geotécnico, que melhor representa o modo de ruptura, é o índice de fragilidade (I_f) (Bishop, 1967, citado por Yoshinaka e Yambe, 1981). A Figura 5.6 apresenta a influência de PC, PF e CF sobre I_f dos compósitos cimentados e não-cimentados reforçados com fibras PET, polipropileno e vidro. Observa-se, claramente, que o cimento confere fragilidade ao compósito. Os efeitos da inclusão das fibras sobre as características de ductilidade/fragilidade dos compósitos diferem de fibra para fibra. As fibras PET, por exemplo, diminuem I_f da matriz cimentada, porém não o suficiente para caracterizar um compósito dúctil. As fibras de polipropileno, por sua vez, alteram o modo de ruptura da matriz cimentada, de frágil para dúctil. As fibras de vidro não interferem no modo de ruptura da matriz em que é incluída.

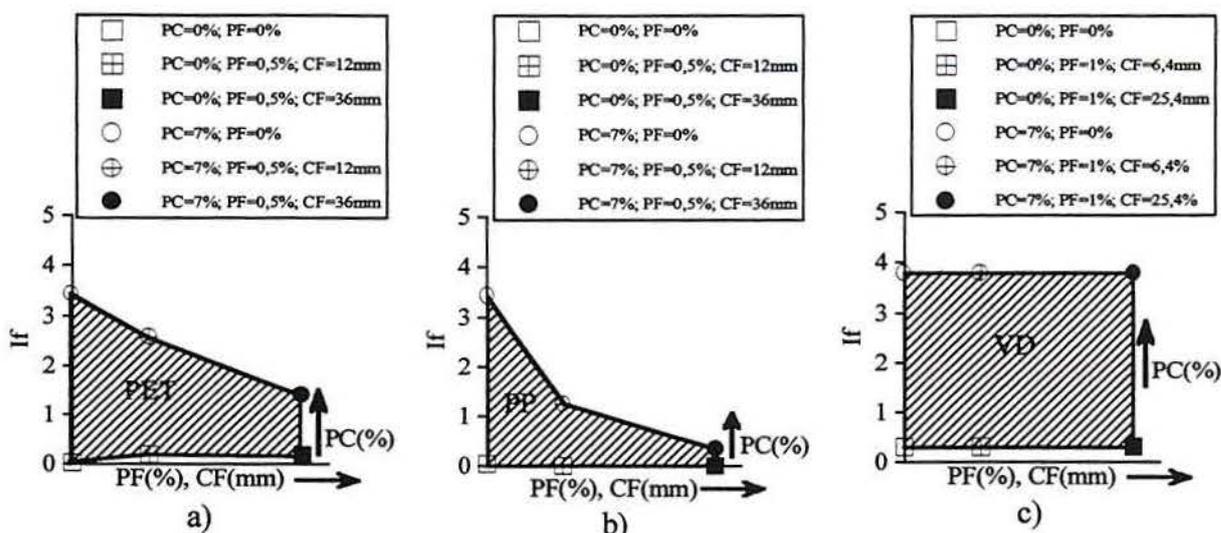


Figura 5.6: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre I_f das matrizes cimentada e não-cimentada reforçadas com as fibras: a) PET; b) polipropileno (PP); c) vidro (VD) ($TC = 60$ kPa).

Como visto anteriormente, os efeitos da inclusão das fibras sobre I_f depende do tipo da fibra. Uma abordagem mais detalhada confirma as considerações de Shewbridge e Sitar (1990). Estes autores argumentam que qualquer deslocamento relativo entre o solo e o elemento de reforço gera mobilização total da resistência friccional e, por conseqüência, arrancamento do reforço. Porém, os autores admitem a possibilidade de parte do comprimento total do elemento de reforço, denominado de comprimento l^* , apresentar movimento relativo em relação ao solo, e a outra parte não. Os autores acrescentam que quanto maior for a rigidez do reforço maior será o comprimento l^* , ou seja, maior será a região onde haverá deslocamento relativo, favorecendo o arrancamento do reforço. Estas proposições ajustam-se perfeitamente aos resultados obtidos nesta pesquisa. As fibras de vidro, que são as mais rígidas, são arrancadas com maior facilidade e, por isso, não têm influência alguma sobre o modo de ruptura da matriz cimentada. As fibras PET, que apresentam uma rigidez intermediária, amenizam o caráter frágil da matriz cimentada. Por último, as fibras de polipropileno, que são as fibras de menor rigidez, conferem ductilidade à matriz originalmente frágil. A leitura que se faz é a seguinte: se a fibra está aderida à matriz quando surge a primeira fissura, há uma repentina tendência da fibra alongar no ponto de fissura. As fibras de menor rigidez irão alongar à medida que as deformações no compósito crescem e, por isso, solicitações cisalhantes na interface fibra-matriz não serão aumentadas. No caso de fibras rígidas, por deformarem pouco, haverá uma concentração de tensões cada vez maior na interface fibra/matriz. A medida que a resistência de aderência é alcançada, devido ao movimento relativo entre o reforço e o solo, o reforço tende a ser arrancado (maior l^*).

Porém, o arrancamento será progressivo para fibras de menor rigidez, e praticamente instantâneo para fibras mais rígidas.

A análise crítica da revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2 salientou apenas um ponto de contradição entre os autores Maher e Ho (1993) e Consoli et al. (1998). Os primeiros afirmavam que fibras de vidro aumentavam I_f de uma areia artificialmente cimentada, e o segundo afirmava que as mesmas fibras diminuía I_f de um solo siltoso artificialmente cimentado. Curiosamente, os resultados do presente trabalho sinalizam para uma terceira situação: as fibras de vidro não alteraram I_f da matriz cimentada. Obviamente, as divergências são decorrentes das diferenças existentes entre os solos, a natureza da cimentação, as porcentagens de cimento e de fibras adicionadas à mistura, os comprimentos das fibras, e até mesmo, diferenças entre as técnicas experimentais. No entanto, o fato concreto é que as fibras de vidro, ao serem comparadas com as fibras PET e polipropileno, são menos eficientes quando busca-se materiais compósitos fibrosos com características dúcteis. Aliás, matrizes cimentadas reforçadas com fibras de vidro sequer se enquadram na definição de materiais compósitos. Material compósito foi definido no Capítulo 2 como sendo a combinação de dois ou mais materiais com propriedades distintas, buscando o desenvolvimento de um produto com propriedades não encontradas nos materiais que lhe deram origem. Sob a perspectiva da Ciência dos Materiais, fibras de vidro são classificadas como materiais cerâmicos, pois apresentam elevada rigidez e ruptura frágil, assim como as matrizes baseadas em cimento Portland. Sob esse aspecto, é compreensível que as fibras de vidro não afetem o modo de ruptura das matrizes cimentadas, uma vez que estes não são materiais que se complementam.

