

MOBILIZAÇÃO DE RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE GRAMPOS  
COM FIBRAS DE POLIPROPILENO

Roberta Amorim Leite

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO  
DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

---

Prof<sup>a</sup>. Anna Laura Lopes da Silva Nunes, Ph.D.

---

Prof. Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão, Ph.D.

---

Prof. Ennio Marques Palmeira, Ph.D.

---

Prof. Maurício Ehrlich, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2007

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

LEITE, ROBERTA AMORIM

Mobilização de Resistência ao Arrancamento  
de Grampos com Fibras de Polipropileno [Rio de  
Janeiro] 2007

XVI, 152 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,  
Engenharia Civil, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE

1. Ensaio de Arrancamento de Grampos
2. Fibras de Polipropileno
3. Instrumentação de Grampos

I. COPPE/UFRJ II. Título ( série )

Aos meus pais,  
*Ronaldo e Regina,*  
pelo amor incondicional  
e incentivo constante.

## AGRADECIMENTOS

À Prof.<sup>a</sup> Anna Laura Lopes da Silva Nunes e ao Prof. Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão pelo incentivo, dedicação, apoio e amizade oferecidos durante todas as etapas deste trabalho.

Ao Corpo Docente do Programa de Engenharia Civil – Geotecnia da Coppe-UFRJ, pelos conhecimentos transmitidos, imprescindíveis para realização desta Pesquisa.

À Empresa SEEL – Serviços Especiais de Engenharia Ltda., em especial aos engenheiros Paulo Henrique Dias, por disponibilizar a área experimental para os ensaios de campo, bem como o suporte instrumental necessário, e Luiz Courzio, pelo auxílio fundamental na execução de todas as etapas de campo.

À Empresa Ober S/A por fornecer as fibras de polipropileno utilizadas na Pesquisa.

Aos amigos Anselmo Borba e Paulo Roberto Henriques Jr., pela eterna parceria e cumplicidade ao longo desta “nossa jornada” e aos demais amigos de Mestrado, que compartilharam as mesmas expectativas e vitórias ao longo destes dois anos de intensa dedicação e tornaram esta experiência mais prazerosa e gratificante.

Ao amigo Marcelo Rios pelo tempo e paciência dedicados, sempre muito prestativo, ajudando-me em todas as tarefas de laboratório e de campo.

Ao Pablo, pelo amor, carinho e compreensão que me ofereceu, especialmente nos momentos mais difíceis, proporcionando-me a tranquilidade e determinação necessárias para concluir esta etapa.

À FAPERJ e ao CNPQ, pelo auxílio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

MOBILIZAÇÃO DE RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE GRAMPOS  
COM FIBRAS DE POLIPROPILENO

Roberta Amorim Leite

Setembro/2007

Orientadores: Anna Laura Lopes da Silva Nunes  
Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Programa: Engenharia Civil

O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade do emprego de grampos reforçados com fibras de polipropileno, em substituição às barras de aço, convencionalmente utilizadas, na técnica de estabilização conhecida como Solo Grampeado. O desempenho dos grampos com fibras foi analisado através de ensaios de arrancamento realizados em uma área experimental, localizada no município de Duque de Caxias, RJ. Verificou-se também a distribuição do carregamento ao longo dos grampos durante a realização dos ensaios, graças ao monitoramento das deformações por meio de *strain gages*. Os resultados indicam que os grampos com fibras apresentam uma resistência ao arrancamento média da ordem de 60% dos grampos convencionais.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Sciences (M. Sc.)

MOBILIZATION OF THE PULLOUT RESISTANCE OF NAILS WITH  
POLYPROPYLENE FIBERS

Roberta Amorim Leite

September/2007

Advisors: Anna Laura Lopes da Silva Nunes  
Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Department: Civil Engineering

This research presents a study of the viability of the nails with polypropylene fibers, in substitution to the steel bars, conventionally used in the soil nailing technique. The strength behavior of nails with polypropylene fibers was analyzed through pullout tests carried in an experimental area, in the city of Duque de Caxias, RIO DE JANEIRO. It was also verified the force distribution along the nails during the pullout test. It was accomplished using the monitoring of strains measured by strain gages glued in to the steel bar. The results indicate that the nails with polypropylene fibers have approximately 60% of the pullout resistance of the conventional nails.

# ÍNDICE

<b>Capítulo 1: Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Importância da Pesquisa.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Organização da dissertação.....	4
<b>Capítulo 2: Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>6</b>
2.1 Solo Grampeado.....	6
2.1.1 Histórico.....	6
2.1.2 Conceito.....	8
2.1.3 Processo Construtivo.....	11
2.1.4 Aplicações, Vantagens e Limitações.....	22
2.1.5 Comportamento Mecânico dos Grampos.....	24
2.2 Ensaio de Arrancamento em Grampos.....	27
2.2.1 Resistência ao Arrancamento.....	27
2.2.2 Ensaio Padrão.....	28
2.2.3 Esquema de Montagem.....	30
2.2.4 Ensaio de Deformação Controlada.....	31
2.2.5 Ensaio de Força Controlada.....	32
2.2.6 Interpretação de Resultados.....	33
2.2.7 Mobilização do Atrito ao longo do Grampo.....	35
2.2.8 Instrumentação de Grampos.....	38
2.2.9 Alguns Resultados da Literatura Nacional.....	42
2.3 Materiais Compósitos Fibrosos de Matriz Cimentícia.....	44
2.3.1 Introdução.....	44
2.3.2 Tipos de Fibras.....	46
2.3.3 Comportamento Mecânico.....	50
2.3.4 Parâmetros que influenciam o desempenho.....	53
2.3.5 Propriedades dos Compósitos no Estado Fresco.....	59
2.3.6 Propriedades dos Compósitos no Estado Endurecido.....	61
2.3.7 Compósitos de Matriz Cimentícia e Fibras de Polipropileno.....	65

<b>Capítulo 3: Programa Experimental de Campo.....</b>	<b>69</b>
3.1 Metodologia.....	69
3.2 Área Experimental.....	70
3.3 Especificação dos Materiais Utilizados.....	73
3.3.1 Grampos Convencionais.....	73
3.3.2 Grampos Reforçados com Fibras de Polipropileno.....	74
3.3.3 Traço da Mistura Nata-Fibras.....	75
3.4 Projeto e Execução da Instrumentação.....	77
3.4.1 Desafios Encontrados.....	77
3.4.2 Projeto da Instrumentação.....	79
3.4.3 Execução da Instrumentação.....	82
3.5 Execução dos Grampos.....	89
3.5.1 Execução dos Furos.....	89
3.5.2 Preparo das Barras e Perfis para serem inseridos nos furos.....	90
3.5.3 Confeccção <i>in loco</i> da Argamassa Reforçada com Fibras.....	93
3.5.4 Injeção dos Grampos com Fibras de Polipropileno.....	95
3.5.5 Confeccção <i>in loco</i> da Nata dos Grampos Convencionais.....	98
3.5.6 Injeção dos Grampos Convencionais.....	99
3.5.7 Reinjeção.....	100
3.6 Ensaaios de Arrancamento.....	101
3.6.1 Montagem.....	101
3.6.2 Execução dos Ensaaios.....	103
<b>Capítulo 4: Análise de Resultados.....</b>	<b>107</b>
4.1 Considerações Iniciais.....	107
4.2 Curvas Carga vs Deslocamento.....	110
4.2.1 Bateria 1.....	111
4.2.2 Bateria 2.....	112
4.2.3 Bateria 3.....	113
4.3 Dados da Exumação.....	115
4.4 Distribuição Real do Carregamento (Bateria 3).....	118
4.5 Distribuição Hipotética do Carregamento.....	120
4.5.1 Bateria 1.....	124

4.5.2 Bateria 2.....	126
4.5.3 Bateria 3.....	129
4.6 Resistência ao Arrancamento.....	131
<b>Capítulo 5: Conclusões e Sugestões.....</b>	<b>135</b>
5.1 Conclusões.....	135
5.2 Sugestões para Futuras Pesquisas.....	138
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>139</b>
<b>Anexo 1.....</b>	<b>145</b>

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Comparação do NATM com a técnica convencional de revestimento rígido (ORTIGÃO <i>et al.</i> , 1993).....	9
Figura 2.2 – Mecanismos de transferência de carga: (a) cortina ancorada; (b) muro em solo grampeado (ORTIGÃO <i>et al.</i> , 1993).....	10
Figura 2.3 – Detalhes das cabeças dos grampos: (a) barra de aço com diâmetro maior ou igual a 20mm; (b) barra de aço com diâmetro inferior a 20mm (ORTIGÃO <i>et al.</i> , 1993).....	14
Figura 2.4 – Componentes de um grampo (Springer, 2006).....	14
Figura 2.5 – Fases de injeção do grampo (PITTA <i>et al.</i> , 2003).....	15
Figura 2.6 – Montagem da aplicação do concreto projetado via seca (SOLOTRAT, 2006).....	18
Figura 2.7 – Fases de aplicação do concreto projetado (PITTA <i>et al.</i> , 2003).....	19
Figura 2.8 – Esquema de execução do concreto projetado com fases construtivas 1 e 2 (PITTA <i>et al.</i> , 2003).....	20
Figura 2.9 – Detalhe do dreno horizontal profundo (ABRAMENTO <i>et al.</i> , 1998).....	20
Figura 2.10 – Detalhe dos drenos tipo barbacã e dreno linear contínuo (ABRAMENTO <i>et al.</i> , 1998).....	21
Figura 2.11 – Comportamento de reforços: (a) flexíveis; (b) rígidos (MITCHELL e VILLET, 1987).....	25
Figura 2.12 – Força máxima mobilizada no grampo (EHRlich, 2003).....	26
Figura 2.13 – Relação entre a tração mobilizada no grampo e a resistência ao arrancamento (ORTIGÃO, 1997).....	27
Figura 2.14 – Esquema de ensaio de arrancamento padrão (ORTIGÃO, 1997).....	29
Figura 2.15 – Esquema de montagem típico de ensaios de arrancamento (SPRINGER, 2006).....	31
Figura 2.16 – Curva típica de ensaio de arrancamento (COUTO, 2002).....	33
Figura 2.17 – Critérios de ruptura usados nos ensaios de arrancamento (adaptado de CLOUTERRE, 1991).....	34

Figura 2.18 – Modelagem de curva experimental de ensaio de arrancamento através da Lei de Frank e Zhao (adaptado de CLOUTERRE, 1991).....	34
Figura 2.19 – Distribuição das deformações ao longo do grampo durante o ensaio de arrancamento (adaptado de CLOUTERRE, 1991).....	35
Figura 2.20 – Distribuição das forças de tração ao longo do grampo durante o ensaio de arrancamento – L = 3m (adaptado de CLOUTERRE, 1991).....	36
Figura 2.21 – Distribuição das forças de tração ao longo do grampo durante o ensaio de arrancamento – L = 12m (adaptado de CLOUTERRE, 1991).....	36
Figura 2.22 – Distribuição das tensões cisalhantes ao longo do grampo durante o ensaio de arrancamento – L = 3m (adaptado de CLOUTERRE, 1991).....	37
Figura 2.23 – Distribuição das tensões cisalhantes ao longo do grampo durante o ensaio de arrancamento – L = 12m (adaptado de CLOUTERRE, 1991).....	37
Figura 2.24 – Esquema de um extensômetro elétrico de resistência (ANDOLFATO <i>et al.</i> , 2004).....	38
Figura 2.25 – Esquema do circuito elétrico em Ponte de <i>Wheatstone</i> (ANDOLFATO <i>et al.</i> , 2004).....	40
Figura 2.26 – Esquema de tensões no concreto sem fibras (FOÁ, 2002).....	51
Figura 2.27 – Esquema de tensões no concreto com fibras (FOÁ, 2002).....	52
Figura 2.28 – Curva de carga <i>versus</i> deslocamento (FOÁ, 2002).....	55
Figura 2.29 – Distribuições possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico (adaptado de FOÁ, 2002).....	57
Figura 2.30 – Mecanismo de transferência de tensão em uma fibra em posição idealizada (adaptado de FITESA, 2002).....	58
Figura 2.31 – Formação de “ouriços” nos compósitos fibrosos.....	60

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Vista do talude em solo grampeado.....	71
Figura 3.2 – Vista aérea da área experimental.....	71
Figura 3.3 – Localização da área destinada aos ensaios de arrancamento.....	72
Figura 3.4 – Vista da área do talude adotada para instalação dos grampos. ....	73

Figura 3.5 – Fibras de polipropileno multifilamentos.....	75
Figura 3.6 – Seção transversal do perfil de PVC usado na instrumentação dos grampos.....	79
Figura 3.7 – Distribuição dos <i>strain gages</i> nos grampos com fibras instrumentados com barra de aço.....	80
Figura 3.8 – Distribuição dos <i>strain gages</i> nos grampos com fibras instrumentados com perfis de PVC.....	81
Figura 3.9 – Extensômetro de resistência elétrica para concreto.....	81
Figura 3.10 – Usinagem das barras de aço nervuradas.....	83
Figura 3.11 – Detalhe das chapinhas metálicas soldadas às barras de aço.....	84
Figura 3.12 – Processo de colagem dos <i>strain gages</i> .....	85
Figura 3.13 – Cabeamento dos <i>strain gages</i> .....	86
Figura 3.14 – Proteção mecânica dos <i>strain gages</i> : (a) camada de adesivo epóxi Araldite; (b) camada de selador adesivo Quilosa.....	87
Figura 3.15 – Barras e perfis instrumentados prontos para serem transportados.....	88
Figura 3.16 – Transporte das barras instrumentadas.....	89
Figura 3.17 – Disposição dos furos dos grampos no talude.....	90
Figura 3.18 – Detalhe dos centralizadores confeccionados na obra.....	91
Figura 3.19 – Detalhe da barra de aço, com mangueira de reinjeção e centralizador acoplados.....	92
Figura 3.20 – Barras de aço prontas para serem inseridas.....	92
Figura 3.21 – Misturador elétrico.....	93
Figura 3.22 – Detalhe do misturador sobre a plataforma de madeira.....	94
Figura 3.23 – Argamassa reforçada com fibras: (a) antes da adição de cimento e aditivo; (b) composição final.....	95
Figura 3.24 – Bomba de injeção.....	95
Figura 3.25 – Tubo e mangueira de injeção.....	96
Figura 3.26 – Inserção da barra instrumentada no furo.....	96
Figura 3.27 – Esquema dos grampos com fibras: GP31, GP32 e GP33.....	97
Figura 3.28 – Esquema dos grampos com fibras: GP34, GP35 e GP36.....	98
Figura 3.29 – Seqüência do processo construtivo dos grampos convencionais.....	99
Figura 3.30 – Esquema dos grampos convencionais: GC31 e GC32.....	100
Figura 3.31 – Montagem típica do ensaio de arrancamento.....	102

Figura 3.32 – Detalhe do extensômetro apoiado sobre o conjunto de placas metálicas.....	103
Figura 3.33 – Esquema de funcionamento do Sistema de Aquisição de Dados.....	105
Figura 3.34 – Detalhe da barra de aço de 10mm com sinais de estricção no trecho rompido.....	106
Figura 3.35 – Situação do aparato de ensaio após a ruptura abrupta da barra de aço do grampo GP31.....	106

## **CAPÍTULO 4**

Figura 4.1 – Detalhe dos grampos convencionais das Baterias 1 e 2 (MAGALHÃES, 2005).....	109
Figura 4.2 – Detalhe dos grampos com fibras de polipropileno das Baterias 1 e 2 (MAGALHÃES, 2005).....	109
Figura 4.3 – Curvas Carga vs Deslocamento dos grampos da Bateria 1 (MAGALHÃES, 2005).....	111
Figura 4.4 – Curvas Carga vs Deslocamento dos grampos da Bateria 2 (MAGALHÃES, 2005).....	112
Figura 4.5 – Curvas Carga vs Deslocamento dos grampos da Bateria 3.....	113
Figura 4.6 – Perfil dos grampos exumados da Bateria 2 e descrição do solo circundante (MAGALHÃES, 2005).....	116
Figura 4.7 – Esquema do padrão de fissuração típico dos grampos com fibras da Bateria 2 (MAGALHÃES, 2005).....	117
Figura 4.8 – Detalhe das fissuras do grampo GP21 (MAGALHÃES, 2005).....	118
Figura 4.9 – Distribuição do carregamento ao longo do grampo GP31.....	119
Figura 4.10 – Distribuição do carregamento ao longo do grampo GP34.....	119
Figura 4.11 – Distribuição do atrito mobilizado nos grampos: (a) convencionais; (b) com fibras e (c) distribuição da carga de tração para a Hipótese 1...121	
Figura 4.12 – Distribuição de: (a) atrito mobilizado e (b) carga de tração ao longo dos grampos com fibras para a Hipótese 2.....	122
Figura 4.13 – Distribuição de: (a) atrito mobilizado e (b) carga de tração ao longo dos grampos com fibras para a Hipótese 3.....	123

Figura 4.14 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencional e com fibras – GP11.....	124
Figura 4.15 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencional e com fibras – GP12.....	124
Figura 4.16 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencional e com fibras – GP13.....	125
Figura 4.17 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencional e com fibras – GP14.....	125
Figura 4.18 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencional e com fibras – GP15.....	126
Figura 4.19 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencional e com fibras – GP21.....	126
Figura 4.20 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencional e com fibras – GP22.....	127
Figura 4.21 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencional e com fibras – GP23.....	127
Figura 4.22 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencional e com fibras – GP24.....	128
Figura 4.23 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencional e com fibras – GP25.....	128
Figura 4.24 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencionais e com fibras – GP31.....	129
Figura 4.25 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencionais e com fibras – GP34.....	129
Figura 4.26 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencionais e com fibras – GP35.....	130
Figura 4.27 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencionais e com fibras – GP36.....	130

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Tipos de barras de aço (GEORIO, 2000).....	13
Tabela 2.2 – Características técnicas de fibras metálicas e fibras de polipropileno (PITTA <i>et al.</i> , 2003).....	17
Tabela 2.3 – Energia específica e resistência à tração na flexão de argamassa reforçada com teor de fibras de polipropileno de 500g/m <sup>3</sup> com diferentes comprimentos (CORTEZ, 1999).....	67
Tabela 2.4 – Energia específica, fator de tenacidade e resistência à tração na flexão de argamassa reforçada com fibras de polipropileno de 20mm (CORTEZ, 1999).....	67
Tabela 2.5 – Resultados de resistências mecânicas quando fibras de polipropileno são adicionadas em argamassas com variação do tipo de cimento (PUERTAS <i>et al.</i> , 2003).....	68

### CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 – Propriedades das barras de aço utilizadas nos grampos convencionais.....	74
Tabela 3.2 – Propriedades das fibras de polipropileno.....	75
Tabela 3.3 – Traço em peso da argamassa reforçada com fibras de polipropileno.....	76
Tabela 3.4 – Seqüência de lançamento dos materiais no misturador para a argamassa reforçada com fibras de polipropileno.....	77
Tabela 3.5 – Características dos extensômetros elétricos.....	82
Tabela 3.6 – Características dos terminais coláveis.....	82
Tabela 3.7 – Quantidades de material consumidas na confecção da argamassa reforçada com fibras de polipropileno.....	94
Tabela 3.8 – Quantidades de material consumidas na confecção da nata de cimento dos grampos convencionais.....	99

## **CAPÍTULO 4**

Tabela 4.1 – Resumo das principais características dos grampos ensaiados.....	110
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de arrancamento dos grampos da Bateria 1 (MAGALHÃES, 2005).....	111
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de arrancamento dos grampos da Bateria 2 (MAGALHÃES, 2005).....	112
Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de arrancamento dos grampos da Bateria 3....	113
Tabela 4.5 – Comprimento sem fissuras na extremidade final dos grampos com fibras da Bateria 2 (MAGALHÃES, 2005).....	117
Tabela 4.6 – Valores da Resistência ao Arrancamento dos grampos segundo as Hipóteses de carregamento 1, 2 e 3.....	132
Tabela 4.7 – Valores médios das resistências ao arrancamento dos grampos com fibras e porcentagem em relação à resistência dos grampos convencionais.....	134

## **ANEXO 1**

Tabela A1 – Resultados de ensaios de arrancamento da literatura nacional.....	146
---	-----

# CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

---

## 1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

No amplo âmbito da Engenharia Geotécnica, a estabilização de taludes naturais, de corte ou de aterros compactados constitui-se uma das demandas mais comuns. Os movimentos de massa de solo e/ou rocha, tais como deslizamentos, não raramente resultam em acidentes com prejuízos diversos para sociedade, desde perdas materiais até mesmo vítimas fatais. Seja em obras viárias, em barragens, em canalização de cursos d'água, em terraplenos para instalações residenciais, comerciais ou industriais, em escavações subterrâneas, ou em encostas naturais, os taludes potencialmente instáveis representam riscos graves e reais para a implantação e a operação dos serviços pretendidos.

Neste cenário, o projeto e execução das estruturas de contenção são atividades de suma importância, que requerem a compreensão do mecanismo geológico-geotécnico que induz a uma instabilização do maciço. Somente essa análise permitirá a adoção de uma solução perfeitamente solidária e adequada ao problema em questão. Aliado a este conhecimento, podem ser adotados coeficientes de segurança menos conservadores, baseados no comportamento esperado do solo estudado, o que resulta em obras mais econômicas e eficazes.

Dentre as técnicas de estabilização, o Solo Grampeado vem sendo amplamente utilizado no Brasil, em virtude de algumas vantagens que oferece, tais como versatilidade, rapidez de execução e economia. Este tipo de intervenção no talude promove o reforço do solo, por meio da inclusão de elementos resistentes à tração e ao cisalhamento no maciço. Normalmente, estes elementos, denominados grampos, são constituídos por uma barra de aço envolvida por nata de cimento.

Atualmente, a metodologia de execução de grampos encontra-se bastante difundida, com poucas variações em relação aos procedimentos e materiais adotados. As principais variáveis que distinguem uma solução de outra são o ângulo de inclinação e o

comprimento dos grampos, o diâmetro dos furos e das barras de aço, o método de perfuração e limpeza do furo, o número de injeções e a pressão adotada, entre outras. O aperfeiçoamento da técnica requer um estudo constante e detalhado do comportamento das estruturas grampeadas e a eventual adoção de procedimentos alternativos, com o intuito de melhorar o desempenho e reduzir os custos de execução dos grampos.

Sob outra perspectiva, o emprego de materiais compósitos na Construção Civil tem sido prática cada vez mais recorrente e permitido avanços tecnológicos nas mais diversas áreas, com particular destaque para as estruturas de concreto reforçado com fibras (CRF). Os compósitos fibrosos, em geral, apresentam propriedades de resistência melhoradas em relação à matriz sem fibras e, com isso, podem ser usados em estruturas mais esbeltas e econômicas.

As fibras de polipropileno, por sua vez, propiciam às misturas cimentícias como pastas, argamassas e concretos, a melhoria das propriedades pós-pico, isto é, após ser mobilizada a resistência máxima das peças fabricadas a partir destes materiais. Isto se faz importante, na medida em que a estrutura passa a apresentar um comportamento dúctil, suportando maiores deformações sem que ocorra uma ruptura brusca e possivelmente catastrófica.

Desta forma, intui-se que o emprego de fibras de polipropileno, como reforço da nata de cimento que envolve os grampos, pode ser benéfico, ao ponto de se propor nesta pesquisa uma nova metodologia de execução, que consiste na substituição das barras de aço, utilizadas para conferir resistência mecânica aos grampos, por fibras de polipropileno, as quais deverão cumprir esta mesma função com segurança.

As barras de aço são os elementos mais caros na composição dos grampos e requerem cuidados especiais para evitar a corrosão. Assim, se a solução proposta apresentar-se tecnicamente viável, a sua prática representará uma economia de tempo e recursos, além de facilitar consideravelmente o processo construtivo dos grampos.

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal estudar a viabilidade de utilização de uma metodologia alternativa de execução de grampos, através da substituição das barras de aço convencionalmente utilizadas, por fibras de polipropileno. A pesquisa dá continuidade ao trabalho realizado por Magalhães (2005) e faz parte de um amplo programa de estudo de Solo Grampeado, desenvolvido por pesquisadores e alunos de Mestrado e Doutorado da Coppe-UFRJ e da PUC-Rio.

Para que possam ser utilizados, os grampos reforçados com fibras de polipropileno devem atender a alguns requisitos básicos. O principal deles é oferecer resistência mecânica capaz de suportar os esforços de tração e de cisalhamento mobilizados ao longo dos grampos, e assim garantir a estabilidade do talude. Esta resistência não necessariamente deverá ser igual ou maior que a verificada nos grampos convencionais, mas ser tal que permita que os grampos não convencionais sejam uma solução segura e econômica.

Outro ponto importante a ser avaliado é a facilidade de aplicação da técnica. Em outras palavras, os procedimentos executivos deverão ser simples e não implicar em aumento do tempo necessário para realização dos serviços. Para isso, o volume de fibras acrescentado à nata de cimento não poderá acarretar uma diminuição drástica da trabalhabilidade, que impossibilite ou dificulte os processos de mistura e injeção.

Desta forma, procurou-se nesta pesquisa avaliar o desempenho da técnica, a partir de um Programa Experimental de Campo que contou com a realização de ensaios de arrancamento em grampos reforçados com fibras de polipropileno instrumentados com *strain gages* ao longo de seu comprimento. O traço utilizado nas argamassas destes grampos foi previamente testado, para assegurar as condições de trabalho no campo.

Finalmente, a partir dos resultados das etapas experimentais, prosseguiu-se à análise de dados, incluindo os obtidos por Magalhães (2005), com os seguintes objetivos:

- Estudar o comportamento Carga vs Deslocamento dos grampos reforçados com fibras;

- Comparar o comportamento Carga vs Deslocamento dos grampos reforçados com fibras com o dos grampos convencionais;
- Estudar a distribuição do carregamento ao longo dos grampos reforçados com fibra durante os ensaios de arrancamento;
- Comparar os resultados obtidos na instrumentação dos grampos com fibras com os dados da exumação;
- Apresentar as possíveis hipóteses de distribuição do carregamento para os grampos não instrumentados;
- Determinar e comparar as resistências ao arrancamento de todos os grampos, a partir das hipóteses de carregamento apresentadas.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos, além das referências bibliográficas e anexo, apresentados ao final do documento.

O presente capítulo (Capítulo 1) faz uma breve introdução ao tema de estudo, identificando aspectos relevantes a serem discutidos e apontando os principais objetivos da pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão do estado da arte sobre a técnica de estabilização em solo grampeado e sobre materiais compósitos fibrosos de matriz cimentícia, temas centrais que direcionam o escopo desta pesquisa. São abordados itens a respeito dos procedimentos executivos de grampos convencionais, vantagens e limitações da técnica, comportamento mecânico, metodologia de ensaios de arrancamento, técnicas de instrumentação, mobilização dos esforços, além de alguns resultados de ensaios da literatura. Com relação aos materiais compósitos fibrosos, são feitas considerações sobre o seu comportamento mecânico, com ênfase nas propriedades de resistência e principais parâmetros que as influenciam.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia seguida no Programa Experimental de Campo, que contou com a realização de ensaios de arrancamento em grampos

convencionais e grampos reforçados com fibras de polipropileno. Assim, é feita uma descrição detalhada da Área Experimental escolhida para os ensaios, dos materiais e equipamentos utilizados e dos procedimentos executivos seguidos na instrumentação, execução e arrancamento dos grampos, além de comentários sobre as principais dificuldades encontradas nestas etapas.

O Capítulo 4 apresenta a análise dos resultados obtidos no Programa Experimental de Campo, com a inclusão dos resultados de Magalhães (2005), com o intuito de agregar o maior número possível de informações à pesquisa e assim fornecer uma contribuição mais consistente ao meio técnico. Para isso, foram confrontados os dados fornecidos pela instrumentação e pela exumação dos grampos, a fim de se estabelecer as possíveis hipóteses de carregamento e respectivas resistências ao arrancamento dos grampos reforçados com fibras de polipropileno.

O Capítulo 5 expõe as conclusões da pesquisa e sugestões para futuros trabalhos a serem realizados sobre o tema em questão.

No anexo 1 encontra-se uma tabela com os principais dados de alguns ensaios de arrancamento da literatura nacional.

## CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1 SOLO GRAMPEADO

#### 2.1.1 HISTÓRICO

O solo grampeado consiste numa técnica na qual se promove a estabilidade de taludes de escavações através do reforço do solo *in situ*. O conceito utilizado nesta técnica é semelhante ao do NATM (*New Austrian Tunneling Method*) para a construção de túneis.

O NATM foi desenvolvido em 1945 pelo professor Landislau Von Rabcewicz, tendo em vista a necessidade de se promover a estabilidade das paredes e teto de uma escavação subterrânea de forma rápida e segura. Para tal, Rabcewicz baseou-se no princípio de que toda cavidade, sob o efeito do peso e tensões confinantes no maciço, apresenta deformações que tendem a reduzir o seu diâmetro. Se tais deformações forem permitidas, surge uma região plastificada no entorno da escavação, havendo uma redistribuição das tensões *in situ*.

Seguindo este princípio, o método desenvolvido consiste na aplicação de um suporte flexível, composto por concreto projetado e tela metálica para permitir que o terreno se deforme resultando em uma região plastificada, a qual é reforçada por elementos metálicos (chumbadores) curtos e radiais. Esta solução mostrou-se bastante prática e eficiente com o passar do tempo, ganhando aceitação dos profissionais e evoluindo para aplicações em solos pouco competentes (ORTIGÃO, 1993).

Em 1970, Lizzi apresentou seu processo de estabilização de encostas em solo, através de chumbadores longos e não protendidos, executados com diversas inclinações e fixados a vigas de concreto armado. Este sistema, por ele denominado *Urdidura Tridimensionale Pali Radice*, posteriormente deu origem às estacas raiz, usualmente empregadas como reforço de fundações (CLOUTERRE, 1991).

A primeira utilização do solo grampeado de que se tem registro ocorreu em 1972, na França, com o nome de *sol cloué*. Foi executado em talude ferroviário de cerca de 70° de inclinação, próximo à cidade de Versailles. O maciço, constituído por arenito, foi estabilizado com chumbadores de 4 a 6m de comprimento, injetados em furos de cerca de 100mm de diâmetro e espaçados de 70cm. O sucesso da obra intensificou o uso do método no país e até o ano de 1986 cerca de 12.000m<sup>2</sup> de taludes e escavações foram estabilizados com esta técnica (BRUCE e JEWELL, 1987).

Ainda na década de 70, outros países começaram a utilizar o solo grampeado para estabilização de taludes escavados. Em 1976, o sistema foi empregado pela primeira vez nos Estados Unidos com o nome de *soil nailing*, nas escavações para a construção de um hospital em Portland, Oregon (ABRAMENTO *et al.*, 1998).

Para acompanhar a evolução da técnica, muitos programas de pesquisa passaram a ser desenvolvidos em diversos países. Em 1975, na Alemanha Ocidental, a empresa Karl Bauer AG associou-se à Universidade Karlsruhe e ao Ministério de Pesquisa e Tecnologia, num programa de 4 anos de duração com a finalidade de estudar 8 modelos experimentais em escala real (STOCKER *et al.*, 1979).

Nos Estados Unidos, um programa de pesquisa foi conduzido pelo Professor Shen, na Universidade da Califórnia, a partir de 1981. Este também analisou o comportamento de estruturas grampeadas a partir da análise de resultados de ensaios em modelos instrumentados em escala real.

Na França, destacou-se um programa nacional de estudos envolvendo universidades, laboratórios, empresas de construção civil, órgãos governamentais, associações de profissionais e agências de fomento, denominado *Programme Clouterre*. O programa contou com uma série de projetos de investigação do comportamento de obras de solo grampeado, com monitoramento de inúmeras obras reais, carregamento até a ruptura de algumas obras experimentais, ensaios de arrancamento e revisão dos modelos de cálculo disponíveis, adequando-os aos resultados das observações de campo. A primeira etapa do programa, realizada de 1986 a 1991, permitiu a elaboração de um relatório inicial denominado *Recommandations Clouterre*, que recebeu um adendo em 2002, após o término da segunda etapa.

No Brasil, pode-se subdividir o desenvolvimento da técnica em duas fases: uma empírica, baseada na experiência dos construtores em NATM, e a fase atual, em que obras mais arrojadas têm sido projetadas de forma racional, com a utilização de métodos de análise desenvolvidos, estudados e discutidos nos últimos 25 anos por pesquisadores do mundo inteiro (ORTIGÃO *et al.*, 1993).

Da fase inicial, pode-se citar duas importantes obras projetadas empiricamente com a técnica: a primeira em 1966, quando uma empresa suíça radicada no Brasil (Ródio Perfurações e Consolidações) aplicou concreto projetado e tela metálica com grampos para estabilizar taludes na área de reservatório da Barragem de Xavantes. A segunda, em 1970, quando a empresa SABESP utilizou o reforço com chumbadores curtos, concreto projetado e tela metálica nos emboques de um dos túneis do Sistema Cantareira de abastecimento de água para a cidade de São Paulo.

### **2.1.2 CONCEITO**

O princípio do solo grampeado é o mesmo utilizado na técnica NATM de execução de túneis, na qual aplica-se um suporte flexível que permite que o terreno se deforme e crie uma região plastificada no entorno da escavação (Figura 2.1). O método convencional, ao contrário, consiste na execução de um revestimento rígido que impede os deslocamentos do terreno. Este impedimento mobiliza esforços muito maiores no maciço e requer assim uma maior espessura de revestimento (concreto armado), o que representa uma solução mais cara.

O grampeamento promove um reforço do solo por meio da inclusão de elementos resistentes à flexão composta, denominados grampos (barras de aço, barras sintéticas de seção cilíndrica ou retangular, micro-estacas, ou estacas, em casos especiais), instalados sub-horizontalmente de forma a introduzir esforços resistentes de tração e cisalhamento. Embora pareça haver grande similaridade entre esta técnica e a de cortinas atirantadas convencionais, estas exibem distinções muito importantes no que se refere ao comportamento tensão-deformação do solo, com aplicações específicas para cada caso (ORTIGÃO *et al.*, 1993).

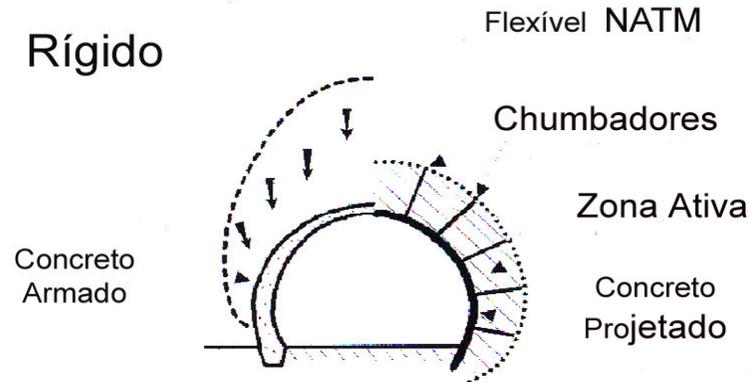


Figura 2.1 – Comparação do NATM com a técnica convencional de revestimento rígido (ORTIGÃO *et al.*, 1993).

Segundo ORTIGÃO *et al.* (1993), pode-se afirmar que “uma escavação de solo grampeado está para o NATM da mesma forma que a solução convencional de túneis se compara a uma cortina ancorada”.

Na prática, enquanto as ancoragens são fortemente pré-tensionadas com cargas de 150 a 1.000kN, com o objetivo de se prevenir os deslocamentos da cortina e, conseqüentemente, do talude a ser estabilizado, os grampos recebem no máximo uma pequena pré-tensão, da ordem de 5 a 10kN, com a única finalidade de garantir a ligação com o concreto projetado (ORTIGÃO *et al.*, 1993).

Além disso, os grampos, ao contrário das ancoragens, não apresentam trecho livre, transferindo tensões para o solo ao longo de todo seu comprimento. Em conseqüência, a distribuição de tensões na massa de solo é diferente. A Figura 2.2 mostra os mecanismos de transferência de carga nas ancoragens convencionais (a) e no solo grampeado (b).

As cortinas convencionais devem ter sua parede de concreto dimensionada para suportar o puncionamento devido às elevadas cargas nos tirantes. Por outro lado, os grampos não exigem tais cuidados, pois apresentam pequenas cargas. O melhor entendimento deste fenômeno é alcançado tendo-se em mente que a intervenção age na causa e não no efeito, ou seja, evita os esforços contra o muro. A essência da técnica está no “alívio controlado das tensões”, obtido permitindo-se que a película de concreto

projetado se desloque juntamente com os grampos até desenvolver um atrito lateral nos mesmos, porém sem haver esforços contra a dita película (GUIMARÃES FILHO, 1994).

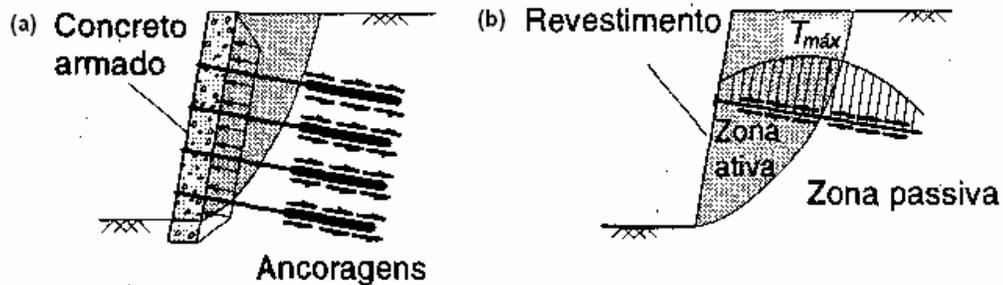


Figura 2.2 – Mecanismos de transferência de carga: (a) cortina ancorada; (b) muro em solo grampeado (ORTIGÃO *et al.*, 1993).

Desta forma, a camada de concreto projetado exerce pouca influência na estabilidade do talude e a sua função principal é evitar a desagregação do solo da superfície sobre a qual se aplica. O equilíbrio é mantido graças ao funcionamento em conjunto dos grampos e do solo que os envolve, que agem como uma estrutura estável que suporta o solo não reforçado a montante (DRINGENBERG e CRAIZER, 1992). Segundo PITTA *et al.* (2003), “o solo se torna o material de constituição de um grande muro de peso limitado pela dimensão do chumbador, que foi melhorado pelas injeções e introdução dos chumbadores”. Trata-se, portanto, de uma técnica de reforço do solo.

Inicialmente os grampos instalados não alteram o estado de equilíbrio do maciço. Conforme se escavam as bancadas do corte, iniciam-se os deslocamentos e a cada etapa de escavação surge uma nova deformação. As deformações maiores se dão na crista do talude, as quais decrescem até próximo de zero no pé do mesmo. As velocidades de deslocamento são decrescentes, tendendo a zero. Isto atesta o estado de equilíbrio alcançado após o alívio de tensões oriundo das deformações controladas (GUIMARÃES FILHO, 1994).

### 2.1.3 PROCESSO CONSTRUTIVO

Com relação à metodologia de execução, existem basicamente dois tipos distintos de grampos: os grampos cravados, executados por meio de cravação direta de elementos metálicos tais como barras, cantoneiras ou tubos de aço no terreno; e os grampos injetados, que são executados sub-horizontalmente no maciço por meio de um pré-furo, seguido da introdução do elemento metálico e preenchimento do furo com material cimentante. Estes últimos são os mais executados, uma vez que o processo construtivo e os equipamentos necessários na sua instalação são semelhantes aos utilizados na técnica de estabilização por meio de tirantes (SPRINGER *et al.*, 2001).

O processo construtivo é constituído por três etapas principais sucessivas que formam um ciclo básico de operações que se repete até que todo o corte seja executado. Tais etapas são a escavação do talude, a instalação dos grampos propriamente dita e por fim, a estabilização do paramento.

A escavação é realizada em estágios de cima para baixo do talude. A altura de cada uma das bancadas de corte depende do tipo de solo e da inclinação da face de escavação, que deve se manter estável durante a fase crítica que se inicia logo após o término da escavação e termina com a aplicação do revestimento de concreto projetado. Em geral, esta altura varia em torno de 1 a 2m (ORTIGÃO *et al.*, 1993).

Para tal, o solo a ser escavado deverá apresentar uma resistência aparente não drenada ao cisalhamento mínima de 10kPa. Pode-se obter este valor de resistência na maioria dos solos argilosos e arenosos, inclusive em areias puras úmidas, devido ao efeito da capilaridade. Entretanto, em areias secas e sem nenhuma cimentação este processo dificilmente terá sucesso (ORTIGÃO *et al.*, 1993).

Nestas condições em que o *stand up time*<sup>1</sup> do material é muito curto pode-se realizar um reforço prévio do solo a fim de que se possa utilizar a técnica de solo grampeado. PITTA *et al.* (2003) relatam em seu trabalho a execução de chumbadores verticais previamente ao início dos cortes, ao longo do eixo do muro, posicionados em distâncias

---

<sup>1</sup> Intervalo de tempo no qual o material se mantém estável sem necessidade de contenções.

conforme o espaçamento dos chumbadores de arrimo e com comprimentos da altura a escavar. Segundo os autores, “a prática desta atitude mostrou uma grande redução de trincas e das deformações nas edificações lindeiras, aumentando ainda a produtividade”.

Após a escavação da primeira bancada segue-se para a segunda etapa do ciclo de operações: a instalação da primeira linha de grampos. Esta etapa é diferenciada conforme o tipo de grampo, seja ele cravado ou injetado.

No caso dos grampos cravados, estes são introduzidos à percussão com a utilização de martelotes pneumáticos, ou de forma manual. A principal vantagem deste método está na rapidez de sua execução. Entretanto, a resistência ao cisalhamento do contato solo-grampo é reduzida, com valores típicos da ordem de 30 a 40kPa em solos arenosos. Outros aspectos são a maior susceptibilidade à corrosão, a impossibilidade de se cravar em solos com ocorrência de pedregulhos e a limitação do comprimento máximo, da ordem de 6,0m, que se pode cravar com eficiência (ORTIGÃO *et al.*, 1993). Devido a estes fatores, o emprego destes grampos no Brasil está voltado a contenções provisórias.

No caso dos grampos injetados, são realizadas perfurações prévias de diâmetros usualmente entre 50 e 100mm, por meio de equipamentos de fácil manuseio com pesos que podem variar de 25 a 500Kg, instaláveis sobre qualquer talude. A inclinação dos furos pode variar de 5° a 30°, sempre abaixo da horizontal, para facilitar o processo de injeção da nata de cimento. Pode-se utilizar água, ar ou lama como fluido de perfuração e limpeza do furo. No caso de se utilizar lama bentonítica, deve-se assegurar que esta seja removida por completo através da introdução da calda de cimento, para evitar um decréscimo da resistência ao atrito lateral devido à presença da lama.

