

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

FACEAMENTO DE SOLO GRAMPEADO COM MALHAS DE AÇO-
ESTUDO DOS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

Bruno Denardin da Rosa

Porto Alegre
2015

BRUNO DENARDIN DA ROSA

**FACEAMENTO DE SOLO GRAMPEADO COM MALHAS DE
AÇO- ESTUDO DOS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

Porto Alegre
2015

BRUNO DENARDIN DA ROSA

**FACEAMENTO DE SOLO GRAMPEADO COM MALHAS DE
AÇO – ESTUDO DOS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO**

Esta dissertação de Mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 3 de Julho de 2015

Prof. Luiz Antônio Bressani
Dr. pelo Imperial College of Science and
Technology, Reino Unido
orientador

Prof. Carlos Torres Formoso
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. Pela UFRGS

Prof^a. Maria Esther Soares Marques (IME)
Dr^a. pela COPPE/UFRJ

Eng. Felipe Gobbi Silveira
Dr. pela UFRGS

Eng. Álvaro Pereira
Dr. pela UFRGS

Dedico este trabalho à meus pais, Edison e Núbia, e a
minhas irmãs, Ana Lúcia e Verônica, por todo amor
carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

O primeiro agradecimento que gostaria de fazer é para minha toda a minha família, em especial, para meus pais, Edison e Núbia da Rosa, que durante toda a vida tiveram como principal preocupação e objetivo prover a mim e a minhas queridas irmãs uma educação de qualidade, abrindo mão de alguns de seus sonhos para que nós pudéssemos ter a chance alcançar os nossos. Impossível deixar de falar que a educação também se constrói com base em exemplos, que para mim foi um caráter exemplar de um pai e uma mãe que sempre nos incentivaram e nos mostraram a diferença entre o certo e o errado, que tiveram um papel fundamental para que eu chegasse até aqui.

As minhas irmãs, Verônica e Ana Lúcia, agradeço pelo exemplo que me deram, me ensinando e protegendo, principalmente na hora das brigas com a turma da rua. Também agradeço por sempre terem sido fonte de incentivo, pois sempre vi as suas brilhantes conquistas admirado, e sempre pensei que um dia elas pudessem ver as minhas e sentir-se da mesma maneira. Por isso e muito mais, eu deixo aqui meu muito obrigado a vocês, que sempre foram e sempre serão meus maiores ídolos.

Para minhas tias e tios, em especial a tia Nara, Naia, Anita, Rosane, Sérgio, Clóvis, e Rubinho, não posso deixar de agradecer imensamente por todos contribuíram de uma maneira ou de outra para a minha formação. Aos meus queridos primos, que sempre foram parceiros para todas as situações deixo a minha lembrança.

Também agradeço a todos os meus amigos, e casualmente, colegas e ex-colegas de trabalho, Felipe, Anderson, Marcelo, Álvaro, Vitor, Patrícia, Astrid, Álisson e Adriano por todo o apoio, incentivo e compreensão que foram gentilmente ofertados por eles durante a execução do trabalho. Somado a tudo isso, quero agradecer imensamente pelo apoio técnico que estes colegas de profissão me deram, auxiliando no desenvolvimento do trabalho, com suas sugestões e ideias, que tenho certeza enriqueceram o trabalho.

Gostaria de fazer um agradecimento especial ao Felipe e Maria Teresa, que juntos acreditam em mim, e investiram tempo e recursos para a realização do trabalho, viabilizando o desenvolvimento e construção de todos os equipamentos utilizados para a obtenção dos dados. necessários para a elaboração da minha dissertação.

Ao meu orientador, e mestre, o Prof. Bressani deixo a minha enorme gratidão, pois durante este período da minha vida ele sempre me apoiou e foi solícito para as minhas dúvidas e questionamentos, sendo muito gentil e atencioso em todas as situações. Agradeço imensamente por todo o conhecimento que foi transmitido por este professor, que me fez enxergar a vastidão da engenharia geotécnica, na qual estou dando os primeiros passos.

Também agradeço a professora Esther, professora do IME, que cordialmente cedeu o espaço para a realização de parte dos ensaios apresentados na dissertação. A esta professora deixo o muito obrigado, e lembro que ela contribuiu para a realização dos ensaios, acompanhando o a execução dos mesmos, compartilhando as suas ideias.

À equipe da Martins Campelo tem minha gratidão pelo exímio trabalho realizado no desenvolvimento e construção das prensas e pórticos utilizados neste trabalho, além de todo o apoio técnico de sua equipe, que foi cordialmente cedida para apoiar a realização dos ensaios em sua fábrica.

“Se enxerguei mais longe, foi porque me apoiei sobre os ombros de gigantes”

Isaac Newton

RESUMO

Da Rosa, B. D. Faceamento de solo grampeado com malhas de aço – Estudo dos critérios de dimensionamento. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O uso de sistemas de faceamento flexíveis com malhas metálicas é uma alternativa viável ao uso do concreto projetado como faceamento em sistemas de solo grampeado. Vários modelos de malhas são empregados hoje para este uso, sendo classificados pela resistência à tração no sentido longitudinal. Mesmo que relevante, segundo Cala *et al.*, (2012), somente este dado é insuficiente para o correto dimensionamento destas soluções. A presente pesquisa busca identificar quais os parâmetros de resistência são necessários para o dimensionamento de um faceamento em malha metálica. Para tanto foram avaliadas duas metodologias desenvolvidas especificamente para as malhas aplicadas junto com a solução de solo grampeado, os métodos Ruvolum e Macro1. Foram então desenvolvidos equipamentos, similares aos utilizados por Roduner (2011) e Cala *et al.* (2012), para caracterizar 4 diferentes modelos de malhas, avaliando a resistência das mesmas frente aos esforços considerados nos modelos de cálculo investigados, tração e o cisalhamento no contato malha/grampo. Deste modo, foram utilizados resultados de ensaios em escala real com a simulação de um talude em solo tratado com as 4 malhas, para a validação dos métodos de dimensionamento, e para investigar quais os parâmetros de resistência da malha são mais importantes. Como resultado foram determinadas as resistências das malhas avaliadas, sendo a de tração no sentido longitudinal entre 50 e 140 kN, e a resistência no contato malha/grampo, que variou entre 10 e 30 kN. Por fim foi realizada uma análise paramétrica com o método Ruvolum a fim de verificar a influência na variação da coesão, espessura instável e ângulo de atrito, dados nem sempre bem definidos em projeto. Os resultados mostram, como era esperado, a grande sensibilidade da variação nos resultados frente aos efeitos da coesão, sendo então recomendado, como em qualquer análise de estabilidade cautela no uso deste parâmetro. A análise destes resultados permite concluir que o método mais adequado para modelar um talude em solo grampeado com face em tela foi o Ruvolum, com previsões que se aproximaram das medições reais dos ensaios de campo.

Palavras-chave: *solo grampeado; faceamento; telas de metálicas; ensaios de campo e laboratório.*

ABSTRACT

Da Rosa, B. D. Soil nail facing with steel meshes – Design parameters study. 2015. Master thesis (Engineering Master). Graduate program of Civil Engineering of UFRGS, Porto Alegre.

The use of flexible facing systems with steel meshes is a viable alternative to the use of shotcrete as facing in soil nailing systems. Currently several different models meshes are being used today for this purpose, being classified only by the tensile strength in the longitudinal direction of the mesh. Even though this parameter is quite relevant, alone it cannot be used to design the flexible facing systems. So this research aims to identify which steel mesh strength parameters are really needed for the correct dimensioning of such solutions. In order to do so two calculation methodologies, specially developed for steel meshes design, were investigated. The design models are called Ruvolum and Macro1 Equipments were developed, similar to those presented in Cala *et al.* (2012), to investigate four different models of mesh, in order to find the strength parameters presented on the studied calculation models, being than tensile and shear. Thus, to validate the investigated design methodologies, field tests results were compared to the models predictions. As product of the research it was possible to determine the tensile strength of the 4 meshes models, being then ranging from 50 and 140 kN. Also it was possible to define the shear resistance in the nail head/mesh contact, which ranges from 10 to 30 kN. The last step of the research was a parametric analysis, performed with the Ruvolum method to evaluate the influence on the variation of cohesion, unstable thickness and friction angle in the predictions, since this data aren't always available in ordinary projects. These analysis have showed that the most influent parameter is cohesion, one that is very hard to determine. Also it was found by the results analysis that the appropriate calculation model to simulate a slope stabilized with soil nail and steel meshes facing is the Ruvolum, due the closeness of the predictions to the real field data.

Keywords: *soil nailing; facing; metal screens; Field and laboratory tests.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Problemática da pesquisa	17
1.2	Objetivos.....	18
1.3	Organização da Dissertação.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Solo grampeado	20
2.1.1	Histórico de desenvolvimento	20
2.1.2	Definições.....	22
2.1.3	Aplicações	23
2.1.4	Metodologias executivas	26
2.1.5	Interação Solo/Grampo.....	27
2.1.6	Modelos de Ruptura	32
2.1.7	Dimensionamento.....	36
2.2	Sistemas de faceamento.....	41
2.2.1	Concreto Projetado	41
2.2.2	Sistemas de Faceamento em Telas Metálicas.....	48
3	DESCRIÇÃO DE ENSAIOS E EQUIPAMENTOS	70
3.1	Ensaios realizados em escala real.....	70
3.1.1	Equipamentos e montagem.....	70
3.1.2	Instrumentação utilizada no ensaio.....	73
3.2	Ensaios de laboratório	76
3.2.1	Prensa para ensaio de tração.....	76
3.2.2	Pórtico utilizado para o ensaio de tração	78
3.2.3	Pórtico do ensaio de resistência ao cisalhamento placa/malha.....	80
3.2.4	Ensaio de puncionamento	83
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	84
4.1	Materiais utilizados na pesquisa.....	84
4.1.1	Telas metálicas utilizadas	84
4.1.2	Placas de fixação	85
4.1.3	Material utilizado como solo nos ensaios em escala real	86

4.2	Procedimentos dos ensaios	87
4.2.1	Metodologia dos ensaios de tração	88
4.2.2	Ensaio de Resistência Malha/Placa.....	90
4.2.3	Ensaio de Puncionamento.....	92
5	APRESENTAÇÃO DA ANÁLISE DOS RESULTADOS	95
5.1	Ensaio de tração	95
5.1.1	Malha metálica modelo TECCO G65/2 mm	95
5.1.2	Malha metálica modelo DELTAX G80/2 mm	97
5.1.3	Malha metálica modelo TECCO G65/3 mm	98
5.1.4	Comentários gerais sobre os resultados.....	100
5.2	Ensaio de resistência ao cisalhamento malha/placa.....	102
5.2.1	Malha TECCO G65/2mm.....	102
5.2.2	Malha DELTAX G80/2mm.....	103
5.2.3	Malha TECCO 65/3mm	104
5.2.4	Malha TECCO 65/4mm	105
5.2.5	Comentários sobre os resultados	106
5.3	Ensaio de resistência ao puncionamento.....	107
5.3.1	Resultados do ensaio de puncionamento sem a tela metálica	108
5.3.2	Resultados dos ensaios de puncionamento com a tela metálica.....	109
5.4	Ensaio em escala real	112
5.4.1	Deformação do sistema – escaneamento a laser.....	112
5.4.2	Cargas atuantes	115
6	AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTO.....	122
6.1	Modelo de cálculo ruvolum.....	122
6.1.1	Verificação das instabilidades paralelas à superfície	122
6.1.2	Verificação das instabilidades entre dois grampos.....	125
6.2	Método de cálculo MACRO 01	128
6.2.1	Determinação dos esforços.....	128
6.2.2	Verificação do sistema de faceamento	129
6.2.3	Análise paramétrica	131
7	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	135
7.1	Conclusões.....	135
7.1.1	Conclusões em relação aos ensaios de tração nas malhas de aço.....	135

7.1.2	Conclusões em relação ao ensaio de resistência no contato malha/placa.....	135
7.1.3	Conclusões em relação ao ensaio em escala real.....	136
7.1.4	Conclusões em relação aos métodos de dimensionamento	137
7.1.5	Sugestões para trabalhos futuros	138
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		140

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Técnicas para a execução de túneis com revestimento rígido (a) e flexível (b). Adaptado de Ortigão <i>et al.</i> (1993).....	21
Figura 2: Exemplos de elementos de reforço. Adaptado Byrne <i>et al.</i> (1998)	22
Figura 3: Principais aplicações de solo grampeado (a) escavação, (b) estabilização de talude e (c) recomposição de talude. Solotrat (2012).....	24
Figura 4: Seção tipo de um grampo. Adaptado de Geoguide 7 (2008)	27
Figura 5: Montagem de um ensaio de arrancamento. Adaptado de Ortigão e Sayão (2000)...	29
Figura 6: Zonas dentro do talude estabilizado com grampo. Adaptado de Conceição (2011).	30
Figura 7: Transferência de esforços ao longo do grampo. Adaptado de Lazarte <i>et al.</i> (2003)	31
Figura 8: Esforços atuantes nos grampos (a) distribuição dos esforços no grampo dentro do talude Geoguide 7 (2008), (b) configuração dos esforços, diagramas dos esforços atuantes na interface solo/grampo e forças de tração no grampo. Adaptado Lazarte <i>et al.</i> (2003).....	32
Figura 9: Tipos de rupturas externas. Adaptado de Geoguide 7 (2008).....	34
Figura 10: Rupturas internas adaptado de Geoguide 7 (2008) e Lazarte <i>et al.</i> (2003).....	35
Figura 11: Modelo geomecânico para o cálculo do fator de segurança, utilizando uma superfície planar de ruptura. (adaptado de Byrne <i>et al.</i> (1998)).....	38
Figura 12: Exemplos de aplicação de concreto projetado. (a) talude rodoviário RTA (2005) (b) talude urbano (<i>solotrat.com.br</i> acessado em 08/06/2014).....	43
Figura 13: Bombeamento Via Seca. Adaptado de Oraee-Mirzamani <i>et al.</i> (2011).....	46
Figura 14: Bombeamento Via úmida. Adaptado de Oraee-Mirzamani <i>et al.</i> (2011).	47
Figura 15: Solução típica de faceamento utilizando malhas de aço e solo grampeado. Adaptado de (a) Roduner e Balg (2010) e (b) Cardoso <i>et al.</i> (2006).	48
Figura 16: Retenção dos blocos de rocha no pé do talude. Adaptado de Oliveira (2010)	49
Figura 17: Exemplos de aplicação de telas de aço como revestimento. Fonte: Roduner (2013)	50
Figura 18: Tela metálica associada a sistema de controle de erosão com vegetação densa. Fonte: Yoko (2006).	50
Figura 19: Representação instabilidade paralela à superfície. Adaptado de Cala <i>et al.</i> (2012)	53
Figura 20: Representação das forças atuantes no sistema. Roduner (2013).....	53
Figura 21: Hipótese de corpo instável isolado Cala <i>et al.</i> (2012).....	56
Figura 22: Cone de pressão formado abaixo da placa de fixação Roduner (2013).....	56
Figura 23: Mecanismos de ruptura (a) um só corpo e (b) dois corpos. Cala <i>et al.</i> (2012).....	58
Figura 24: Esforços atuantes na tela. Cala <i>et al.</i> (2012)	59
Figura 25: Modelos de ruptura considerados pelo MACRO1. Adaptado Macafferri (2014)....	61
Figura 26: Representação do talude. Adaptado de Maccaferri (2014).	62
Figura 27: Geometria avaliada para o cálculo da massa instável. Adaptado de Maccaferri, (2014).	62
Figura 28: Exemplo de gráfico de deformação	66
Figura 29: Deslocamento calculado.	66
Figura 30: Vista geral do ensaio em escala real de campo realizado em Winterthur Geobrigg (2012)	71
Figura 31: Vista interna da estrutura de madeira, Geobrigg (2012).....	72
Figura 32: Pontos de fixação da malha junto a estrutura.....	73
Figura 33: Superfície obtida durante um ensaio utilizando o sistema de escaneamento Laser Baraniak e Schawarz (2014).....	74

Figura 34: Formato típico do <i>strain gauge</i> (adaptado de www.sensorland.com acessado em 25/06/2014).....	75
Figura 35: Aplicação dos <i>strains gauges</i> . Adaptado de Baraniak e Schawarz (2014).....	76
Figura 36: Prensa que foi utilizada na pesquisa em sua configuração original.....	77
Figura 37: (a) Viga base (b) configuração final com o pórtico dos ensaios de tração.....	78
Figura 38: Pórtico do ensaio de tração com uma.....	79
Figura 39: Detalhes das fixações laterais do pórtico. (fonte autor).....	79
Figura 40: Visão geral do pórtico desenvolvido.....	81
Figura 41: Detalhe do funcionamento do equipamento (fonte autor).....	82
Figura 42: Detalhe do sistema de aplicação de carga (fonte autor).....	82
Figura 43: Arranjo das malhas Tecco LGA (2014).....	85
Figura 44: Formato da placa de fixação utilizada. Adaptado de Cala <i>et al.</i> (2012).....	86
Figura 45: Materiais utilizados nos ensaios em escala real (a) Seixo Flum <i>et al</i> (2014) e (b) material britado Geobruigg (2012).....	87
Figura 46: Esquema de fixação da tela junto ao pórtico de tração. (fonte autor).....	88
Figura 47: verificação do nível da viga de aplicação de carga. (fonte autor).....	89
Figura 48: Principais pontos da montagem do ensaio (fonte: autor).....	91
Figura 49: Diferenças entre os ensaios com e sem a tela Cala <i>et al.</i> (2012).....	93
Figura 50: Resultados dos ensaios de tração G65/2 mm.....	96
Figura 51: Resultados dos ensaios de tração G80/2 mm.....	97
Figura 52: Conjunto de amostras malha G65/3mm.....	99
Figura 53: Parafuso que sofreu escoamento durante o ensaio 15.....	99
Figura 54: Rupturas observadas nas amostras. (a) ensaio 12 (centro) - (b) ensaio 07 (bordo inferior) - (c) ensaio 17 (bordo superior) (fonte autor).....	100
Figura 55: Detalhe da fixação.....	102
Figura 56: Resistência ao cisalhamento da malha no contato malha/placa.....	103
Figura 57: Resultados obtidos para modelo G80/2mm.....	104
Figura 58: Resultados para o conjunto de amostras da malha G65/3mm.....	105
Figura 59: Gráfico carga x deslocamento malha G65/4 mm.....	106
Figura 60: Detalhe do deslizamento dos arames nos pontos de contato.....	107
Figura 61: Arranjo da execução dos ensaios de puncionamento no solo fonte LGA (2014).....	108
Figura 62: Curva carga x deslocamento ensaio de puncionamento em solo LGA (2014).....	109
Figura 63: Montagem do ensaio de puncionamento solo + tela LGA (2014).....	109
Figura 64: Conjunto de resultados dos ensaios de puncionamento malha+solo LGA (2014).....	110
Figura 65: Leituras com o escâner laser do ensaio de em escala real para os modelos de malhas (a) G65/2 e (b) G65/3 mm Baraniak e Schawarz (2014).....	113
Figura 66: Detalhe da porção de solo estabilizada.....	113
Figura 67: Distribuição das cargas.....	114
Figura 68: Deformações para uma tela de malha quadrada, Geobruigg (2014).....	115
Figura 69: Grampos instrumentados Baraniak e Schawarz (2014).....	116
Figura 70: Esforço de puncionamento. Adaptado de Baraniak e Schawarz (2014).....	118
Figura 71: Carga atuante no grampo que causa a flexão, Adaptado Baraniak e Schawarz (2014).....	119
Figura 72: Flexão do grampo na região de ruptura do ensaio 01. Baraniak <i>et al.</i> (2014).....	124
Figura 73: Resultados da análise paramétrica.....	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos e características dos grampos mais utilizados no Brasil. Adaptado de Ortigão e Sayão (2000). (*Tensão de ensaio ** Tensão de trabalho)	23
Tabela 2: Valores típicos de Qs utilizados. Adaptado de Elias e Juran (1990).....	28
Tabela 3: Dimensões das amostras utilizadas:	85
Tabela 4: Parâmetros característicos dos materiais	87
Tabela 5: Número de amostras por ensaio realizado	95
Tabela 6: Resumo dos resultados de puncionamento do conjunto solo + malha	111
Tabela 7: Resistência ao puncionamento das malhas	111
Tabela 8: Resumo dos resultados. Adaptado de Baraniak <i>et al.</i> (2014).....	121
Tabela 9: Cálculo do esforço de cisalhamento.	123
Tabela 10: Cálculo do esforço de puncionamento	126
Tabela 11: Verificação do volume atuante	129
Tabela 12: Cargas atuantes nos ensaios.....	129

LISTA DE SÍMBOLOS

A : Área

a espaçamento horizontal entre os grampos

a_{red} : espaçamento horizontal equivalente

b : espaçamento vertical entre os grampos

α : inclinação do talude

β : inclinação crítica do plano de falha

c : coesão do solo

δ : inclinação do cone de estabilização

D_{plate} : diâmetro da placa

d_t : incremento na tração

d_x : incremento no comprimento

ξ : raio da base do tronco do cone

ζ : raio do topo do tronco de cone

F_s : Fator de segurança

f_y : tensão de escoamento do aço

φ : ângulo de atrito do material

φ_f : diâmetro da perfuração

φ_j : ângulo de atrito da junta

G : força peso

H : altura

kN : kilonewton

L : medida de comprimento

L : comprimento injetado

N : força normal

η : espaçamento horizontal corrigido

ψ : ângulo entre a força de pré tensionamento e a horizontal

P : esforço de puncionamento

P_r : resistência ao puncionamento

P_d : esforço ao puncionamento de projeto (majorado)

Q_s : aderência solo/grampo

q : aderência solo/grampo unitária

R : reação do solo

R_g : reação do grampo

S : esforço de cisalhamento

S_r : resistência ao cisalhamento

S_d : esforço de cisalhamento de projeto (majorado)

t : espessura da camada instável

T : carga de tração

T_{ens} : carga de tração de ensaio

$T_{máx}$: carga de tração máxima

T_r : Resistência a tração da barra

T_{trab} : carga de tração de trabalho

V : tensão de pré tensionamento

V_d : tensão de pré tensionamento de projeto (majorado)

Z :esforço absorvido pela malha no contato com a placa de fixação

Z_r : resistência da malha no contato com a placa de fixação

Z_d : absorvido pela malha no contato com a placa de fixação de projeto

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA DA PESQUISA

A técnica de solo grampeado é originária da engenharia de túneis, mais especificamente da técnica NATM (New Austrian Tunneling Method), desenvolvida nos anos 50 pelo professor Landislau Von Rabcewicz, Lima (2007), que utiliza o reforço das rochas com o uso integrado de chumbadores e concreto projetado. O princípio por trás desta metodologia reside no fato de que os grampos inseridos no maciço promovem um reforço e permitem pequenas deformações do maciço estabilizado, reduzindo os esforços atuantes no revestimento e por consequência os reforços necessários. Devido à grande aplicabilidade e bons resultados desta técnica em rochas de competências variáveis, o seu uso foi expandido para materiais cada vez menos resistentes, até o ponto no qual foi aplicada a taludes de solo, apresentando resultados igualmente satisfatórios.

O uso de grampos como elemento de reforço é uma técnica bastante eficaz, tanto para taludes de corte quanto para taludes naturais, tendo sido aplicada pela primeira vez nos anos 70 na França, Lima (2007). Desde então a aplicação desta alternativa vem ganhando cada vez mais espaço no nosso país.

De acordo com Silva (2010), os grampos introduzidos no maciço atuam no sentido de estabilização de cunhas de rupturas profundas, sendo classificado como sistema de proteção passivo, entrando em carga quando a massa de solo/rocha que envolve o elemento sofre pequenas deformações. Devido a este fato, rupturas superficiais estão livres para se manifestarem, por isso geralmente a técnica de solo grampeado está associada a um sistema de faceamento, que tem por função estabilizar as possíveis rupturas superficiais que possam vir a ocorrer na face do talude. A solução clássica para o faceamento é o concreto projetado, que já está bem consolidada como faceamento no cenário mundial.

Nas últimas duas décadas, um sistema de faceamento composto por telas de aço e placas de fixação tem sido desenvolvido e ganhado espaço como alternativa ao concreto projetado. No Brasil, inúmeros modelos de telas, que apresentam diferentes arranjos de fios e resistências associadas são empregados como faceamento de taludes. Estas diferentes concepções são classificadas somente pelos critérios de resistência à tração longitudinal, geralmente em ensaios de carga em amostras com um metro de largura. Embora este parâmetro seja importante, por si só não é capaz de caracterizar por completo um sistema deste tipo, pois não é o único parâmetro de dimensionamento. Somado a esta problemática, o dimensionamento destes sistemas nem sempre é realizado corretamente, devido à falta da padronização e normas que guiem os engenheiros responsáveis para um projeto adequado.

Extensas pesquisas sobre o assunto já foram realizadas por Cala *et al.* (2012), Roduner (2011) entre outros pesquisadores no cenário internacional, sendo este assunto ainda incipiente no nosso país. Portanto, a presente pesquisa irá deter-se ao estudo destes materiais como sistema de faceamento, avaliando quais os parâmetros relevantes que devem ser conhecidos, bem como a verificação dos métodos utilizados para o dimensionamento destas soluções.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é verificar quais os parâmetros são relevantes para o dimensionamento de sistemas de faceamento flexíveis, aqui representados pelas telas metálicas, avaliando os parâmetros de resistência das malhas em conjunto com o material que compõe o talude. O objetivo é verificar se os métodos utilizados no dimensionamento correspondem ao comportamento real obtido através de ensaios de campo.

Para atingir o objetivo geral da pesquisa foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Buscar e definir métodos de dimensionamento que são utilizados atualmente para o projeto de telas metálicas. Definir claramente quais as considerações e hipóteses utilizadas para o projeto das telas metálicas, buscando a compreensão destas e apontando quais os parâmetros de resistência são necessários para o seu correto dimensionamento;
- b) Adaptar os ensaios de laboratório utilizados internacionalmente para obtenção dos parâmetros de resistência das telas, e ensaiar amostras de

malhas metálicas para obter os parâmetros que são utilizados nos métodos de dimensionamento pesquisados;

- c) Comparar as previsões com os dados de ensaios em escala real, verificando se as estimativas são próximas da realidade;
- d) Realizar uma análise paramétrica do modelo, verificando qual das considerações de cálculo é a mais próxima das dos dados reais.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação é composta por sete capítulos que estão divididos da seguinte maneira:

- a) Capítulo 1: Introdução – capítulo introdutório, onde são apresentados o problema e relevância da pesquisa e são definidos os objetivos gerais e o objetivo específico do trabalho.
- b) Capítulo 2: Revisão bibliográfica – contém uma revisão com os tópicos de interesse para o desenvolvimento da pesquisa;
- c) Capítulo 3: Descrição de Ensaios e equipamentos – apresenta os equipamentos utilizados no desenvolvimento da pesquisa. Neste capítulo todo o maquinário utilizado tanto para os ensaios de campo quanto para os ensaios de laboratório.
- d) Capítulo 4: Materiais e métodos – apresentam os materiais utilizados no desenvolvimento da pesquisa bem como os principais procedimentos seguidos na realização dos ensaios. Todos os detalhes e normas que guiam os ensaios realizados estão apresentados neste capítulo.
- e) Capítulo 5: Apresentação da análise dos resultados – detalhadamente todos os dados coletados no desenvolvimento da pesquisa e alguns comentários sobre os mesmos.
- f) Capítulo 6: Avaliação das metodologias de dimensionamento – neste capítulo serão apresentadas as previsões de cálculo e comparações com ensaios em escala real
- g) Capítulo 7: Conclusões e considerações finais – neste capítulo estão contidas as conclusões gerais e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLO GRAMPEADO

2.1.1 Histórico de desenvolvimento

O uso da técnica de solo grampeado como sistema de estabilização é originário do procedimento de estabilização de túneis NATM (New Austrian Tunneling Method), desenvolvida pelo professor Landislau Von Rabcewicz nos anos 50, e aplicada pela primeira vez na década de 60. A técnica NATM foi desenvolvida para suprir a necessidade de estabilização nas paredes laterais que surgiam gradativamente com o avanço da frente de escavação dos túneis, consistindo em instalar grampos dentro do maciço rochoso e revestir a face das paredes laterais utilizando uma delgada camada de concreto projetado, com espessura variando entre 10 e 30 cm, e malhas metálicas desempenhando o papel de armaduras, sistema ilustrado na Figura 1 (b).

Lima (2007) aponta que o fino revestimento de concreto armado tem um comportamento flexível, permitindo que o maciço rochoso sofra pequenas deformações, aliviando parte das tensões geradas e ao mesmo tempo mobilizando uma parte da resistência interna da rocha, condição que possibilita a redução na espessura do revestimento e por consequência reduz os custos para estabilizar as paredes do túnel. Em contra partida, Ortigão *et al.* (1993) afirmam que estas pequenas deformações que ocorrem no maciço rochoso geram zonas de plastificação nas rochas, sendo necessários reforçá-las pela inserção dos grampos. A Figura 1 (a) representa a solução tradicional utilizada antes do desenvolvimento do NATM, que utiliza revestimentos considerados rígidos, revestimentos em concreto bastante espesso e de elevada resistência, já que nesta configuração a resistência interna do maciço não é mobilizada.

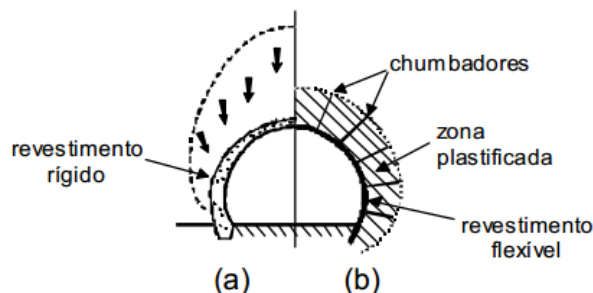


Figura 1: Técnicas para a execução de túneis com revestimento rígido (a) e flexível (b).

Adaptado de Ortigão *et al.* (1993).

Originalmente o NATM foi desenvolvido e utilizado em rochas de boa qualidade, ou seja, rochas que apresentavam elevados parâmetros de resistência, tendo para este tipo de material um excelente resultado, mostrando-se uma solução, tanto técnica quanto economicamente, viável. Gradativamente o campo de aplicação deste novo método foi expandido, sendo testado em rochas mais brandas, até o ponto em que foram realizadas experiências em taludes compostos basicamente por solos. Teixeira (2011) mostra que os primeiros relatos de aplicação da técnica de solo grampeado em taludes datam dos anos 70, na região de Versalhes na França e na cidade de Portland nos Estados Unidos, em taludes ferroviários e de escavações urbanas, respectivamente.

Devido ao grande sucesso destes projetos, diversas pesquisas foram iniciadas, objetivando compreender melhor os princípios envolvidos nesta solução, e desenvolver os fundamentos e especificações básicas para a padronização da utilização desta técnica, ou seja, o desenvolvimento de uma metodologia de projeto. Dentre as pesquisas ganha destaque especial o Projeto Clouterre, financiado pelo Ministério do Transporte Francês, entre 1986 e 1990, que tem como produto a elaboração de grande parte das metodologias utilizadas até hoje em projetos desta natureza.

No Brasil, a técnica de solo grampeado foi utilizada pela primeira vez em meados dos anos 70, no estado de São Paulo em duas importantes obras: Taludes na barragem de Xavantes e em emboques de túnel na movimentada rodovia dos Imigrantes, sem que o sucesso das obras fosse devidamente divulgado, Ortigão *et al.* (1993). Já na década de 80 esta técnica ganhou força no cenário de engenharia brasileiro e passou a ser utilizada mais corriqueiramente em inúmeras construções. As primeiras pesquisas que foram desenvolvidas para avaliar o comportamento do solo grampeado utilizado em solos tropicais, materiais tipicamente encontrados no Brasil, ocorreram somente nos anos 90, principalmente pela ação da fundação Geo-Rio, Pierk e Azevedo (2009).

Atualmente a técnica de solo grampeado é amplamente difundida e dominada em todo mundo, sendo que nos últimos anos grandes saltos tecnológicos foram dados, tanto na direção do desenvolvimento de novos equipamentos e materiais para a execução da solução como na compreensão e métodos de análise e dimensionamento.

2.1.2 Definições

O grampeamento do solo é uma técnica utilizada para estabilizar tanto os taludes naturais quanto os artificiais, que atende critérios técnicos e econômicos. A técnica consiste em introduzir elementos de reforço dentro do maciço de solo/rocha, distribuídos com um espaçamento uniforme sobre a face do talude, sendo os reforços denominados grampos ou chumbadores. A função destes elementos é conter cunhas de ruptura profundas que possam vir se originar dentro do maciço de solo/rocha devido à soma de inúmeras condições desfavoráveis (carregamentos, geometria, poro-pressões, resistência dos materiais, descontinuidades, fluxo de água, dentre outras). Neste tipo de solução é comum associar a estes grampos um revestimento para a face do talude, um sistema de faceamento, que tem por objetivo estabilizar e proteger contra processos erosivos a camada superficial do talude.

O elemento de reforço inserido dentro de taludes tem função de absorver os esforços gerados pela movimentação de uma massa de solo instável dentro do talude e redistribuí-los para a porção estável, solidarizando as duas porções de material. Segundo Byrne *et al.* (1998) os grampos podem ser constituídos por barras de aço, microestacas, estacas e até mesmo materiais sintéticos, ilustrados na Figura 2. É de extrema importância garantir que o tipo e material que compõem o elemento escolhido como reforço apresente parâmetros de resistência à flexão composta e cisalhamento compatíveis com os esforços atuantes previstos.

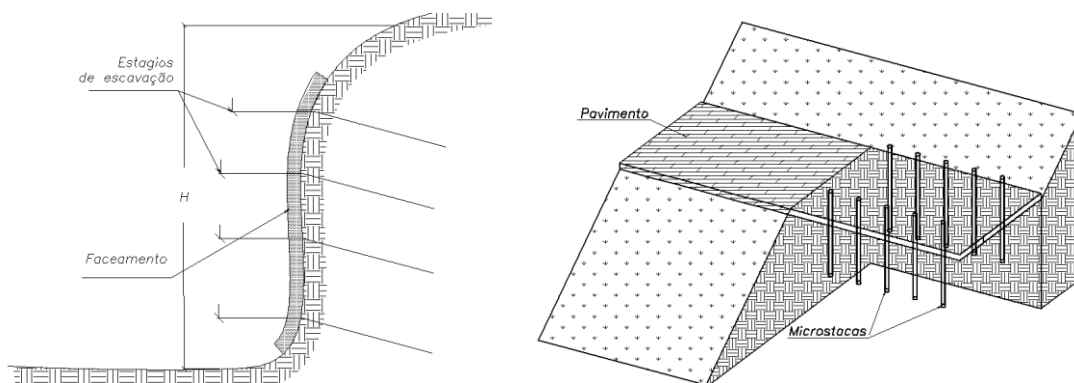


Figura 2: Exemplos de elementos de reforço. Adaptado Byrne *et al.* (1998)

O reforço composto pela combinação de barras circulares de aço e injeção de calda de cimento é o tipo o mais comum de grampo Ortigão e Sayão (2000). O sucesso deste conjunto de elementos é devido à elevada resistência dos materiais utilizados, associada a grande versatilidade e a disponibilidade no mercado no nacional. Em seu trabalho, Ortigão e Sayão (2000) também destacam a necessidade de adoção de medidas de proteção das barras de aço contra processos corrosivos, indicando a utilização de pinturas eletrolíticas e resinas epóxi, visto que o processo corrosivo compromete parte da seção transversal das barras de aço, ou seja, a resistência dos elementos de reforço é reduzida, diminuindo a segurança da solução adotada. Alguns dos modelos de barras estão apresentados na Tabela 1

Tabela 1: Tipos e características dos grampos mais utilizados no Brasil. Adaptado de Ortigão e Sayão (2000). (*Tensão de ensaio ** Tensão de trabalho)

Tipo de Aço	Diâmetro de barra (mm)	Cargas máximas (kN)	
		Ensaio (T _{ens} *) (kN)	Ensaio (T _{trab} ***) (kN)
Dywidag Gewi ST50/55	32	350	200
Dywidag Gewi ST85/105	32	600	350
CA-50	12,5	55	30
	20	140	80
	25	230	130
	32	360	200
Incotep - 13 - D	22	220	125
Incotep - 22 - D	30	380	125
Rocsolo ST 75/85	22	210	125
	25	280	165
	28	360	200
	38	660	375
	41	890	510

2.1.3 Aplicações

Lima (2007), Proto da Silva (2005), Geoguide 7 (2008), Solotrat (2012) apresentam diversos usos para o solo grampeado, sendo utilizado basicamente em três situações distintas: (a) escavação, (b) estabilização e (c) recomposição. As situações de escavação compreendem a execução de subsolos e novos taludes em função de ajustes da morfologia do terreno ao projeto. Já a estabilização está ligada a taludes antigos e naturais, que devido a alterações em alguma das condições originais (sobrecargas, alterações geométricas, fluxo de águas, intempéries) passam a apresentar sinais de instabilidades. Por fim, a recomposição se aplica a

taludes, naturais ou artificiais que experimentaram processos de ruptura, sendo retaludados e estabilizados com este sistema. A Figura 3: ilustra os principais tipos de aplicação de solo grampeado.

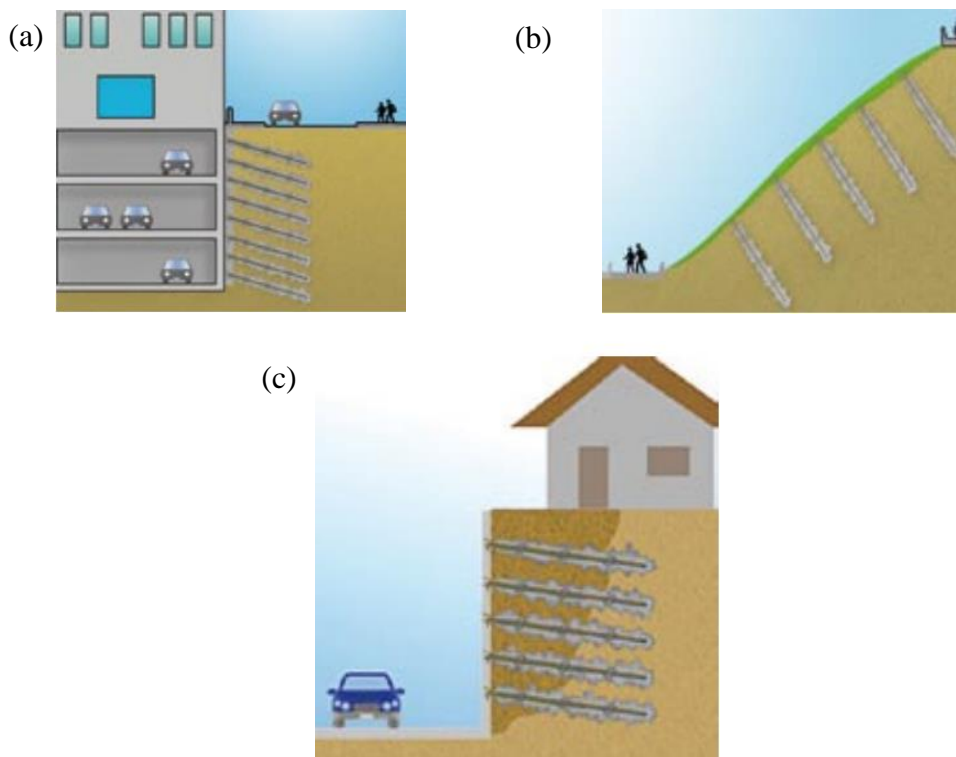


Figura 3: Principais aplicações de solo grampeado (a) escavação, (b) estabilização de talude e (c) recomposição de talude. Solotrat (2012)

Algumas das principais razões que levam os projetistas a utilizarem o solo grampeado como solução em seus projetos de estabilização são apontadas por Ortigão *et al.* (1993), Geoguide 7 (2008), Bruce *et al.* (1986) e Alonso (2010), sumarizadas da seguinte forma:

- Flexibilidade: A execução desta solução não exige a utilização de grandes equipamentos, sendo adaptável para ser aplicada em locais de difícil acesso, como por exemplo, trechos ferroviários;
- Adaptabilidade: Esta solução é menos sensível a imprevistos geológicos e geotécnicos, sendo que o projeto pode ser facilmente ajustado às condições encontradas no local;
- Velocidade: A execução da perfuração, instalação e injeção dos grampos é realizada em um curto espaço de tempo, exigindo o trabalho de pequenas equipes;

- Impacto Ambiental: Reduz a necessidade de conformação geométrica do talude, podendo ser utilizada em diferentes geometrias, reduzindo os volumes de corte, e por consequência a quantidade de material de bota-fora;
- Economia: Todos os fatores acima contribuem para a redução dos custos. Ortigão *et al.* (1993) cita que soluções deste tipo podem reduzir o custo global da obra em até 30%, frente a uma solução de cortina atirantada.