A Figura 5.7 apresenta o efeito da inclusão das fibras PET, polipropileno e vidro sobre a capacidade de absorção de energia de deformação ($E_{def(10\%)}$) das matrizes cimentada e não-cimentada. Essa variável de resposta mede a propriedade de tenacidade dos compósitos fibrosos. Tenacidade é a propriedade do material que representa a energia que este consome ao deformar-se. A energia consumida, ou absorvida, por um corpo-de-prova em um ensaio destrutivo é proporcional a área abaixo da curva tensão x deformação. Portanto, a tenacidade é uma propriedade que conjuga resistência e deformação, e é apropriada para avaliar o comportamento dos compósitos frente a carregamentos dinâmicos. Para Taylor (1994), a tenacidade pode ser aumentada com a utilização de fibras longas e que apresentem alta deformação de ruptura, como, por exemplo, as fibras de polipropileno.

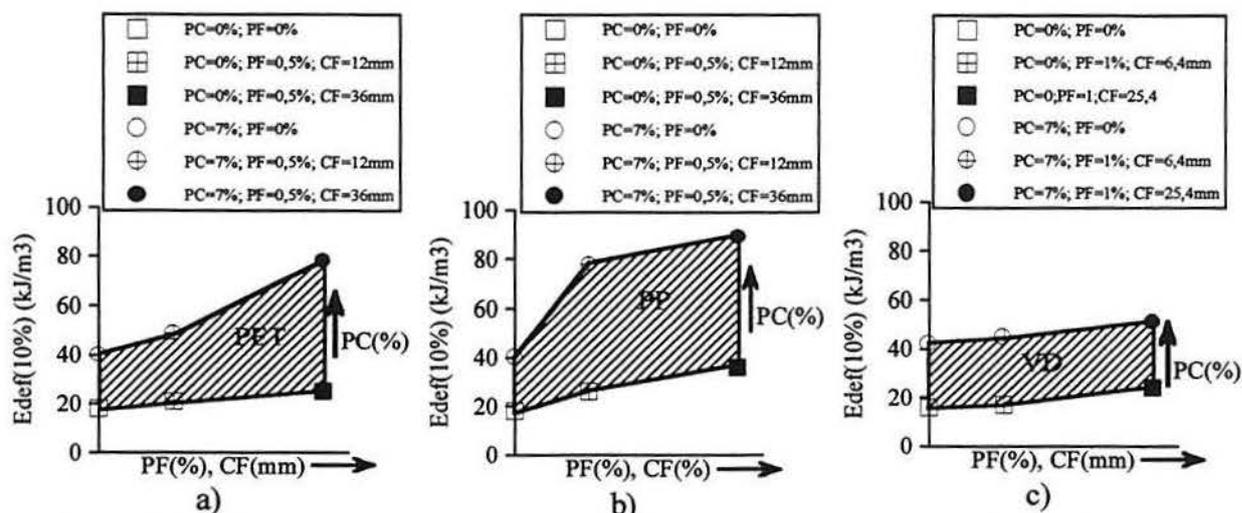


Figura 5.7: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre $E_{def(10\%)}$ das matrizes cimentada e não-cimentada reforçadas com as fibras: a) PET; b) polipropileno (PP); c) vidro (VD) (TC = 60 kPa).

Conforme a Figura 5.7, todos os três tipos de fibra aumentam $E_{def(10\%)}$, independentemente da natureza da matriz. Porém, o efeito da inclusão das fibras PET e polipropileno é bem mais pronunciado, principalmente quando a matriz é cimentada e para fibras mais longas. O fator PC também influencia fortemente esta variável de resposta. Freitag (1986), Maher e Ho (1993, 1994) e Ulbrich (1997) corroboram estes resultados.

O valor de $E_{def(10\%)}$ representa a energia de deformação absorvida pelos compósitos para atingir 10% de deformação. Se o solo reforçado e não-reforçado tiverem aproximadamente o mesmo modo de ruptura e a mesma resistência de pico, o valor de $E_{def(10\%)}$ pode ser utilizado como uma variável de resposta alternativa para aferir os efeitos da inclusão do reforço sobre a propriedade de ductilidade dos compósitos fibrosos. No entanto, pode ocorrer que valores absolutos de $E_{def(10\%)}$ nivelem compósitos que apresentam características de ruptura bem distintas. Só para exemplificar, fibras PET e polipropileno, ambas com 36 mm de comprimento, para TC = 100 kPa, proporcionam à matriz cimentada praticamente o mesmo valor de $E_{def(10\%)}$ (Tabelas 4.4 e 4.8). Porém, as curvas tensão x deformação destes compósitos acusam diferenças marcantes quanto ao modo de ruptura. A matriz cimentada reforçada com fibras PET apresenta pico de resistência definido, ao passo que a reforçada com fibras de polipropileno, não. Portanto, seria interessante avaliar a energia de deformação absorvida, não somente para 10% de deformação, mas ao longo da curva tensão x deformação. Nesse sentido, apresenta-se a Figura 5.8 que mostra o efeito da inclusão das fibras PET, polipropileno e vidro na evolução da energia de deformação absorvida (E_{def}). A primeira constatação é que para atingir a ruptura ($\epsilon_{a(rupt)} \cong 3\%$), a matriz cimentada

reforçada com fibras de polipropileno absorve aproximadamente 25% da energia total ($E_{def(10\%)}$), enquanto a matriz cimentada não-reforçada e reforçada com fibras PET e vidro absorvem, até a deformação de ruptura ($\epsilon_{a(rup)} \cong 0,6\%$), pouco mais de 5% da energia total. Outro aspecto interessante, é o fato de haver, nas matrizes não-reforçada e reforçada com fibras PET e vidro, uma “quebra” na taxa de aumento de E_{def} com a deformação. Isso indica uma mudança sensível na estrutura destes compósitos após o pico de resistência, capaz de impedir que ele absorva energia de deformação com a mesma intensidade que vinha absorvendo antes do pico. Na matriz reforçada com fibras de polipropileno, tal mudança não se verifica, permitindo que o compósito absorva energia de deformação de forma continuada.

Concluindo, se materiais compósitos fibrosos apresentam modo de ruptura e resistência de ruptura distintos, a comparação direta de $E_{def(10\%)}$ não é suficiente para identificar diferenças entre o comportamento destes materiais. É necessário, portanto, que se avalie a capacidade dos materiais de absorver energia de deformação antes e depois do pico de resistência, para que haja, de fato, uma compreensão da influência da inclusão de fibras na tenacidade dos compósitos.