A perfuração deve prosseguir de modo que a cavidade perfurada se mantenha estável até o término da injeção. Podem ser utilizados diversos tipos de equipamentos, tais como perfuratrizes tipo sonda, *crawlair*, *wagon drill* ou perfuratrizes manuais. A escolha depende do tipo de solo, da profundidade do furo, do seu diâmetro e da área de trabalho.

Concluída a perfuração, segue-se a instalação e fixação da armação metálica. Geralmente utilizam-se barras de aço comerciais destinadas à construção civil, apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Tipos de barras de aço (GEORIO, 2000).

Aço	Seção	Diâmetro (mm)
Dywidag Gewi ST 50/55	Plena	32
Dywidag ST 85/105	Plena	32
CA 50 A	Plena	Entre 12,5 e 32,0mm
CA 50 A	Reduzida com rosca	Entre 12,5 e 32,0mm
Rocsolo ST 75/85	Rosqueada	Entre 14,0 e 41,1mm
Incotep	Rosqueada	Entre 19,0 e 50,0mm
Resinex	Rosqueada	Entre 14,0 e 41,1mm

Cabe ressaltar que a corrosão das barras de aço é uma das principais causas de acidentes em cortinas ancoradas, devido à exposição do trecho livre, junto à cabeça da ancoragem. Conforme mencionado, os grampos cravados são mais susceptíveis à corrosão, e, portanto, devem receber um tratamento adequado para evitar que este problema ocorra. Nestes casos podem ser utilizadas resinas epóxicas ou proteção eletrolítica para preservar a integridade dos grampos. Por outro lado, a camada de cimento dos grampos injetados já representa uma proteção considerável à corrosão. Ainda assim, a utilização de uma dupla proteção é obrigatória em alguns países como a França e a Alemanha, nos quais costuma-se envolver o grampo com um revestimento plástico preenchido com nata de cimento.

As barras de diâmetro inferior a 20mm podem apresentar uma dobra de 90° e aproximadamente 20cm na sua extremidade, para fixação do grampo ao paramento. Já as barras de diâmetro superior a 20mm são fixadas com auxílio de uma placa de apoio e porca, que permitem a aplicação de uma pequena carga de incorporação (da ordem de 5kN). No caso de muros com paramento vertical, este recurso torna-se indispensável para garantir a aderência solo-concreto projetado e evitar possíveis deslocamentos. A Figura 2.3 apresenta detalhes das cabeças dos grampos com barras de diâmetro superior a 20mm (a), ou inferior (b).

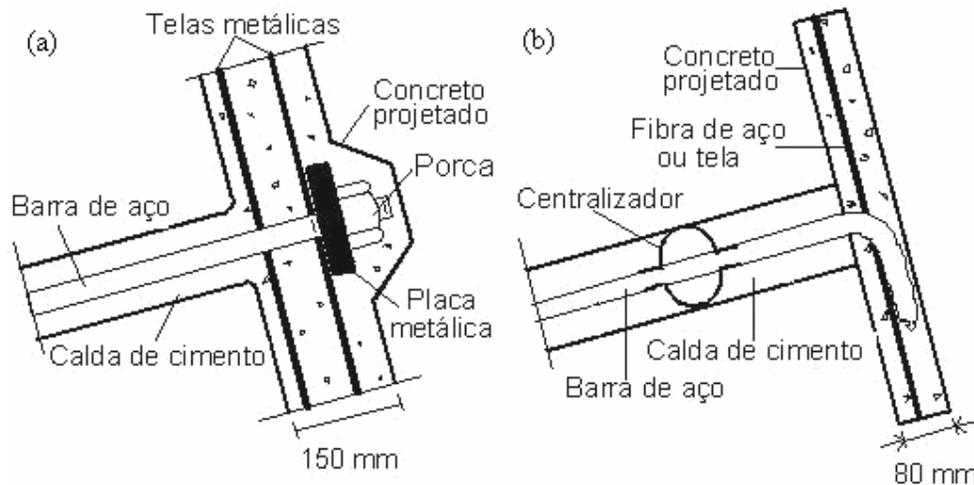


Figura 2.3 – Detalhes das cabeças dos grampos: (a) barra de aço com diâmetro maior ou igual a 20mm; (b) barra de aço com diâmetro inferior a 20mm (ORTIGÃO *et al.*, 1993).

Ao longo das barras são fixados centralizadores, usualmente a cada 2,0m. Estes são dispositivos simples que evitam o contato direto das barras com a parede do furo no solo e garantem uma cobertura uniforme da nata de cimento sobre as mesmas. Além disso, são acoplados um ou mais tubos de injeção e reinjeção, em polietileno ou similar, com diâmetros de 8 a 15mm e dotados de válvulas a cada 0,5m, até cerca de 1,5m da boca do furo. A quantidade de tubos depende do número de fases de injeção que estão previstas, sendo necessário um tubo para cada fase. A Figura 2.4 apresenta uma seção transversal típica com os elementos construtivos de um chumbador fixado ao paramento através de placa e porca.

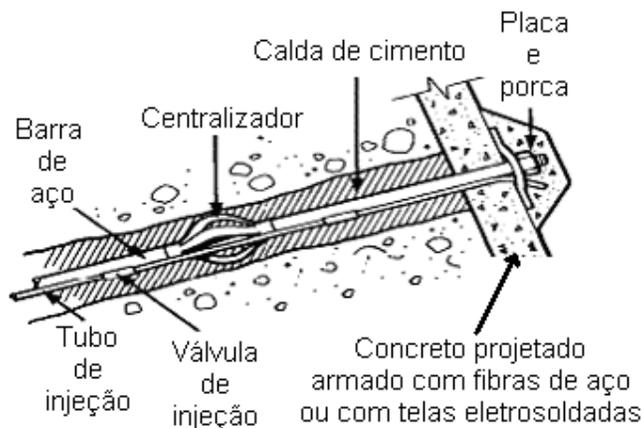


Figura 2.4 – Componentes de um grampo (Springer, 2006).

SOUZA *et al.* (2005) analisaram 12 grampos com características geométricas iguais (diâmetro, comprimento, inclinação), executados com diferentes estágios de injeção. Ficou constatado que nos grampos envolvidos apenas com a bainha de injeção, a exsudação da nata de cimento provoca um vazio em grande parte do furo. Segundo os autores, este fenômeno impede a reconstituição do desconfinamento gerado pela perfuração e o grampo tem sua função prejudicada. Recomenda-se, portanto, pelo menos a realização de uma fase de re-injeção, de preferência sob pressão, o que melhora sensivelmente o contato entre o grampo e o solo. Os ensaios de arrancamento realizados comprovam esta melhoria através do aumento da resistência ao atrito lateral.

A nata de cimento deve ser preparada em misturadores de alta turbulência, com fator água/cimento em peso variando entre 0,5 e 0,7. A bainha é injetada pela tubulação auxiliar, de forma ascendente (do fundo para a superfície), até que extravase na boca do furo. As bombas de injeção, de pistão, devem ter capacidade para trabalho com pressões de injeção até 4,0 MPa e vazões de 60l/min. A análise das pressões e do volume injetado é uma forma de se avaliar o desempenho do grampo. Fazendo isto, pode-se ajustar melhor o projeto às condições do campo, através da inclusão ou da retirada de um conjunto de mangueiras de injeção, conforme a necessidade (PITTA *et al.*, 2003). A Figura 2.5 ilustra as diferentes fases de injeção de um grampo.

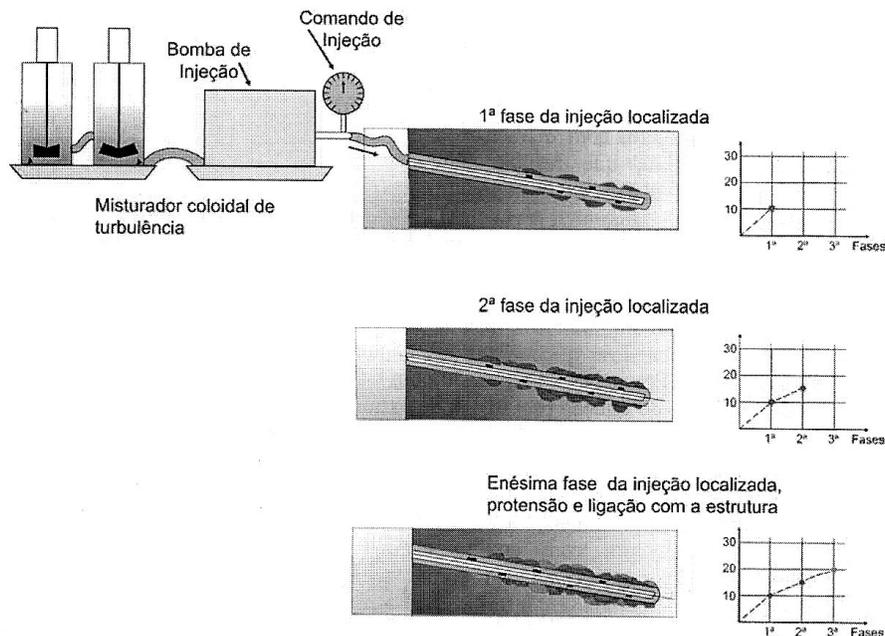


Figura 2.5 – Fases de injeção do grampo (PITTA *et al.*, 2003).

Uma alternativa de execução do grampo é o preenchimento do furo com nata de cimento, antes da introdução da barra metálica. Neste caso, a bainha é a fase inicial de injeção em que se pretende recompor a cavidade escavada. ZIRLIS *et al.* (1999) recomendam a re-injeção por meio de tubos perdidos após um período mínimo de 12 horas de cura da bainha.

Além do procedimento de re-injeção, pode-se também otimizar o desempenho dos grampos com a utilização de aditivos expansores na calda de cimento. Estes evitam a retração e possibilitam um melhor preenchimento do furo pela nata. Conseqüentemente aumenta-se a resistência ao atrito lateral no contato solo-grampo.

A última etapa do ciclo básico de operações é a construção do paramento, responsável pela estabilização da face do talude e proteção contra os processos erosivos causados pelas chuvas e outras intempéries. Em geral utiliza-se o concreto projetado, armado com uma malha de fios de aço, ou ainda com adição de fibras metálicas ou de polipropileno. Outras opções de revestimento são elementos pré-fabricados de concreto ou grama para revegetação do talude, o que proporciona um melhor efeito estético.

A escolha freqüente pelo concreto projetado deve-se basicamente às vantagens que este apresenta, tais como grande durabilidade, tenacidade e facilidade de aplicação. Nas obras permanentes pode-se aplicar um sarrafeamento à superfície e esta não necessita de nenhum acabamento complementar (PITTA *et al.*, 2003).

A função principal da armação do paramento é suportar as tensões devido às oscilações térmicas. Na prática utilizam-se telas metálicas eletro-soldadas com taxas entre 10 e 60Kg/m<sup>3</sup>, fibras metálicas com taxas entre 30 e 40Kg/m<sup>3</sup> e fibras sintéticas de polipropileno com taxas entre 5 e 8Kg/m<sup>3</sup>. PITTA *et al.* (2003) relatam a tendência moderna de se armar o concreto somente com fibras e sugerem ainda a execução de juntas no sentido vertical, espaçadas de 10 a 20m, para evitar o aparecimento de trincas. Na Tabela 2.2 são apresentadas algumas características obtidas em ensaios de laboratório em placas de fibras metálicas e de polipropileno. Os autores ressaltam que a fibra de polipropileno pode ser uma opção excelente para a armação do concreto projetado. Sua aplicabilidade é excelente e definitivamente encerra em todas as instâncias o problema de corrosão.

A presença das fibras produz um concreto de alta tenacidade e baixa permeabilidade, uma vez que as tensões de tração são combatidas homoganeamente em toda a peça, desde o início do processo de cura. Além disso, promove redução de mão-de-obra, pois não há necessidade de pessoal para preparo e instalação das telas metálicas. Assim, apesar do seu custo por quilo ser superior ao das telas, possibilitam uma economia final de 20% a 40% por metro quadrado de concreto projetado aplicado (SOLOTRAT, 2006).

Tabela 2.2 – Características técnicas de fibras metálicas e fibras de polipropileno (PITTA *et al.*, 2003).

Característica	Unidade	Tipo de Fibra	
		Aço	Polipropileno
		Dramix 65/35	Sheikan 40
<i>Consumo</i>	Kg/m <sup>3</sup>	35,0	6,0
<i>Tração na flexão</i>	MPa	4,0	4,9
<i>Tenacidade</i>	Joule	15,0	12,7
<i>Fator de tenacidade</i>	MPa	2,2	1,8

Quanto ao preparo, existem duas maneiras de se obter o concreto projetado: por “via seca” ou por “via úmida”. Na primeira, a adição de água é feita apenas alguns instantes antes da aplicação, junto ao bico de projeção do mangote. Na segunda, o concreto é preparado com água e em seguida conduzido até o local a ser projetado.

Os equipamentos e o traço adotados variam conforme o método de preparo e projeção. Nas obras de solo grampeado é mais comum a utilização do concreto projetado “via seca”, uma vez que esta prática pode ser interrompida e reiniciada sem perda de material e necessidade de se limpar o equipamento, o que é necessário para o concreto projetado “via úmida”. Entretanto, vale lembrar que a perda por reflexão do concreto é sensivelmente maior (cerca de 40%) no caso de se usar a “via seca” (SPRINGER, 2006). Neste caso, o uso de fibras no lugar da malha metálica pode representar uma boa solução sob o ponto de vista técnico e econômico.

A Figura 2.6 apresenta a montagem convencional dos equipamentos necessários para a projeção do concreto “via seca”. São necessárias bombas de projeção, compressor de ar, bomba de água, mangote, bico de projeção, anel de água e bico pré-umidificador (opcional).

A bomba de compressão recebe o concreto seco, devidamente misturado e o disponibiliza para aplicação. Assim ele é conduzido pelo mangote até o local desejado, graças ao compressor de ar que fornece ar comprimido em vazão e pressão adequadas para impulsioná-lo. Na prática brasileira adota-se normalmente a pressão característica de 0,7MPa para qualquer diâmetro de mangueira ou vazão de trabalho (SOLOTRAT, 2006).

A bomba de água pode ser substituída pela rede de abastecimento pública, desde que forneça pressão ao bico de projeção pelo menos 0,1MPa superior à dos materiais em fluxo. O anel de água é o componente de ligação pelo qual se adiciona água ao concreto. Se for desejável, pode-se utilizar um bico pré-umidificador, instalado a cerca de 3m do bico de projeção, com objetivo de fornecer água ao concreto antes do ponto de aplicação.

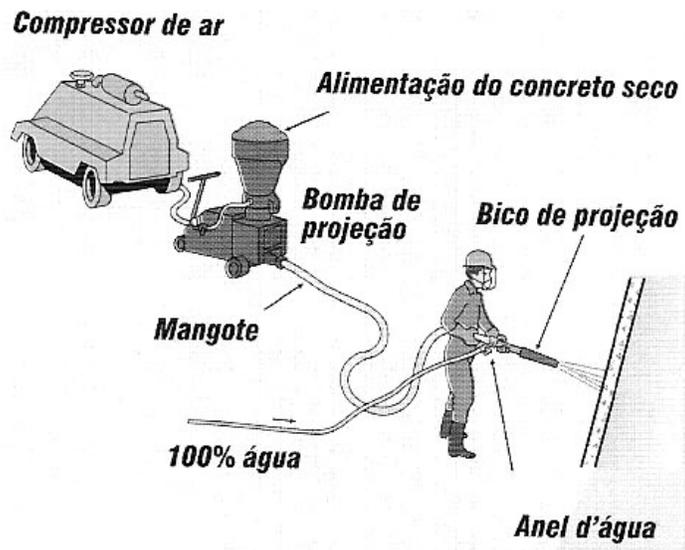


Figura 2.6 – Montagem da aplicação do concreto projetado via seca (SOLOTRAT, 2006).

A resistência normalmente exigida para o concreto projetado é de 15MPa, mas na prática podem ser atingidos valores muito superiores, até cerca de 40MPa. A confecção da mistura seca pode ser feita na própria obra, ou fornecida usinada, em caminhões betoneiras. A espessura da camada pode variar de 5 a 15cm.

PITTA *et al.* (2003) recomendam duas medidas construtivas para evitar o aparecimento de trincas horizontais. A primeira é a aplicação de trechos verticais de concreto projetado logo após o término de uma etapa e escavação de uma nova faixa horizontal, conforme ilustra a Figura 2.7. Estes, não necessariamente adjacentes e contínuos, servem como sustentação provisória do revestimento de concreto projetado antes da execução do chumbador.

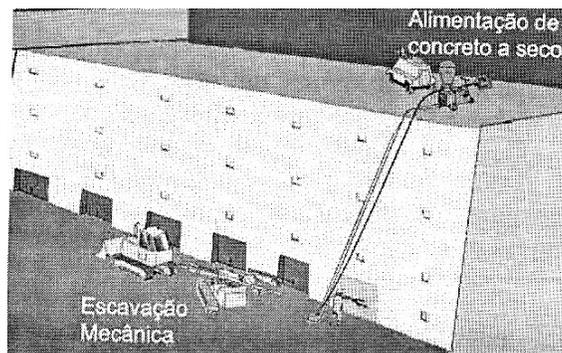


Figura 2.7 – Fases de aplicação do concreto projetado (PITTA *et al.*, 2003).

A segunda recomendação é aplicação do concreto projetado em espessura variada, numa primeira fase (fase 1). A emenda superior do trecho já executado terá a espessura final, valor este que se reduz até cerca de 50% do total, junto à berma. Em seguida complementa-se esta espessura (fase 2) e assim sucessivamente até que todo o muro esteja revestido. A Figura 2.8 ilustra este processo.

A drenagem, como em toda obra de contenção, é de suma importância para o sucesso da estabilização. A presença da água é prejudicial em vários aspectos, desde a geração de poropressões que diminuem as tensões efetivas e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento do solo, até a corrosão das barras de aço, se estas não estiverem adequadamente protegidas. Para evitar estes efeitos nocivos, é indispensável a execução de um sistema de drenagem, tanto profunda como superficial.

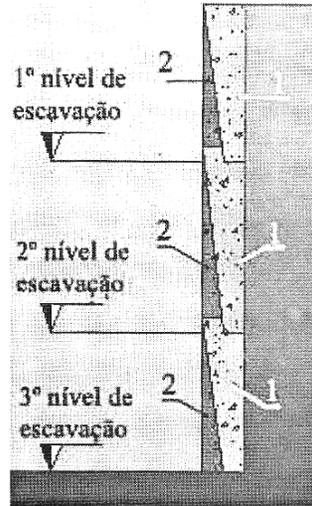


Figura 2.8 – Esquema de execução do concreto projetado com fases construtivas 1 e 2 (PITTA *et al.*, 2003).

Para a drenagem profunda, são utilizados com freqüência drenos sub-horizontais profundos (DHP), que captam as águas distantes da face do talude e as conduzem para o exterior do mesmo, depositando-as nas canaletas. O processo construtivo consiste na perfuração do solo em diâmetros de 60 a 100mm e instalação de tubos plásticos drenantes de 40 a 50mm de diâmetro. Estes tubos são perfurados e revestidos por uma manta geotêxtil ou tela de nylon, conforme ilustra a Figura 2.9. O comprimento dos drenos deve ser maior que o dos grampos e o espaçamento dependerá das condições locais, tais como nível do lençol freático, freqüência de chuvas, permeabilidade do solo, etc.

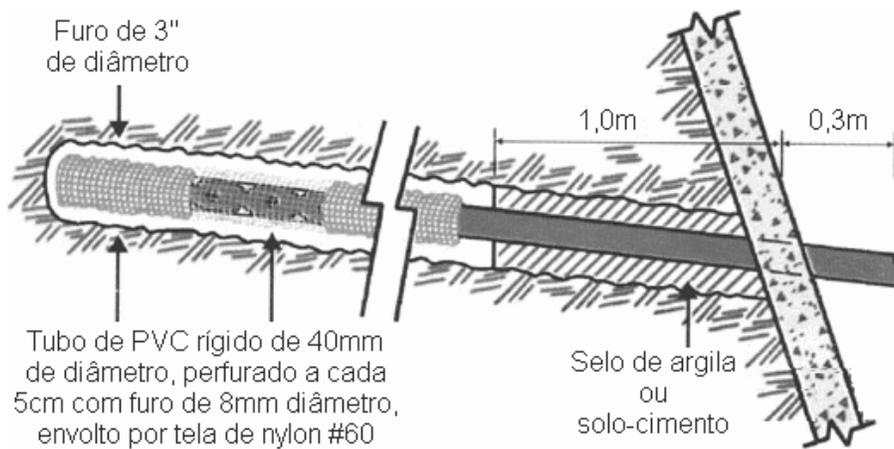


Figura 2.9: Detalhe do dreno horizontal profundo (ABRAMENTO *et al.*, 1998).

A drenagem da superfície é realizada por meio de barbacãs e drenos lineares contínuos, que se destinam a recolher a água que chega até o paramento de concreto projetado. O dreno tipo barbacã é responsável pela drenagem pontual. Trata-se de uma cavidade de aproximadamente 40 x 40 x 40cm, preenchida com material arenoso envolvido por tela de *nylon*. Esta cavidade é conectada a um tubo de PVC com inclinação descendente para o exterior, que conduz a água para fora do maciço. Os drenos lineares contínuos se estendem verticalmente da crista ao pé do talude, despejando as águas na canaleta de pé do paramento. São constituídos por uma calha plástica drenante revestida por manta geotêxtil ou por dreno fibroquímico, instalados numa escavação de cerca de 10 x 30cm. A Figura 2.10 apresenta um esquema típico de drenagem superficial, na qual estão indicados o dreno barbacã e o dreno linear contínuo.

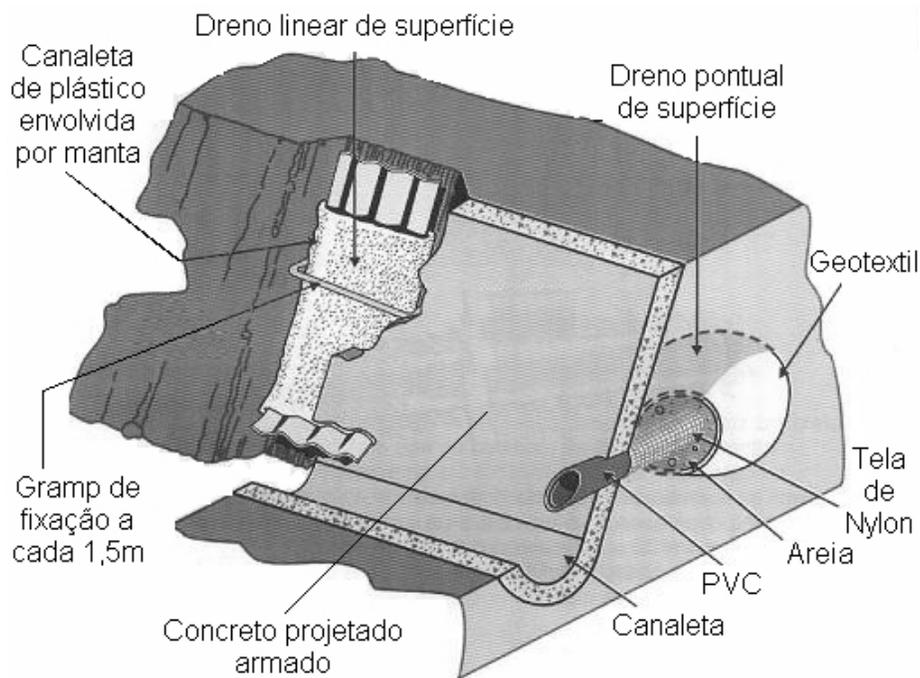


Figura 2.10 – Detalhe dos drenos tipo barbacã e dreno linear contínuo (ABRAMENTO *et al.*, 1998).

Para completar o sistema de drenagem, são construídas canaletas de crista e pé, bem como descidas d'água, moldadas *in loco* e revestidas por concreto projetado.

#### 2.1.4 APLICAÇÕES, VANTAGENS E LIMITAÇÕES

O solo grampeado é uma técnica bastante versátil que pode ser adotada nas mais diversas situações em que se deseja estabilizar um maciço de solo ou rocha. Seja para obras permanentes ou provisórias, rurais ou urbanas, novas ou de recuperação de outras antigas, trata-se de uma opção bastante competitiva sob o ponto de vista técnico-econômico.

No que se refere às novas construções, destaca-se sua aplicação em cortinas de contenção para escavações destinadas às fundações de edifícios, estacionamentos subterrâneos ou vias de transporte (metrô); em estabilização de taludes nos cortes necessários para a implantação de vias rodoviárias ou ferroviárias; e ainda em estabilizações de portais de túneis (DRINGENBERG e CRAIZER, 1992).

Em obras de recuperação pode ser utilizado para reparo de cortinas de terra armada, substituindo tiras ou conexões danificadas por sobrecarga ou por corrosão; em reparos de muros de arrimo de peso para prevenir ou remediar a ruptura causada por deterioração do muro ou de movimentos a montante; em estabilização de taludes de solo instáveis, após ruptura ocorrida devido ao colapso, inadequação de contenções pré-existentes ou movimentos catastróficos por razões hidro-geológicas; e em reparos de cortinas ancoradas, após o colapso de tirantes por carregamento excessivo ou corrosão (DRINGENBERG e CRAIZER, 1992).

As principais vantagens do uso da técnica de solo grampeado podem ser divididas em três categorias distintas: economia, facilidades construtivas e desempenho.

- Economia

Por ser uma intervenção mais flexível, que permite o alívio e a acomodação do solo, a técnica de solo grampeado demanda um menor consumo de recursos (materiais, equipamentos e mão-de-obra) para promover a estabilização, se comparada às cortinas ancoradas. A economia média observada é em torno de 20%, mas pode chegar até 50% em alguns casos.

- Facilidades Construtivas

Neste âmbito destacam-se a rapidez e a versatilidade da técnica, que pode facilmente ser adaptada a diversas características de projeto. Conforme a obra avança podem ser feitas alterações com relação ao comprimento, espaçamento ou número de grampos necessários de acordo com a necessidade observada.

Os equipamentos utilizados são leves, deslocáveis e pouco ruidosos, características apreciadas nas obras urbanas, nas quais ruídos, vibrações e condições de acesso são extremamente importantes (DRINGENBERG e CRAIZER, 1992).

A velocidade de execução, tanto dos grampos como do paramento, é garantida com o uso de equipamentos adequados. O comprimento reduzido dos grampos permite que o furo seja realizado com poucas manobras da lança de uma perfuratriz rotopercussora. Além disso, não há necessidade de interrupção dos trabalhos para se aguardar cura, protensão e ensaios de ancoragem, como nos casos de cortinas ancoradas.

Ao contrário das cortinas tradicionais, o muro de solo grampeado adapta-se a variadas geometrias de talude e pode ser inclinado no sentido do terreno sem que haja prejuízos para a concretagem. Esta conformação representa uma menor movimentação de terra, além de reduzir a perda por reflexão do concreto projetado.

- Desempenho

De acordo com medições de campo em obras de solo grampeado realizadas na Europa, os deslocamentos necessários para a mobilização do reforço são surpreendentemente menores que o esperado. Em taludes verticais, os valores máximos observados são da ordem de 0,3% da altura, na direção horizontal (CLOUTERRE, 1991, JURAN e ELIAS, 1991).

Os danos às construções vizinhas podem ser minimizados, uma vez que a imediata instalação dos grampos e injeção após a perfuração não permite que o desconfinamento do solo gere perturbações significantes. Nas escavações próximas a estruturas sensíveis, pode-se ainda adotar soluções mistas em que o solo grampeado é combinado com outras

técnicas, como ancoragens convencionais. Isto permite um aumento de rigidez em locais específicos e, conseqüentemente, a redução de movimentos do terreno.

Apesar das vantagens apresentadas, a técnica de solo grampeado possui algumas limitações de utilização que a tornam inadequada em certas condições. É necessário que a escavação se mantenha estável por algumas horas até que sejam instalados os grampos e executadas as injeções. Para isso o solo deverá apresentar alguma cimentação ou coesão (mesmo devida à sucção). Não é aconselhável para solos com alto teor de argila ou susceptíveis a grandes variações de volume (argilas expansivas e argilas orgânicas), pois as deformações inerentes a esta técnica poderiam ser, nestes casos, inaceitáveis.

Nos solos permeáveis em que se detecta nível d'água próximo à superfície, não é possível o uso da técnica sem que se faça um rebaixamento permanente. Do contrário, o maciço ficará sujeito a freqüentes instabilizações localizadas, o que tornará difícil a execução do paramento em concreto projetado, além do maior risco de corrosão das partes metálicas do grampo.

PITTA *et al.* (2003) listam em alguns pontos importantes na avaliação do desempenho de uma obra de solo grampeado, dentre os quais destacam-se os seguintes: (i) a observação das deformações deve ser obrigatória; (ii) o método executivo é muito importante e deve ser detalhadamente padronizado e fielmente executado; (iii) a injeção do chumbador é fundamental para a eficiência do solo grampeado, muito mais qualitativamente que quantitativamente, devendo sempre ser realizada e avaliada; (iv) a observação da geologia e hidrogeologia previamente ao detalhamento do projeto, e o diário de acompanhamento dos trabalhos definem os passos de um projeto, que somente se encerra após o término da execução da contenção.

### **2.1.5 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS GRAMPOS**

As estruturas em solo grampeado apresentam pequenos deslocamentos que, no entanto, são suficientes para a mobilização de esforços nos grampos. O atrito entre a superfície lateral dos grampos e o solo circundante é o principal elemento de interação responsável pela transferência destes esforços.

MITCHELL e VILLET (1987) apresentam a configuração dos esforços mobilizados em estruturas de contenção flexíveis (Figura 2.11a) e rígidas (Figura 2.11b). Observa-se que para reforços flexíveis, a estabilização é promovida somente pela resistência à tração. Por outro lado, os reforços rígidos podem ser solicitados à tração, à flexão e ao cisalhamento.

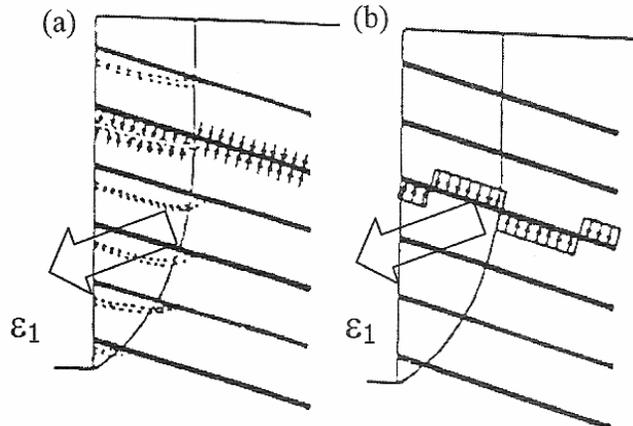


Figura 2.11 – Comportamento de reforços: (a) flexíveis; (b) rígidos (MITCHELL e VILLET, 1987).

Os grampos podem ser considerados elementos rígidos e, portanto, oferecem resistência aos esforços normais, cortantes e cisalhantes. Porém, sua eficiência máxima se dá quando são instalados com inclinação próxima à direção da deformação principal maior ( $\epsilon_1$ ) da massa de solo. Normalmente adotam-se inclinações pequenas, em torno de  $15^\circ$  na média, apenas para facilitar os procedimentos de injeção. Como a tendência de movimentação da massa de solo é preponderantemente horizontal, esta não difere significativamente da direção dos grampos. Nestas condições, a tração mobilizada é o principal mecanismo estabilizador (EHRlich, 2003).

Na prática, o processo de estabilização se desenvolve da seguinte forma: enquanto não ocorrem deformações ( $\epsilon = 0$ ), o solo se encontra em condição de repouso ( $\sigma_h' = K_0 \cdot \sigma_v'$ ). À medida que as deformações se processam, as tensões no solo diminuem, tendendo para o estado ativo, enquanto as tensões nos grampos crescem. Este fenômeno cessa quando é alcançado o equilíbrio, isto é, as tensões no solo igualam-se às tensões no grampo. Por isso, grampos mais rígidos levam a menores movimentações do solo e mobilizam tensões próximas às correspondentes ao estado de repouso. Em

contraposição, grampos mais flexíveis permitem deformações maiores e tem-se o solo num estado próximo ao ativo, com tensões mais baixas (EHRlich, 2003).

A distribuição das tensões de tração ao longo do comprimento do grampo é diferente da observada em ancoragens. Segundo PLUMELLE (1990), a tensão de tração cresce, de forma aproximadamente linear, de zero (na extremidade livre do grampo) até um valor máximo ( $T_{máx}$ ) em determinado ponto de sua extensão que coincide com a superfície potencial de ruptura. Depois decresce até o paramento, onde tipicamente corresponde a 25% do valor máximo.

Além de definir o ponto de tração máxima, a superfície de ruptura separa as zonas ativa e resistente, nas quais o atrito mobilizado possui sentidos opostos. O ponto de tração máxima conseqüentemente apresenta tensões cisalhantes nulas na interface solo-grampo (Figura 2.12).

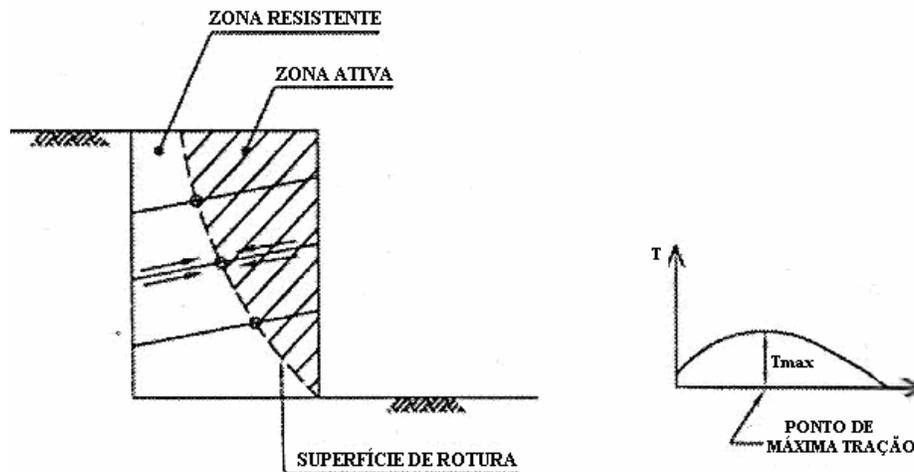


Figura 2.12 – Força máxima mobilizada no grampo (EHRlich, 2003).

De acordo com SPRINGER *et al.* (2001), um dos fatores mais importantes para o comportamento do talude grampeado refere-se às alternativas de execução com grampo fixo ou livre em relação à face escavada. A partir dos resultados da modelagem numérica de um talude estabilizado com grampos, os autores concluíram que o ponto de tração máxima ocorre junto à face nos grampos fixos, enquanto nos grampos livres verifica-se este ponto mais interno. Além disso, nota-se que o mecanismo de ruptura

com o desenvolvimento de regiões ativa e passiva somente ocorre quando os grampos são livres.

## 2.2 ENSAIO DE ARRANCAMENTO EM GRAMPOS

### 2.2.1 RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO

A tração mobilizada nos grampos é essencial para a estabilização dos taludes em solo grampeado. O valor deste esforço varia em função do atrito mobilizado durante a movimentação do grampo. Assim, o valor da resistência ao arrancamento ( $q_s$ ), isto é, o atrito unitário desenvolvido na interface solo-grampo, é o principal parâmetro para o dimensionamento destas estruturas. A Figura 2.13 indica a relação entre a resistência ao arrancamento e a tração máxima mobilizada no grampo.

Desta forma, quanto maior o atrito entre os dois materiais, melhor será o desempenho do reforço. Dentre os fatores que podem influenciar  $q_s$  estão as características do terreno, a profundidade em que se encontra o grampo (tensão confinante), o método de perfuração e de limpeza do furo, as características da calda de cimento, fatores ambientais como temperatura e umidade e o emprego de aditivos (ORTIGÃO, 1997).

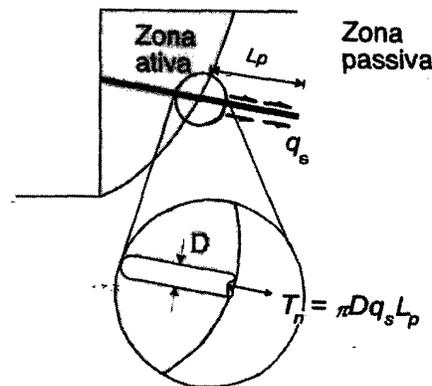


Figura 2.13 – Relação entre a tração mobilizada no grampo e a resistência ao arrancamento (ORTIGÃO, 1997).

Embora possam ser feitas considerações teóricas para se obter  $q_s$ , o método mais adequado consiste na realização de ensaios de arrancamento no campo. Por meio destes,

obtém-se diretamente o valor da força de tração necessária para promover a movimentação do grampo no interior da massa de solo, com a utilização de células de carga devidamente calibradas. A partir destes resultados e das características geométricas do grampo ensaiado, obtém-se facilmente o valor de  $q_s$ .

Na fase de pré-dimensionamento de obras de pequeno porte podem ser utilizadas correlações empíricas para a obtenção de  $q_s$ . Porém, ao longo da construção, recomenda-se a realização de ensaios de arrancamento e o ajuste do projeto de acordo com os resultados obtidos. Dentre estas correlações, podem ser citadas as de BUSTAMANTE e DOIX (1985), ORTIGÃO (1997) e SPRINGER (2006), que estimam o valor de  $q_s$  a partir da pressão limite do pressiómetro Ménard e/ou do índice de resistência à penetração  $N_{spt}$ , respectivamente.

### 2.2.2 ENSAIO PADRÃO

No Brasil, não existe ainda uma norma técnica que regulamente a execução de ensaios de arrancamento em grampos. Os procedimentos descritos a seguir advêm da experiência de diversos autores que executaram estes ensaios e publicaram informações e recomendações referentes ao esquema de montagem, aplicação de carga e comportamento geral dos grampos ensaiados.

Em geral, os ensaios são realizados conforme apresentado na Figura 2.14, com um trecho livre de 1,0m seguido de trecho injetado ou ancorado com 3,0m de comprimento. Por meio de um macaco hidráulico, aplicam-se forças de tração na barra de aço ancorada ao terreno. A medição da carga aplicada é feita por célula de carga com acurácia entre 0,5 e 1,0%, verificada na maior parte dos transdutores elétricos. Com auxílio de um deflectômetro, são registrados os deslocamentos da cabeça do grampo correspondentes a cada carga que é aplicada. Tem-se assim uma curva Carga vs Deslocamento, da qual se extrai o valor máximo da força de tração no grampo. A resistência ao arrancamento  $q_s$  é obtida através da expressão:

$$q_s = \frac{T_{\max}}{\pi \cdot D \cdot L_{\text{ancorado}}} \quad (2.1)$$

Onde:  $q_s$  = Resistência ao arrancamento mobilizada;

$T_{max}$  = Força axial de tração máxima no grampo;

$D$  = Diâmetro da perfuração;

$L_{ancorado}$  = Comprimento ancorado ou injetado do grampo.

O trecho livre evita efeitos de contorno na cabeça do grampo, causados pela placa de reação que é posicionada diretamente sobre o solo. Ao se aplicar o carregamento de tração no grampo, a face e o solo são submetidos à compressão. Caso haja preenchimento com nata, o trecho inicial do grampo estará sujeito à compressão, o que é indesejado. Portanto, deve-se utilizar um obturador de calda de cimento, para não permitir o preenchimento do furo neste trecho (SPRINGER, 2006). FEIJÓ e EHRLICH (2001), PROTO SILVA (2005) e SPRINGER (2006) garantiram o controle dos comprimentos injetado e livre dos grampos de arrancamento por meio de um obturador constituído de espuma enrolada na barra de aço.

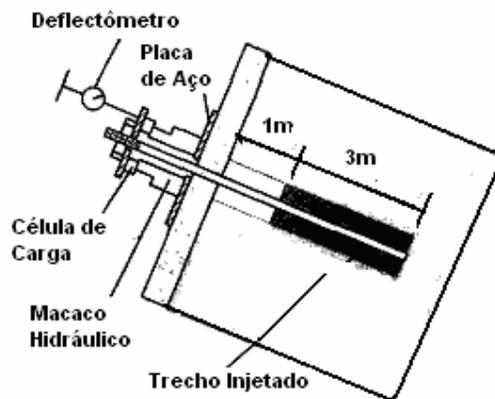


Figura 2.14 – Esquema ensaio de arrancamento padrão (ORTIGÃO, 1997).

CLOUTERRE (1991) recomenda que os grampos ensaiados sigam exatamente os mesmos procedimentos de execução dos grampos permanentes da obra (inclinação, limpeza do furo, instalação da barra e injeção), a fim de que se mantenha o mesmo padrão de comportamento.

A quantidade de grampos ensaiados deve ser tal que garanta uma boa representatividade dos resultados. Além disso, deverá ser adequado ao tamanho da obra.

PITTA *et al.* (2003) recomendam a proporção de 1 ensaio para cada 10 grampos permanentes da massa de solo a ser estabilizada. GEORIO (2000) estabelece que sejam realizados ensaios em pelo menos 2 grampos, ou em 1%, para que sejam confirmados os valores das resistências ao arrancamento especificados em projeto.

CLOUTERRE (1991) classifica os ensaios de arrancamento em 3 tipos, conforme o objetivo e fase de construção em que são executados: (i) Ensaio preliminar – realizado durante a fase de projeto e com o objetivo de validar um novo procedimento executivo de solo grampeado num local importante da obra; (ii) Ensaio de conformidade – realizado no início da construção visando verificar a estimativa da resistência ao arrancamento utilizada no projeto; (iii) Ensaio de inspeção – realizado durante a construção em grampos previamente escolhidos sem que ocorra a ruptura dos mesmos.

Todos os ensaios são idênticos no que se refere aos procedimentos de montagem e execução. O princípio básico consiste na aplicação de uma força estática à cabeça do grampo até provocar um movimento de cisalhamento entre o solo e o grampo. Nenhum dos grampos ensaiados deve ser incorporado à estrutura permanente de contenção (CLOUTERRE, 1991).