Os mesmos autores, Ortigão *et al.* (1993) , Geoguide 7 (2008), Bruce *et al.* (1986), também apresentam em seus trabalhos os principais problemas e limitações oferecidos pela técnica:

- Compatibilização de projetos: Em zonas urbanas é comum que o subsolo já esteja densamente ocupado por tubulações e fundações, elementos que podem restringir o comprimento dos grampos, e por consequência a utilização da solução. Deste modo é necessário adaptar o projeto para contemplar estes elementos;
- Questões Legais: Como os grampos ultrapassam os limites do terreno onde será executada a obra, invadindo a área da propriedade vizinha é necessário obter a permissão do proprietário para que os grampos sejam executados dentro de sua propriedade;
- Lençol freático: Um nível de água muito elevado pode causar problemas durante a perfuração e injeção dos grampos, além de ser um problema para a estabilidade do talude.
- Superfícies de rupturas muito profundas: Exige grampos com comprimentos elevados (12-15 metros), tendo como consequência uma dificuldade na execução da perfuração, elevando o custo da execução do material;
- Permeabilidade/Fraturas: Uma alta permeabilidade do solo e um elevado grau de faturamento das rochas favorecem a ocorrência de pontos de fuga do material de injeção, exigindo assim um volume maior de calda de cimento, elevando a quantidade de tempo e recursos para a execução da obra;
- Deformações: A resistência oferecida pelos grampos é mobilizada frente a pequenas deformações do maciço de solo/rocha, condição que pode comprometer a estabilidade estrutural de construções vizinhas ao talude estabilizado;
- Instabilidades superficiais: Somente a utilização dos grampos é insuficiente para a estabilização do material de superfície do talude, sendo necessário utilizar um sistema secundário para tanto.

2.1.4 Metodologias executivas

Ortigão *et al.* (1993) e Solotrat (2012) citam que existem duas principais metodologias de execução dos grampos, sendo a primeira por meio de cravação e a segunda por meio de perfuração acompanhada de injeção. Adicionalmente é possível encontrar mais especificações e recomendações executivas junto a normas brasileiras de tirantes a NBR 5629 de 2006.

A metodologia que prevê a cravação dos grampos é executada utilizando equipamentos percussivos, por exemplo, um martete hidráulico. Por este método as barras de aço são posicionadas no local de instalação desejado, instalando o martete, ou equipamento similar, na cabeça do grampo, que é acionado cravando a barra através de sucessivos golpes. Também é comum utilizar equipamentos pesados, como escavadeiras para introduzir as barras metálicas dentro do maciço de solo.

A aplicação desta técnica fica restrita a taludes compostos por solo, e preferencialmente livres de pedregulhos e matacões, que podem interferir no processo de cravação. Nestes casos, a aderência no contato solo/grampo, atrito unitário lateral, é muito baixa geralmente da ordem de 30 a 40 kPa, para solos arenosos. Em solos argilosos estes valores podem alcançar patamares ainda menores, tornando a técnica desvantajosa frente às necessidades de projeto.

A execução dos grampos pelo método da perfuração, com pré-furo, com exemplo de grampo dado na Figura 4, é a técnica mais utilizada, e consiste em perfurar o terreno, com o auxílio de perfuratrizes hidráulicas ou pneumáticas, com diâmetros superiores ao do grampo, comumente 53, 63, 75 e 100 mm. O grampo é então introduzido no pré-furo na posição desejada, com o auxílio de dispositivos centralizadores, comumente espaçados em 2,0 m, cujo objetivo é garantir o correto posicionamento do grampo dentro do furo. Junto às barras de aço são instalados tubos de injeção perdidos, tubos de PVC, com diâmetros entre 5 e 18 mm, cuja função é conduzir a nata de cimento para dentro da área do furo, distribuindo uniformemente a calda no entorno da barra. Nestes tubos são previstas válvulas de injeção, pequenas perfurações no tubo que se expandem com a pressão de injeção, permitindo o livre fluxo da calda de cimento. Estas válvulas são espaçadas uniformemente entre 0,5 e 1,50 m, dependendo da pressão de injeção, e características da nata de cimento. O número de tubos é função do número de injeções que serão realizadas, sendo recomendado um tubo por injeção.

A injeção do pré-furo preenchido é realizada utilizando calda de cimento ou resinas epóxi. O material utilizado na injeção exerce grande influência na resistência ao arrancamento,

devendo este ser escolhido de acordo com as necessidades do projeto. Geralmente estes materiais são injetados, sobre pressão, para garantir que o material preencha de fato o furo e solidarize o grampo com a estrutura do solo/rocha que envolve o furo.

É recomendado um intervalo de pelo menos 12 horas entre cada processo de injeção, para permitir o ganho de resistência do material já injetado, sem o risco de danificá-lo com a nova injeção. Esta metodologia executiva permite que a aderência na interface, solo/grampo, seja superior, podendo atingir valores da ordem de 100 kPa para solos e 800 kPa para rochas.

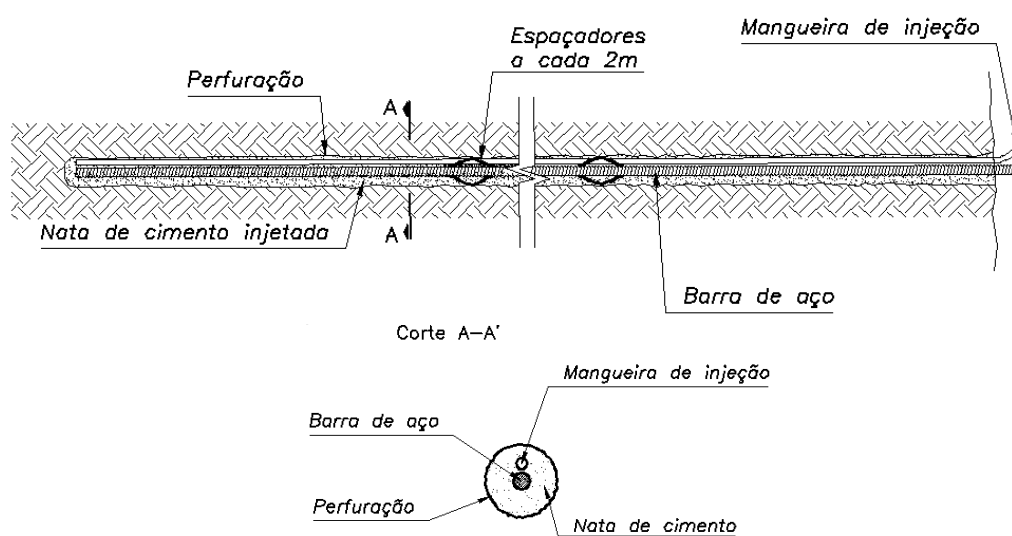


Figura 4: Seção tipo de um grampo. Adaptado de Geoguide 7 (2008)

2.1.5 Interação Solo/Grampo

2.1.5.1 Aderência na interface solo/grampo

A aderência no contato solo/grampo, conhecida com Q_s , é um dos parâmetros mais importantes em projetos de solo grampeado. Este parâmetro representa a resistência máxima ao arrancamento dos grampos quando estes são submetidos a esforços de tração. O valor de Q_s é influenciado pelas propriedades de comportamento do solo no qual o grampo foi executado, pelas características da superfície dos grampos, pelo método construtivo, bem como pelas propriedades de resistência da nata de cimento ou resina utilizada.

Bustamante e Doix (1985) apresentam um modelo relativamente simples para determinar a aderência na interface solo/grampo, Equação 1. A proposta destes autores engloba todos os fatores que influenciam neste parâmetro, podendo ser expressa da seguinte maneira:

$$Q_s = \frac{T}{\pi \phi_f L_i} \quad \text{Equação 1}$$

Onde Q_s é a aderência no contato solo/grampo (kN/m^2), T representa a carga aplicada a grampo no momento da ruptura (kN), ϕ_f o diâmetro da perfuração (m) e L_i (m) o comprimento injetado do grampo.

Alonso (2010) cita em seu trabalho que uma estimativa inicial do valor da resistência de aderência pode ser obtida utilizando correlações empíricas e teóricas, fornecendo ao projetista uma ideia preliminar da magnitude do valor de Q_s . Estas correlações geralmente estão fundamentadas em resultados de N_{spt} , características táteis e visuais do material encontrado no talude, bem como a experiência do projetista. Fica claro que a utilização deste método para a determinação do Q_s é limitado a uma fase preliminar do desenvolvimento de um projeto de estabilização, sendo necessária a confirmação da hipótese de cálculo através de ensaios

A Tabela 2, apresenta alguns valores típicos de Q_s para diferentes tipos de materiais.

Tabela 2: Valores típicos de Q_s utilizados. Adaptado de Elias e Juran (1990)

Material	Tipo de Rocha/Solo	Aderência Q_s (kN/m^2)
Rocha	Calcários	300-400
	Filito	100-300
	Dolomita mole	400-600
	Dolomita Fissurada	600-1000
	Arenito Intemperizado	200-300
	Basalto	500-600
Solos Não coesivos	Areia Siltosa	100-150
	Silte	60-75
	Colúvio	75-150
	Areia	380
Solos Finos	Argila Siltosa	35-50
	Silte Argiloso	90-140
	Argila Mole	20-30
	Argila Rija	40-60

Com o avanço do projeto básico para a fase executiva, é fundamental que as estimativas realizadas para a resistência a aderência sejam refinadas, utilizando para tanto ensaios de arrancamento, determinando o valor real de Q_s para o material de interesse. A seguir, uma breve apresentação sobre este tipo de ensaio será realizada.

Os ensaios de arrancamento são realizados *in situ*, instalando na cabeça do grampo um macaco hidráulico, responsável pela aplicação de cargas, tracionando o conjunto. Concomitantemente ao carregamento são realizadas as medições de deformações e das cargas aplicadas, até que a carga limite de ensaio seja alcançada ou se observe o arrancamento do grampo. A carga limite do ensaio é referente à resistência da barra de aço, de modo que o valor máximo de carregamento deve ser inferior à resistência da barra, evitando que a barra sofra rupturas bruscas, condição que pode projetar a barra em alta velocidade para fora do furo, colocando em riscos a vida de pessoas próximas, NBR 5629.

A norma brasileira de execução de tirantes NBR 5629 define quais os principais procedimentos a serem seguidos para a execução de ensaios de arrancamento. Também é possível encontrar mais informações sobre este ensaio em trabalhos de Ortigão e Sayão (2000), Byrne *et al.* (1998), Proto (2005) entre outros autores.

O valor máximo do carregamento atingido durante o ensaio, carga de ruptura ou limite, é utilizada juntamente com a Equação 1 para determinar o valor da aderência na interface. A Figura 5 apresenta um croqui geral da configuração de montagem de um ensaio de arrancamento típico.

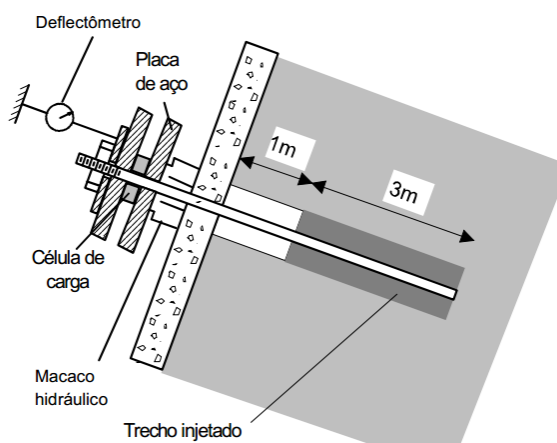


Figura 5: Montagem de um ensaio de arrancamento. Adaptado de Ortigão e Sayão (2000).

Mesmo que não seja observado visualmente o arrancamento do bulbo injetado, é possível estimar o momento da ruptura por meio da análise das deformações registradas (NBR 5629). Com base nos registros, é possível determinar as deformações plásticas e elásticas que ocorrem ao longo do ensaio, de modo que grandes deformações plásticas indicam a movimentação relativa do bulbo em relação ao solo, o que indica que a ruptura no contato solo grampo se manifesta.

Cabe lembrar que a calda de cimento também deve atender a requisitos de projeto mínimos, sendo que este material é normatizado, norma brasileira NBR 7681. A norma indica a utilização de calda de cimento com $f_{ck} \geq 25 \text{Mpa}$.

2.1.5.2 Distribuição de esforços

Um modelo idealizado de talude, relativamente simples, pode auxiliar no entendimento dos mecanismos do solo grampeado, Geoguide 7 (2008) e Silva (2009). Considerando um talude comum, constituído por um material homogêneo e isotrópico, no qual existem tensões de cisalhamento atuando, é plausível imaginar que dentro deste talude exista um plano onde as tensões atuantes podem superar a resistência do solo/rocha que compõem o maciço. O referido plano é conhecido como superfície de ruptura, podendo assumir diferentes formatos (circulares, cunhas, planos e formas irregulares). A superfície de ruptura também divide o talude em duas regiões, a Zona Ativa e a Zona Passiva, Figura 6.

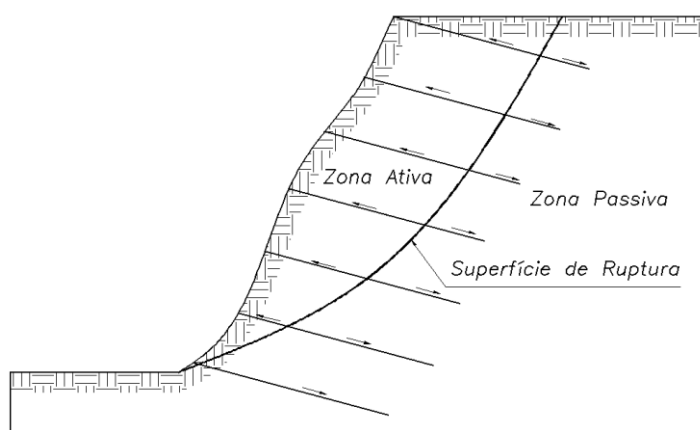


Figura 6: Zonas dentro do talude estabilizado com grampo. Adaptado de Conceição (2011)

A Zona Ativa do talude corresponde à massa de solo instável, limitada pela face do talude e a superfície de ruptura. O restante do talude, compreendido abaixo da superfície de ruptura é chamada de Zona Passiva, massa de material estável. Sendo assim, os grampos têm por principal função absorver os esforços gerados pela movimentação da zona ativa, que tende a se deslocar para fora do maciço, e distribuí-los ao longo do comprimento ancorado dentro da zona passiva, solidarizando as regiões do talude, Geoguide 7 (2008).

Estes esforços são transmitidos à massa de solo estável por meio da aderência na interface solo/grampo, mobilizada frente aos pequenos deslocamentos dos grampos em relação ao solo (alguns milímetros). A mobilização da resistência ao longo dos grampos não ocorre de maneira uniforme, devido às características construtivas dos grampos, da magnitude dos

esforços atuantes e das características heterogêneas do subsolo, Lima (2007). Todavia, para fins de simplificação e de cálculo, a distribuição da resistência mobilizada é considerada uniforme ao longo do comprimento das barras, sendo representada pela Figura 7.

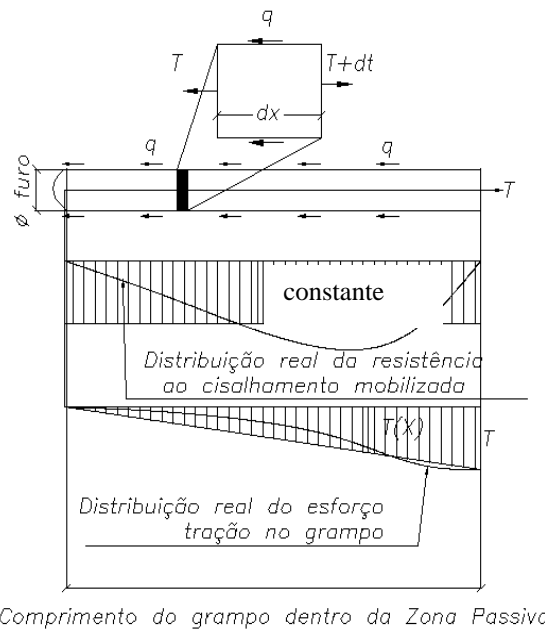


Figura 7: Transferência de esforços ao longo do grampo. Adaptado de Lazarte *et al.* (2003)

Segundo Proto da Silva (2005) os esforços atuantes nos grampos ocorrem em direções opostas dentro das zonas Ativa e Passiva, conforme ilustrado na Figura 8 (b). Esta condição solicita axialmente o grampo, surgindo assim os esforços de tração dentro da barra de aço, atingindo valores nulos no ponto onde o grampo intercepta a superfície de ruptura, Ehrlich (2003). Neste mesmo ponto de interseção, o esforço de tração sofre uma inversão de sentido e atuam esforços cisalhantes e fletores, Figura 8 (a), que surgem quando a massa ativa tende a se deslocar para baixo, Geoguide 7 (2008).

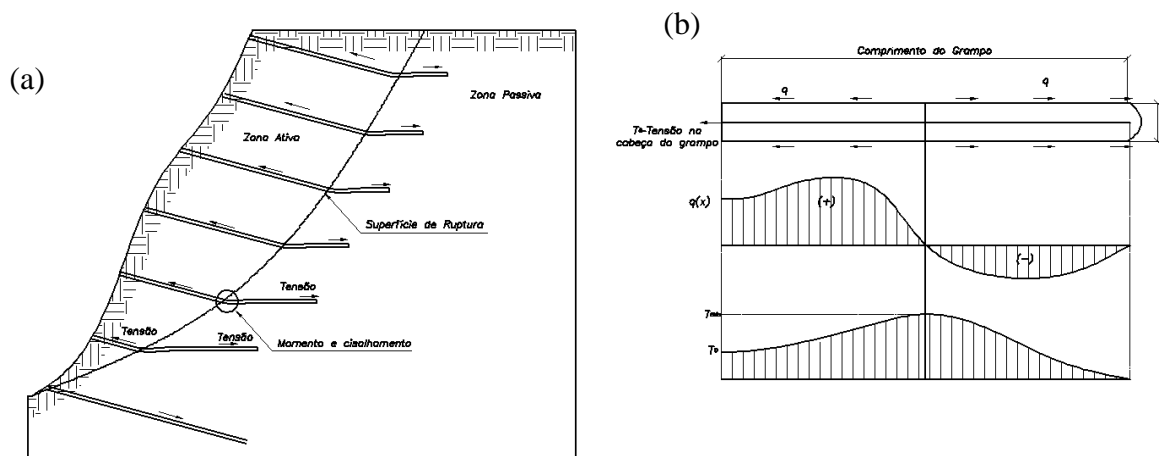


Figura 8: Esforços atuantes nos grampos (a) distribuição dos esforços no grampo dentro do talude Geoguide 7 (2008), (b) configuração dos esforços, diagramas dos esforços atuantes na interface solo/grampo e forças de tração no grampo. Adaptado Lazarte *et al.* (2003).

Ainda analisando a Figura 8 (b) é possível verificar que na extremidade externa dos grampos, porção voltada para a face do talude, existe um esforço atuante, esforço de tração da barra, representado nas figuras por T_0 . Este esforço será transmitido pontualmente ao sistema de faceamento utilizado, que deve apresentar uma resistência compatível.

2.1.6 Modelos de Ruptura

No início do desenvolvimento da técnica de solo grampeado, os métodos de dimensionamento utilizados não possuíam um consenso comum entre projetistas devido ao incipiente desenvolvimento teórico da técnica Finney *et al.* (1998), sendo as principais premissas de projeto baseadas nas experiências anteriores onde estas soluções foram empregadas. Visando compartilhar os conhecimentos adquiridos, uma conferência sobre solo grampeado foi realizada em Paris, no ano de 1979, onde diversos profissionais atuantes da área discutiram o comportamento destas soluções, com destaque aos engenheiros Franceses e Alemães.

Byrne *et al.* (1998) e Geoguide 7 (2008) apontam as principais análises que devem ser levadas em conta para o correto dimensionamento de um sistema de estabilização composto pela técnica de solo grampeado como sendo:

- 1) Análises de estabilidade: Estes critérios se relacionam com o estado último de serviço do sistema, no qual diferentes mecanismos de ruptura poderão se manifestar levando a uma falha estrutural tanto do talude tratado como das estruturas adjacentes a ele.
- 2) Análises de Serviciabilidade: Esta análise diz respeito ao estado limite de utilização do sistema, ou seja, corresponde ao estado no qual a funcionalidade do talude ou

estruturas adjacentes fica comprometida, devido a deformações excessivas que se manifestaram no talude.

- 3) Análises de Durabilidade: É imprescindível avaliar as condições de agressividade do meio em que os grampos serão inseridos, verificando se a resistência química e física oferecida pelos elementos é compatível com o meio no qual estão inseridos.

Os critérios acima apresentados são os principais em um dimensionamento deste tipo de solução, entretanto é necessário elucidar o fato de que além dos critérios técnicos de resistência é necessário realizar uma avaliação dos aspectos socioeconômicos e ambientais envolvidos no projeto em questão.

2.1.6.1 Mecanismos de ruptura

Geoguide 7 (2008), Lazarte *et al.* (2003), Clouterre (1991) Finney *et al.* (1998), Byrne *et al.* (1998), Cheng e Lau (2008) citam que é fundamental para o engenheiro projetista conhecer os mecanismos de ruptura passíveis de se manifestarem em taludes onde a solução de solo grampeado será adotada para dimensionar corretamente o sistema frente os critérios supracitados. Taludes instáveis, tanto os naturais quando os escavados, tratados com solo grampeado estão sujeitos a basicamente dois modos de ruptura, as rupturas internas, que se manifestam na massa de solo dentro da área tratada bem como nos elementos que compõem a solução de solo grampeado, e as rupturas externas, geralmente observadas fora da porção tratada do maciço de solo.

2.1.6.2 Rupturas Externas

As rupturas externas, como o próprio nome já diz, envolvem processos que se manifestam externamente à massa de solo tratada com grampos, sendo típica a movimentação do talude como um todo. Esta condição pode ser observada quando a maior parte da superfície de ruptura se manifesta fora da área grampeada, condição que faz com que a maior parte, e até mesmo a totalidade, do comprimento dos grampos esteja inserido na zona ativa do talude, tornando a solução ineficaz contra movimentação. A Figura 9 mostra os modelos conceituais utilizados para descrever como as rupturas externas se manifestam em taludes tratados com solo grampeado

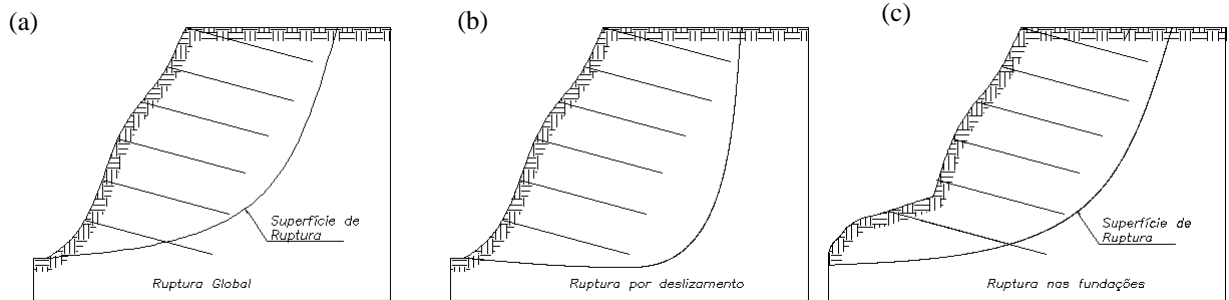


Figura 9: Tipos de rupturas externas. Adaptado de Geoguide 7 (2008)

- a) Estabilidade Global: Este modelo refere-se à estabilidade global da massa de solo grampeado. A superfície de ruptura, neste modelo, tende passar atrás e por baixo dos grampos, a superfície é muito profunda. Sendo os grampos ficam totalmente na zona ativa, não oferecendo proteção alguma ao talude, pois não são capazes de ancorar a massa instável.
- b) Deslizamento: Compreende o tipo de falha que pode ocorrer devido à movimentação da massa de solo como um todo em relação à base do talude. Este mecanismo se manifesta quando as os empuxos ativos, atuantes atrás da solução de solo grampeado, superam a aderência disponível na base do talude.
- c) Ruptura nas Fundações: É o mais incomum dos mecanismos de falha de se manifestar e está geralmente associado a taludes escavados em áreas de solos moles. Ocorre pelo fato de que a escavação gera um desequilíbrio de tensões, que não é absorvido pelo material do subsolo, levando a rupturas no nível do terreno próximo ao pé do talude.

2.1.6.3 Rupturas Internas

Já as rupturas internas envolvem falhas que ocorrem dentro da massa de solo tratada com os grampos, podendo ocorrer tanto nos elementos de estabilização como no próprio solo. A Figura 10 mostra alguns modelos rupturas internas em um sistema de solo grampeado.

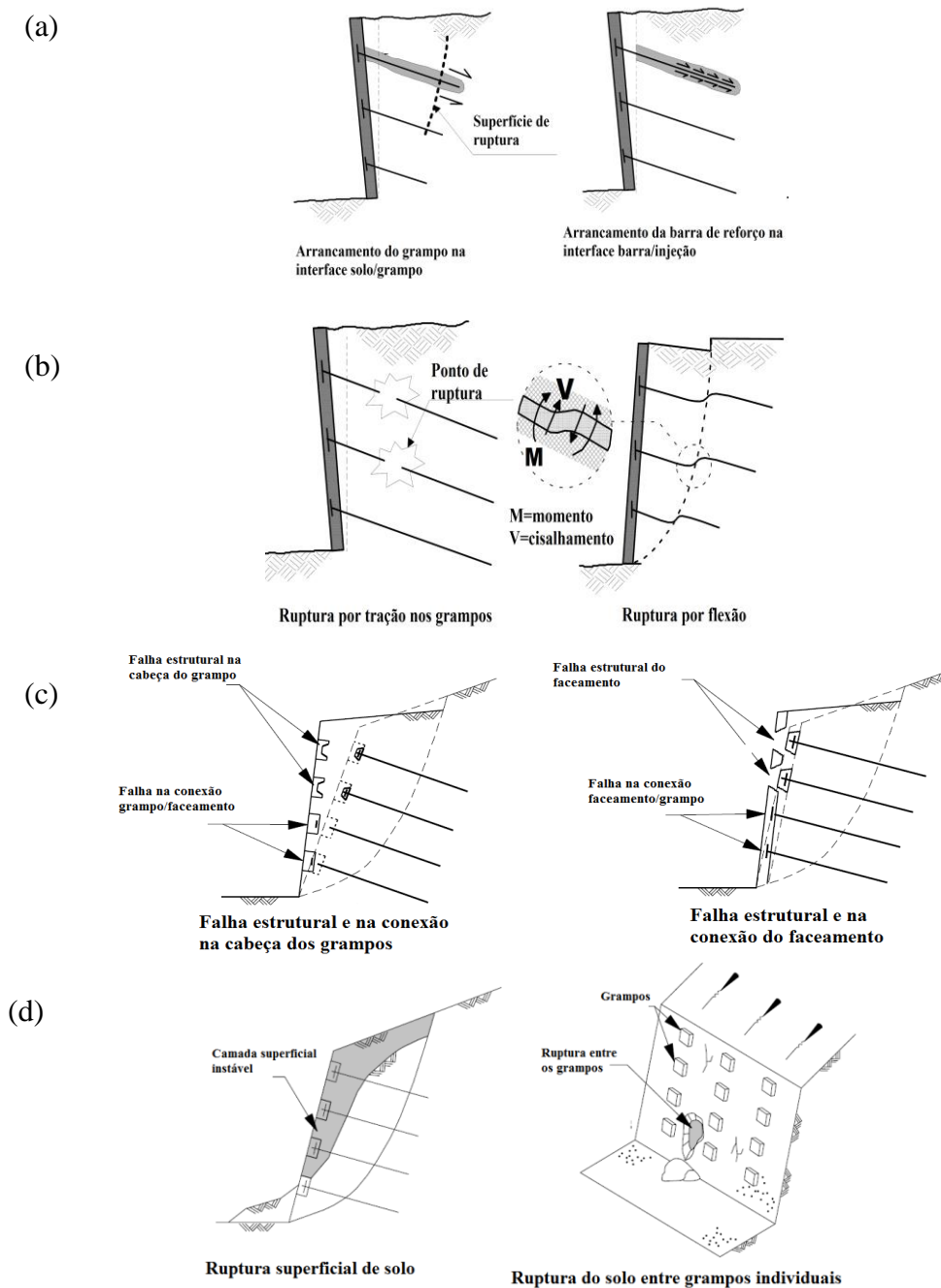


Figura 10: Rupturas internas adaptado de Geoguide 7 (2008) e Lazarte *et al.* (2003)

- a) Arrancamento dos grampos: Este tipo de falha é o modelo interno de ruptura mais comum observado em taludes estabilizados com grampo. A ocorrência desta falha pode se dar tanto na interface da barra de aço com a nata de cimento bem como na interface solo/grampo, e ocorre quando as tensões atuantes superam a capacidade de aderência entre os materiais de uma das interfaces;
- b) Falha nos Grampos: O elemento de reforço está sujeito a esforços de tração e flexão, devido à tendência de arrancamento e movimentação do maciço de solo. Deste modo estes esforços, em um dado momento para uma dada condição de carregamento,

podem superar a resistência dos elementos introduzidos como grampos, levando a falha estrutural dos reforços do sistema.

- c) Falhas no Faceamento: A movimentação da massa de solo contida atrás do faceamento pode gerar esforços de puncionamento, tração e cisalhamento no sistema de estabilização.
- d) Falhas no solo entre os grampos: este tipo de ruptura ocorre quando a massa de solo entre os grampos sofre instabilidades. Esta ruptura se dá de duas maneiras, sendo a primeira na forma de blocos individuais de solo que podem surgir entre os grampos, e a segunda na forma de uma camada superficial uniforme que tende a deslizar como um todo.

2.1.7 Dimensionamento

O dimensionamento de um talude em solo grampeado exige que o projetista avalie todos os critérios de estabilidade referentes ao talude em questão, como por exemplo, as condições de carregamento, a geometria do talude, a drenagem da área e as características do material que compõem o talude. Entretanto, na presente dissertação serão abordados e descritos somente os critérios e metodologias de dimensionamento que estão diretamente relacionados ou sofrem influência do sistema de grampeamento. É possível encontrar mais detalhes sobre o dimensionamento deste tipo solução nos trabalhos apresentados em Clouterre (1991) Geoguide 7 (2008), Lazarte *et al.* (2003), Finney *et al.* (1998), Byrne *et al.* (1998), Cheng e Lau (2008), Jiménez (2008) entre outros autores.

2.1.7.1 Estabilidade Global:

Uma abordagem simplificada para compreender o modelo de um talude consiste em imaginar que sobre a superfície de ruptura considerada existe uma massa de solo instável, cujo comportamento pode ser comparado a um bloco rígido único com tendência ao deslizamento. A estabilidade deste bloco é função da relação existente entre os efeitos estabilizantes e instabilizantes que sobre ele atuam. Mesmo que esta hipótese não seja totalmente verdadeira, pelo fato de que ao longo do talude a massa de solo tem comportamento variável, a estabilidade de um talude é expressa através de um único fator de segurança, que quando próximo da unidade (FS=1) representa a iminência de instabilidades.

$$Fs = \frac{\sum \text{forças resistentes}}{\sum \text{esforços atuantes}} \quad \text{Equação 2}$$

Os esforços responsáveis por instabilizar um talude são oriundos do peso próprio da massa de solo somada a sobrecargas, de qualquer natureza, aplicadas sobre o talude bem como os efeitos do fluxo de água. Já as forças estabilizadoras dizem respeito à resistência ao cisalhamento disponível no plano da superfície de ruptura somada a estruturas de estabilização (solo grampeado, bermas de equilíbrio, muros de gravidade, etc.).

A determinação matemática destes esforços pode ser realizada através dos métodos de análise bidimensionais de equilíbrio limite. Da Silva (2011) aponta que os métodos de equilíbrio limite foram introduzidos por Fellenius na década de 30, e aprimorados por Janbu (1954), Bishop (1955), Morgenstern e Price (1965), Spencer (1967) e Correia (1988). As principais diferenças entre estes métodos de cálculo estão nas considerações realizadas acerca do sistema de forças que atuam, nas equações de estática a serem satisfeitas bem como a distribuição das forças.

No caso dos taludes tratados com solo grampeado, a diferença existente da análise convencional de equilíbrio limite reside no fato de que os grampos introduzem uma parcela extra nas forças estabilizante, parcela necessária para que a estabilidade seja atingida. O valor da força estabilizante introduzida pelos grampos pode ser estimada por meio das equações da estática propostas nos métodos de Stocker (1979), Clouterre (1991), Juran *et al.* (1990), Jewell *et al.* (1984), Schlosser (1992), e Jiménez (2008). Todos estes métodos tem origem no equilíbrio limite, tendo como principal diferença entre si o formato da superfície de ruptura considerada no momento da ruptura.

A seguir, a Figura 11, apresenta um modelo simplificado para cálculo da estabilidade global de um talude tratado com solo grampeado, apresentando todas as forças envolvidas, levando em conta no cálculo à ocorrência de uma superfície de ruptura planar.

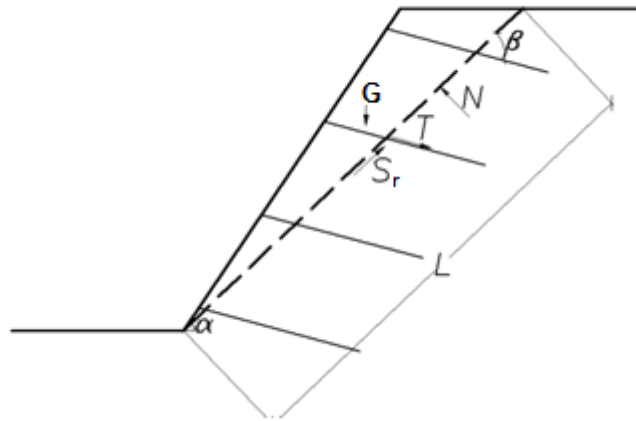


Figura 11: Modelo geomecânico para o cálculo do fator de segurança, utilizando uma superfície planar de ruptura. (adaptado de Byrne *et al.* (1998)).

Na figura estão apresentados todos os esforços atuantes no modelo, a força peso massa instável (G), a parcela estabilizadora do grampo (T), a resistência ao cisalhamento no plano de ruptura (S_r) e a força normal (N), juntamente com os ângulos α e β . Com estas informações é possível estabelecer a relação para o fator de segurança, descrita pela Equação 3, relação entre as forças estabilizantes e as instabilizantes. Estas forças podem ser relacionadas e agrupadas da seguinte maneira:

$$F_s = \frac{S_r}{(G \sin \alpha - T \cos \beta)} = \frac{cL + N \tan(\varphi)}{(G \sin \alpha - T \cos \beta)} = \frac{cL + (G \cos \alpha + T \sin \beta) \tan(\varphi)}{(G \sin \alpha - T \cos \beta)} \quad \text{Equação 3}$$

Onde c representa a força de coesão, L o comprimento do plano de ruptura e φ o ângulo de atrito do material.

Ainda nestas análises, deve ser considerado o efeito da água que tende a instabilizar o talude. Devem ser verificados os efeitos da poropressão bem como os efeitos das forças de percolação dentro do talude. Tais aspectos podem ser encontrados de maneira detalhada em Aguilera (2009).

Alguns projetistas utilizam coeficientes de segurança parciais, ou seja, fatores que majoram os esforços e minoram os parâmetros de resistência do material, de acordo com a complexidade e risco envolvido no projeto, este procedimento segue as normas europeias de dimensionamento. No Brasil a determinação do FS segue a norma brasileira de estabilidade

de taludes NBR 11682, que faz uso de coeficiente de segurança global, variando entre 1,2 e 1,5, em função do risco e importância da obra.

Jiménez (2008) ressalta que os métodos de equilíbrio limite adaptados para taludes tratados com solo grampeado analisam a condição de pré-ruptura do talude, que apresenta um comportamento de um único corpo rígido, não sendo capazes de prever ou fornecer qualquer tipo de estimativas referentes aos deslocamentos que irão ocorrer no talude.

2.1.7.2 Arrancamento dos grampos

Este é o mecanismo de ruptura mais comum observado em taludes estabilizados com este tipo de solução. O arrancamento compreende o tipo de falha que se manifesta na ligação entre a interface do solo com a nata de cimento (grampo) ou ainda na interface nata de cimento com a barra de aço. Quando ocorre o arrancamento a ligação entre os elementos é desfeita, eliminando a capacidade de transferência de carga do grampo para a zona passiva do talude.

A ocorrência desta falha pode estar associada a superestimativas no valor da aderência e/ou subestimativas nas cargas de projeto. Isto ocorre pela falta de informações geotécnicas dos parâmetros subsolo pelo fato de ensaios de arrancamento não serem realizados.

O cálculo do comprimento dos grampos pode ser obtido reescrevendo a Equação 1 apresentada por Bustamante e Doix (1985), isolando o comprimento do grampo. Um fator de segurança é introduzido, em função das incertezas envolvidas na determinação de Q_s e dos parâmetros da análise de equilíbrio limite. O coeficiente tende a majorar o carregamento considerado, conseqüentemente aumentando o comprimento necessário. A Equação 4 apresenta a determinação do comprimento dos grampos.

$$L = \frac{T \cdot F_s}{\pi \phi_f Q_s} \quad \text{Equação 4}$$

Onde F_s é o fator de segurança considerado, Q_s é a aderência (kN/m^2), T representa a carga necessária para ser absorvida pelo grampo (kN), ϕ_f o diâmetro do furo (m) e L (m) o comprimento do grampo injetado do grampo. Geoguide 7 (2008) e Lazarte *et al.* (2003) recomendam o coeficiente de segurança assuma valores entre 1,5 e 2,0, em função da metodologia utilizada para determinar o valor de Q_s adotado no projeto dos grampos.

A verificação acima deve ser realizada considerando a aderência no contato da nata de cimento com o solo e com a barra de aço, sendo que o dimensionamento será comandado pelo maior comprimento obtido, que se relaciona com o menor valor de Q_s .