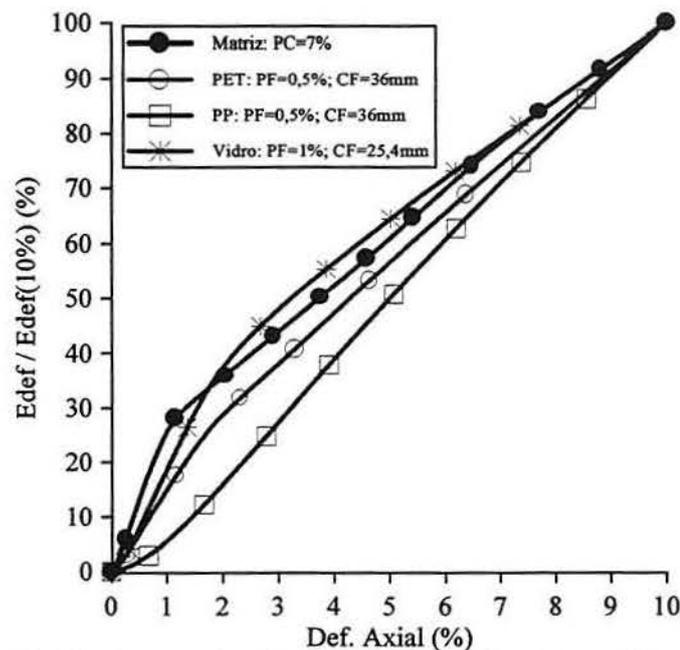


Figura 5.8: Evolução de E_{def} da matriz cimentada não-reforçada e reforçada com fibras PET, polipropileno e vidro ($TC = 60 \text{ kPa}$)

Conforme apresentado no início desta seção, materiais com ruptura frágil apresentam plano de ruptura bem definido, enquanto materiais com ruptura dúctil não apresentam plano de ruptura. A Figura 5.9 mostra três corpos-de-prova rompidos. Como pode ser visto, se o elemento de reforço é fibra PET ou vidro, forma-se um plano de ruptura bem definido. Em

contrapartida, se o elemento de reforço é fibra de polipropileno, tal plano não é evidente. As fibras de polipropileno proporcionam uma ampla distribuição das fissuras ao longo do corpo-de-prova, sugerindo, obviamente, maior distribuição das tensões. A distribuição das tensões proporcionada pela inclusão das fibras de polipropileno é o principal motivo do comportamento dúctil observado neste tipo de compósito.

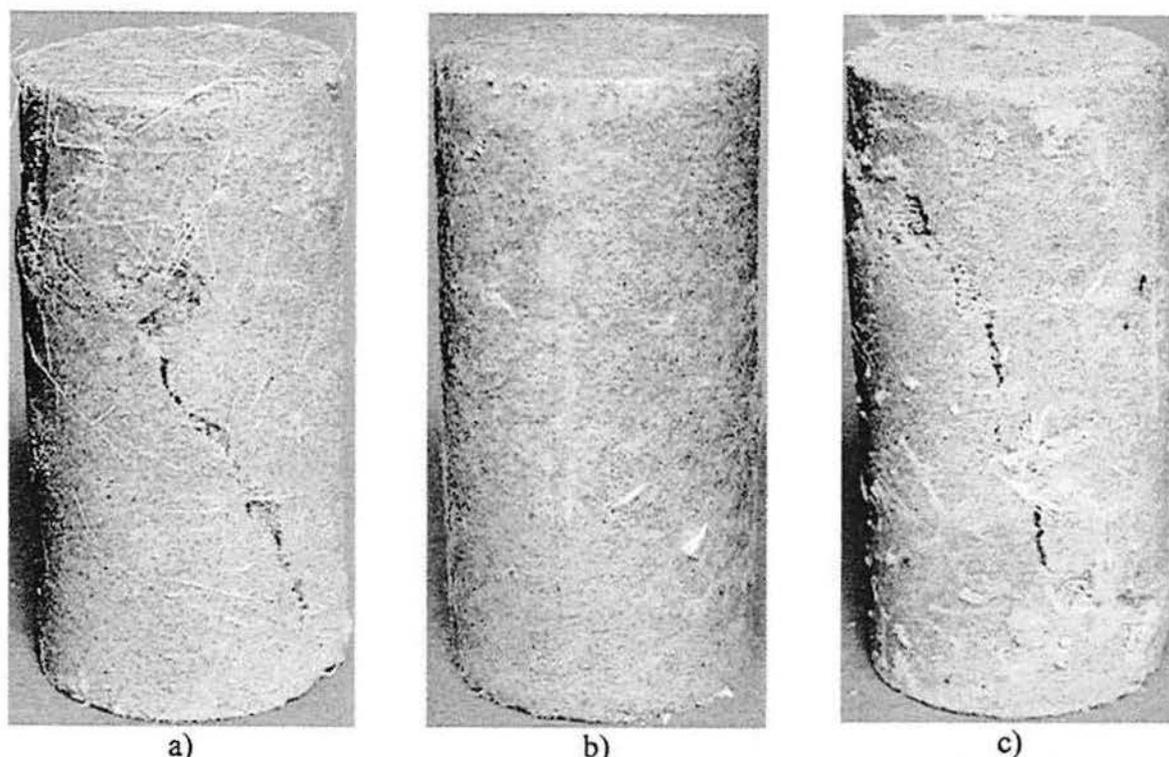


Figura 5.9: Corpos-de-prova rompidos em ensaios de compressão não-confinada.
a) matriz cimentada (PC = 5%) reforçada com fibras PET;
b) matriz cimentada (PC = 5%) reforçada com fibras de polipropileno;
c) matriz cimentada (PC = 5%) reforçada com fibras de vidro.

5.2.2 Rigidez inicial

No Capítulo 4 foram apresentados resultados que buscavam aferir a influência das fibras sobre a rigidez inicial dos compósitos fibrosos. Esta propriedade foi avaliada através da análise dos módulos de deformação secante (E_s) calculados para 0,01% e 0,1% de deformação axial. Conforme as análises de regressão múltipla indicaram, a inclusão das fibras PET e vidro não exercem qualquer influência sobre E_s , independentemente do nível de deformação analisado. Pode-se, então, concluir que, partindo do pressuposto que o elemento de reforço só é mobilizado se a matriz que o envolve deforma (McGown et al., 1978), deformações axiais de até 0,1%, foram insuficientes para mobilizar as propriedades do reforço.

Por sua vez, as fibras de polipropileno provocaram uma redução acentuada na rigidez inicial da matriz cimentada. Hannant (1994) argumenta que o módulo de elasticidade das fibras é geralmente menor que cinco vezes o da matriz cimentada, e que isto, combinado com a baixa porcentagem de fibras na mistura, significa que o módulo de deformação do compósito não deve ser muito diferente do módulo da matriz. Mas os resultados referentes às fibras de polipropileno não encontram suporte neste argumento. Acredita-se que a diminuição da rigidez inicial deve-se ao mesmo motivo dado para a diminuição da resistência de ruptura. Ou seja, devido ao grande volume ocupado pelas fibras de polipropileno, a densidade relativa (D_r) do corpo-de-prova era inferior à estipulada no programa experimental. Este, aliado à hipótese da perda da continuidade dos vínculos cimentados, são os prováveis motivos da diminuição da rigidez inicial da matriz cimentada.

