

FREDERICO HORTA MIRANDA

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NA INTERFACE
SOLO-GRAMPO COM O USO DE CALDA ADITIVADA E CALDA
CONVENCIONAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Cláudio Henrique de C. e Silva

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2019**

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

M672e
2019
Miranda, Frederico Horta, 1969-
Estudo da resistência ao cisalhamento na interface
solo-grampo com o uso de calda aditivada e calda convencional /
Frederico Horta Miranda. – Viçosa, MG, 2019.
168 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 134-139.

1. Taludes (Mecânica do solo) - Estabilidade. 2. Ancoragem
(Engenharia de estruturas). 3. Cimento - Aditivos.

I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

II. Título.

CDD 22. ed. 624.151363

FREDERICO HORTA MIRANDA

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NA INTERFACE
SOLO-GRAMPO COM O USO DE CALDA ADITIVADA E CALDA
CONVENCIONAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 17 de dezembro de 2019.

Assentimento:



Frederico Horta Miranda
Autor



Cláudio Henrique de Carvalho e Silva
Orientador

Aos meus filhos,

José Pedro e Antônio Frederico.

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, por ser meu guia nos dias bons e nos dias difíceis. Ofertou-me lucidez nos dias de extremo cansaço físico e mental, durante as 96 viagens realizadas para esta pesquisa, quando percorri 39.000 km (7.000 km sem pavimentação), sempre antes do sol nascer ou depois da lua aparecer. Ofertou-me paciência e força de vontade, diante de resultados inconsistentes e perante as dificuldades inerentes à extensão de minha pesquisa. Obrigado **Senhor**, confio em ti e lhe temo! Sem as tuas mãos direcionando as minhas, este experimento e os demais agradecimentos não seriam possíveis.

Aos meus **filhos**, fontes de sentido e equilíbrio entre a razão e a emoção em minha vida. Com seus carinhos inocentes e inspiradores, sempre impulsionam os meus desejos e pensamentos em torná-los grandes homens. Percebo o carinho que sentem pelo avô **José Pedro Miranda** (in memoriam), diante da curiosidade e do encantamento demonstrados pelo legado e frases do vovô **Zé**: *“se prometeu tem que cumprir”, “aja com fé em Deus, muita honestidade e carinho com tudo e com todos que nós chegaremos lá”, “tenha muito cuidado com o dinheiro dos outros, faça tudo muito bem e com honestidade, tenha o seu nome sempre limpo, saiba entrar em qualquer lugar de cabeça erguida, não tenha nada, mas tenha nome, é tudo”*. Obrigado **pai**, como sentimos sua falta! Ficamos imaginando como estás feliz por esta conquista de muita dedicação e superação.

À minha mãe, **Maria do Carmo** (Roxa), por ser esta arqueira certa, corajosa e resistente, que nos lançou bem longe como flechas vivas para buscarmos conhecimento, mesmo sabendo que éramos a sua fonte de inspiração e proteção. Antes de cada viagem realizada, ainda escuro, ela aparecia de repente e antevendo meu olhar de cansaço por mais uma noite de pouco sono, ofertava-me um café bem forte. Com um olhar de preocupação e ternura, abraçava-me com carinho e me benzia, dizendo: *“vai dirigindo conversando com Deus, pedindo proteção. Ficarei rezando, esperando você voltar à noite”*. **Mãe**, amo-lhe muito além de meus sentimentos!

Aos meus irmãos e minhas irmãs, **Vera** (Lela), **José Pedro** (Juca), **Ângela** (Lalá), **Maria José** (Janinha), **Carolina** (Taia) e **Leonardo** (Léo), pelos apoios de sempre e por entenderem minha ausência para cumprir a sina que **pai** nos ensinou: buscar sempre mais conhecimento. Em especial ao **Ricardo Horta** (Duá), meu melhor amigo, exemplo de comprometimento familiar e dedicação à medicina, parceiro fiel desde as brigas de criança. Durante nossos estudos, sozinhos na UFMG, estive a frente, sempre me protegendo e abrindo os caminhos. Especialmente à **Luciana** (Lelé), pela dedicação à família, pela fé em **Jesus Cristo** e bondade natural que exalam de seu coração e nos tornam melhores também, pelo seu amor e zelo para com a mãe, José Pedro (Zé Pedrin) e Antônio (Keko) e por sempre orar e cuidar tão bem de mim.