O valor da carga T , esforço que se manifesta no grampo é definido em função do valor calculado através dos métodos de análise, carga necessária para estabilizar o talude, bem como necessidades de pré-tensionamento de sistemas de faceamento.

2.1.7.3 Resistência do elemento de reforço

O item 2.1.5.2. Distribuição de esforços apresenta os esforços que atuam nos grampos, sendo o principal a força de tração. Então, o dimensionamento parte da determinação da magnitude do esforço de tração de projeto a ser resistido pelo elemento de reforço. É necessário avaliar a condição de maior criticidade, ou seja, a maior sollicitação entre uma eventual carga de pré-tensão ou o valor calculado da parcela necessária para estabilizar o talude (transferência de carga da zona ativa para a passiva).

Sendo assim, antes de definir qual o tipo de reforço, é necessário quantificar o esforço a ser resistido pelo elemento, facilmente calculados utilizando *softwares* computacionais fundamentados nas análises de equilíbrio limite. Um exemplo de programa de cálculo é o SLOPE 2000, Cheng e Lau (2008).

Considerando uma barra de aço como elemento de reforço, utiliza-se da Equação 5 para verificar se o elemento resiste ou não ao esforço, definindo qual o diâmetro mínimo e o tipo da barra de aço a ser utilizada.

$$T_{\text{máx}} = \frac{A f_y}{F_s} \quad \text{Equação 5}$$

Onde $T_{\text{máx}}$ (kN) representa o máximo esforço de tração suportado pela barra de aço, A (m^2) a área da seção transversal, f_y a tensão de escoamento do aço (kN/m^2) e F_s um fator de segurança, que assume um valor da ordem de 1,75.

2.2 SISTEMAS DE FACEAMENTO

As soluções de faceamento servem principalmente como uma proteção do material localizado na superfície do talude, controlando processos erosivos e evitando o surgimento de qualquer tipo de ruptura superficial, Geoguide 7 (2008).

Os principais sistemas de faceamento associados às soluções de solo grampeado são classificados como sistemas rígidos ou flexíveis. Ambos os tipos são considerados sistemas estruturais, pois são capazes de promover uma conexão entre os grampos, de modo que os esforços são absorvidos e redistribuídos entre os elementos que compõem a solução, Geoguide 7 (2008). Ainda existe uma terceira opção de tratamento, os revestimentos frágeis, mantas geossintéticas, que são medidas não estruturais cuja principal função é fornecer uma proteção temporária e limitada para a face do talude.

Os sistemas flexíveis permitem pequenas deformações para a massa instável sem que a estrutura sofra danos, já os sistemas de faceamento rígidos não suportam praticamente nenhuma deformação, apresentando falhas estruturais com deformações. Os representantes destas soluções são as telas de aço e o concreto projetado, respectivamente.

2.2.1 Concreto Projetado

2.2.1.1 Histórico de desenvolvimento

A utilização do concreto projetado como uma solução de estabilização teve origem no início do século XX, na região da Pensilvânia, Estados Unidos da América, Yoggy (2005). Nas primeiras décadas de desenvolvimento desta tecnologia o concreto projetado era chamado de “*Gunite*”. A partir dos anos 20 a técnica passou por um grande processo de expansão, atingindo uma escala global de utilização, tendo os como principais mercados a Europa e os EUA. Entretanto foi somente após a Segunda Guerra Mundial que o grande salto nesta tecnologia foi observado, impulsionado pelo grande crescimento das cidades, grande demanda por rodovias, energia e toda a infraestrutura necessária para o crescimento. Yoggy (2005) ainda cita que em meados dos anos 50 a tecnologia já estava disponível em mais de 120 países em todos os continentes.

Palermo (1997) aponta que no ramo geotécnico o concreto projetado foi utilizado inicialmente na construção de túneis, como um revestimento primário para evitar que os blocos rochosos atingissem os trabalhadores nas fases iniciais do trabalho, sendo necessário um revestimento

definitivo, em concreto moldado em loco, para resistir de fato às tensões nos túneis. Sendo assim, o concreto projetado era considerado como um material secundário, dando enfoque principal ao concreto moldado *in loco*. Tudo mudou com o surgimento da NATM (New Austrian Tunneling Method), que foi desenvolvida por Rabcewicz entre os anos 50 e 60.

Juntamente com a rápida expansão da técnica da NATM para os taludes no início dos anos 70, o concreto projetado foi gradualmente conquistando seu espaço como sistema de faceamento, sendo atualmente a técnica mais conhecida e dominada no mercado nacional.

2.2.1.2 Definições

Este tipo de solução consiste em um revestimento do tipo rígida, ou seja, deformações mesmo que muito pequenas, dependendo das condições da solução, podem de causar trincas e rachaduras na face tratada do concreto projetado. A solução atua formando uma parede, impedindo a manifestação de processos erosivos, além de conter quaisquer movimentações do material da face do talude, de solo ou rocha.

A técnica de concreto projetado consiste em projetar uma mistura de concreto sobre uma superfície qualquer, formando uma camada de concreto com uma dada espessura, que funciona como um elemento de revestimento (faceamento de taludes e túneis), concreto estrutural (estruturas de formas complexas) ou ainda uma camada de reforço (reparos de pontes).

Quando utilizado como um sistema de revestimento de taludes em um sistema de solo grampeado, o concreto projetado atua como um sistema de proteção contra rupturas superficiais e processos erosivos, além de interconectar os grampos, de modo que o revestimento é capaz de absorver parte das cargas que atuam em certos grampos e, redistribuí-las igualmente entre todo o sistema de grampos, uniformizando as forças atuantes. O concreto projetado ainda é hoje, em nosso país, a solução de faceamento mais comum aplicada a taludes, impulsionado pelo domínio da técnica por parte dos projetistas e construtores.

A mistura de concreto a ser projetado deve apresentar uma consistência pastosa compatível com o sistema de bombeamento utilizado. Como no concreto convencional, a mistura é constituída por um determinado tipo de cimento, agregados (grãos e miúdos) e água, e em alguns casos é possível adicionar aditivos, visando um controle maior sobre certas propriedades da mistura (plasticidade, resistência, tempo de cura, etc.), e fibras de aço, que

melhoram a resistência à tração do material, substituindo a armadura convencional. A mistura de concreto deve apresentar características satisfatórias de viscosidade, para facilitar o processo de bombeamento, e de aderência, para garantir que a mistura se fixe adequadamente na superfície, neste caso a face do talude.

2.2.1.3 Aplicações

A gama de possibilidades de utilização de concreto projetado é bastante ampla, indo desde simples reparos e reforços estruturais à construção estruturas de formas bastante complexas, visto que o material dispensa o uso de formas. A presente dissertação irá focar no uso de concreto projetado como um sistema de revestimento em faces de taludes, sendo possível encontrar mais detalhes sobre as aplicações deste material no manual do Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos da América, U.S. *Army* (1993).

Esta técnica pode ser utilizada como um revestimento temporário, sendo necessária para garantir a segurança para a execução de uma etapa da obra, tendo critérios de dimensionamento menos rigorosos. Também é possível aplicá-lo como uma solução definitiva, exigindo um controle, projeto e especificações mais rigorosos, U.S. *Army* (1993)

Lazarte *et al.* (2003), Geoguide 7 (2008), Solotrat (2012), RTA (2005) apresentam diversos usos do concreto projetado como sistema de faceamento, estando algumas delas ilustradas na Figura 12.



Figura 12: Exemplos de aplicação de concreto projetado. (a) talude rodoviário RTA (2005) (b) talude urbano (*solotrat.com.br* acessado em 08/06/2014)

Quando aplicado como solução de revestimento em taludes tratados com solo grampeado, o concreto projetado está associado a grampos inseridos no solo, que são conectados por meio

de placa de aço e sistema de porcas, e armaduras, transferindo adequadamente os esforços oriundos dos grampos para o sistema de faceamento.

2.2.1.4 Méritos e limitações

O manual de engenharia do corpo de engenheiros de U.S. *Army* (1993) cita as principais vantagens do concreto projetado como sendo:

- **Durabilidade:** Quando bem executado e associado a um bom sistema de drenagem, um faceamento em concreto apresenta uma grande vida útil. Adicionalmente este material é bastante resistente contra a ação das intempéries e uma grande gama de agentes químicos;
- **Processo Executivo:** Revestir um talude utilizando concreto projetado exige equipamentos relativamente pequenos, possibilitando que a solução seja aplicada a lugares de acesso restrito, além de conferir uma grande produtividade com menos trabalhadores, reduzindo o custo de produção;
- **Resistência:** Devido as grandes velocidades de projeção, o concreto ao atingir a face a ser estabilizada sofre um forte processo de compactação resultando em uma adesão com o substrato, formando uma única camada;
- **Aplicabilidade:** Esta solução é adaptável a qualquer formato de superfície, dispensando o uso de qualquer tipo de forma ou qualquer tipo de elemento de suporte para a execução.

Mesmo que seja a solução mais utilizada e apresente excelentes características estruturais o concreto projetado ainda apresenta desvantagens

- **Elevada Rigidez (comparada ao sistema flexível):** Pequenas deformações na face de concreto, causadas por deformações no solo e efeitos térmicos, são passíveis de gerar grandes esforços internos na estrutura, levando a rachaduras no revestimento, criando áreas para a infiltração de água no talude;
- **Fluxo de água:** A percolação de água sob o revestimento, pela falha nos sistemas de drenagem ou rachaduras no faceamento, gera acréscimo de subpressões, acelerando o processo de deterioração do sistema de faceamento. Deste modo exige a execução de barbacãs;

- Reflexão: A alta velocidade de projeção faz com que parte do material seja rebatido ao se chocar contra a face, material que não pode ser reutilizado, elevando o consumo de concreto e o custo de material. Adicionalmente este processo provoca uma segregação no concreto fazendo com que o material aderido seja diferente do dosado, provocando diferentes resistências ao longo da face projetada.
- Custo: Para contornar problemas de percolação de água, e eventuais rupturas é necessário que as espessuras dos revestimentos sejam maiores e associar sistemas de drenagem robustos. Somada a estes, o espaçamento máximo entre os grampos é pequeno, exigindo mais grampos.

2.2.1.5 Metodologia Executiva

Quando utilizado como sistema de revestimento em uma solução de solo grampeado, o concreto projetado é executado somente após a finalização da execução da perfuração necessária para a instalação dos grampos, de modo a evitar o processo de perfuração no concreto projetado, promovendo uma economia nesta fase da obra.

A utilização desta solução fica condicionada a um sistema de drenagem, muito bem projetado e executado, que evite que as águas pluviais circulem livremente pelo talude. Deste modo é necessário executar um sistema de drenagem na crista, pé do talude e ainda interno, por meio de barbacãs, reduzindo o máximo possível a poro pressão que atua dentro do talude.

O concreto projetado é executado utilizando um sistema de misturadores, bombas e mangueiras. Os materiais são previamente misturados, de acordo com a dosagem adequada e direcionados para o sistema de bombeamento, que por ar comprimido projeta o concreto em alta velocidade contra a face do talude, que automaticamente é compactado. Estes sistemas podem ser classificados o como projeção por via úmida ou a projeção por via seca, ambas descritas em inúmeros trabalhos, dentre eles destaque para Oraee-Mirzamani *et al.* (2011) Bastos (2012).

Antes de iniciar o processo de bombeamento do concreto em geral é necessário que a armadura esteja instalada sobre a face do talude, que geralmente é composta por uma malha de barras de aço soldadas, (malha eletrossoldada). A função da armadura é conferir ao concreto a resistência à tração, auxiliando na absorção dos esforços oriundos dos grampos e de processos dilatação e retração térmica, contribuindo para o controle de fissuração no concreto.

Uma alternativa ao uso desta armadura é a utilização de fibras de aço ou sintéticas na mistura do concreto, que conferem à mistura uma grande melhora nos parâmetros de resistência a tração e ductilidade entre outros. Com esta técnica é possível lançar o concreto sobre a face imediatamente após finalizar os grampos, expondo a face o mínimo de tempo possível às intempéries. Uma apresentação detalhada sobre todos os aspectos das fibras de aço adicionadas ao concreto, tanto o projetado quanto o convencional, pode ser encontrada em ACI (2002), Franzén (1992), Miguel (2001), Figueiredo (2000) dentre outros.

No processo executivo utilizando a via seca, os materiais são misturados sem que água seja adicionada a mistura, sendo estes conduzidos ao sistema de bombeamento, onde é adicionada a água na saída da mangueira, no bico de projeção como mostrado na Figura 13. Deste modo é possível utilizar magotes mais longos, além de obter um concreto mais compacto e resistente. Entretanto o nível de reflexão de material é alto, formando uma camada de concreto mais heterogêneo, sobre a face. Outro ponto negativo deste método é que o controle tecnológico da mistura é menor, visto que falhas e erros podem acontecer na injeção de água, tendo também uma elevada dependência do operador na qualidade do material.

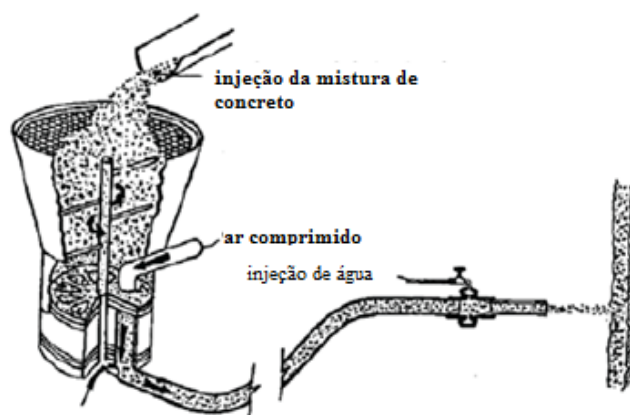


Figura 13: Bombeamento Via Seca. Adaptado de Oraee-Mirzamani *et al.* (2011).

Já no processo por via úmida, a mistura de concreto finalizada é lançada no sistema de bombeamento, Figura 14, tendo assim um controle tecnológico maior do material, controlando todos os parâmetros de acordo com as especificações de projeto, reduzindo assim a dependência do produto final da experiência do operador. Deste modo o concreto projetado tem uma homogeneidade maior, além de sofrer menos com o processo de reflexão.

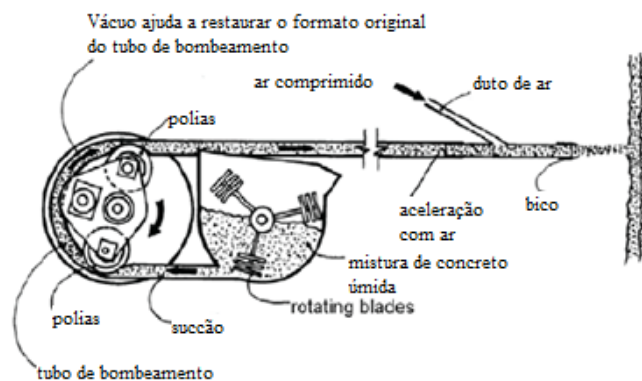


Figura 14: Bombeamento Via úmida. Adaptado de Oraee-Mirzamani *et al.* (2011).

Ainda cabe lembrar que em ambos os métodos é possível utilizar aditivos de melhoramento para o concreto, sendo adicionados diretamente na mistura, no caso da via úmida, ou misturados à água no caso da via seca.

Em ambas as metodologias, o material, ao atingir a face do talude, é automaticamente compactado, sendo então necessário garantir que a maior pressão possível no sistema de ar comprimido para promover a máxima compactação do concreto projetado. Cabe lembrar que a pressão máxima de projeção deve ser compatível com a resistência do material que compõem a face do talude, para evitar que o processo de execução não provoque rupturas na face do talude.

Quando finalizado o trabalho de lançamento de concreto, chapas de aço são introduzidas na cabeça expostas dos grampos, já finalizados, e aparafusadas e solidarizadas ao sistema de faceamento, promovendo a conexão grampo/face. Ou ainda a placa pode ser instalada no meio da camada de concreto, sendo executada após a primeira fase.

No Brasil a produção e execução do concreto projetado devem atender às normas vigentes apresentadas pela ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. As principais normas a serem destacadas são a NBR 13597 (2012), que apresenta as qualificações necessárias para o mangoteiro, e NBR 14026 (2012) que apresenta as principais especificações para o concreto projetado.

2.2.2 Sistemas de Faceamento em Telas Metálicas

2.2.2.1 Definições

Os sistemas de faceamento compostos por telas metálicas são fixados no talude por meio de placas de fixação instaladas na cabeça dos grampos. Deste modo, a tela transmite a carga neste ponto de contato, sendo capaz de absorver esforços oriundos da massa instável, controlando a movimentação do material instável localizado na superfície do talude, Pokharel *et al.* (2011).

As placas de fixação citadas podem ter tamanhos e formatos diferentes, definidos em função do fabricante do material. Cabe apontar que a forma e tamanho da placa exercem um papel fundamental na estabilidade, pois afetam diretamente na transmissão de carga entre os elementos.

O acabamento deste tipo de solução é executado utilizando cabos de aço, que são instalados no perímetro externo da malha, chamados de cabos de contorno. As duas extremidades destes cabos são fixadas em ancoragens independentes do faceamento, que absorvem as cargas que se manifestam nestes cabos. O panorama geral desta solução está apresentado na Figura 15.

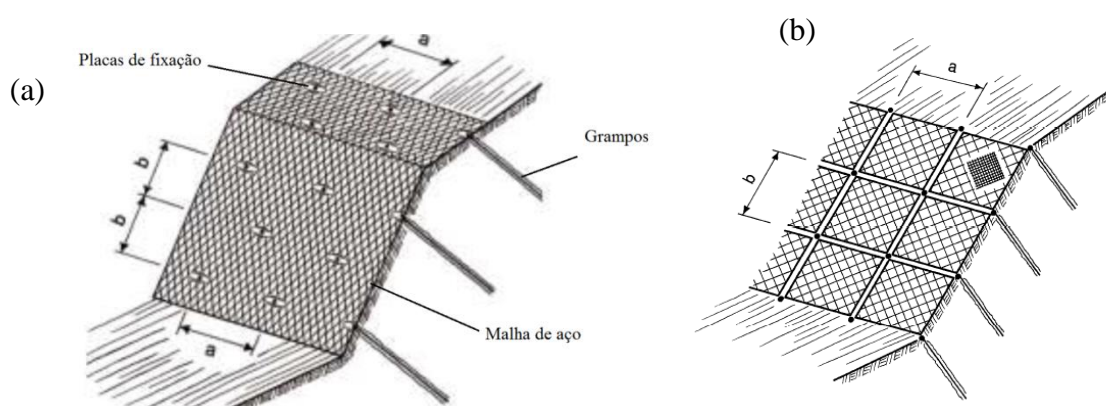


Figura 15: Solução típica de faceamento utilizando malhas de aço e solo grampeado. Adaptado de (a) Roduner e Balg (2010) e (b) Cardoso *et al.* (2006).

2.2.2.2 Aplicações

A solução de revestimento por malha de aço pode ser aplicada tanto a revestimento de taludes quanto a revestimento das paredes de túneis, impedindo que a massa de solo/rocha se

desloque, sendo caracterizado como um sistema de estabilização. É possível também, aplicar telas metálicas para conduzir corretamente as massas instabilizadas para uma região que não ofereça risco a infraestrutura e vidas humanas.

A aplicação desta solução se estende às mais diversas condições nas quais os taludes podem ser observados em campo. Atualmente as telas são utilizadas de duas maneiras distintas: associada a um sistema de solo grampeado ou apenas como uma proteção Cala *et al.* (2012) e Muhunthan *et al.* (2005).

Quando utilizada como uma solução de proteção, taludes onde há movimento blocos de rochas, a tela de aço tem a função restringir a amplitude do deslocamento, conduzindo os blocos até o pé da encosta de maneira segura. Nesta configuração, solução chamada de cortina, o revestimento não impede a movimentação da massa, apenas mitiga os efeitos de queda de blocos, impedindo a massa se desloque livremente. Normalmente é necessário executar um sistema de leiras e valas no pé do talude, cuja função é acumular a massa instável, conforme ilustração na Figura 16, utilizando valas ou leiras de retenção.

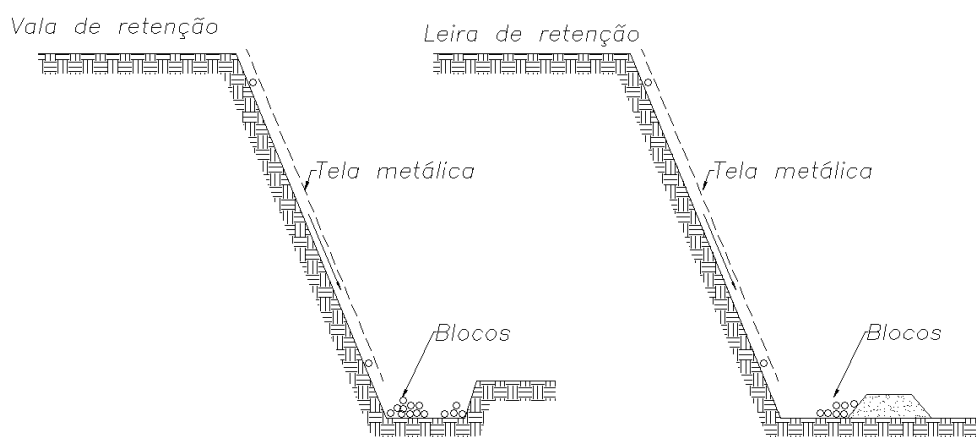


Figura 16: Retenção dos blocos de rocha no pé do talude. Adaptado de Oliveira (2010)

Já o sistema de estabilização é utilizado em conjunto com solo grampeado, utilizando placas de fixação nas cabeças dos grampos, mantendo a tela junto à face do talude. É possível considerar a aplicação de um pré-tensão da malha, esforço transferido para a tela por meio das placas utilizadas.

A Figura 17, mostra exemplos da aplicação do sistema de malhas metálicas em taludes, atuando como uma solução ativa, onde é possível observar que foi aplicada uma pré-tensão na tela, pressionando a solução contra a face do talude oferecendo uma estabilização mais eficaz.



Figura 17: Exemplos de aplicação de telas de aço como revestimento. Fonte: Roduner (2013)

No caso de taludes onde a face é predominantemente revestida por um material suscetível a processos erosivos é necessário associar elementos para controle de erosão, tais como mantas geossintéticas e bio-sintéticas. Estes materiais também servem como um substrato favorável para o crescimento de vegetação sobre a face do talude, que gradualmente cobre a solução de faceamento, dando um aspecto natural ao projeto de estabilização, Figura 18.



Figura 18: Tela metálica associada a sistema de controle de erosão com vegetação densa. Fonte: Yoko (2006).

2.2.2.3 Méritos e limitações

A utilização de telas metálicas como revestimento de taludes, em soluções de solo grampeado apresenta significativas vantagens sobre o uso de concreto projetado, Cala *et al.* (2012):

- Velocidade e segurança na execução: A tela pode ser lançada sobre o talude antes mesmo de execução dos grampos, fornecendo uma proteção prévia aos trabalhadores da obra, além do processo de instalação ser extremamente rápido, reduzindo de 30% a 40% o tempo de execução do faceamento;

- Drenagem: Permite o fluxo de água através do revestimento, evitando o surgimento de excesso de poro pressão atuante na estrutura;
- Durabilidade: As malhas de aço, quando devidamente projetadas para a situação encontrada, e que apresentam um sistema adequado de proteção contra corrosão apresentam uma grande vida útil;
- Flexibilidade: Estes sistemas são compatíveis com deformações na massa estabilizada, além de suportarem adequadamente deformações causadas por variações térmicas;

Em contra partida, é possível destacar como principais desvantagens do sistema os seguintes pontos:

- Domínio da técnica: No cenário nacional ainda são poucos os projetistas e executores especializados nestes sistemas, o que pode muitas vezes inviabilizar e/ou levar a erros, comprometendo a segurança da obra;
- Falta de normatização: Ainda no Brasil não existe uma norma específica que classifique as malhas existentes, dificultando a especificação em projetos.

2.2.2.4 Metodologia Executiva

Uma completa descrição sobre os processos executivos de malhas de aço como faceamento em taludes pode ser obtida em Cala *et al.* (2012), bem como nos manuais de instalação fornecidos pelos principais fabricantes destes sistemas, sendo aqui apresentados os aspectos básicos para a instalação destes elementos.

O primeiro método executivo prevê a instalação do faceamento após a execução dos grampos, lançando a tela sobre a face do talude e instalando as placas de fixação, metodologia utilizada em situações onde não há risco aos operários. Quando existe o risco aos trabalhadores a tela de aço é lançada sobre a face antes da execução dos grampos, sendo fixada na crista do talude, de modo que as equipes trabalham sobre a tela, tendo grau de segurança mais elevado.

A maneira mais adequada para lançar as malhas sobre a face do talude é posicionar os rolos de tela na crista do talude e gradualmente desenrolá-los, utilizando a gravidade como força motriz, reduzindo a necessidade de equipamentos pesados. À medida que a tela é lançada é recomendado instalar as placas de fixação, executando os grampos, pois assim o sistema já será ativado minimizando o tempo de exposição dos operários a eventos de instabilidades.

Nos limites da área é necessária à instalação de cabos de aço, uma espécie de costura da malha, que são ancorados em ancoragens extras para promover o fechamento da solução.

Esta solução exige o trabalho de equipes especializadas, pois muitas vezes estes trabalhos são executados utilizando sistemas de escalada, pois a posição dos taludes instáveis não favorece a utilização de equipamentos ou sistemas de andaimes.

2.2.2.5 Dimensionamento

Os mecanismos de ruptura atuantes na camada de solo instável em ambos os sistemas, telas metálicas e concreto projetado, são semelhantes, entretanto, devido a grande diferença constitutiva entre os sistemas, os esforços que surgem nos sistemas são diferentes, condição que exige uma metodologia de dimensionamento que contemple as particularidades de cada um dos sistemas.

A seguir serão apresentados dois métodos de dimensionamento para os sistemas de telas metálicas que são utilizados atualmente, descrevendo as principais considerações, hipóteses e modelos de ruptura considerados em cada uma das metodologias analisadas.

1) Método Ruvolum

O método Ruvolum foi desenvolvido para ser compatível com qualquer tipo de tela metálica, aplicada sobre taludes rochosos ou de solo, sendo necessário levar em consideração os parâmetros referentes ao modelo de tela e tipo de material do talude. Esta metodologia está detalhadamente apresentada no trabalho de Wartmann (2011) e no livro texto Cala *et al.*, (2012). Abordagens simplificadas podem ser encontradas nos trabalhos de Flum *et al.* (2010), Roduner e Balg (2010) Mumma (2002) entre outros autores.

O conceito Ruvolum de dimensionamento abrange dois modelos de investigação de estabilidade, avaliando critérios referentes às telas metálicas e os grampos do sistema. Os modelos de investigação verificam instabilidades localizadas (que se manifestam entre dois grampos) e instabilidades de uma massa de solo paralela à superfície do talude. O modelo ainda permite incluir os efeitos de carregamentos dinâmicos e fluxo de água no talude.

a) Instabilidades paralelas à superfície

Neste modelo de ruptura a tela e os grampos devem resistir aos esforços que são provocados pela camada instável, que tende a se deslocar paralelamente a superfície do talude. O

deslocamento se manifesta quando a força peso atuante no material superficial supera a resistência existente na interface desta camada com o substrato mais resistente. Esta situação está ilustrada na Figura 19.

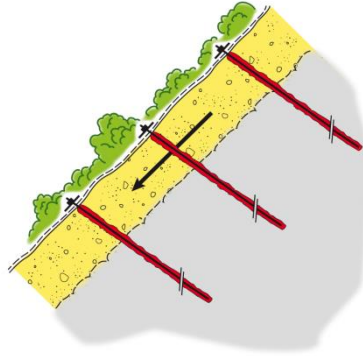


Figura 19: Representação instabilidade paralela à superfície. Adaptado de Cala *et al.* (2012)

O talude e o material de superficial são considerados homogêneos ao longo da seção de escorregamento. Surge então um corpo prismático, cujas dimensões são dadas por $a \times b \times t$, que pode ser isolado para a análise, representando a totalidade do talude. As dimensões são relacionadas ao espaçamento horizontal, a , o espaçamento vertical, b , e a espessura da camada instável, t .

O bloco prismático isolado para a análise é apresentado esquematicamente na Figura 20, onde estão indicadas todas as forças consideradas na análise.

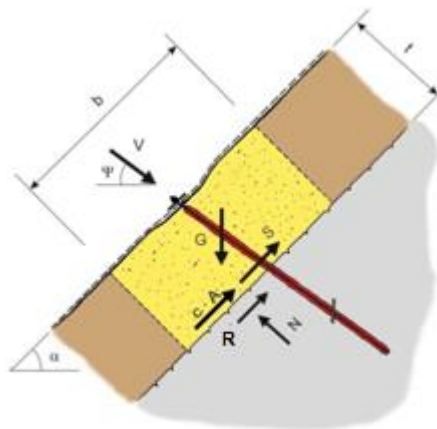


Figura 20: Representação das forças atuantes no sistema. Roduner (2013)

Onde G (kN) é a força peso da massa de solo, que atua no sentido de instabilizar o corpo, o produto c (kN/m²) \times A (m²) representa a resistência ao movimento oferecida pela coesão entre

as partículas na base na interface de contato entre os materiais. V (kN) é força de pré-tensionamento aplicada na fase de instalação da tela, transmitida ao sistema por meio das placas de fixação. A incógnita do sistema é o esforço de cisalhamento, S (kN), que deve ser absorvido pelo grampo e transmitido ao subsolo estável, zona passiva, para garantir a estabilidade ao sistema. Apenas indicadas para complementar o sistema de forças estão representadas as forças de reação do subsolo N e R (kN). Por fim α e ψ representam as inclinações do talude e da força V atuante, respectivamente.

A consideração da aplicação da força de pré-tensão, V , no sistema considera uma ativação da tela, visto que esta força aplicada nos grampos atua no sentido de impedir a movimentação da massa de solo ou rocha instável. Porém, o conjunto da solução (faceamento e grampo) é uma medida passiva de proteção, que só entra em carga quando a massa de solo/rocha se desloca.

O esforço de cisalhamento S pode ser obtido utilizando relações trigonométricas e a condições de ruptura de Mohr-Coulomb através da Equação 6, que também leva em conta os parâmetros geotécnicos do material que constitui o talude.

$$S = G \cdot \sin(\alpha) - V \cos(\alpha + \psi) - \left[\frac{c \cdot A + (G \cdot \cos(\alpha) + V \sin(\alpha + \psi)) \cdot \tan \varphi}{FS_{\text{mod}}} \right] \quad \text{Equação 6}$$

Onde S , G e V são dados em (kN), α e ψ e φ (ângulo de atrito do material) em graus e FS é adimensional, representa o coeficiente de segurança das incertezas do modelo.

Após a determinação da incógnita S , todos os esforços que atuam neste modelo de ruptura são conhecidos, sendo possível então verificar se os elementos do sistema são capazes de resistir às solicitações a eles impostas. Segue as análises sugeridas pelo modelo Ruvolum

- Análise da resistência do grampo

Para garantir a estabilidade do sistema é necessário verificar se os elementos utilizados como reforço apresentam uma resistência compatível com os esforços de cisalhamento, S , e de tração, V , que se manifestam nestes elementos.

A Equação 7, apresenta a verificação da barra de aço frente ao esforço de cisalhamento calculado pela Equação 6. Aqui cabe lembrar que o valor de S é corrigido para S_d , esforço de cisalhamento de projeto, por meio de fatores de segurança parciais (que majoram o valor da ação atuante). S_r representa resistência ao cisalhamento da barra de aço utilizada como reforço, sendo esta função da resistência ao escoamento do aço f_y e da área da seção

transversal da barra. Por fim, a resistência S_r é minorada pelo fator de segurança γ_{FS} cujo valor é de 1,50. A expressão apresentada abaixo é uma simplificação comumente utilizada.

$$S_d \leq \frac{S_r}{F_s} \quad \text{onde } S_r = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot A \quad \text{Equação 7}$$

O esforço de tração V atuante é conhecido, e é a força de pré-tensão aplicada aos grampos, parâmetro definido pelo projetista na fase de projeto. Utilizando a Equação 8 é possível verificar se a resistência à tração do grampo, T_r , é suficiente para resistir ao esforço de tração, majorado, aplicado no sistema, V_d .

$$V_d \leq \frac{T_r}{F_s} \quad \text{onde } T_r = f_y \cdot A \quad \text{Equação 8}$$

Por fim é realizada a verificação dos esforços que atuando em conjunto no sistema, relação expressa pela Equação 9, que agrupa os esforços de tração e de cisalhamento nos grampos.

$$\left[\left(V_d / \frac{T_r}{F_s} \right)^2 + \left(S_d / \frac{S_r}{F_s} \right)^2 \right]^{0,5} \leq 1,0 \quad \text{Equação 9}$$

- Análise da resistência da tela

Também é necessário avaliar se o modelo de tela utilizado no faceamento tem a capacidade de resistir à carga de pré-tensão de projeto, V_d , transmitido para a tela por meio da placa de fixação na cabeça do grampo. A transferência de carga para a tela gera um esforço de puncionamento que atua na direção do grampo, sendo fundamental a tela resistir a esta sollicitação. A Equação 10 traduz matematicamente a verificação necessária.

$$V_d \leq \frac{P_r}{F_s} \quad \text{Equação 10}$$

A obtenção da resistência ao puncionamento da tela, P_r (kN), será apresentada na sequência da presente dissertação, sendo um dos parâmetros a ser obtido nos ensaios a serem realizados.

b) Investigação de instabilidades entre dois grampos

Neste modelo de ruptura são estudados os efeitos de massas de solo instáveis isoladas entre dois grampos do sistema, tendo o prisma instável as dimensões de $a \times 2b \times t$, conforme a representação da Figura 21.

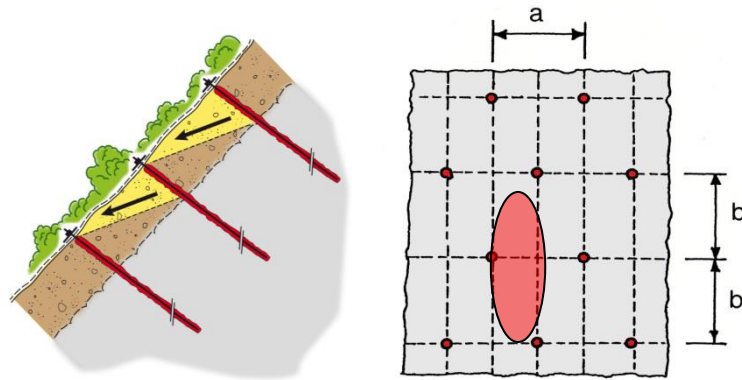


Figura 21: Hipótese de corpo instável isolado Cala *et al.* (2012)

De maneira análoga a condição anterior, um conjunto de grampos é escolhido para representar a totalidade da face do talude. O modelo estabelecido para o cálculo assume que a massa de solo entre os grampos tem uma porção totalmente estabilizada, em função da formação de um cone de pressão, oriundo do processo de pré-tensionamento da malha contra o talude por meio da placa de fixação. O cone se forma diretamente abaixo da placa de fixação e se expande por toda a camada instável. A Figura 22 apresenta, de maneira gráfica, a hipótese de cálculo do cone.

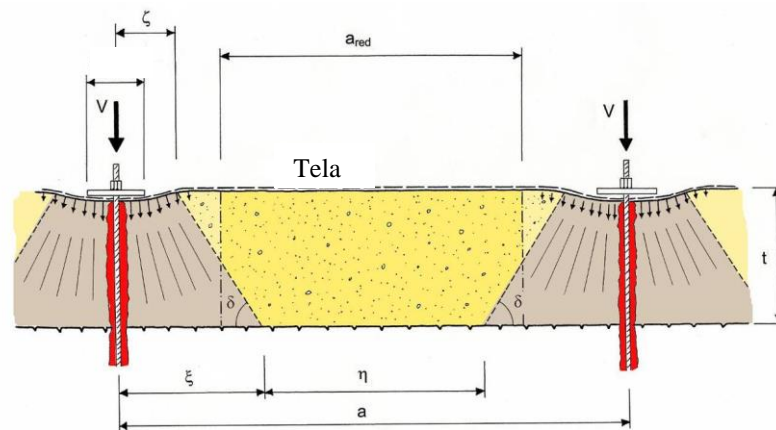


Figura 22: Cone de pressão formado abaixo da placa de fixação Roduner (2013)

A porção de solo completamente estável, compreendida dentro do cone de pressão, deve ser desconsiderada no cálculo de estabilidade, ou seja, é necessário corrigir as dimensões do prisma de solo instável. Para tanto é necessário que algumas hipóteses sejam levantadas, sendo elas:

Em termos práticos, a dimensão da base superior do cone de pressão, face externa do talude, é considerada igual à metade da largura da placa de fixação, sendo expressa por ζ . A partir do topo o cone de pressão se estende ao longo da espessura de solo instável, t , sob uma inclinação δ , assumida como sendo 45° . Consequentemente, a base inferior deste cone apresenta uma dimensão maior, aqui definida como ξ , que pode ser facilmente determinada por relações trigonométricas.

O volume de material contido dentro da área delimitada pelo cone não está sujeito a instabilidades, sendo necessário desconsiderá-lo no cálculo, conferindo ao corpo instável uma forma trapezoidal, com base superior igual a $a - 2\zeta$ e base inferior a $a - 2\xi$, ver Figura 22. A fim de simplificar os cálculos, o trapézio pode ser transformado em um corpo prismático, de dimensões $a_{red} \times 2b \times t$, onde a_{red} é dado pela Equação 11, que reduz o espaçamento horizontal real em função das dimensões do cone de pressão.

$$a_{red} = a - (t/\text{tg } \delta) - 2\zeta \quad \text{Equação 11}$$

As verificações a serem realizadas, apresentadas na sequência deste item, deverão levar em conta inúmeros corpos prismáticos, cujas dimensões serão obtidas realizando o processo acima descrito variando a espessura da camada instável entre 0 e t . Este procedimento irá determinar qual dos mecanismos de falha que serão apresentados comanda o dimensionamento.

Definido o tamanho do prisma de solo instável partimos para a determinação das forças que atuam neste modelo de ruptura, sendo possível considerar duas configurações distintas: um mecanismo no qual ocorre a formação de somente um corpo instável e um mecanismo no qual dois corpos são observados, conforme a Figura 23, que ilustra os corpos considerados bem como o sistema de forças atuantes em cada um.