### **2.2.3 ESQUEMA DE MONTAGEM**

A Figura 2.15 apresenta o esquema típico de montagem de um ensaio de arrancamento de grampos convencionais. Observam-se os seguintes componentes, imprescindíveis para o bom desempenho do ensaio:

- (1) Placas de reação: são responsáveis pela distribuição da carga do macaco;
- (2) Grade de reação: direciona o macaco na mesma inclinação do grampo para que a carga aplicada seja axial;
- (3) Macaco hidráulico: fornece a força necessária para deslocar o grampo;
- (4) Célula de Carga: mede a força que é transmitida ao grampo;

(5) Placa de referência: superfície de apoio para o extensômetro e referência para as leituras de deslocamentos;

(6) Porca: mantém o conjunto unido durante a realização do ensaio. O aperto da porca já fornece uma carga inicial ao grampo, que deve ser devidamente monitorada;

(7) Suporte externo rígido e fixo: estrutura de fixação do extensômetro para a medida dos deslocamentos do grampo sob carga.

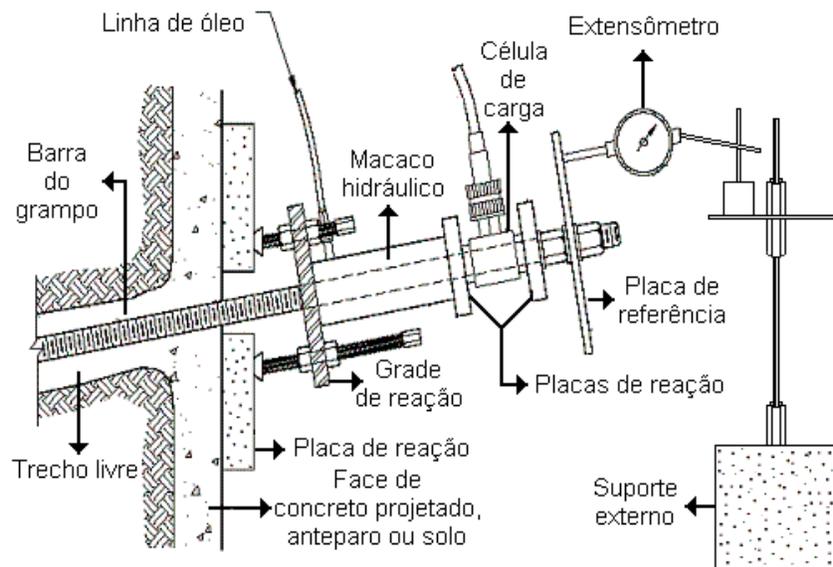


Figura 2.15 – Esquema de montagem típico de ensaios de arrancamento (SPRINGER, 2006).

#### 2.2.4 ENSAIO DE DEFORMAÇÃO CONTROLADA

Neste tipo de ensaio o grampo será submetido a um carregamento com velocidade de deformação constante. CLOUTERRE (1991) recomenda a utilização de um macaco manual para a aplicação de forças que devem produzir um deslocamento de aproximadamente 1,0mm/min, com margem de erro até 10% para mais ou para menos.

O ensaio é concluído uma vez que a força de tração atinja um valor máximo ou se estabilize. Recomenda-se plotar a curva Carga vs Deslocamento. As leituras de carga são feitas a cada 0,1mm (ou a cada 6 segundos) nos primeiros 5mm. Depois disso, são

feitas leituras a cada 0,5mm (ou a cada 30 segundos) até que seja atingida a força residual. Caso não se observe um pico ou um valor residual, o ensaio deverá prosseguir até que a força de tração na cabeça do grampo varie menos que 1% para um deslocamento de 1mm (CLOUTERRE, 1991).

Durante o descarregamento, as leituras deverão ser feitas até cerca de 1/10 do valor máximo da força.

### **2.2.5 ENSAIO DE FORÇA CONTROLADA**

Neste ensaio, conforme CLOUTERRE (1991), o grampo é gradualmente submetido à força de arrancamento, que cresce até o limite estimado ( $T_{LE}$ ) e que deve ser inferior a 60% da carga de escoamento do aço. Carregamentos sucessivos são mantidos por 60 minutos, com exceção do passo correspondente a 70% de  $T_{LE}$ , que deve ser mantido durante 3 horas. A primeira carga aplicada corresponde a 20% de  $T_{LE}$ . O primeiro deslocamento deve ser registrado a 10% de  $T_{LE}$ .

A força aplicada na cabeça do grampo é medida com uma célula de carga. O nível desta força deve ser mantido constante a cada passo do carregamento. Entretanto, uma variação do valor da força em até 0,1% de  $T_{LE}$  é aceita.

O tempo inicial de cada etapa de carregamento ( $t_0$ ) corresponde ao momento em que a carga é atingida. Em seguida, são medidos força e deslocamento nos tempos de: 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60 minutos e, depois, a cada 15 minutos, para a etapa de carregamento correspondente a 70% de  $T_{LE}$ , que deve ser mantida por 3 horas.

Se a ruptura não ocorrer para a carga limite estimada ( $T_{LE}$ ), é possível continuar o ensaio de arrancamento com incrementos iguais a 10% de  $T_{LE}$  até o décimo quinto passo, não excedendo 90% da tensão de escoamento do aço.

Após o último estágio de carga, inicia-se o descarregamento. A leitura dos deslocamentos deve ser feita a cada 1/10 da carga máxima de arrancamento obtida pelo ensaio.

## 2.2.6 INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de arrancamento devem ser obtidos e analisados em função dos dados medidos. Se somente as forças de tração forem registradas no decorrer dos ensaios, estes fornecerão apenas o valor máximo da força de arrancamento  $T_{máx}$  e, conseqüentemente, o valor da resistência ao arrancamento  $q_s$  (Equação 2.1).

Se durante os ensaios forem medidos tanto as forças de tração, como os respectivos deslocamentos da cabeça do grampo, obtém-se uma curva Carga vs Deslocamento que descreve a interação solo-grampo. Isto é bastante útil para a previsão dos deslocamentos de uma obra em solo grampeado e para cálculos futuros do estado limite de utilização (CLOUTERRE, 1991).

Uma curva Carga vs Deslocamento típica, obtida em ensaio de arrancamento, é apresentada na Figura 2.16 por COUTO (2002). O autor identifica três fases de comportamentos distintos: (i) fase de ajuste do sistema, na qual a rigidez é crescente; (ii) fase elástica, na qual a rigidez se mantém constante, ou seja, verifica-se uma proporcionalidade entre forças e deslocamentos; e (iii) fase plástica, na qual a rigidez decresce e verificam-se grandes deslocamentos para pequenos acréscimos de carga aplicada.

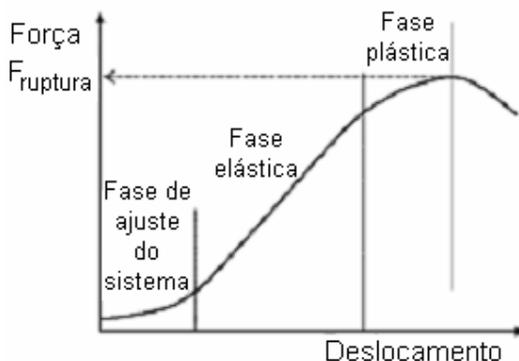


Figura 2.16 – Curva típica de ensaio de arrancamento (COUTO, 2002).

A força máxima de arrancamento  $T_{máx}$  corresponderá na curva alternativamente ao valor de pico, ao valor residual, ao valor cuja variação de força para 1mm de deslocamento é menor do que 1%, ou, por fim, ao valor correspondente a um

deslocamento máximo de 30mm. Alguns destes critérios estão apresentados na Figura 2.17.

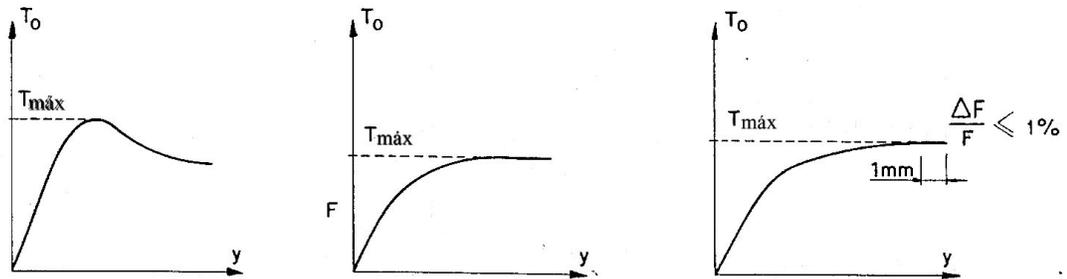


Figura 2.17 – Critérios de ruptura usados nos ensaios de arrancamento (adaptado de CLOUTERRE, 1991).

A mobilização do atrito lateral unitário pontualmente pode ser representada pela Lei bilinear de Frank e Zhao (1982), conforme mostrado em uma comparação entre curvas de arrancamento teórica e experimental de ensaios executados em areia pelo CEBTP (*Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics*) no Projeto *Clouterre* (Figura 2.18). Esta lei é representada no plano  $(\tau, y)$  pelo valor limite da resistência ao arrancamento  $q_s$  e por duas retas de inclinações nas razões  $\kappa_\beta$  e  $\kappa_\beta/5$ , que se interceptam no ponto de ordenada  $q_s/2$ .

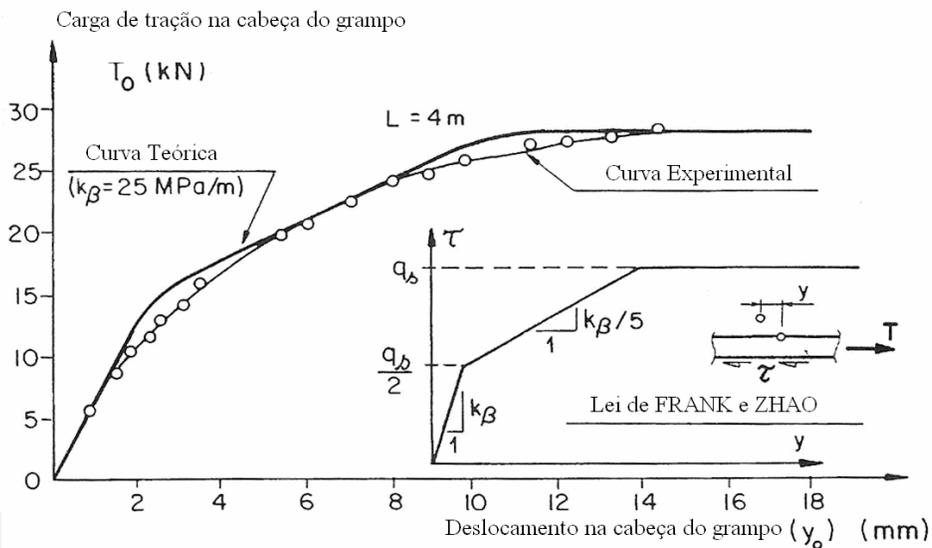


Figura 2.18 – Modelagem de uma curva experimental de ensaio de arrancamento através da Lei de Frank e Zhao (adaptado de CLOUTERRE, 1991).

## 2.2.7 MOBILIZAÇÃO DO ATRITO AO LONGO DO GRAMPO

A mobilização do atrito lateral ao longo do grampo ocorre gradualmente, a partir da cabeça, em direção à parte mais interna do mesmo. Assim, quando uma força  $T$  é aplicada na cabeça do grampo, este tende a se deslocar com relação ao solo para equilibrá-la. Isto gera um campo de forças e deformações maiores na extremidade externa do grampo (cabeça) e menores nas imediações da extremidade interna (ponta), independente do comprimento do mesmo (Figuras 2.19, 2.20 e 2.21).

Com o aumento progressivo de  $T$  as tensões de cisalhamento aproximam-se do limite de ruptura do contato solo-grampo, até ser então mobilizada a resistência ao arrancamento  $q_s$ . Quanto maior o grampo, menor será a distribuição destas tensões ao longo de seu comprimento (Figuras 2.22 e 2.23).

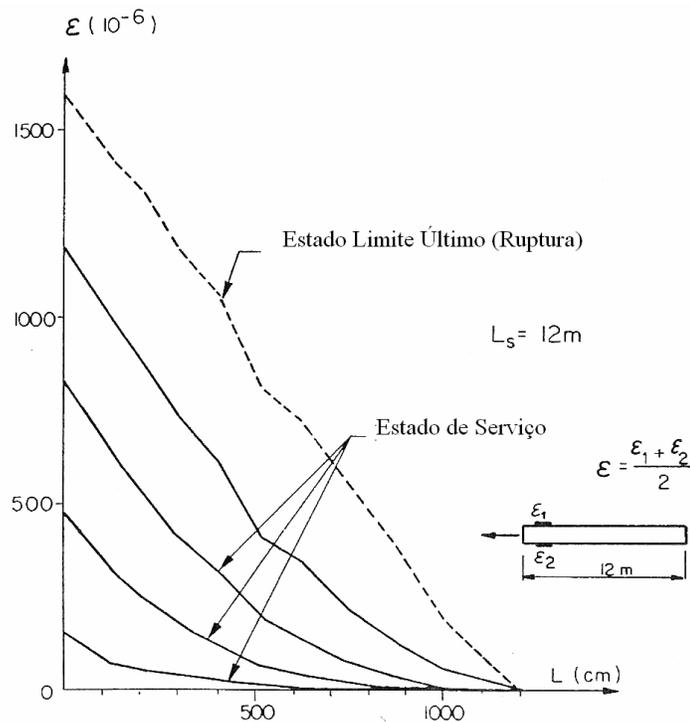


Figura 2.19 – Distribuição das deformações ao longo do grampo durante o ensaio de arrancamento (adaptado de CLOUTERRE, 1991).

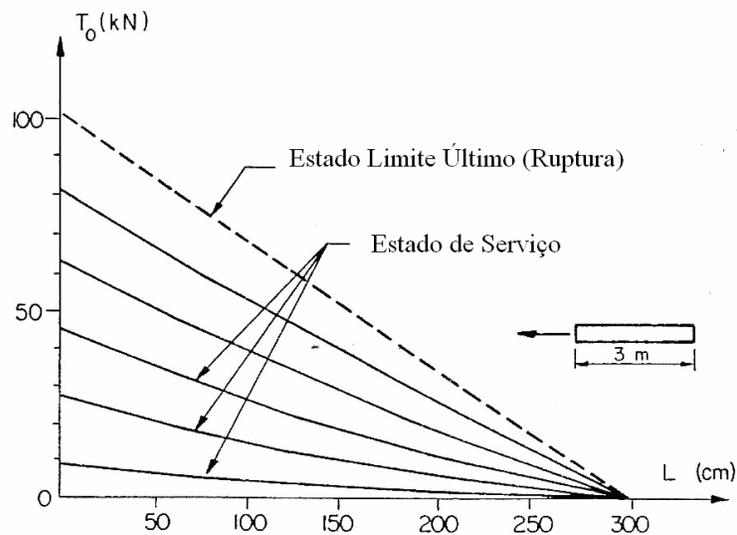


Figura 2.20 – Distribuição das forças de tração ao longo do grampo durante o ensaio de arrancamento –  $L = 3\text{m}$  (adaptado de CLOUTERRE, 1991).

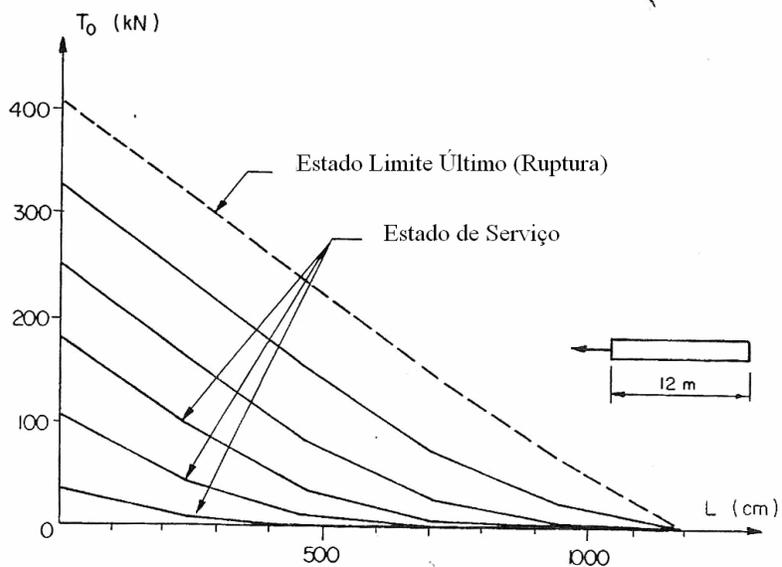


Figura 2.21 – Distribuição das forças de tração ao longo do grampo durante o ensaio de arrancamento –  $L = 12\text{m}$  (adaptado de CLOUTERRE, 1991).

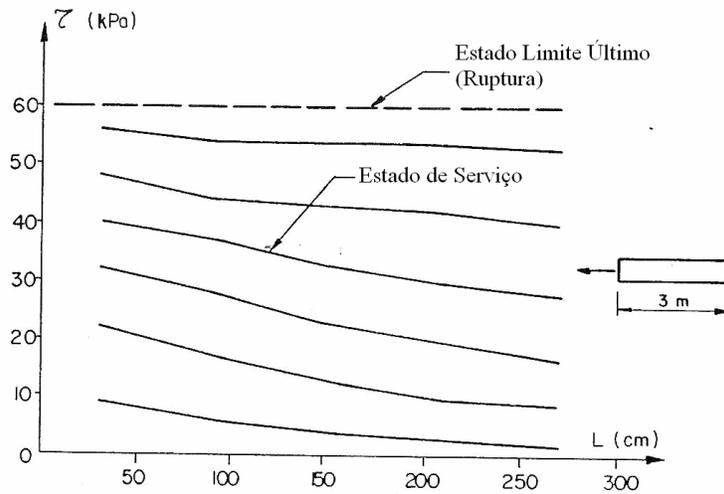


Figura 2.22 – Distribuição das tensões cisalhantes ao longo do grampo durante o ensaio de arrancamento –  $L = 3\text{m}$  (adaptado de CLOUTERRE, 1991).

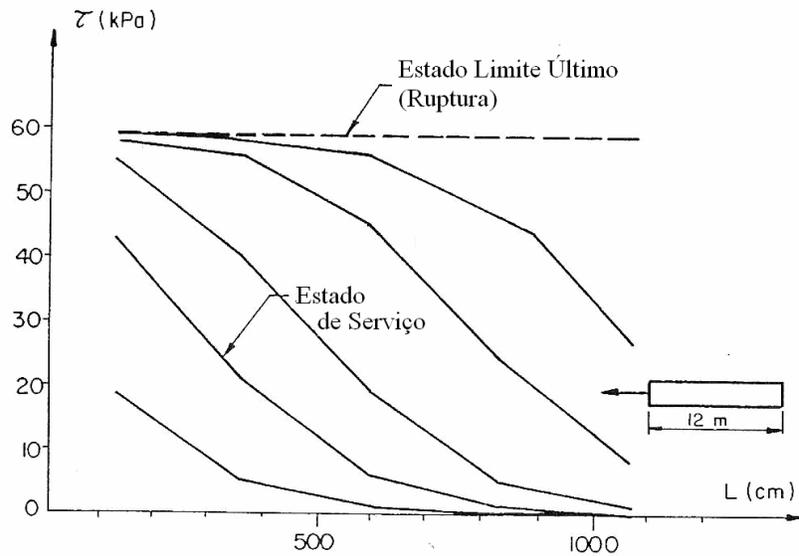


Figura 2.23 – Distribuição das tensões cisalhantes ao longo do grampo durante o ensaio de arrancamento –  $L = 12\text{m}$  (adaptado de CLOUTERRE, 1991).

## 2.2.8 INSTRUMENTAÇÃO DE GRAMPOS

Durante a realização dos ensaios de arrancamento, é de extremo interesse o conhecimento da distribuição das tensões desenvolvidas ao longo do grampo, a fim de que se possa prever o comportamento da estrutura no processo de estabilização do terreno. Uma vez determinada esta distribuição, é possível identificar o comprimento real do grampo que estará sendo solicitado à tração na medida em que o solo circundante tende a se deslocar.

Tendo em vista este interesse, pode-se utilizar a extensometria para uma análise experimental das tensões e deformações nos grampos durante o ensaio de arrancamento. Esta técnica consiste na monitoração das deformações sofridas em estruturas mecânicas de diversas formas, tais como por relógio comparador, detectores eletrônicos de deslocamento, fotoelasticidade, camada frágil, *strain gages*, entre outros.

Os *strain gages* destacam-se pela sua versatilidade de aplicação, precisão das medidas e facilidade de manipulação. Além disso, são capazes de monitorar as deformações até as cargas últimas em ensaios destrutivos. São constituídos por um resistor elétrico composto de uma finíssima camada de material condutor, depositado sobre um composto isolante chamado de base. Este é então colado sobre a estrutura em teste, seguido pela soldagem dos fios de saída. Um tipo comum de *strain gage* é mostrado na Figura 2.24.

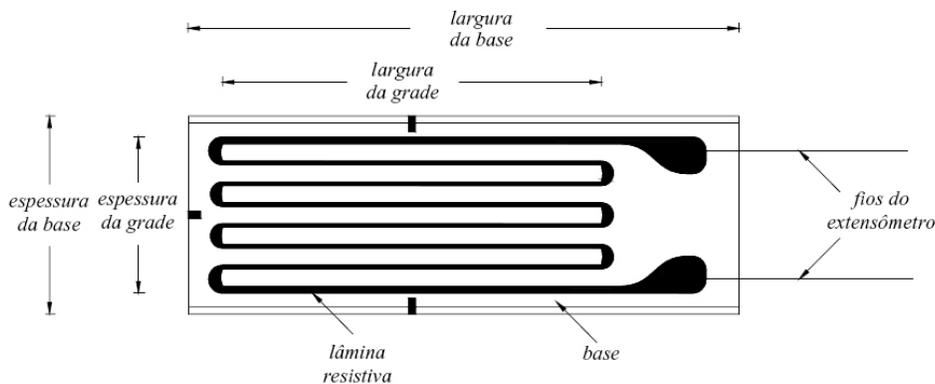


Figura 2.24 – Esquema de um extensômetro elétrico de resistência (ANDOLFATO *et al.*, 2004).

O princípio de funcionamento está baseado no fato de que os metais sofrem uma alteração de sua resistência elétrica ao se deformarem. Assim, as deformações são convertidas em uma quantidade elétrica que é amplificada para leitura em um local remoto. Os *strain gages* oferecem várias vantagens tais como:.

- Alta precisão;
- Excelentes respostas aos fenômenos dinâmicos;
- Fácil utilização desde que conhecida a boa técnica;
- Excelente linearidade;
- Medições possíveis dentro de uma ampla faixa de temperatura;
- Possibilidade de medição de diversas grandezas físicas tais como força, pressão, torque, aceleração e deslocamento;
- Possibilidade de medição em locais remotos.

A resistência medida pelos *strain gages* pode variar com a variação da temperatura. Para eliminar esta interferência existem diferentes métodos de medição. Porém, muitos dos *strain gages* disponíveis atualmente já apresentam uma auto-compensação, isto é, são fabricados com tecnologia apropriada para sofrerem menos efeitos da temperatura.

O elemento sensor de deformação de um *strain gage* é disposto em forma de grade de material resistivo em uma pequena área, fornecendo uma dada resistência, usualmente de 120 Ohms. A razão entre a mudança na resistência relativa no medidor e a deformação na peça ensaiada é chamada de Fator de Sensibilidade do *strain gage* e geralmente expressa pelo símbolo  $K$ , conforme apresentado na Equação 2.2.

$$K = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon} \quad (2.2)$$

Onde:  $\Delta R$  = variação de resistência do *strain gage*;

$R$  = resistência nominal do *strain gage*;

$\varepsilon$  = deformação do *strain gage*.

Para a medição das pequenas variações na resistência elétrica dos *strain gages* com precisão é necessário o emprego de circuitos elétricos especiais. O circuito que melhor se adapta a esta condição e que por esta razão frequentemente é utilizado denomina-se Ponte de *Wheatstone* (Figura 2.25).

O circuito de entrada de todo instrumento de medida de deformação inclui um circuito de ponte, cuja função é converter uma pequena mudança na resistência em uma voltagem elétrica. O circuito de Ponte de *Wheatstone* é formado por quatro resistores,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ , conforme mostrado na Figura 2.25. Assim, este circuito sempre apresentará quatro braços em sua configuração. Porém, no processo de medição, existem três diferentes tipos de disposição dos *strain gages* neste circuito, denominados de um quarto de ponte, meia ponte e ponte completa.

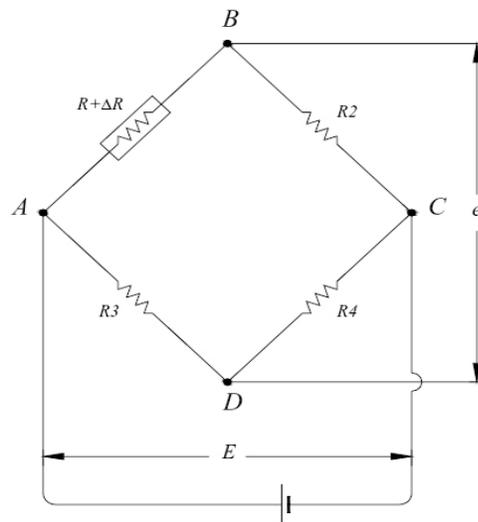


Figura 2.25 – Esquema do circuito elétrico em Ponte de *Wheatstone* (ANDOLFATO et al., 2004).

A técnica de medida em um quarto de ponte consiste na utilização de um *strain gage*, posicionado em um dos braços, o qual estará colado no material a ser ensaiado, e de resistores de precisão nos outros três braços.

A técnica de medida que utiliza dois *strain gages* em dois braços distintos da ponte é chamada de medida em meia ponte. E por fim existe a técnica de medida que utiliza os

quatro *strain gages* ligados em cada um dos braços da ponte, chamada de leitura em ponte completa.

Em qualquer uma das técnicas citadas é importante que o posicionamento dos *strain gages* em cada braço da ponte seja feito de forma correta com relação ao que se deseja medir.

No caso de ligações em ponte completa, as deformações podem ser calculadas a partir das leituras (em Volts) registradas pelo sistema de aquisição de dados, através da seguinte expressão (PERRY e LISSNER, 1962):

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R \cdot K} = \frac{4 \cdot \Delta L}{(V_{exc} + 2 \cdot \Delta L) \cdot K} \quad (2.3)$$

Onde:  $\varepsilon$  = deformação do *strain gage*;

$\Delta L$  = variação de voltagem do *strain gage*;

$V_{exc}$  = voltagem de excitação da Ponte de *Wheatstone*;

$K$  = Fator de Sensibilidade do *strain gage*.

Conhecendo-se as deformações ocorridas na peça ensaiada, chega-se facilmente às tensões correspondentes através da relação tensão-deformação do material. No caso de pequenas deformações em que o corpo se mantém na região elástica, isto é, são válidas as leis de Hooke, esta relação é dada pela seguinte equação:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.4)$$

Onde:  $\sigma$  = tensão na peça ensaiada;

$E$  = Módulo de elasticidade do material constituinte da peça ensaiada;

$\varepsilon$  = deformação na peça ensaiada.

## 2.2.9 ALGUNS RESULTADOS DA LITERATURA NACIONAL

Neste item são comentados alguns resultados de ensaios de arrancamento em grampos da literatura nacional. Deve-se ressaltar que os valores de resistência ao arrancamento obtidos em cada grupo de ensaios estão vinculados às características (i) do grampo: diâmetro e inclinação do furo, comprimento do trecho injetado, diâmetro e tipo de aço da barra; (ii) do processo executivo: método de limpeza do furo (ar, água ou lama), método de perfuração, número de injeções, fator água-cimento, tempo de cura, pressão de re-injeção; e (iii) do solo: parâmetros de resistência, módulo de elasticidade, presença de nível d'água, entre outras. Desta forma, procurou-se resumir os dados mais importantes de cada caso e os respectivos resultados na Tabela A1 (em anexo).

ORTIGÃO *et al.* (1992) executaram ensaios de arrancamento em grampos instalados em solo residual arenoso, em uma encosta localizada no Morro da Formiga, RJ. Foram realizados 3 ensaios em grampos com ângulo de inclinação de 20°, em furos com diâmetro de 75mm e comprimento total de 4m (3m injetados e 1m livre). Os resultados apresentados de  $q_s$  compreendem valores ligeiramente superiores a 250kPa, sendo este o valor adotado para projeto.

FEIJÓ e EHRLICH (2001) apresentam os resultados de um programa de pesquisa realizado pela Fundação GEORIO, com o objetivo de verificar o comportamento de grampos injetados com calda de cimento em solos tropicais. Ao todo foram realizados 20 ensaios de arrancamento em dois locais com perfis de solo residual: um de biotita-gnaiss, em Jacarepaguá e outro de gnaiss-leptinítico, em Laranjeiras. Além das cargas de ruptura, também foram monitoradas as deformações ao longo do comprimento injetado durante o arrancamento, por meio de *strain gages* colados nas barras de aço.

AZAMBUJA *et al.* (2001) descrevem o desenvolvimento do projeto de um sistema de contenção em solo grampeado na cidade de Porto Alegre, destinado a promover a estabilidade de uma escavação profunda, tipo caixão. Um dos procedimentos de controle tecnológico da obra foi a realização de 6 ensaios de arrancamento, em pontos com cotas distintas, com a finalidade de verificar a relação tensão-deformação dos grampos utilizados. Para isso, foram executados grampos protótipos, sem função

estrutural, nos locais de interesse especificados pelo projetista, com os mesmos critérios de execução dos demais grampos da obra quanto à perfuração e à injeção.

PITTA *et al.* (2003) apresentam os resultados de ensaios executados em 5 obras em diversas regiões de São Paulo, com o objetivo de se estudar a melhoria proporcionada pelas fases de re-injeção. Todos os grampos ensaiados localizavam-se entre 2,0 e 4,0m abaixo da crista do talude e foram especialmente executados para a realização dos ensaios.

SOARES e GOMES (2003) relatam um caso de obra de contenção em solo grampeado realizada em talude rodoviário localizado a montante da Usina Nuclear de Angra dos Reis, no Rio de Janeiro. Foram realizados 6 ensaios de arrancamento imediatamente antes da execução da obra com a finalidade de verificar as premissas de projeto e validar o dimensionamento final da estrutura. Os grampos ensaiados distinguiam-se entre si pelo comprimento do trecho injetado, sendo 4 grampos ancorados com comprimento de 3,0m e 2 com comprimento de 5,0m. Em todos eles o trecho livre foi garantido pela colocação de graxa e mangueira plástica em volta da barra, até a superfície.

MORAES e ARDUINO (2003) descrevem a metodologia utilizada na obra de contenção em solo grampeado de uma encosta localizada na borda de um platô, no distrito industrial da Zona Franca de Manaus, estado do Amazonas. Foram realizados 2 ensaios de arrancamento em grampos executados da mesma forma e em locais adjacentes aos grampos definitivos, para confirmar o valor de  $q_s$  arbitrado no projeto. Os grampos ensaiados foram preparados com comprimento total de 6,0m e comprimento de ancoragem de 3,0m.

ALONSO e FALCONE (2003) apresentam a solução de estabilização adotada num talude localizado às margens da Avenida Wenceslau Brás, que serve de ligação entre as cidades de Poços de Caldas e Belo Horizonte, em Minas Gerais, na qual foi utilizada a técnica de solo grampeado. Também neste caso foram realizados 2 ensaios de arrancamento com o objetivo de verificar o valor da resistência adotado em projeto.

PROTO SILVA (2005) realizou uma pesquisa para avaliação da resistência ao arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss na cidade de Niterói, Rio de Janeiro. O objetivo do estudo foi propor uma relação semi-empírica de  $q_s$ , a partir dos resultados encontrados, com parâmetros de resistência do solo e da interface solo/nata de cimento, obtidos em ensaios de cisalhamento direto executados em laboratório. Foram realizados 8 ensaios de arrancamento em grampos de 4,0m de comprimento total, sendo o comprimento do trecho livre de 1,0m. Quatro destes grampos foram instrumentados com *strain gages* para avaliação da distribuição do carregamento ao longo do grampo durante os ensaios.

MAGALHÃES (2005) realizou ensaios de arrancamento com o objetivo de atestar a viabilidade do emprego de grampos não convencionais reforçados com fibras de polipropileno, em substituição às barras de aço. Foram executadas duas baterias de ensaios em duas cotas distintas de um talude de solo residual areno-argiloso, localizado na cidade de Niterói, Rio de Janeiro. Cada uma destas baterias foi composta de 6 grampos, sendo 1 grampo convencional e 5 não convencionais. Todos os grampos foram executados com comprimento total de 4,0m e trecho livre de cerca de 1,0m. A presente pesquisa tem como finalidade dar continuidade a este estudo.

SPRINGER (2006) estudou a influência de parâmetros tais como tempo de cura da nata de cimento, número de injeções, método de lavagem do furo e tipo de solo sobre a resistência ao arrancamento. Para isso, realizou 25 ensaios de arrancamento de grampos em talude de solo residual e rocha alterada de gnaiss, na cidade de Niterói, Rio de Janeiro, alternando estas condições de execução. Destes grampos, 14 receberam *strain gages* ao longo das barras de aço para monitoração das deformações durante os ensaios.

## **2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS FIBROSOS DE MATRIZ CIMENTÍCEA**

### **2.3.1 INTRODUÇÃO**

Nas diversas áreas do conhecimento podem ser desenvolvidos novos materiais a partir da combinação de outros, desde que se conheçam as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais constituintes e como estes podem ser combinados.

Define-se como “material compósito” a combinação de dois ou mais materiais que apresenta propriedades cujos materiais componentes não possuem isoladamente. São, portanto, constituídos de duas fases: a matriz, que ocupa a maior parte do volume total, e o elemento de reforço, e são desenvolvidos para otimizar os pontos fortes de cada uma destas fases (BUDINSKI, 1996).

Na construção civil, tem-se que tipicamente a matriz é constituída por um material frágil e o elemento de reforço é um material dúctil, como as argamassas reforçadas com fibras.

A história da utilização de compósitos fibrosos como material de construção data mais de 3.000 anos. Há exemplos de uso de palhas em tijolos de argila mencionados no Êxodo, e ainda, crina de cavalo reforçando materiais cimentados. Outras fibras naturais têm sido utilizadas para conferir ductilidade aos materiais de construção essencialmente frágeis (ILLSTON, 1994).

Em contraste com estes antigos materiais naturais, o crescimento da indústria do petróleo nos últimos cem anos impulsionou o desenvolvimento dos polímeros. Assim, 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).

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 (TAYLOR, 1994).

Segundo BUDINSKI (1996), os materiais compósitos mais importantes são combinações de polímeros e materiais cerâmicos. De acordo com a ciência dos materiais, os produtos baseados em cimento Portland são considerados materiais cerâmicos por apresentarem características típicas deste grupo de materiais, tais como alta rigidez, fragilidade, baixa resistência à tração e tendência de fissuração por secagem.

As cerâmicas e os polímeros podem então ser considerados como grupos opostos de materiais, uma vez que as primeiras são mais rígidas e frágeis, enquanto os segundos apresentam comportamento menos rígido e dúctil (TAYLOR, 1994).

Para TAYLOR (1994), os materiais baseados em cimento Portland são uma opção natural para a aplicação de materiais fibrosos à base de fibras poliméricas, uma vez que são baratos, mas apresentam problemas relativos à ductilidade, resistência ao impacto e capacidade de absorção de energia de deformação.

Os materiais compósitos originados da combinação de cerâmicas e polímeros apresentam melhores características de resistência mecânica, rigidez, ductilidade, fragilidade, capacidade de absorção de energia de deformação e comportamento pós-fissuração, em comparação aos materiais que lhes deram origem (FITESA, 2002).

Por fim, as matrizes cimentícias podem ser de três tipos: pastas, argamassas e concretos. Em todas elas a matriz pode ser considerada como um meio poroso composto de um esqueleto sólido, cujo principal componente é o silicato de cálcio hidratado (CSH) e poros (LOPES, 2005).

### **2.3.2 TIPOS DE FIBRAS**

- **Fibras Naturais**

As fibras naturais são aquelas encontradas na natureza e usadas “*in natura*” ou mesmo após certo grau de beneficiamento. Dentre os materiais utilizados na sua confecção podem ser citados: juta, banana, linho, malva, algodão, mamona, coco, sisal, piaçava, bambu, cana-de-açúcar, celulose, entre outros.

A princípio, as fibras naturais apresentam poucas vantagens, pois geralmente as propriedades mecânicas dos compósitos constituídos por elas são pioradas ou se mantêm quase inalteradas. No entanto, o apelo comercial é alto, em vista dos baixos custos das mesmas, que são originárias de fontes renováveis e inesgotáveis. Além disto, possuem baixa densidade, causam menor abrasão nas máquinas de processamento e também mostram boa aderência à matriz.

Devido à degradação provocada pela ação de fungos ou microorganismos, os compósitos com fibras naturais podem ter sua durabilidade reduzida, o que representa uma desvantagem da sua utilização. A exposição destas fibras em ambientes alcalinos, como em materiais a base de cimento Portland comum, resulta numa rápida deterioração e limita a aplicação das mesmas (VENDRUSCOLO, 2003).

- **Fibras Minerais**

As fibras minerais são representadas pelas fibras de vidro, carbono e amianto

As fibras de vidro são produzidas a partir do vidro em forma líquida, que é resfriado a alta velocidade. Através do controle de temperatura e velocidade de escoamento do vidro são produzidos vários tipos de filamentos com diâmetros variados.

As fibras de vidro são produzidas a partir do vidro em forma líquida, que é resfriado a alta velocidade. Através do controle de temperatura e velocidade de escoamento do vidro são produzidos vários tipos de filamentos com diâmetros variados. Embora sejam fabricadas a partir de um material frágil, estas fibras possuem propriedades satisfatórias para o emprego na construção civil, tais como: baixo coeficiente de dilatação térmica; resistência à tração e à vibração; retenção das propriedades mecânicas a altas temperaturas; grande alongamento na ruptura; facilidade de processamento e baixo custo se comparadas a outras fibras dúcteis. Entretanto, cerca de 99% das fibras de vidro são produzidas a partir do vidro do tipo E, que é susceptível ao ataque dos álcalis presentes no cimento Portland, o que limita a sua utilização nos concretos, pastas e argamassas.

A maioria das fibras de carbono é produzida a partir de um componente básico conhecido como PAN (Poliacrilonitrila). Dependendo do tipo de tratamento da fibra básica, que inclui carbonização, grafitização e oxidação, é possível fabricar fibras de carbono em diversas configurações de resistência. Algumas delas podem chegar a ser várias vezes mais resistentes que o aço.

Estas fibras podem ser divididas em duas categorias principais: fibras de alta resistência e fibras de alta rigidez. As fibras de alta resistência possuem resistência à

tração de aproximadamente 2,4GPa e módulo de elasticidade de 240GPa, enquanto as fibras de alta rigidez apresentam resistência à tração da ordem de 2,1GPa e módulo de elasticidade de 420GPa.

Além de ser um material relativamente barato e de fácil extração, a estrutura fibrosa do amianto confere a ele propriedades físicas e químicas especiais, que o tornam mecanicamente atrativo. Assim, as fibras de amianto caracterizam-se por possuírem propriedades que se destacam quando comparadas com as de outros materiais: alta resistência mecânica (comparada à do aço); elevada superfície específica; incombustibilidade; baixa condutividade térmica; resistência a produtos químicos, estabilidade em diferentes valores de pH; boa durabilidade; flexibilidade e aderência satisfatória em matrizes cimentícias.

Apesar das inúmeras vantagens apresentadas, a utilização de tais fibras na construção civil é proibida em muitos países, porque, ao ser cortada, ela libera partículas muito pequenas que danificam os alvéolos pulmonares, se aspiradas pelo homem.

#### • **Fibras Metálicas**

Dentre as fibras metálicas existentes no mercado, as mais comuns e utilizadas são as fibras de aço. Normalmente, tais fibras são fabricadas a partir do aço-carbono. Para que o seu manuseio seja mais fácil, elas podem vir coladas em feixes de 10 a 30 fibras, por meio de cola solúvel em água, que se dissolve no processo de mistura.

As fibras de aço podem ser lisas ou corrugadas, sendo estes dois tipos subdivididos em fibras sem ancoragem geométrica ou com ancoragem geométrica (ganchos, desvios de linearidade ou aumento de seção nas pontas, etc). O comprimento destas fibras pode variar de 5 a 65mm e o diâmetro de 0,10 a 1,0mm. A resistência à tração varia entre 345 e 2.100MPa, módulo de elasticidade entre 200 e 210GPa e deformação na ruptura de 0,5 a 3,5%.

Devido à sua alta resistência, o mecanismo de ruptura dos compósitos reforçados com fibras metálicas geralmente está associado ao arrancamento das mesmas, e não ao seu rompimento. A desvantagem apresentada por estas encontra-se na susceptibilidade à

corrosão, a qual pode ser minimizada através de tratamentos especiais, como banho de níquel.

- **Fibras Poliméricas**

Os polímeros são compostos químicos de elevada massa molecular relativa, resultantes de reações químicas de polimerização.

As fibras poliméricas de maior emprego atualmente são as fibras de polipropileno, no entanto, outros tipos podem ser citados, tais como poliéster, polietileno e poliamida ou *Kevlar*.

As fibras de polipropileno estão disponíveis comercialmente na forma de monofilamentos e na forma de filmes, que é cortado em fitas, esticado e fibrilado. A fibrilação é feita através de controlados cortes longitudinais, criando-se uma espécie de rede trançada. Esta forma apresenta vantagens sobre a forma de monofilamentos devido à sua fácil distribuição no concreto e melhora na interação mecânica fibra-matriz (NANNI e MEAMARIAN, 1991).

As principais características das fibras de polipropileno são baixo módulo de elasticidade (cerca de 8GPa), grande deformação, resistência aos álcalis e baixo custo. A resistência à tração destas fibras varia em torno de 400MPa. Quando adicionadas às misturas cimentícias, auxiliam no controle da fissuração durante o endurecimento e melhoram as propriedades pós-pico do material.

O poliéster é um tipo de polímero plástico com diversas aplicações industriais, em especial na produção têxtil. As propriedades de interesse deste material são sua alta densidade, rigidez e resistência. As fibras de poliéster apresentam aspecto bastante similar às fibras de polipropileno, e podem ser utilizadas para os mesmos fins.

O polietileno tereftalato (PET) é um tipo de polímero termoplástico da família do poliéster e utilizado na fabricação de embalagens em geral, cujos processos de reciclagem, trituração e extrusão dá origem às fibras constituídas por este material (BETIOLI, 2003). Apesar da alta durabilidade destas fibras, elas apresentam maiores

deformações de fluência, o que limita a sua utilização em compósitos fibrosos fissurados submetidos a tensões permanentes e de valor elevado.