À minha esposa, **Mariana**, arquiteta linda e parceira diária. Juntos sempre, algumas vezes, “*In Sacrifice*”, rompemos e vencemos as fases difíceis da vida conjugal e profissional. Agradeço-lhe carinhosamente por sua entrega incondicional às maiores bênçãos que **Deus** nos ofertou, nossos **filhos**. *Amo-lhe serenamente sempre!*

À minha doutora e irmã **Carolina** e ao meu cunhado **Márcio** (Dr. Marçã), pelo amor infindo e zelo ofertados aos meus filhos, pelas presenças nos momentos mais difíceis, pelas preocupações com minha saúde, pelos conselhos e pelas sagradas orações de joelhos e testa ao chão que sempre me protegeram e direcionaram aos melhores caminhos. Agradecimento especial ao Marçã, pelos carinhos de filho ofertados ao meu pai e pela coragem e competência demonstradas na realização das complicadas cirurgias que salvaram e prolongaram a vida de pai por mais alguns anos.

À minha sogra **Tereza Cristina** (Tetê) e ao meu sogro **José Sales** (Zé), pelo amor, pela proteção e pelo zelo para com os netos, principalmente durante minha ausência e de minha esposa. Sempre me ofertaram tranquilidade durante os estudos e as viagens necessárias à pesquisa. Agradecimento especial ao **Zé Sales**, pelo exemplo de vida simples e *amizade sincera* de quase um pai. Sempre antevê o melhor caminho a ser seguido, mas, com palavras serenas e o olhar de sábio observador e conciliador, apenas deseja que optemos por ele.

Ao Prof. **Cláudio Henrique de Carvalho Silva**, pela orientação nesta pesquisa, pelas discussões e sugestões, pelo suporte científico, pela disponibilização do laboratório e equipe técnica, pelo apoio na aquisição de equipamentos e materiais, pela confiança demonstrada e liberdade ofertada.

Ao Prof. **Leonardo Gonçalves Pedroti**, pela coorientação nesta pesquisa, pelas discussões e sugestões que enriqueceram substancialmente este trabalho, pelo apoio na aquisição de equipamentos e pela prontidão na disponibilização do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC/DEC/UFV).

Ao Prof. **Roberto Lopes Ferraz**, pelas orientações, pelas discussões e sugestões, pelas valiosas contribuições para esta pesquisa, pela participação na banca examinadora, pela presença e atenção dispensada nas inúmeras visitas ao talude.

Ao Prof. **Enivaldo Minette**, pelas orientações, pelas discussões e sugestões, pelo apoio técnico e profissional, pela disponibilização de equipamentos e do galpão de sua empresa, imprescindíveis para a montagem e execução dos grampos e, principalmente, por nossa amizade, iniciada durante as aulas de sua última turma ministrada da UFV em 2016, disciplina de *Estabilidade de Taludes e Obras de Arrimo*.

Ao Prof. **Lauro Gontijo**, pelas orientações fundamentais no início da pesquisa, por oferecer prontamente o seu laboratório particular e equipamentos para a realização de ensaios em caldas, pela presença e atenção ofertada nas visitas ao talude.

Aos professores, **Heraldo Pitanga** e **Dario Lima**, pelas experiências e conhecimentos transmitidos nas disciplinas ministradas. Em especial ao Prof. **Eduardo Marques**, pelo apoio imediato e pela disposição e competência para simplificar os problemas.

Ao Prof. **Daniel Duarte**, pela prontidão na realização do levantamento topográfico do talude experimental. Aos professores **Luiz Rangel** e **Gustavo Verissimo**, pela disposição em contribuir para o experimento.

À Prof^a. **Maria Giovana** (Gigi), pelos conhecimentos repassados na disciplina de *Geologia de Engenharia* ministrada na UFMG no início de 2016, quando pude rever os laboratórios do IGC e reviver, nostalgicamente, os momentos vividos durante a graduação em Estruturas (1992) e a pós-graduação em Construção Civil (2004).

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil (LEC/DEC/UFV), **Anderson, Marcelo, Dedé** e **Wellington**, pelo apoio e direcionamento na realização dos ensaios. Especialmente ao **José Carlos** (Zé), pelo olhar de alegria diante de bons resultados e pelo olhar de tristeza diante de resultados inconsistentes, mas, seguido de um sorriso espontâneo de motivação. Obrigado **Zé**, pela companhia durante os ensaios e pela experiência transmitida, adquirida nos quase quarenta anos dedicados à UFV.