5.2.3 Estado Último

Para avaliar a resistência última dos materiais compósitos fibrosos utilizou-se como variável de resposta a tensão desvio última (q_{ult}) medida para 10% de deformação axial. A influência de PC, PF e CF sobre q_{ult} é apresentada na Figura 5.10, para $TC = 60$ kPa. Diferentemente do que ocorre com q_{rup} , quando o cimento é o grande responsável pelo aumento da resistência, q_{ult} é influenciada igualmente, ou próximo disso, pela inclusão das fibras e pela tensão confinante, exceto quando as fibras são de vidro. Independentemente da natureza da matriz, a inclusão das fibras PET aumenta q_{ult} . Porém, na matriz cimentada o efeito é mais pronunciado, principalmente para $CF = 36$ mm. A influência da inclusão das fibras de polipropileno sobre q_{ult} é marcante, tanto para a matriz cimentada como para a matriz não-cimentada. A tensão desvio última das matrizes cimentada e não cimentada não é afetada pela inclusão das fibras de vidro.

As Figura 5.11 e 5.12 mostram a influência dos fatores PC, PF e CF sobre a resistência friccional e coesão última, respectivamente, dos compósitos reforçados com fibras PET, polipropileno e vidro. Nota-se que a influência das fibras PET sobre ϕ'_{ult} depende da natureza da matriz. Na ausência do cimento, a inclusão dessas fibras, e também o aumento do seu comprimento, aumentam ϕ'_{ult} de forma linear. Porém, quando o cimento se faz presente, a contribuição das fibras é mais pronunciada. Como pode ser visto na Figura 5.12(a), a influência de qualquer um dos três fatores sobre o intercepto coesivo último (c'_{ult}) da matriz não-cimentada não é significativa. No caso da matriz cimentada, fibras de 36 mm de comprimento proporcionam um leve aumento de c'_{ult} .

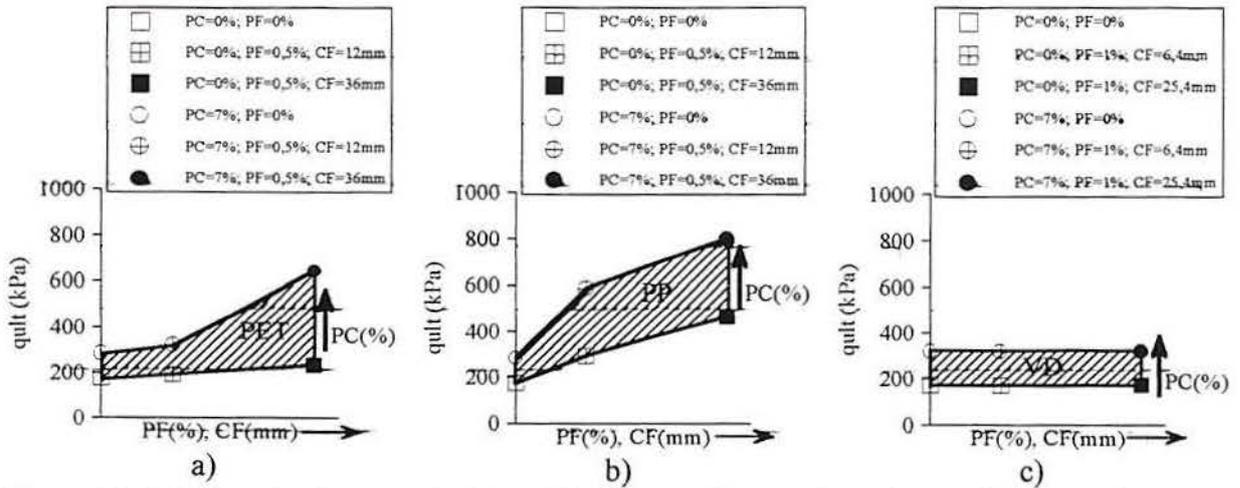


Figura 5.10: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre q_{ult} das matrizes cimentada e não-cimentada reforçadas com as fibras: a) PET; b) polipropileno (PP); c) vidro (VD) ($T_C = 60$ kPa).

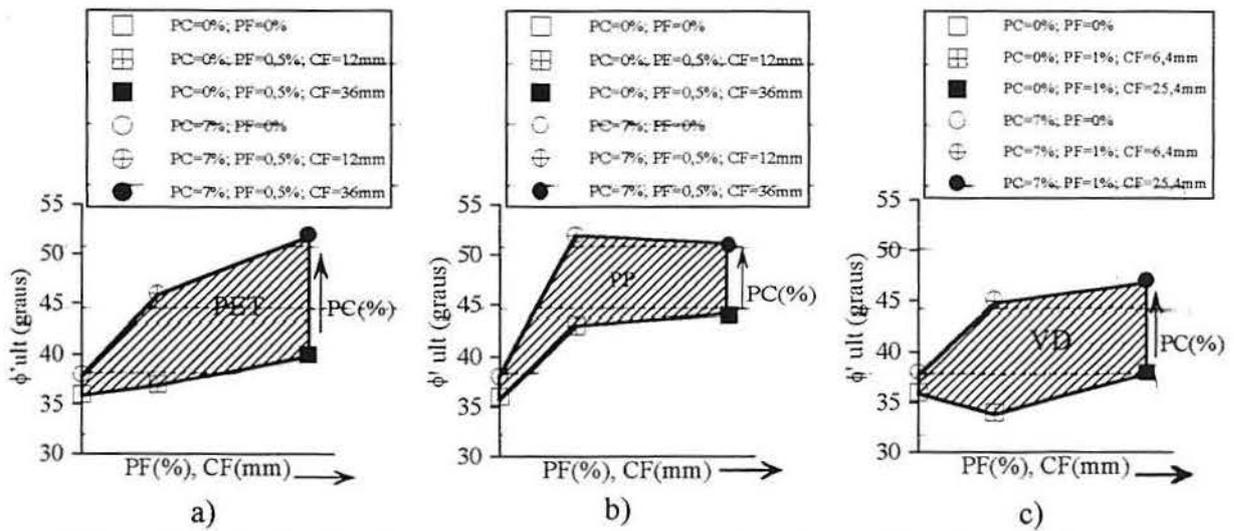


Figura 5.11: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre ϕ^{ult} das matrizes cimentada e não-cimentada reforçadas com as fibras: a) PET; b) polipropileno (PP); c) vidro (VD)