As fibras conhecidas pelo nome de *Kevlar*, marca registrada da empresa Dupont, na verdade, representam um tipo de fibra derivada de uma poliamida aromática. Duas formas principais destas fibras são produzidas: o Kevlar 29, com resistência à tração da ordem de 3GPa e módulo de elasticidade médio de aproximadamente 64GPa, e o Kevlar 49, com mesma resistência mecânica, porém módulo mais elevado, em torno de 300GPa.

### **2.3.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO**

Segundo JOHNSTON (1994), as fibras em uma matriz cimentada podem ter dois efeitos importantes: primeiramente elas tendem a reforçar o compósito sobre todos os modos de carregamento que induzem tensões de tração, isto é, na tração direta, na flexão, no cisalhamento e na retração restringida; secundariamente, melhoram a ductilidade e a tenacidade da matriz frágil.

Os principais parâmetros que controlam o desempenho dos compósitos fibrosos são o teor e comprimento das fibras, as propriedades físicas das mesmas e da matriz, além da interação fibra-matriz (HANNANT, 1994).

JOHNSTON (1994) acrescenta ainda o efeito da orientação e distribuição da fibra na matriz. A orientação de uma fibra relativa ao plano de fissura ou ruptura da matriz influencia fortemente sua habilidade na transmissão de cargas. Uma fibra que se posiciona paralela ao plano de ruptura não tem efeito algum, enquanto que uma perpendicular tem efeito máximo.

Este comportamento pode ser visualizado através das Figuras 2.26 e 2.27. Quando a matriz apresenta uma fissura, esta representa uma barreira à propagação de tensões, diagramada pelas linhas de tensões. Ocorre então um “desvio” que implica numa concentração de tensões nas extremidades da fissura. Caso o valor desta tensão supere a resistência da matriz, ocorrerá a ruptura abrupta do material. Ainda se houver um esforço cíclico, pode ocorrer a ruptura por fadiga, ou seja, para cada ciclo ocorrerá uma

pequena propagação das microfissuras e um aumento progressivo na concentração de tensões até o momento da ruptura do material (FOÁ, 2002).

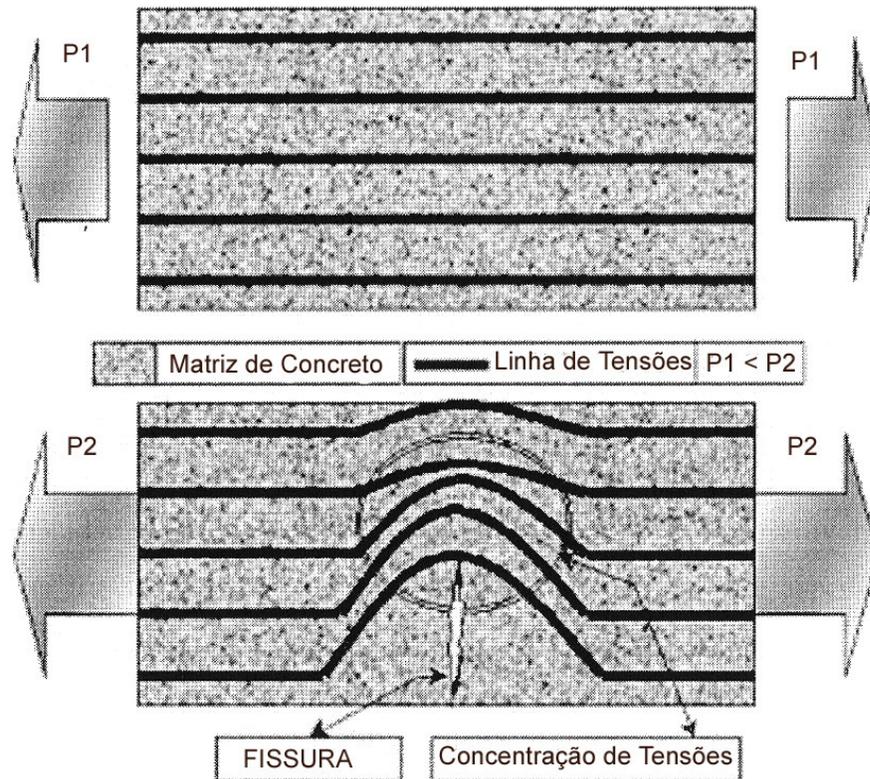


Figura 2.26 – Esquema de tensões no concreto sem fibras (FOÁ, 2002).

Esta concentração de tensões nas fissuras é minimizada pela adição de fibras, que funcionam como “pontes de transferência” do carregamento, conforme ilustrado na Figura 2.27. Assim, o material passa a apresentar uma capacidade portante pós-fissuração, o que caracteriza um comportamento pseudo-dúctil. Deve-se ressaltar, porém, que o nível de tensão que a fibra é capaz de transferir através das fissuras depende de uma série de aspectos, tais como o seu comprimento e volume que é adicionado à matriz (FOÁ, 2002).

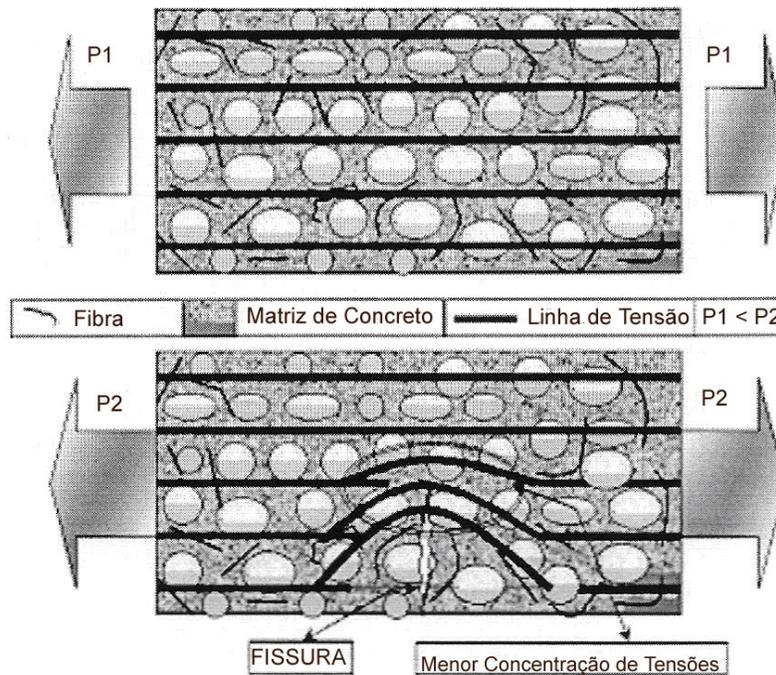


Figura 2.27 – Esquema de tensões no concreto com fibras (FOÁ, 2002).

AGOPYAN e JOHN (2000) comentam que o efeito da adição de fibra na matriz frágil é o de dificultar a propagação das fissuras. Sua presença em uma microfissura em propagação representa uma barreira, e para enfrentá-la é necessário que ocorra ou o arrancamento da fibra, ou o desvio da fissura pelo contorno da fibra, ou a ruptura da mesma. Estas três situações requerem um elevado gasto de energia. Enquanto esta energia não é superada, uma outra microfissura se inicia em outro defeito estrutural da matriz, e se propaga até encontrar outra fibra, repetindo-se o mecanismo anteriormente comentado. Dessa forma, são apresentadas duas características intrínsecas ao compósito de matriz cimentícia com fibras: para sua ruptura é necessária uma maior energia em comparação à matriz pura (aumento da tenacidade), além da ocorrência de múltiplas fissuras.

Em consequência a esta restrição à propagação da fissura, o compósito resultante apresenta uma série de propriedades otimizadas. BENTUR e MINDESS (1990), BALAGURU (1994), DANTAS (1987) e FIGUEIREDO (2000) indicam que ao se adicionar fibras em matriz de cimento, o compósito pode apresentar um aumento da tenacidade e das capacidades de resistência à tração na flexão e de deformação.

Deve-se salientar, porém, que o compósito apresentará um desempenho estrutural superior ao da matriz somente se o módulo de elasticidade da fibra for maior do que o da matriz. Nos concretos, esta condição não é atingida pelas fibras plásticas usuais, uma vez que os cimentos atuais, em conjunto com os aditivos aceleradores de pega e redutores de água propiciam um elevado ganho de resistência inicial e do módulo de elasticidade. Assim, as fibras de baixo módulo só têm a possibilidade de atuar como reforço num curto espaço de tempo após o seu lançamento, de onde se conclui que a sua função está muito ligada às propriedades do concreto nas primeiras idades (FITESA, 2002).

Entretanto, quando se adicionam estas fibras às argamassas e pastas de cimento esta situação pode mudar, visto que estas misturas apresentam módulos de elasticidade mais próximos aos das fibras.

#### **2.3.4 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO**

O desempenho do compósito pode ser influenciado por vários parâmetros dentre os quais destacam-se: (i) interação fibra-matriz; (ii) volume crítico de fibras; (iii) comprimento crítico da fibra; (iv) módulo de elasticidade da fibra; e (v) resistência da fibra.

- **Interação Fibra-Matriz**

A interação fibra-matriz depende basicamente de duas propriedades: aderência e compatibilidade entre os materiais constituintes.

Uma alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras e amplia sua distribuição pelo compósito (TAYLOR, 1994). Este fato está associado à redistribuição dos esforços promovida pelas fibras, conforme visto no item anterior. Ou seja, quanto maior a dificuldade das fibras serem arrancadas da matriz, proporcionada por uma boa aderência entre as fases, maior será a capacidade de transmissão de cargas pelas fibras, e conseqüentemente, menores serão as fissuras.

Por sua vez, a compatibilidade química e física entre as fibras e a matriz também é de suma importância e, sobretudo, deve-se esperar uma durabilidade satisfatória do conjunto.

A curto prazo, as fibras que absorvem água podem causar excessiva perda de trabalhabilidade das misturas cimentícias. Além disso, tais fibras são susceptíveis a variações de volume, o que compromete a aderência fibra-matriz (TAYLOR, 1994).

A longo prazo, alguns tipos de fibras poliméricas não possuem estabilidade química frente à presença de álcalis, como os existentes nos materiais à base de cimento Portland. Nestes casos ocorre uma natural deterioração da fibra por parte dos álcalis e a perda das propriedades do compósito pode ser significativa (TAYLOR, 1994).

Por fim, além da compatibilidade física e química, deve haver também uma compatibilidade dimensional entre agregados e fibras, de modo que estas interceptem com maior frequência a fissura que ocorre na matriz. Em função disso recomenda-se a utilização de fibras cujo comprimento seja igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado na mistura (FOÁ, 2002).

#### • Volume Crítico de Fibra

Para cada tipo e aplicação de fibra, existe um teor recomendado que maximiza as propriedades desejadas. Um dos fatores determinantes para que haja um bom desempenho dos compósitos fibrosos é o número de fibras por metro cúbico de concreto, argamassa ou nata de cimento. Cabe ressaltar que o número de fibras necessário para melhorar algumas propriedades do concreto/argamassa no estado plástico, como diminuir a incidência de fissuras por retração plástica, a exsudação e a segregação, é sensivelmente menor que o número de fibras necessário para alterar propriedades do concreto/argamassa no estado endurecido, como por exemplo, a resistência ao impacto (FITESA, 2002).

Considera-se como volume crítico aquele que mantém a mesma capacidade portante do compósito após a ruptura da matriz. Este índice é diretamente proporcional à resistência da matriz, a qual determina a tensão de aparecimento da primeira fissura e

inversamente proporcional à tensão de ruptura da fibra e seu módulo (AVESTON *et al.*, 1971).

Em outras palavras, abaixo deste volume, assim que ocorre a ruptura da matriz, há necessariamente uma queda na carga que o material tem capacidade para suportar. Acima, o compósito continua a aceitar níveis crescentes de carregamento, mesmo após a ruptura da matriz (FOÁ, 2002). A Figura 2.28 ilustra este conceito, através das curvas de carga x deslocamento de concretos reforçados com fibras, obtidas a partir de ensaios de flexão realizados em corpos de prova prismáticos. Observa-se um trecho inicial elástico-linear, que corresponde ao estágio pré-fissurado da matriz. Por meio dos patamares de escoamento pode-se diferenciar os comportamentos dos compósitos com volume de fibras abaixo, acima e igual ao volume crítico.

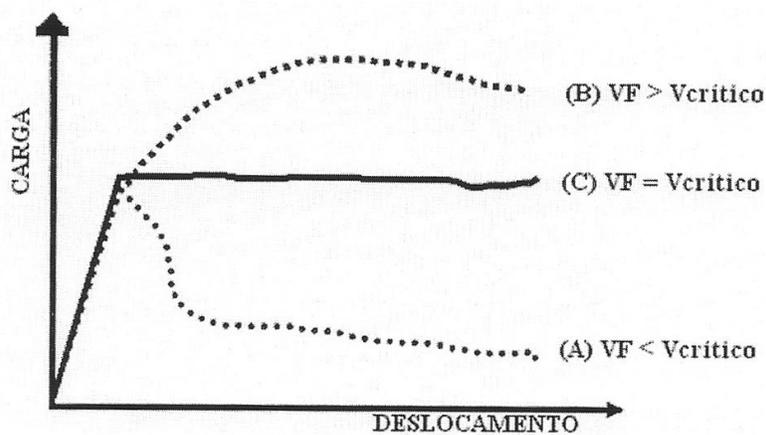


Figura 2.28 – Curva de carga *versus* deslocamento (FOÁ, 2002).

Da análise da Figura 2.28 conclui-se precocemente que quanto maior o volume de fibras, melhor será o desempenho mecânico do material compósito. Entretanto, contrapõe-se o fato de que as fibras diminuem a trabalhabilidade da mistura, uma vez que ao se adicionar fibra, adiciona-se também uma grande área superficial que demanda água de molhagem. Esta redução da trabalhabilidade pode acarretar prejuízos à compactação e, conseqüentemente, à durabilidade e ao próprio desempenho mecânico do material compósito.

### • Comprimento Crítico da Fibra

A facilidade com que as fibras são arrancadas da matriz está diretamente ligada ao comprimento das mesmas. Define-se como comprimento crítico ( $l_c$ ) aquele que permite o desenvolvimento de uma tensão de tração no centro da fibra igual à sua tensão de ruptura do sistema (FOÁ, 2002).

Em outras palavras, 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 entre a matriz e a fibra induza na fibra uma tensão de tração igual à sua resistência à tração (FITESA, 2002).

A Figura 2.29 apresenta três possíveis hipóteses de distribuição de tensões nas fibras em função do seu comprimento  $l$  em relação ao comprimento crítico  $l_c$ . Estas distribuições baseiam-se no conceito de que a transferência de tensão entre a matriz e a fibra aumenta linearmente dos extremos para o centro.

Podem ser identificadas as seguintes situações:

- Se  $l = l_c$ : a tensão de tração desenvolvida no centro da fibra é igual à sua resistência à tração ( $f_t$ ). Desta forma, pode-se dizer que a fibra, que está atuando como ponte de transferência de tensões através de uma fissura, encontra-se com seu desempenho máximo, pois sua resistência à tração está sendo utilizada para que a fissura não aumente;
- Se  $l < l_c$ : a tensão cisalhante desenvolvida entre a fibra e a matriz não é suficiente para produzir uma tensão de tração na fibra que mobilize sua resistência à tração. Assim, com o aumento progressivo da deformação e da abertura da fissura, a fibra será arrancada do lado que possuir menor comprimento embutido;
- Se  $l > l_c$ : a tensão cisalhante desenvolvida entre a fibra e a matriz produz uma tensão de tração maior que a resistência à tração da fibra e esta acaba

rompendo. Isto pode ocorrer também quando se tem uma alta aderência entre a fibra e a matriz.

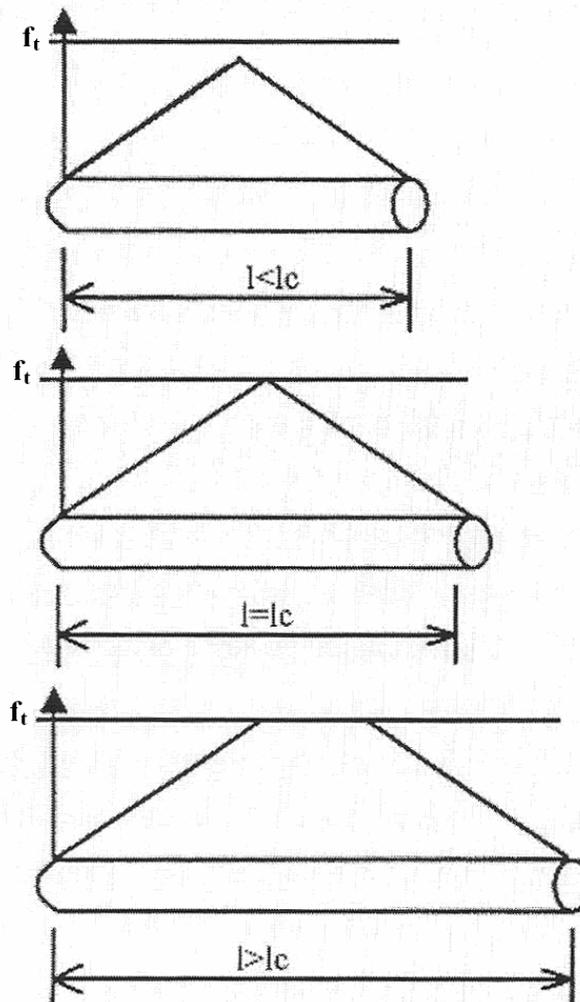


Figura 2.29 – Distribuições possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico (adaptado de FOÁ, 2002).

O diâmetro das fibras também deve ser levado em conta nesta análise do seu comportamento, pois influi na capacidade da fibra em desenvolver as resistências ao cisalhamento e à tração. O equacionamento do mecanismo de transferência de tensão é apresentado na Figura 2.30, na qual é mostrada uma fibra em uma disposição idealizada à fissura, isto é, perpendicular à mesma.

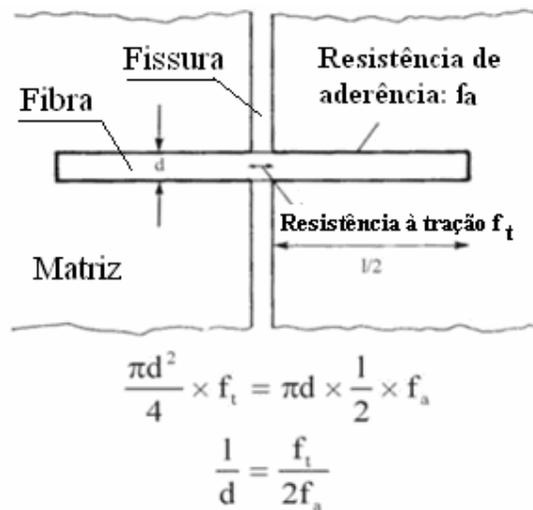


Figura 2.30 – Mecanismo de transferência de tensão em uma fibra em posição idealizada (adaptado de FITESA, 2002).

Da análise desta figura, conclui-se que a relação  $l/d$ , denominada fator de forma, é proporcional à razão entre a resistência à tração da fibra ( $f_t$ ) e a resistência de aderência fibra-matriz ( $f_a$ ).

Em grande parte, a tecnologia dos materiais compósitos depende desta simples equação: se a fibra possui uma alta resistência à tração (fibras de aço, por exemplo), então isto implica que 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).

- **Módulo de Elasticidade da Fibra**

O volume crítico de fibras de baixo módulo de elasticidade é maior que o das fibras de alto módulo. Além disso, a eficiência destas fibras será maior nas primeiras idades do compósito, diminuindo com o processo de hidratação do cimento e ganho de resistência e módulo de elasticidade da matriz (ARMELIN e HAMASSAKI, 1990).

O módulo de elasticidade da fibra é importante no sentido de proporcionar maior rigidez e capacidade de impedir que a fissuração continue. A fibra de baixo módulo permite um maior nível de abertura de fissuras que uma fibra de alto módulo, para um

mesmo nível de deformação do conjunto fibra-matriz. Isto ocorre porque quanto maior o nível de deflexão, maior será o nível de abertura de fissuras, mantendo-se uma relação constante que depende das características do conjunto fibra-matriz (ARMELIN e HAMASSAKI, 1990).

- **Resistência da Fibra**

Aumentando-se a resistência da fibra, aumenta-se, também, a ductilidade do compósito. Esse parâmetro dependerá das características pós-fissuração desejadas, assim como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz (TAYLOR, 1994).

### 2.3.5 PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS NO ESTADO FRESCO

- **Exsudação**

Um dos efeitos proporcionados pela adição de fibras nas matrizes cimentíceas é a diminuição da água exsudada durante o processo de cura do compósito. Isto se deve ao fato de ser atribuída às fibras uma redução no assentamento. Desta forma, os canais capilares, formados pela exsudação, tendem a ser eliminados (SOROUSHIAN *et al.*, 1995).

Além disso, ZOLLO e ILTER (1986) e SOROUSHIAN *et al.* (1995) sugerem que a diminuição da exsudação possa ser conseqüência das fibras formarem uma malha que estabiliza a matriz, prevenindo o assentamento e a segregação dos materiais mais pesados da mistura, tais como os agregados. As fibras também podem contribuir, nesse aspecto, com o aumento da área de molhagem.

- **Trabalhabilidade**

A adição de fibras altera as condições de consistência e conseqüentemente a trabalhabilidade das argamassas, pastas e concretos. Conforme já foi mencionado, ao se adicionar fibras à mistura, adiciona-se também uma grande área superficial que requer

água de molhagem. Assim, resta uma menor quantidade de água disponível para fluidificar a mistura (FOÁ, 2002).

Devido a isso, quanto menor for o diâmetro das fibras e quanto maior for o seu comprimento, maior será a perda de fluidez da mistura. Estes parâmetros podem ser representados em conjunto através do conceito do fator de forma, já introduzido anteriormente. Assim, quanto maior o fator de forma da fibra, maior será o impacto sobre a trabalhabilidade da mistura. Por esta razão, aponta-se a adição de fibras como um elemento redutor da trabalhabilidade, podendo ocasionar prejuízos à sua compactação e à sua durabilidade e desempenho mecânico (FOÁ, 2002).

Outro possível problema que pode vir a ocorrer nos compósitos fibrosos é o aparecimento dos chamados “ouriços”, conforme ilustrado na Figura 2.31. Estes são aglomerados de fibras que foram mal distribuídas, tendo como consequência uma redução do teor de fibra homogeneamente distribuída e a configuração de pontos fracos nos locais onde os mesmos se alojam (FOÁ, 2002).



Figura 2.31 – Formação de “ouriços” nos compósitos fibrosos.

A formação dos “ouriços” deve-se à mistura inadequada dos materiais. Quanto maior o fator de forma da fibra, maior o risco de empelotamento. Além disso, a forma

como a fibra é adicionada à mistura pode também contribuir para que este fenômeno ocorra. Recomenda-se o lançamento de taxas controladas de fibras juntamente com os agregados, evitando-se virar o saco ou a caixa de uma só vez e homogeneizando a mistura antes do lançamento do cimento (FOÁ, 2002).

### **2.3.6 PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS NO ESTADO ENDURECIDO**

#### **• Resistência à Tração**

A princípio acreditava-se que a incorporação de fibras em matrizes cimentícias aumentaria, substancialmente, sua resistência à tração e à flexão. Isso porque as fibras seriam responsáveis pela obstrução da propagação de microfissuras, retardando, assim, o aparecimento de fissuras de tração e aumentando a resistência à tração do material. No entanto, pesquisas demonstraram que alguns compósitos cimentícios com fibras não apresentaram melhoras substanciais na resistência quando comparados às misturas sem fibra. Entretanto, enquanto as resistências últimas à tração não aumentaram apreciavelmente, as deformações de tração na ruptura aumentaram (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A influência da adição de fibras na resistência à tração de matrizes cimentícias, assim como nas demais propriedades mecânicas, varia em função do tipo, características e volume de fibra que é adicionado. Assim, é quase impossível traçar um comportamento padrão, pois cada caso exhibe suas particularidades. Devido a esta impossibilidade, alguns estudos sobre a influência de fibras de características diversas na resistência à tração e à flexão são brevemente comentados a seguir.

COUTTS e WARDEN (1992) demonstraram que a incorporação de polpa de sisal em argamassas, em um volume aproximado de 8% em massa, pode dobrar a resistência à flexão do compósito quando comparado à matriz sem fibras.

Esse comportamento também foi observado por GARCÉS *et al.* (2005) para argamassas com fibras de carbono. Em sua pesquisa com corpos de prova (4 x 4 x 16cm), os autores observaram um aumento na resistência à flexão de 14% quando incorporado um teor de 0,5% de fibra. Para teores acima do mencionado, o aumento de

resistência não é significativo, podendo até ocorrer sua diminuição. Isso, provavelmente, se deve ao aumento de porosidade do material provocado pelo maior teor de fibra de carbono.

OKAFOR *et al.* (1996) avaliaram o comportamento mecânico de argamassas com fibras provenientes de uma palmeira. Concluíram que a resistência à tração do compósito diminui proporcionalmente ao aumento do teor de fibra incorporada na mistura. Já a resistência à flexão aumentou em cerca de 33% para um volume ótimo de fibra de 2%.

Em pesquisas com a adição de fibras de poliéster, nylon, acrílica e aramida (WANG *et al.*, 1987) e com a adição de fibras de PET (PELISSER, 2002) foi constatado um aumento significativo na resistência à flexão de concretos.

BENTUR e MINDESS (1990) relatam, ainda, que a incorporação de fibras de aço tem, geralmente, um maior efeito na resistência à flexão de concretos, com acréscimos de mais de 100% se comparado a concretos sem fibras. Esse aumento na resistência à flexão é influenciado não apenas pelo volume de fibras, mas, também, pelo fator de forma. Quanto maior for o fator de forma, maior será o acréscimo na resistência.

DONATO *et al.* (2004), através dos resultados de ensaios de compressão diametral em amostras de concreto compactado com rolo (CCR) reforçadas e não reforçadas com fibras de polipropileno, concluíram que a adição destas fibras (teor de 0,5% em peso) produz um incremento da ordem de 50% na resistência à tração do material.

#### • Resistência à Compressão

Assim como na resistência à tração, verifica-se que ainda não há um consenso quanto ao comportamento dos materiais compósitos fibrosos de matriz cimentícia, quando submetidos a carregamentos de compressão, uma vez que resultados divergentes vêm sendo obtidos por diversos autores.

BAUER e CORTEZ (2001) constataram que a adição de fibras de nylon e de polipropileno pouco influenciou na resistência à compressão de argamassas de

revestimento. Este mesmo comportamento foi encontrado por PELISSER (2002) em seu estudo sobre a incorporação de fibras de PET em concretos.

No entanto, FUJYAMA *et al.* (1999) e MODLER *et al.* (2000) observaram que a adição de fibras de sisal em argamassas e a adição de fibras de aço em concretos, respectivamente, apresentaram uma tendência a diminuir o valor de resistência à compressão dos compósitos.

No estudo de HUGHES e FATTUHI (1977), os compósitos de matriz cimentícia e fibras de aço curtas uniformemente distribuídas apresentaram um acréscimo de resistência à compressão. Os autores atribuíram este acréscimo a vários fatores, como o comprimento e teor das fibras, o tipo e a resistência da matriz e a orientação das fibras em relação à direção do carregamento.

HUGHES e FATTUHI (1977) realizaram ainda ensaios de compressão em corpos de prova prismáticos de dimensões iguais a 100 x 100 x 300mm e cúbicos com 102mm de aresta em concretos contendo cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo (1,0:0,5:2,5:1,5), com adição de fibras de polipropileno no teor de 1,5% em volume. Foram usadas fibras com título<sup>2</sup> de 12.000 *denier* e comprimento de 51mm e fibras com título de 1.500 *denier* e comprimento de 53mm. Para os concretos reforçados com fibras de 51mm foram encontrados valores de resistência à compressão variando em torno de 30 a 32MPa. Já os concretos moldados com as fibras de 53mm de comprimento apresentaram valores de resistência da ordem de 36 a 38MPa. Estes resultados mostram a influência do comprimento das fibras na resposta mecânica do material compósito.

#### • Módulo de Elasticidade

O efeito de “ponte de transferência de tensões” desempenhado pelas fibras nas matrizes cimentícias promove não só o aumento da deformação necessária para que ocorra o aparecimento da primeira fissura, como também a deformação até o colapso.

---

<sup>2</sup> O título é a propriedade da fibra que informa o seu peso por uma determinada unidade de comprimento. Neste caso, o título de 1 *denier* equivale dizer que uma fibra de comprimento igual a 9.000m, apresenta peso de 1,0gf.

Isto ocorre porque o compósito continua a suportar o carregamento e a se deformar, mesmo após o aparecimento das fissuras (TANESI e FIGUEIREDO, 1999).

Conclui-se então que a adição de fibras numa quantidade igual ou superior ao volume crítico diminui o módulo de elasticidade dos materiais compósitos.

#### • **Tenacidade**

A tenacidade pode ser definida como a área sob a curva carga vs deslocamento de um certo material, isto é, o trabalho dissipado ou a energia absorvida pelo mesmo, em Joules, até um certo nível de deslocamento (FIGUEIREDO, 2000).

A adição de fibras em quantidades próximas ao volume crítico eleva a tenacidade dos materiais compósitos de matriz cimentícia e estes perdem as características de fragilidade. Isto ocorre porque o gasto de energia para a deformação plástica da fibra, ou para o arrancamento da fibra da matriz será maior, em decorrência do número de fibras e da diminuição da abertura das fissuras (TANESI e FIGUEIREDO, 1999).

O aumento da tenacidade dependerá de propriedades da própria fibra, tais como seu diâmetro e comprimento, módulo de elasticidade e resistência, além da aderência fibra-matriz, uma vez que estes parâmetros determinam a facilidade com que a fibra será deformada, rompida ou arrancada da matriz e os respectivos gastos de energia nestas três hipóteses.

Quanto maior for o fator de forma, maior será a tenacidade do compósito. Entretanto, este parâmetro também influi sobre a trabalhabilidade da mistura, conforme já foi comentado, e não deve ser aumentado indiscriminadamente (FOÁ, 2002).

#### • **Fissuração**

KOVLER *et al.* (1992) afirmam que as fibras trazem uma melhoria na tendência a fissuração dos compósitos tanto pelo efeito da fibra no reforço da matriz, como também pelo seu efeito na retração livre. A atuação das fibras é verificada através do aumento

do número de fissuras com largura e área total menores, decorrente do aumento da capacidade de deformação do compósito (BALAGURU e SHAH, 1992).

Este comportamento decorre do fato das fibras atuarem como pontes de transferência de tensões através das fissuras. Assim, a carga inicialmente suportada pela matriz é transferida para a fibra que intercepta a fissura, controlando a abertura da mesma. A transferência da carga para uma região não fissurada promoverá nela um incremento de tensão, que resultará no aparecimento de novas fissuras quando atingir a resistência da matriz (BENTUR e MINDESS, 1990).

O teor de fibras é muito importante no controle da fissuração. Quanto mais fibras estiverem dispersas na matriz, maior será a probabilidade de uma fibra interceptar a fissura. Além disso, o espaçamento entre elas será menor e a tensão de aparecimento da primeira fissura será maior, conforme verificado por ROMUALDI e MANDEL (1964). Outras variáveis que devem ser consideradas são o comprimento, a forma, a textura da superfície da fibra e a densidade da interface fibra-matriz (SALVASTANO JR, 1992).

Em suma, o número de fissuras será maior em um compósito reforçado em relação à matriz sem fibras, porém com abertura de fissuras menor. A abertura de fissuras será controlada e estabilizada desde que a tensão suportada pela fibra não atinja a sua tensão de ruptura e desde que haja suficiente aderência entre a fibra e a matriz (TANESI e FIGUEIREDO, 1999).

### **2.3.7 COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCEA E FIBRAS DE POLIPROPILENO**

As fibras de polipropileno podem ser usadas tanto como reforço primário quanto secundário. No primeiro caso, o teor de fibras utilizado deve ser tal que possibilite um aumento da capacidade portante do compósito após o aparecimento da fissuração, o que significa na prática que as fibras necessariamente devem exceder o volume crítico. Já no caso de reforço secundário, o teor de fibras utilizado é bem inferior ao volume crítico, normalmente entre 0,1 e 0,3% em volume, e seu emprego visa principalmente o controle da fissuração nas primeiras horas após o lançamento do concreto, pasta ou

argamassa, com o intuito de melhorar a durabilidade dos compósitos (TANESI e FIGUEIREDO, 1999).

Segundo BENTUR e MINDESS (1990), os mecanismos de transferência de tensões por meio das fibras são distintos antes e após a fissuração da matriz. Os autores defendem que antes da fissuração ocorrem transferências do tipo elásticas, onde uma tensão de cisalhamento se desenvolve na interface fibra-matriz. Quando esta tensão é maior que a resistência de aderência fibra-matriz ocorre o desligamento da fibra e, conseqüentemente, o seu deslizamento, se esta não se romper antes. Com isso o mecanismo de transferência de tensões passa a ser por atrito.

Nos compósitos de matriz cimentícia e fibras de polipropileno cuja atuação das fibras é na pós-fissuração, o mecanismo predominante é o de transferência por atrito. A eficiência desta transferência está associada às propriedades físicas e mecânicas da fibra e da matriz (SILVA, 2006).

De acordo com o tipo de tecnologia de produção utilizada, as fibras de polipropileno podem apresentar uma estrutura do tipo monofilamento, na qual são produzidas macrofibras individualmente, ou multifilamento, composta por microfibras agrupadas em forma de rede ou filme (BENTUR e MINDESS, 1990).

Observa-se que para as fibras de polipropileno individuais (monofilamento), a ancoragem mecânica e o efeito de intertravamento, resultado de uma dispersão aleatória das fibras na matriz, oferecem uma grande contribuição à eficiência na transferência de tensão. Nos filmes de polipropileno fibrilado, efeitos adicionais na aderência podem ocorrer, independentes do contato íntimo entre a matriz e a fibra. Nestes casos, a área de contato não é um parâmetro de controle da aderência, uma vez que o escorregamento pode se dar por meio de cisalhamento interno do próprio filme (BENTUR e MINDESS, 1990).

Outro fator de eficiência do reforço propiciado pelas fibras de polipropileno em função da transferência de tensões é o seu comprimento. Quanto maior a extensão da fibra inserida na matriz, maior será a resistência desenvolvida por atrito durante seu arrancamento, a qual está diretamente relacionada com a energia de fratura. Este

aumento de energia foi verificado por CORTEZ (1999), ao adicionar um teor de 500 g/m<sup>3</sup> de fibras de polipropileno de diferentes comprimentos em argamassas para revestimento, no teor de 500g/m<sup>3</sup>. A Tabela 2.3 apresenta os resultados obtidos pelo autor, na qual observa-se que a energia específica<sup>3</sup> aumentou 12% quando o comprimento das fibras utilizadas passou de 10mm para 20mm e 494 % quando passou de 10mm para 40mm.

Tabela 2.3 – Energia específica e resistência à tração na flexão de argamassa reforçada com teor de fibras de polipropileno de 500g/m<sup>3</sup> com diferentes comprimentos (CORTEZ, 1999).

<b>Comprimento da Fibra (mm)</b>	<b>Energia Específica (kN/m)</b>	<b>Resistência à Tração na Flexão (MPa)</b>
10	0,113	0,35
20	0,126	0,37
40	0,671	0,44

Com relação às propriedades mecânicas, observa-se que um baixo teor de fibras de polipropileno proporciona apenas um aumento da tenacidade às matrizes cimentícias. Tanto a resistência à tração como à compressão sofrem pouca influência com a adição destas fibras. Isto se deve às propriedades mecânicas da própria fibra, tais como baixa resistência e módulo de elasticidade. Valores de resistência à tração na flexão e suas respectivas energias específicas podem ser comparados quando da utilização de fibras de polipropileno de 20mm nos teores de 500, 1.500 e 3.000g/m<sup>3</sup> de argamassa, conforme a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Energia específica, fator de tenacidade e resistência à tração na flexão de argamassa reforçada com fibras de polipropileno de 20mm (CORTEZ, 1999).

<b>Teor de Fibra (g/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Energia Específica (kN/m)</b>	<b>Fator de Tenacidade (MPa)</b>	<b>Resistência à Tração na Flexão (MPa)</b>
500	0,126	0,376	0,37
1500	0,177	0,647	0,37
3000	0,222	0,542	0,36

<sup>3</sup> A energia específica equivale à energia total absorvida durante o ensaio dividida pela área de fratura do corpo-de-prova (Savastano *et al.*, 1994).

Em teores mais altos, as fibras de polipropileno podem acarretar uma diminuição das propriedades mecânicas, principalmente da resistência à compressão. PUERTAS *et al.* (2003) investigaram argamassas de cimento e areia com quatro tipos diferentes de cimento, reforçadas com fibras de polipropileno de 12mm de comprimento e fração volumétrica variando de 0,5 a 1% em volume de argamassa. Os resultados de resistência mecânica deste estudo estão resumidos na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Resultados de resistências mecânicas quando fibras de polipropileno são adicionadas em argamassas com variação do tipo de cimento (PUERTAS *et al.*, 2003).

<b>Tipo de Cimento</b>	<b>Fibra (%)</b>	<b>Compressão (MPa)</b>	<b>Flexão (MPa)</b>
Escória	0	89,5	7,8
	0,5	90,0	7,6
	1,0	79,0	6,7
Cinza Volante	0	39,4	6,8
	0,5	35,8	6,1
	1,0	26,9	5,5
Escória e Cinza Volante	0	30,0	4,6
	0,5	31,2	4,8
	1,0	30,1	4,8
Cimento Portland	0	53,0	7,8
	0,5	48,2	7,5
	1,0	47,6	7,4

Estes valores indicam uma pequena variação da resistência à tração na flexão, da ordem de 1MPa. Já na resistência à compressão, observa-se uma redução mais acentuada, principalmente nas argamassas com resistências menores (com exceção da argamassa constituída por cimento de escória e cinza volante). Este comportamento pode ser atribuído ao aumento da porosidade e conseqüente diminuição da densidade das argamassas devido à incorporação de ar que ocorre ao se adicionar fibras em matrizes cimentíceas (SILVA, 2006).

# CAPÍTULO 3 – Programa Experimental de Campo

---

## 3.1 METODOLOGIA

O programa experimental de campo teve como objetivo principal a determinação da resistência ao arrancamento dos grampos executados com fibras de polipropileno em substituição às barras de aço e a análise da distribuição dos esforços ao longo dos mesmos.

Este capítulo apresenta as características da área experimental, os materiais utilizados, além do projeto de instrumentação dos grampos com fibras e a metodologia de execução dos grampos e ensaios de arrancamento.

A fim de se obter os parâmetros desejados e alcançar os objetivos mencionados no Capítulo 1, seguiu-se a seguinte metodologia de trabalho para o programa experimental de campo:

- 1) Escolha de uma área experimental com talude potencialmente instável para a execução de ensaios de arrancamento em grampos convencionais e grampos com fibras de polipropileno;
- 2) Especificação dos materiais a serem utilizados nas diversas etapas, desde a instrumentação até o arrancamento dos grampos;
- 3) Definição do traço a ser adotado na confecção da nata dos grampos reforçados com fibras de polipropileno;
- 4) Projeto e execução da instrumentação composta por extensômetros elétricos distribuídos ao longo dos grampos reforçados com fibras de polipropileno;
- 5) Locação e execução dos furos no talude da área escolhida;
- 6) Transporte das barras instrumentadas para a área experimental;
- 7) Preparo das barras para serem inseridas nos furos;
- 8) Confecção *in loco* da argamassa de cimento reforçada com fibras de polipropileno de acordo com o traço pré-definido;
- 9) Injeção dos grampos com fibras de polipropileno;

- 10) Confeção *in loco* da nata de cimento dos grampos convencionais;
- 11) Injeção dos grampos convencionais;
- 12) Reinjeção de todos os grampos com a nata de cimento sem adição de fibras;
- 13) Realização de ensaios de arrancamento (após 15 dias), com monitoramento das deformações nos grampos com fibras de polipropileno.

Os procedimentos bem como as dificuldades encontradas no cumprimento destas etapas serão relatados a seguir.

### **3.2 ÁREA EXPERIMENTAL**

A área experimental escolhida para servir de apoio ao Programa Experimental de Campo situa-se no bairro de Santa Cruz da Serra, localizado no 3º distrito de Duque de Caxias, a 20Km de Petrópolis e 35Km do centro do Rio de Janeiro. Para chegar até o bairro é preciso seguir pela rodovia Washington Luís (Rio de Janeiro – Petrópolis) até chegar à saída 107, no sentido Petrópolis ou pela saída 105, no sentido Rio de Janeiro.

No local estava sendo realizada pela empresa SEEL – Serviços Especiais de Engenharia Ltda, uma obra de contenção em solo grampeado em um conjunto de taludes com inclinação 2:1 e banquetas de 3m. Os grampos foram executados com barras de aço de diâmetro de 32mm, em furos de 75mm de diâmetro. O paramento é composto por grama em placas e tela de alta resistência. Em alguns pontos que apresentavam deslizamentos e erosões associadas a deslocamentos, foi necessário o preenchimento com colunas de sacos de solo-cimento e reaterro para recompor a superfície do talude projetado (Figura 3.1).

A estrutura em questão destina-se a evitar o deslizamento da encosta existente e assim proteger a edificação em construção a jusante, um galpão de aproximadamente 130.000m<sup>2</sup> pertencente às Casas Bahia. A Figura 3.2 apresenta a vista aérea da área experimental.



Figura 3.1 – Vista do talude em solo grampeado.



Figura 3.2 – Vista aérea da área experimental.

As sondagens à percussão realizadas apontaram a existência de uma camada superficial, com cerca de 6m de espessura de solo silto-argilo-arenoso. A camada

subjacente, com espessura que vai até o limite das sondagens à percussão, em torno de 17m, apresenta solo residual composto de silte arenoso com boas características geomecânicas. A camada mais inferior, localizada imediatamente abaixo do limite das sondagens, pode ser caracterizada, conforme observações feitas no campo, como uma camada de transição entre o solo e a rocha sã, ou seja, um saprolito ou uma rocha muito decomposta, onde são visíveis os planos de alívio e de tração, com inclinações desfavoráveis em relação ao plano de corte projetado.

O trecho onde foram realizados os ensaios de arrancamento situa-se na lateral à direita do talude em que estava sendo executada a obra de contenção, conforme mostram as Figuras 3.3 e 3.4. Trata-se de uma camada de solo residual maduro, silto-arenoso, razoavelmente homogênea, em bancada de corte com aproximadamente 6m de altura.