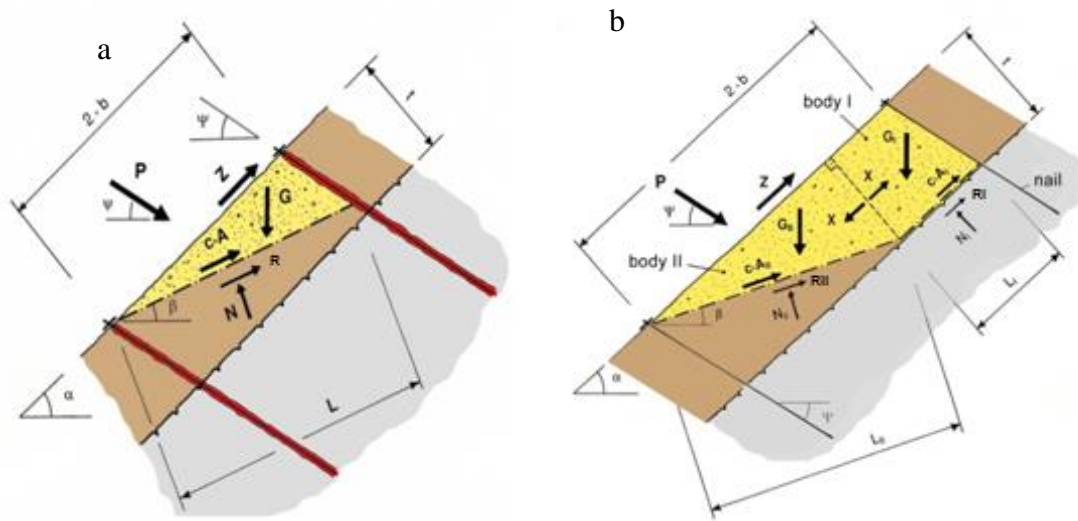


Figura 23: Mecanismos de ruptura (a) um só corpo e (b) dois corpos. Cala *et al.* (2012)

Analisando a figura é possível notar que em ambos os casos ainda estão atuando as forças peso (G) e força de contato $c \times A$ nos corpos, sendo agora introduzidas as forças P , Z , e no modelo de dois corpos instáveis a força X , todas estas dadas em (kN). X é a componente do peso do corpo de formato trapezoidal (I) que atua no corpo em formato de cunha(II), e atua no sentido de instabilizar a massa de solo.

A variável Z representa a força de atrito existente entre o solo e a tela, que é transmitida para o grampo superior do sistema, contribuindo para a estabilidade do corpo instável. Este valor é uma hipótese de cálculo, assumindo valores da ordem de 15 kN. Já a força P , é a incógnita do problema, sendo esta a força necessária para estabilizar por completo o talude.

Deste modo, a força P pode ser calculada utilizando a Equação 12 para o modelo de um corpo de solo e por meio das Equação 13 e Equação 14 para a condição de dois corpos instáveis.

$$P = \frac{G[Fs. \operatorname{sen}\beta - \operatorname{cos}\beta. \operatorname{tg}\varphi] - Z[Fs. \operatorname{cos}(\alpha - \beta) - \operatorname{sen}(\alpha - \beta). \operatorname{tg}\varphi - c. A]}{Fs. \operatorname{cos}(\beta + \psi) + \operatorname{sen}(\beta + \psi). \operatorname{tg}\varphi} \quad \text{Equação 12}$$

$$P = \frac{G_{II}[Fs. \operatorname{sen}\beta - \operatorname{cos}\beta \operatorname{tg}\varphi] + (X - Z)[Fscos(\alpha - \beta) - \operatorname{sen}(\alpha - \beta) \operatorname{tg}\varphi - cA]}{Fs. \operatorname{cos}(\beta + \psi) + \operatorname{sen}(\beta + \psi). \operatorname{tg}\varphi} \quad \text{Equação 13}$$

Onde

$$X = \frac{G_1(F_s \sin(\alpha) - \cos(\alpha) \cdot \tan\varphi) - c \cdot A}{F_s} \quad \text{Equação 14}$$

Onde β é o ângulo com que a cunha do corpo de solo/rocha forma com a horizontal. Os demais parâmetros são os mesmos apresentados anteriormente. A verificação da espessura crítica entre 0 e t é função do deste ângulo β , sendo um procedimento obrigatório a ser executado.

- Análise da resistência da tela

O modelo de ruptura exige somente a resistência da tela metálica utilizada como faceamento, não tendo efeito direto sobre os grampos do sistema. A Figura 24 mostra esquematicamente os esforços a serem resistidos pela tela.

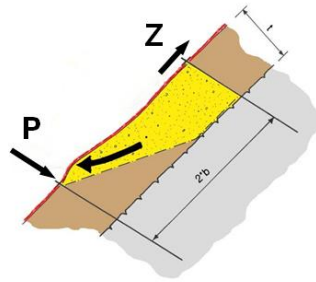


Figura 24: Esforços atuantes na tela. Cala *et al.* (2012)

Conforme citado anteriormente, atua no sistema a força Z , que representa o atrito existente entre o solo e a tela, que é transmitido para o grampo superior do sistema. Deste modo, no contato da tela com a placa de fixação, surge um esforço de cisalhamento da tela, que deve ser inferior a resistência do material para garantir a estabilidade do sistema. A Equação 15 traduz na forma matemática a verificação, onde Z_d é a força de atrito adotada em projeto majorada, e Z_r a resistência da tela a este tipo de esforço.

$$Z_d \leq \frac{Z_r}{F_s} \quad \text{Equação 15}$$

Analisando a Figura 24 também é possível verificar que a tela metálica fica sujeita a um esforço de punção, conforme pode ser observado na Figura 17, que irá se manifestar na tela junto no grampo inferior do sistema. A magnitude a ser verificada para este esforço

corresponde ao valor previamente calculado, levando em conta fator de majoração, para o projeto, P_d . A Equação 16 expressa a relação a ser atendida para que a tela não sofra rupturas por puncionamento.

$$P_d \leq \frac{Pr}{2 F_s} \quad \text{Equação 16}$$

Onde P_d é o valor de corrigido de P em função de um coeficiente de segurança definido no Eurocode 7, e Pr a resistência ao puncionamento da malha no contato malha grampo. Nesta situação o valor é reduzido pela metade pelo fato de que a carga se concentra somente em metade da área disponível da placa.

De acordo com a metodologia apresentada no método de dimensionamento Ruvolum, é necessário que todas as condições acima apresentadas sejam atendidas para que a solução de faceamento não sofra rupturas, ou seja, o método só analisa o estado limite último da estrutura.

Este método ainda permite que sejam verificados os efeitos do fluxo de água e efeitos dinâmicos (sismos), atuando em conjunto ou de maneira individual, a depender da situação avaliada.

A consideração sobre os efeitos da água no talude é limitada a condição saturação ou não, onde é considerado um incremento na carga atuante, força peso do talude. O efeito do sismo é computado considerando um coeficiente de aceleração, tanto na horizontal quanto na vertical, que também geram um incremento na força peso do talude.

2) Método MACRO1

Este método de dimensionamento foi desenvolvido pela equipe técnica da fabricante de telas de aço Macaferri, estando apresentado nos trabalhos de Macaferri (2014) e Brunet & Giacchetti (2012). Esta metodologia de cálculo foi desenvolvida para ser utilizada em taludes rochosos, sendo os principais dados de entrada parâmetros relacionados a este tipo de material.

O método MACRO1 também admite que sobre a face do talude sejam possíveis dois modelos de ruptura na camada superficial de rocha do talude, uma ruptura do material entre grampos

do sistema e uma ruptura planar e paralela à superfície do talude. A principal diferença é que a ruptura observada entre os grampos se manifesta de acordo com as descontinuidades existentes na face da rocha entre os grampos, conforme pode ser observado na Figura 25.

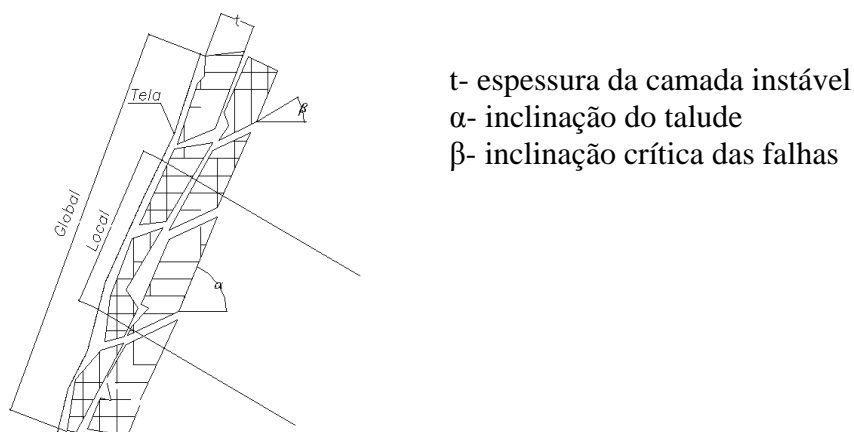


Figura 25: Modelos de ruptura considerados pelo MACRO1. Adaptado Macaferri (2014).

Nesta metodologia, também é necessário realizar uma série de investigações para garantir que os esforços previstos não superem a resistência dos elementos do sistema de estabilização. A seguir serão apresentadas as verificações consideradas no MACRO 1.

a) Dimensionamento da tela

O MACRO1 permite realizar dois tipos de análise do sistema, verificando qual o estado limite último, momento no qual se dá a ruptura da tela, e uma investigação sobre estado limite de serviço, determinando as deformações esperadas do sistema.

a. Definição dos esforços

O modelo geomecânico do talude que é utilizado nesta verificação é semelhante ao do método Ruvolum, considerando que uma camada de espessura t , contida entre dois grampos do sistema irá se instabilizar e solicitar o sistema. Neste caso, a massa de rocha se desloca sobre o plano inclinado das fraturas, representado pelo ângulo β citado acima na Figura 25. A consideração sobre a solicitação imposta à tela por este método é diferente do anterior, e pode ser representado pela Figura 26.

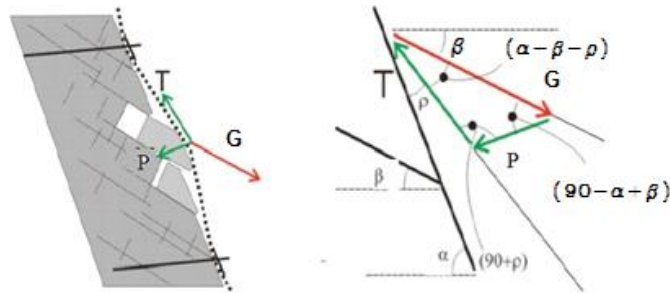


Figura 26: Representação do talude. Adaptado de Maccaferri (2014).

Na Figura, G (kN) é a força instabilizante, função do peso do bloco que se desloca sobre o plano β ; T (kN) o esforço de tração que solicita a malha paralelamente à superfície do talude, que surge quando os blocos se deslocam, empurrando a tela; P (kN) o esforço de punção que atua perpendicularmente a tela, que surge devido as condições de fixação considerada para as condições de contorno.

No cálculo dos esforços, parte da determinação da massa de rocha que pode sofrer instabilidades é função do volume e densidade do material. O MACRO1 determina o volume de material que pode vir a se instabilizar utilizando a geometria apresentada na Figura 27. O método avalia a hipótese de corpos com diferentes formatos, um triangular e um trapezoidal, semelhantemente ao Ruvolum, entretanto verifica somente um dos corpos, em função do algoritmo de cálculo, apresentado a seguir

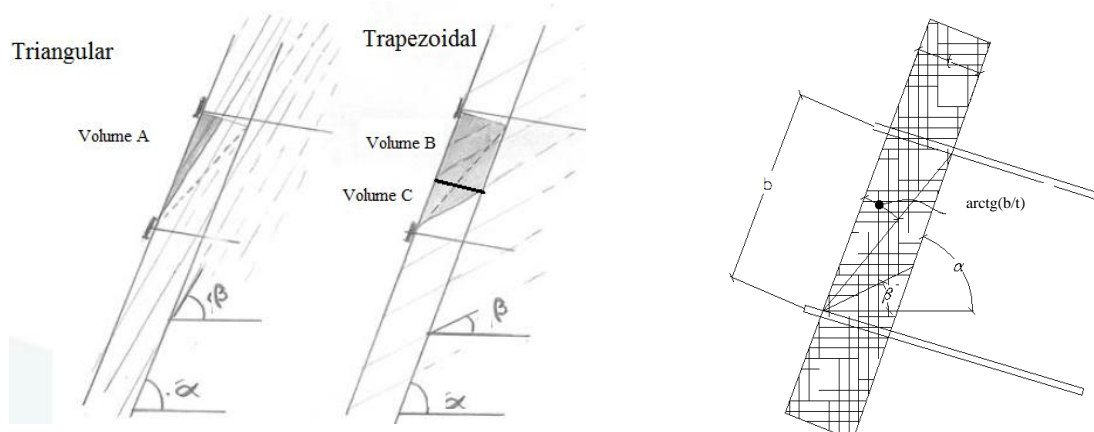


Figura 27: Geometria avaliada para o cálculo da massa instável. Adaptado de Maccaferri, (2014).

$$\text{se } \beta \geq \alpha - \arctg\left(\frac{t}{b}\right) \text{ e } \beta < \alpha \rightarrow \text{Volume A} = \frac{1}{2} b^2 \text{tg}(\alpha - \beta)$$

Equação 17

$$\text{e se } \beta < \alpha - \arctg\left(\frac{t}{b}\right) \quad \text{Volume B} = b \cdot t - t^2/\text{tg}(\alpha - \beta) \quad \text{Equação 18}$$

$$\text{Volume C} = 0,5t^2/\text{tg}(\alpha - \beta) \quad \text{Equação 19}$$

Este sistema de equações tem por objetivo definir, geometricamente, qual o modelo do corpo prismático que irá se manifestar em uma provável ruptura, sendo o volume a soma das três parcelas, volume A, B e C.

Sendo assim, a força de funcionamento que atua sobre a tela pode ser determinada por meio da Equação 20, função de G que é o peso do bloco de rocha (Volume x γ) calculado com base no volume calculado acima e na densidade do material.

$$P = (G_{dr} - G_{st})\text{sen}(\alpha - \beta) \cdot b \quad \text{Equação 20}$$

$$G_{dr} = G \text{sen } \beta + \Delta \cdot \cos \beta * F_{s_{dr}} \quad \text{Equação 21}$$

$$G_{st} = G \text{sen } \beta (1 - \Delta) * F_{s_{st}} \quad \text{Equação 22}$$

Onde, G_{st} é a parcela da força peso que estabiliza o sistema, G_{dr} a parcela da força peso que atua no sentido de instabilizar o sistema e Δ representa o coeficiente de aceleração da sísmico, que atua da mesma maneira que o método anterior, aumentando a carga peso. $F_{s_{dr}}$ e $F_{s_{st}}$ são os fatores de segurança, que dependem das condições do talude (incertezas na inclinação, espessura, condição de sanidade, homogeneidade e formato). Mais informações sobre estes fatores, podem ser encontradas em Maccaferri, (2014), que apresenta detalhadamente como são obtidos.

E através das relações trigonométricas é possível determinar o valor de T, tração que atua no sistema, sendo este expresso por:

$$T = \frac{\frac{P}{b}}{\text{sen}(\alpha - \beta - \rho)} \quad \text{Equação 23}$$

Onde ρ é ângulo formado entre a tela deformada e a face do talude rochoso. Este ângulo pode ser determinado através da seguinte relação:

$$\rho = \text{atg}\left(\frac{2dl}{i}\right) \text{ onde } i = (a * b)^{0,5} \quad \text{Equação 24}$$

O parâmetro d_l corresponde ao deslocamento da malha de aço em função da carga de puncionamento e é definido no item a seguir.

b. Verificações da Tela

Primeiramente é necessário verificar se a tela tem capacidade de resistir aos esforços aos quais está submetida, a tração, verificação do estado limite último. Cabe lembrar que as resistências são minoradas em função de um fator de segurança, que para o caso do ensaio de tração, não deve ser menor do que 2,5, valor determinado com base em uma série de ensaios e pesquisas realizadas pelos autores do método, Macafferri (2014).

$$T \leq \frac{T_r}{F_s} \quad \text{Equação 25}$$

Tal equação representa a verificação da malha frente ao esforço que nela atua, sendo então T_r a resistência a tração da malha de aço.

Neste ponto cabe apontar que o puncionamento considerado neste modelo se manifesta diretamente na malha de aço, sendo originado em função do peso próprio do material que é retido pela malha, solicitando a mesma na região intermediária ente os grampos, como pode ser observado na Figura 26.

A resistência ao puncionamento idealizada neste modelo de cálculo é definida com base em um ensaio normatizado pela UNI 11437:2012, que consiste em aplicar um esforço de puncionamento em uma amostra de malha quadrada de 3,0x3,0 m, de modo que o aplicador de tensão consiste em uma estrutura ovalada. A tela de aço é de aço é fixada ao longo de toda a suas extremidades, nos quatro cantos, e a carga de puncionamento é aplicada por meio de cabos de aço que tracionam o aplicador ovalado contra a malha, gerando o esforço de puncionamento idealizado pela metodologia de cálculo no sistema. A Figura 28 ilustra o esquema de fixação e apresenta uma fotografia real do ensaio.

O ensaio busca reproduzir os efeitos de uma massa rochosa mobilizada e retida pela malha, conforme a idealização de carregamento indicada na Figura 26. Este ensaio não foi realizado na presente pesquisa sendo possível encontrar mais detalhes em Macafferri (2014) e Bertolo *et al* (2009).

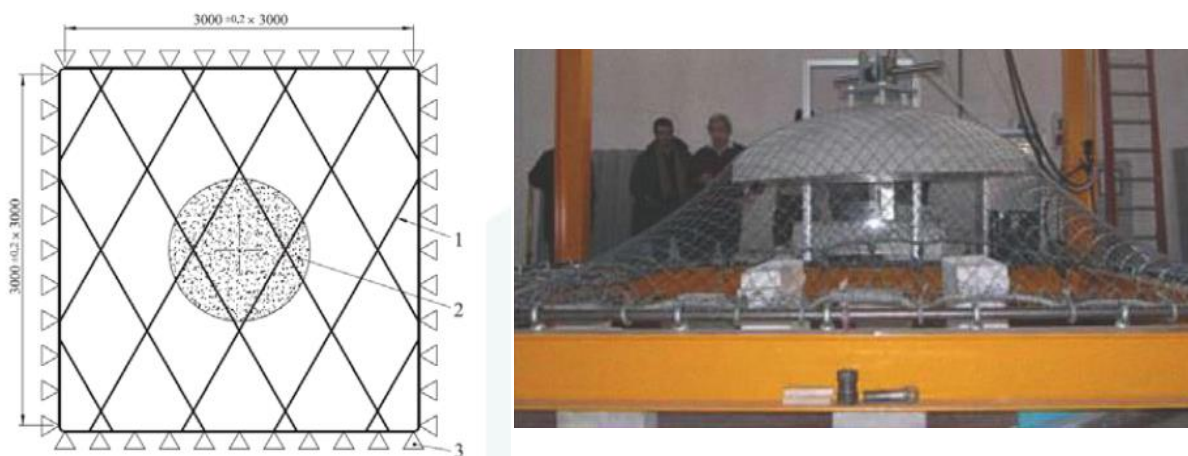


Figura 28: Configuração do ensaio de puncionamento considerado no método MACRO. Fonte Macaferri (2014) e Bertolo *et al* (2009).

O estado limite de serviço é avaliado por meio do deslocamento esperado para a tela de aço, que é função da carga de puncionamento P calculada anteriormente. Este valor é confrontado com um gráfico, que é gerado a partir de ensaios de dados coletados por meio de ensaios laboratório normatizados. Tais ensaios consistem em solicitar a tela verificando o deslocamento em função da carga aplicada, considerando uma dada configuração de ancoragem, onde pode ser simulado um conjunto de quatro grampos distribuídos em uma malha quadrada de 3x3 m. Os resultados do ensaio são apresentados na forma de um gráfico que correlaciona a carga aplicada com o deslocamento medido no sistema. Um croqui do ensaio e os resultados do ensaio estão apresentados na Figura 29.

O ensaio também segue a normativa UNI 11437:2012, que especifica o deslocamento máximo, as cargas, a configuração da montagem do ensaio e todos os demais aspectos envolvidos. Aqui cabe lembrar que existe um conjunto de dados carga x deslocamento específico para cada modelo de tela metálica, visto que a resistência, rigidez e construção de cada tipo de tela são fundamentais para a definição do comportamento do material frente às cargas aplicadas.

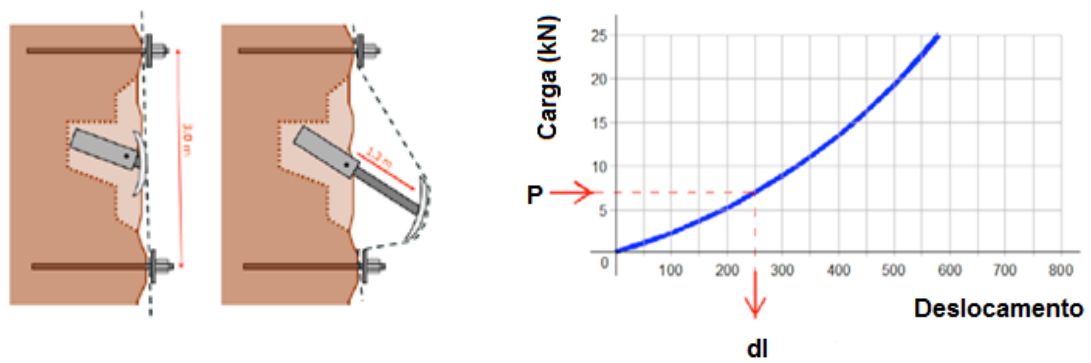


Figura 29: Exemplo de gráfico de deformação

O valor de deformação obtido por meio destes resultados é então comparado com o valor definido como deslocamento máximo permitido, definido pelo projetista, que geralmente é adotado de acordo com as características locais. Neste processo também é possível incluir um fator de segurança, que varia entre 1,5 a 3,0, devido às condições da instalação da tela e à morfologia do talude Macaferri (2014). A Equação 26 apresenta a verificação, e a Figura 30 o deslocamento esperado para a tela.

$$D - \frac{d_1}{F_s} \geq 0 \quad \text{Equação 26}$$

Onde D é o deslocamento máximo de projeto, definido pelo projetista, d_1 é o deslocamento observado quando a carga de punção P , estimada anteriormente, é aplicada ao sistema e F_s o fator de segurança desejado.

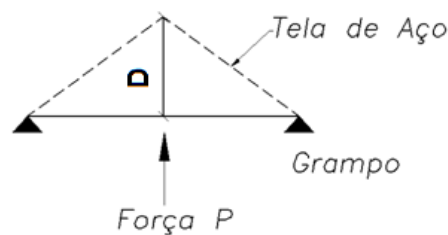


Figura 30: Deslocamento calculado.

Como o ensaio é realizado utilizando as dimensões padrão da norma referida, os autores indicam que para a carga de punção calculada, o deslocamento obtido no gráfico específico para a malha investigada seja corrigida em função do espaçamento entre os grampos, levando em conta a relação geométrica entre a solução e o ensaio.

b) Verificação dos grampos

A hipótese de cálculo assumida é de que os grampos trabalham de maneira passiva, ou seja, entram em carga somente quando o bloco rochoso entre os grampos sofre deslocamentos. Deste modo, o dimensionamento dos grampos exige que seja verificada a condição limite do equilíbrio das forças, onde o fator de segurança é igual a 1,0, condição na qual existe a iminência da instabilidade de um bloco rochoso cujas dimensões são equivalentes ao espaçamento, a e b , considerado para os grampos.

A Equação 27 é a expressão matemática que descreve o sistema de forças que atuam em um bloco prismático localizado entre os grampos do sistema, onde atuam forças instabilizadoras, força peso (G) e forças estabilizantes, reação do grampo (R_g) e a força de atrito existente no contato do bloco com o substrato. A referida equação ainda pode levar em conta os efeitos de sismos sobre o talude, na forma de um coeficiente de aceleração aqui representado por Δ .

$$G (\text{sen}(\alpha) - \Delta \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot \text{tg}(\varphi_j)) + R_g \geq G (\text{sen}(\alpha) + \Delta \cdot \text{cos}(\alpha)) \quad \text{Equação 27}$$

Onde G é a força peso do bloco de rocha, Δ o coeficiente de aceleração de sísmica, R_g a reação necessária dos grampos para manter a estabilidade. Sobre φ_j , o ângulo de atrito da junta da falha rochosa, os autores destacam os critérios de Barton-Bandis, que apresenta a faixa de variação deste ângulo, entre 28° e 70° , sendo uma hipótese conservadora, adotar um valor de 45° , embora isto tenha que ser verificado para os casos de juntas com preenchimento ou rochas de granulometria muito fina.

Os autores indicam a utilização de fatores de segurança para minorar as forças estabilizadoras e majorar a força peso do bloco, utilizando a combinação de diferentes fatores de segurança em função das incertezas das variáveis de entrada e morfologia do talude. Seguindo os padrões europeus, os coeficientes variam entre 1 e 1,50, Macafferri (2014).

A força de estabilização introduzida no sistema pela presença do reforço, R_g pode ser calculada utilizando Equação 28, que é baseada no princípio do trabalho máximo, apresentado por Pallet e Egger(1995) e Giani (1992)

$$R_g = \left[\frac{\left(1 + \frac{m^2}{16}\right)}{\left(1 + \frac{m^2}{4}\right)} \right]^{0,5} \cdot T_{\text{máx}} \quad \text{Equação 28}$$

Sendo

$$m = \cotg(\phi + \omega) \quad \text{Equação 29}$$

$$(\phi = 90 - \alpha - \theta) \quad \text{Equação 30}$$

$$\omega = \frac{JRC \cdot \log\left(\frac{JCS}{\sigma_{\text{plan}}}\right)}{3} \quad \text{Equação 31}$$

$$T_{\text{máx}} = \frac{A f_y}{F_s} \quad \text{Equação 32}$$

$$\sigma_{\text{plan}} = \frac{a \cdot b \cdot t \cdot \gamma \cdot \cos(\beta)}{a \cdot b} \quad \text{Equação 33}$$

Onde α e θ são o ângulo do talude e o ângulo do eixo da barra com a normal do plano de deslizamento (determinado pelo projetista), ambos em graus; ω é a dilatação da superfície de deslizamento; $T_{\text{máx}}$ é a resistência da barra (kN) e σ_{plan} a tensão normal do plano deslizante (kN). JRC e JCS são parâmetros das juntas, o coeficiente de rugosidade (adimensional) e resistência à compressão da junta (MPa) respectivamente.

O sistema de equações acima já considera no cálculo a resistência da barra de aço a ser utilizada prevendo a ação de processos corrosivos, reduzindo a área total da seção transversal da barra, sendo esta uma decisão do projetista.

A metodologia ainda inclui o cálculo do comprimento mínimo de ancoragem necessário para que o grampo seja capaz de transferir as cargas satisfatoriamente para a porção estável do talude sem que o arrancamento ocorra. Este cálculo está baseado nos mesmos princípios que estão apresentados no capítulo 2.1, ou seja, a resistência de aderência dos grampos.

Por fim, o último ponto a ser abordado nesta metodologia consiste na verificação da estabilidade global do talude, que pode ser realizada utilizando os mesmos procedimentos indicados anteriormente, métodos de equilíbrio limite caso seja possível, ou ainda métodos de análise de cunhas de ruptura em taludes rochosos.

Caso alguma das verificações propostas por cada um dos métodos de cálculo não seja satisfeita, a configuração do sistema da solução não está corretamente elaborada, sendo necessário realizar alterações no espaçamento e/ou tipo dos grampos bem como no modelo de tela utilizada, avaliando os efeitos das alterações nas verificações necessárias. Com a solução para o sistema de faceamento definida é imprescindível uma análise utilizando os métodos de

equilíbrio limite, citados no capítulo 2.1.7, para verificar a condição de estabilidade global do talude tratado, garantindo a total segurança no projeto.

3 DESCRIÇÃO DE ENSAIOS E EQUIPAMENTOS

3.1 ENSAIOS REALIZADOS EM ESCALA REAL

Os ensaios em escala real consistem em simular um talude tratado com um sistema de faceamento (tela e grampos) posicionado em diferentes condições de inclinação. O talude foi simulado em uma grande estrutura metálica preenchida com solo, onde grampos e uma tela metálica foram instalados. A inclinação progressiva do conjunto foi realizada por um guindaste de grande porte, responsável por variar o ângulo do conjunto com a horizontal, alterando progressivamente as condições de equilíbrio (e as cargas). Concomitantemente foram realizadas uma série de medições, até o momento da ruptura do sistema de faceamento utilizado.

3.1.1 Equipamentos e montagem

O ensaio de campo em escala real é realizado utilizando uma grande estrutura aço, de formato retangular com dimensões de 13 x 15 m. A estrutura de aço serve como uma base para a montagem de uma estrutura secundária de madeira, que forma uma grande caixa onde o material que irá simular o solo de um talude é inserido. Neste conjunto também são instalados os grampos e a tela metálica a ser investigada, simulando a condição real de tratamento de um talude. Também fazem parte do conjunto do ensaio inúmeros instrumentos, cuja função é registrar as forças e deformações que se manifestam ao longo do ensaio.

Um guindaste, de 500 toneladas é responsável por elevar uma das extremidades do conjunto, alterando gradativamente a inclinação na qual o solo está depositado, condição que altera os carregamentos aplicados. A Figura 31 apresenta uma fotografia do ensaio na posição inicial, mostrando uma visão geral da montagem do ensaio.



Figura 31: Vista geral do ensaio em escala real de campo realizado em Winterthur Geobruigg (2012)

A estrutura secundária retangular de madeira, uma grande caixa, tem dimensões iguais a 10 x 12 m, com uma profundidade de 1,20 metros. A madeira utilizada na face interna apresenta uma superfície bastante rugosa, conferida por um revestimento de chapisco, e conta com pequenas vigas de madeira, de seção transversal 60 x 30 mm, que são igualmente espaçadas no sentido transversal da caixa, Figura 32. O revestimento interno da caixa de madeira tem por objetivo aumentar a resistência no contato entre a interface dos materiais, garantindo que as superfícies de rupturas se manifestem dentro da superfície do solo, e não no contato entre o solo com a estrutura de madeira.

Os grampos, cujo espaçamento e diâmetro são definidos em função da necessidade do ensaio, também são fixados junto à estrutura metálica descrita. Cada grampo é constituído pelo conjunto de uma barra de aço, geralmente do tipo GEWI, e a injeção de nata de cimento, cuja aplicação se dá utilizando um tubo de revestimento de PVC, com 100 mm de diâmetro, conforme apresentado na Figura 32.

A barra de aço utilizada possui um comprimento livre de 24 cm na extremidade superior, que é utilizado para a correta instalação da tela de aço sobre o material de preenchimento, utilizando as placas do sistema. A fixação do conjunto que compõem o grampo se dá por meio de uma placa de fundação, soldada à barra de aço. Por sua vez, a placa é aparafusada junto da estrutura de aço principal. Este modelo de fixação do grampo à estrutura principal objetiva aumentar a resistência da base do grampo, buscando reduzir ao máximo as deformações no ponto de fixação.



Figura 32: Vista interna da estrutura de madeira, Geobrugg (2012)

Quando finalizada a montagem dos grampos, o material de preenchimento é lançado dentro da caixa, sem que nenhuma medida especial de compactação seja adotada. Antes da instalação da tela metálica é necessário lançar diretamente sobre o material que simula o solo uma tela secundária, cuja resistência não afeta os resultados do ensaio, com o objetivo de conter o material, evitando que este atravesse o faceamento pelas aberturas da malha de aço principal.

A fixação da tela metálica principal junto à estrutura do ensaio é projetada para simular uma condição de talude infinito, eliminando eventuais problemas com as condições de contorno. Para tanto a tela metálica é presa a cabos de aço na porção inferior e superior, que por sua vez é conectado à estrutura de aço por meio de manilhas. Nas laterais, a fixação da tela se dá por meio de parafusos, que são instalados diretamente em perfis metálicos da estrutura principal, garantindo que não ocorram deformações laterais na tela metálica.

Por fim são instaladas as placas de fixação do sistema, cujo formato varia de acordo com o sistema de faceamento investigado durante o ensaio, aplicando quando necessário o pré-tensionamento do sistema por meio das placas. A Figura 33 mostra os pontos de fixação da tela metálica.

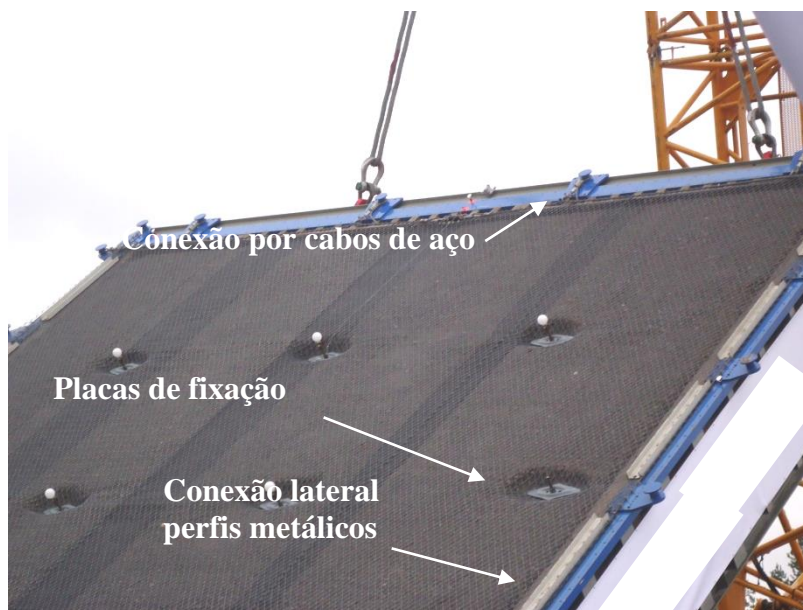


Figura 33: Pontos de fixação da malha junto a estrutura

3.1.2 Instrumentação utilizada no ensaio

Para garantir a acurácia e precisão das medidas foram utilizados diferentes equipamentos para medição de um mesmo parâmetro. A seguir serão descritos os equipamentos utilizados de maneira bastante sucinta, com objetivo de apresentar e elucidar as grandezas obtidas com a realização deste ensaio. Os equipamentos e procedimentos de ensaios estão descritos em Baraniak e Schawarz (2014).

a) Escâner Laser Laser – Deformações Superficiais

Este tipo de equipamento é capaz de modelar uma superfície qualquer tridimensionalmente, a partir de coordenadas X, Y e Z coletadas a partir das leituras realizadas. O princípio de funcionamento destes scanners, segundo Barchick *et al.* (2007), está em um sistema de emissão e recepção de feixes de laser.

O equipamento emite milhares de feixes de laser sobre toda a face da superfície, que ao ser atingido reflete parte dos sinais, redirecionando os feixes de volta para uma central receptora do equipamento. Especificamente, nos ensaios disponibilizados para a presente dissertação, o equipamento emissor utilizado foi um escâner laser de pulso, do tipo Riegl VZ-400. A configuração do equipamento foi elaborada de modo que feixes fossem emitidos em intervalos regulares de 0,02 graus, tanto na direção horizontal quanto na vertical. Deste modo uma densidade de 104 pontos de leitura por m² de face foi obtida.

O tempo transcorrido entre o envio e recepção do sinal, juntamente com a variação na energia do feixe são as informações utilizadas para criar um conjunto de coordenadas X, Y e Z, que a modelam a superfície escaneada. A Figura 34 apresenta um exemplo das medições realizadas utilizando o escâner laser.

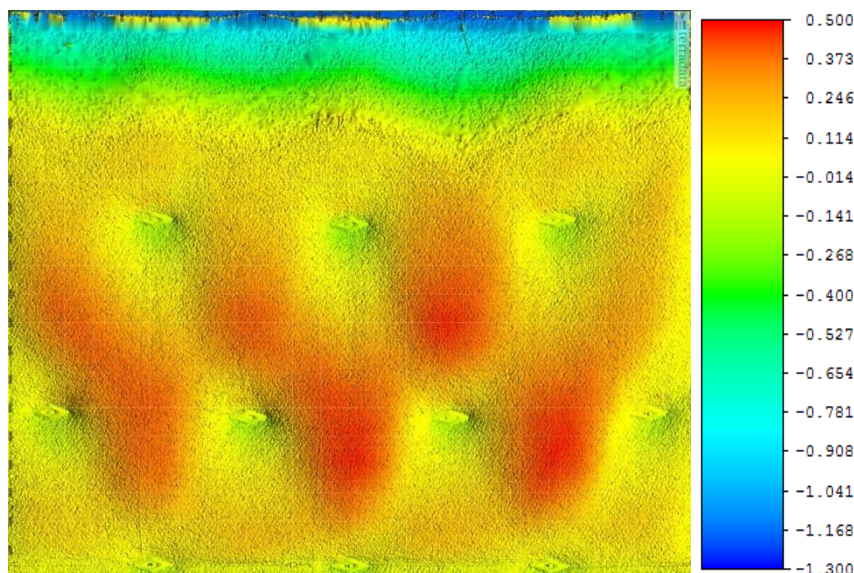


Figura 34: Superfície obtida durante um ensaio utilizando o sistema de escaneamento Laser Baraniak e Schawarz (2014)

b) Potenciômetro de Fio

O modelo de potenciômetro utilizado nos ensaios é capaz de registrar deslocamentos dentro da faixa de 0-3000 mm. Este equipamento foi instalado na cabeça de um dos grampos da caixa, em um ponto no qual as convexidades geradas pela pré-tensão aplicada na malha não interferissem nos resultados das medições.

Este equipamento é composto por um elemento resistivo e um conjunto de dois contatos, um móvel e um fixo, que estão submetidos a uma tensão elétrica. O deslocamento do contato móvel do potenciômetro, que acompanha o deslocamento de um elemento de interesse do ensaio no qual ele é fixado, promove uma alteração na resistividade elétrica dos condutores, causando uma variação na tensão elétrica que está aplicada ao sistema.

A oscilação nas medições da tensão elétrica pode facilmente, em laboratório, ser correlacionada com um deslocamento específico, ou seja, o equipamento é calibrado para transformar as variações nas leituras de voltagem (V) em deslocamentos (mm) medidos.

c) Células de Cargas

As células de carga foram instaladas nos cabos de suporte inferior e superior do ensaio, que são instalados para simular as condições de contorno de campo durante a realização do ensaio. Neste caso as células de carga utilizadas eram compostas por *strain gauges* (descritos abaixo), fixados a placas de alumínio, que por sua vez estavam em contato direto com os cabos de aço. Deste modo, as células de carga utilizadas era capazes de medir cargas de até 200 kN.

d) *Strain gauges*

Estes dispositivos estão baseados no mesmo princípio de que a variação na tensão elétrica é proporcional às deformações da resistência elétrica e pode ser facilmente correlacionada com as deformações do elemento ao qual o dispositivo está fixado, sendo correlacionáveis com as cargas. O formato típico de um dispositivo deste tipo é similar ao apresentado na Figura 35.

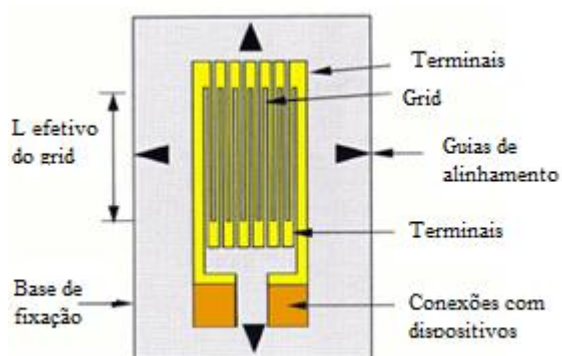


Figura 35: Formato típico do *strain gauge* (adaptado de www.sensorland.com acessado em 25/06/2014)

Cabe lembrar que para completar o circuito e ser possível realizar as leituras, é necessário que este sensor esteja ligado em arranjo tipo ponte de Wheatstone e conectado a um conjunto de dispositivos eletrônicos (baterias, amplificadores de sinal, etc.) para o correto funcionamento.