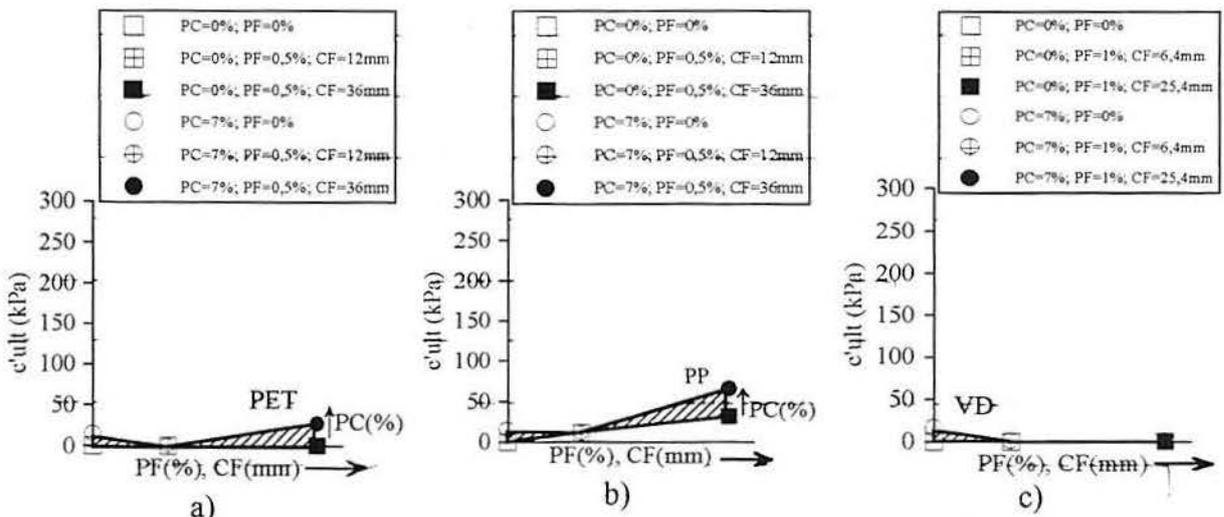


Figura 5.12: Efeito dos fatores PC, PF e CF sobre c^{ult} das matrizes cimentada e não-cimentada reforçadas com as fibras: a) PET; b) polipropileno (PP); c) vidro (VD)

A inclusão das fibras de polipropileno aumenta a resistência friccional última das matrizes cimentada e não-cimentada (Figura 5.11(b)). Porém, o efeito do fator CF sobre a resistência friccional última é nula. A coesão última das matrizes também é afetada positivamente pela inclusão das fibras de polipropileno, e o efeito é mais pronunciado para $CF = 36$ mm.

A influência da inclusão das fibras de vidro sobre ϕ'_{ult} da matriz não-cimentada é errática. No caso da matriz cimentada, a inclusão das fibras aumenta a resistência friccional última. Quanto ao efeito das fibras de vidro sobre c'_{ult} , pode-se dizer que é nulo, independentemente da natureza da matriz.

Traçando um paralelo entre as Figuras 5.10, 5.11 e 5.12, conclui-se que o aumento da q_{ult} dos compósitos reforçados com fibras PET deve-se basicamente ao aumento da resistência friccional. Já o aumento proporcionado pela inclusão das fibras de polipropileno deve ser atribuído ao acréscimo da resistência friccional e da coesão, para as duas matrizes analisadas neste trabalho.

Baseado nas colocações acima, pode-se concluir que há dois mecanismos distintos de interação fibra-matriz que explicam a influência das fibras sobre q_{ult} . O primeiro refere-se às fibras de vidro. Essas fibras são realmente arrancadas da massa do solo quando o compósito atinge a resistência de pico. Após o pico, portanto, não há qualquer resistência de aderência entre a fibra e a matriz, e por isso q_{ult} não é afetado pela inclusão destas fibras. As fibras PET, e principalmente as fibras de polipropileno, não são arrancadas totalmente da matriz quando o compósito atinge a resistência de pico. O deslizamento se dá de forma gradual, e isso permite que mesmo para níveis altos de deformação, as fibras possam conferir resistência ao compósito.

CAPÍTULO 6

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos em 222 ensaios de laboratório, apresentados, analisados e interpretados nos capítulos anteriores, bem como a avaliação crítica dos resultados relatados na literatura, permitiram estabelecer as seguintes conclusões principais:

- a) Quanto aos aspectos gerais do comportamento do compósito solo-cimento-fibra:
 - A cimentação, representada pela porcentagem de cimento, e a tensão de confinamento exercem forte influência sobre as características de resistência e deformabilidade dos compósitos. Basicamente, a cimentação aumenta a resistência de ruptura, a rigidez inicial, a resistência última, a capacidade de absorção de energia de deformação e confere características de fragilidade ao compósito. O aumento da tensão de confinamento aumenta a resistência de ruptura, a resistência última e a capacidade de absorção de energia de deformação. Além disso, quanto maior a tensão confinante, maior é a tendência do compósito ao comportamento dúctil;
 - A influência da inclusão de fibras sobre as propriedades mecânicas do compósito depende fundamentalmente das propriedades mecânicas da fibra e da matriz. Não é possível generalizações que apontem regras sobre o comportamento dos compósitos fibrosos, sem que antes sejam estabelecidas as propriedades de cada um dos seus componentes. Fibras relativamente rígidas (fibras de vidro e PET) exercem efeito mais pronunciado na resistência de ruptura, ao passo que fibras relativamente flexíveis (fibras de polipropileno) exercem efeito mais pronunciado no modo de ruptura e no comportamento último.

b) Quanto à resistência à tração:

- A inclusão de fibras PET ou de vidro aumentou a resistência à tração por compressão diametral da matriz cimentada. O aumento foi mais pronunciado para maiores teores de fibra. O efeito do comprimento da fibra mostrou-se nulo;
- A inclusão de fibras de polipropileno na matriz cimentada não provocou qualquer alteração importante na resistência à tração por compressão diametral.

c) Quanto à resistência ao cisalhamento:

- A inclusão de fibras PET aumentou a resistência à compressão não-confinada da matriz cimentada. O aumento é mais pronunciado para maiores porcentagem de fibra adicionada à mistura. O efeito do comprimento da fibra mostrou-se nulo;
- A inclusão de fibras de vidro aumentou a resistência à compressão não-confinada da matriz cimentada. O aumento é mais pronunciado para fibras longas. O efeito da porcentagem da fibra mostrou-se nulo;
- O aumento da resistência à compressão não-confinada da matriz cimentada com a inclusão de fibras de polipropileno foi proporcional tanto à porcentagem como ao comprimento das fibras. Porém, quando comparado com o aumento obtido com a inclusão de fibras PET e de vidro, permaneceu em um patamar inferior;
- As fibras PET e de vidro aumentaram a tensão desvio de ruptura das matrizes cimentada e não-cimentada obtida nos ensaios triaxiais, de forma mais pronunciada para comprimentos de fibra maiores. Estas fibras se mostraram suficientemente rígidas para mobilizar a sua resistência à tração a baixos níveis de deformação, e, portanto, aumentar a resistência dos compósitos. O principal motivo do aumento da resistência de ruptura é o aumento da resistência friccional, visto que a coesão da matriz cimentada diminui na presença dessas fibras;
- As fibras de polipropileno aumentaram a tensão desvio na ruptura obtida em ensaios triaxiais somente para a matriz não-cimentada. A queda da resistência triaxial verificada nos compósitos de matriz cimentada pode ser creditada à dificuldade de moldagem dos corpos-de-prova, que impediu que estes atingissem a densidade relativa estipulada.