Figura 3.3 – Localização da área destinada aos ensaios de arrancamento.



Figura 3.4 – Vista da área do talude adotada para instalação dos grampos.

### 3.3 ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DOS GRAMPOS

#### 3.3.1 GRAMPOS CONVENCIONAIS

Os grampos convencionais foram executados segundo os procedimentos consagrados no meio técnico e descritos no Capítulo 2. Tais grampos são constituídos por barras de aço inseridas nos furos do talude e envolvidas pela nata de cimento convencional.

O cimento utilizado na confecção da nata foi o Cimento *Portland* do tipo CP-II-E32 (Cimento Composto com Escória) da marca Alvorada (Grupo Holcim). Segundo especificações do fabricante, este cimento possui um tempo de início de pega de cerca de 150 minutos e resistências à compressão médias de 9, 18, 26 e 36MPa com 1, 3, 7 e 28 dias respectivamente. Sua composição combina adequadamente o baixo calor de hidratação com o aumento de resistência do Cimento Portland Comum. É recomendado

para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento, para evitar o surgimento de trincas, ou que possam ser atacadas por sulfatos.

Utilizou-se também na nata, um aditivo superplastificante da marca Vedacit Impermeabilizantes, com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade e assim possibilitar a redução do fator água-cimento da mistura, tendo em vista um ganho de resistência da mesma. De acordo com as especificações do fabricante, este produto pode reduzir em até 25% o fator água-cimento utilizado na argamassa/concreto, além de proporcionar um aumento da impermeabilidade em até 50%.

As barras utilizadas nos grampos convencionais foram de aço CA-50 B, nervuradas, de 32,0mm de diâmetro. As características deste material encontram-se resumidas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades das barras de aço utilizadas nos grampos convencionais.

Diâmetro Nominal (mm)	Massa Nominal (Kg/m)	Resistência Característica de Escoamento – $f_y$ (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento mínimo em 10 $\phi$ (%)	Módulo de Elasticidade (kN/m <sup>2</sup> )
32,0	6,313	500	1,10 x $f_y$	8	2,1 x 10 <sup>8</sup>

### 3.3.2 GRAMPOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO

Os grampos não convencionais são constituídos por um material compósito, cuja matriz é uma argamassa de cimento, areia e água e o reforço é dado pelas fibras de polipropileno, em substituição às barras de aço.

O cimento e o aditivo utilizados na confecção da argamassa destes grampos são os mesmos utilizados nos grampos convencionais. Portanto, as misturas se diferem apenas pela adição de areia e das fibras de polipropileno.

As fibras de polipropileno utilizadas foram fornecidas pela empresa Ober S.A. São fibras multifilamentos (Figura 3.5) cujas propriedades encontram-se resumidas na Tabela 3.2.



Figura 3.5 – Fibras de polipropileno multifilamentos.

Tabela 3.2 – Propriedades das fibras de polipropileno.

<b>Propriedade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Comprimento	m	0,03
Diâmetro	$10^{-5}$ m	1,8
Título	denier	2,8
Carga de Ruptura	$10^{-5}$ kN	3,5
Resistência à tração	MPa	138,3
Alongamento na Ruptura	%	70

### 3.3.3 TRAÇO DA MISTURA NATA-FIBRAS

O traço a ser utilizado na argamassa reforçada com fibras de polipropileno dos grampos não convencionais foi previamente testado no galpão da empresa SEEL. O objetivo deste teste foi evitar contratempos durante a execução dos grampos na obra, devido a possíveis dificuldades de homogeneização e trabalhabilidade da mistura.

O cimento, a areia e a água utilizados na mistura foram separados no galpão e pesados em uma balança com capacidade de 5,0Kg e precisão de 0,25Kg, As fibras de polipropileno foram pesadas no Laboratório de Pavimentação da Coppe, em balança com capacidade de 1,0Kg e precisão de 0,1g e levadas para o galpão em sacos plásticos de 10, 20, 50, 100 e 200g.

Para se atingir um traço ótimo, partiu-se do traço utilizado por Magalhães (2005) e procurou-se diminuir o fator água-cimento com o objetivo de melhorar as propriedades de resistência da argamassa, mas sem que houvesse prejuízos a trabalhabilidade. Isso só foi possível aumentando-se a porcentagem de aditivo plastificante na mistura. Desta forma, chegou-se ao traço indicado na Tabela 3.3.

Os materiais foram lançados gradativamente no misturador elétrico da marca Betomaq, até se obter uma mistura homogênea e com fluidez suficiente para que pudesse ser injetada no campo. Além do traço ótimo, tentou-se também definir a melhor seqüência para lançamento dos materiais no misturador, de forma a evitar o embaraço das fibras e garantir a sua distribuição uniforme na mistura. Esta seqüência encontra-se na Tabela 3.4.

Tabela 3.3 – Traço em peso da argamassa reforçada com fibras de polipropileno.

Material	Proporção em relação à quantidade de cimento
Cimento	1
Água	0,40
Areia	0,10
Fibras	0,005
Aditivo	0,009

Tabela 3.4 – Seqüência de lançamento dos materiais no misturador para a argamassa reforçada com fibras de polipropileno.

Ordem de Lançamento	Material	% em relação ao total de cada material
1	Água	50
2	Areia	70
3	Fibras	60
4	Cimento	25
5	Fibras	20
6	Areia	30
7	Água	40
8	Cimento	25
9	Água + Aditivo	5 e 70
10	Fibras	20
11	Cimento	25
12	Água + Aditivo	5 e 30
13	Cimento	25

### 3.4 PROJETO E EXECUÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO

#### 3.4.1 DESAFIOS ENCONTRADOS

A realização dos ensaios de arrancamento nos grampos não convencionais apresenta alguns problemas operacionais em consequência das características dos grampos executados segundo a metodologia proposta nesta pesquisa. Assim, ao se tentar substituir a barra de aço pelas fibras de polipropileno, inevitavelmente elimina-se o elemento de transmissão dos esforços para o grampo, imprescindível para a realização destes ensaios.

Além disso, a instrumentação dos grampos não convencionais também se apresentou como um desafio, uma vez que habitualmente os *strain gages* são colados diretamente sobre as barras de aço (PROTO SILVA, 2005; SPRINGER, 2006; NUNES *et al.*, 2006).

Tendo em vista estas dificuldades, procurou-se estudar uma solução para a configuração dos grampos que contemplasse dois objetivos principais e conflitantes: permitir a instalação da instrumentação e a realização dos ensaios de arrancamento, e, ao mesmo tempo, não acarretar numa contribuição de resistência significativa ao grampo, a fim de que o desempenho do material compósito pudesse ser adequadamente avaliado.

A idéia inicial era isentar ao máximo o grampo da influência de qualquer outro material que pudesse interferir no seu comportamento. Assim, tentou-se moldar previamente peças em formato de “meia-cana” com a argamassa reforçada com fibras de polipropileno, sobre as quais se pretendia colar os *strain gages* e posteriormente inseri-las nos furos do talude, completando o processo com reinjeção para preencher o restante da cavidade. A barra de aço seria introduzida apenas no trecho inicial do grampo (cerca de 1m), com um trecho externo para que fossem acoplados o macaco e a célula de carga. Desta forma, o grampo apresentaria um trecho de 1m reforçado com barra de aço e outro com 3m somente com a presença do material compósito.

Apesar desta configuração aparentar ser a ideal para os objetivos da pesquisa, infelizmente ela não pôde ser adotada, devido às dificuldades de desmoldar as peças. O seu reduzido diâmetro em relação ao comprimento total de 4m, tornou-as excessivamente esbeltas e conseqüentemente frágeis. Assim, ao tentar desmoldá-las, as peças romperam-se e descartou-se a possibilidade de seu uso.

Diante deste obstáculo, decidiu-se utilizar um material para servir de base apenas para a colagem dos *strain gages* e que não interferisse no comportamento mecânico do grampo. Optou-se então pela adoção de perfis de PVC, utilizados na construção civil em acabamentos de divisórias e esquadrias em geral. Este material, aparentemente semi-flexível, poderia ser facilmente manuseado e introduzido nos furos do talude, e, julgou-se que a sua contribuição para a resistência do grampo poderia ser desprezada.

Com isso, solucionou-se o problema da instrumentação, entretanto havia ainda a necessidade da presença da barra de aço no trecho inicial dos grampos para a realização dos ensaios de arrancamento. Temia-se que esta descontinuidade pudesse ocasionar o

seccionamento do grampo no ponto de transição de uma configuração com barra para outra sem a presença da mesma, durante a transmissão dos esforços de tração.

Decidiu-se então adotar também uma segunda metodologia, que solucionasse concomitantemente os dois problemas enfrentados e possibilitasse ao grampo apresentar uma configuração única em todo seu comprimento. A única forma encontrada para isso foi dotar os grampos não convencionais com barras de aço de diâmetro consideravelmente inferior ao das barras utilizadas nos grampos convencionais. Desta forma, eles poderiam ser instrumentados e ensaiados, e a sua resistência seria estudada e avaliada conforme seu desempenho em comparação aos demais grampos. Assim, caso fosse observado um incremento de resistência significativo nestes grampos, em relação aos grampos instrumentados com perfis de PVC, este seria atribuído à presença da barra de aço e levado em consideração na interpretação dos resultados obtidos.

Apesar da praticidade desta metodologia, a sua implementação não foi completamente satisfatória, conforme relatado no item 3.6.2.

### 3.4.2 PROJETO DA INSTRUMENTAÇÃO

Para servir de base para a colagem dos *strain gages*, a princípio tentou-se moldar em tubos de PVC, peças em formato de “meia-cana”, com a argamassa reforçada com fibras de polipropileno. Entretanto, estas peças se mostraram muito frágeis e não resistiram ao processo de desmolde, o que obrigou a procura de outra solução. Dois materiais distintos foram então escolhidos: barras de aço CA 50 de 10mm de diâmetro e perfis chatos de PVC, com seção transversal de dimensões 25 x 10 x 17,5mm, conforme Figura 3.6.

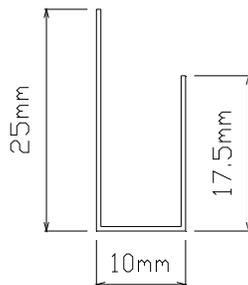


Figura 3.6 – Seção transversal do perfil de PVC usado na instrumentação dos grampos.

As barras de aço tiveram seus comprimentos projetados de forma que pudessem ser inseridas nos furos e preencher todo o grampo, com uma sobra de 1,2m na extremidade externa a fim de que fosse acoplado o macaco para a realização dos ensaios de arrancamento. O comprimento final destas barras foi de 5,2m.

Os perfis de PVC serviram apenas como superfície de colagem para os extensômetros e para tal foi necessário um comprimento de 2,5m. Para a execução dos ensaios de arrancamento nos grampos instrumentados desta maneira, foi necessário utilizar barras de aço similares às utilizadas nos grampos convencionais, porém inseridas apenas em 1,0m no interior do grampo. A determinação das deformações e respectivas tensões nestas barras foi possível graças à colagem de *strain gages* em suas extremidades.

A disposição dos *strain gages* ao longo das barras foi prevista de forma a contemplar preferencialmente a região de maiores esforços. Desta forma, deixou-se um comprimento de 0,9m sem instrumentação na extremidade final do grampo, uma vez que os esforços tendem a se anular neste trecho.

Cada uma das barras de aço recebeu um total de cinco *strain gages* (SG0 a SG4), espaçados de 0,5m entre eles, a partir de 1,1m da cabeça dos grampos (Figura 3.7). Os perfis de PVC foram instrumentados com quatro *strain gages* cada um (SG1 a SG4), também colados a cada 0,5m, a partir de 1,6m da cabeça dos grampos (Figura 3.8). Nestes casos, os SG0 foram colados nas extremidades finais das barras de aço, utilizadas para a execução dos ensaios de arrancamento.

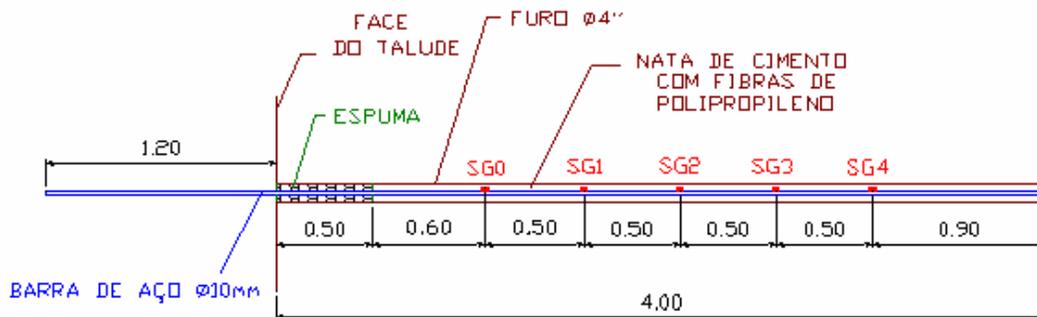


Figura 3.7 – Distribuição dos *strain gages* nos grampos com fibras instrumentados com barra de aço.

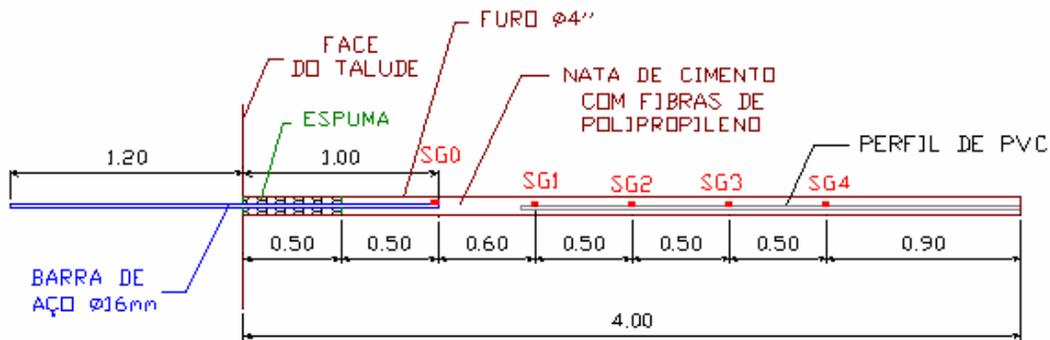


Figura 3.8 – Distribuição dos *strain gages* nos grampos com fibras instrumentados com perfis de PVC.

Para a instrumentação dos grampos reforçados com fibras de polipropileno, utilizou-se extensômetros elétricos do tipo PA – 06 – 1000BA – 120 – LEN, fabricados pela Excel Sensores Ltda. Estes pertencem ao grupo dos extensômetros coláveis de resistência elétrica, modelo para aplicações em concreto (Figura 3.9).

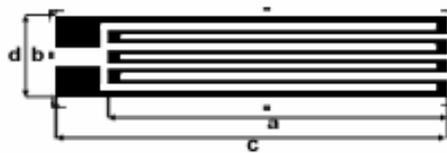


Figura 3.9 – Extensômetro de resistência elétrica para concreto

O modelo escolhido é constituído por uma base de poliamida com filme metálico com autocompensação de temperatura para aço, resistência elétrica de 120 Ohms e encapsulado com fio de cobre. As dimensões deste tipo de extensômetro encontram-se resumidas na Tabela 3.5.

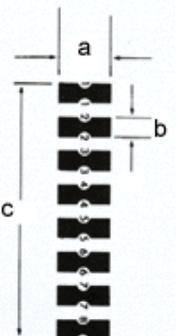
O valor teórico do Fator de Sensibilidade dos extensômetros elétricos é  $K = 2,1$ . Entretanto, na prática, este valor pode apresentar uma pequena variação, a qual deve ser informada pelo fabricante junto à identificação do lote. O lote utilizado nesta pesquisa apresentou um Fator de Sensibilidade igual a 2,0.

Em conjunto com cada um dos extensômetros, foram utilizados também dois pares de terminais de ligação coláveis, cujas características encontram-se na Tabela 3.6. A ligação dos *strain gages* ao sistema de aquisição de dados foi feita por meio de cabos flexíveis blindados contendo quatro fios de cobre revestidos, dos quais apenas três foram de fato utilizados.

Tabela 3.5 – Características dos extensômetros elétricos.

Modelos			
Material da Base e do Filme Metálico	Compensação de Temperatura	Tamanho e Forma da Grelha	Resistência (Ohms)
PA	06 – Para Aço	1000 BA	120
Dimensões			
Grelha		Total	
A (Comprimento)	B (Largura)	C (Comprimento)	D (Largura)
25,4 mm 1,00"	6,35 mm 0,250"	31,8 mm 1,25"	6,35 mm 0,250"

Tabela 3.6 – Características dos terminais coláveis.

Modelo	Código	Dimensões		
		a	b	c
	T – 100	4,75mm 0,187"	1,90mm 0,075"	22,86mm 0,900"

### 3.4.3 EXECUÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO

A execução da instrumentação seguiu as seguintes etapas:

- 1) Marcação dos pontos de fixação dos *strain gages*;
- 2) Usinagem das barras de aço nos trechos a serem colados os *strain gages*;
- 3) Preparo das superfícies de colagem, incluindo polimento, acabamento manual com lixa e limpeza;
- 4) Colagem dos *strain gages* nas barras e perfis;
- 5) Colagem dos terminais nas barras e perfis;
- 6) Soldagem dos fios e cabeamento;
- 7) Verificação do funcionamento dos *strain gages*;
- 8) Isolamento e proteção dos *strain gages* e ligações.

Para a primeira etapa, utilizou-se uma trena com resolução de 1mm e fita adesiva amarela para delimitação dos trechos com cerca de 5 cm, para colagem dos *strain gages* e terminais.

A usinagem das barras de aço para a eliminação das nervuras nos trechos delimitados foi feita em torno mecânico do Laboratório de Geotecnia da Coppe, conforme mostra a Figura 3.10.



Figura 3.10 – Usinagem das barras de aço nervuradas.

Além desse procedimento, as barras de aço também precisaram ser submetidas à soldagem de barra rosqueada de 22mm de diâmetro, com 150mm de comprimento para fixação do sistema macaco-célula de carga através de porca. A junção entre as barras de 10 e 22mm de diâmetro foi reforçada com chapinhas metálicas, de cerca de 10cm de comprimento e 2cm de largura, popularmente chamadas de bacalhauzinho (Figura 3.11).

Para dar maior estabilidade às barras de aço e aos perfis de PVC e impedir deslocamentos indesejados nas etapas seguintes, estes foram fixados a caibros de madeira com o auxílio de pregos, abraçadeiras e fita adesiva.

Após a usinagem, as barras de aço foram submetidas a um acabamento da superfície com utilização de ferramenta rotativa de alta velocidade da marca DREMEL. Em seguida foi dado um acabamento manual com lixa para metais número 120, a fim de se eliminar qualquer rugosidade da superfície que pudesse comprometer o bom funcionamento dos *strain gages*. Este lixamento foi executado com movimentos aleatórios para impedir a formação de uma direção preferencial e assim melhorar as condições de aderência dos *strain gages* às barras. O mesmo procedimento foi seguido para os perfis de PVC.



Figura 3.11 – Detalhe das chapinhas metálicas soldadas às barras de aço.

Para a limpeza da superfície, utilizou-se primeiramente algodão embebido em álcool, a fim de se eliminar os resíduos oleosos contidos nas barras. Tomou-se o cuidado de não passar mais do que duas vezes o mesmo tufo de algodão sobre a área a ser limpa, para evitar a re-contaminação da mesma. Em seguida foi passada gaze, com um único movimento cobrindo toda a área a ser utilizada. Após estas etapas a superfície encontrava-se pronta para receber os *strain gages*.

O manuseio dos *strain gages* é uma operação delicada e foi feito com extremo cuidado para evitar a perda dos mesmos. Para auxiliar esta tarefa, utilizou-se pinças e uma placa de vidro, devidamente limpa com álcool e gaze.

Assim, o *strain gage* a ser colado era transferido de sua embalagem para a placa de vidro, com a utilização de uma pinça. Em seguida, colava-se sobre ele uma fita adesiva especial, ao longo de seu eixo, para facilitar o seu posicionamento sobre a superfície delimitada na barra. O *strain gage* era então transferido da placa de vidro e posicionado sobre a superfície a ser colado, alinhado ao eixo da barra, com uma das extremidades fixa pela fita adesiva e a outra livre. A extremidade livre era então ligeiramente levantada (Figura 3.12) e aplicava-se uma pequena quantidade de cola na superfície, a qual era espalhada gradualmente ao mesmo tempo em que se levava o *strain gage* pra sua posição final.



Figura 3.12 – Processo de colagem dos *strain gages*.

A cola utilizada foi do tipo cianoacrilato da marca Loctite, cujo tempo de cura é de cerca de 2 minutos. Após este tempo de espera, no qual o *strain gage* era mantido sob pressão dos dedos sobre a superfície, retirava-se a fita adesiva especial e prosseguia-se da mesma maneira para a colagem dos terminais.

A soldagem dos fios nos terminais foi feita com solda de estanho. Os materiais e ferramentas usados nessa operação, além do próprio equipamento de solda, foram ferro de solda, pasta de solda e pinça.

Os *strain gages* foram conectados por meio de um cabo com três fios (Figura 3.13), um deles destinado apenas a eliminar o efeito do comprimento do cabo no desbalanceamento da Ponte de *Wheatstone*. Estes cabos foram previamente cortados nos tamanhos necessários para se alcançar os respectivos *strain gages* e ainda sobrar cerca de 3m para que pudessem ser conectados ao sistema de aquisição de dados no campo, a uma distância segura do local de realização do ensaio.

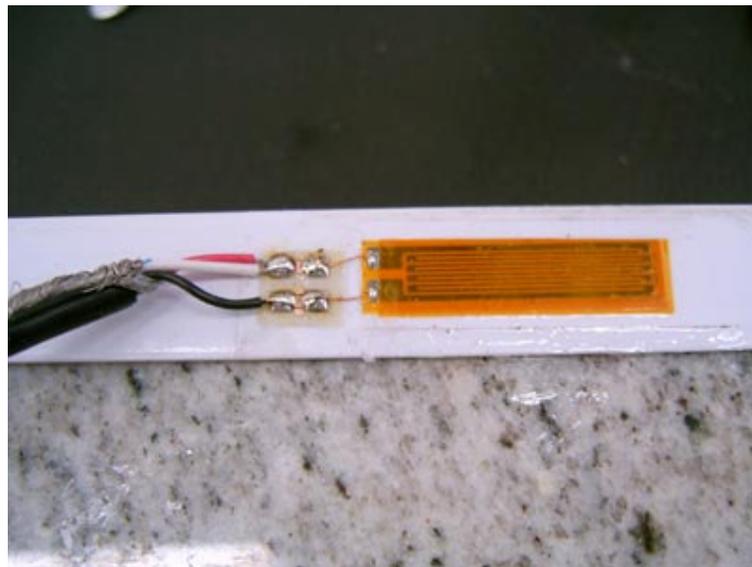


Figura 3.13 – Cabeamento dos *strain gages*.

Cada um dos cabos recebeu uma etiqueta com identificação do grampo e *strain gage* ao qual pertencia, para facilitar os trabalhos de campo e evitar conexões trocadas. As ferramentas utilizadas na etapa de cabeamento foram alicates de corte e de pressão,

descascador de fio, solda de estanho, ferro de solda, fita crepe e abraçadeiras para fixar os cabos às barras.

Concluído o cabeamento, as resistências nominais dos *strain gages* eram verificadas por meio de um multímetro, tanto nos terminais como nas extremidades dos cabos, para que se pudesse detectar qualquer falha do sistema. Na ocasião, constatou-se que todos os *strain gages* e cabos encontravam-se em perfeitas condições de funcionamento.

Para a proteção dos *strain gages* e terminais, primeiramente foi aplicada uma película de verniz para placa de circuito impresso. Este produto tem dupla função: além de proteger os *strain gages* da oxidação, age como um isolante nas barras de aço e evita o curto-circuito devido ao contato dos fios nas mesmas.

Após a aplicação do verniz, as ligações receberam uma camada de adesivo epóxi Araldite de cura rápida, como mostra a Figura 3.14a, que por sua vez confere proteção mecânica contra choques resultantes do transporte e instalação das barras. Por fim, foi passado um selador adesivo de polímero da marca Quilosa Sintex, também destinado à proteção mecânica e impermeabilização dos fios. A Figura 3.14b mostra o resultado final destas etapas.

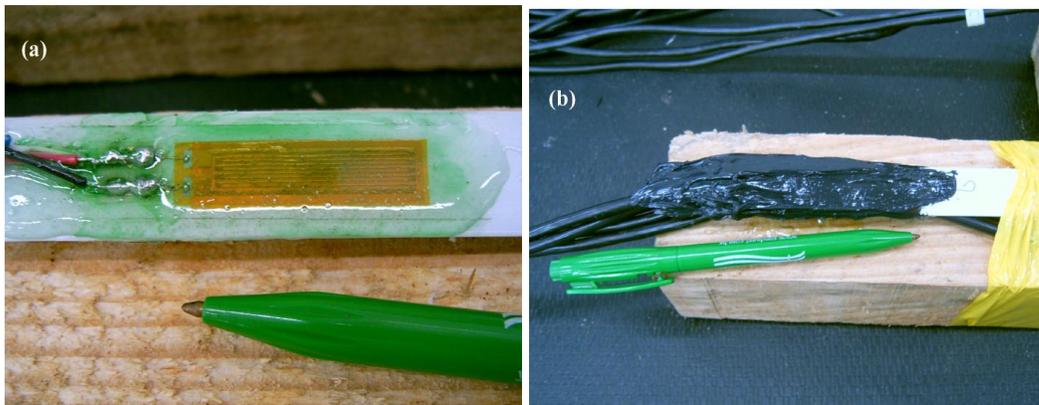


Figura 3.14 – Proteção mecânica dos *strain gages*: (a) camada de adesivo epóxi Araldite; (b) camada de selador adesivo Quilosa.

Ao final de todos estes procedimentos, as barras e os perfis encontravam-se prontos para serem transportados para o campo (Figura 3.15).



Figura 3.15 – Barras e perfis instrumentados prontos para serem transportados.

As barras de aço e perfis de PVC instrumentados foram transportados do Laboratório de Geotecnia da Coppe-UFRJ, localizado na Ilha do Fundão, para a área experimental em Santa Cruz da Serra. O trajeto de aproximadamente 40Km foi realizado em caminhão, com bastante cautela para evitar vibrações excessivas causadas por eventuais irregularidades na pista, que pudessem comprometer o funcionamento dos *strain gages*.

Para o transporte, as barras e perfis permaneceram fixados aos caibros de madeira utilizados para dar maior estabilidade durante o processo de instalação da instrumentação. Isto permitiu uma melhor acomodação dos mesmos na caminhonete, de forma a impedir o deslocamento e a rotação das peças durante o transporte.

Devido ao comprimento das barras de aço ser maior que o da caçamba do caminhão, estas precisaram ser inclinadas e apoiadas no estrado que separa a cabine da caçamba. Para evitar o deslizamento destas barras, as extremidades superiores dos caibros foram amarradas às laterais da caçamba e as extremidades inferiores ficaram apoiadas em um calço de madeira fixado à caçamba, conforme ilustra a Figura 3.16.



Figura 3.16 – Transporte das barras instrumentadas.

Assim que a caminhonete chegou à área experimental e as barras foram devidamente descarregadas, todos os *strain gages* foram mais uma vez testados com o multímetro, para verificação de uma possível perda durante o transporte, fato que se constatou não ter ocorrido.

### **3.5 EXECUÇÃO DOS GRAMPOS**

#### **3.5.1 EXECUÇÃO DOS FUROS**

Para a locação dos furos na área escolhida, primeiramente definiu-se o trecho do talude com melhores condições de trabalho, cujo solo apresentasse maior homogeneidade visualmente. Desta forma, os resultados obtidos não apresentariam discrepâncias significativas devido a diferenças nas características dos materiais atravessados pelos grampos.

Definiu-se também o espaçamento de 1m entre os furos, de forma que não houvesse interferência de um grampo na resposta de outro, durante a realização dos ensaios de arrancamento. A altura dos furos em relação ao pé do talude foi pré-estipulada em torno de 0,8m, a fim de facilitar a instalação dos equipamentos necessários para a execução dos ensaios.

Ao todo foram executados oito furos, seis destinados à injeção dos grampos reforçados com fibras de polipropileno (GP31 ao GP36) e dois destinados à injeção dos grampos convencionais (GC31 e GC32). Estes furos ficaram dispostos em linha, conforme ilustra a Figura 3.17.

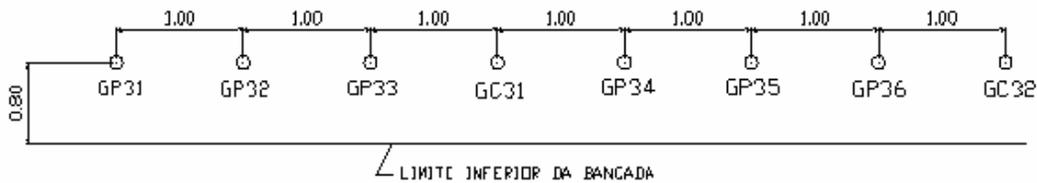


Figura 3.17 – Disposição dos furos dos grampos no talude.

Após a locação dos furos com auxílio de trena, piquetes e um barbante para o alinhamento dos mesmos, realizou-se a perfuração com equipamento elétrico da marca BOSCH, modelo BOSCHHAMMER GBH11 de 220V. O ângulo de inclinação de cerca de 15° foi atingido com a utilização de um gabarito de madeira improvisado na própria obra e acoplado ao equipamento de perfuração. Utilizou-se ar como fluido de perfuração e limpeza do furo.

O material produzido pela perfuração era analisado na boca do furo para determinação do tipo de solo que seria atravessado por cada grampo. Verificou-se então que todos os grampos seriam inseridos numa massa de solo residual silto-arenoso maduro, razoavelmente homogênea. Os furos ficaram com um diâmetro final de 10cm e comprimento total de 4m.

Após esta etapa, as extremidades dos furos foram temporariamente vedadas para evitar a penetração de materiais e de água até o momento da execução dos grampos.

### 3.5.2 PREPARO DAS BARRAS E PERFIS PARA INSERÇÃO NOS FUROS

Antes de serem inseridos nos furos, as barras e os perfis tiveram que ser preparados com a fixação de centralizadores, mangueira para reinjeção dos grampos e um obturador constituído de espuma, para garantia do trecho livre.

Os centralizadores são fundamentais para permitir o posicionamento da barra exatamente ao centro do furo e assim garantir uma cobertura uniforme da argamassa em torno da mesma. Nesta pesquisa foram utilizados centralizadores confeccionados na própria obra, a partir de tubos de PVC cortados ao longo de seu eixo e moldados em forma de “carambolas” (Figura 3.18). Estes centralizadores foram dispostos a cada 1m ao longo das barras e fixados às mesmas com arame.



Figura 3.18 – Detalhe dos centralizadores confeccionados na obra.

Para a reinjeção, foram acopladas às barras e aos perfis mangueiras de 10mm de diâmetro, nas quais foram feitos pequenos orifícios (válvulas) a cada 50cm por onde extravasaria a nata de cimento. Estes orifícios foram vedados com fita crepe para impedir a entrada de nata e entupimento da mangueira assim que as barras fossem inseridas no furo. Como a reinjeção é realizada sob pressão, esta vedação é facilmente rompida nesta etapa. A Figura 3.19 mostra um detalhe de uma barra de aço já com centralizador e mangueira de reinjeção acoplados.



Figura 3.19 – Detalhe da barra de aço, com mangueira de reinjeção e centralizador acoplados.

O obturador tem como finalidade isolar o trecho inicial do grampo das interferências geradas pela placa de reação, que é posicionada diretamente sobre o solo e induz a formação de uma zona de compressão indesejada, durante o ensaio de arrancamento. Assim, enrolou-se espuma ao longo de 50cm das extremidades das barras de aço que ficariam próximas às cabeças dos grampos. A Figura 3.20 mostra as barras de aço já prontas para serem inseridas nos furos, com todos os elementos mencionados acima já fixados.



Figura 3.20 – Barras de aço prontas para serem inseridas.

### 3.5.3 CONFEÇÃO *IN LOCO* DA ARGAMASSA REFORÇADA COM FIBRAS

A argamassa reforçada com fibras foi confeccionada na área experimental com o traço ótimo pré-definido no teste realizado no galpão da empresa SEEL, conforme item 3.5. As especificações, bem como a seqüência de lançamento dos materiais também foram respeitadas, a fim de se evitar dificuldades no processo de mistura.

As fibras de polipropileno utilizadas foram do tipo multifilamentos, que se encontram agregadas em tufo de centenas de fibras individuais. Para facilitar a homogeneização da mistura, optou-se por desagregar com as mãos estas fibras, antes delas serem lançadas no misturador elétrico.

Utilizou-se no campo o mesmo misturador elétrico da marca Betomaq, usado para o teste de traço (Figura 3.21). Para auxiliar o processo de injeção, o misturador foi posicionado acima do nível dos furos, apoiado sobre uma plataforma de madeira construída na obra (Figura 3.22). Além disso, a sua saída precisou ser aumentada, passando de 4cm de diâmetro para 10cm, uma vez que ocorreu entupimento da mesma na primeira tentativa de injeção.



Figura 3.21 – Misturador elétrico



Figura 3.22 – Detalhe do misturador sobre a plataforma de madeira.

As quantidades de material consumidas para a confecção da argamassa reforçada com fibras de polipropileno encontram-se na Tabela 3.7. Estes materiais foram pesados na própria obra, com a mesma balança utilizada no teste de traço, com exceção do cimento, que já vem embalado em sacos de 50Kg.

Tabela 3.7 – Quantidades de material consumidas na confecção da argamassa reforçada com fibras de polipropileno.

Material	Quantidade Consumida (Kg)
Cimento	150
Água	60
Areia	15
Fibra	0,75
Aditivo	1,35

A Figura 3.23a mostra a mistura imediatamente antes do lançamento do cimento e do aditivo, ou seja, apenas com água, areia e fibras, conforme a seqüência de

lançamento dos materiais recomendada. A Figura 3.23b apresenta a mistura em sua composição final.

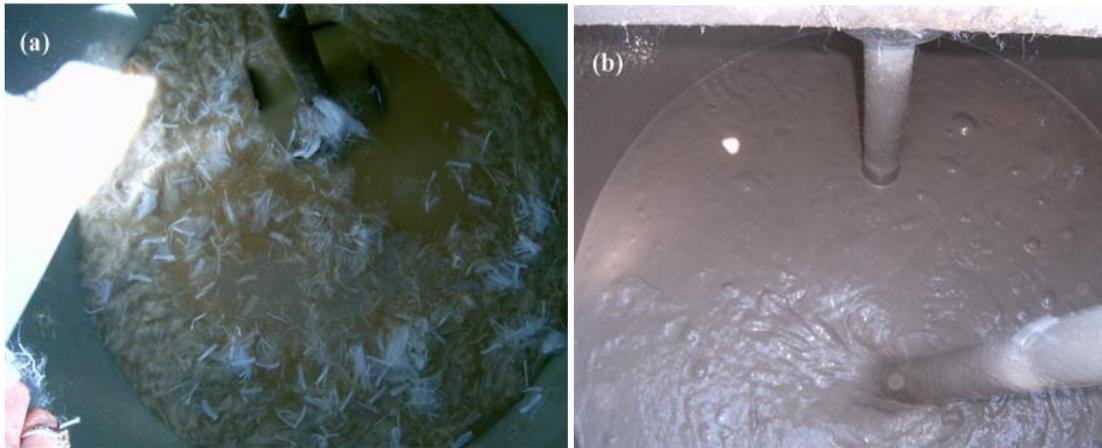


Figura 3.23 – Argamassa reforçada com fibras: (a) antes da adição de cimento e aditivo; (b) composição final.

#### **3.5.4 INJEÇÃO DOS GRAMPOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO**

A injeção da argamassa reforçada com fibras de polipropileno nos furos destinados aos grampos não convencionais foi executada com um sistema composto por bomba do tipo Hidrojet (Figura 3.24) e um conjunto de tubos de PVC, de diâmetro inferior ao diâmetro dos furos (Figura 3.25).



Figura 3.24 – Bomba de injeção.



Figura 3.25 – Tubo e mangueira de injeção.

A injeção foi feita de forma ascendente até que a argamassa extravasasse na extremidade de cada furo. Em seguida era inserida a barra instrumentada correspondente, com cautela para não haver nenhum tipo de danos aos *strain gages* (Figura 3.26).



Figura 3.26 – Inserção da barra instrumentada no furo.

No caso dos grampos instrumentados com barras de aço de 10mm de diâmetro (GP31 ao GP33), a própria barra serviu como elemento para fixação do macaco e célula

de carga no ensaio de arrancamento. Assim, estes grampos podem ser divididos em dois trechos distintos (Figura 3.27):

- 1) Trecho Livre: trecho que compreende o comprimento de 1,2m de barra de aço de 10mm de diâmetro, para fixação do macaco na parte externa ao furo e o comprimento de 50cm no interior do furo, ao longo do qual foi enrolada espuma para isolar o grampo do solo;
- 2) Trecho Injetado com barra de 10mm: trecho que corresponde ao comprimento de 3,5m, com presença de barra de aço de 10mm de diâmetro, instrumentada e envolvida por argamassa reforçada com fibras de polipropileno em contato direto com o solo.

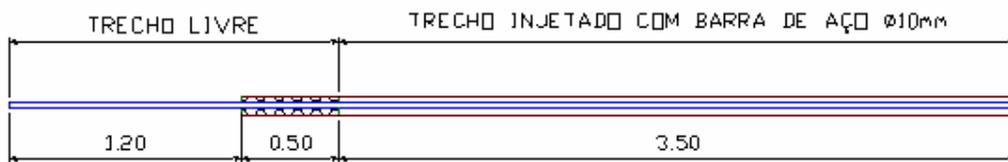


Figura 3.27 – Esquema dos grampos com fibras: GP31, GP32 e GP33.

Os grampos instrumentados com perfis de PVC (GP34 ao GP36) necessitaram de instalação de barras de aço para a realização dos ensaios de arrancamento. Estas barras de 22mm de diâmetro foram inseridas nos furos logo após a inserção dos perfis de PVC instrumentados. Desta forma, estes grampos podem ser divididos em quatro trechos distintos (Figura 3.28):

- 1) Trecho Livre: trecho que compreende o comprimento de 1,2m de barra de aço de 22mm de diâmetro, para fixação do macaco na parte externa ao furo e o comprimento de 50cm no interior do furo, ao longo do qual foi enrolada espuma para isolar o grampo do solo;

- 2) Trecho Injetado com barra de 22mm: trecho que corresponde ao comprimento de 50cm, com presença de barra de aço de 22mm de diâmetro, envolvida por argamassa reforçada com fibras de polipropileno em contato direto com o solo;
- 3) Trecho Injetado sem barra: trecho que corresponde ao comprimento de 50cm, sem a presença de barra, ou seja, constituído apenas pelo material compósito fibroso;
- 4) Trecho Injetado com perfil de PVC: trecho que corresponde ao comprimento de 2,5m, no qual se encontra o perfil de PVC instrumentado, envolvido por argamassa com fibras de polipropileno em contato direto com o solo.

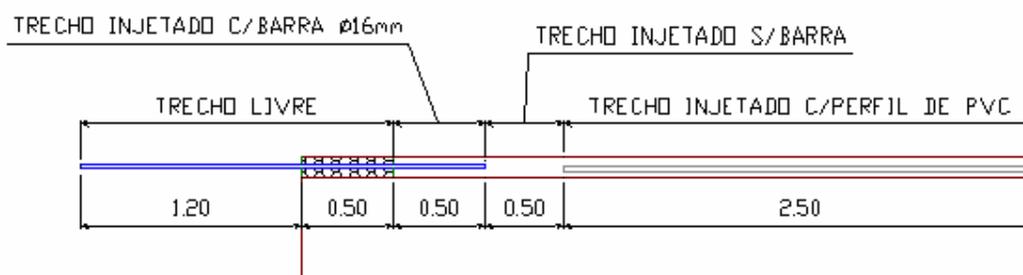


Figura 3.28 – Esquema dos grampos com fibras: GP34, GP35 e GP36.

### 3.5.5 CONFECÇÃO *IN LOCO* DA NATA DOS GRAMPOS CONVENCIONAIS

Para a confecção da nata de cimento dos grampos convencionais na área experimental, adotou-se o mesmo fator água-cimento (0,4) e a mesma proporção de aditivo superplastificante usado na composição das argamassas reforçadas com fibras.

O misturador elétrico utilizado foi o mesmo das etapas anteriores. Não houve preocupação com a ordem de lançamento dos materiais, uma vez que esta mistura não contém elementos que dificultem a sua homogeneização. Sendo assim, primeiramente foi lançada toda a água, em seguida todo o cimento e por último o aditivo. As quantidades consumidas destes materiais se encontram na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Quantidades de material consumidas na confecção da nata de cimento dos grampos convencionais.

Material	Quantidade Consumida (Kg)
Cimento	50
Água	20
Aditivo	0,45

### 3.5.6 INJEÇÃO DOS GRAMPOS CONVENCIONAIS

O equipamento utilizado na injeção dos grampos convencionais foi o mesmo usado nas injeções dos grampos reforçados com fibras. Assim que a nata de cimento extravasava no furo inseria-se a barra de aço de 32mm de diâmetro até que a mesma atingisse o final do mesmo, com uma sobra de cerca de 80cm do lado de fora para fixação do macaco e célula de carga (Figura 3.29).



Figura 3.29 – Sequência do processo construtivo dos grampos convencionais.

Estes grampos podem ser divididos em dois trechos (Figura 3.30):

- 1) Trecho Livre: trecho que compreende o comprimento de 80cm de barra de aço de 32mm de diâmetro, para fixação do macaco na parte externa ao furo e o comprimento de 50cm no interior do furo, ao longo do qual foi enrolada espuma para isolar o grampo do solo;
- 2) Trecho Injetado com barra de 32mm: trecho que corresponde ao comprimento de 3,5m, com presença de barra de aço de 32mm de diâmetro, envolvida pela nata de cimento sem adição de fibras em contato direto com o solo.

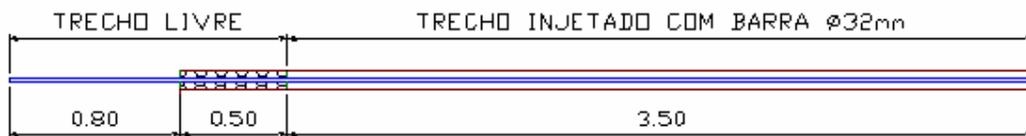


Figura 3.30 – Esquema dos grampos convencionais: GC31 e GC32.