Ao **Paulo** (P3), pelo direcionamento nos ensaios de sondagens SPT e PMT realizados no talude, e à equipe de apoio, **Agostinho, Doguinho** e **Valdete**. Ao **Júlio** e **Edson**, pelo apoio e dedicação na execução dos grampos. Em especial ao **Edson** (Grandão), pelo apoio diário, espontâneo e incondicional durante os 33 dias de experimentos no talude. Emprestava equipamentos, providenciava energia e água, oferecia um bom café e, nos dias mais difíceis, indicava os caminhos para a solução dos problemas.

Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFV, pela atenção, competência e prontidão no atendimento, em especial à **Cilene** e ao **Tiago**.

Ao **Filipinho**, à **Káren** e à **Elisa**, pelas contribuições significativas dos últimos quatro anos. De ex-alunos e ex-estagiários, atualmente parceiros confiáveis na engenharia. O Filipinho, com sua extrema calma e inteligência, esteve ao meu lado diariamente, estudando e discutindo cada detalhe desta pesquisa, além de assumir os projetos de estrutura metálica da Aton; a Káren, sempre responsável e dedicada, prosseguiu com os projetos de estrutura em concreto, e a Elisa, com sua eficiência e competência, assumiu o ramo de consultoria. O trio foi também imprescindível para a publicação dos meus livros de Fundações, Pontes e Estruturas de Madeira que, a meu ver, foram as “*chaves*” que abriram as portas da UFV para este experimento.

Aos meus estagiários, **Wendel** (UFV), **Luana, Rodolfo, Kesley, Amanda** e **Letícia** (Aton Arquitetura e Engenharia), pela dedicação demonstrada em etapas diferentes desta pesquisa. Espero que tenham captado os conhecimentos básicos do Solo Grampeado, técnica pouco pesquisada e aplicada na região do Vale do Aço, M.G.

Ao meu recente e “*meu velho*” amigo **Galindo**, pelas longas conversas sobre a vida pessoal, profissional e acadêmica, durante minhas estadias em seu apartamento em Viçosa-M.G., pelas orientações que enriqueceram esta pesquisa e pela mansidão transmitida diante de minhas impaciências em algumas etapas do experimento.

À **Vera Lanza, Roberto Galindo, Vinícius, Géssica, Carol, Juliana, Mário e Leandro** pelos momentos vividos com alegria em sala de aula e pelos conhecimentos compartilhados. Em especial ao **Lázaro** e ao **Udo**, pelo apoio espontâneo e pela companhia durante as visitas ao talude, e ao **Lucas Almeida**, pela parceria de longa data, ex-aluno, ex-estagiário, parceiro no mestrado e na Engenharia Geotécnica.

À dupla, tio **Geraldo** e primo **Miguel Ângelo**, pela paciência, pela disponibilização da oficina, pela prontidão (aos sábados, domingos e feriados) e, principalmente, pela criatividade intrínseca de ambos, imprescindíveis para o aperfeiçoamento e a fabricação das peças e equipamentos desenvolvidos para este experimento.

Ao meu primo **Audrey**, pelo direcionamento e apoio na língua inglesa, às minhas **tias** que rezaram por mim, aos meus **tios e tias** que respeito como grandes *mestres da vida*, tio **Zezinho** (in memoriam), tio **Hélio** (in memoriam), tia **Naná**, tia **Rininha** (in memoriam), tio **Inhô** e tio **Mano**, aos meus **primos e primas**, aos demais **familiares** e aos **amigos**, que de certa forma contribuíram para esta pesquisa.

À **Prefeitura Municipal de Ipatinga**, em especial à Secretaria de Obras e ao Departamento de Recursos Humanos, que favoreceram prontamente a realização desta pesquisa e, conseqüentemente, a capacitação do servidor.

Às empresas, **Pedreira Um Valemix, Lafarge Holcim Ltda e MC-Bauchemie Brasil**, pelo apoio técnico e fornecimento gratuito de cimentos e aditivos para esta pesquisa. Em especial ao **Romério, Carlinhos, André, Wany e Mirany** (Pedreira Um Valemix), ao **Fabício** (Lafarge Holcim Ltda) e ao **André** (MC-Bauchemie Brasil).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Enfim, em agosto de 2016, com o corpo sobre um *apoio móvel*, a mente ao lado da incerteza e os ventos suavemente mudando de direção, fui levado levemente do campus da UFMG ao da UFV. Agradeço, com respeito e gratidão, à **Universidade Federal de Viçosa - UFV**, pela oportunidade da realização desta pós-graduação. Atualmente, ao atravessar as quatro pilastras, o vento muda harmoniosamente, o meu corpo flutua livremente, a minha mente vagueia tranquilamente e então... me sinto enraizado e privilegiado. Pelos lindos caminhos e belas lagoas do campus da UFV... meus pensamentos pairam no ar... imaginando como seria um novo experimento... em companhia de **meus filhos**. Que sejas assim! Se **Deus** quiser!