Além de estes dispositivos terem sido aplicados nas células de cargas, eles também foram utilizados em grampos do sistema, realizando medições das cargas de tração e de deformação, tanto as horizontais quanto as verticais, observadas tanto na base quanto na cabeça do grampo de interesse. Ao todo foram instalados 12 conjuntos de *strain gauges*, 6 em cada extremidade, sendo necessário um par de instrumentos para cada uma das medidas a serem realizadas. A Figura 36, apresenta a configuração da instalação destes equipamentos nos grampos.

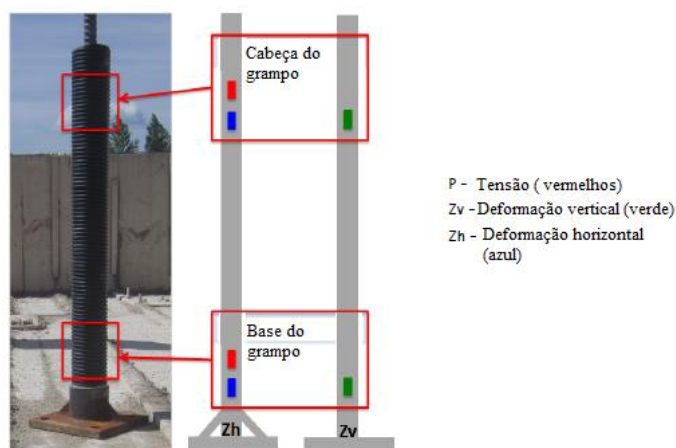


Figura 36: Aplicação dos *strains gauges*. Adaptado de Baraniak e Schawarz (2014).

3.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Atualmente no nosso país ainda não foram desenvolvidos critérios claros para a classificação das telas metálicas que são comumente utilizados em sistemas de faceamento de taludes. Dentro desta problemática são propostos ensaios de laboratório que buscam avaliar as características destes materiais, definindo claramente quais são as resistências nominais das diferentes telas frente aos esforços apresentados pelos métodos de dimensionamento.

Estes ensaios foram realizados no laboratório de Materiais de Construção e Concreto do Instituto Militar de Engenharia, o IME, e nas dependências da empresa que fabricou os equipamentos, em Belo Horizonte.

3.2.1 Prensa para ensaio de tração

Os equipamentos e as metodologias seguidas durante a execução dos ensaios das malhas metálicas utilizadas na presente dissertação estão baseados nos projetos e procedimentos utilizados em pesquisas semelhantes da Universidade de Cantabria, na Espanha, Universidade do Estado de Washington, EUA e na sede da empresa parceira na Suíça (Geobruigg).

Devido à diferença conceitual entre o equipamento disponibilizado pelo laboratório do IME e o equipamentos utilizados nos ensaios realizados nas pesquisas citadas acima, foram necessárias adaptações dos dispositivos utilizados na presente pesquisa, tomando como base os projetos e informações disponibilizadas. Deste modo, o maquinário foi adaptado para atender as necessidades encontradas pelas pesquisas em desenvolvimento no local.

O Instituto Militar de Engenharia disponibilizou uma prensa INSTRON, capaz de aplicar cargas de compressão e de tração nos elementos a serem ensaiados, sendo necessário apenas inverter o sentido do curso da viga central. Esta característica de tração é fundamental para o desenvolvimento da presente pesquisa. A Figura 37 apresenta uma fotografia da prensa em sua configuração original.



Figura 37: Prensa que foi utilizada na pesquisa em sua configuração original.

Este equipamento passou por um processo de reforma, recebendo um novo conjunto de motores e sistema de controle, juntamente com um novo *software*. Adicionalmente foram instaladas novas células de carga e novos sistemas de aquisição de dados de deformação, ou seja, a prensa foi inteiramente remodelada.

Estruturalmente também foram necessários alguns ajustes, a instalação de uma nova viga de suporte, fixada na estrutura original da base da prensa, tendo por função fornecer a base para a instalação dos pórticos e aplicação de carga nas telas a serem ensaiadas (elemento de cor azul na fotografia) Figura 38 (a). A estrutura rígida do pórtico de ensaio é conectada na viga azul, formando a base fixa do pórtico. A porção superior da estrutura do pórtico é móvel, viga de cor amarela, e é fixada diretamente na viga móvel da prensa, viga de cor escura, por meio de cabos de aço,. Esta configuração permite que as cargas sejam transmitidas uniformemente da prensa para a tela a ser ensaiada. A Figura 38 (b) apresenta o arranjo geral da prensa.

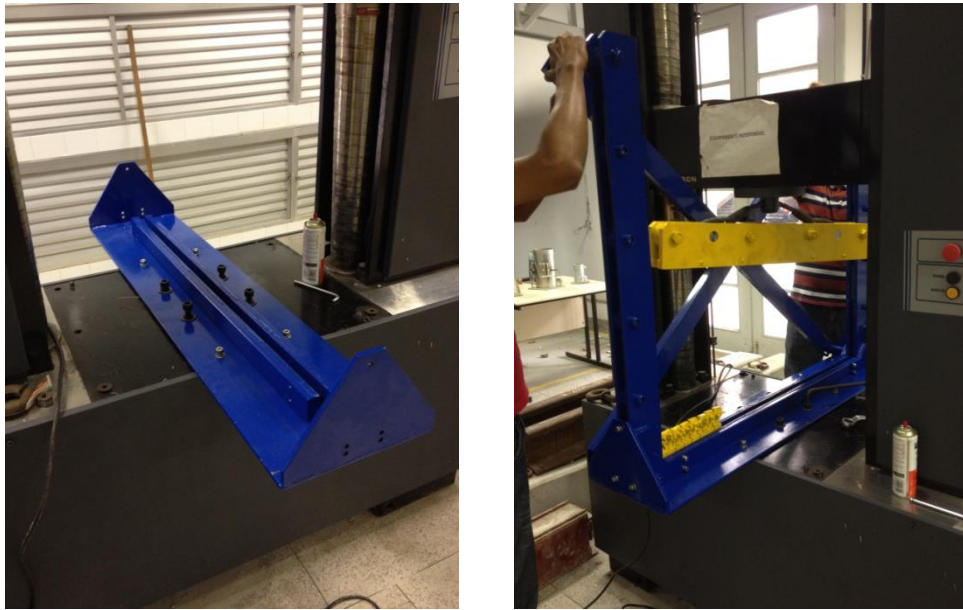


Figura 38: (a) Viga base (b) configuração final com o pórtico dos ensaios de tração.

3.2.2 Pórtico utilizado para o ensaio de tração

Parte da pesquisa compreendeu o desenvolvimento do pórtico para a instalação da tela, que foi inteiramente construído, tendo como base os projetos e considerações indicadas por Cala *et al.*(2012) e Roduner (2011). A estrutura do pórtico elaborado sofreu ajustes em relação ao projeto original, com o intuito de adaptar seu formato às condições e limitações oferecidas pela prensa disponibilizada pelo IME. A Figura 39 apresenta uma fotografia do pórtico montado, com um corpo de prova de tela, dando uma ideia geral da montagem do equipamento.



Figura 39: Pórtico do ensaio de tração com uma.

O conjunto para o ensaio é montado fixando a tela metálica junto das presilhas laterais e superiores, Figura 40 (b) na viga, elementos de cor amarela. Estes elementos podem se deslocar lateralmente de forma livre ao longo do eixo das vigas, que são construídas utilizando duas chapas metálicas, Figura 40 (a), formando uma espécie de trilho por onde se deslocam as fixações.



Figura 40: Detalhes das fixações laterais do pórtico. (fonte autor)

A livre movimentação das presilhas laterais tem por objetivo manter as deformações laterais da tela praticamente nulas, ou seja, reduzir ao máximo processos de contração lateral, mantendo a largura da amostra uniforme ao longo do processo de carregamento da tela. Deste modo é possível manter um carregamento uniforme, evitando concentração de tensões em pontos de maiores deformações ao longo do desenvolvimento do ensaio.

Esta configuração padroniza o ensaio, conferindo um alto grau de repetibilidade nos resultados, reduzindo ao máximo as variáveis geométricas da tela que possam se manifestar por variações nas cargas aplicadas. Deste modo é possível utilizar o mesmo pórtico para diferentes tipos de telas metálicas.

O pórtico desenvolvido para adequar as condições da prensa permite que sejam utilizadas mostras de tela com dimensões (h) 670 mm e (l) 570 mm, considerando que os diferentes tipos de tela possuem diferentes tamanhos característicos para os elementos da malha de aço.

3.2.3 Pórtico do ensaio de resistência ao cisalhamento placa/malha

O equipamento foi desenvolvido com base no trabalho apresentado por Cala *et al.* (2012) e nas pesquisas das universidades acima citadas. O papel desempenhado durante o desenvolvimento do pórtico ficou limitado ao projeto conceitual do funcionamento do equipamento, informando as necessidades e um modelo básico de como a solução poderia ser encontrada. O processo de fabricação e dimensionamento do equipamento ficou a cargo da empresa que o fabricou, sendo que durante o processo a comunicação era constante, a fim de refinar o projeto final.

O equipamento utilizado na pesquisa aplica as cargas de forma vertical, diferentemente do equipamento original, que é montado horizontalmente, entretanto o efeito reproduzido é o mesmo, o cisalhamento da malha de aço metálica no contato com a placa de fixação do sistema. A aplicação da carga se dá por meios de cabos de aço que tracionam a placa do sistema no sentido ascensional. Deste modo é necessária que a fixação da tela seja realizada na base do pórtico, fornecendo à reação a carga, utilizando presilhas semelhantes às apresentadas no pórtico da prensa de tração. A extremidade de topo não precisa ser fixada do mesmo modo, pois nesta extremidade não são aplicadas cargas, sendo sua fixação realizada por meio de um cabo elástico, cuja função é apenas manter a amostra na posição correta para a instalação da placa do sistema. Uma visão geral do equipamento está apresentada na Figura 41, onde uma amostra está instalada no pórtico, e o detalhe das presilhas.

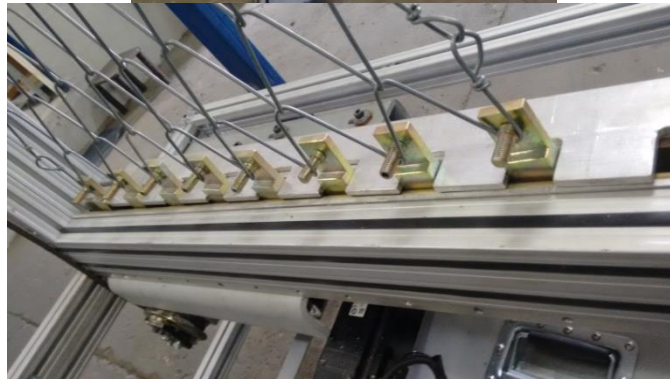


Figura 41: Visão geral do pórtico desenvolvido

A carga é aplicada ao sistema por meio de dois cabos de aço que estão fixados a viga superior do equipamento, sendo que estes são tracionados concomitantemente, tracionando de maneira uniforme a placa do sistema. Junto à viga superior também está localizada a célula de carga, ponto onde entram em contato com os cabos, registrando o carregamento ao longo do ensaio. Estes cabos partem do motor do equipamento, localizado na região inferior da máquina. A Figura 42, apresenta um esquema da montagem do equipamento.

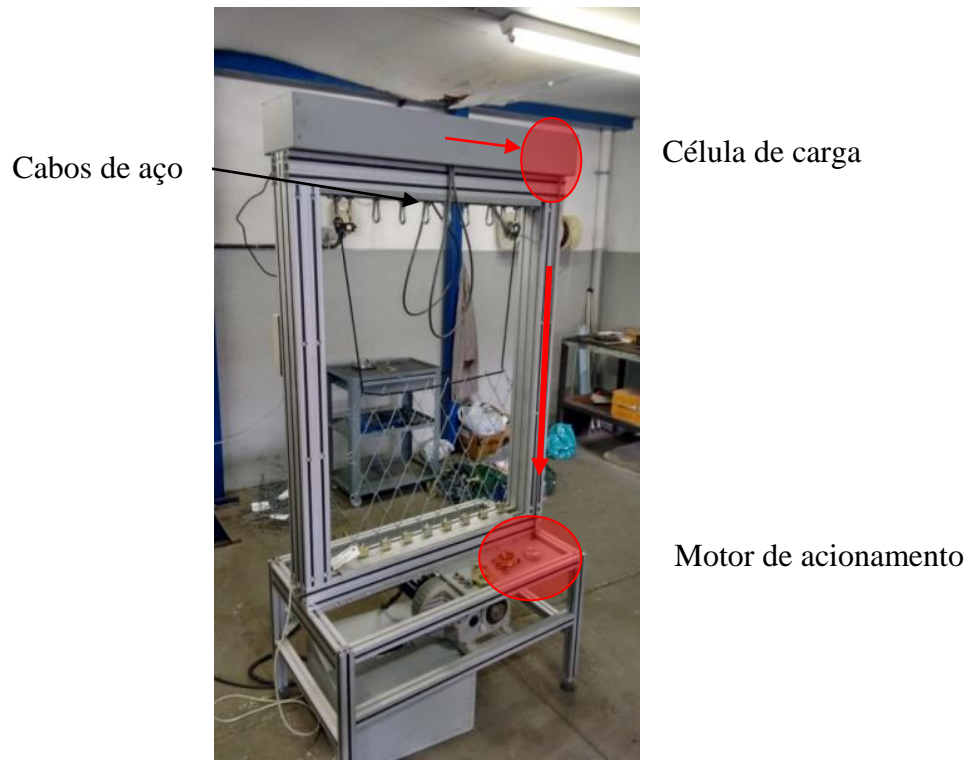


Figura 42: Detalhe do funcionamento do equipamento (fonte autor)

O carregamento é aplicado à amostra instalando a placa de fixação do sistema e um conjunto auxiliar de chapas metálicas, roldanas e parafusos. Este conjunto tem por função simular o grampo da solução de solo grampeado e garantir que a malha metálica tenha contato com a placa do sistema, a fim de avaliar a resistência da amostra nesta região. A fixação do conjunto se dá por meio de duas porcas, nas quais é aplicado o torque suficiente para garantir que a malha metálica não se desloque para fora do contato da placa de fixação sistema. A Figura 43 traz imagens, em detalhe deste dispositivo.



Figura 43: Detalhe do sistema de aplicação de carga (fonte autor)

Deste modo, os cabos são tracionados para cima, fazendo com que o conjunto apresentado se desloque, aplicando uma carga nos pontos de contato da tela com a placa e com o parafuso que simula o grampo. Foi garantido que os cabos tivessem o mesmo comprimento para que a carga fosse aplicada mais uniformemente possível, evitando a concentração de tensão em uma das extremidades da placa de fixação.

O equipamento dispõe de uma célula de carga, para os dois cabos um sistema que mede o deslocamento dos cabos, em função do deslocamento das engrenagens do motor do sistema, ou seja é uma medida de deformação externa. Não foi utilizado um sistema para medir a deformação diretamente na malha pelo fato de que o parâmetro investigado é a resistência do sistema e não o comportamento de deformação da malha ao longo do ensaio.

Em ambos os equipamentos os dados eram coletados durante a realização do ensaio por meio do *software* desenvolvido para o controle de ensaio. Os dados foram coletados apresentando o horário do ensaios, a carga em quilogramas e o deslocamento do curso do motor em milímetros.

3.2.4 Ensaio de puncionamento

Devido às necessidades especiais e adaptações necessárias para a realização deste ensaio, não houve tempo hábil para o desenvolvimento e construção de um equipamento que fosse capaz de determinar o esforço de puncionamento da tela. Todavia, no desenvolvimento do trabalho foram utilizados resultados de ensaios de puncionamento realizados por um laboratório alemão, que foram disponibilizados, cordialmente, pela equipe da Geobrugg. Deste modo, não serão apresentados os equipamentos utilizados para a realização do ensaio, sendo apenas indicado, no capítulo seguinte, o procedimento executivo do mesmo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas 4 tipos diferentes de malhas metálicas, sendo que a principal diferença entre os modelos consiste na espessura dos fios e na geometria da malha. As amostras utilizadas foram especialmente fabricadas sob medida para esta pesquisa, para adequar as dimensões aos pórticos fabricados para a realização dos ensaios. A placa de fixação utilizada corresponde ao modelo padrão fornecido junto com a tela metálica pela fabricante, reproduzindo fielmente as condições de campo. Este item também contempla a apresentação dos materiais utilizados para simular as condições de um talude no ensaio de escala real.

A seguir serão apresentados todos os elementos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, descrevendo as amostras e materiais.

4.1.1 Telas metálicas utilizadas

Os quatro modelos de malhas utilizados na pesquisa tem todas as especificações, medidas, geometria apresentadas nos manuais e dados fornecidos pelo fabricante, sendo possível encontrá-los em GEOBRUGG (2009). Aqui apenas serão indicadas as informações relevantes a pesquisa.

Os modelos avaliados foram DELTAX G80/2 mm TECCO G65/.2 mm, TECCO G65/3mm, TECCO G65/4mm. Estas malhas são constituídas pelo entrelace de arames de aço de diâmetro variando entre 2 e 4 mm, sendo que o aço apresenta uma resistência nominal de 1770 N/mm².

Estas malhas são trançadas sob um formato romboidal, uma malha na forma de losangos, com dimensões x e y, indicadas na Figura 44 de 83/143mm para a malha G65 e 101/175mm para o modelo G80. Nesta configuração, é possível que um círculo seja circunscrito no losango, com 65 mm de diâmetro no modelo G65 e com 80 mm no modelo G80, dimensão que correspondente à nomenclatura dos modelos de tela utilizados.

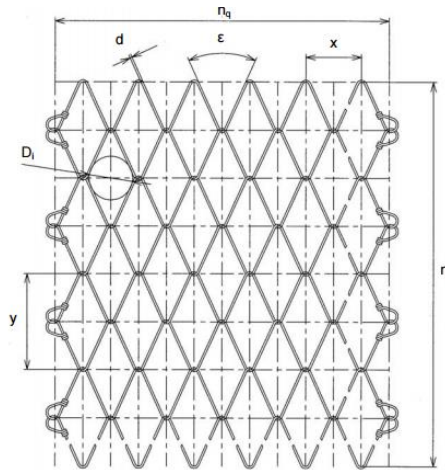


Figura 44: Arranjo das malhas Tecco LGA (2014).

Conforme supracitado as amostras foram especialmente fabricadas para a pesquisa, adequando as dimensões para a correta fixação junto aos pórticos de ensaio, estando as dimensões de cada tipo de amostra apresentadas junto a Tabela 3.

Tabela 3: Dimensões das amostras utilizadas:

Tipo de amostras	Abertura (x, y)	Largura	Altura
DELTA X G80/2mm	101/175 mm	530 mm	600 mm
TECCO G65/2mm	83/143 mm	570 mm	660 mm
TECCO G65/3mm	83/143 mm	570 mm	660 mm
TECCO G65/4mm	83/143 mm	570 mm	660 mm

4.1.2 Placas de fixação

As placas de fixação tem a função de promover a correta aplicação da carga de pré-tensão no sistema de faceamento proposto bem como a correta transmissão dos esforços gerados na malha para o grampo. Este processo se dá através dos pontos de contato existentes entre a placa e a malha metálica utilizada, um contato direto entre os elementos.

Foi utilizada uma placa de fixação padrão, a placa P33, alusão aos seus 33 cm de comprimento, que é instalada transversalmente ao sentido da malha, ou seja, as placas ficam perpendiculares aos losangos que compõem a tela. Nesta posição é possível garantir que a placa possua o maior número de pontos de contato com a tela metálica, 16 pontos ao todo (Figura 45.), configuração que permite uma melhor transferência de carga, Cala *et al.* (2012).



Figura 45: Formato da placa de fixação utilizada. Adaptado de Cala *et al.* (2012)

É de extrema importância elucidar o fato de que o formato da placa bem como suas dimensões exerce um papel fundamental nos ensaios realizados, visto que placa afeta diretamente a maneira com que os elementos interagem, principalmente na transferência de carga da cabeça do grampo para a tela. Devido a esta razão, para fins comparativos, foi utilizado somente um modelo de placa, para garantir que as mesmas condições na análise dos resultados.

4.1.3 Material utilizado como solo nos ensaios em escala real

O material utilizado como solo de preenchimento nos ensaios em escala real varia de acordo com a necessidade do ensaio. Entretanto é comum que nestes ensaios sejam utilizados dois tipos de solos granulares, uma espécie de seixo e um material britado Flum *et al.* (2014).

O seixo, Figura 46 (a), é caracterizado por apresentar partículas com formato predominantemente arredondado, com tamanho variando entre 16-32 mm, que quando lançado na caixa atinge a condição de densidade máxima. Já o material britado, Figura 46 (b), que tem características similares a uma mistura composta por brita e areia, é um material de origem artificial, proveniente do processo de britagem de materiais de reciclagem, com grão variando entre 0-63 mm de diâmetro e forma variada. Este material apresenta um alto intertravamento.

Devido à sua natureza granular os materiais utilizados nestes ensaios não apresentam coesão e efeitos de sucção, de modo que a resistência ao cisalhamento oferecida por estes materiais é inteiramente friccional. Mesmo que em condições reais campo, um talude constituído por seixo rolado ou por materiais britados não sejam encontrados, Flum *et al.* (2014) apontam em seu trabalho que a utilização destes materiais para a execução dos ensaios é válida pelo fato de que a força atuante no sistema e que por eles são simuladas são as mesmas, sendo ela a

força peso do material. A segunda justificativa recai sobre as forças estabilizantes serem reduzidas somente a forças de atrito, simplificando a análise do conjunto de resultados.

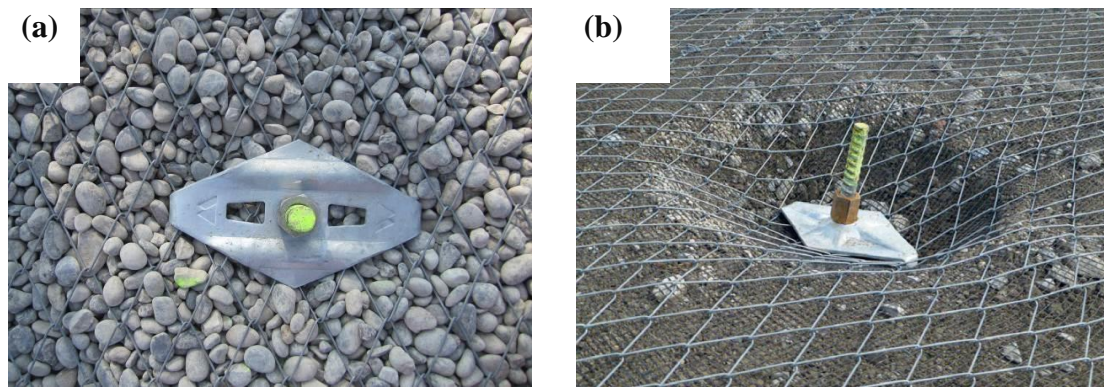


Figura 46: Materiais utilizados nos ensaios em escala real (a) Seixo Flum *et al* (2014) e (b) material britado Geobrug (2012).

Os parâmetros de resistência destes materiais estão apresentados junto ao trabalho de Baraniak e Schawarz (2014), e foram estimados com base na medição das inclinações das pilhas, o ângulo de repouso das mesmas. Estes podem ser visualizados junto Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros característicos dos materiais

Material	φ (graus)	c (kN/m ²)	γ (kN/m ³)
Seixo arredondado 16 – 32 mm	33	0	20
Areia Britada 0 – 63 mm	38	0	21

4.2 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS

Para a realização dos ensaios foram utilizadas as diretrizes apresentadas nas pesquisas utilizadas como base no desenvolvimento do trabalho, a fim de reproduzir as condições de campo e garantir a repetibilidade dos resultados obtidos nos ensaios. Além das diretrizes apresentadas, foram realizados pré-testes, a fim de avaliar as condições dos ensaios com os equipamentos desenvolvidos, buscando evidenciar a particularidade de cada um, e promover e mínimos ajustes nas metodologias para garantir os melhores resultados.

4.2.1 Metodologia dos ensaios de tração

Devido à relativa facilidade na montagem do equipamento, clara definição das condições de contorno do ensaio e execução simplificada, julga-se necessário que este ensaio seja realizado com o intuito de classificar as malhas metálicas. Este ensaio também fornece um parâmetro que é utilizado para o dimensionamento das soluções de faceamento em telas de acordo com uma das metodologias apresentadas anteriormente.

A grande repetibilidade de ensaio proporciona uma padronização da classificação das malhas, sendo assim possível avaliar diferentes modelos telas que possuam diferentes arranjos de fios e diferentes materiais constituintes Roduner (2011).

O ensaio se inicia com a instalação da tela a ser ensaiada no pórtico, fixando a tela junto às presilhas laterais, que podem ser ajustadas em função das dimensões internas da malha que compõem a tela, dentro dos limites apresentados acima para estrutura do pórtico. Uma chapa de madeira foi posicionada junto ao pórtico na direção de um corredor existente no laboratório com a intenção de evitar que no momento da ruptura da tela fragmentos fossem lançados naquela direção, evitando ferimentos as pessoas que por ali circulavam. A configuração ao final da instalação se assemelha a Figura 47.



Figura 47: Esquema de fixação da tela junto ao pórtico de tração. (fonte autor)

A fixação da malha junto ao pórtico é realizada em todas as extremidades da amostra, fixando-a em todos os gomos que compõem a malha. Este procedimento é necessário para garantir que a tela mantenha as suas dimensões durante o ensaio, evitando contrações laterais, e deste modo garantindo que concentrações de carga sejam evitadas devido a deformações no sistema.

Após finalizar a montagem do conjunto é necessário aplicar uma pequena carga, próxima de 4 kN para promover o ajuste do corpo de prova junto ao equipamento. Deste modo é possível realizar pequenos ajustes para garantir as condições necessárias para o ensaio, uniformidade das dimensões da tela e na aplicação de cargas. Nesta fase, a viga superior, fonte de aplicação da carga de tração, era verificada, a fim de garantir a sua horizontalidade, ou seja, a uniformidade da distribuição de carga. Para tanto foi utilizado um nível de bolha, que era posicionado sobre a viga antes de iniciar a aplicação da carga de ensaio, conforme apresentado na Figura 48.



Figura 48: verificação do nível da viga de aplicação de carga. (fonte autor)

Após a finalização da correta montagem, aplicação da carga inicial e verificação da horizontalidade da viga o ensaio pode ser iniciado. Neste caso em particular, o equipamento foi montado de modo que a carga poderia ser aplicada sob uma taxa constante de carregamento (kgf/min) ou velocidade definida (mm/s), sendo esta de escolha do usuário. Entretanto, foi seguido o procedimento apresentado por Roduner (2011), que indica que o ensaio deve ser realizado respeitando uma taxa de deslocamento que varia entre 80 e 90 mm/min. Porém, devido à limitação do equipamento disponível, a taxa de deslocamento utilizada foi de 15 mm/mim.

Juntamente com a prensa, foi fornecido pelo fabricante um programa para operar a prensa, que pode ser instalado em qualquer computador com placa wi-fi, para possibilitar a conexão com o sistema de controle da prensa. Com a prensa conectada, bastou programar o sistema de funcionamento com a taxa de deslocamento desejado. O programa desenvolvido pelo fabricante da prensa também possibilitou acompanhar em tempo real o desenvolvimento do ensaio, além de salvar os resultados, em formato de planilha eletrônica, registrando o tempo, deslocamento e carga durante o ensaio.

Além das cargas aplicadas, foram registrados os deslocamentos ao longo do ensaio, sendo que estes eram medidos internamente, ou seja, através do deslocamento interno do curso da prensa. Deste modo não foram registradas as deformações em pontos específicos da tela, apenas o deslocamento total do sistema ao longo da aplicação da carga.

O equipamento foi previamente calibrado e testado pela equipe que o desenvolveu, sendo garantido por eles a precisão e acurácia nos resultados. As unidades padrão definidas por eles para os resultados foram quilograma-força (kgf) para as cargas e milímetros (mm) para o deslocamento.

4.2.2 Ensaio de Resistência Malha/Placa

Este ensaio tem por objetivo medir a resistência ao cisalhamento da tela metálica no contato com a placa de fixação, frente aos esforços tangenciais que surgem nos grampos superiores quando um corpo de solo instável tende a se movimentar entre dois grampos consecutivos, conforme a indicação da Figura 24, força indicada como Z.

O ensaio é iniciado com a instalação da amostra junto ao pórtico de ensaio, fixando inicialmente a extremidade superior com um elástico, posicionando a amostra de maneira horizontal. A extremidade superior pôde ser fixada somente com um elástico pelo fato de que a reação ao carregamento aplicado se deu na base da amostra, sendo a fixação superior necessária para garantir apenas a posição. Na base, a amostra era fixada por meio de presilhas, mantendo a amostra no local.

Neste ensaio, as laterais não foram fixadas pelo fato de que as deformações laterais da tela não iriam gerar pontos de concentração de tensão durante o ensaio, pois as cargas estavam sendo aplicadas de maneira concentrada no ponto de instalação da placa. Esta configuração é diferente do ensaio de tração, que aplica carga ao longo de todo o comprimento da tela.

Na sequência da preparação do ensaio se dá a montagem do sistema de aplicação de carga e o posicionamento da placa do sistema, sistema apresentado no item que descreve o equipamento. Durante a montagem deste conjunto alguns cuidados foram tomados para garantir que todos os ensaios fossem realizados da maneira mais homogênea possível, sendo possível destacar os seguintes procedimentos:

- A placa foi instalada horizontalmente, de modo que os pontos de contato com a malha metálica correspondessem a losangos no mesmo nível, tendo os mesmos pontos em ambas as extremidades da placa;
- Os cabos de aço foram conectados do sistema de modo a manter a posição mais vertical possível, evitando concentração de tensão em uma das extremidades do sistema;
- O torque aplicado ao sistema (placa/chapa) foi o máximo permitido pelo sistema de aplicação manual, evitando que no contato entre os arames com as placas os arames escapassem durante a aplicação da carga.

Após a finalização da montagem do ensaio, o sistema era ativado, aplicando uma pequena carga, não superior aos 4 kN, apenas para tracionar o sistema a ponto de garantir o correto posicionamento de todos os elementos e a verticalidade nos cabos de aço. Deste modo foi possível realizar os ensaios de maneira uniforme. A Figura 49 apresenta algumas imagens da montagem do ensaio, dando enfoque aos principais pontos acima apresentados.



Figura 49: Principais pontos da montagem do ensaio (fonte: autor)

Após verificar as condições de montagem de ensaio, era dado início ao processo de carregamento do ensaio, sendo que este equipamento também permite o controle por taxa de carregamento e taxa de deslocamento. Entretanto, neste caso foi adotada uma taxa de carregamento constante, visto que neste ensaio esperavam-se deformações maiores e não lineares, devido à construção do equipamento. Por estas razões o controle de carga foi julgado como mais adequado para gerar resultados mais precisos.

Sendo assim, foi definido um carregamento padrão para todas as amostras, sendo a taxa aplicada de 10%/min da carga máxima esperada para cada tipo de amostra. Esta decisão foi tomada para evitar que um carregamento rápido gerasse erros na interpretação dos resultados,

e possibilitar o tempo necessário para a deformação da amostra para se adequar a carga aplicada, buscando evitar pontos de concentração de tensão.

O mesmo sistema de controle e aquisição de dados da prensa de tração foi instalado neste equipamento, sendo conectado ao computador via wi-fi. O carregamento era registrado por meio de células de carga ligadas aos cabos de aço e as deformações medidas junto ao deslocamento interno do motor do equipamento, medindo apenas o deslocamento total. Os resultados eram expressos em quilograma força (kgf) e milímetros (mm).

4.2.3 Ensaio de Puncionamento

A realização deste ensaio não foi possível, em virtude do tempo disponível para o desenvolvimento do trabalho e em complicações na adequação do equipamento disponível para o ensaio. Deste modo, serão apresentados os resultados e procedimentos de ensaio que foram fornecidos pelos laboratórios Alemães LGA, e apresentados nas pesquisas de Roduner (2013) e Cala *et al.* (2012).

Este ensaio tem por objetivo determinar a resistência da tela de aço frente aos esforços de puncionamento que surgem no sistema de faceamento quando uma camada de solo instável tende a se desprender do talude, criando um esforço que tende a empurrar a tela de aço contra a placa de fixação. Cabe lembrar que o valor da resistência ao puncionamento é extremamente dependente do modelo de placa que é utilizado, pois o formato e tamanho afetam diretamente as forças de contato e comportamento do sistema.

A resistência ao puncionamento de uma dada tela metálica no contato com o grampo pode ser determinada com base na diferença observada entre a resistência ao puncionamento do solo sem o revestimento metálico com a resistência ao puncionamento do conjunto solo + tela metálica. Sendo assim é necessário realizar dois ensaios para determinar o parâmetro.

O conjunto de ensaio é constituído por uma caixa metálica que é preenchida com solo, um grampo, uma barra metálica que dá reação ao sistema, e um macaco hidráulico que aplica as cargas no sistema, sendo a sua constante de calibração 1,66 kN/bar de pressão aplicada. Sobre o solo, e instalada o no eixo do grampo, existe a placa de fixação do sistema, cujo modelo é definido em função do ensaio desejado.

O ensaio tem início com a investigação do puncionamento do solo, sem o revestimento metálico desejado. Deste modo instala-se a placa de fixação junto grampo, e a carga é aplicada ao conjunto até o ponto onde é observada a ruptura por cisalhamento do material utilizado como solo no ensaio. Ao mesmo tempo em que é medida a carga são registradas os deslocamentos observadas.

A camada de solo do ensaio é recomposta, com o mesmo grau de compactação, e procedimento é repetido, de maneira idêntica, só que utilizando agora o faceamento da tela metálica investigado, que é simplesmente lançado sobre a superfície do material. A malha introduz resistências laterais, que surgem por atrito, condição que permite que cargas maiores sejam atingidas para as mesmas deformações. A Figura 50 apresenta a configuração do ensaio com e sem tela sobre o material a ser ensaiado.

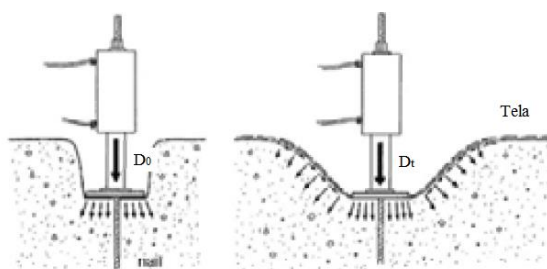


Figura 50: Diferenças entre os ensaios com e sem a tela Cala *et al.* (2012).

O valor da resistência ao puncionamento das telas é expresso pela diferença algébrica entre as cargas registradas no ensaio no momento da ruptura por cisalhamento do solo nas duas condições, com o revestimento metálico e sem o mesmo.

O material utilizado como solo de enchimento corresponde a uma agregado grosseiro, um material granular, com partículas de dimensões variando entre 0-32 mm. A caixa metálica foi preenchida lançando o material em três camadas, sendo que cada uma destas camadas foi compactada utilizando um compactador vibratório. Este procedimento foi repetido em todas as situações, considerando a caixa preenchida somente com solo e utilizando a tela metálica, para os diferentes modelos.

Um ponto que deve ser elucidado diz respeito ao grau de compactação do material, que exerce um papel importantíssimo na realização do ensaio, de modo que os valores máximos das cargas obtidas nos ensaios são diretamente proporcionais ao grau de compactação do solo, sendo recomendado que em ambas as situações o material seja compactado de maneira

similar, atingindo o mesmo grau de compactação, minimizando o efeito desta variável nos resultados. Os autores recomendam que o material apresente uma densidade de aproximadamente 22 kN/m³, densidade padrão dos ensaios realizados nos estudos anteriores apresentados nos relatórios fornecidos pelo LGA.

5 APRESENTAÇÃO DA ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os resultados apresentados para os ensaios de tração foram obtidos por meio da realização de ensaios utilizando a prensa de tração adaptada para esta pesquisa. A prensa fica localizada nas instalações do IME, Instituto Militar de Engenharia. Foram realizados ensaios utilizando apenas três modelos de telas, sendo eles: G80/2 mm, G65/2 mm e G65/3 mm. O modelo mais robusto de tela, o modelo com arame de aço de 4 mm não foi ensaiado devido a capacidade estrutural do pórtico, que não apresentava resistência suficiente para romper a amostra..

Logo, para os modelos ensaiados, foi realizada uma bateria de ensaios, verificando a resistência a tração de um conjunto de amostras para cada um dos modelos de tela investigados. Ressalta-se que foram realizados alguns ensaios de caráter preliminar, cujo objetivo era verificar as principais condicionantes de ensaio, estas referentes à montagem e a programação da prensa. Os resultados destes ensaios foram excluídos da dissertação, pelo fato de que o procedimento executivo não seguiu o padrão correto pré-estabelecido.

A tabela Tabela 5 sumariza a distribuição das amostras nos ensaios realizados, sendo que os resultados dos mesmos estão apresentados a seguir, juntamente com comentários sobre os mesmo.

Tabela 5: Número de amostras por ensaio realizado

Amostra	Ensaio de tração	Ensaio de resistência no contato malha/palca
Tecco G80/2mm	7	5
Tecco G65/2mm	7	4
Tecco G65/3mm	5	5
Tecco G65/4mm	--	2

5.1.1 Malha metálica modelo TECCO G65/2 mm

Para este modelo de malha metálica foram ensaiadas sete amostras diferentes, com o objetivo de verificar a repetibilidade dos resultados obtidos, tendo as amostras uma dimensão de 0,66 m de largura e 0,57 m de altura.

A resistência características destas malhas é expressa internacionalmente apresentando o valor da resistência a tração por metro linear, porém as amostras ensaiadas apresentam uma

dimensão de 0,66 m, em função das limitações nas dimensões existentes no pórtico de ensaio desenvolvido para a pesquisa. Logo, para padronizar os resultados, os valores encontrados durante o ensaio foram corrigidos pela relação existente entre a dimensão da amostra e a unidade métrica, estando os resultados apresentados na Figura 51, que traz o gráfico de carga x deslocamento.

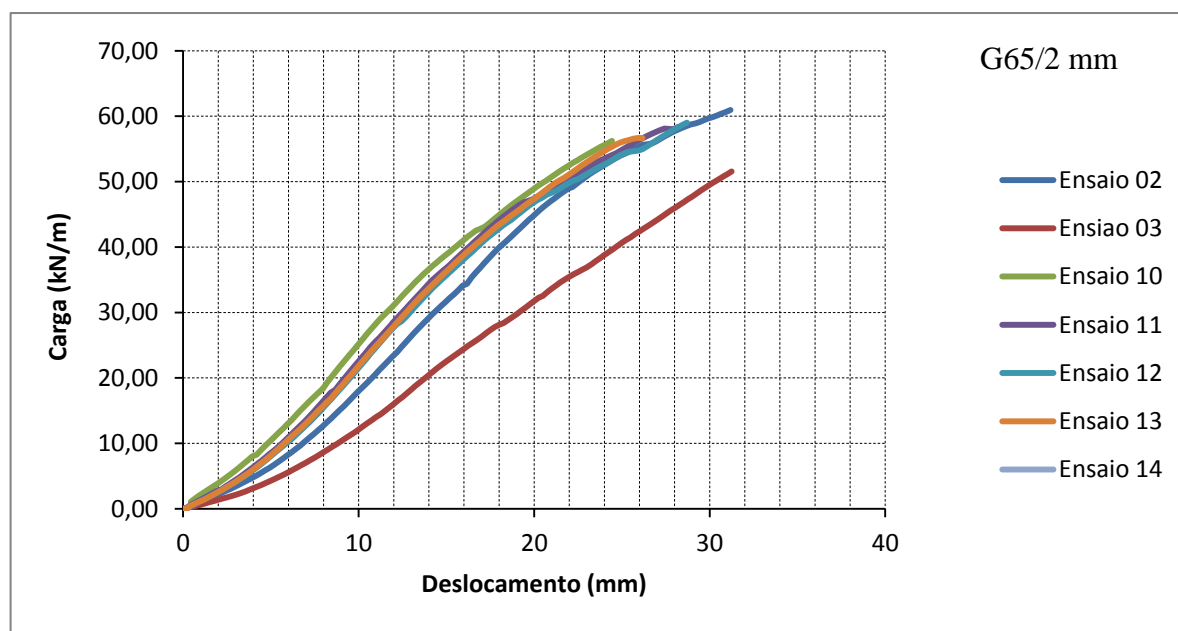


Figura 51: Resultados dos ensaios de tração G65/2 mm

Durante a realização do ensaio número 3, propositalmente, a amostra foi fixada sem que o procedimento de ensaio pré-estabelecido fosse seguido corretamente, a fim de avaliar o impacto nos resultados do ensaio. Neste ensaio, não foi verificada a horizontalidade da viga e não foi aplicada a carga de pré-tensão, deixando que o sistema se ajustasse livremente, tendo como consequência uma rotação na viga superior e concentração de carga em uma das extremidades da amostra, rompendo a malha com uma carga total aplicada menor.