### 3.5.7 REINJEÇÃO

A reinjeção de todos os grampos foi realizada após cerca de 1 hora da execução dos mesmos, com a utilização de nata de cimento composta de água, cimento e aditivo superplastificante, com o mesmo traço adotado para os grampos convencionais.

Este procedimento é realizado com auxílio de bomba de injeção que fornece pressão, com a qual a nata de cimento é inserida nos furos, através das mangueiras de reinjeção que foram previamente acopladas às barras e aos perfis de PVC dos grampos. A nata de cimento rompe a vedação de fita crepe feita nos orifícios das mangueiras e preenche assim os vazios que possam existir entre a parede do furo e o grampo, após a primeira injeção.

Após a reinjeção dos grampos, realizou-se uma nova verificação nas condições de funcionamento dos *strain gages* com auxílio do multímetro, na qual constatou-se a perda do SG0 pertencente ao GP31. Esta perda provavelmente se deu durante a inserção da barra instrumentada no furo.

### **3.6 ENSAIOS DE ARRANCAMENTO**

Os ensaios de arrancamento nos grampos convencionais e nos grampos reforçados com fibras de polipropileno foram realizados segundo os procedimentos consagrados no meio técnico em virtude das experiências relatadas de diversos autores. Estes ensaios foram executados após um período de 16 dias de cura dos grampos.

A metodologia adotada em todos os ensaios foi a mesma e consistiu na aplicação de uma força estática controlada à cabeça do grampo e medição dos respectivos deslocamentos e deformações, até a ruptura do mesmo.

Inicialmente estava prevista a realização de um total de 8 ensaios de arrancamento, 2 em grampos convencionais e 6 em grampos reforçados com fibras de polipropileno. Entretanto, devido a problemas enfrentados na realização de um dos ensaios, que serão discutidos mais a frente, somente 4 dos grampos reforçados com fibras puderam ser de fato ensaiados. Os grampos convencionais não apresentaram dificuldades para a execução dos ensaios e, portanto, constam dos resultados obtidos.

#### **3.6.1 MONTAGEM**

Antes da montagem dos equipamentos necessários à realização dos ensaios de arrancamento foi feita uma preparação da superfície do talude. Este acerto, feito com picareta e enxada, teve como objetivo deixar a superfície o mais plana possível para receber a placa de reação dos ensaios.

A Figura 3.31 ilustra o esquema de montagem típico dos ensaios de arrancamento. O aparato montado ao longo dos trechos externos das barras de aço é constituído por uma placa de reação, seguida da grade de reação, macaco hidráulico, célula de carga, placas e luvas. Associado a ele encontra-se um suporte formado por uma haste de aço engastada em um bloco de concreto, munida de duas luvas para fixação de uma placa metálica sobre a qual se apóia o extensômetro.

O conjunto bomba – macaco hidráulico é utilizado para fornecer a carga ao grampo. Nesta pesquisa utilizou-se um conjunto da marca Enerpac, com capacidade de 600kN.

As cargas transferidas aos grampos eram medidas pela célula de carga, com capacidade de 200kN.



Figura 3.31 – Montagem típica do ensaio de arrancamento.

O extensômetro fornece as medidas dos deslocamentos da cabeça do grampo durante a realização do ensaio. Utilizou-se extensômetro analógico com curso de 50mm e precisão de 0,01mm. O posicionamento correto deste instrumento deve ser tal que o deixe o mais paralelo possível ao eixo do grampo. Para isso, a placa sobre a qual ele se apóia era fixada na altura mais adequada, por meio do aperto das luvas localizadas acima e abaixo dela.

Nos ensaios dos grampos com fibras com a barra de aço de 10mm de diâmetro, a montagem do sistema de arrancamento foi bastante dificultada pelo comprimento da barra externo ao talude. Para fixar todo o conjunto, as porcas eram rosqueadas no trecho de barra de 22mm soldado à barra de 10mm de diâmetro, situado na extremidade do trecho livre. Este trecho, demasiadamente longo, exigiu o acoplamento de placas metálicas até atingir-se a barra de 22mm para fixação das porcas (Figura 3.32). Inicialmente, procurou-se reduzir este comprimento. Entretanto, a ausência de equipamento de solda profissional no local da obra não permitiu tal ajuste. Desta forma, essa solução foi descartada e o problema solucionado com o acoplamento das placas metálicas.

Ressalta-se que o aperto das porcas era feito com o sistema de aquisição de dados já ligado, para que se pudesse monitorar esta carga inicial, denominada aqui de “carga morta” do ensaio.



Figura 3.32 – Detalhe do extensômetro apoiado sobre o conjunto de placas metálicas.

### 3.6.2 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Uma vez montado todo o aparato necessário à realização do ensaio de arrancamento, a célula de carga era conectada ao sistema de aquisição de dados e o macaco à bomba. No caso dos grampos não convencionais, acoplavam-se também os cabos ligados aos *strain gages* ao sistema de aquisição de dados a fim de que as deformações ao longo dos grampos pudessem ser monitoradas no decorrer do ensaio.

Após o aperto das porcas, esperavam-se alguns minutos até que o conjunto formado pelas placas, macaco hidráulico e célula de carga se acomodasse e era então feita a leitura da carga morta do sistema.

Prosseguia-se então à aplicação de carga ao grampo por meio de bombeamento em estágios crescentes com incrementos de pressão de cerca de 1MPa (10Kgf/cm<sup>2</sup>). A cada estágio implementado, eram feitas as leituras dos deslocamentos no extensômetro ao longo do tempo até que estas se estabilizassem. Observado isso, dava-se início a um

novo estágio de carregamento com mais 1MPa de pressão no macaco e assim sucessivamente até que não fosse mais possível aumentar a carga do grampo.

Ao ser atingida a carga máxima, correspondente à resistência ao arrancamento do grampo, iniciava-se o descarregamento e a finalização do ensaio.

Todos os instrumentos dos ensaios de arrancamento foram monitorados de forma automática por um sistema de aquisição. Somente o extensômetro mecânico na cabeça do grampo não foi automatizado, exigindo a presença do leitor ao lado do grampo em carregamento.

A Figura 3.33 apresenta o esquema de funcionamento do Sistema de Aquisição de Dados para a obtenção das medidas de força e deformação nos grampos instrumentados. Cada um dos cinco *strain gages* colados nas barras de aço ou de PVC transmitia os sinais de variação de resistência elétrica através dos cabos aos quais estavam ligados até uma caixa, especialmente construída para este tipo de instrumentação, com pontes de *Wheatstone*.

Esta caixa foi conectada a um dispositivo que contém a placa de aquisição de dados, através de 5 cabos com conectores de 4 pinos cada um (2 de leitura e 2 de alimentação). Este dispositivo era alimentado pela energia elétrica da rede externa e a transformava para 3 Volts, que eram então fornecidos para a caixa contendo as pontes de *Wheatstone*. Esta, por sua vez, alimentava os *strain gages*. Um sexto canal do dispositivo foi utilizado para a conexão da célula de carga, energizada por uma bateria de 10 Volts independente.

Durante a realização dos ensaios, os sinais elétricos provenientes dos *strain gages* eram enviados para a placa de aquisição de dados que fazia a decodificação das leituras de voltagem e as enviava para o computador ao qual estava conectada. Este computador continha um programa de aquisição de dados que compilava todas as informações no decorrer do tempo. Os dados eram armazenados em unidades de voltagem para posteriormente serem transformados em unidades de deformação, através das fórmulas propostas no item 2.2.8.

Para a leitura da célula de carga, introduziu-se previamente no programa de aquisição de dados o valor da constante deste equipamento ( $C = 1688,658\text{Kgf} / \text{V}$ ). Desta forma, a força de tração aplicada ao grampo era fornecida diretamente pelo programa em Kgf. Observou-se que a leitura inicial após o aperto das porcas no sistema era aproximadamente constante em todos os ensaios, cerca de 650Kgf, e adotou-se este valor médio de carga morta nos cálculos dos ensaios.

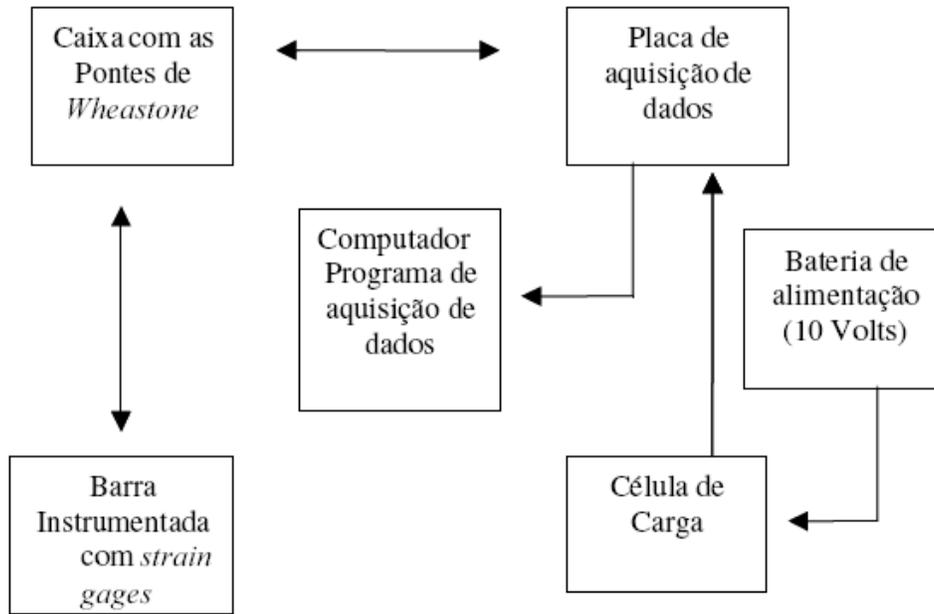


Figura 3.33 – Esquema de funcionamento do Sistema de Aquisição de Dados.

Foram ensaiados 2 grampos convencionais com sucesso. Dos 6 grampos com fibras instrumentados e instalados no talude somente 4 puderam ser de fato ensaiados. Durante a execução do primeiro ensaio de arrancamento do grampo com fibra com a barra de 10mm de diâmetro (GP31), ocorreu uma ruptura abrupta da barra de aço de diâmetro reduzido, próximo à cabeça do grampo (Figura 3.34), resultando na ejeção de todo o aparato do ensaio para trás (Figura 3.35), felizmente sem conseqüências drásticas. Por esta razão, apesar deste grampo ter suportado uma carga de tração considerável no ensaio, o que atesta o seu bom desempenho, decidiu-se não ensaiar os demais grampos com esta configuração (GP32 e GP33), por razões óbvias de segurança.



Figura 3.34 – Detalhe da barra de aço de 10mm com sinais de estrição no trecho rompido.



Figura 3.35 – Situação do aparato de ensaio após a ruptura abrupta da barra de aço do grampo GP31.

Os resultados dos ensaios de arrancamento são apresentados e discutidos no Capítulo 4.

## CAPÍTULO 4 – Análise de Resultados

---

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Antes da apresentação e análise dos resultados obtidos é importante ressaltar alguns pontos fundamentais que determinaram as diretrizes seguidas nesta fase da pesquisa. O objetivo principal aqui é estudar a viabilidade de utilização de uma nova metodologia para contenção de taludes de solo ou rocha, por meio de grampos reforçados com fibras de polipropileno em substituição às barras de aço, conforme já mencionado em capítulos anteriores.

Para que tal metodologia possa ser empregada, deve-se assegurar que os grampos reforçados com fibras ofereçam uma resistência ao arrancamento capaz de promover a estabilidade do talude. Desta forma, os ensaios realizados têm a finalidade de fornecer dados que caracterizam o comportamento mecânico dos grampos, sobretudo a resistência ao arrancamento.

Nesta pesquisa pretendia-se realizar um estudo completo do comportamento mecânico dos grampos reforçados com fibras de polipropileno, através de um amplo Programa Experimental que envolveria etapas de laboratório e de campo. Porém, devido a algumas dificuldades encontradas no decorrer dos trabalhos, algumas destas etapas não puderam ser contempladas, tais como os ensaios de compressão diametral e axial em laboratório e a exumação dos grampos no campo.

Apesar das informações fornecidas por estas etapas não serem imprescindíveis para a conclusão deste trabalho, acredita-se que as mesmas contribuiriam para o melhor entendimento do comportamento tensão-deformação dos grampos, observado nos ensaios de arrancamento, bem como dos dados obtidos na instrumentação, levando assim a uma análise mais completa do problema.

Com base nestes fatos, e tendo em vista que esta dissertação dá continuidade ao estudo realizado por MAGALHÃES (2005), que contou com a execução de tais procedimentos em seu Programa Experimental, porém não instrumentou os grampos em campo, decidiu-se agregar todas as informações e dados obtidos nestes trabalhos e assim realizar uma análise mais detalhada e conclusiva dos mesmos. Em outras palavras, procurou-se confrontar os resultados fornecidos pelas campanhas experimentais de cada um dos autores, de forma que uma pudesse complementar e reforçar as premissas de cálculo da outra e assim resultar numa análise mais fundamentada.

Desta forma, serão analisados os resultados referentes a três baterias de ensaios de arrancamento, identificadas a seguir:

- Bateria 1: Ensaios de arrancamento realizados por MAGALHÃES (2005) em grampos convencionais e não convencionais, cujas dimensões são apresentadas respectivamente nas Figuras 4.1 e 4.2, instalados em solo residual de gnaiss, sem instrumentação e com exumação de 2 grampos;
- Bateria 2: Ensaios de arrancamento realizados por MAGALHÃES (2005) em grampos convencionais e não convencionais, cujas dimensões são apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.2 respectivamente, instalados em solo residual de gnaiss, sem instrumentação e posteriormente exumados;
- Bateria 3: Ensaios de arrancamento realizados na presente pesquisa em grampos convencionais e não convencionais, cujas características foram apresentadas no Capítulo 3, com instrumentação e não exumados.

A Tabela 4.1 resume as principais informações de cada uma das baterias de ensaios. Os grampos ensaiados foram nomeados de forma a indicar o tipo de grampo, convencional (GC) e com fibras (GP), a bateria de ensaios respectiva (1, 2 ou 3) e o número do ensaio (1 a 6).

Este capítulo apresenta a caracterização do comportamento mecânico dos grampos reforçados com fibras de polipropileno, analisado conforme a seguinte metodologia:

- 1) Apresentação das curvas Carga vs Deslocamento da cabeça do grampo, obtidas nas três baterias de ensaios;
- 2) Apresentação dos dados obtidos na exumação dos grampos das Baterias 1 e 2;
- 3) Apresentação das curvas reais de distribuição do carregamento ao longo dos grampos reforçados com fibras da Bateria 3, obtidas a partir dos dados da instrumentação;
- 4) Apresentação de curvas hipotéticas de distribuição do carregamento ao longo dos grampos das Baterias 1, 2 e 3, com base nas informações e conclusões obtidas nas etapas 2 e 3;
- 5) Cálculo das resistências ao arrancamento de todos os grampos, com base nas diferentes hipóteses de distribuição do carregamento, admitidas na etapa 4.

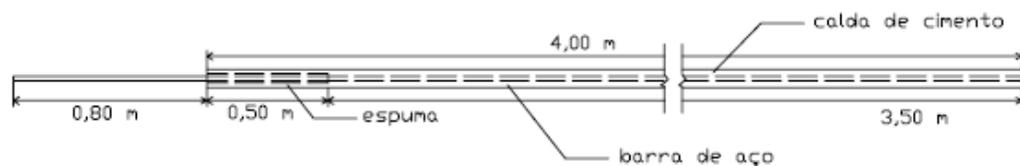


Figura 4.1 – Detalhe dos grampos convencionais das Baterias 1 e 2 (MAGALHÃES, 2005).

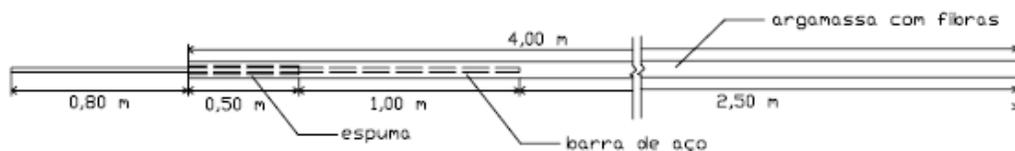


Figura 4.2 – Detalhe dos grampos com fibras de polipropileno das Baterias 1 e 2 (MAGALHÃES, 2005).

Tabela 4.1 – Resumo das principais características dos grampos ensaiados.

Bateria	Grampo	Tipo	Comprimento Injetado com barra de aço (m)	Comprimento Injetado sem barra de aço (m)	Exumação	Instrumentação
1	GC11	Convencional	3,5	-	N	N
	GP11	Com fibras	1,0	2,5	S	N
	GP12	Com fibras	1,0	2,5	S	N
	GP13	Com fibras	1,0	2,5	N	N
	GP14	Com fibras	1,0	2,5	N	N
	GP15	Com fibras	1,0	2,5	N	N
2	GC21	Convencional	3,5	-	S	N
	GP21	Com fibras	1,0	2,5	S	N
	GP22	Com fibras	1,0	2,5	S	N
	GP23	Com fibras	1,0	2,5	S	N
	GP24	Com fibras	1,0	2,5	S	N
	GP25	Com fibras	1,0	2,5	S	N
3	GC31	Convencional	3,5	-	N	N
	GC32	Convencional	3,5	-	N	N
	GP31	Com fibras	3,5*	-	N	S
	GP32	Com fibras	3,5*	-	-	-
	GP33	Com fibras	3,5*	-	-	-
	GP34	Com fibras	0,5	3,0	N	S
	GP35	Com fibras	0,5	3,0	N	S
	GP36	Com fibras	0,5	3,0	N	S

\*Grampos reforçados com fibras, porém com a presença de barra de aço de 10,0mm de diâmetro, para servir de base para colagem dos *strain gages*.

## 4.2 CURVAS CARGA VS DESLOCAMENTO

Neste item, não são reportadas as análises particulares dos grampos das Baterias 1 e 2, visto que isso já foi feito na dissertação de Magalhães (2005). Assim, para estas baterias, são apenas apresentados os valores das cargas e deslocamentos obtidos nos ensaios de arrancamento, que posteriormente serão utilizados para o cálculo das

respectivas resistências. Já os grampos da Bateria 3 terão seu comportamento e valores de carga e deslocamento comentados.

#### 4.2.1 BATERIA 1

A Bateria 1 contou com um total de seis grampos ensaiados, sendo um grampo convencional e cinco grampos reforçados com fibras de polipropileno. A Figura 4.3 apresenta as curvas Carga vs Deslocamento dos grampos desta bateria e a Tabela 4.2 exibe os valores das cargas de arrancamento de pico  $T_m$  e residual  $T_{res}$ , bem como os respectivos deslocamentos da cabeça de cada grampo, correspondentes a estas cargas.

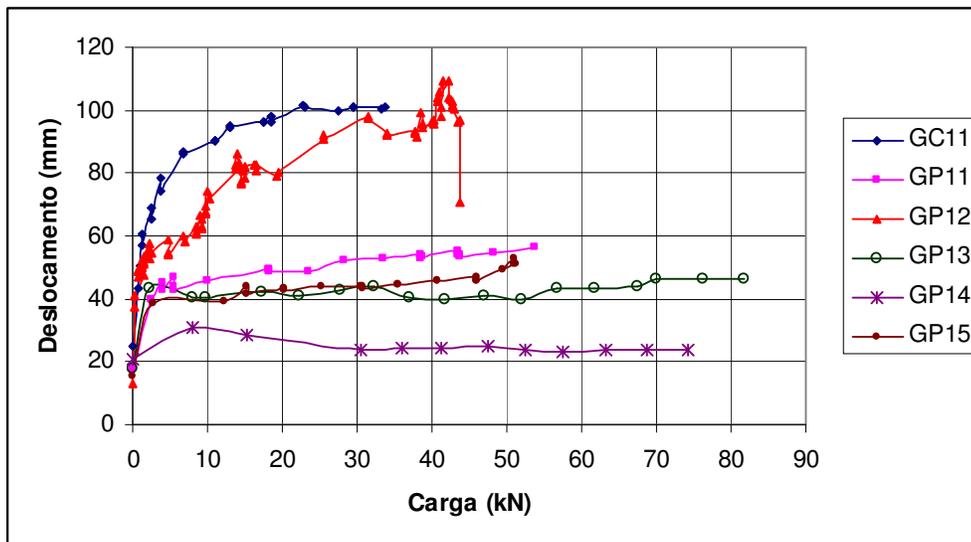


Figura 4.3 – Curvas Carga vs Deslocamento dos grampos da Bateria 1 (MAGALHÃES,2005).

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de arrancamento dos grampos da Bateria 1 (MAGALHÃES,2005).

Grupo	Cargas		Deslocamentos	
	$T_m$ (kN)	$T_{res}$ (kN)	$\delta_m$ (mm)	$\delta_{res}$ (mm)
GC11	101,8	100,0	22,8	33,3
GP11	56,5	56,5	53,8	53,8
GP12	105,9	70,5	42,2	43,7
GP13	46,5	46,1	70,1	81,8
GP14	30,8	23,6	8,1	74,1
GP15	49,7	49,7	51,1	51,1

#### 4.2.2 BATERIA 2

Similar à Bateria 1, a Bateria 2 também contou com a realização de um total de seis ensaios de arrancamento, sendo um ensaio em grampo convencional e cinco ensaios em grampos reforçados com fibras de polipropileno. Estes grampos foram posteriormente exumados. A Figura 4.4 apresenta as curvas Carga vs Deslocamento dos grampos e a Tabela 4.3 exibe os valores das cargas de arrancamento de pico  $T_m$  e residual  $T_{res}$  e os respectivos deslocamentos da cabeça do grampo, correspondentes a estas cargas.

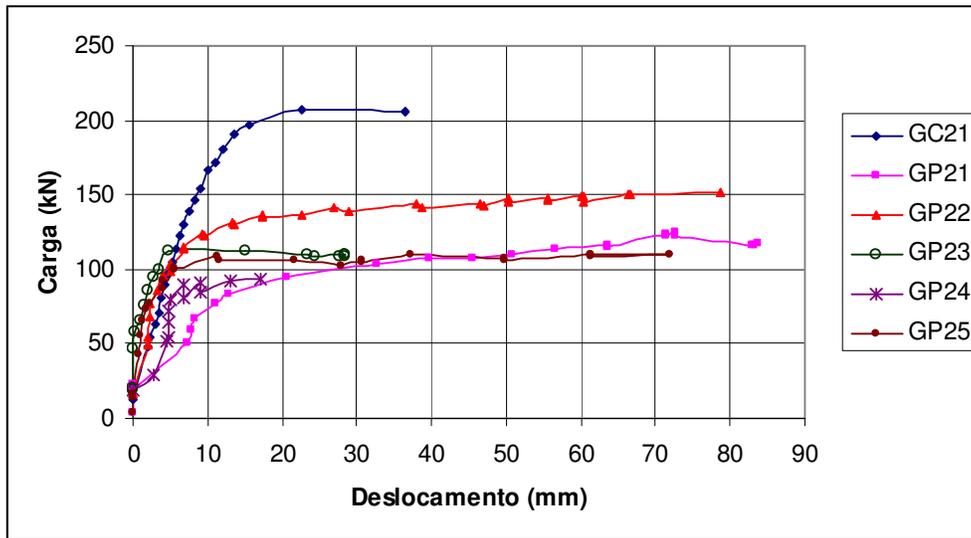


Figura 4.4 – Curvas Carga vs Deslocamento dos grampos da Bateria 2 (MAGALHÃES, 2005).

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de arrancamento dos grampos da Bateria 2 (MAGALHÃES, 2005).

Grampo	Cargas		Deslocamentos	
	$T_m$ (kN)	$T_{res}$ (kN)	$\delta_m$ (mm)	$\delta_{res}$ (mm)
GC21	206,5	205,8	22,6	36,5
GP21	130,6	117,3	72,8	83,7
GP22	151,1	151,1	78,6	78,6
GP23	112,5	110,5	15,2	28,4
GP24	93,0	93,0	17,1	17,1
GP25	112,8	110,3	71,9	71,9

### 4.2.3 BATERIA 3

Para esta Bateria, executou-se um total de oito grampos, sendo dois convencionais e seis reforçados com fibras de polipropileno. Estes últimos receberam *strain gages* para monitoração das deformações durante o arrancamento, conforme descrito no Capítulo 3. Porém, devido a dificuldades encontradas na execução dos ensaios e por razões de segurança, os grampos GP32 e GP33 não foram submetidos ao arrancamento.

A Figura 4.5 apresenta as curvas Carga x Deslocamento dos grampos desta bateria e a Tabela 4.4 exibe os valores das cargas de arrancamento de pico  $T_m$  e residual  $T_{res}$  e os respectivos deslocamentos da cabeça do grampo.

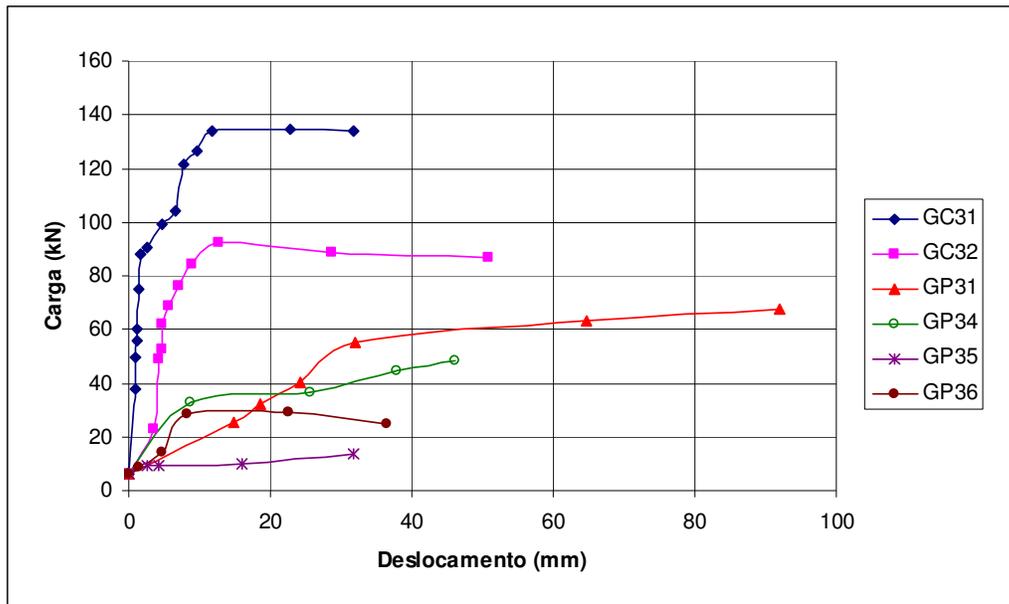


Figura 4.5 – Curvas Carga vs Deslocamento dos grampos da Bateria 3.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de arrancamento dos grampos da Bateria 3.

Grampo	Cargas		Deslocamentos	
	$T_m$ (kN)	$T_{res}$ (kN)	$\delta_m$ (mm)	$\delta_{res}$ (mm)
GC31	134,8	134,0	22,9	31,8
GC32	92,2	86,6	12,7	50,9
GP31	67,9	67,9	92,1	92,1
GP34	48,4	48,4	46,1	46,1
GP35	13,5	13,5	31,8	31,8
GP36	29,2	24,7	22,6	36,5

Observa-se uma variação na carga máxima resistida pelos grampos da Bateria 3 de 13,5kN (GP35) a 134,8kN (GC31). Os dois grampos convencionais apresentaram comportamento similar entre si, com uma carga de arrancamento média de 113,5kN e carga residual média de 110,3kN

Por outro lado, os quatro grampos reforçados com fibras de polipropileno podem ser divididos em dois grupos, de acordo com as cargas máximas de arrancamento observadas para cada um deles: o primeiro, composto pelos grampos GP31 e GP34, apresentou um valor médio de 58,2kN para as cargas de arrancamento máxima e residual, enquanto o segundo, composto pelos grampos GP35 e GP36, apresentou valor médio de 21,4kN e 19,1kN para estas mesmas cargas.

O valor médio da carga de arrancamento observado para os grampos GP31 e GP34 corresponde a 51,3% da carga de arrancamento média dos grampos convencionais. O valor médio da carga residual destes mesmos grampos equivale a 52,8% da carga residual média verificada nos grampos convencionais.

O maior valor de carga de arrancamento observado para o grampo GP31, em relação aos demais grampos reforçados com fibras de polipropileno, pode ser atribuído ao fato deste grampo ter sido executado com uma barra de aço de 10mm de diâmetro, apenas para facilitar o processo de instrumentação do mesmo. Apesar do diâmetro reduzido desta barra, em comparação às utilizadas nos grampos convencionais, sua rigidez contribuiu para o incremento da resistência ao arrancamento deste grampo.

Apesar de alguns valores de carga de arrancamento dos grampos reforçados com fibras de polipropileno terem sido mais baixos do que o esperado, nota-se que em todos eles esta carga foi mantida sem quedas significativas para grandes deslocamentos, o que corrobora o fato das fibras contribuírem para melhorar as propriedades de pós-pico do material compósito.

Em termos de deslocamentos, os grampos GP34, GP35 e GP36 apresentaram comportamento bastante semelhante entre si, com deslocamentos totais entre 30 e 46mm. O grampo GP31 apresentou comportamento peculiar e registrou o maior deslocamento, da ordem de 90mm.

Observa-se também que os deslocamentos de pico dos grampos reforçados com fibras são consideravelmente maiores que os dos grampos convencionais. Este fato advém do comportamento mais frágil da nata de cimento em relação à mistura com fibras, além do módulo de elasticidade elevado da barra de aço, utilizada nos grampos convencionais, que faz com que estes grampos sejam mais rígidos.

### **4.3 DADOS DA EXUMAÇÃO**

Após serem ensaiados, 2 grampos da Bateria 1 e todos os grampos da Bateria 2 foram exumados, o que contribuiu para o melhor entendimento do comportamento dos mesmos quando solicitados pela carga de arrancamento. Além de informações a respeito do solo circundante, esta prática comprovou a adequação da técnica de execução dos grampos e a mobilização da resistência à tração da argamassa reforçada com fibras de polipropileno, uma vez que foram detectadas fissuras ao longo do comprimento destes grampos. A Figura 4.6 apresenta uma vista geral dos 6 grampos exumados da Bateria 2, incluindo-se o grampo convencional, com a descrição do solo circundante.

Na Bateria 1, foram exumados apenas os grampos GP11 e GP12. Verificou-se que a execução do furo para o grampo GP12 não obedeceu ao padrão de qualidade necessário às perfurações e por isso, este grampo sofreu um desvio inaceitável que promoveu sua ancoragem no grampo vizinho (GP11). Isso justifica o valor elevado da carga de arrancamento observado para este grampo, que será desconsiderado mais adiante, por não retratar a realidade do sistema grampo-solo.

O surgimento de fissuras indica que a carga de pico do ensaio gerou uma tensão superior à resistência à tração da matriz cimentícia. As fibras presentes na nata funcionaram como “ponte de transferência” de tensões, mantendo a carga máxima resistida pelos grampos, mesmo após a sua ruptura.

EXUMAÇÃO DOS GRAMPOS DE POLIPROPILENO – Descrição e Ilustração				
0,0 - 1,0 m	1,0 - 2,0 m	2,0 - 3,0 m	3,0 - 4,0 m	
<b>GRAMPO CONVENCIONAL</b>				
Silte areno-argiloso, cinza esverdeado	Silte areno-argiloso com intercalações de silte argiloso branco	Silte areno-argiloso, cinza esverdeado	Silte areno-argiloso com intercalações de silte argiloso branco	
<b>GRAMPO GP21</b>				
Silte areno-argiloso, cinza esverdeado com intercalações de silte argiloso branco.	Silte areno-argiloso, cinza esverdeado com intercalações de silte argiloso branco.	Silte areno-argiloso, cinza esverdeado com intercalações de silte argiloso branco.	Silte areno-argiloso, cinza esverdeado com intercalações de silte argiloso branco.	
<b>GRAMPO GP22</b>				
Silte areno-argiloso, cinza esverdeado com intercalações de silte argiloso branco.	Silte areno-argiloso, amarelo	Silte areno-argiloso, vermelho com intercalações de silte argiloso branco	Silte areno-argiloso, vermelho com intercalações de silte argiloso branco	
<b>GRAMPO GP23</b>				
Silte areno-argiloso, amarelo cortado por um veio de 20 cm de silte argiloso branco.	Silte areno-argiloso, amarelo	Silte areno-argiloso, vermelho com intercalações de silte argiloso branco	Silte areno-argiloso, cinza esverdeado com intercalações de silte argiloso branco.	
<b>GRAMPO GP24</b>				
Silte areno-argiloso, cinza esverdeado com intercalações de silte argiloso branco.	Silte areno-argiloso, vermelho com intercalações de silte argiloso branco	Silte argiloso branco	Silte areno-argiloso, amarelo intercalado com silte areno-argiloso, vermelho e com o silte argiloso branco	
<b>GRAMPO GP25</b>				
Silte areno-argiloso, cinza esverdeado	Silte areno-argiloso, cinza esverdeado com intercalações de silte argiloso branco	Silte areno-argiloso, cinza esverdeado com intercalações de silte argiloso branco	Silte areno-argiloso, cinza esverdeado com intercalações de silte argiloso branco	

Figura 4.6 – Perfil dos grampos exumados da Bateria 2 e descrição do solo circundante (MAGALHÃES, 2005).

Conforme visto no Capítulo 2, a presença das fibras nos compósitos, de maneira geral, tende a aumentar o número de fissuras e reduzir a abertura das mesmas. Conseqüentemente, a distribuição destas fissuras ao longo do comprimento dos grampos retrata a forma com que estes foram solicitados durante os ensaios de arrancamento. Assim, o trecho mais fissurado do grampo indica onde foi mobilizada a maior tensão de tração, decorrente da maior carga, visto que a área da seção transversal é constante. Analogamente, o trecho com ausência ou menor número de fissuras sugere o desenvolvimento de cargas mais baixas, cujas tensões resultantes não atingiram a resistência à tração da matriz.

Em sua pesquisa, Magalhães (2005) realizou um mapeamento das fissuras existentes em todos os grampos reforçados com fibras de polipropileno da Bateria 2, após a exumação dos mesmos. Com isso, verificou-se que a região próxima da ponta (extremidade oposta à cabeça) é a menos solicitada destes grampos. Em todos eles, foi observado um trecho final sem fissuras de aproximadamente 1,0m de comprimento, que corresponde a um terço do comprimento total injetado sem barra de aço nestes grampos. A Tabela 4.5 apresenta o comprimento exato do trecho sem fissuras para cada um dos grampos da Bateria 2. As Figura 4.7 e 4.8 ilustram o padrão de fissuração típico observado.

Tabela 4.5 – Comprimento sem fissuras na extremidade final dos grampos com fibras da Bateria 2 (MAGALHÃE, 2005).

Grampo	GP21	GP22	GP23	GP24	GP25
L (m)	1,49	0,92	0,87	1,20	1,25



Figura 4.7 – Esquema do padrão de fissuração típico dos grampos com fibras da Bateria 2 (MAGALHÃES, 2005).



Figura 4.8 – Detalhe das fissuras do grampo GP21 (MAGALHÃES, 2005).

#### 4.4 DISTRIBUIÇÃO REAL DO CARREGAMENTO (BATERIA 3)

A instrumentação dos grampos com fibras da Bateria 3 permitiu a obtenção de curvas reais de distribuição das cargas de tração ao longo dos mesmos durante os ensaios de arrancamento. Para isso, cada grampo recebeu um total de cinco *strain gages*, conforme ilustrado nas Figuras 3.7 e 3.8.

Os *strain gages* foram acoplados a um Sistema de Aquisição de Dados que permitiu o monitoramento completo de todos os ensaios. Conforme os grampos eram solicitados, as leituras de voltagem eram armazenadas em um arquivo digital, para análise posterior e cálculo das deformações sofridas e tensões correspondentes, através das Equações 2.3 e 2.4.

Infelizmente, os *strain gages* dos grampos GP35 e GP36 não resistiram ao processo de arrancamento e foram danificados logo no início dos ensaios. Desta forma, não foi possível obter a curva de distribuição do carregamento para estes grampos. Entretanto, a instrumentação dos grampos GP31 e GP34 foi bem sucedida e forneceu dados consistentes de todo o ensaio de arrancamento, com exceção do SG0 do grampo GP31, que já havia sido perdido durante a fase de injeção.

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam a distribuição das cargas de tração durante os ensaios de arrancamento, ao longo dos grampos GP31 e GP34, respectivamente.

Observa-se claramente em ambos os casos que as cargas mobilizadas distribuem-se em função não linear e decrescente da cabeça até a extremidade final do grampo.

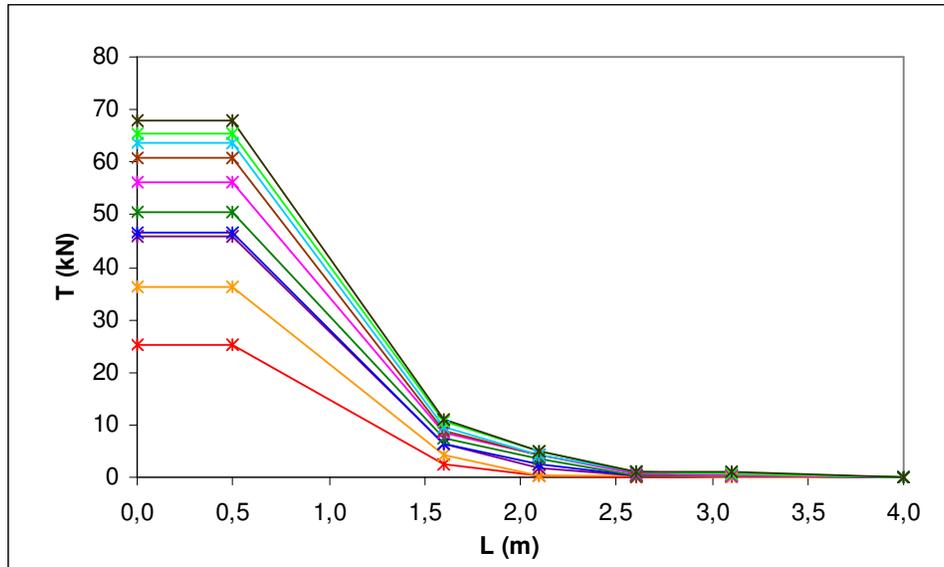


Figura 4.9 – Distribuição do carregamento ao longo do grampo GP31.

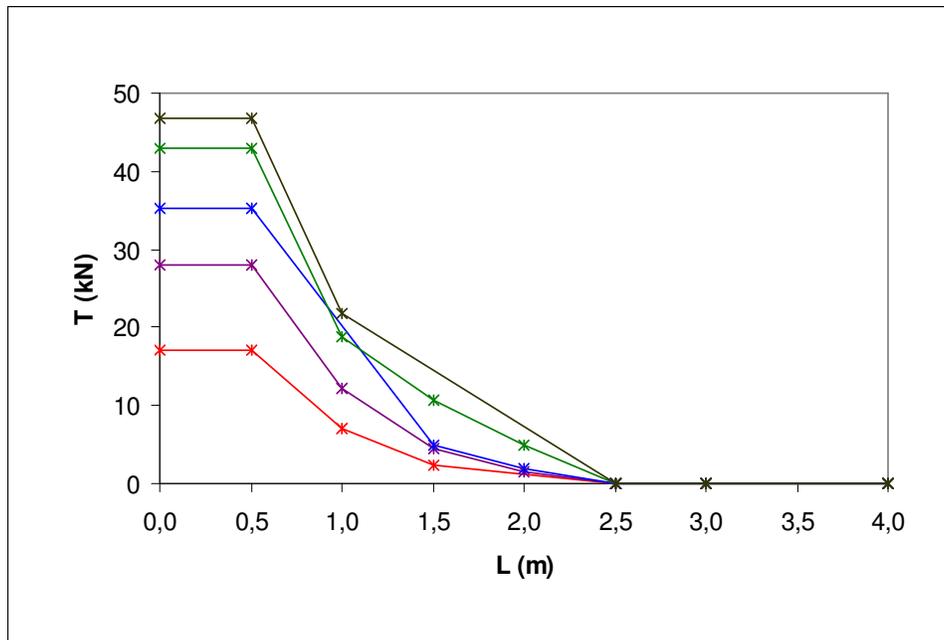


Figura 4.10 – Distribuição do carregamento ao longo do grampo GP34.

Verifica-se também que cerca de 1,5 m do trecho final destes grampos apresentou deformações e, portanto, cargas praticamente nulas, o que corrobora os resultados da

exumação dos grampos da Bateria 2, os quais indicaram que não há fissuras neste trecho.

#### 4.5 DISTRIBUIÇÃO HIPOTÉTICA DE CARREGAMENTO

Com base nos resultados obtidos nos itens 4.3 e 4.4, propõem-se três modelos hipotéticos para a distribuição do carregamento nos grampos. Em todos eles, admite-se que o atrito mobilizado durante o arrancamento é constante ao longo do comprimento dos grampos, resultando assim numa distribuição linear das cargas de tração. As peculiaridades de cada hipótese serão descritas a seguir. Cabe ressaltar que a hipótese 1 é válida para todos os grampos, enquanto as hipóteses 2 e 3 aplicam-se somente aos grampos reforçados com fibras.

##### • Hipótese 1

Admite-se que a resistência por atrito distribui-se de maneira uniforme ao longo de todo o comprimento do grampo, exceto ao longo do trecho livre, onde a barra de aço não possui qualquer contato com a nata de cimento circundante. Conseqüentemente, a distribuição da força de tração (T) ao longo do grampo será do tipo triangular, com valor máximo próximo à cabeça do grampo e nulo na extremidade final do mesmo. A Figura 4.11 ilustra as distribuições do atrito lateral mobilizado  $Q_{gc}$  (grampos convencionais) e  $Q_{gp}$  (grampos com fibras) e da carga de tração T ao longo dos grampos para esta hipótese. As Equações 4.1 e 4.2 expressam os valores dos respectivos atritos.

$$Q_{gc} = \frac{T_m}{L_{inj}} \quad (4.1)$$

$$Q_{gp} = \frac{T_m}{L_{inj}} \quad (4.2)$$

Onde:  $T_m$  = carga máxima verificada durante o ensaio de arrancamento;

$L_{inj}$  = comprimento total injetado do grampo;

$Q_{gc}$  = atrito mobilizado no grampo convencional;

$Q_{gp}$  = atrito mobilizado no grampo com fibras.