“Ninguém pode construir em teu lugar as pontes que precisarás passar, para atravessar o rio da vida – ninguém, exceto tu, só tu. Existe no mundo um único caminho por onde só tu podes passar. Onde leva? Não perguntes, segue-o!”

Friedrich Nietzsche

RESUMO

MIRANDA, Frederico Horta, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2019. **Estudo da resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo com o uso de calda aditivada e calda convencional.** Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho e Silva.

O solo grampeado é uma técnica de estabilização de maciços terrosos que promove o reforço do solo *in situ* com a introdução do grampo, elemento passivo composto de barra de aço circundada por calda de cimento endurecida. Esta técnica proporciona ao maciço ganho de resistência à tração e aumento da resistência ao cisalhamento, através da mobilização da resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo (q_s). Um problema recorrente do solo grampeado, que reduz a resistência q_s e aumenta o deslocamento do maciço reforçado, é a presença de vazios ao longo da superfície do grampo, causados pela retração da calda e por falhas nos processos executivos de perfuração e injeção da bainha. Nesta pesquisa é apresentado um estudo comparativo sobre o emprego de caldas de cimento, com (calda aditivada) e sem aditivos plastificante e expensor (calda convencional), para a injeção somente da bainha, visando o aumento da resistência q_s do grampo, através da supressão da retração da calda. Com o objetivo de melhorias nos processos de perfuração e enchimento das bainhas, além de auxílio na execução dos ensaios de arrancamento, foram desenvolvidos peças e equipamentos para este trabalho, que se mostraram muito úteis para as finalidades projetadas. Foram executados treze grampos com injeção de bainha, sendo seis injetados com calda aditivada e seis com calda convencional, além de um grampo teste, os quais foram curados por um período de 45 dias, antes da realização dos ensaios de arrancamento. As cargas de ruptura foram definidas com base em dois critérios clássicos de ruptura: carga de pico e recalque limite. Foram realizados dois estudos comparativos: o primeiro com amostragem de doze grampos e o segundo com a exclusão de duas amostras. No primeiro estudo, pelo critério da carga de pico foi obtido um incremento de 17,6% na resistência q_s com o uso da calda aditivada e pelo critério do recalque limite de 12,9%. No segundo estudo, o aumento foi de 25,1% pelo critério da carga de pico e de 15,9% pelo critério do recalque limite. Os grampos executados com a calda aditivada apresentaram um incremento médio de 17,9% na resistência q_s em relação àqueles executados com a calda convencional.

Palavras-chave: Solo grampeado. Retração. Calda aditivada. Resistência q_s .

ABSTRACT

MIRANDA, Frederico Horta, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2019. **Study of the shear strength at the soil-nail interface with the use of cement paste with additives and conventional paste.** Adviser: Cláudio Henrique de Carvalho e Silva.

Soil nailing is a technique used to stabilize soil masses by in-situ soil reinforcement through the insertion of nails, passive elements made of steel bars surrounded by hardened cement grout. This technique improves the soil mass's tensile and shear strength through the mobilization of the shear strength of the soil-nail interface (q_s). A common problem of soil nailing, which reduces the q_s resistance and increases the displacement of the reinforced soil mass, is the presence of voids along the nail surface caused by the shrinkage of the grout and failures in the execution of the processes of drilling and sheath injection. This research shows a comparative study on the use of cement grouts, with (grout with additives) and without plasticizer and expander additives (conventional grout) for the injection of the sheath only, aiming to increase the nail q_s resistance by suppressing the grout retraction. Parts and equipment were developed for this work, which proved to be very useful for their projected purposes, to improve the processes of drilling and sheath filling, as well as assisting the execution of pullout tests. Thirteen nails with sheath injection were inserted, six injected with grout with additives and six with conventional grout, along with one nail for a test. The grout hardened for 45 days before the pullout tests were carried out. The rupture loads were defined based on two classic rupture criteria: peak load and limit settlement. Two comparative studies were carried out: the first one with a sample of twelve nails and the second one with the exclusion of two samples. In the first study, by the peak load criterion, an increase of 17.6% in the q_s resistance was obtained with the use of the grout with additives and by the criterion of the limit settlement of 12.9%. In the second study, the increase was 25.1% for the peak load criterion and 15.9% for the limit settlement criterion. Nails executed with the grout with additives showed an average increase of 17.9% in the q_s resistance than the ones made with the conventional grout.