d) Quanto ao modo de ruptura:

- A inclusão de fibras de polipropileno no compósito de matriz cimentada alterou significativamente o seu modo de ruptura. Com a inclusão das fibras o comportamento do material na ruptura, que era frágil, torna-se dúctil. Estas constatações resultaram da análise dos índices de fragilidade calculados a partir das curvas tensão-deformação e da verificação visual da ausência ou presença de planos de ruptura nos corpos-de-prova rompidos;
- A inclusão de fibras PET reduziram sensivelmente o índice de fragilidade da matriz cimentada, de forma mais acentuada para comprimentos da fibra maiores. No entanto, a redução verificada não foi suficiente para expressar uma modificação no modo de ruptura da matriz cimentada;
- As fibras de vidro não exercem influência sobre o índice de fragilidade de nenhuma das matrizes, ou seja, o modo de ruptura não é modificado com a inclusão dessas fibras.

e) Quanto ao comportamento pós-ruptura:

- A resistência última foi afetada pela inclusão de fibras PET e de polipropileno, independentemente da natureza da matriz, embora na matriz cimentada o efeito seja mais pronunciado, principalmente para as fibras de polipropileno. O aumento da tensão desvio última foi observado ser diretamente proporcional ao comprimento das fibras. A inclusão de fibras de vidro não afetou a resistência última dos compósitos;
- Pode-se creditar o aumento da resistência última ao acréscimo da resistência friccional última para os compósitos em que os elementos de reforço são as fibras PET, principalmente para a matriz cimentada e para o maior comprimento de fibra (36 mm). No que se refere ao solo reforçado com fibras de polipropileno, o aumento da resistência última é devido ao acréscimo conjunto da resistência friccional última e da coesão última.

f) Quanto à rigidez inicial:

- A rigidez inicial, tanto da matriz cimentada como da matriz não-cimentada, para níveis de deformação axial de 0,01% e 0,1%, não foi afetada pela inclusão das fibras PET e de vidro. Porém, a rigidez inicial da matriz cimentada é drasticamente diminuída com a

inclusão de fibras de polipropileno, provavelmente devido a limitações verificadas na moldagem dos corpos-de-prova. Na matriz não-cimentada também observa-se a diminuição, mais tímida, da rigidez inicial com a inclusão de fibras de polipropileno.

g) Quanto à capacidade de absorção de energia de deformação:

- A inclusão de qualquer tipo de fibra aumentou a capacidade de absorção de energia de deformação, de forma mais acentuada para comprimentos de fibra maiores. No entanto, foi observada uma clara distinção de comportamento entre os compósitos, quando comparada a evolução da energia consumida ao longo de todo o ensaio triaxial. Matrizes cimentadas sem a inclusão de fibras ou reforçadas com fibras PET e de vidro (ruptura frágil) apresentaram, no trecho inicial de deformações, uma taxa de crescimento da energia consumida superior à taxa de crescimento referente a deformações mais elevadas. Já a matriz cimentada reforçada com fibras de polipropileno (ruptura dúctil) apresentou uma taxa de crescimento da energia consumida constante para todos os níveis de deformação.

h) Quanto à distribuição das fibras na matriz do compósito:

- A hipótese da distribuição aleatória das fibras na matriz do compósito não foi validada no presente trabalho. Quando o esforço de compactação é aplicado à mistura solo-cimento-fibra, há uma nítida tendência das fibras permanecerem orientadas na direção de um plano perpendicular à direção do esforço de compactação.

6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Com a finalidade de complementar a pesquisa apresentada nesta dissertação, sugere-se:

- a) A realização de ensaios triaxiais drenados que contemplem outros níveis de porcentagem de fibra e de cimento, para que haja melhor definição a respeito do efeito destes fatores sobre as propriedades de resistência e deformabilidade dos compósitos fibrosos;
- b) A realização de ensaios de fadiga e de determinação de módulo resiliente a fim de avaliar-se a influência da inclusão de fibras sobre parâmetros de interesse específico para a

engenharia rodoviária, visto que a construção de base de pavimentos é uma das potenciais áreas de aplicação dos compósitos solo-cimento-fibra;

- c) A realização de ensaios que permitam avaliar a influência das fibras sobre a formação, o tamanho e a quantidade de fissuras ou trincas originadas por retração da camada cimentada durante o período de cura;
- d) A realização de ensaios de campo como, por exemplo, ensaios de placa, e a construção de pistas experimentais, para avaliar o desempenho de camadas cimentadas reforçadas com fibras, submetidas a condições reais de solicitação e de intemperismo. Atrelado à execução dessas camadas *in situ*, sugere-se o desenvolvimento de técnicas que permitam a execução da mistura solo-cimento-fibra no campo, de maneira prática e econômica;

Por fim, o autor sugere que os próximos trabalhos, não só os relacionados com o tema dessa dissertação, mas todos que tenham caráter experimental, sejam planejados e avaliados segundo teorias estatísticas. A utilização dessas teorias deve ser encarada como uma ferramenta que o pesquisador pode e deve utilizar para avaliar seu experimento. Cabe ao pesquisador concentrar seus esforços na interpretação dos resultados, pois isto depende tão somente do conhecimento por ele adquirido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMENTO, M. Geossintéticos em estruturas de contenção e taludes íngremes. In: CURSO SOBRE APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS EM GEOTECNIA E MEIO AMBIENTE, 1998, São Paulo. São Paulo: 1998. p.D1-D32.
- AL WAHAB, R. M.; EI-KEDRAH, M. A. Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in a compacted clay. **GEOENVIRONMENT 2000: Characterization, Containment, Remediation and Performance in Environmental Geotechnics**, Louisiana, Geotechnical Special Publication, ASTM, 2v, v.1, n.46, p.791-805, 1995.
- ANDRAWES, K. Z.; MCGOWN, A.; MASHHOUR, M. M.; WILSON-FAHMY, R. F. Tension resistant inclusion in soils. **Journal of the Geotechnical Engineering**, New York, v.106, n.12, p.1313-1326, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo coesivo – determinação da resistência à compressão não-confinada: NBR 12777**. Rio de Janeiro, 1995, 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassas e concretos – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: NBR 7222**. Rio de Janeiro, 1983, 3p.
- AVERSA, S.; EVANGELISTA, A.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, A. Some aspects of the mechanical behavior of structured soils and soft rocks. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GEOTECHNICAL ENGINEERING OF HARD SOILS – SOFT ROCKS, 1993, Athens. **Proceedings...** Rotterdam: A. A. Balkema, 1993. 3v. v.1, p.359-366.