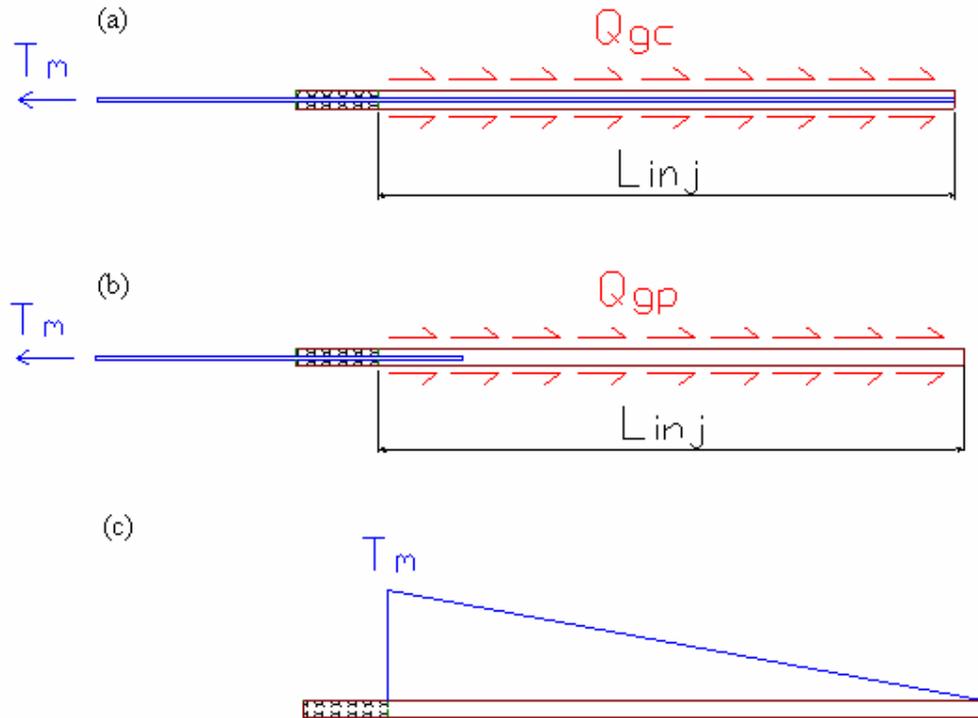


Figura 4.11 – Distribuição do atrito mobilizado nos grampos: (a) convencionais; (b) com fibras e (c) distribuição da carga de tração para a Hipótese 1.

• **Hipótese 2**

Neste caso, calcula-se a parcela do trecho injetado sem barra para resistir à carga de arrancamento nos grampos com fibras de polipropileno, descontando-se a contribuição de carga resistida pelo trecho injetado com barra de aço, adotada igual à do grampo convencional, conforme as seguintes equações:

$$T_{gc} = Q_{gc} \times L_{gc} \quad (4.3)$$

$$T_{gp} = T_m - T_{gc} \quad (4.4)$$

Onde:  $L_{gc}$  = comprimento do trecho injetado com barra;

$T_{gc}$  = parcela de carga resistida pelo trecho com barra;

$T_{gp}$  = parcela de carga resistida pelo trecho sem barra.

O valor do atrito lateral mobilizado passa então de  $Q_{gc}$ , no trecho com barra, para  $Q_{gp}$ , no trecho sem barra, obtido a partir da equação:

$$Q_{gp} = \frac{T_{gp}}{L_{gp}} \quad (4.5)$$

Onde:  $L_{gp}$  = comprimento do trecho injetado sem barra.

Em cada um destes trechos estes atritos se mantêm constantes e, portanto, resultam em distribuições triangulares da carga de tração T, conforme ilustra a Figura 4.12.

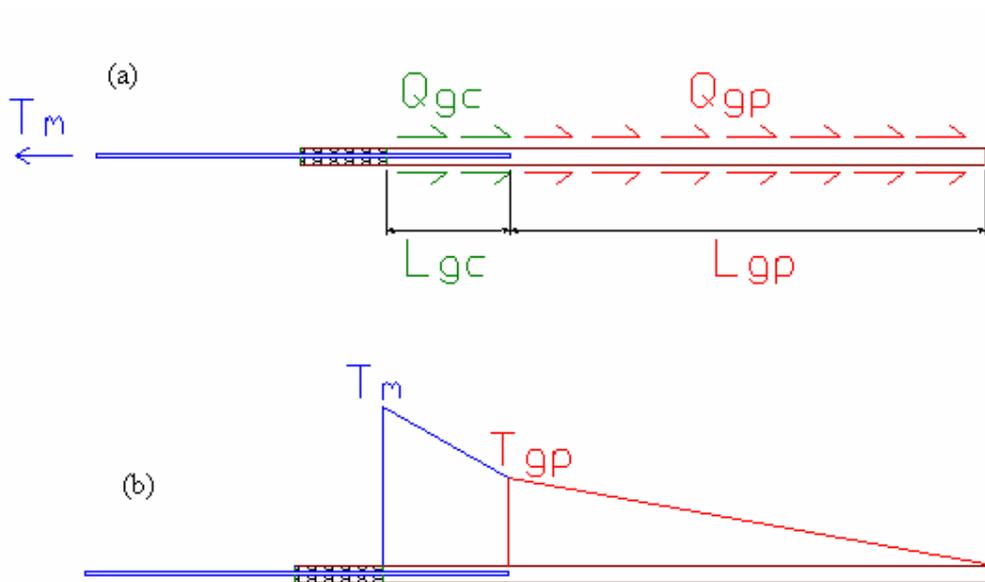


Figura 4.12 – Distribuição de: (a) atrito mobilizado e (b) carga de tração ao longo dos grampos com fibras para a Hipótese 2.

- **Hipótese 3**

Similar à Hipótese 2, porém, neste caso, considera-se a distribuição do carregamento somente ao longo do trecho fissurado dos grampos. Para isso, foram utilizados os resultados obtidos na exumação, relativos ao comprimento sem fissuras dos grampos da Bateria 2 (Tabela 4.5). Para os grampos da Bateria 1, estimou-se um trecho sem fissuras

de 1,0m, com base no que foi observado na exumação da Bateria 2. Já para os grampos da Bateria 3, adotou-se um comprimento de 1,5m sem mobilização de carga de tração, de acordo com os resultados da instrumentação dos grampos GP31 e GP34. Assim, a carga de tração é suposta triangular, como nas demais hipóteses, porém anula-se no início do trecho sem fissuras do grampo. A Figura 4.13 ilustra este modelo de carregamento, calculado através da seguinte equação:

$$Q_{gp} = \frac{T_{gp}}{L_{fis}} \quad (4.6)$$

Onde:  $L_{fis}$  = comprimento do trecho injetado sem barra fissurado.

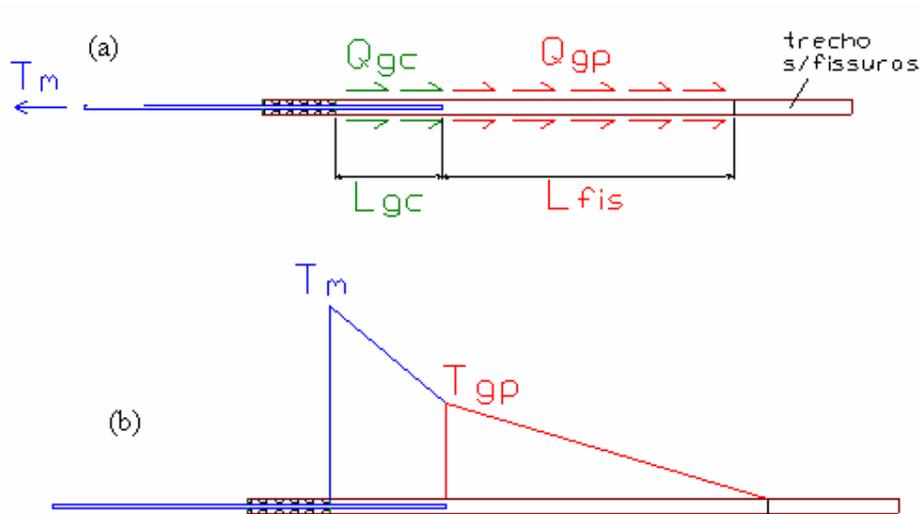


Figura 4.13 – Distribuição de: (a) atrito mobilizado e (b) carga de tração ao longo dos grampos com fibras para a Hipótese 3.

As Figuras 4.14 a 4.27 apresentam as curvas de distribuição da carga  $T$  para os grampos das Baterias 1, 2 e 3, segundo as Hipóteses 1, 2 e 3, descritas neste item. No caso dos grampos GP31 e GP34 incluem-se também as distribuições reais do carregamento, para fins de comparação.

#### 4.5.1 BATERIA 1

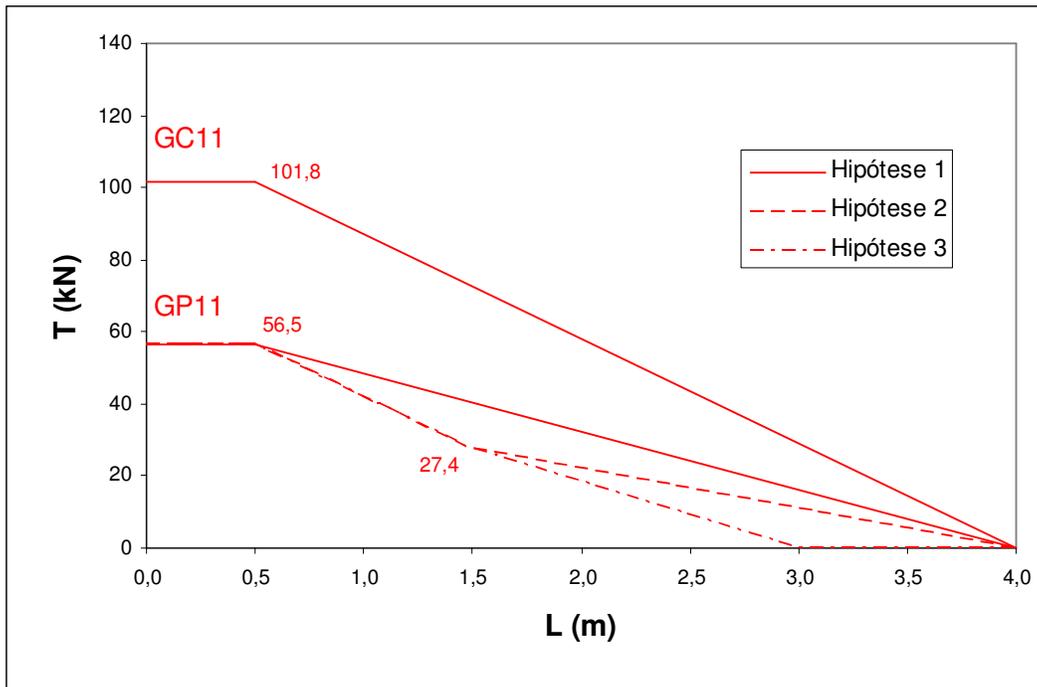


Figura 4.14 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencionais e com fibras – GP11.

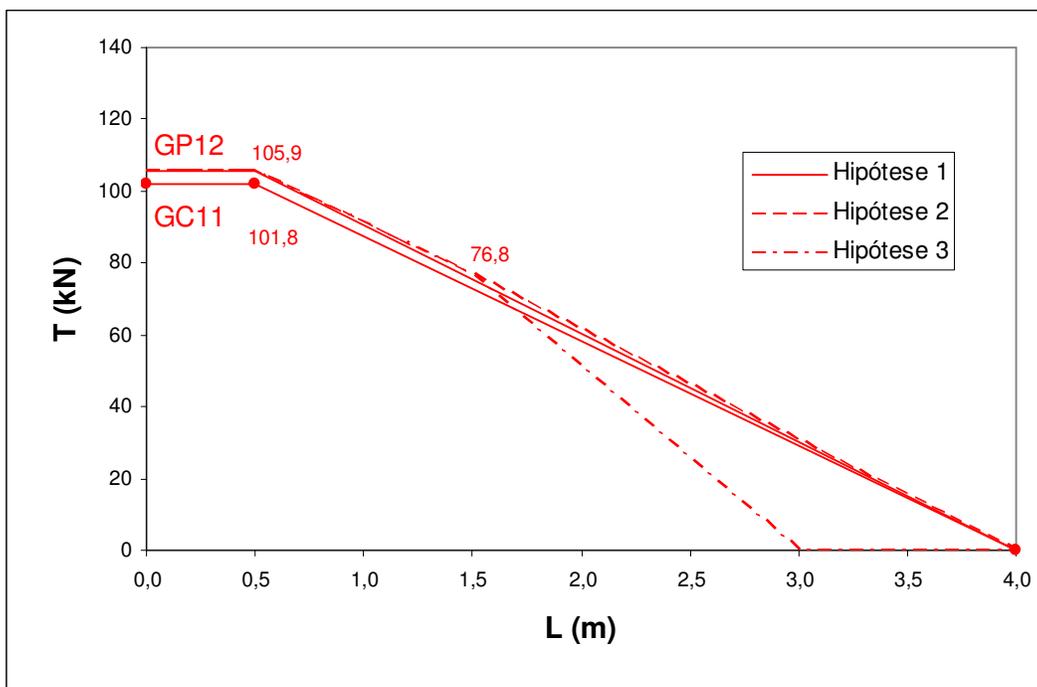


Figura 4.15 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencionais e com fibras – GP12.

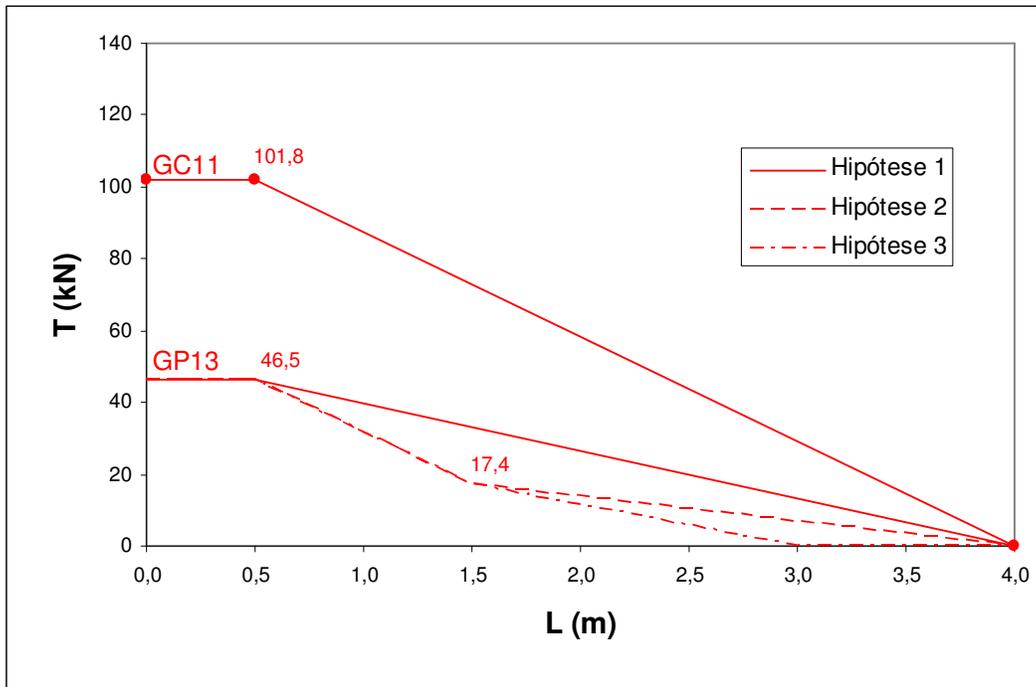


Figura 4.16 – Distribuição da carga de tração nos grupos convencionais e com fibras – GP13.

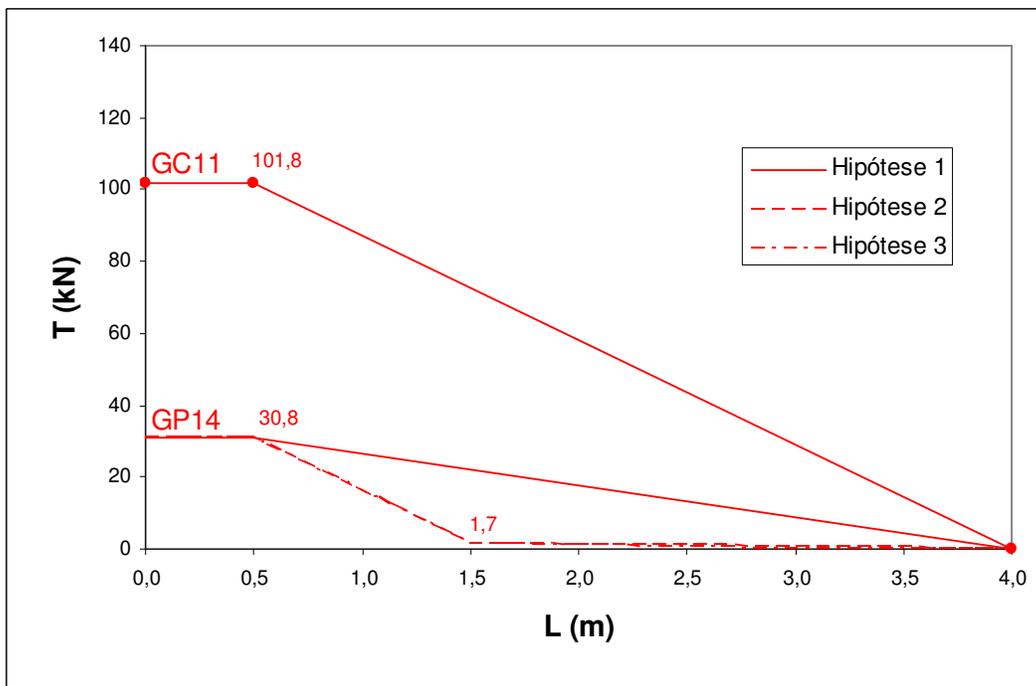


Figura 4.17 – Distribuição da carga de tração nos grupos convencionais e com fibras – GP14.

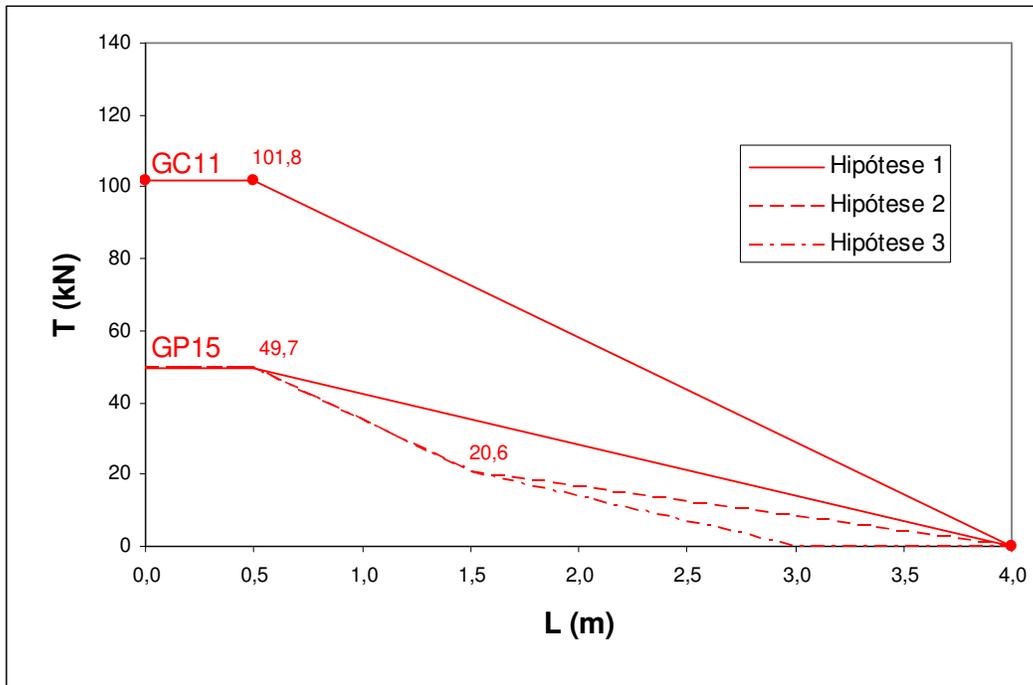


Figura 4.18 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencional e com fibras – GP15.

#### 4.5.2 BATERIA 2

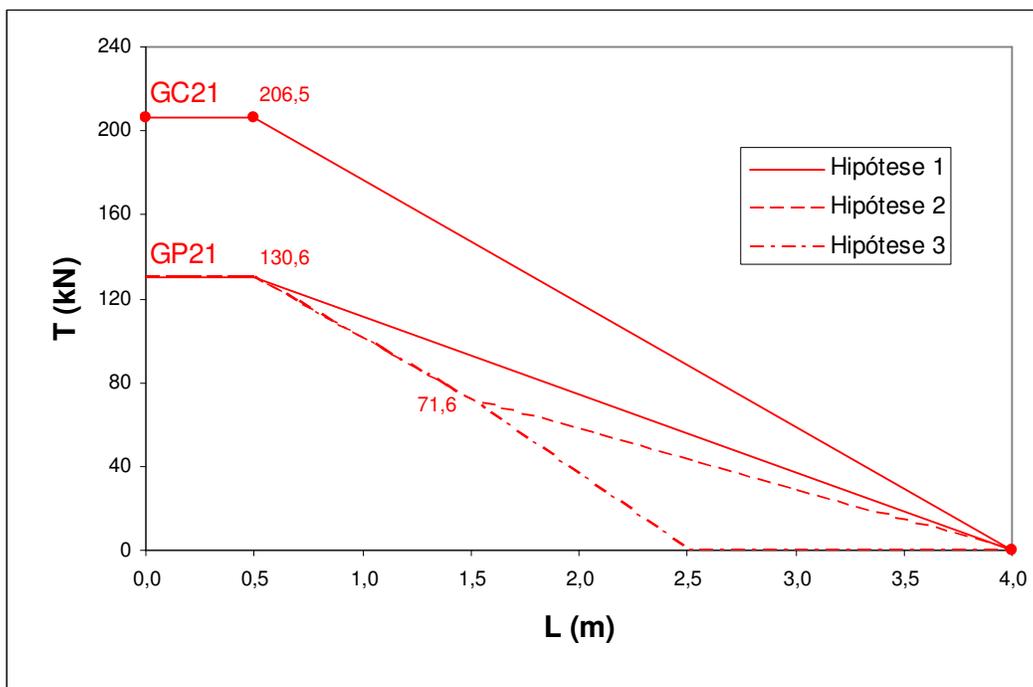


Figura 4.19 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencional e com fibras – GP21.

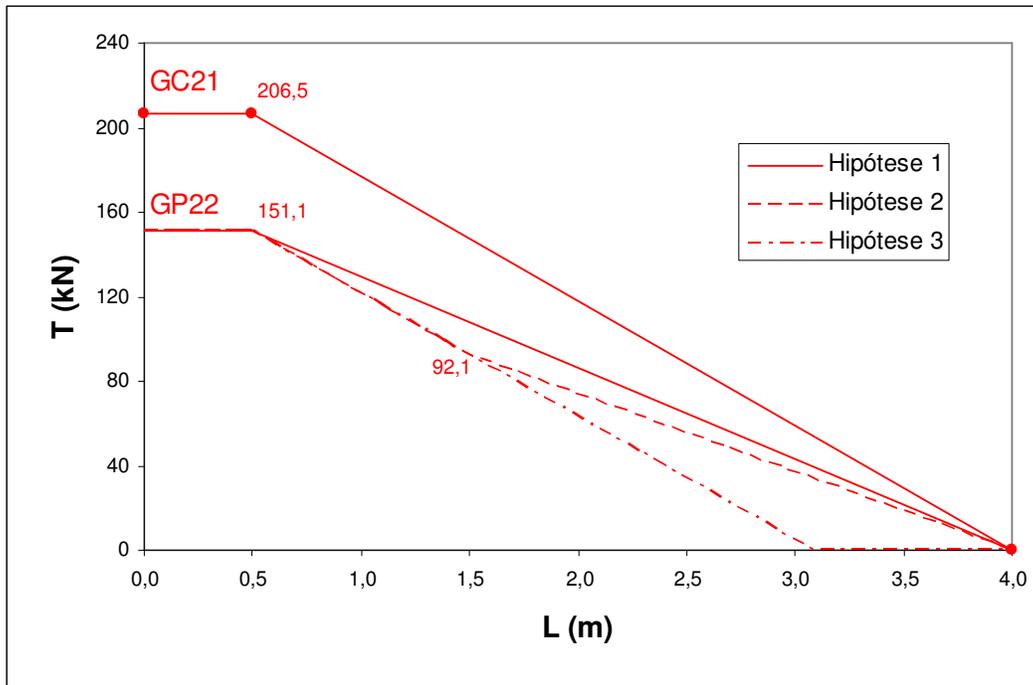


Figura 4.20 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencionais e com fibras – GP22.

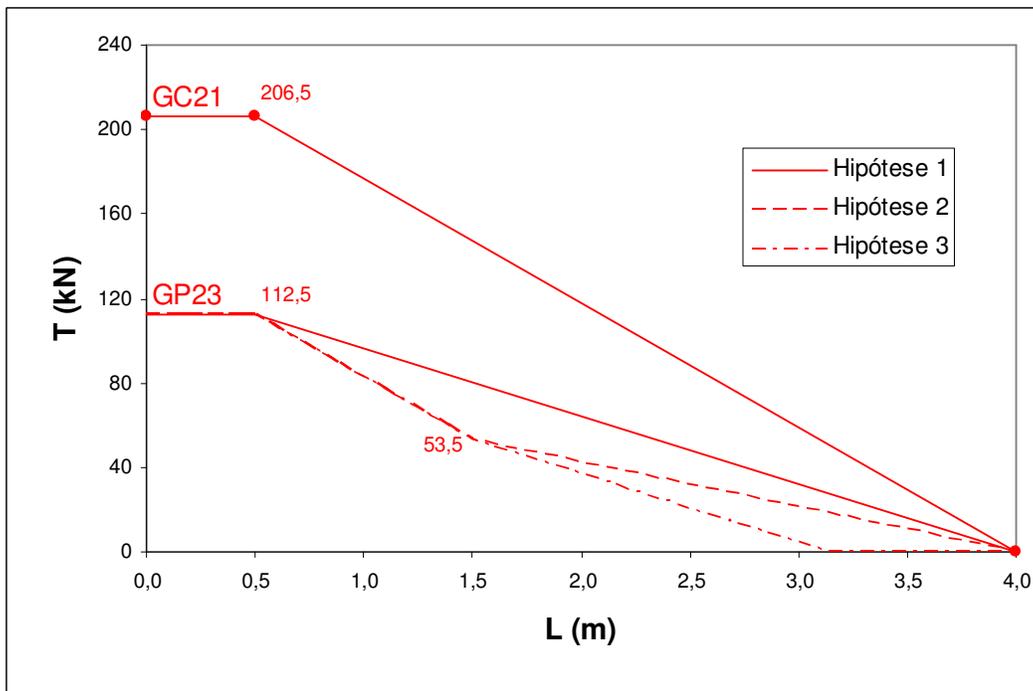


Figura 4.21 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencionais e com fibras – GP23.

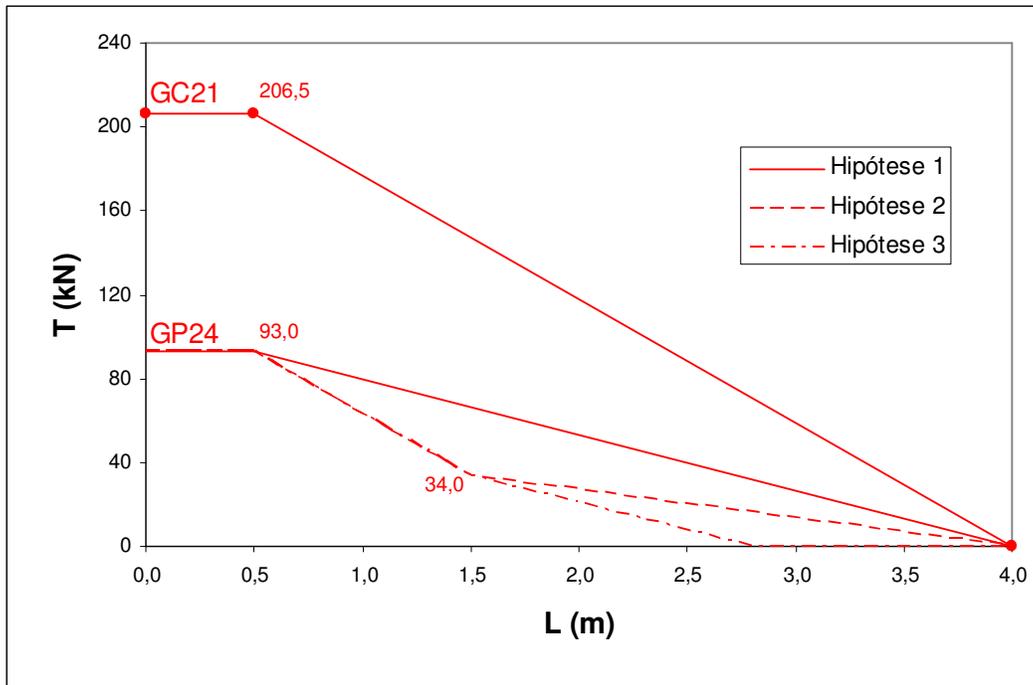


Figura 4.22 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencional e com fibras – GP24.

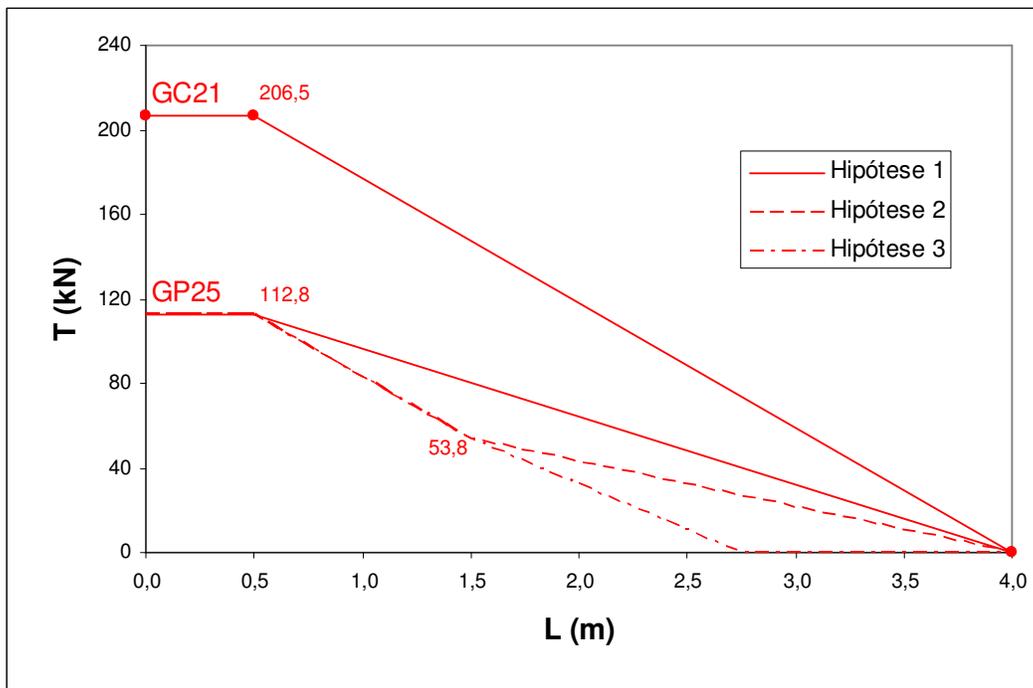


Figura 4.23 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencional e com fibras – GP25.

### 4.5.3 BATERIA 3

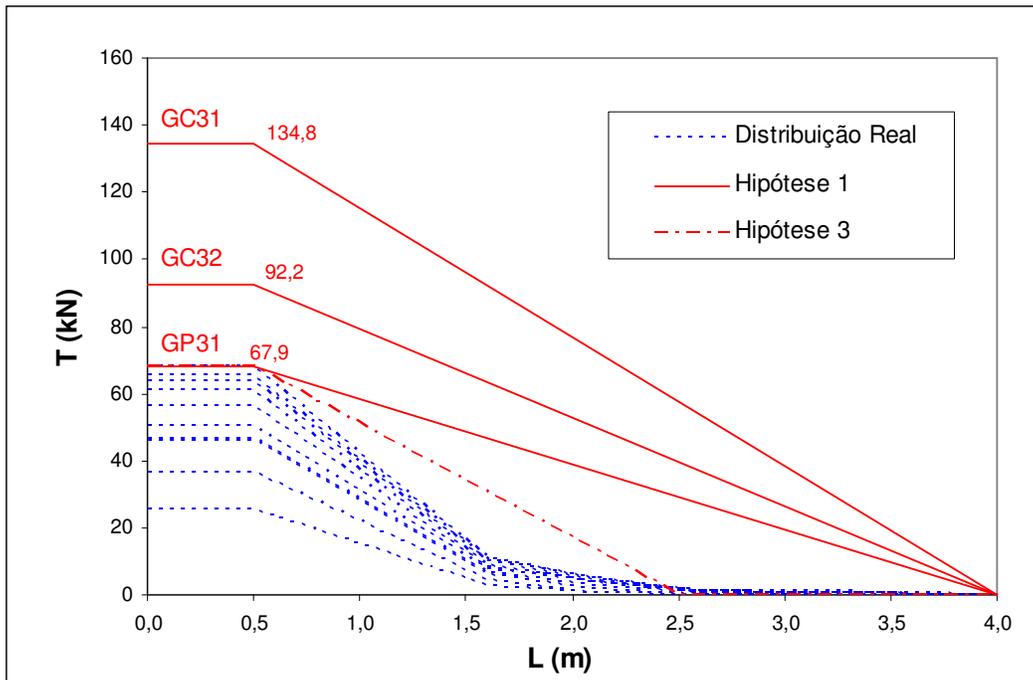


Figura 4.24 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencionais e com fibras – GP31.

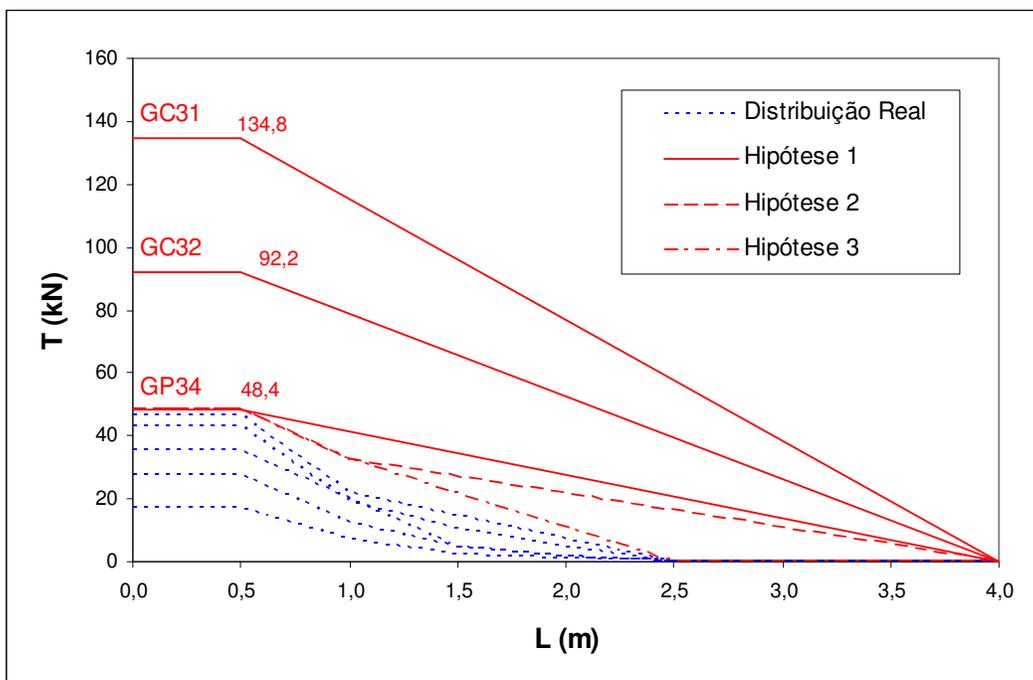


Figura 4.25 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencionais e com fibras – GP34.

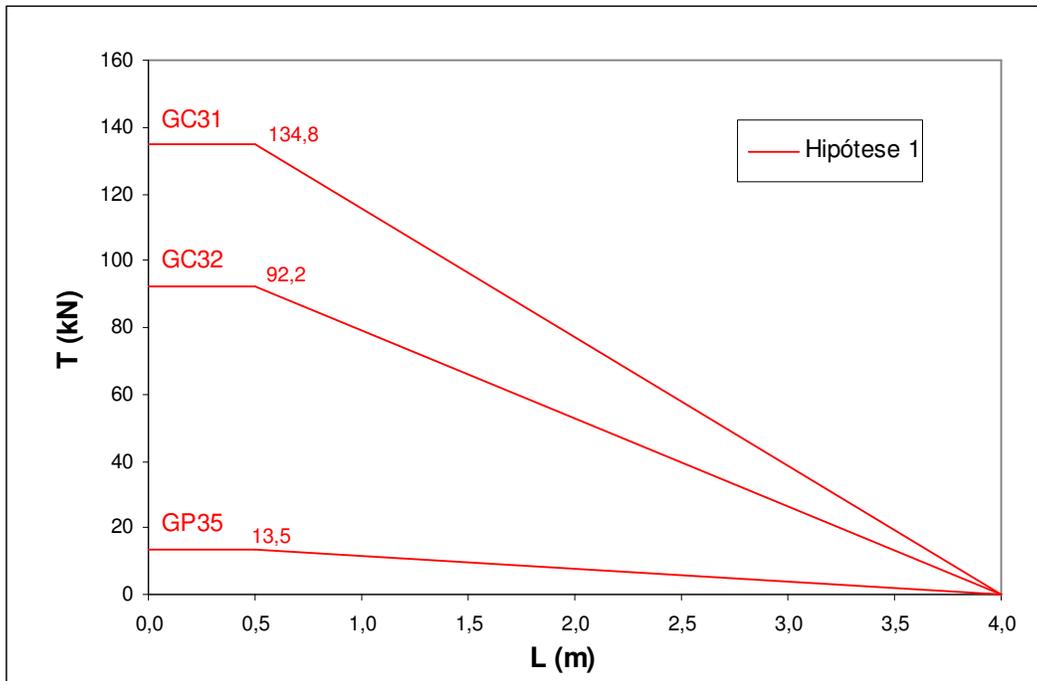


Figura 4.26 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencionais e com fibras – GP35.

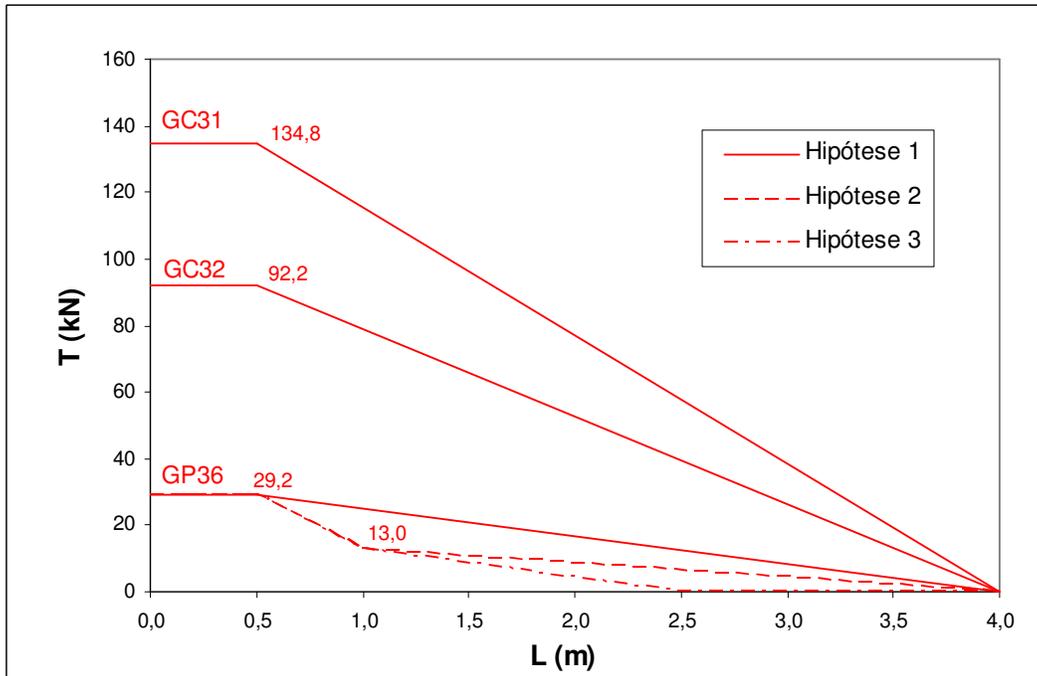


Figura 4.27 – Distribuição da carga de tração nos grampos convencionais e com fibras – GP36.

#### 4.6 RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO

A resistência ao arrancamento dos grampos pode ser calculada admitindo-se as Hipóteses de carregamento 1, 2 e 3, para os grampos reforçados com fibras e a Hipótese 1 para os convencionais.

Para grampos convencionais, a resistência ao arrancamento é dada por:

$$q_{gc} = \frac{Q_{gc}}{\pi \cdot D_{gc}} \quad (4.7)$$

Onde:  $q_{gc}$  = resistência ao arrancamento do grampo convencional;

$D_{gc}$  = diâmetro do grampo convencional.

A resistência ao arrancamento dos grampos com fibras é calculada através da seguinte expressão:

$$q_{gp} = \frac{Q_{gp}}{\pi \cdot D_{gp}} \quad (4.8)$$

Onde:  $q_{gp}$  = resistência ao arrancamento do grampo com fibras de polipropileno;

$D_{gp}$  = diâmetro do grampo com fibras de polipropileno.

A Tabela 4.6 apresenta os valores calculados das resistências ao arrancamento de todos os grampos.

O grampo GP12 apresentou o maior valor de resistência ao arrancamento da Bateria 1, inclusive superando a resistência do grampo convencional. Entretanto, conforme visto no item 4.3, este valor não é representativo, pois sofreu interferência do grampo vizinho (GP11), devido a uma falha no processo de perfuração. Por esta razão desconsiderou-se este valor no cálculo da resistência média dos grampos com fibras de polipropileno desta bateria. Da mesma forma, não se levou em conta o menor valor de resistência verificado para o grampo GP14, atribuído ao contato de uma camada de solo

residual jovem com solo residual maduro, exatamente no local onde este grampo foi executado.