Keywords: Nailed soil. Retraction. Cement paste with additives. q_s resistance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comparação da técnica NATM com o método tradicional	26
Figura 2 – Aplicações da técnica do solo grampeado	28
Figura 3 – Fases construtivas do solo grampeado	29
Figura 4 – Execução do solo grampeado em escavações intercaladas	31
Figura 5 – Tipos de cabeças para grampos	32
Figura 6 – Equipamentos e realização de teste de fluidez	39
Figura 7 – Sistemas de drenagem profunda e de superfície	42
Figura 8 – Mecanismos de transferência de tensões no solo grampeado e na cortina	45
Figura 9 – Pontos de deslocamentos horizontais máximos em muros de solo grampeado e solo reforçado com geossintético	46
Figura 10 – Carregamento progressivo no Grampo 3 durante e após o processo de escavação	47
Figura 11 – Mobilização dos esforços nos grampos nas zonas ativa e passiva.....	48
Figura 12 – Detalhes dos equipamentos e do grampo no ensaio de arrancamento .	50
Figura 13 – Curva de ensaio de arrancamento com pico	51
Figura 14 – Curva de ensaio de arrancamento sem pico	52
Figura 15 – Correlações empíricas para q_s e P_L para areias.....	55
Figura 16 – Correlações empíricas para q_s e P_L para argilas	55
Figura 17 – Correlações empíricas para q_s e N_{SPT}	56
Figura 18 – Desenvolvimento de zona de cisalhamento em massa grampeada.....	58
Figura 19 – Deformação em grampo submetido à flexão composta	59
Figura 20 – Tipos de ruptura em maciço grampeado	60
Figura 21 – Ilustração e considerações principais dos métodos de análise de estruturas grampeadas	63
Figura 22 – Organograma das principais atividades do Programa Experimental.....	69
Figura 23 – Barras de aço utilizadas nos experimentos	73
Figura 24 – Funil de Marsh	75
Figura 25 – Moldes metálicos em aço inox	76
Figura 26 – Perfuração do solo com uso de trado e equipamento adaptado	77
Figura 27 – Disposição e detalhes dos equipamentos de perfuração	78
Figura 28 – Detalhes, dimensões e componentes da rampa metálica (cm).....	78

Figura 29 – Tipos de centralizadores	80
Figura 30 – Detalhes do novo centralizador	80
Figura 31 – Modelo de misturador elétrico para calda de cimento	81
Figura 32 – Triângulo metálico para acerto da face do talude.....	82
Figura 33 – Bancada de retração e moldes de EPS e PVC	83
Figura 34 – Medição da retração longitudinal em calda de cimento.....	85
Figura 35 – Corpos de prova moldados no EPS e PVC	86
Figura 36 – Planta de localização do talude experimental	89
Figura 37 – Talude experimental.....	89
Figura 38 – Seção típica do talude (medidas em m)	90
Figura 39 – Planta de locação dos 13 grampos, 3 furos SPT, 2 furos PMT e	91
Figura 40 – Resultados da sondagem SPT e do ensaio PMT - seção esquemática 1 entre Gr 3 e Gr 4	91
Figura 41 – Resultados da sondagem SPT e do ensaio PMT - seção esquemática 2 entre Gr 8 e Gr 9	92
Figura 42 – Resultado da sondagem SPT - seção esquemática 3 entre Gr 12 e Gr 13	92
Figura 43 – Ensaio pressiométrico de Ménard (PMT)	94
Figura 44 – Localização dos pontos de retirada de amostras no talude	95
Figura 45 – Moldagem de corpos de prova para ensaios de cisalhamento direto e compressão triaxial	95
Figura 46 – Curva granulométrica da amostra A.....	96
Figura 47 – Curva granulométrica da amostra B.....	96
Figura 48 – Detalhes do sistema de perfuração (cm).....	100
Figura 49 – Montagem do sistema de perfuração no talude	100
Figura 50 – Equipamentos para perfuração	101
Figura 51 – Preparação dos furos para inserção dos grampos.....	102
Figura 52 – Detalhe dos espaçamentos dos centralizadores.....	103
Figura 53 – Inserção da barra de aço com centralizadores	104
Figura 54 – Teste de infiltração em corpos de prova executados no pé do talude..	105
Figura 55 – Preparativos para execução da calda em campo.....	106
Figura 56 – Vista dos grampos executados no talude.....	107
Figura 57 – Teste de fluidez e moldagem de corpos de prova em campo	108
Figura 58 – Teste de infiltração das caldas no solo	109