Desconsiderando então os resultados do ensaio número 3, observamos que os resultados obtidos apresentam um comportamento consistente frente ao esforço de tração, tendo todas as curvas um formato e valor máximo similares. Para este modelo de malha metálica as curvas obtidas obedecem a um regime elástico de deformação, tendo um comportamento linearizado ao longo do ensaio, indicando que a tensão atuante nos arames de aço não chega ao limite de escoamento do material até o momento em que se dá a ruptura.

As amostras válidas neste conjunto de ensaio atingiram cargas de ruptura, corrigidas em função da dimensão da amostra, muito próximas às 55 kN por metro, com deslocamentos entre 25 e 30 mm, o que representa uma deformação de aproximadamente 5% no momento da ruptura, em relação altura total da amostra.

5.1.2 Malha metálica modelo DELTAX G80/2 mm

Foram realizados 7 ensaios utilizando este modelo de tela, sendo que a amostra apresentava 0,60 m de largura e 0,53 m de altura. Os resultados obtidos foram multiplicados pela relação existente entre as medidas da amostra e a unidade métrica, garantindo que a resistência seja apresentada por metro linear de amostra. Deste modo, os resultados podem ser expressos através do gráfico apresentado na Figura 52.

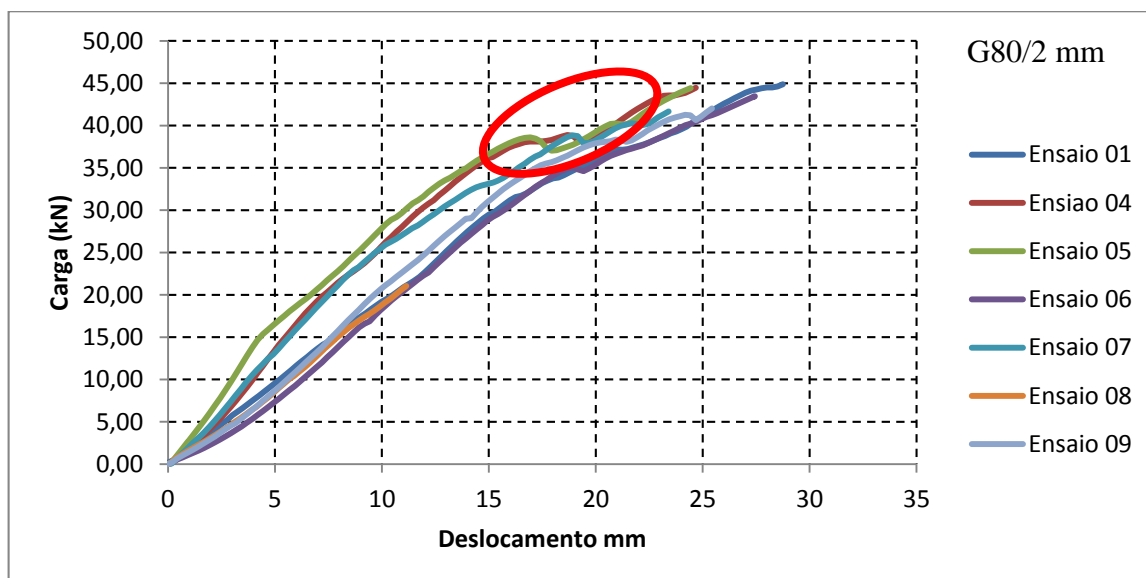


Figura 52: Resultados dos ensaios de tração G80/2 mm

Neste conjunto de amostras o ensaio número 8 não foi realizado até a ruptura pelo fato de que durante a execução do ensaio ocorreu uma queda de energia, paralisando o ensaio. Para evitar possíveis variações nos resultados a amostra foi excluída.

Analisando os resultados é possível verificar dois grupos de curvas, um composto pelos ensaios 04, 05 e 07 e o segundo composto pelos demais ensaios, onde pode ser observado comportamentos levemente diferentes.

No primeiro conjunto, as amostras apresentam um módulo de rigidez um pouco maior do que as demais, representando deslocamentos menores para as mesmas cargas. Também é possível

notar que próximo da ruptura as amostras sofrem deslocamentos sem aumento de carga, formando um pequeno patamar horizontal. Esta condição ocorre pelo fato de que neste ponto os nós dos losangos que compõem esta malha se deslocaram um pouco, rearranjando a estrutura da amostra para a condição de carregamento, região dentro do círculo indicado no gráfico.

Já o segundo conjunto de ensaios (01, 06, 08 e 09) tem um comportamento linearizado, sem pontos de escoamento, semelhante à situação observada para a malha G65/2mm, sem que o patamar seja observado.

Como o comportamento observado se deu de maneira aleatória entre as amostras, e de maneira dividida, infere-se que ele seja devido ao rearranjo das amostras devido ao carregamento, e que este patamar não afeta resistência final das amostras como pode ser verificado no gráfico, onde todas as amostras apresentaram a ruptura com praticamente a mesma carga de tração.

Mesmo com estas diferenças, a carga máxima de ruptura obtida no ensaio foi a mesma para as duas situações, ficando próxima de 45 kN/m, com deslocamentos máximos contidos na faixa de 25 a 30 mm, aproximadamente 5,2% de deformação da amostra.

5.1.3 Malha metálica modelo TECCO G65/3 mm

Para este modelo de malha metálica foram realizados apenas cinco ensaios, com amostras de dimensões 0,66 m de largura por 0,57 de altura. Das sete amostras disponíveis uma foi utilizada como amostra teste, ou seja, utilizada para ajustar o procedimento de ensaio a ser utilizado nas demais situações. A segunda amostra foi excluída das análises porque o carregamento ocorreu de maneira muito rápida, gerando resultados imprecisos.

Para os resultados considerados válidos, foi adotado o mesmo procedimento de correção das cargas para atingir a carga de resistência das amostras por metro, sendo possível verificar os resultados obtidos na Figura 53.

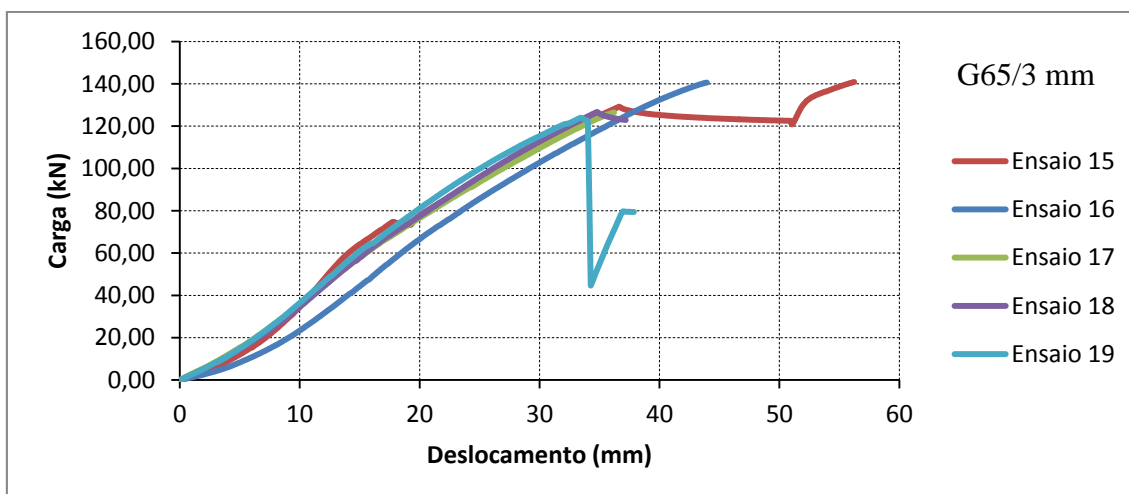


Figura 53: Conjunto de amostras malha G65/3mm

Para este conjunto de amostras os resultados mantiveram o padrão de comportamento das demais, apresentando um comportamento linear e deformação na fase elástica do aço até o momento da ruptura, que foi observada por volta das 140 kN, com um deslocamento máximo de 35mm, representando cerca de 6% de deformação da amostra.

O ensaio de número 15 merece um destaque especial, pois a curva mostra claramente um escoamento no ensaio, representado por dois patamares. Entretanto, o que aconteceu foi o escoamento de um parafuso nas presilhas de fixação, que sofreu uma grande deformação no desenvolvimento deste ensaio (ver foto na Figura 54).



Figura 54: Parafuso que sofreu escoamento durante o ensaio 15.

5.1.4 Comentários gerais sobre os resultados

Durante a realização dos ensaios foi observado uma situação comum a todos os conjuntos de amostra, a ruptura da malha de aço se deu em pontos totalmente aleatórios, tendo sido observadas rupturas no centro da amostra bem como nas quatro extremidades (cantos superiores e inferiores). Esta situação indica que durante os testes não foram gerados pontos preferenciais de falha, o que indicaria a interferência do sistema de montagem do ensaio. A Figura 55 apresenta algumas fotografias das rupturas em diferentes amostras.

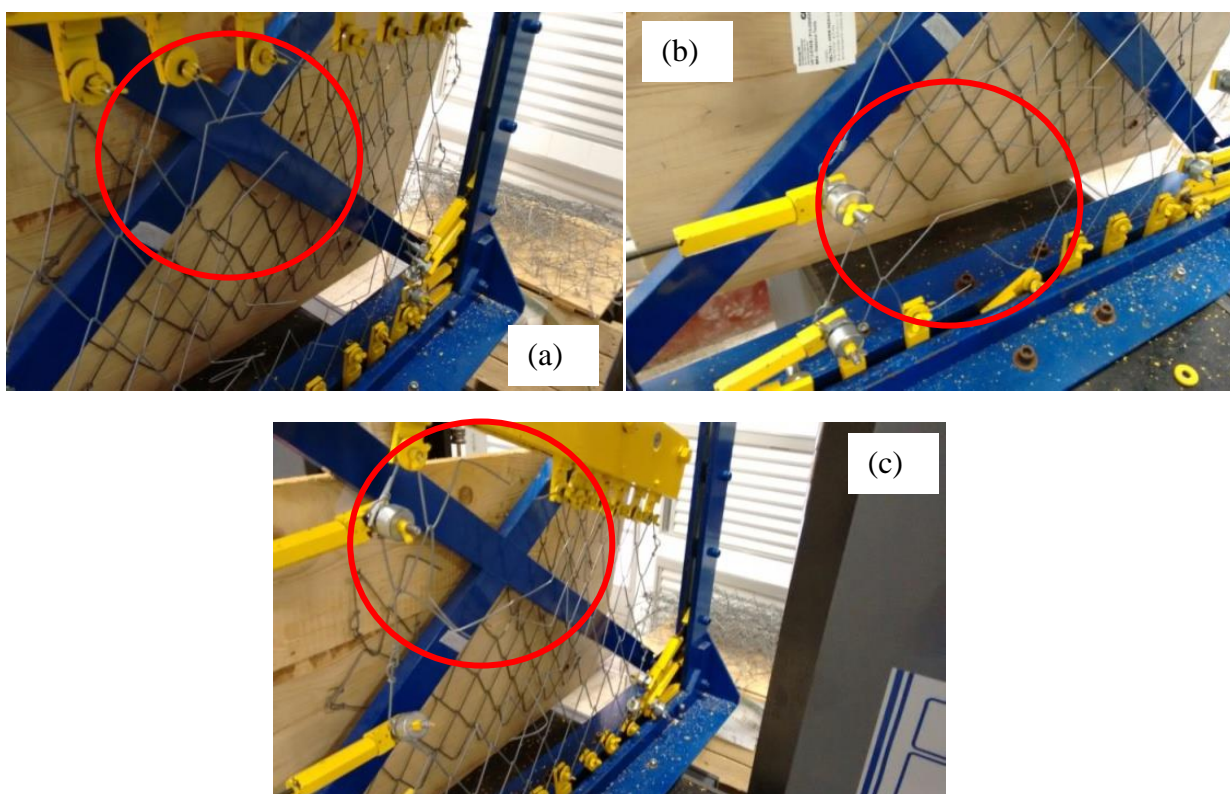


Figura 55: Rupturas observadas nas amostras. (a) ensaio 12 (centro) - (b) ensaio 07 (bordo inferior) - (c) ensaio 17 (bordo superior) (fonte autor)

Os deslocamentos medidos ao longo do desenvolvimento do ensaio foram realizados com base no deslocamento do curso da prensa, ou seja, foram os deslocamentos totais sofridos pelo conjunto pórtico-amostra. Deste modo não é possível separar claramente o deslocamento sofrido pela amostra individualmente, com exceção do caso onde o parafuso sofre uma grande deformação.

A resistência por metro obtida por meio dos ensaios realizados nesta pesquisa é levemente inferior à resistência nominal da malha indicada pela fabricante, que tem como base os

ensaios realizados nos laboratórios alemães da LGA. Os resultados aqui encontrados são em média 10% menores do que os apresentados nos relatórios fornecidos pelo referido laboratório.

Uma das possíveis explicações para esta pequena diferença pode estar associada aos efeitos de escala do experimento, que foi realizado utilizando uma amostra de dimensões menores, o que pode levar a um comportamento de distribuição de carga levemente diferente. Nas amostras utilizadas neste trabalho existe um número menor de pontos de contato entre os arames que constituem a malha, podendo gerar uma concentração de tensão um pouco maior nos nós.

No ensaio original a amostra com um metro de largura tem 14 pontos de contato em uma linha da malha, enquanto que na amostra aqui utilizada existem apenas 9 pontos de contato na mesma linha, no sentido longitudinal. Sendo assim, no ensaio apresentado em LGA (2014) para a amostra G65/3 mm, foi registrada uma carga de 11 kN por nó, enquanto que para o ensaio 15, por exemplo, foi registrada uma carga de 15 kN, diferença que pode justificar a diferença na carga de pico registrada.

A segunda possível explicação reside na própria construção do equipamento, que neste caso utiliza um cabo individual de aço que traciona a tela através da viga superior. Mesmo que perfeitamente nivelado no início do ensaio, foi verificado que a viga superior sofria leves rotações durante a execução do ensaio, situação que pode gerar uma pequena diferença nas cargas aplicadas levando a um acúmulo de tensão em uma das extremidades da amostra.

A terceira e última hipótese que pode explicar esta pequena diferença pode estar associada ao sistema de fixação da amostra junto ao pórtico. O pórtico utilizado na pesquisa fixa a amostra por meio de presilhas, que utilizam parafusos, borboletas e arruelas para garantir a posição da malha, enquanto que os ensaios europeus a malha é fixada por meio de uma espécie de pino. Deste modo os pontos de fixação da malha permitem uma liberdade maior de movimentação, enquanto que no pórtico desenvolvido para a pesquisa a borboleta e a arruela aplicam um torque na malha, situação que pode dificultar a livre movimentação nesta região, levando a esta pequena diferença. A fotografia apresentada na Figura 56 apresenta o detalhe da fixação do pórtico utilizado.



Figura 56: Detalhe da fixação

5.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO MALHA/PLACA

Este ensaio foi realizado utilizando todos os modelos de tela investigados na pesquisa. A carga máxima aplicada ao sistema foi de 3 toneladas, em função da resistência estrutural do equipamento fabricado, que foi projetado para atender uma série de exigências quanto ao peso da estrutura, visto que foi desenvolvido um equipamento portátil.

É necessário fazer um comentário pertinente a todos os modelos de malha de aço investigados, sendo este referente à dimensão das amostras, que foram fabricadas com as especificações do pórtico da prensa de tração, apresentando as mesmas dimensões das amostras indicadas nos ensaios de tração.

5.2.1 Malha TECCO G65/2mm

Este tipo de malha foi a primeira a ser ensaiada, por esta razão das cinco amostras disponíveis para avaliação a primeira foi descartada em função de ter sido o ensaio teste, onde foram verificadas as principais questões de montagem e ajuste do procedimento de ensaio. Logo, serão apresentados apenas 4 resultados, que foram considerados válidos.

Os dados coletados correspondem ao carregamento da malha em função do deslocamento observado, que corresponde ao deslocamento do curso do motor, uma medida externa à

malha. Os resultados destes ensaios podem ser visualizados no gráfico apresentado junto à Figura 57.

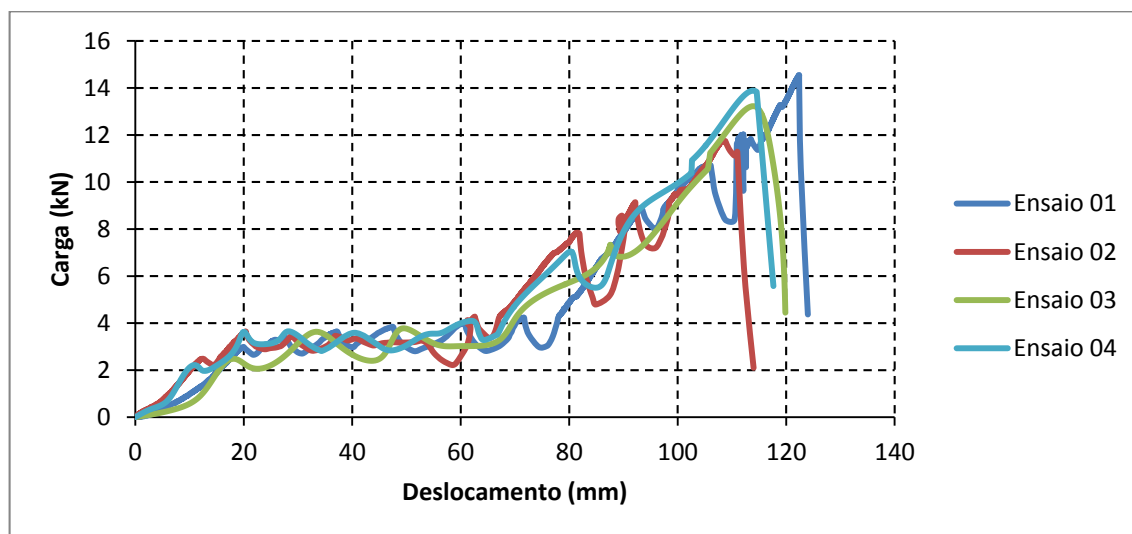


Figura 57: Resistência ao cisalhamento da malha no contato malha/placa.

Observando o gráfico é possível observar uma consistência entre os resultados, tendo todas as curvas obtidas um formato bastante similar. Todos os resultados mostraram 3 fases bem marcadas: a) um comportamento inicial de carregamento até cerca de 20mm de deslocamento; b) um patamar semelhante a um escoamento, com cargas mais ou menos constantes, até a um deslocamento de 60mm e c) um novo carregamento mais ou menos linear até a ruptura. Esta malha apresentou uma carga de ruptura média de 14 kN, com um deslocamento total médio de 110 mm.

5.2.2 Malha DELTAX G80/2mm

Este conjunto de ensaios foi realizado utilizando 5 amostras do modelo malha de aço de alta resistência. Estas amostras seguiram o mesmo procedimento de ensaio descrito anteriormente, estando os resultados representados graficamente na Figura 58.

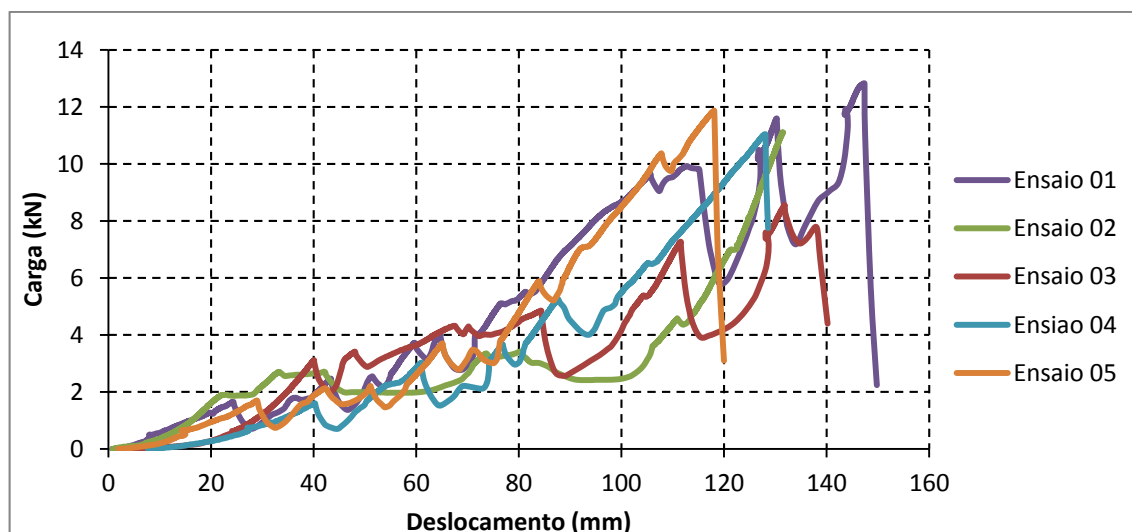


Figura 58: Resultados obtidos para modelo G80/2mm

Este conjunto de amostras apresenta uma resistência ao cisalhamento do contato malha/placa de aproximadamente 12 kN, com um deslocamento médio de 120 mm, sendo que todas as amostras verificadas apresentaram cargas similares mas com uma considerável dispersão nos valores de deslocamento.

Também é possível verificar o mesmo padrão de comportamento, um pequeno trecho “linear” no início do ensaio seguido por um patamar de escoamento, onde os fios deslizam nos pontos de contato com a malha. Ao cessar o processo de movimentação relativa dos fios da malha a carga o deslocamento volta a ter um comportamento “linearizado”.

5.2.3 Malha TECCO 65/3mm

Para as 5 amostras ensaiadas neste conjunto, foi necessário realizar um pequeno ajuste na programação do equipamento. O ensaio número 1, foi realizado até a carga máxima de 2,50 toneladas, valor correspondente a um máximo estabelecido pela programação do equipamento. Ao verificar esta situação, a configuração do equipamento foi ajustada, e a carga máxima redefinida foi de aproximadamente 30 kN correspondente ao valor máximo resistido pelo pórtico dimensionado. Os resultados deste conjunto de amostras podem ser verificados no gráfico apresentado na Figura 59.

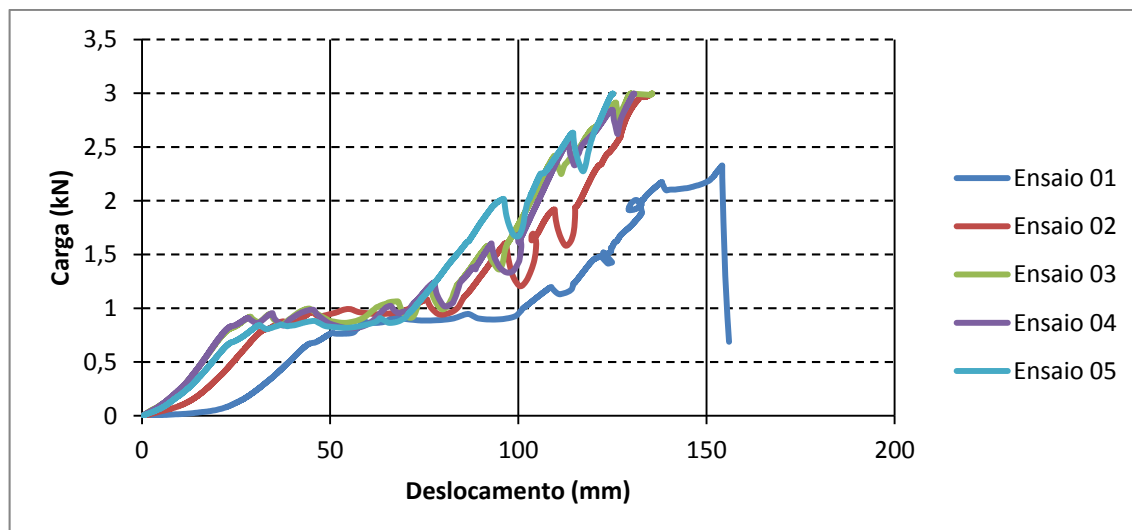


Figura 59: Resultados para o conjunto de amostras da malha G65/3mm

Todas as amostras atingiram a carga máxima definida (3,0 ton ~ 30 kN) sem ruptura, apenas sofreram um rearranjo em sua estrutura para compensar a carga aplicada, mantendo a integridade estrutural ao longo do ensaio.

A curva do ensaio 01 apresenta uma queda acentuada na carga aplicada devido à programação inicial do ensaio que previa um máximo de 25 kN. Portanto, a amostra não foi rompida e sim o ensaio interrompido.

Não foi possível determinar qual a real carga de ruptura deste conjunto de amostras, apenas é possível afirmar com certeza que a resistência da malha supera os 30 kN no contato com a placa de fixação.

Neste caso, as amostras quando atingiram cerca de 10 kN sofreram um rearranjo das amostras, ponto no qual os fios se deslocam nos nós, até o ponto em que atingem uma nova estabilidade e o sistema volta a ser carregado, comportamento similar as demais malhas.

5.2.4 Malha TECCO 65/4mm

De todas as amostras ensaiadas esta é a mais resistente de todas, pois é constituída de um arame de aço de 4 mm de espessura, ou seja, é esperado que este conjunto de amostras apresente uma rigidez e resistência bastante elevadas. Sendo assim a carga de ruptura esperada para este modelo supera os 30 kN, valor limite do equipamento, razão que justificou que apenas duas amostras fossem ensaiadas, com o objetivo de verificar o comportamento das amostras no intervalo de carga disponível. Os resultados obtidos para este conjunto de

amostras foram plotados na Figura 60, de maneira similar aos anteriores, lembrando que o deslocamento apresentado consiste no deslocamento total do conjunto (malha de aço e os elementos do equipamento).

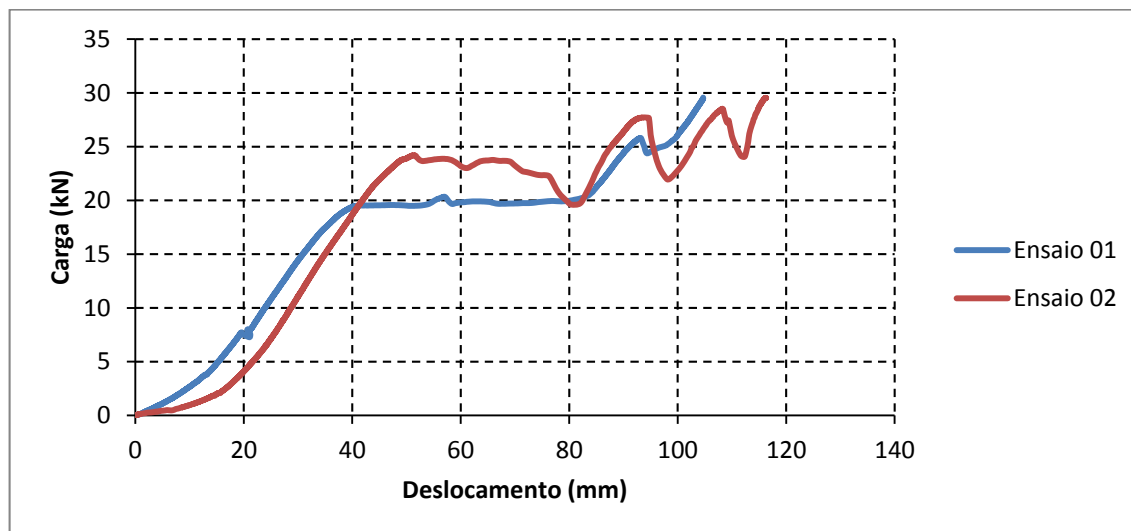


Figura 60: Gráfico carga x deslocamento malha G65/4 mm

Novamente neste conjunto de ensaios foi observado o crescimento de carga com o deslocamento de forma “linear” até a carga de 20-25 kN, a partir da qual houve um escoamento até que o deslocamento chegasse a 80mm. A partir daí iniciou um novo crescimento da carga até que o limite do equipamento fosse atingido. Como era esperado, os ensaios apresentaram uma rigidez inicial mais elevada.

5.2.5 Comentários sobre os resultados

Os resultados obtidos com estes ensaios vão de encontro à especificação do produto apresentada pelo fabricante para as malhas G65/2 mm e G80/2 mm. Para a amostra de 3 mm, as 30 kN atingidas como carga máxima do ensaio, corresponde ao valor de resistência especificado. Quanto à malha com 4 mm de espessura não é possível afirmar qual o valor de resistência do ensaio, pois a resistência especificada é de 5 tf, valor bastante superior à carga aplicada.

As curvas dos ensaios tem um formato semelhante, apresentando comportamentos carga x deslocamentos mais ou menos lineares (um comportamento elástico) e comportamentos de escoamento (plástico). O comportamento referido como sendo elástico foi observado ao longo do ensaio no momento em que a malha não sofreu rearranjo estrutural, enquanto que todos os

trechos onde existem deformações, aqui referidas como plásticas ocorre um rearranjo estrutural da malha.

O rearranjo estrutural da malha pode ser explicado pelo fato de que os principais pontos de contato entre a malha e a placa se dão nas arestas da placa de fixação, como pode ser observado na Figura 49, onde ocorre uma concentração das tensões, provocando um deslizamento relativo dos arames, observado nos pontos de contato entre si, sem que um acréscimo de carga seja aplicado. Este comportamento foi observado em todos os ensaios realizados, tendo ocorrido em diferentes níveis de carregamento para cada amostra. A Figura 61 apresenta o detalhe do deslocamento entre os arames no ponto referido.



Figura 61: Detalhe do deslizamento dos arames nos pontos de contato.

As irregularidades e patamares observados nas curvas de carga x deslocamentos apresentadas acima são justificadas por esta deformação da tela, sendo que quando um novo arranjo ficava estabilizado, a malha assumia o comportamento “linear” novamente.

5.3 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO PUNCIONAMENTO

Os resultados aqui apresentados para estes ensaios foram cedidos pela Geobruigg, tendo em vista a falta de tempo hábil para a montagem do equipamento necessário para a realização dos mesmos. Estes ensaios foram realizados por um laboratório independente sediado na Alemanha, o laboratório de ensaio de materiais LGA Bautechnik GmbH.

Os ensaios de puncionamento que foram considerados nesta dissertação de mestrado correspondem aos ensaios realizados utilizando a placa de fixação modelo P33, pois este modelo foi o mesmo utilizado nos ensaios anteriores, excluindo esta variável das análises subsequentes.

5.3.1 Resultados do ensaio de puncionamento sem a tela metálica

Este ensaio foi realizado uma única vez, visto que seus resultados podem ser aplicados a todas aos modelos de tela investigado, considerando que no ensaio onde a tela metálica é inserida no arranjo é utilizado o mesmo material de enchimento da caixa, lançado sob as mesmas condições de compactação. Sendo assim a Figura 62 apresenta uma fotografia da configuração do equipamento utilizado para a realização do ensaio de puncionamento do solo utilizado na análise dos diferentes modelos de tela considerados na pesquisa.



Figura 62: Arranjo da execução dos ensaios de puncionamento no solo fonte LGA (2014)

Após finalizar a montagem do esquema foi possível realizar o carregamento do solo, sendo que a carga foi aplicada até o momento em que foi observada a ruptura do substrato, o material de enchimento. Neste ensaio o momento da ruptura se deu quando a carga aplicada pelo macaco hidráulico foi de aproximadamente 190 kN, tendo sido registrado um deslocamento máximo de 290 mm. Com os dados coletados durante a execução do ensaio foi possível traçar uma curva carga x deslocamento, considerando a utilização da placa P33. Esta curva está apresentada abaixo, na forma de gráfico (Figura 63) sendo que esta foi construída com base nos resultados apresentados nos relatórios de ensaios fornecidos pela LGA.

As curvas apresentadas não apresentam o momento claro da ruptura, e pelo fato de que estas não foram geradas na presente pesquisa é assumido que a ruptura foi definida com base na observação do ensaio e que os dados após a ruptura foram excluídos das curvas.

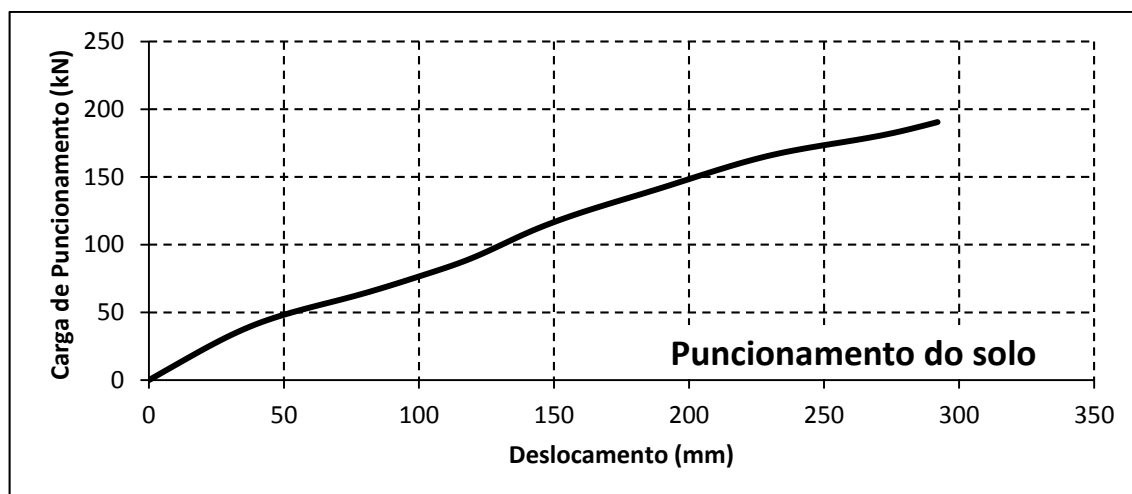


Figura 63: Curva carga x deslocamento ensaio de punção em solo LGA (2014)

5.3.2 Resultados dos ensaios de punção com a tela metálica

Para os modelos de amostras G65/2mm, G65/3mm e G65/4mm este ensaio foi realizado, seguindo o mesmo procedimento de montagem e instalação do conjunto de ensaio. Cada um dos modelos investigados foi instalado sobre a caixa metálica preenchida com solo, sendo fixado nas extremidades apenas com o intuito de evitar o deslocamento da tela, ou seja, a fixação teve por função apenas manter a amostras no local correto de ensaio. O conjunto final pronto para o ensaio pode ser visualizado junto da Figura 64, que apresenta a tela G65/3 mm pronta para ser ensaiada.

Não foram disponibilizados os resultados dos ensaios de punção do modelo de malha de aço DELTAX G80/2 mm, por esta razão estes não foram apresentados juntamente com os demais.

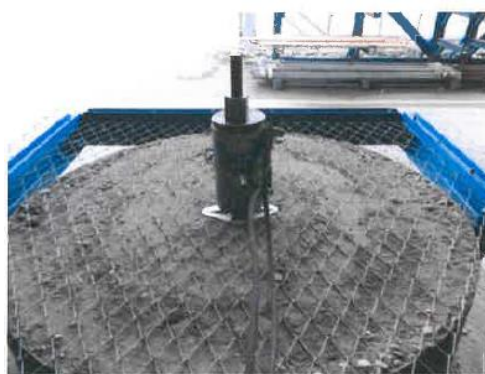


Figura 64: Montagem do ensaio de punção solo + tela LGA (2014).

O mesmo procedimento de coleta de dados foi seguido, sendo que foram realizados dois ensaios para cada modelo de tela. As curvas geradas a partir destes ensaios estão compiladas juntas na Figura 65(a, b e c) que também apresenta a curva do puncionamento do solo (fins comparativos).

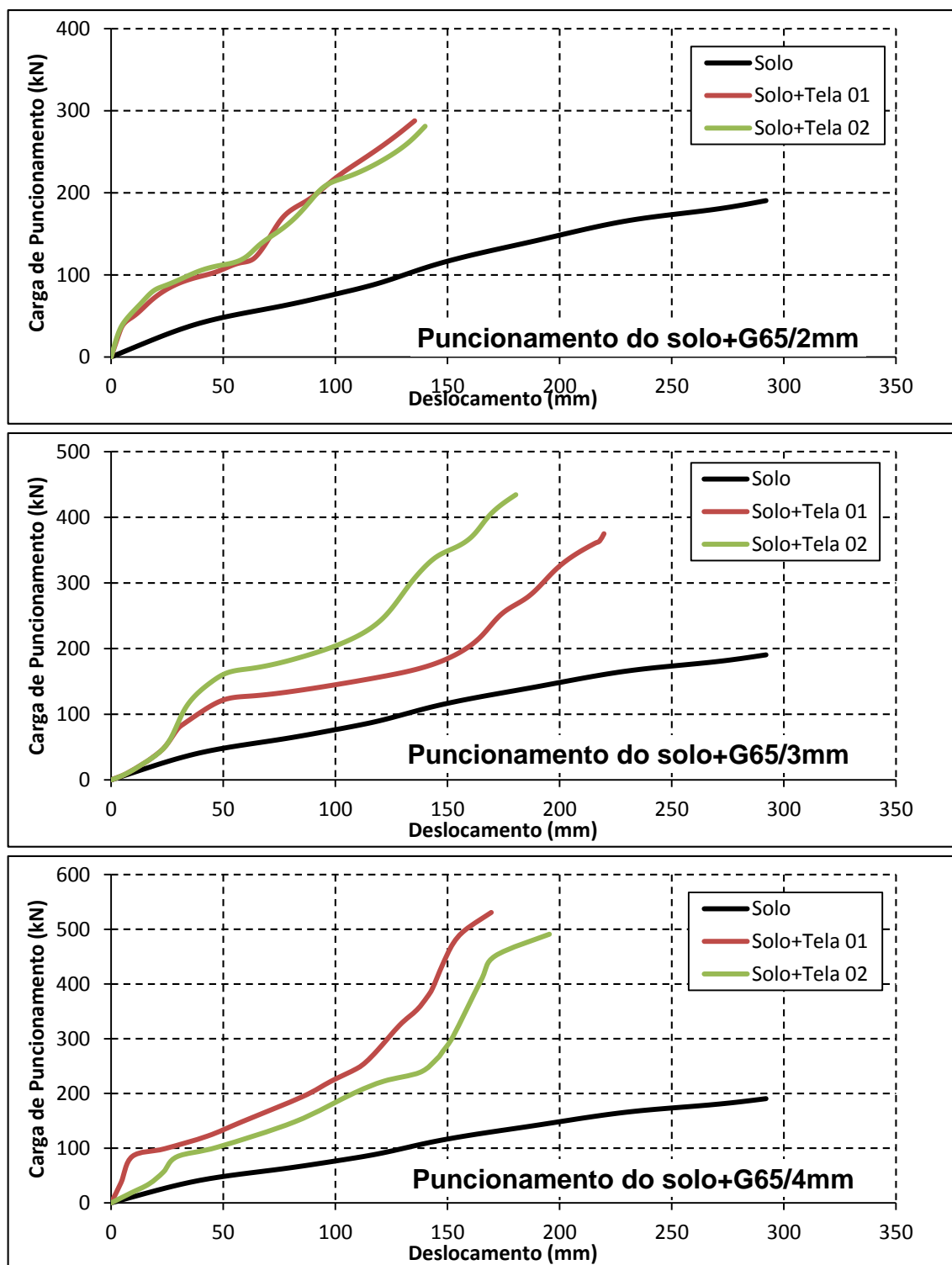


Figura 65: Conjunto de resultados dos ensaios de puncionamento malha+solo LGA (2014)

Com a introdução da tela no sistema de ensaio, fica claro o ganho de resistência ao puncionamento do conjunto, sendo possível verificar que quanto mais espesso é o arame utilizado na tela metálica maior é o ganho, indicando que as malhas com arame mais espesso apresentam uma rigidez maior. As cargas e os deslocamentos registrados no momento da ruptura dos ensaios realizados estão sumarizados na Tabela 6.