Tabela 4.6 – Valores da Resistência ao Arrancamento dos grampos segundo as Hipóteses de carregamento 1, 2 e 3.

Grupo	Resistência ao Arrancamento (kPa)		
	Hipótese 1	Hipótese 2	Hipótese 3
GC11	123,4	-	-
GP11	68,5	46,48	77,53
GP12	128,4	130,40	217,30
GP13	56,4	29,56	49,23
GP14	37,3	2,84	4,81
GP15	60,3	34,99	58,29
GC21	250,4	-	-
GP21	158,4	121,64	300,87
GP22	183,2	156,36	247,40
GP23	136,4	90,89	139,30
GP24	112,8	57,77	111,00
GP25	136,8	91,38	182,67
GC31	122,6	-	-
GC32	83,9	-	-
GP31	61,8	-	108,1
GP34	44,0	23,2	46,5
GP35	12,3	-	-
GP36	26,6	13,8	27,6

O valor da resistência ao arrancamento do grampo GP31 foi calculado apenas para as Hipóteses 1 e 3, pois a Hipótese 2 não faz sentido para este grampo, já que o mesmo possui barra de aço ao longo de todo seu comprimento. Neste caso, a Hipótese 3 foi similar à Hipótese 1, apenas com a diferenciação do comprimento solicitado à tração. Enquanto a Hipótese 1 considera este comprimento igual ao do trecho total injetado (3,5m), a Hipótese 3 adota apenas o trecho em que foi verificada de fato a mobilização de carga de tração (2,0m), de acordo com a distribuição real vista na Figura 4.9.

Os grampos GP34 e GP36, que apresentam trechos com e sem a presença da barra de aço, puderam ser modelados de acordo com as três hipóteses propostas, para o cálculo das respectivas resistências ao arrancamento. Para o grampo GP34 foram utilizados os dados da curva da Figura 4.8, nas equações das Hipóteses 2 e 3. Já o grampo GP36, que não apresentou curva real de distribuição do carregamento, foi analisado de acordo com o comportamento típico observado nos demais grampos desta

bateria. Desta forma, para o cálculo da parcela de carga resistida pelo trecho com barra neste grampo foi utilizado o valor médio do atrito obtido nos grampos convencionais GC31 e GC32. Além disso, adotou-se o comprimento real solicitado nos grampos GP31 e GP34 para os cálculos de resistência segundo a Hipótese 3.

Devido ao baixo valor de carga de arrancamento observado para o grampo GP35, este não pôde ser configurado conforme as distribuições das Hipóteses 2 e 3, pois a parcela resistida pelo trecho com barra, calculada com base nos resultados dos grampos convencionais, seria maior que a carga total resistida pelo grampo. Desta forma, a resistência ao arrancamento deste grampo foi calculada apenas com base na Hipótese 1.

Da observação da Tabela 4.6 verifica-se que a Hipótese 3 apresenta em média os maiores valores de resistência ao arrancamento, enquanto a Hipótese 2 é a mais conservadora. As médias das resistências ao arrancamento dos grampos da Bateria 1 são de 61,7, 37,0 e 61,7kPa para as Hipóteses 1, 2 e 3, respectivamente. Estes valores correspondem a 50, 30 e 50,0% da resistência ao arrancamento obtida no grampo convencional desta bateria. Para os grampos da Bateria 2, os valores médios das resistências são 145,5kPa (Hipótese 1), 103,6kPa (Hipótese 2) e 196,2kPa (Hipótese 3), que representam 58,1, 41,4 e 78,4% do valor observado no grampo convencional. Finalmente, para a Bateria 3, têm-se os valores médios de 36,2kPa (Hipótese 1), 18,5kPa (Hipótese 2) e 60,7kPa (Hipótese 3) para as resistências ao arrancamento, as quais são equivalentes a 35, 17,9 e 58,8% da resistência média dos grampos convencionais. A Tabela 4.7 resume os valores médios calculados e suas respectivas porcentagens em relação à resistência ao arrancamento do grampo convencional de cada bateria de ensaio.

Os valores mais altos de resistência ao arrancamento obtidos a partir da Hipótese 3 devem-se ao menor comprimento do trecho solicitado, considerado neste modelo de carregamento. Nele, a mesma carga que atua na Hipótese 2 (descontada a parcela resistida pelo trecho com barra), é distribuída ao longo de um comprimento reduzido e resulta assim, em um maior valor do atrito mobilizado e da resistência ao arrancamento.

Tabela 4.7 – Valores médios das resistências ao arrancamento dos grampos com fibras e porcentagem em relação à resistência dos grampos convencionais.

Bateria	Grampo	Hipótese	$q_s$ (kPa)	$q_{GP}/q_{GC}$ (%)
1	GC	1	123,4	-
	GP	1	61,7	50,0
		2	37,0	30,0
		3	61,7	50,0
2	GC	1	250,4	-
	GP	1	145,5	58,1
		2	103,6	41,4
		3	196,2	78,4
3	GC	1	103,3	-
	GP	1	36,2	35,0
		2	18,5	17,9
		3	60,7	58,8

## CAPÍTULO 5 – Conclusões e Sugestões

---

### 5.1 CONCLUSÕES

A pesquisa teve como objetivo principal avaliar o comportamento mecânico de grampos reforçados com fibras de polipropileno, a fim de atestar a viabilidade desta técnica. Para tanto, realizaram-se ensaios de arrancamento em grampos convencionais e grampos reforçados com fibras, sendo estes instrumentados com *strain gages* para monitoramento das deformações e obtenção das distribuições do carregamento ao longo de seu comprimento.

Além dos resultados obtidos na bateria de ensaios desta pesquisa, utilizou-se também os dados provenientes de duas baterias de ensaios de arrancamento realizadas por MAGALHÃES (2005), em grampos convencionais e com fibras, além de informações referentes à exumação dos mesmos.

Nesta pesquisa, uma das principais dificuldades encontradas foi adequar a metodologia de execução de grampos com fibras de polipropileno ao ensaio padrão de verificação de resistência. O ensaio de arrancamento requer a instalação de barras metálicas para sua realização, justamente o elemento que se deseja suprimir nesta técnica. A presença das barras para fixação do macaco dificultou a avaliação de desempenho dos grampos não convencionais.

A exclusão da barra de aço ao longo do grampo também representou um obstáculo à instrumentação dos grampos, já que convencionalmente utiliza-se este elemento como superfície de colagem para os *strain gages*. Para solucionar este impasse, tentou-se pré-moldar peças em formato de “meia-cana” com a argamassa reforçada com fibras, a fim de que estas pudessem servir de base para a instrumentação, porém estas se mostraram muito frágeis. A alternativa foi utilizar tanto a barra de aço de seção reduzida quanto a barra chata de PVC para a colagem dos *strain gages*.

Este tipo de instrumentação exigiu cuidados especiais para colagem, cabeamento e proteção dos *strain gages* e para o transporte e inserção do conjunto dentro dos furos. Apesar da perda de alguns sensores, pode-se concluir que a instrumentação foi capaz de medir as deformações ao longo do grampo.

A análise das curvas Carga vs Deslocamento indica que os grampos convencionais apresentaram comportamento mais frágil, com deslocamentos de pico em média menores, em comparação aos grampos reforçados com fibras, cujos módulos de elasticidade são mais baixos. Além disso, constatou-se a melhoria das propriedades pós-pico dos grampos a partir da adição de fibras, visto que o carregamento é suportado sem quedas significativas até grandes deslocamentos, mesmo após a ruptura da matriz.

A distribuição do carregamento obtida a partir da instrumentação dos grampos com fibras da Bateria 3 mostrou que a força de tração é mobilizada ao longo de seu comprimento de forma não linear e decrescente, da cabeça até à extremidade final. Verificou-se também que as deformações são praticamente nulas no trecho final (cerca de 1,5m), o que indica não haver mobilização da resistência do grampo nesta região. Estes resultados corroboram as informações fornecidas pela exumação dos grampos das Baterias 1 e 2, nos quais realizou-se um mapeamento das fissuras existentes. O padrão de fissuração típico, com maior concentração de fissuras próximas à cabeça do grampo e ausência de fissuras na extremidade final (cerca de 1,0m), também reflete a distribuição do carregamento indicada pela instrumentação dos grampos da Bateria 3.

Com base nestas análises, propôs-se para os grampos reforçados com fibras 3 hipóteses de distribuição do carregamento: na primeira considerou-se uma distribuição linear da carga de tração ao longo de todo comprimento injetado do grampo; na segunda, descontou-se a parcela de carga resistida pelo trecho com barra e considerou-se a carga de tração resultante deste cálculo distribuída ao longo do trecho injetado sem barra; a terceira hipótese é similar à segunda, porém a carga de tração é distribuída apenas ao longo do comprimento fissurado do grampo.

As resistências ao arrancamento dos grampos reforçados com fibras das 3 baterias de ensaios foram calculadas segundo as 3 hipóteses de distribuição do carregamento propostas, com exceção dos grampos GP31, modelado de acordo com as Hipóteses 1 e 3

e do GP35 com a Hipótese 1 apenas. Os grampos convencionais tiveram suas resistências ao arrancamento calculadas através da Hipótese 1.

As resistências ao arrancamento calculadas para os grampos com fibras são inferiores às resistências atingidas pelos grampos convencionais nas três baterias e para cada uma das hipóteses de distribuição do carregamento. Em média, as resistências dos grampos com fibras, quando comparadas às resistências dos grampos convencionais, foram iguais a: 50, 30 e 50%, na bateria 1; 58, 41 e 78%, na bateria 2; e 35, 18 e 59%, na bateria 3, para as hipóteses 1, 2 e 3, respectivamente.

A distribuição do carregamento segundo a Hipótese 2 resultou em valores de resistência ao arrancamento mais conservativos em relação às demais, enquanto a Hipótese 3 apresentou em média os valores mais altos. A comparação das distribuições reais e hipotéticas do carregamento nos grampos GP31 e GP34 indica que a Hipótese 3 é a mais representativa do comportamento dos grampos com fibras.

Os grampos reforçados com fibras de polipropileno podem constituir uma metodologia viável para a estabilização de taludes, tanto do ponto de vista técnico como econômico, uma vez que estes grampos apresentaram resistência ao arrancamento média da ordem de 60% (levando-se em conta apenas a Hipótese 3) das alcançadas pelos grampos convencionais. Além disto, o menor custo das fibras de polipropileno em comparação às barras de aço torna o método bastante atrativo.

Os procedimentos executivos dos grampos com fibras também se mostraram vantajosos em relação aos dos grampos convencionais, pois não há necessidade de preparo e instalação das barras, o que facilita as operações e reduz o tempo de execução dos trabalhos. O único cuidado especial a ser tomado é a adoção de um traço adequado para a mistura, que não comprometa a sua trabalhabilidade e permita uma distribuição uniforme das fibras no grampo.

## 5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Nesta pesquisa, uma das principais dificuldades encontradas foi a execução do ensaio de arrancamento dos grampos com fibras de polipropileno, visto a necessidade de se instalar a barra de aço para fixação do macaco.. Assim, sugere-se o estudo de formas alternativas para a avaliação da resistência lateral destes grampos, sem que haja interferência de qualquer outro material.

A exclusão da barra de aço representou também um obstáculo à colagem de *strain gages* nos grampos, desta forma, sugere-se que outros tipos de instrumentação sejam estudados.

Para uma melhor avaliação do desempenho da argamassa reforçada com fibras de polipropileno, sugere-se a realização de uma campanha de ensaios de laboratório tais como de compressão axial, compressão diametral e tração direta em corpos de prova moldados com e sem a presença de fibras, a fim de que as suas resistências possam ser comparadas.

Pode-se ainda estudar a interação entre o material compósito e o solo circundante, através de ensaios nesta interface, como por exemplo, ensaios de cisalhamento direto com a utilização de placa moldada com a argamassa reforçada com fibras. Estes ensaios forneceriam parâmetros importantes como a adesão e o coeficiente de atrito solo-nata, além de uma estimativa da transferência de carga para o grampo.

Por fim, recomenda-se a realização de pesquisa similar a esta, com a utilização de outros tipos de fibras existentes no mercado, como as de aço. Estas fibras apresentam resistência à tração bastante elevada, o que pode tornar os grampos mais rígidos e talvez contribua para que sua resistência ao arrancamento se aproxime à dos grampos convencionais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMENTO, M., KOSHIMA, A., ZIRLIS, A. C., 1998, “Reforço do Terreno”. In: ABMS/ABEF (eds), *Fundações – Teoria e Prática*, 2 ed., capítulo 18, São Paulo, Brasil, PINI.
- AGOPYAN, V., JOHN, V. M., 2000, *Introdução a Materiais Reforçados com Fibras e a Tecnologia de CRV*. In: Simpósio Internacional – Componentes Pré-Moldados em Cimento Reforçados com Fibras de Vidro, São Paulo.
- ALONSO, U. R., FALCONE, F. F., 2003, “Solo Grampeado sem Concreto Projetado. Proposição para Estabilização de Taludes Rodoviários”. In: *Anais de Solo Grampeado – Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento*, ABMS, v. 1, pp. 175-178, São Paulo, Out.
- ANDOLFATO, R.P., CAMACHO, J. S., BRITO, G.A., 2004, *Extensometria Básica*, Apostila Unesp – Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural, Ilha Solteira, São Paulo.
- ARMELIN, H. S., HAMASSAKI, L.T., 1990, “Avaliação do concreto projetado reforçado com fibras de aço e polipropileno na construção de túneis – NATM”. In: *Anais da 32ª Reunião Anual do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON)*, pp. 12.
- AVESTON, A., COOPER, G. A., KELLY, A., 1971, “Single and Multiple Fracture in The Properties of Fiber Composites”. In: *Proceedings of Conference National Physical Laboratories*, IPC, Science and Technology Press, pp. 15-24, England, Nov.
- AZAMBUJA, E., STRAUSS, M., SILVEIRA, F. G., 2001, “Caso Histórico de um Sistema de Contenção em Solo Grampeado em Porto Alegre, RS”. In: *Anais da III Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas*, pp. 435-443, Rio de Janeiro, Nov.
- BALAGURU, P. N., SHAH, S. P., 1992, *Fiber-Reinforced Cement Composites*. 1 ed. New York, McGraw-Hill International Editions.
- BALAGURU, P., 1994, “Contribution of Fibers to Crack Reduction of Cement Composites During the Initial and Final Setting Period”, *ACI Materials Journal*, v. 91, n. 3 (May), pp. 280-288.
- BAUER, E., CORTEZ, I., 2001, *Compósitos à Base de Fibras Sintéticas em Argamassas para Revestimento na Prevenção da Fissuração*, IV Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Brasília.
- BENTUR, A., MINDESS, S., 1990, *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. 1 ed. London, Elsevier Science Publishers LTD.

- BETIOLI, A. M., 2003, *Degradação de Fibras PET em Materiais à Base de Cimento Portland*. Dissertação de M.Sc., DEC/UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.
- BRUCE, D. A., JEWELL, R. A., 1987, "Soil Nailing: The Second Decade". In: *Proceedings of the International Conference on Foundations and Tunnels*, pp. 68-83, London, Mar.
- BUDINSKI, K. G., 1996, *Engineering Materials: Properties and Selection*. 5 ed. New Jersey, Prentice Hall International.
- BUSTAMANTE, M., DOIX, B., 1985, *Une Méthode pour le Calcul des Tyrants et des Micropieux Injectés*, Bulletin des Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées, n° 140.
- CLOUTERRE, 1991, *Recommendations Clouterre – Soil Recommendations for Designing, Calculating, Constructing and Inspecting Earth Support Systems Using Soil Nailing*, French National Project Clouterre, English Language Translation, pp. 302.
- CORTEZ, I. M. M., 1999, *Contribuição ao Estudo dos Sistemas de Revestimento à Base de Argamassa com Incorporação de Fibras Sintéticas*. Dissertação de M.Sc., FT/UnB, Brasília, DF, Brasil.
- COUTO, R. T. S., 2002, *Arrancamento das Pregagens e Cabos de Aço na Mina do Moinho ALJUSTREL*, 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa.
- COUTTS, R. S. P., WARDEN, P. G., 1992, "Sisal Pulp Reinforced Cement Mortar", *Cement and Concrete Composites*, v. 14, n. 1 (Jan), pp. 17-21.
- DANTAS, F. A. S., 1987, *Concretos de Baixo Consumo de Cimento Reforçados com Fibras: Propriedades e Análise da Fissuração Devido à Retração*. Tese de D.Sc., POLI/USP, São Paulo, SP, Brasil.
- DONATO, M., FOPPA, D., CERATTI, J. A. P. et al., 2004, "Fibras de Polipropileno como Reforço para Materiais Geotécnicos", *Solos e Rochas*, v. 27, n. 2 (Set), pp. 161-176.
- DRINGENBERG, G., CRAIZER, W., 1992, "Estabilidade de Taludes por Pregagens: Projeto-Execução". In: *Anais da I Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas*, v. 2, pp. 853-864, Rio de Janeiro, Nov.
- EHRlich, M., 2003, "Solos Grampeados – Comportamento e Procedimentos de Análise". In: *Anais de Solo Grampeado – Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento*, ABMS, v. 1, pp. 127-137, São Paulo, Out.
- FEIJÓ, R. L., ERHLICH, M., 2001, "Resultados de Ensaios de Arrancamento em Grampos Injetados em Dois Pontos do Município do Rio de Janeiro". In: *Anais da III Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas*, pp. 517-524, Rio de Janeiro, Nov.

- FIGUEIREDO, A. D., 2000, *Concreto com Fibras de Aço*, Boletim Técnico BT/PCC/260 POLI/USP, São Paulo.
- FITESA, 2002, “Materiais Compósitos e Fibras de Polipropileno”, Boletim Técnico, Gravataí, Rio Grande do Sul.
- FOÁ, S. B., ASSIS, A., 2002, *Concreto Projetado Para Túneis*, Apostila Complementar ao Curso de Obras Subterrâneas, ENC/UnB, Brasília.
- FRANK, R., ZHAO, S.R., 1982, “Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans les sols fins”. *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, n°.119, Réf 2712, pp. 17-24.
- FUJYAMA, R. T., DARWISH, F. A., GHAVAMI, K., 1999, *Caracterização do Comportamento em Compressão Uniaxial de Argamassa de Cimento Reforçada por Fibras de Sisal*. In: SEMENGE 99, Niterói.
- GARCÉS, P., FRAILE, J., VILAPLANA-ORTEGO, E. et al., 2005, “Effect of Carbon Fibres on the Mechanical Properties and Corrosion Levels of Reinforced Portland Cement Mortars”, *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 2 (Feb), pp. 324-331.
- GEORIO, 2000, “Ancoragens e Grampos”. In: Ortigão, J.A.R., Sayão, A.S.F.J. (eds), *Manual Técnico de Encostas – Ancoragens e Grampos*, 2 ed., capítulo 2, Rio de Janeiro, Brasil, Fundação Instituto de Geotécnica.
- GUIMARÃES FILHO, J. D., 1994, “O Alívio Controlado de Tensões na Técnica de Solo Grampeado”, *Solos e Rochas*, v. 17, n. 3 (Dez), pp. 195-201.
- HANNANT, L., 1994, “Fibre-Reinforced Cements and Concretes”. In: *Construction Materials: Their Nature and Behaviour*, J. M. Illston/ E & FN Spon , 2 ed. London, pp. 359-403.
- HUGHES, B. P., FATTUHI, N. I., 1977, “Stress-Strain Curves for Fibre Reinforced Concrete in Compression”, *Cement and Concrete Research*, v. 7, n. 2 (Mar), pp. 173-183.
- ILLSTON, J. M., 1994, *Construction Materials: Their Nature and Behaviour*. 2 ed. London, E & FN Spon.
- JOHNSTON, C. D., 1994, “Fibre-Reinforced Cement and Concrete”. In: *Advances in Concrete Technology*, EMR, 2 ed. Ottawa, pp. 603-673.
- KOVLER, K., SIKULER, J., BENTUR, A., 1992, “Free and restrained shrinkage of fiber reinforced concrete with low polypropylene fiber content at early age”. In: *Fibre reinforced cement and concrete*, Sheffield, London, RILEM, pp. 91-101.
- JURAN, I., ELIAS, V., 1991, “Ground Anchors and Soil Nails in Retaining Structures”. In: Fang, H. (ed), *Foundation Engineering Handbook*, 2 ed., chapter 26, New York, USA, Van Nostrand Reinhold.

- LOPES, M. M., 2005, *Substituição Parcial de Armaduras de Flexão em Vigas de Concreto*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MAGALHÃES, M. A., 2005, *Resistência ao Arrancamento de Grampos com Fibras de Polipropileno*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., 1994, *Concreto: Estrutura, Propriedade e Materiais*. São Paulo, PINI.
- MITCHELL, J. K., VILLET, W. C. B., 1987, *Reinforcement of Earth Slopes and Embankments*. NCHRP Report 290 Washington D.C., Transportation Research Board, National Research Council.
- MODLER, L. E., SPECHT, L. P., CORÓ, A. G. et al., 2000, *Investigação das Propriedades Mecânicas de Concretos Reforçados com Fibras*. In: Congresso de Engenharia Civil, Juiz de Fora.
- MORAES, L. J., ARDUINO, E. G. A., 2003, “Estabilização de Taludes por Solo Grampeado em Manaus-AM”. In: *Anais de Solo Grampeado – Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento*, ABMS, v. 1, pp. 121-125, São Paulo, Out.
- NANNI, A., MEAMARIAN, N., 1991, “Distribution and Opening of Fibrillated Polypropylene Fibers in Concrete”, *Cement and Concrete Composites*, v. 13, n. 2 (Apr), pp. 107-114.
- OKAFOR, F. O., EZE-UZOMAKA, O. J., EGBUNIWE, N., 1996, “The Structural Properties and Optimum Mix Proportions of Palmnut Fibre-Reinforced Mortar Composite”, *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 7 (Jul), pp. 1045-1055.
- ORTIGÃO, J. A. R., 1997, “Ensaio de Arrancamento para Projetos de Solo Grampeado. Nota Técnica”, *Solos e Rochas*, v. 20, n. 1 (Abr), pp. 39-43.
- ORTIGÃO, J. A. R., D’ÁVILA, C. J. R., SILVA, S. P. et al., 1992, “Solo Grampeado no Morro da Formiga”. In: *Anais da I Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas*, v. 1, pp. 47-56, Rio de Janeiro, Nov.
- ORTIGÃO, J. A. R., ZIRLIS, A. C., PALMEIRA, E. M., 1993, “Experiência com Solo Grampeado no Brasil – 1970 – 1993”, *Solos e Rochas*, v. 16, n. 4 (Dez), pp. 291-304.
- PELISSER, F., 2002, *Avaliação do Desempenho de Concreto Reforçado com Fibras de Polietileno Tereftalato*. Dissertação de M.Sc., DEC/UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.
- PERRY, C. C., LISSNER, H. R., 1962, *The Strain Gage Primer*. 2 ed. New York, MacGraw Hill Book Company.
- PITTA, C. A., SOUZA, G. J. T., ZIRLIS, A. C., 2003, “Solo Grampeado: Alguns Detalhes Executivos – Ensaio – Casos de Obras”. In: *Anais de Solo Grampeado –*

- Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento*, ABMS, v. 1, pp. 1-20, São Paulo, Out.
- PLUMELLE, C., SCHLOSSER, F., DELAGE, P., KNOCHENMUS, G., 1990, "French National Research Project on Soil Nailing: CLOUTERRE" Design and Performance of Earth Retaining Structures, In: *ASCE Geotechnical Publication*, n. 25, pp. 660.
- PROTO SILVA, T., 2005, *Resistência ao Arrancamento de Grampos em Solo Residual de Gnaiss*. Dissertação de M.Sc., DEC/PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PUERTAS, F., AMAT, T., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. et al., 2003, "Mechanical and Durable Behaviour of Alkaline Cement Mortars Reinforced with Polypropylene Fibers", *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 12 (Dec), pp. 2031-2036.
- ROMUALDI, J. P., MANDEL, J. A., 1964, "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement", *ACI Journal Proceedings*, v. 61, n. 6 (Jun), pp. 657-671.
- SAVASTANO JUNIOR, H., 1992, *Zona de Transição entre Fibras e Pasta de Cimento Portland: Caracterização e Inter-relação com as Propriedades Mecânicas do Compósito*. Dissertação de M.Sc., POLI/USP, São Paulo, SP, Brasil.
- SILVA, R. P., 2006, *Argamassas com Adição de Fibras de Polipropileno – Estudo do Comportamento Reológico e Mecânico*. Dissertação de M.Sc., POLI/USP, São Paulo, SP, Brasil.
- SOARES, J. E. S., GOMES, R. C., 2003, "Um Caso de Solo Grampeado na Encosta da BR-101 em Angra dos Reis, RJ". In: *Anais de Solo Grampeado – Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento*, ABMS, v. 1, pp. 49-56, São Paulo, Out.
- SOROUSHIAN, P., MIRZA, F., ALHHOZAIMY, A., 1995, "Permeability Characteristics of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete", *ACI Materials Journal*, v. 92, n. 3 (May), pp. 291-295.
- SOUZA, G. J. T., PITTA, C. A., ZIRLIS, A. C., 2005, "Solo Grampeado – Aspectos Executivos do Chumbador". In: *Anais da IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas*, pp. 835-844, Salvador, Set.
- SPRINGER, F. O., 2006, *Ensaio de Arrancamento de Grampos em Solo Residual de Gnaiss*. Tese de D.Sc., DEC/PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SPRINGER, F. O., GERSCOVICH, D. M. S., SAYÃO, A.S.F.J., 2001, "Deformabilidade de Escavações com Solo Grampeado". In: *Anais da III Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas*, v.1, pp. 483-490, Rio de Janeiro.
- STOCKER, M. F., KORBER, G. W., GASSLER, G. et al., 1979, "Soil Nailing". In: *Proceedings of the International Conference on Soil Reinforcement: Reinforced*

*Earth and Other Techniques*, Ecole des Ponts et Chaussées, v. 2, pp. 469-474, Paris, Mar.

TANESI, J., FIGUEIREDO, A. D., 1999, *Materiais com Fibras de Polipropileno para Construção Civil*. In: Congresso Internacional de Não Tecidos e Tecidos Técnicos, São Paulo.

TAYLOR, G. D., 1994, *Materials in Construction*. 2 ed. London, Longman Scientific & Technical.

VENDRUSCOLO, M. A., 2003, *Estudo do Comportamento de Materiais Compósitos Fibrosos para Aplicação como Reforço de Base de Fundações Superficiais*. Tese de D.Sc., PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

WANG, Y., BACKER, S., LI, V. C., 1987, "An Experimental Study of Synthetic Fibre Reinforced Cementitious Composites", *Journal of Materials Science*, v. 22, n. 12 (Dec), pp. 4281-4291.

ZOLLO, R. F., ILTER, J. A., 1986, "Plastic and Drying Shrinkage in Concrete Containing Collated Fibrillated Polypropylene Fiber". In: *Proceedings of Sixth RILEM Symposium on Fiber Reinforced Cement and Concrete*, Sheffield, Sep.

**ANEXO 1**

Tabela A1 – Resultados de ensaios de arrancamento da literatura nacional.

Referência	Ensaio	Profundidade (m)	Tipo de Solo	Comp. do Trecho Livre (m)	Comp. do Trecho Injetado (m)	N.º de Inj.	Ø Furo (mm)	Ø Barra de Aço (mm)	Ângulo de Incl. do Grampo	$q_s$ (kPa)
Ortigão <i>et al</i> (1992)	1	ND	Solo residual arenoso.	1,0	3,0	1	75	32	20°	250
	2	ND	Solo residual arenoso.	1,0	3,0	1	75	32	20°	250
	3	ND	Solo residual arenoso.	1,0	3,0	1	75	32	20°	250
Feijó e Ehrlich (2001)	1	1,0	Silte arenoso de alta plasticidade.	2,0	3,0	ND	75	25,4	15°	145
	2	1,0	Silte arenoso de alta plasticidade.	2,0	3,0	ND	75	25,4	15°	*
	3	1,0	Silte arenoso de alta plasticidade.	2,0	6,0	ND	75	25,4	15°	185
	4	1,0	Silte arenoso de alta plasticidade.	2,0	6,0	ND	75	25,4	15°	*
	5	2,0	Silte arenoso de alta plasticidade.	2,0	3,0	ND	75	25,4	15°	295
	6	2,0	Silte arenoso de alta plasticidade.	2,0	3,0	ND	75	25,4	15°	*
	7	2,0	Silte arenoso de alta plasticidade.	2,0	6,0	ND	75	25,4	15°	205
	8	2,0	Silte arenoso de alta plasticidade.	2,0	6,0	ND	75	25,4	15°	*
	9	5,0	Silte arenoso de alta plasticidade.	2,0	3,0	ND	75	25,4	15°	108
	10	5,0	Silte arenoso de alta plasticidade.	2,0	3,0	ND	75	25,4	15°	*
	11	5,0	Silte arenoso de alta plasticidade.	2,0	6,0	ND	75	25,4	15°	95*
	12	5,0	Silte arenoso de alta plasticidade.	2,0	6,0	ND	75	25,4	15°	
	13	10,0	Silte arenoso de alta plasticidade.	2,0	3,0	ND	75	25,4	15°	148
	14	10,0	Silte arenoso de alta plasticidade.	2,0	3,0	ND	75	25,4	15°	*
	15	10,0	Silte arenoso de alta plasticidade.	2,0	6,0	ND	75	25,4	15°	120
	16	10,0	Silte arenoso de alta plasticidade.	2,0	6,0	ND	75	25,4	15°	*

Referência	Ensaio	Profundidade (m)	Tipo de Solo	Comp. do Trecho Livre (m)	Comp. do Trecho Injetado (m)	N.º de Inj.	Ø Furo (mm)	Ø Barra de Aço (mm)	Ângulo de Incl. do Grampo	$q_s$ (kPa)
Feijó e Ehrlich (2001)	17	15,0	Areia siltosa sem plasticidade.	2,0	3,0	ND	75	25,4	15°	248
	18	15,0	Areia siltosa sem plasticidade.	2,0	3,0	ND	75	25,4	15°	*
	19	15,0	Areia siltosa sem plasticidade.	2,0	6,0	ND	75	25,4	15°	190
	20	15,0	Areia siltosa sem plasticidade.	2,0	6,0	ND	75	25,4	15°	*
Azambuja <i>et al</i> (2001)	1	2,50	Solo residual de paragnaisse.	ND	ND	2	100	20	18°	260
	2	6,76	Solo residual de paragnaisse.	ND	ND	2	100	20	18°	264
	3	4,60	Solo residual de paragnaisse.	ND	ND	2	100	20	18°	261
	4	4,30	Solo residual de paragnaisse.	ND	ND	2	100	20	18°	270
	5	1,50	Solo residual de paragnaisse.	ND	ND	2	100	20	18°	210
	6	4,00	Solo residual de paragnaisse.	ND	ND	2	100	20	18°	204
Pitta <i>et al</i> (2003) Obra 1	1	2 a 4	Silte argiloso.	ND	4,0	1	75	20	ND	82
	2	2 a 4	Silte argiloso.	ND	4,0	1	75	20	ND	82
	3	2 a 4	Silte argiloso.	ND	4,0	1	75	20	ND	89
	4	2 a 4	Silte argiloso.	ND	4,0	1	75	20	ND	82
	5	2 a 4	Silte argiloso.	ND	4,0	1	75	20	ND	74
	6	2 a 4	Silte argiloso.	ND	4,0	1	75	20	ND	103
	7	2 a 4	Silte argiloso.	ND	4,0	2	75	20	ND	126
	8	2 a 4	Silte argiloso.	ND	4,0	2	75	20	ND	119
	9	2 a 4	Silte argiloso.	ND	4,0	2	75	20	ND	126
	10	2 a 4	Silte argiloso.	ND	4,0	2	75	20	ND	119

Referência	Ensaio	Profundidade (m)	Tipo de Solo	Comp. do Trecho Livre (m)	Comp. do Trecho Injetado (m)	N.º de Inj.	Ø Furo (mm)	Ø Barra de Aço (mm)	Ângulo de Incl. do Grampo	$q_s$ (kPa)
Pitta <i>et al</i> (2003) Obra 2	1	2 a 4	Argila arenosa.	ND	6,0	1	75	20	ND	69
	2	2 a 4	Argila arenosa.	ND	6,0	1	75	20	ND	69
	3	2 a 4	Argila arenosa.	ND	6,0	1	75	20	ND	74
	4	2 a 4	Argila arenosa.	ND	6,0	1	75	20	ND	74
	5	2 a 4	Argila arenosa.	ND	6,0	1	75	20	ND	69
	6	2 a 4	Argila arenosa.	ND	6,0	2	75	20	ND	114
	7	2 a 4	Argila arenosa.	ND	6,0	2	75	20	ND	104
	8	2 a 4	Argila arenosa.	ND	6,0	2	75	20	ND	114
	9	2 a 4	Argila arenosa.	ND	6,0	2	75	20	ND	99
	10	2 a 4	Argila arenosa.	ND	6,0	2	75	20	ND	109
Pitta <i>et al</i> (2003) Obra 3	1	2 a 4	Argila porosa.	ND	6,0	1	75	20	ND	37
	2	2 a 4	Argila porosa	Não foi possível realizar o ensaio						
	3	2 a 4	Argila porosa.	ND	6,0	2	75	20	ND	92
	4	2 a 4	Argila porosa.	ND	6,0	3	75	20	ND	113
	5	2 a 4	Argila porosa.	ND	6,0	3	75	20	ND	131
	6	2 a 4	Argila porosa.	ND	6,0	3	75	20	ND	125
	7	2 a 4	Argila porosa.	ND	6,0	3	75	20	ND	131
	8	2 a 4	Argila porosa.	ND	4,0	3	75	20	ND	115
	9	2 a 4	Argila porosa.	ND	4,0	3	75	20	ND	131
	10	2 a 4	Argila porosa.	ND	4,0	2	75	20	ND	155

Referência	Ensaio	Profundidade (m)	Tipo de Solo	Comp. do Trecho Livre (m)	Comp. do Trecho Injetado (m)	N.º de Inj.	Ø Furo (mm)	Ø Barra de Aço (mm)	Ângulo de Incl. do Grampo	$q_s$ (kPa)	
Pitta <i>et al</i> (2003) Obra 3	11	2 a 4	Argila porosa.	ND	4,0	2	75	20	ND	155	
	12	2 a 4	Argila porosa.	ND	4,0	1	75	20	ND	82	
	13	2 a 4	Argila porosa.	ND	4,0	1	75	20	ND	56	
Pitta <i>et al</i> (2003) Obra 4	1	2 a 4	Saprolito de gnaïsse.	ND	6,0	2	75	20	ND	120	
	2	2 a 4	Saprolito de gnaïsse.	ND	6,0	2	75	20	ND	158	
	3	2 a 4	Saprolito de gnaïsse.	ND	6,0	3	75	20	ND	164	
	4	2 a 4	Saprolito de gnaïsse.	ND	6,0	3	75	20	ND	137	
	5	2 a 4	Saprolito de gnaïsse.	ND	6,0	1	75	20	ND	81	
	6	2 a 4	Saprolito de gnaïsse.	Não foi possível realizar o ensaio							
Pitta <i>et al</i> (2003) Obra 5	1	2 a 4	Argila porosa.	ND	6,0	1	75	20	ND	91	
	2	2 a 4	Argila porosa.	ND	6,0	1	75	20	ND	124	
	3		Argila porosa	Não foi possível realizar o ensaio							
	4	2 a 4	Argila porosa.	ND	6,0	2	75	20	ND	141	
	5	2 a 4	Argila porosa.	ND	6,0	3	75	20	ND	150	
	6	2 a 4	Argila porosa.	ND	6,0	3	75	20	ND	156	
Soares e Gomes (2003)	1	ND	Solo residual silto-arenoso.	3,0	3,0	1	50	25	25°	269	
	2	ND	Solo residual silto-arenoso.	3,0	3,0	1	50	25	25°	282	
	3	ND	Solo residual silto-arenoso.	1,0	5,0	1	50	25	25°	262	
	4	ND	Solo residual silto-arenoso.	1,0	5,0	1	50	25	25°	ND	
	5	ND	Solo residual silto-arenoso.	3,0	3,0	1	50	25	25°	374	

Referência	Ensaio	Profundidade (m)	Tipo de Solo	Comp. do Trecho Livre (m)	Comp. do Trecho Injetado (m)	N.º de Inj.	Ø Furo (mm)	Ø Barr a de Aço (mm)	Ângulo de Incl. do Grampo	$q_s$ (kPa)
Soares e Gomes (2003)	6	ND	Solo residual silto-arenoso.	3,0	3,0	1	50	25	25°	310
Moraes e Arduino (2003)	1	ND	Argila arenosa.	3,0	3,0	1	54	20	ND	162*
	2	ND	Argila arenosa.	3,0	3,0	1	54	20	ND	
Alonso e Falcone (2003)	1	ND	Argila silto-arenosa.	ND	ND	3	100	20	ND	ND
	2	ND	Argila silto-arenosa.	ND	ND	3	100	20	ND	ND
Proto Silva (2005)	1	ND	Solo residual argilo-arenoso.	1,0	3,0	2	75	22	11°	ND
	2	ND	Solo residual argilo-arenoso.	1,0	3,0	2	75	22	11°	166
	3	ND	Solo residual areno-argiloso.	1,0	3,0	2	75	22	11°	216
	4	ND	Solo residual areno-argiloso.	1,0	3,0	2	75	22	11°	249
	5	ND	Solo residual areno-argiloso.	1,0	3,0	2	75	22	11°	269
	6	ND	Solo residual areno-argiloso.	1,0	3,0	2	75	22	11°	280
	7	ND	Solo residual areno-argiloso.	1,0	3,0	2	75	22	11°	258
	8	ND	Solo residual areno-argiloso.	1,0	3,0	2	75	22	11°	263
Magalhães (2005)	1	ND	Silte areno-argiloso.	0,5	3,5	2	75	22	10°	123
	2 <sup>(p)</sup>	ND	Silte areno-argiloso.	0,5	3,5	2	75	-	10°	46
	3 <sup>(p)</sup>	ND	Silte areno-argiloso.	0,5	3,5	2	75	-	10°	130
	4 <sup>(p)</sup>	ND	Silte areno-argiloso.	0,5	3,5	2	75	-	10°	30
	5 <sup>(p)</sup>	ND	Silte areno-argiloso.	0,5	3,5	2	75	-	10°	3
	6 <sup>(p)</sup>	ND	Silte areno-argiloso.	0,5	3,5	2	75	-	10°	35

Referência	Ensaio	Profundidade (m)	Tipo de Solo	Comp. do Trecho Livre (m)	Comp. do Trecho Injetado (m)	N.º de Inj.	Ø Furo (mm)	Ø Barr a de Aço (mm)	Ângulo de Incl. do Grampo	$q_s$ (kPa)
Magalhães (2005)	7	ND	Silte areno-argiloso.	0,5	3,5	2	75	22	10°	250
	8 <sup>(p)</sup>	ND	Silte areno-argiloso.	0,5	3,5	2	75	-	10°	122
	9 <sup>(p)</sup>	ND	Silte areno-argiloso.	0,5	3,5	2	75	-	10°	156
	10 <sup>(p)</sup>	ND	Silte areno-argiloso.	0,5	3,5	2	75	-	10°	91
	11 <sup>(p)</sup>	ND	Silte areno-argiloso.	0,5	3,5	2	75	-	10°	58
	12 <sup>(p)</sup>	ND	Silte areno-argiloso.	0,5	3,5	2	75	-	10°	91
Springer (2006)	1	ND	Solo residual maduro.	1,0	3,0	1	101,6	25,4	10°	101
	2	ND	Solo residual jovem.	1,0	3,0	2	101,6	25,4	10°	159
	3	ND	Solo residual jovem.	1,0	3,0	2	101,6	25,4	10°	168
	4	ND	Solo residual argilo-arenoso.	1,0	3,0	1	101,6	25,4	10°	147
	5	ND	Solo residual argilo-arenoso.	1,0	3,0	1	101,6	25,4	10°	145
	6	ND	Solo residual argilo-arenoso.	1,0	3,0	2	101,6	25,4	10°	ND
	7	ND	Solo residual argilo-arenoso.	1,0	3,0	2	101,6	25,4	10°	184
	8	ND	Solo residual argilo-arenoso.	1,0	3,0	2	101,6	25,4	10°	201
	9	ND	Solo residual argilo-arenoso.	1,0	3,0	2	101,6	25,4	10°	188
	10	ND	Solo residual argilo-arenoso.	1,0	3,0	2	101,6	25,4	10°	ND
	11	ND	Solo residual argilo-arenoso.	1,0	3,0	2	101,6	25,4	10°	217
	12	ND	Solo residual argilo-arenoso.	1,0	3,0	2	101,6	25,4	10°	210
	13	ND	Solo residual argilo-arenoso.	1,0	3,0	2	101,6	25,4	10°	200
	14	ND	Solo residual argilo-arenoso.	1,0	3,0	1	101,6	25,4	10°	115

Referência	Ensaio	Profundidade (m)	Tipo de Solo	Comp. do Trecho Livre (m)	Comp. do Trecho Injetado (m)	N.º de Inj.	Ø Furo (mm)	Ø Barr a de Aço (mm)	Ângulo de Incl. do Grampo	$q_s$ (kPa)
Springer (2006)	15	ND	Solo residual argilo-arenoso.	1,0	3,0	1	101,6	25,4	10°	134
	16	ND	Solo residual argilo-arenoso.	1,0	3,0	1	101,6	25,4	10°	94
	17	ND	Solo residual argilo-arenoso.	1,0	3,0	1	101,6	25,4	10°	129
	18	ND	Solo residual silto-areno-argiloso.	1,0	3,0	2	88,9	22	10°	200
	19	ND	Solo residual silto-areno-argiloso.	1,0	3,0	2	88,9	22	10°	231
	20	ND	Solo residual silto-areno-argiloso.	1,0	3,0	2	88,9	22	10°	211
	21	ND	Solo residual silto-areno-argiloso.	1,0	3,0	1	88,9	22	10°	162
	22	ND	Rocha alterada e argila arenosa.	1,0	3,0	2	88,9	22	10°	206
	23	ND	Rocha alterada e argila arenosa.	1,0	3,0	2	88,9	22	10°	200
	24	ND	Solo residual silto-areno-argiloso.	1,0	3,0	1	76,2	22	11°	240
	25	ND	Solo residual silto-areno-argiloso.	1,0	3,0	2	76,2	22	18°	180

\*Valor médio obtido nos ensaios;

ND: dado não disponível;

<sup>(p)</sup>Grampo reforçado com fibras de polipileno.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)