- BENSON, C. H.; KHIRE, M. V. Reinforcing sand with strips of reclaimed high-density polyethylene. **Journal of the Geotechnical Engineering**, New York, v.120, n.5, p.838-855, 1994.
- BISHOP, A. W.; HENKEL, D. J. **The measurements of soil properties in the triaxial test**. 2ed. London: Edward Arnold, 1962. 227p.
- BOX, G. E. P.; DRAPER, N. **Empirical model building and response surfaces**. New York: John Wiley and Sons, 1987.
- BRESSANI, L. A. **Experimental studies of na artificially bonded soil**. London, 1990. 459p. Tese (Ph. D.) – University of London.
- BRESSANI, L. A.; MARTINS, F. B.; BICA, A. V. D. Mechanical behavior of a residual soil from Botucatu sandstone. In: INTERNATIONAL CONGRESS – INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 1994, Lisbon. **Proceedings...** Rotterdam: A. A. Balkema, 1994. v.1, p.316-322.
- BRESSANI, L. A.; VAUGHAN, P. R. Damage to soil structure during triaxial testing. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 12., Rio de Janeiro, 1989. **Proceedings...** Rotterdam: A. A. Balkema, 1989. v.1, p.17-20.
- BUDINSKI, K. G. **Engineering Materials**; properties and selection. New Jersey: Prentice Hall International., 5ed, 1996. 653p.
- CARNEIRO, F. L. Um novo método para determinação da resistência à tração de concretos. **Comunicação**, 5. Reunião Associação Brasileira de Normas Técnicas, publ. Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro, 1943.
- CARRARO, J. A. H. **Utilização de resíduos industriais na estabilização de um solo residual de arenito**. Porto Alegre, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS. 152p.

- CHANG, T.; WOODS, R. D. Effect of particle contact bond on shear modulus. **Journal of the Geotechnical Engineering**, New York, v.118, n.8, p.1216-1233, 1992.
- CLAYTON, C. R. I.; KHATRUSH, S. A. A new device for measuring local axial strain on triaxial specimens. **Géotechnique**, v.25, n.4, p.657-670, 1986.
- CLAYTON, C. R. I.; KHATRUSH, S. A.; BICA, A. V. D.; SIDDIQUE, A. The use of Hall effect semiconductor in geotechnical instrumentation. **Geotechnical Testing Journal**, v.12, n.1, p.69-76, 1989.
- CLOUGH, G. W.; SITAR, N.; BACHUS, R. C.; RAD, S. N. Cemented sands under static loading. **Journal of the Geotechnical Engineering**, New York, v.107, n.6, p.799-817, 1981.
- CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; ULBRICH, L. A. Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, v.124, n.12, p.1211-1214, 1998.
- CONSOLI, N. C.; ULBRICH, L. A.; PRIETTO, P. D. M. Engineering behavior of randomly distributed fiber-reinforced cemented soil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RECENT DEVELOPMENTS IN SOIL AND PAVEMENT MECHANICS, 1997, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rotterdam: A. A. Balkema, 1997. p.481-486.
- COOP, M. R.; ATKINSON, J. H. The mechanics of cemented carbonate sands. **Géotechnique**, London, v.43, n.1, p.53-67, 1993.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples**. DNER – ME 180, Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral**. DNER – ME 181, Rio de Janeiro, 1994.

- DIAZ, J. G. **Estudo do comportamento de fundações superficiais em solos cimentados.** Porto Alegre, 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS. 136p.
- FANYU, Z.; CLARK, J. I.; PAULIN, M. J. Factores affecting at-rest lateral stress in artificially cemented sands. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, n.32, p.195-203, 1995.
- FATANI, M., N.; BAUER, G. E.; AL-JOULLANI, N. Reinforced soil with ligned and randomly oriented metallic fibers. **Geotechnical Testing Journal**, Philadelphia, v.14, n.1, p.78-87, 1991.
- FERREIRA, P. M. V. **Estudo de um solo residual de arenito da rodovia RS 239 – ensaios triaxiais servo controlados.** Porto Alegre, 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC-UFRGS. 114p.
- FOGAÇA, B. C. **Análise paramétrica de estruturas de pavimento utilizando areia do litoral do Rio Grande do Sul estabilizada com cinza volante e cal.** Porto Alegre, 1996. Dissertação (Mestrado de Engenharia) – CPGEC/UFRGS. 143p.
- FREITAG, D. R. Soil randomly reinforced with fibers. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v.112, n.8, p823-826, 1986.
- GRAY, D. H.; AL-REFEAI, T. Behavior of fabric versus fiber-reinforced sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v.112, n.8, p804-820, 1986.
- GRAY, D. H.; MAHER, M. G. Admixture stabilization of sands with random fibers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 12., 1989, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1989. v.2, p.1363-1366.
- GRAY, D.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforced in sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v.109, n.3, p.335-353, 1983.

- HANNANT, L. Fibre-reinforced cements and concretes. In: J. M. ILLSTON. **Construction Materials; their nature and behaviour**. 2ed. London: J. M. Illston/E & FN Spon., 1994. p.359-403.
- HEAD, K., H. **Manual of soil laboratory testing**. London: Pentech Press, 1980. v.1. 339p.
- HEINECK, K. S. **Estudo da influência de cimentações introduzidas sob tensão**. Porto Alegre, 1998. 117p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.
- HIGGINS, R. A. **Properties of engineering materials**. London: E. Arnold, 2ed., 1994. 495p.
- HOLLAWAY, L. Polymers and polymer composites. In: J. M. ILLSTON. **Construction Materials; their nature and behaviour**. 2ed. London: J. M. Illston/E & FN Spon, 1994. p.321-358.
- ILLSTON, J. M. [Ed]. **Construction Materials; their nature and behaviour**. London: E & FN Spon, 2ed., 1994. 518p.
- JOHNSTON, C. D. Fibre-reinforced cement and concrete. In: V. M. MALHORTA. **Advances in concrete technology**. 2ed. Ottawa: V. M. Malhotra, 1994. p.603-673.
- LA ROCHELLE, P.; LEROUEIL, S.; TRAK, B.; BLAIS-LEROUX, L.; TAVENAS, F. Observational approach to membrane and area corrections in triaxial tests. In: SYMPOSIUM ON ADVANCED TRIAXIAL TESTING OF SOIL AND ROCK, 1986, Louisville. **Proceedings...** Philadelphia: ASTM, 1988. 1v., p.715-731.
- LADE, P. V.; OVERTON, D. D. Cementation effects in frictional materials. **Journal of the Geotechnical Engineering**, New York, v.115, n.10, p.1373-1387, 1989.
- LAMBE, T.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**, SI version. New York: John Wiley & Sons Inc, 1979. 553p.