Tabela 6: Resumo dos resultados de puncionamento do conjunto solo + malha

Amostra	Ensaio 01 (mm x kN)	Ensaio 02 (mm x kN)	Média (mm x kN)
G65/2mm	135 x 290	140 x 284	137,5 x 287
G65/3mm	220 x 375	180 x 438	200 x 406,5
G65/4mm	170 x 539	195 x 498	182,5 x 518,5

(a tabela apresenta os valores do deslocamento x carga no momento da ruptura, sendo o deslocamento em mm e a carga em kN) LGA (2014)

A resistência ao puncionamento de cada uma das telas pode ser determinada com a simples diferença algébrica entre os resultados dos ensaios que foram realizados com a tela+solo e os ensaios realizados somente com o solo. Seguindo este procedimento, a resistência ao puncionamento das malhas, Pr , está apresentada junto a Tabela 7, sendo que estas cargas correspondem à resistência considerando a área total da placa, sendo necessário reduzir pela metade este valor para verificar o dimensionamento frente ao esforço de puncionamento que surge quando o corpo de solo tende a se deslocar, solicitando o grampo inferior (ver o item 2.2.2.5).

Tabela 7: Resistência ao puncionamento das malhas

Amostra	Pr Ensaio 01 (kN)	Pr Ensaio 02 (kN)	Pr Médio (kN)	Pr de cálculo (kN)
G65/2mm	99	93	96	80
G65/3mm	184	247	215	180
G65/4mm	348	307	327,5	280

A resistência ao puncionamento considerada no cálculo é inferior à resistência obtida no ensaio, introduzido um fator de segurança de 1,2 no elemento. Este procedimento é indicado por Cala *et al.* (2012), que também indica que a resistência ao puncionamento deve ser reduzida pela metade quando o esforço atua somente em uma das metades da placa de fixação.

5.4 ENSAIOS EM ESCALA REAL

Os ensaios em escala real disponibilizados foram realizados em um campo de testes localizado na cidade de Winterthur, um município da Suíça, pela equipe da Universidade de Ciências Aplicadas de Berna e a equipe da Geobruigg. Estes foram responsáveis pelo planejamento e execução dos mesmos, que cordialmente forneceram os resultados para serem analisados na presente pesquisa. Foi possível acompanhar a realização de dois destes ensaios *in loco*, onde foi realizada uma verificação de todos os principais elementos, auxiliando na compreensão do ensaio.

Foram disponibilizados os resultados de um conjunto de ensaios que contemplou o uso dos dois tipos de materiais de enchimento acima especificados, os diferentes modelos de malha de aço investigados na pesquisa e diferentes modelos de placa de fixação. Todavia, dos resultados cedidos foram considerados apenas aqueles pertinentes à pesquisa, que envolvem os modelos de malha e placa de fixação aqui investigados, malhas G80/ 2 mm, G65/2 mm, G65 3/mm, G65/4 mm e a placa de fixação modelo P33.

5.4.1 Deformação do sistema – escaneamento a laser

Com o escaneamento a laser foi possível verificar a deformação do sistema de faceamento ao longo do desenvolvimento do ensaio, ou seja, para cada um dos intervalos de inclinação onde foram realizadas as leituras com este equipamento.

O objetivo destas leituras era definir o formato do sistema para as condições de carregamento aplicadas ao faceamento, verificando como a movimentação do material de enchimento ocorreria em relação à condição idealizada. A Figura 66 apresenta algumas das leituras realizadas, indicando a deformada para (a) tela G65/2 mm com 55° e (b) tela G65/3 mm com 60° de inclinação, com grampos espaçados em $a=b=3,00$ m, placa P33 e o material classificado como seixo.

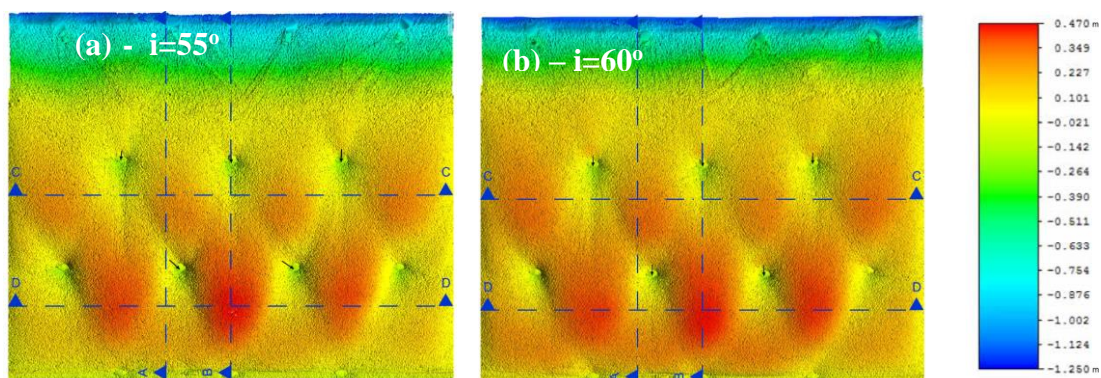


Figura 66: Leituras com o escâner laser do ensaio de em escala real para os modelos de malhas (a) G65/2 e (b) G65/3 mm Baraniak e Schwarz (2014).

Observando a figura é possível verificar que o formato da deformada de ambas as malhas são semelhantes, mostrando claramente que o material de enchimento sofre um deslocamento quando a caixa é inclinada, deslizando na região superior, região de cor azul, e se acumulando entre os grampos, região de cor vermelha. Também é possível verificar que mesmo com uma diferença de 5 graus de inclinação, a magnitude dos deslocamentos é similar, indicando que a espessura do arame, nestes modelos de malha metálica, exerce um papel importante na rigidez do sistema.

Adicionalmente é possível verificar que a hipótese admitida no método de dimensionamento Ruvolum que sob a placa de fixação existe uma porção de solo estabilizada, pela ação da carga de pré-tensão do sistema, é confirmada. Nas proximidades da placa do sistema a coloração da superfície tem tons verdes e amarelos, indicando pela escala apresentada, que a movimentação de material neste ponto mínima, Figura 67. Devido à estabilização de parte do material entre os grampos, para que alcançar os esforços máximos que o sistema de faceamento é capaz de absorver são necessários espaçamentos um pouco maiores, condição que gera economia, reduzindo o comprimento total de perfuração e de barras.

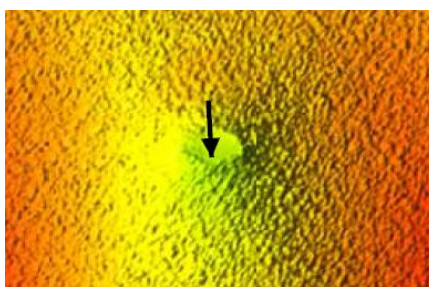


Figura 67: Detalhe da porção de solo estabilizada

O último comentário a cerca dos resultados é referente à distribuição das cargas pelo sistema de faceamento, sendo possível afirmar que as cargas se distribuem entre os grampos no mesmo formato de losango, um diamante, sendo possível observar junto da Figura 68 uma representação desta condição. Na figura é verificado que na região indicada pelas setas a deformação é menor, se concentrando no espaço entre os grampos.

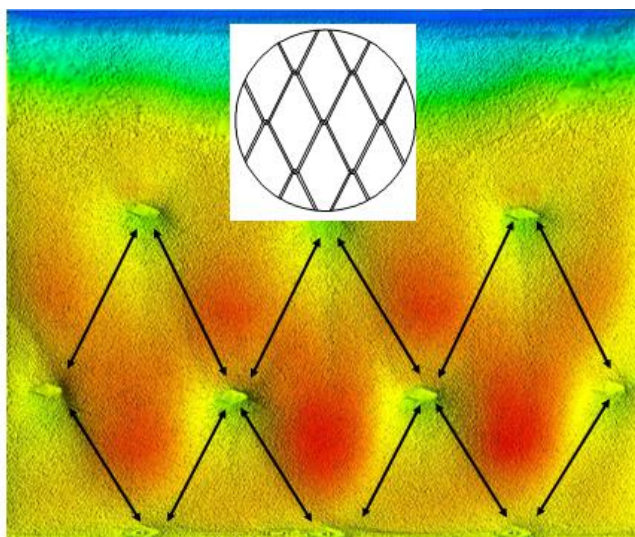


Figura 68: Distribuição das cargas

Cabe apontar que a distribuição dos grampos colabora para este efeito, entretanto tem um papel secundário. Esta constatação é baseada em ensaios similares realizados utilizando malhas metálicas com diferentes formatos e mesma distribuição de grampos. Abaixo, na Figura 69, está apresentado uma figura com um ensaio utilizando uma tela de aço com aberturas quadradas e grampos sob uma distribuição em losango, indicando que a malha exerce papel fundamental na distribuição de cargas.

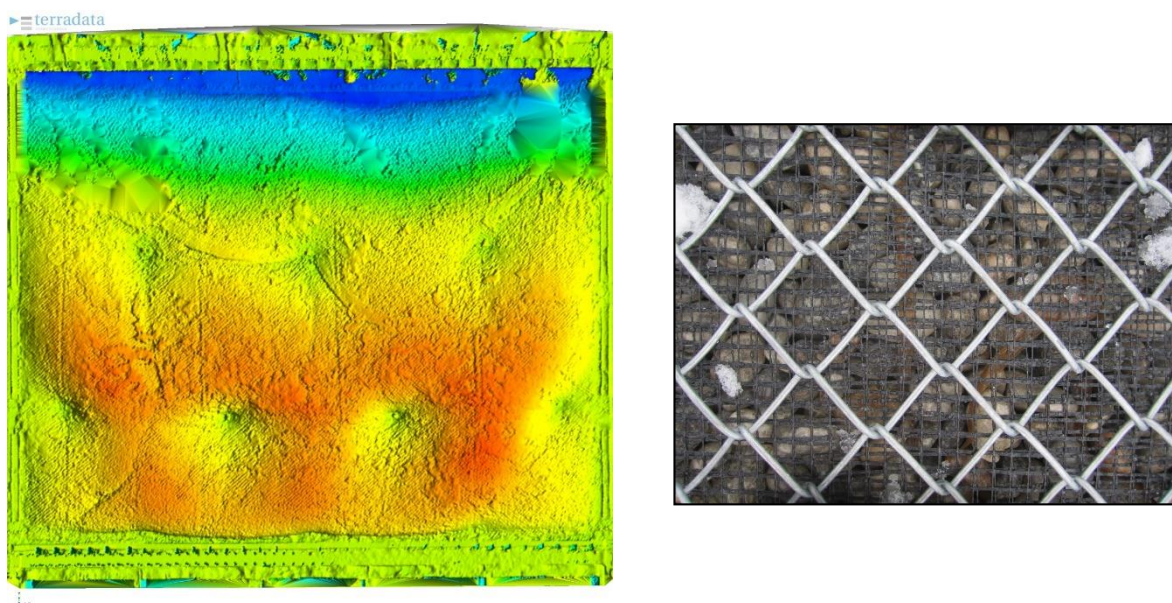


Figura 69: Deformações para uma tela de malha quadrada, Geobruigg (2014)

5.4.2 Cargas atuantes

Os ensaios foram conduzidos inclinando a estrutura do ensaio até que fosse observada a ruptura do sistema de faceamento testado ou que a inclinação máxima fosse atingida (85°). Durante o processo foram registradas, em alguns dos chumbadores (os que foram previamente instrumentados com os *strain gauges*), as cargas atuantes na cabeça dos grampos, a carga de puncionamento e a carga no contato malha/placa. A seguir, serão apresentados os dados coletados e a interpretação dos mesmos para somente um dos ensaios realizados, contemplando apenas os dados referentes às cargas atuantes nos grampos, informação de interesse da pesquisa. Os demais resultados estão apresentados, de maneira sumarizada junto à Tabela 8, sendo que eles foram obtidos seguindo o mesmo procedimento abaixo apresentado.

Os resultados do experimento que será apresentado a seguir foram obtidos utilizando como sistema de faceamento a malha TECCO G65/3 mm, associada a grampos do tipo GEWI 32 e placas P33, distribuídos sob um espaçamento de 3,0 x 3,0 m dentro da caixa, que foi totalmente preenchida com o material classificado como seixo rolado (16-32mm). No dia em que o ensaio foi realizado não havia registro de precipitação, entretanto não é possível afirmar

que o material estava totalmente seco, pois um dia antes do ensaio choveu e não foi realizado um controle de umidade.

Pelo fato de ser um material granular com poros de grandes dimensões, o volume de água acumulada da precipitação do dia anterior dentro do conjunto de ensaio foi gradualmente drenada na medida em que a inclinação era conferida ao sistema, não tendo um papel fundamental nos resultados.

Entretanto é plausível imaginar que parte desta água tenha sido absorvida pelos microporos das partículas do material utilizado, gerando um incremento no peso total atuante no sistema. Para a análise subsequente dos resultados este efeito foi desconsiderado, pois apenas uma pequena porção do material foi submersa, criando um pequeno efeito de incremento de carga.

O procedimento de ensaio foi seguido inclinando a caixa gradualmente em intervalos de 5 graus para as leituras com o escâner laser, até o momento em que foi observada a ruptura, com uma inclinação de 73°. Neste experimento foi verificado que o material de enchimento da caixa iniciou a sua movimentação quando a inclinação do conjunto foi de 41° graus, lembrando que o material apresenta um $\phi=33^\circ$. A posição da ruptura do sistema de faceamento ocorreu junto ao grampo instrumentado GI 3, indicado na Figura 70, na inclinação de 73°.

Na estrutura do ensaio foi instalada toda a instrumentação apresentada no capítulo 3.1, incluindo a instalação três conjuntos de *strain gauges* em três grampos, utilizados para a medição das cargas nestes elementos. A Figura 70 apresenta a planta baixa da estrutura de ensaio, indicando posição onde os grampos instrumentados (GI 1, GI 2 e GI 3) foram locados.

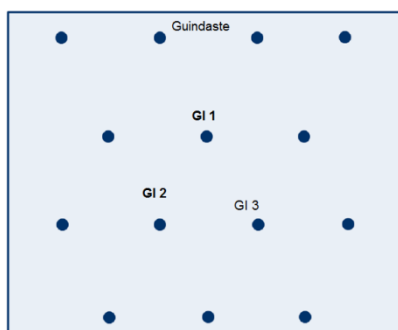


Figura 70: Grampos instrumentados Baraniak e Schwarz (2014).

Com esta configuração foi possível medir as cargas de puncionamento atuantes nos grampos inferiores e a carga de cisalhamento no grampo superior para cada uma das condições de inclinação que foram conferidas ao conjunto de ensaio e no momento da ruptura do sistema.

5.4.2.1 Carga de puncionamento

A carga de puncionamento surge no ensaio quando o material de enchimento se desloca, fazendo com que a malha de aço se mova em direção à placa de fixação, no sentido de dentro para fora. Este movimento gera um carregamento no conjunto grampo/malha/placa, que pode ser definido como um esforço de tração para o grampo e um esforço de puncionamento da malha contra a placa.

Deste modo, como foram registradas as cargas de tração atuantes na cabeça dos grampos instrumentados, foi considerado que o esforço de tração medido corresponde à carga de puncionamento no contato da malha com a placa. Na Figura 71 estão apresentadas as cargas de tração medidas para a cabeça dos grampos.

Entretanto ressalta-se que podem existir pequenas diferenças entre a carga real atuante neste ponto e os valores aqui apresentados, em função da posição de instalação dos *strain gauges* ser levemente afastada do ponto de contato entre placa e grampo.

Analisando os resultados é possível notar que até aproximadamente os 41° a carga considerada como puncionamento fica constante, assumindo até magnitudes levemente negativas. Este comportamento está associado à resistência interna do material a o incremento desta oferecida pelo faceamento e a pré-tensão aplicada as barras, ou seja, até o ponto onde o material começa a deslizar a tela não é carregada, sofrendo grandes incrementos de carga na medida em que o material desliza, até o ponto de ruptura ,73°, no grampo GI 3 com uma carga total aproximada de 60 kN. O máximo valor registrado para a tensão no grampo ocorre no grampo GI 02, com um valor de aproximadamente 80 kN.

Os valores negativos registrados, e associados à carga de pré-tensão aplicadas, são observadas imediatamente após o início de movimentação do material, sofrendo um incremento gradual até a carga de ruptura. Neste curto intervalo de tempo, a movimentação inicial do material faz com que placa perca o contato, sendo então registrada a carga de pré-tensão do sistema. No gráfico que relaciona carga e tempo existem patamares onde o carregamento é constante, sendo estes os pontos onde o ensaio foi paralisado para realização das leituras laser, mantendo

a inclinação constante. Neste ponto cabe lembrar que os ensaios são realizados de maneira bastante lenta, de maneira a evitar efeitos dinâmicos.

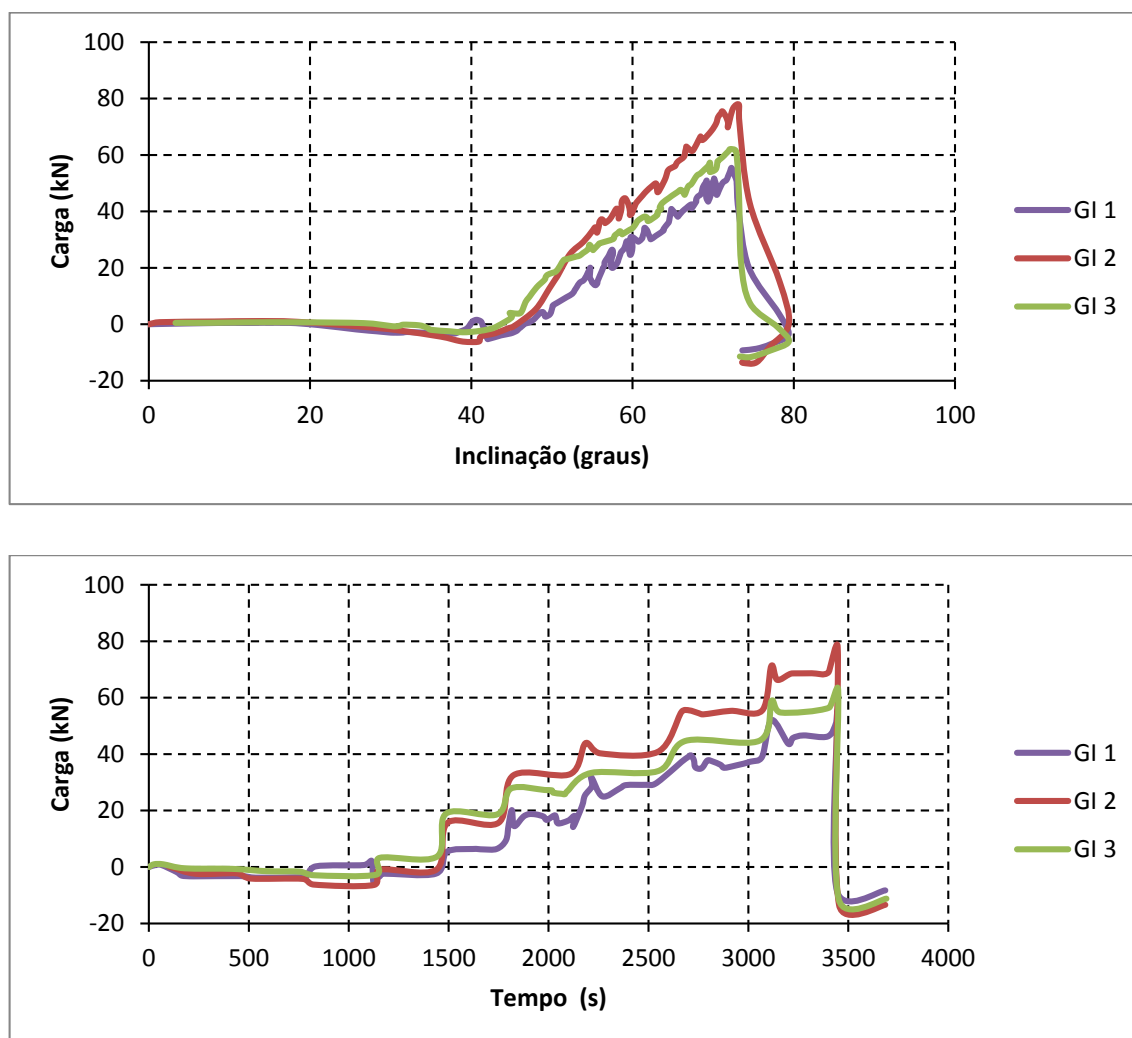


Figura 71: Esforço de punção. Adaptado de Baraniak e Schawarz (2014).

5.4.2.2 Flexão vertical nos grampos

Este esforço é oriundo da flexão do grampo, no sentido vertical, que ocorre quando a massa de solo se desloca, solicitando então o contato existente entre a placa e malha do faceamento. Esta medição foi realizada por meio do registro do esforço de flexão que atua no grampo por meio dos *strain gauges* instalados tanto base e na cabeça do elemento.

De maneira análoga, a tensão na barra devido à flexão medida no grampo foi considerada como sendo o a carga de cisalhamento que atua no ponto de contato malha/placa, também

sendo uma simplificação da realidade. O gráfico que apresenta o esforço de flexão no grampo, tanto na base quanto na cabeça está apresentado na Figura 72.

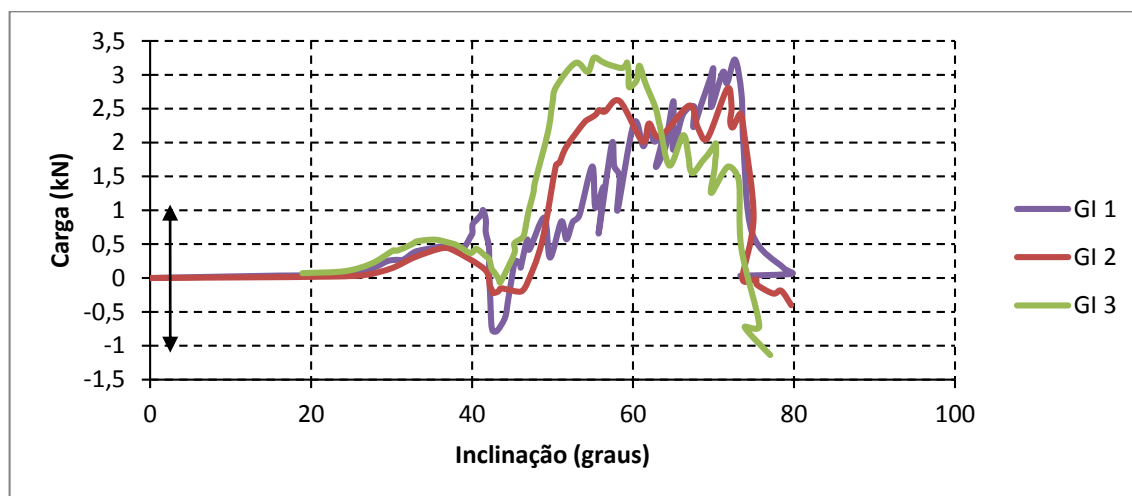


Figura 72: Carga atuante no grampo que causa a flexão, Adaptado Baraniak e Schawarz (2014).

No gráfico apresentado o incremento de carga no sentido positivo do eixo indica que houve uma flexão do grampo no sentido superior da estrutura do ensaio, enquanto que a flexão no grampo em direção sentido da base da estrutura é representada por cargas negativas, conforme as setas indicativas no gráfico.

Neste gráfico também é possível observar que até aproximadamente os 40° de inclinação do sistema, as cargas de flexão são constantes e praticamente nulas. Esta condição é explicada pelo fato de que até este ponto a resistência da brita associada ao faceamento ainda é maior do que o peso do material, ou seja, até os 40° o talude está estável.

Após este intervalo de inclinação é possível verificar, através das curvas apresentadas no gráfico, que os grampos começam a sofrer flexão em ambos os sentidos, para cima e para baixo. Esta situação ocorre devido ao processo de inclinação da estrutura de ensaio, que faz com que a massa de material os desloque para baixo, carregando os grampos neste sentido, promovendo então a flexão negativa. A carga no sentido positivo é registrada quando a malha “puxa” os grampos para cima quando esta entra em carga sob a ação da massa de solo.

Também pode ser observado que os grampos inferiores, GI 2 e GI 3 apresentam um comportamento semelhante até a inclinação aproximada de 60 graus, quando o GI 3 começa a sofrer flexão negativa enquanto que o GI 2 se desloca para cima. Esta condição indica que a

massa de solo se movimenta de maneira assimétrica dentro da estrutura de ensaio, tendo um volume deslocado maior na região acima do GI 3, hipótese corroborada pelo fato de que a ruptura do faceamento foi observada neste grampo.

Este comportamento indica que o sistema de faceamento trabalha como um todo, absorvendo as cargas da massa instável e distribuindo os esforços ao longo de toda a superfície tratada com a solução aplicada até que o limite de resistência de algum dos elementos seja alcançado, momento no qual se dá a ruptura.

O comportamento observado na base os grampos é diferente do observado na cabeça dos grampos, sendo que estes apresentaram uma carga constante até inclinação atingir a marca dos 20°, ponto no qual a massa de solo passa a carregar a base dos grampos. A partir daí a carga de que atua na base dos grampos cresce rapidamente, fletindo todos os grampos instrumentados da mesma maneira, no sentido negativo que corresponde ao deslocamento da massa de solo, até atingir um valor máximo de 5 kN. Os sinais elétricos dos dispositivos de medição da região da base no grampo apresentaram uma falha e não foram capturados pelo sistema de aquisição de dados utilizado para inclinações superiores a 40°. A falha registrada é associada a capacidade de medição dos *strain gauges* utilizados, que tiveram seu limite superior ultrapassado durante a execução do ensaio.

5.4.2.3 Resumo dos resultados

No relatório fornecido pela Universidade de Berma, Baraniak *et al.* (2014), está apresentado que todos os ensaios realizados utilizando as malhas de aço e o material de enchimento considerados na presente pesquisa sofrem uma ruptura no sistema de faceamento.

Os resultados para os ensaios apresentados na Tabela 8 foram obtidos através da mesma interpretação acima apresentada, e correspondem aos ensaios onde os chumbadores do sistema foram ensaiados. Na tabela são apresentados os valores registrados para as ações atuantes no sistema, tanto no momento da ruptura do faceamento (rup.) ou as cargas máximas que foram registradas durante o ensaio (máx). Os resultados apresentados consistem nos dados referentes aos experimentos realizando utilizando as malhas investigadas na presente pesquisa em conjunto com a placa de fixação P33, a mesma utilizada no ensaio realizado. Também cabe apontar que os resultados apresentados foram medidos para o grampo onde foi observada a ruptura.

Convém lembrar que o sinal positivo e negativo indicado para as cargas de cisalhamento da Tabela 8 representa apenas a direção da movimentação do grampo ao longo do ensaio e que as cargas indicadas foram registradas para o mesmo grampo.

Tabela 8: Resumo dos resultados. Adaptado de Baraniak *et al.* (2014)

Ensaio	Malha	a=b (m)	Material utilizado	Carga P (puncionamento) (kN)	Carga Z (cisalhamento) (KN)	Inclinação (graus)
1	G65/4	3,5 x 3,5	Areia 0-63 mm	80 máx	12 rup.	83
2	G80/2	3,5 x 3,5	Seixo 16-32 mm	35 rup.	-6 máx.	56
3	G65/2	3,5 x 3,5	Seixo 16-32 mm	30 rup.	3 máx.	56
4	G65/3	3,0 x 3,0	Areia 0-63 mm	80 rup.	12 máx	84
5	G65/2	3,0 x 3,0	Areia 0-63 mm	40 rup.	8 rup.	63
6*	G65/3	3,0 x 3,0	Seixo 16-32 mm	80 rup.	3 máx	73
7	G65/2	3,0 x 3,0	Seixo 16-32 mm	40 rup.	6 máx	57

*ensaio descrito anteriormente

Os resultados mostram, como já era esperado, que quanto mais resistente o material que compõem o talude maiores são nos ângulos alcançados pela inclinação do sistema. Condição evidenciada ao analisarmos os ensaios 5 e 7, cuja única diferença é o material, sendo possível verificar uma diferença de quase 30⁰ na inclinação final. Também é possível destacar as cargas medidas, que são muito próximas, função da convergência no peso específico dos dois materiais.

Também ao analisarmos uma mesma condição de espaçamento e tipo de material, ensaios 6 e 7, com um modelo de tela de aço diferente, é possível verificar que o ângulo máximo de ensaio passe de apenas 57^o no experimento 7 para cerca de 73^o no experimento 6, indicando que é fundamental conhecer os parâmetros de resistência do material.

6 AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTO

Utilizando as metodologias de cálculo apresentadas no item 2.2.2.5, foi realizada uma série de análises objetivando definir se os métodos desenvolvidos especificamente para este propósito são capazes de expressar resultados condizentes com a realidade, situação aqui representada pelos dados obtidos através da execução de ensaios em escala real.

Para tanto foram considerados nos cálculo analíticos os mesmos parâmetros de resistência dos materiais de enchimento utilizados nos ensaios em escala real, bem como os dados obtidos na pesquisa por meio do ensaio de tração da malha e do ensaio de cisalhamento no contato malha/placa.

A escolha dos dois métodos apresentados se deu em função da especificidade destes para o dimensionamento de sistemas de faceamento com malhas metálicas, tendo sido desenvolvidos especialmente para este propósito.

Por fim uma análise paramétrica foi desenvolvida, onde foram investigados os efeitos da variação nos parâmetros de resistência e comportamento do solo, a fim de verificar a sua influência sobre os resultados do dimensionamento.

6.1 MODELO DE CÁLCULO RUVOLUM

A verificação deste método de dimensionamento foi realizada utilizando todas as equações e hipóteses apresentadas, considerando no cálculo os parâmetros dos materiais definidos por meio dos ensaios realizados. Sendo assim, foram analisadas todas as condições estudadas nos ensaios em escala real, introduzindo no cálculo as variáveis de cada um dos experimentos realizados.

Na sequência será apresentado o procedimento seguido em todas as análises realizadas, sendo apenas apresentada a verificação para o ensaio número 6, sendo que o mesmo procedimento se aplica aos demais, tendo como diferença apenas as variáveis e parâmetros de cálculo.

6.1.1 Verificação das instabilidades paralelas à superfície

O ensaio analisado, o ensaio 6, foi realizado utilizando um espaçamento entre os grampos de $a=b=3,0$ metros, sendo a caixa preenchida com o seixo arredondado, cuja peso específico é de

20 kN/m³, tendo um ângulo de atrito $\phi=33^\circ$. A malha utilizada neste ensaio foi a malha TECCO G65/3mm, enquanto que os grampos são do tipo GEWI 32 (T=206 kN)

O primeiro passo da análise é calcular o esforço de cisalhamento que atua no grampo. Para tanto foi necessário calcular a força peso da massa de solo, volume de material contido entre os grampos e definir a tensão de pré-tensionamento, que é definida pelo projetista, e aqui considerada como sendo 30 kN. Os chumbadores são executados perpendiculares à caixa de solo, ou seja, o ângulo formado entre as barras e a horizontal é complementar à inclinação da estrutura de ensaio. Foram considerados coeficientes de segurança unitários, a fim de comparar com o ensaio em escala real, no momento da ruptura.

Então, utilizando os princípios apresentados no item 2.2.2.5 é possível determinar o esforço de cisalhamento que atua nos grampos do sistema para a condição específica da análise, e proceder com as verificações necessárias para garantir a segurança do dimensionamento, estando os valores considerados no cálculo e resultados apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Cálculo do esforço de cisalhamento.

Dados de entrada	Esforços Calculados (kN)	Verificações
$\alpha: 73^\circ$	Força Peso (G): 216	$Sd < \frac{Sr}{Fs} = 146 < \frac{232}{1,0} \rightarrow OK$ (grampo)
$\phi: 33^\circ$	Esforço Cisalhante (S): 146	$Vd < \frac{Tr}{Fs} = 30 < \frac{402}{1,0} \rightarrow OK$ (grampo)
$c: 0 \text{ kN/m}^3$	Res. ao cisalhamento (Sr): 232	$Vd < \frac{Pr}{Fs} = 30 < \frac{180}{1,0} \rightarrow OK$ (tela)
$\gamma: 20 \text{ kN/m}^3$	Res. à tração (Tr): 402	$\left[\left(\frac{Vd}{Fs} \right)^2 + \left(\frac{Sd}{Fs} \right)^2 \right]^{0,5} \leq 1,0$
$a=b=3,00 \text{ metros}$	Res. ao puncionamento (Pr) 180	
$t=1,20 \text{ metros}$		$0,63 \leq 1,0 \rightarrow ok$
FS global = 1,0		
Fs parcial=1,0		

De acordo com os resultados do cálculo analítico acima apresentado é possível concluir que a solução proposta (diâmetro, espaçamento e modelo de malha) está segura quanto a instabilidades paralelas a superfície do talude, modelo de ruptura investigado.

O cálculo também indica que a carga de cisalhamento que atua no grampo é muito maior do que a carga de tração, sendo primeira oriunda da massa de solo instável e a segunda da carga de pré-tensionamento. Entretanto esta comparação é válida para o modelo de ruptura superficial apresentado. O mesmo procedimento de cálculo analítico apresentado acima foi realizado considerando as condições dos outros seis ensaios em escala real.

Portanto foi verificado que com os dados de entrada correspondentes aos ensaios 02, 03, 04, 05 e 07 para a máxima inclinação atingida com o ensaio em escala real, dados apresentados na Tabela 8, as cargas estimadas foram menores do que a resistência dos elementos do sistema, ou seja, a ruptura não prevista pelo cálculo, indo de encontro à condição observada nos ensaios. campo.

Para as condições do ensaio 01, o cálculo analítico utilizando o Ruvolum indica que haveria uma ruptura por cisalhamento nos grampos, prevendo uma carga de cisalhamento de aproximadamente 250 kN, enquanto a barra de aço utilizada resiste a 230 kN.

Deste modo, foi verificada qual a inclinação máxima para que com as condições deste ensaio, material e espaçamento, os esforços fossem compatíveis com as resistências dos materiais. Os resultados mostraram que a inclinação máxima admissível para o ensaio 01 seria de 78°, inclinação inferior aos 83° atingidos no ensaio.

Porém ao analisarmos os grampos ao final do ensaio 01 foi observado que os grampos estavam íntegros, entretanto como é possível observar na Figura 73 foi verificado uma grande flexão dos mesmos, indicando que estes foram fortemente solicitados durante o ensaio.



Figura 73: Flexão do grampo na região de ruptura do ensaio 01. Baraniak *et al.* (2014)

Como o solo não apresenta rigidez suficiente para solicitar o grampo ao cisalhamento puro, a barra de aço é fletida, Esta condição gera esforço de tração na barra, e como a resistência a tração é superior a resistência ao corte, o grampo é mantido íntegro no processo. Tal condição pode explicar a divergência entre a previsão e a realidade observada no ensaio.

Com base na comparação entre as previsões e os cálculos é possível afirmar que frente a instabilidades paralelas a superfície do talude, o método de cálculo Ruvolum é capaz de

prever os resultados de maneira satisfatória, e se mostra levemente conservador em suas previsões, condição que vai a favor da segurança em um projeto.

As cargas medidas na base do grampo por meio dos *strain gauges* instalados não foram apresentadas pelo fato de que os dispositivos de medição terem sofrido uma ruptura, para inclinações superiores aos 40° e leituras da ordem de 5 kN, os resultados disponíveis não representavam o carregamento na ruptura.

6.1.2 Verificação das instabilidades entre dois grampos

Os conceitos utilizados para a verificação da estabilidade da solução frente aos esforços de massas instáveis contidas entre dois grampos também foi detalhada no item 2.2.2.5, onde estão apresentados os principais conceitos do método de cálculo. A seguir, será apresentada uma breve descrição do procedimento de cálculo e comentários a cerca dos resultados obtidos.

Inicialmente é necessário definir a espessura crítica da camada instável, visto que nem sempre a espessura total corresponde à condição que gera o carregamento crítico no faceamento. Este procedimento é necessário em função que variando a espessura e o espaçamento entre os grampos o ângulo β também é alterado, mudando a geometria do problema, o plano de falha crítico do solo, e por consequência as cargas atuantes. Logo se faz necessário verificar qual o conjunto (espessura e ângulo) que produz a maior força de puncionamento P atuante sobre a malha, para um dado espaçamento, sendo este o valor de dimensionamento. .

Neste caso, o cálculo resulta em uma carga máxima de $P=81,20$ kN, calculada para a condição onde atuam dois corpos instáveis. A carga prevista se aproxima do máximo valor registrado durante todo o ensaio, que foi de aproximadamente 80 kN, indicando que o modelo é capaz de reproduzir os efeitos de carregamento.

Quanto ao esforço que atua no sentido no contato entre a malha e a placa, a força Z , é necessário apontar que a magnitude desta é definida como variável de entrada do método de calculo, pois esta força surge devido ao atrito existente entre o material de enchimento e a malha de aço, sendo transmitida para a cabeça do grampo, tracionando a malha nesta região.

Deste modo, na condição inicial este valor é assumido como sendo a resistência máxima da amostra corrigida em função de um fator de segurança, definido no método como sendo de

pelo menos 2,0. Portanto, para a amostra considerada o valor da carga Z é de 15 kN, sendo que não foi observada a ruptura causada por este esforço no sistema.

A Tabela 10 apresenta os resultados desta análise para o ensaio 06, indicando as cargas de puncionamento calculadas para os dois modelos de ruptura considerados pelo método Ruvolum.

Tabela 10: Cálculo do esforço de puncionamento

Dados de entrada	Esforços Calculados (kN)
$\alpha: 73^\circ$	Modelo de um corpo instável
$\varphi: 33^\circ$	$t_{\text{crítico}} = 1,08 \text{ m}$
$c: 0 \text{ kN/m}^3$	$\beta = 63,90^\circ$
$\gamma: 20 \text{ kN/m}^3$	$P = 64,42 \text{ kN}$
$a = b = 3,00 \text{ metros}$	Modelo de dois corpos instáveis
$t = 1,20 \text{ metros}$	$t_{\text{crítico}} = 0,96 \text{ m}$
$P_r = 90 \text{ kN}$	$\beta = 58,00^\circ$
	$P = 81,20 \text{ kN}$ – valor de projeto

Em posse dos resultados desta análise, para o caso particular do ensaio 06, o método prevê que o sistema está estável aos 73° , porém muito próximo da ruptura. Ao variarmos a inclinação observamos que a ruptura se dá aos 75° , uma variação muito pequena, indicando uma grande proximidade entre o previsto e o observado.

A investigação de instabilidade entre dois grampos foi realizada para os seis ensaios restantes, sendo possível separar os resultados dos cálculos numéricos em dois grupos com características distintos o Grupo A composto pelos ensaios 01-02-03 e o Grupo B composto por 04-05-06-07. A característica comum a todos os ensaios em cada grupo é o espaçamento dos grampos, sendo de 3,50 m para o Grupo A e de 3,00 m para o Grupo B.

Para os três ensaios do Grupo A a previsão de cálculo é que para a inclinação máxima do ensaio o faceamento sofreria a ruptura nos três casos, como realmente foi observado nos ensaios em escala real realizados. Contudo foi observada uma grande diferença entre as cargas estimadas pelo método Ruvolum e as cargas medidas realmente.

Para o ensaio 01 a carga máxima de puncionamento registrada foi de 80 kN, enquanto que a calculada foi de 143 kN, valor levemente superior aos 140 kN resistidos pela amostra G65/4mm estudada. A carga máxima registrada para os ensaios 02 e 03 foi de 35 e 30 kN,

enquanto que a carga prevista para o sistema foi de 75 kN. Em ambos os casos a previsão de cálculo supera a resistência da malha, enquanto que a medição do ensaio fica muito aquém da carga máxima de funcionamento suportada pelos sistemas.

Mesmo com esta grande diferença entre a estimativa e o medido, o método Ruvolum previu de maneira segura a ruptura do faceamento para a condição de ensaio, mostrando que o método está a favor da segurança.

A razão mais provável para esta grande diferença entre a previsão e a realidade pode estar associada ao grande espaçamento entre os grampos que influencia na transmissão de cargas pelo sistema, pois como será apresentado a seguir para o Grupo B, onde o espaçamento é de 3,0x3,0 as previsões de cálculo ficaram muito próximas da realidade observada em campo.

Para os ensaios de número 04 a carga prevista pelo cálculo foi de 83 kN enquanto que o máximo registrado foi de 80 kN. Os ensaios 05 e 07 registraram a mesma carga de pico 40 kN, tendo uma previsão de 42 kN e de 44 kN respectivamente. Com os grampos espaçados tanto na vertical quanto na horizontal em 3,00 m, os resultados previstos ficam muito próximos dos valores de carregamentos medidos em campo, sustentando a hipótese de que o elevado espaçamento interfere de alguma maneira nas medições.

A carga Z, que é um dado de entrada do método, é função do modelo da amostra ensaiada, e exerce uma influência positiva na análise. Deste modo ao analisarmos os máximos valores medidos nos ensaios em escala real e compararmos com as resistências aqui determinadas por meio dos ensaios (capítulo 5.2), a hipótese de utilizar a resistência máxima reduzida pela metade foi julgada adequada, pois a carga medida como Z ficou muito próxima dos valores medidos em campo.

Como comentário final sobre o método Ruvolum é possível afirmar que para as condições dos ensaios 01,02,03,05 e 07 o método previu corretamente a ruptura do sistema de faceamento, enquanto que para os ensaios 04 e 06 as cargas previstas ficaram levemente abaixo da resistência máxima da malha, indicando que o modelo de dimensionamento é capaz de reproduzir a condição de ruptura. É fundamental levar em conta a utilização de fatores de segurança nas análises em situações reais, para eliminar quaisquer efeitos das incertezas existentes na natureza.

Outro ponto que deve ser levado em conta, e que também é apontado por Baraniak e Schwarz (2014), é que os sistemas não sofrem uma ruptura pela ação de um ou outro esforço isoladamente, e sim pela combinação dos dois, ou seja, a resultante entre eles.

Por fim, o último comentário pertinente é referente à metodologia de medição. Aqui foi considerado que a carga de tração atuante nos grampos é igual a de punção, entretanto podem haver diferenças entre as mesmas, sendo necessário avaliar a fundo esta condição. Porém para a análise aqui realizada estas foram consideradas satisfatórias.

6.2 MÉTODO DE CÁLCULO MACRO 01

Conforme apresentado anteriormente, este método de cálculo foi desenvolvido para ser aplicado a taludes rochosos, sendo que as suas variáveis correspondem a parâmetros de resistência de fraturas rochosas. Portanto, para aplicá-lo à situação dos experimentos realizados, foi necessário considerar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do material de enchimento. O detalhamento do cálculo apresentado corresponde ao ensaio 06, o mesmo utilizado anteriormente.

Outro ponto importante que deve ser apresentado diz respeito ao plano de falha crítico considerado no modelo, que é determinado por meio da avaliação das famílias de fraturas das rochas. Como o material utilizado não apresenta um conjunto de fraturas, nas verificações aqui desenvolvidas foi considerado inicialmente que o ângulo β crítico corresponde ao valor definido na análise anterior, mecanicamente isto deveria resultar nos mesmos esforços obtidos nos ensaios de campo.

6.2.1 Determinação dos esforços

O cálculo da força peso que atua neste sistema é função direta das relações entre os ângulos de inclinação do talude e do plano de falha com espaçamento entre os grampos, sendo necessário verificar em qual hipótese o nosso talude se encontra, ver item 2.2.2.5. Para o caso do ensaio 06 o volume considerado no cálculo corresponde ao volume A, conforme indicado na Tabela 11, condição que representa apenas um corpo prismático instável com um volume $1,21 \text{ m}^3/\text{m}$, o que equivale a $24,1 \text{ kN/m}$.

Tabela 11: Verificação do volume atuante

Dados de entrada	Verificação
$\alpha: 73^\circ$	se
$\varphi: 33^\circ$	$\beta \geq \alpha - \arctan\left(\frac{t}{b}\right)$ e $\beta < \alpha$
$c: 0 \text{ kN/m}^3$	Volume A = 1,21 m ³ /m
$\gamma: 20 \text{ kN/m}^3$	$\beta < \alpha - \arctan\left(\frac{t}{b}\right)$
$a=b=3,00 \text{ metros}$	Volume B – não se aplica
$t=1,20 \text{ metros}$	Volume C – não se aplica
$\beta=58,50^\circ$	

Para os demais ensaios o mesmo procedimento foi realizado estando apresentados apenas os volumes e cargas obtidas para o volume crítico na Tabela 12.

Tabela 12: Cargas atuantes nos ensaios

Ensaio	Volume (m ³ /m)	Carga (kN/m)
01	1,75	36,88
02	1,75	36,88
03	1,75	36,88
04	1,29	25,80
05	1,46	29,24
06	1,21	24,10
07	1,46	29,24

6.2.2 Verificação do sistema de faceamento

Considerando um coeficiente de aceleração sísmico horizontal (Δ) igual a zero e um FS=1,00, e as características do ensaio 06, a carga que atua punctionando a malha, é calculada em função da diferença entre as forças instabilizantes e estabilizantes, Equação 20, Equação 21 e Equação 22. Os cálculos analíticos aqui realizados foram desenvolvidos manualmente e verificados por meio do *software* de cálculo disponibilizado pela empresa Macaferri.

Ao utilizarmos as equações acima citadas é possível calcular, para estas condições, uma carga estabilizante $G_{st}= 20,45 \text{ kN/m}$ e uma força instabilizante $G_{dr}=20,45 \text{ kN/m}$, ou seja, não existe carga de punctionamento atuando no talude para um coeficiente de segurança unitário e coeficiente de aceleração sísmica Δ igual a zero para a condição do ensaio. Entretanto, na Tabela 8, as medições indicam sim que existe um esforço atuante, de 80 kN.

Buscando verificar a influência do ângulo crítico da falha nos resultados o valor de 58° foi alterado, de modo que quanto maior o ângulo das falhas menor é o volume mobilizado e por

consequência a carga. Já no sentido decrescente, o volume instável sofre um incremento, porém a carga que atua no sistema oriunda desta massa é menor. Estes resultados são função da geometria do problema estudado.

Toda via, as cargas de puncionamento obtidas neste procedimento nulas, e como a carga de tração que atua no sistema de faceamento é diretamente dependente da carga de puncionamento, Equação 24, foi verificado que o sistema também não está sofrendo esforços de tração na malha (T), ou seja, o sistema não está sendo mobilizado, de acordo com método de cálculo.

A explicação para esta condição reside na análise do método de dimensionamento em si, com enfoque especial para a Equação 21 e a Equação 22. Ao considerarmos um coeficiente de segurança unitário e o coeficiente de aceleração sísmica igual a 0, as cargas que atuam no sentido de instabilizar o talude sempre serão iguais as cargas que contribuem para a estabilidade do talude. Deste modo é possível concluir que o modelo de cálculo MacRo 1 necessita fundamentalmente da consideração de fatores de segurança (majoração e minoração) em sua análise para que resulte em algum carregamento no sistema.

Esta hipótese vai de encontro ao que é apontado por Macaferri (2014), que indica uma faixa de variação para coeficientes de segurança. Para as forças estabilizantes a faixa de $F_{s_{st}}$ varia entre 1,20~1,43 e para as forças instabilizantes $F_{s_{dr}}$ varia entre 1,10~1,56, sendo possível notar que o mínimo indicado é sempre maior do que 1,00.

Logo, comparar os resultados de ensaios em escala real com os resultados previstos por este modelo é uma tarefa complexa, pois as cargas previstas são extremamente dependentes dos fatores de segurança considerados pelo usuário, sendo estes função das condições do talude observadas em campo. Logo, conclui-se também que adotar este método em um talude real é igualmente complexo e os resultados tendem a ser questionáveis.

Portanto aqui foram considerados os fatores de segurança máximos e mínimos apresentados para determinar as cargas de puncionamento atuantes no sistema. Foram testadas diferentes combinações entre os limites superiores e inferiores para a condição do ensaio 06. Como resultado foram obtidas cargas de puncionamento variando entre 4,23 kN e 13,70 kN, para os limites inferiores e superiores respectivamente. Estes resultados correspondem à 6% e 18% da carga medida na realidade durante o ensaio.

Como indicado pela Equação 24 a carga de tração é calculada em função da carga de puncionamento acima determinada e do deslocamento previsto para o faceamento em função de P . O deslocamento, dl , é definido com base na curva carregamento x deslocamento específica para o modelo de malha investigado, e pode ser definida com base no ensaio apresentado na UNI11437:2012. Como este ensaio não foi desenvolvido na pesquisa uma estimativa grosseira da deformação esperada para a malha foi realizada de maneira analítica.

Para amostra TECCO G65/3mm utilizada no ensaio 06 foi considerada uma deformação máxima de ruptura como sendo de 6%. Esta estimativa está relacionada aos resultados obtidos para o ensaio de tração da malha (T), onde a máxima deformação foi de 6%. Deste modo, pelo ensaio descrito na norma italiana, a decomposição da força de puncionamento gera duas componentes que tracionam a tela.

Deste modo o máximo dl obtido é de 0,18 m (em função do espaçamento de 3,0x3,0), que quando introduzido nas equações do método MACRO 01 define o esforço de tração atuante para verificar a condição de ruptura ou não da tela. Para o limite inferior a carga de tração longitudinal estimada é de $T=54$ kN/m enquanto para o limite superior a tração longitudinal atinge $T=175$ kN/m.

Ao considerarmos a resistência de 140 kN/m da amostra G65/3mm, valor definido com base no ensaio aqui realizado, verificamos que para o limite inferior dos fatores de segurança a previsão do método indica que o talude está seguro, e que para a previsão com os limites superiores o faceamento sofrerá rupturas.

Sendo assim não é possível comparar os resultados em escala real com as previsões de cálculo do modelo, que exige a inserção de fatores de segurança em sua análise, pois deste modo aproximação entre as previsões do modelo de cálculo com a realidade pode ser ajustada com variação dos fatores de segurança dentro dos limites indicados em Macafferri (2014).

6.2.3 Análise paramétrica

Para concluir a avaliação dos métodos de dimensionamento investigados na pesquisa foi realizada uma variação nos parâmetros de entrada necessários para as estimativas, a fim de avaliar a sensibilidade destes modelos frente a diferentes condições de cálculo, e comparar estas análises com os experimentos em escala real. Sendo assim foi definido que os parâmetros investigados seriam o ângulo de atrito, coesão e a espessura da camada instável.

Estes dados foram escolhidos para a análise paramétrica em função de que a determinação da resistência ao cisalhamento em projetos geotécnicos brasileiros nem sempre é realizada de maneira adequada, sendo necessário que em muitos casos os projetistas estimem estes valores ou busquem correlações com as informações disponíveis, sendo eles alvo de grande incerteza.

O procedimento adotado para a realização das análises paramétricas foi o seguinte: em cada caso investigado um dos parâmetros acima definidos foi variável, enquanto que os demais foram mantidos constantes, para uma dada inclinação, modelo de malha metálica, tipo de grampo e espaçamento entre os grampos. Esta metodologia permite verificar quem exerce a maior influência nos resultados. Nesta análise foi considerado somente o método de cálculo Ruvolum, devido ao menor número de incertezas envolvidas.

A faixa de variação dos parâmetros geotécnicos foi definida com base na literatura técnica de resistência ao cisalhamento dos solos, em particular os livros de Lambe e Whitman (1969) e Souza Pinto (2006).

6.2.3.1 Experimento Número 4

Os resultados obtidos através da análise paramétrica estão apresentados na Figura 74, que sumariza graficamente todas as situações consideradas, indicando qual o parâmetro foi alterado em cada análise e a magnitude da variação no esforço de punção da malha e cisalhamento no grampo.

A carga de punção é mais sensível às variações no ângulo de atrito do material do que a carga cisalhante que atua no grampo, sofrendo uma variação máxima de +- 20% dentro da faixa considerada. A ruptura observada entre os intervalos de 38 para 35 graus não é considerada crítica, pois o sistema já trabalhava no limite da resistência do faceamento na condição inicial. Para esta variável, não é esperada uma ruptura por cisalhamento dos grampos em nenhuma das situações observadas.

Já alterando a espessura da camada instável a carga de punção atuante praticamente não se altera, sendo que quando consideradas espessuras maiores ela se mantém constante, pois o ângulo de β já atingiu seu valor limite para o espaçamento entre grampos considerado, sofrendo uma pequena redução quando a espessura é reduzida. Esta situação é observada pois a espessura crítica é definida em função do espaçamento dos grampos, coesão e φ ,

permanecendo a mesma quando aumentamos a espessura da camada, corroborando para a hipótese de que a espessura da caixa de ensaio é suficiente para verificar a malha.

Para a carga de cisalhamento no grampo, a espessura é fundamental, pois ela define o volume de material atuando sobre os grampos, sendo possível notar que pequenas variações, em apenas 0,2 m, geram incrementos da ordem de +- 20% no valor da carga atuante.

Como já era esperado, pequenas variações na coesão geram grande variações nos resultados, função do baixo nível de tensões referentes a camadas de pequena espessura, superfície do talude, sendo então recomendado excluir este parâmetro das análises deste tipo.

Quanto aos demais parâmetros é possível afirmar que variações em até 5 graus no ângulo de atrito do solo e até 0,50 metros na espessura não irão resultar em erros expressivos nas previsões desenvolvidas para as cargas atuantes na malha. Já para a carga de cisalhamento as previsões podem levar a falhas nos grampos, com a faixa de variação descrita.

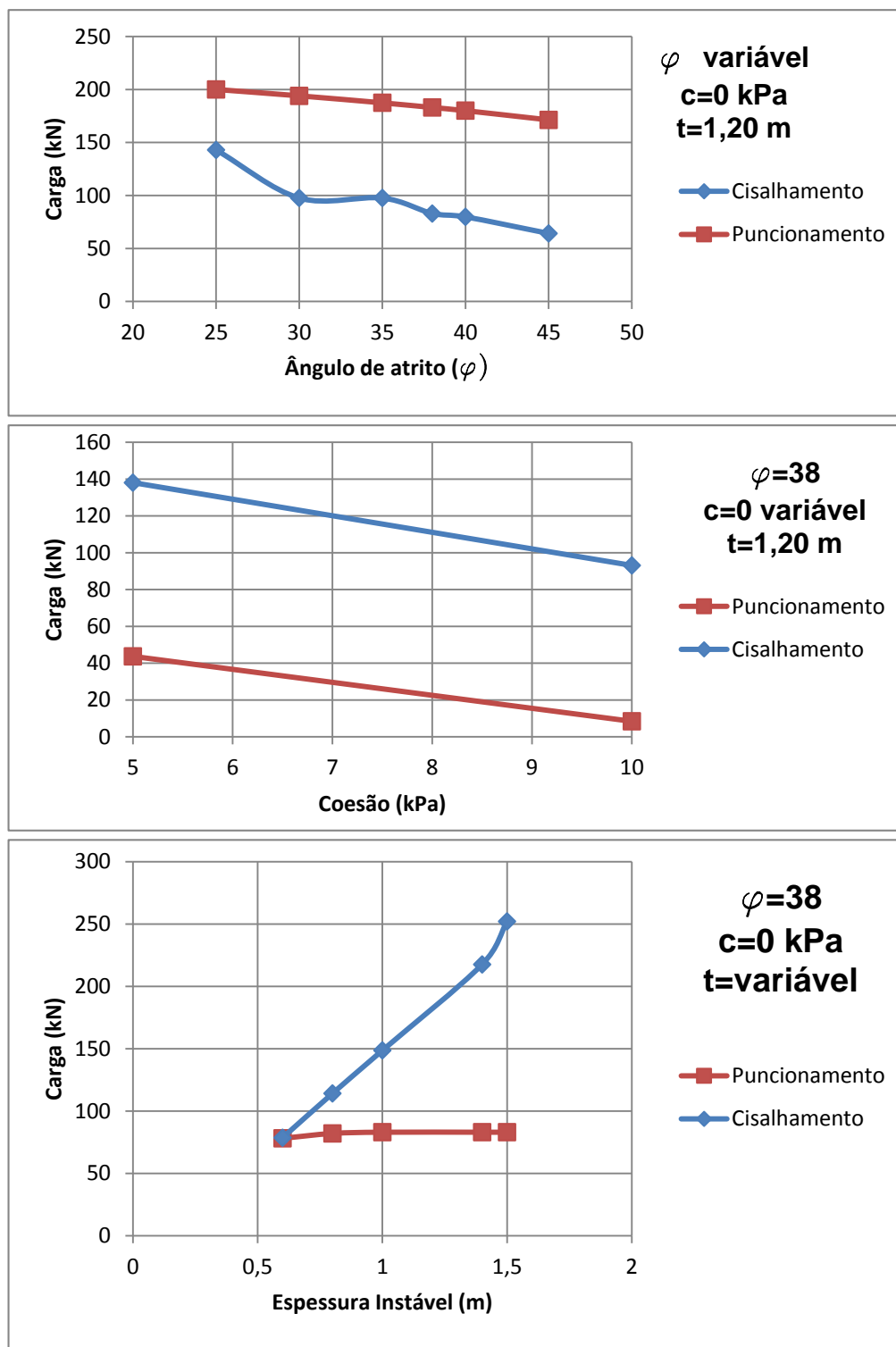


Figura 74: Resultados da análise paramétrica

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÕES

O último capítulo do presente trabalho aborda a apresentação das conclusões que foram obtidas com o desenvolvimento do trabalho, estando estas baseadas nos experimentos e ensaios realizados durante a pesquisa, bem como a análise dos mesmos. Estas serão listadas separadamente com o objetivo de simplificar a compreensão das mesmas.

7.1.1 Conclusões em relação aos ensaios de tração nas malhas de aço

- a) Resistência obtida: Foi verificado que em todos os ensaios realizados a resistência máxima alcançada, quando normalizada em função do comprimento unitário, ficou ligeiramente abaixo da carga nominal apresentada para as malhas ensaiadas, tendo sido registrado em média uma diferença negativa de $\sim 10\%$. Duas hipóteses podem justificar esta diferença, a maior concentração de carga nos nós da amostra aqui estudada. A segunda hipótese consiste na análise da fixação lateral da malha com o pórtico, que aqui utiliza presilhas para fixar, enquanto que no ensaio original a malha é fixa por um pino, tendo um grau de liberdade de movimentação maior, podendo esta diferença influenciar os resultados;
- b) Ruptura: As rupturas observadas nas amostras durante a realização dos ensaios ocorreram em diferentes pontos da malha: nas quatro extremidades e no centro das amostras. Esta distribuição aleatória indica que o processo de montagem exerceu pouca influência nos resultados, e que não foi registrado pontos de concentração de carga, portanto cada amostra rompeu em seu ponto de fragilidade e não em um local induzido pelo equipamento.

7.1.2 Conclusões em relação ao ensaio de resistência no contato malha/placa

- a) Resistência obtida: Nestes ensaios a resistência obtida, para as amostras que foram rompidas, se aproximou bastante da resistência nominal dos modelos de malhas avaliadas. No caso da malha G65/ 3 mm, a resistência nominal é de 30 kN, valor máximo atingido no ensaio sem que fosse verificada a ruptura na malha;

- b) Condição de ensaio: O ensaio foi realizado sem que a malha tivesse contato com material de enchimento, situação do ensaio original. Entretanto, a situação verificada representa uma condição comum observada em campo para taludes rochosos, que é quando existem negativos nos taludes e a placa de fixação fica em contato somente com a malha do faceamento, deste modo os ensaios foram considerados válidos e capazes de representar a situação real. Já para os taludes em solo, existe uma restrição de movimento dada pelo atrito entre a malha e o solo, entende-se que a condição em solo seja melhor do que a condição em rocha, levando a valores superiores desta resistência
- c) Deformação das amostras: Devido à condição de ensaio, os pontos de contato da amostra com a placa ficaram limitados às extremidades da placa, condicionando um deslizamento entre os arames da malha, rearranjando a estrutura da amostra em função da carga. Este comportamento foi observado em todos os modelos estudados;
- d) Distribuição de carga: Os arames de aço que compõem a malha trabalham em conjunto, sendo as cargas distribuídas ao longo da superfície da amostra. Quando era verificada a ruptura em um dos arames, mesmo que fora do ponto de aplicação de carga, a amostra não suportava mais nenhum ganho de carga, indicando que a ruptura em um dos arames compromete a distribuição de cargas no sistema;
- e) Comportamento das amostras: Durante o ensaio, todos os deslocamentos “plásticos” sofridos pela amostra podem ser associados ao rearranjo da estrutura (abertura ou fechamento dos nós) das malhas em função da condição de carregamento se dar somente nos pontos de contato com a placa;

7.1.3 Conclusões em relação ao ensaio em escala real

- a) Deformação do faceamento: Foi verificada que a deformação do faceamento devido à ação do peso do material de enchimento se dá da mesma maneira que ela foi prevista no método de dimensionamento RUVOLUM, ocorrendo um acúmulo de material na região do grampo inferior. Também é possível apontar que a consideração realizada sobre a porção de solo estabilizada em função da carga de pré tensionamento é verdadeira, sendo indicada pelas zonas de deformação nula na região das placas. Por fim também foi observado nos ensaios que o material se desloca aleatoriamente dentro da caixa, baseado na diferença observada entre as cargas atuantes em grampos paralelos do sistema;

- b) Ruptura da tela: As cargas medidas para os esforços de puncionamento nos ensaios em escala real no momento da ruptura, em alguns dos ensaios, ficaram abaixo da resistência esperada para as amostras estudadas. Deste modo conclui-se que a ruptura do sistema não se manifesta sob a ação isolada de esforços, sendo a carga de ruptura uma resultante entre os esforços de puncionamento e cisalhamento que atuam nos grampos;
- c) Distribuição de cargas: Ao analisarmos as leituras do escâner laser é possível notar que o material se concentra em uma região entre os grampos com formato de losango, o mesmo formato de construção das malhas. Ao compararmos com uma malha de formato retangular com o mesma distribuição de grampos, fica evidente que a distribuição da carga é função do formato losangular da malha e não função da distribuição dos grampos;
- d) Início da movimentação: Foi registrado que o início da movimentação do material de enchimento se deu em um ângulo superior ao ângulo de atrito do material, indicando que a carga de pré-tensão conferida ao sistema ativa o faceamento, contribuindo para a estabilização do talude.

7.1.4 Conclusões em relação aos métodos de dimensionamento

7.1.4.1 Método Ruvolum

Os resultados previstos pelo método Ruvolum se aproximaram bastante das observações realizadas nos ensaios em escala real, estimando para a condição real o limite da ruptura do sistema de faceamento ou a ruptura, para as condições de fatores de segurança unitários. Ao introduzir os fatores da NBR 11682 todas as previsões indicaram ruptura do sistema em inclinações inferiores às atingidas.

Quanto às cargas estimadas é possível afirmar que para os ensaios de menor espaçamento de grampos, o grupo B, foi possível estimar as cargas máximas atuantes com fidelidade as medições realizadas. Entretanto ao verificarmos as cargas do grupo A, as estimativas ficaram muito distantes das medições indicando que o espaçamento maior exerce uma influência no sistema.

A determinação de parâmetros geotécnicos para uma avaliação de solução é fundamental, em especial a coesão do material, parâmetro de difícil determinação e dependente de várias condições naturais, o qual exerce uma influência significativa nos resultados em função do baixo nível de tensões do problema estudado. Com base na análise paramétrica recomenda-se

que ao utilizar o método Ruvolum este parâmetro seja desconsiderado, a menos que seja extremamente confiável.

Por fim, com base na análise paramétrica e nos cálculos analíticos é possível afirmar com certeza que a espessura da caixa utilizada no experimento em escala real é suficiente para aplicar o máximo carregamento no sistema de faceamento, visto que o incremento da espessura para um dado espaçamento entre os grampos não alterou o ângulo crítico de falha, e por consequência a espessura crítica de material instável. Entretanto é de extrema importância apontar que a verificação do cisalhamento nos grampos a espessura de solo é fundamental, porém o objetivo do ensaio era verificar o faceamento e não o grampo.

7.1.4.2 Método Macro 01

Este método verifica o sistema somente frente à resistência a tração, dependente do esforço de puncionamento, da malha utilizada como faceamento, com base na relação existente entre a deformação e carga de puncionamento – UNI11437:2012. Entretanto este esforço não atua sozinho no sistema, ainda existem os esforços localizados no contato malha/placa que não são verificados pelo método, e que como mostram os ensaios em escala real estão presentes em uma solução de faceamento.

Adicionalmente as previsões do método MacRo 1 exigem que sejam introduzidos fatores de segurança mínimo, caso contrario, ao calcularmos utilizando F_s unitários as cargas atuante no sistema ficam praticamente nulas, o que não condiz com os ensaios realizados. Deste modo, a comparação das previsões com o ensaio em escala real é uma tarefa complexa, pois as previsões podem ser ajustadas com a variação dos coeficientes de segurança dentro da faixa indicada por Macaferri (2014), e tais indicações não podem ser tomadas a priori com assertividade em um projeto real.

7.1.5 Sugestões para trabalhos futuros

Em virtude do tempo disponível e dos materiais fornecidos sugere-se que sejam realizados uma nova campanha de ensaios utilizando uma gama mais variada de modelos de malhas metálicas, utilizando as malhas hexagonais com e sem reforço de cabos de aço em diferentes direções, malhas quadradas com e sem reforço de cabo de aço associadas a placas de fixação com diferentes tamanhos e formatos. Deste modo seria possível construir um banco de dados para diferentes materiais.

Adicionalmente sugere-se que seja projetado e executado um ensaio em escala real, onde sejam registradas todas as cargas e deformações utilizando estes diferentes modelos de malhas e placas, contemplando também uma situação de taludes rochosos.

Devido a grande divergência entre as cargas previstas e as observadas para as diferentes condições de espaçamento, sugere-se realizar ensaios com uma gama mais variada de distribuição de grampos, a fim de verificar a influência destas nas medições. Complementando este estudo sugere-se desenvolver e propor um sistema para a medição dos esforços no contato malha grampo diretamente.

A realização dos ensaios de puncionamento, seguindo os dois procedimentos aqui apresentados, é um ponto interessante a ser estudado, a fim de avaliar as diferenças entre os dois modelos propostos.

Por fim, sugere-se que um talude real seja instrumentado durante a fase de instalação e operação do sistema, a fim de verificar as cargas atuantes em um conjunto completo da solução durante um dado período de tempo, objetivando verificar a influência de poro pressões no sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI, State-of-the-Art Report – Fiber Reinforced Concrete: ACI-544.1R-96. American Concrete Institute 2002

AGUILERA (2009), C. E.T. Aplicação de métodos de análise de taludes de grande altura em mineração. Dissertação de Mestrado; PUC Rio, 2009.

ALONSO, T.P. *et al.*. Solo grampeado: a arte de estabilizar, uma técnica moderna e eficaz. Revista Fundações e Obras Geotécnicas, São Paulo, v.0. 2010. p. 38-44.

BASTOS, P. S. Notas de Aula: Concreto Projetado. Disciplina 2151 – Concretos Especiais. Universidade Estadual Paulista,–Faculdade de Engenharia, Campus de Bauru - 2012.

BARCHICK, E.; MOSER. I.; DOS SANTOS, D.S. ; MARTINS. B.D. Aplicação do Scanner Terrestre ILRIS-3D no ramo da mineração. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-25 Abril 2007, INPE, p. 3631-3635.

BARANIAK, P.; SCHAWARZ, K. Report of Experiment N° 20. Relatório de experimento, Universidade de Ciências Plicadas de Berna, Suíça. 2014

BERTOLO, P.; OGERRI, C.; PEILA, D. Full-scale testing of draped nets for rock fall protection. Canadian Geotechnical Journal, Edição 46, 2009, p. 306-317.

BUSTAMANTE, M., DOIX, B., Une Méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés, In: Bulletin des Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées, n° 140, 1985.

BRUCE, D.A; JEWEL, R.A ; Soil Nail: Application and Praticce. Ground Engineering, vol. 19, no. 8, 1986.

BRUNET, G. ; GIACCHETI, G. Design Software for Secured Drapery- Proceedings of the 63rd Highway Geology Symposium, 2012, Redding, California

BYRNE, R. J., COTTON, D., PORTERFIELD, J., WOLSCHLAG, C. UEBLACKER, G. Manual for design and construction monitoring of soil nail Wall. Federal Highway Administration, U.S. Departament of Transportation, 1998. USA.

CALA, M.; FLUM, D.; RODUNER, A.; RUEGGER, R.; WARTMANN,S. TECCO® Slope Stabilization System and RUVOLUM® dimensioning method. AGH University of Science and Technology, Faculty of Mining and Geoengineering. Romanshorn, Suíça. Livro Texto 2012.

CARDOSO, A.I.S.; QUINTANILHA DE MENEZES, J.E. Estudo da interação mecânica entre redes metálicas pregadas e taludes rochosos. 10º Congresso Nacional de Geotecnia, Universidade de Lisboa, 2006.

CHENG, Y.M; LAU, C.K. Slope Stability Analysis and Stabilization. New methods and insight. Livro Texto Routledge, 2008.

CLOUTERRE. Recommendations Clouterre – soil recommendations for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing. French National Project Clouterre ., English Language Translation, 1991.

CONCEIÇÃO ,D.A. Análise paramétrica de estabilidade de um talude grampeado. Trabalho de conclusão de curso; Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

DA SILVA, J.P.M. Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes. Dissertação de Mestrado; FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

EHRlich, M. Solos Grampeados – Comportamento e procedimentos de análise. Workshop sobre solo grampeado, ABMS, 2003. São Paulo, pp 127-137.

ELIAS, V.; JURAN, I. Preliminary draft - Manual of practice for soil nailing, Prepared for the U.S. Dept. of Transp, Federal Highway Administration, Contract DTFH-61-85-C-00142, 1990. Não paginado.

ENGINEER MANUAL 1110-2-2005. Standard Practice for Shotcrete . Department of the Army, US Army Corps of Engineers, Washington, DC, 1 ed 1993.

FUNDASOLOS – Procedimento Executivo de Aplicação de Concreto Projetado em Taludes. São Paulo.

FIGUEIREDO, A.D. Concreto Com Fibras de Aço. Boletim Técnico BT/PCC/260 Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia da Construção Civil. 2000.

FINNEY, A; BANERJEE, S.; WENTWORTH, T.; BAHIRADHAN, M. Evaluation of design methodologies for soil-nailed walls, Volume 3: An Evaluation of soil-nailing analysis packages. Washington State Department of Transportation, 1998.

FLUM, D; BUCUR, M.D.; UNGUREANU, V.V.; CORBESCU, G. Modern Flexible Systems for slope stabilization made from high-tensile steel wire meshes/nets in combination with nailing and anchoring in soil and rocks. CIBv - International Scientific Conference, Brasov, 2010.

FLUM D.; STOLZ, M.; RODUNER, A. Large-scale field tests with flexible slope stabilizations systems. Bern University of Applied Sciences in Burgdorf, 2014.

FRANZÉN, T. “Shotcrete for underground support: a state of the art report with focus on steel fiber reinforcement.”. Proceedings of the Rock Support in Mining and Underground Construction Symposium, Rotterdam, Balkema, pp. 91–104, 1992.

GEOBRUGG AG. Large-scale field tests with TECCO system- Photo Documentation. Winterthur, Suíça. 2012

GEOBRUGG AG. TECCO Stabilization System – Product Manual. Romanshorn, Suíça, 2009,

GEOGUIDE 7. Guide to Soil Nail Design and Construction. Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department. The Government of Hong Kong. Special Administrative Region. Hong Kong. 2008.

- GIANI, G.P. Rock Slope Stability Analysis. Livro Texto Balkema, Rotterdam, 1992
- LAZARTE, C. A., ELIAS, V., ESPINOSA, D., SABATINI, P. J. Geotechnical engineering circular n°7 – soil nailing. FHWA, Washington D.C, 2003.
- LAMBE, W.T.; WHITMAN, R.V. Soil Mechanics. Massachussets Institute of Technology. Editora John Wiley & Sons, Inc. 1969.
- LIMA ,A.P. Comportamento de uma escavação grampeada em solo residual de gnaiss. Tese de Doutorado. Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007.
- LGA. Test Report. N° 946 12395/04-en. TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH. 2014
- LGA. Test Report. N° 946 12395/05-en. TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH. 2014
- LGA. Test Report. N° 946 12395/06-en. TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH. 2014
- JIMÉNEZ, A.G.N. Análises tensão-deformação de estruturas de solo grampeado. Boletim Dissertação de mestrado apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia da Construção Civil. 2008.
- MACAFERRI. Technical Data Sheet – SteelGrid HR. Zola Pedrosa, Itália, 2011.
- MACAFERRI. Product Standard Specifications – Rock Mesh HR 30 Composite Cable and Wire Mesh Panel. Zola Pedrosa, Itália, 2013.
- MACAFERRI. Rockfall protection system – MACRO 1 – Theory and Backgorund manual. Zola Pedrosa, Itália, 2014.
- MIGUEL, W.S Revestimento de Túneis em Concreto Projetado com Fibras de Aço. 43° Congresso Brasileiro de Concreto, 2001.
- MUHUNTHAN, B.; Shu,S.; SASIHARAN, N.; HATTAMLEH, O.A.; BARDGER, T.C, LOWELL, S.C.; DUFFY, J.D. Analysis and design of wire mesh/cable net slope protection. Final Research Report.FHWA, Seattle, 2005.
- MUMMA, S. Slope Stabilization utilizing high performance steel wire mesh in combination with soil nailing an anchoring. 53th Annual Highway Geology Symposium, San Luis Obispo, California, EUA, 2002.
- NBR 11682 – Norma Brasileira de Estabilidade de Taludes. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2009
- NBR 13597 – Norma Procedimento para a qualificação de mangoteiro de concreto projetado. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2012
- NBR 14026 – Concreto Projetado - Especificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2012
- NBR 5629 - Execução de tirantes ancorados no terreno. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2006

NBR 7681 - Calda de cimento para injeção – Partes I e II. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2013

OLIVEIRA, N.C.D. Soluções para a estabilização de taludes em linhas férreas. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Portugal, 2010.

OREAEE-MIRZAMANI, B., TRAVASSOLI, M. ORAEE, K. Designing shotcrete as primary support in tunnels. 30th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, West Virginia 2011.

ORTIGÃO, J. A. R.; SYÃO, A. S.F.J., Manual Técnico de escavações. GeoRio 2ª edição, Rio De Janeiro, 2000.

ORTIGÃO, J.A.R E PALMEIRA, E.M. Optimized design for soil nailed walls., In: 3rd Conference on Ground Improvement Geosystems, 1997, London Thomas Telford, 1997 p. 368-374.

ORTIGÃO, J. A. R.; PALMEIRA, E. M.; ZIRLIS, A., Experiência com solo grampeado no Brasil: 1970-1993. Revista Solos e Rochas, 1993, v. 16 no. 4, pp. 291-304.

PALERMO, G. Concreto Projetado como revestimento de túneis. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP BT/PCC/183. Departamento de Engenharia de Construção Civil – São Paulo 1997.

PALLET, F.; EGGER P..Analytical model for the behaviour of bolted rock joints and practical applications. In proceedings of international symposium Anchors theory and practice. Widmann R. Editor, Balkema, Rotterdam. 1995

PIERK, T.O; AZEVEDO, M.T. Execução de contenção de encostas em solo grampeado. Lauro de Freitas-BA. p.16 2009.

PINTO, S.C. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. 3ª edição. São Paulo Oficina de Textos (2006).

POKHAREL, S.; PARSONS, R.L.; HAN, J.; WILLEMS, I.; PIERSON, M.. Use of flexible facing for soil nail walls. Final Report nº K-TRAN: KU-10-6. Kansas Department of Transportation, EUA, 2011.

PROTO DA SILVA, T. Resistência ao arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss. Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2005.

RODUNER, A. Slope stabilization with soil nailing and flexible facing. Geobrugg AG 2013, Romanshorn, Suíça.

RODUNER, A. Tension test method for chain link wire mesh. Manual do ensaio de tração, Geobrugg 2011.

RODUNER ,A.; BALG, C. Flexible Surface slope stabilization system made from high tensile wire meshes – State of the Arte. ISRM- International Symposium of Rock Mechanics and 6th Asian Rock Mechanics Symposium. Nova Delhi, Índia, 2010.

RTA. Shotcrete Design Guidelines. Roads and Traffic Authority Australia 2005.

SILVA, D. P. Análise de diferentes metodologias executivas de solo pregado a partir de ensaios de arrancamento realizados em campo e laboratório. 2009, 313 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

SILVA, R.C. Análise do comportamento de estruturas de solo grampeado através da monitoração de obra e modelos físicos (escala 1:1). Dissertação de Mestrado; Coppe - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

SOLOTRAT ENGENHARIA GEOTÉCNICA LTDA. Manual de Serviços geotécnicos, 4ª edição. 2012.

TEIXEIRA, I. J.R. Estudo comparativo de duas alternativas para contenção de taludes verticais: Solo Grampeado e Cortina Atirantada. Trabalho de conclusão de curso; Universidade Federal de Feira de Santana, 2011

WARTMANN, S. The Method of flexible slope stabilization systems with high tensile steel wire meshes. Tese de doutorado. Universidade AGH de Ciência e Tecnologia, Polônia 2011.

YOKO, G. Slope Stabilization can be tackled by the use of metal and ecology. Euroculture advertorial. 2006.

YOGGY, G.D. The History of shotcrete – 2005.