- LEROUEIL, S.; VAUGHAN, P. R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. **Géotechnique**, v.40, n.3, p.467-488, 1990.
- MAHER, M. H.; GRAY, D. H. Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers. **Journal of Geotechnical Engineering**, v.116, n.11, p.1661-1677, 1990.
- MAHER, M. H.; HO, Y. C. Behavior of fiber-reinforced cement sand under static and cyclic loads. **Geotechnical Testing Journal**, v.16, n.3, p.330-338, 1993.
- MAHER, M. H.; HO, Y. C. Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite. **Journal of Geotechnical Engineering**, v.120, n.8, p.1387-1393, 1994.
- MAHER, M. H.; WOODS, R. D. Dynamic response of sand reinforced with randomly distributed fibers. **Journal of Geotechnical Engineering**, v.116, n.7, p.1116-1131, 1990.
- McGOWN, A.; ANDRAWES, K. Z.; AL-HASANI, M. M. Effect of inclusion properties on the behaviour of sand. **Géotechnique**, v.28, n.3, p.327-346, 1978.
- McGOWN, A.; ANDRAWES, K. Z.; HYTIRIS, N.; MERCER, F. B. Soil strengthening using randomly distributed mesh elements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 11., São Francisco, 1988. **Proceedings...v.3.** p.1735-1738.
- MITCHELL, J. K., KATTI, R. K. Soil improvement. State-of-the-art report. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10., Stockholm. **Proceedings...** Rotterdam: A. A. Balkema, v.4, 1981. p.261-317.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments.** 2ed. New York: John Wiley and Sons. 1984.
- MOREL, J. C.; GOURC, J. P. Mechanical behavior of sand reinforced with mesh elements. **Geosynthetics International**, Minnesota, v.4, n.5, p.481-508, 1997.

- NANNI, L. F.; RIBEIRO, J. L. **Planejamento e avaliação de experimentos.** CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 1992 (Caderno de Engenharia 17/87).
- NATARAJ, M. S.; ADDULA, H. R.; McMANIS, K. L. Strength and deformations characteristics of fiber reinforced soils. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY, 3., San Diego, 1996. **Proceedings...** Pennsylvania: Technomic Publishing Co., Inc, v.1, 1996. p.826-835.
- NUNEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação.** Porto Alegre, 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS. 150p.
- OMINE, K.; OCHIAI, H.; YASUFUKU, N.; KATO, T. Effect of plastic wastes in improving cement-treated soils. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1996. p.875-880.
- PALMEIRA, E. M. Geossintéticos: tipos e evolução nos últimos anos. In: SEMINÁRIO SOBRE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS EM GEOTECNIA. **Geossintéticos 92...**Brasília: 1992. p.1-20.
- PALMEIRA, E. M. Evolução dos geossintéticos no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS, 2., 1995. **Geossintéticos 95...** Palestras Especiais, 1995. p.5-15.
- PASA, G. S. **Método de otimização experimental de formulações.** Porto Alegre, 1996. 117p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) –UFRGS.
- PRIETTO, P. D. M. **Estudo do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado.** Porto Alegre, 1996. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.

- PRIETTO, P. D. M., SCHNAID, F., CONSOLI, N. C. Aspectos do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado. **Solos e Rochas...** São Paulo: ABMS/AABGE, v.20, n.3, 1997.
- RANJAN, G. R.; CHARAN, H. D. Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil. **Journal of Geotechnical Engineering**, v.122, n.6, p.419-426,1996.
- ROHLFES JR., J. A. **Comportamento de um solo cimentado e sua aplicação na engenharia de fundações**. Porto Alegre, 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.
- ROTTA, G. V.; CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M. Influência da formação da matriz cimentante no comportamento tensão-deformação de solos cimentados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., 1998, Brasília. **Anais...**v.2, p.1125-1132.
- SALES, L. F. P. **Estudo do comportamento de fundações superficiais assentes em solos tratados**. Porto Alegre, 1998. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC-UFRGS.
- SAVASTANO JUNIOR, H.; NOLASCO, A. M.; LUZ, P. H. C. Análise dos resíduos e subprodutos da agroindústria de fibras vegetais do Brasil para uso em materiais de construção. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL, 2., São Carlos, e SIMPÓSIO DO CURSO DE CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL, 4., São Carlos, 1997. **Anais...** São Carlos, 1997.
- SAXENA, S. K.; LASTRICO, R. M. Static properties of lightly cemented sand. **Journal of Geotechnical Engineering** , New York, v.104, n.12, p.1449-1465. 1978.
- SHEWBRIDGE, E.; SITAR, N. Deformation characteristics of reinforced sand in direct shear. **Journal of Geotechnical Engineering** New York, v.115, n.8, p.1134-1147, 1989.

- SHEWBRIDGE, E.; SITAR, N. Deformation-based model for reinforced sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v.116, n.7, p.1153-1170, 1990.
- SHEWBRIDGE, S. E.; SOUZA, J. B. Dynamic properties of reinforced sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v.117, n.9, p.1402-1422, 1991.
- SILVA, M. A.; BUENO, B. S.; LIMA, D. C. Estabilização de solos com inclusões curtas aleatórias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS, 2., São Paulo, 1995. **Geossintéticos 95...** p.327-335.
- SOARES, J. M. D.; BICA, A. V. D.; BRESSANI, L. A.; MARTINS, F. B. Medição local de deformações utilizando sensores de efeito Hall. **Solos e Rochas...** São Paulo, v.17, n.3, p.183-188, 1994.
- TAYLOR, G. D. **Materials in Construction**. London: Longman Scientific & Technical, 2ed, 1994. 284p.
- TEODORO, J. M.; BUENO, B. S. Estudo do comportamento dos solos reforçados com fibras plásticas de polipropileno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., Brasília, 1998. **Anais...** v.2. p.1093-1100.
- TESSARI, M. A. **Ensaio de placa em camadas de cinza pesada de carvão tratadas com cimento**. Porto Alegre, 1998. 84p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.
- THOMÉ, A. **Estudo do comportamento de um solo mole tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais**. Porto Alegre, 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS. 149p.
- TOMASI, L.; LIMA, D. C.; BUENO, B. S. Estabilização de um solo argiloso com cal e geofibras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS, 2., São Paulo, 1995. **Geossintéticos 95...** p.337-344.

- ULBRICH, L. A. **Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras.** Porto Alegre, 1997. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.
- VAUGHAN, P. R.; MACCARINI, M.; MOKHTAR, S. M. Indexing the engineering properties of residual soil. **Quartely Journal of Engineering Geology**, London, v.21. p.69-84, 1988.
- VENDRUSCOLO, M. **Estudo do comportamento de fundações superficiais em solo melhorado mediante ensaios de placa.** Porto Alegre, 1996. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC-UFRGS.
- VIDAL, H. **La terre armee.** Anns Inst. tech Bâtim., Paris, nos. 223-229, 1966.
- YOSHINAKA, R.; YAMABE, T. Deformation behavior of soft rocks. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WEAK, SOFT, FRACTURED AND WEATHERED ROCK**, Tokyo, 1981. **Proceedings...** Rotterdam: A. A. Balkema, 1981-82. 3v. v.1, p.87-92.