Figura 59 – Posicionamento da barra de aço no talude	111
Figura 60 – Pannel rigido de madeira e trecho livre da barra	112
Figura 61 – Instalação da peça metálica e do macaco hidráulico	113
Figura 62 – Calibração do macaco hidráulico e manômetro analógico	114
Figura 63 – Montagem do macaco hidráulico.....	115
Figura 64 – Montagem dos extensômetros e sistema de apoio	115
Figura 65 – Detalhes dos equipamentos e layout do ensaio de arrancamento	116
Figura 66 – Curva Carga x Deslocamento: Grampo 1	120
Figura 67 – Grampo 2	121
Figura 68 – Grampo 3	121
Figura 69 – Grampo 4	122
Figura 70 – Grampo 5	122
Figura 71 – Grampo 6	123
Figura 72 – Grampo 7	123
Figura 73 – Grampo 8	124
Figura 74 – Grampo 9	124
Figura 75 – Grampo 10	125
Figura 76 – Grampo 11	125
Figura 77 – Grampo 12	126
Figura 78 – Curva Carga x Deslocamento: Grampos 1 a 12.....	126
Figura B.1 – Criação de experimento de superfície de resposta.....	141
Figura B.2 – Janela para criação de experimento de superfície de resposta.....	141
Figura B.3 – Janela de fatores	142
Figura B.4 – Planilha com valores aleatórios	142
Figura B.5 – Planilha com os traços experimentais.....	143
Figura B.6 – Definição da análise do experimento de superfície de resposta	143
Figura B.7 – Janela para definição da análise do experimento	144
Figura B.8 – Termos da análise	144
Figura B.9 – Otimizador de resposta	145
Figura B.10 – Janela do otimizador de resposta	145
Figura B.11 – Configurações da otimização das respostas	145
Figura B.12 – Gráfico otimizado	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Altura de escavação para diferentes tipos de solo	30
Tabela 2 – Quantidades de ensaio de arrancamento de acordo com a área da face	54
Tabela 3 – Coeficientes de ancoragem.....	57
Tabela 4 – Ensaio de fluidez / vida útil	71
Tabela 5 – Caracterização do cimento Portland CP II E 32	84
Tabela 6 – Dados do ensaio de tração do aço CA 50	84
Tabela 7 – Resultados dos ensaios dos limites de Atterberg	95
Tabela 8 – Frações granulométricas da amostra A segundo a ABNT NBR 7181 (ABNT, 2016d)	96
Tabela 9 – Frações granulométricas da amostra B segundo a ABNT NBR 7181 (ABNT, 2016d)	97
Tabela 10 – Resultados do peso específico dos sólidos	97
Tabela 11 – Parâmetros obtidos nos ensaios de cisalhamento direto	97
Tabela 12 – Parâmetros obtidos nos ensaios de compressão triaxial.....	98
Tabela 13 – Dados relativos à execução dos furos	103
Tabela 14 – Dados relativos à injeção, geometria do furo e do grampo	107
Tabela 15 – Dados dos ensaios de arrancamento e geometria dos grampos	118
Tabela 16 – Cargas máximas de tração e deslocamentos totais (ciclos de descarregamento)	127
Tabela 17 – Resumo dos dados das curvas Carga x Deslocamento e q_{sCP} pelo critério da carga de pico	128
Tabela 18 – Dados das curvas Carga x Deslocamento e q_{sRL} pelo critério do recalque limite	129
Tabela 19 – Resumo das resistências q_s de ruptura e admissível com os respectivos deslocamentos pelos critérios da carga de pico e do recalque limite	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Fator água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABNT	Norma Técnica Brasileira
NBR	
ASTM	American Society for Testing and Materials
CD	Consolidado Drenado
CIU	Compressão Triaxial
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
cm ³	Centímetro cúbico
CP	Corpo de prova
CP II E 32	Cimento Portland Composto com Escória com resistência de 32 MPa aos 28 dias
CU	Consolidado não Drenado
cv	Cavalo-vapor (potência)
DEA	Departamento de Engenharia Agrícola
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DHP	Drenos horizontais profundos
EPS	Poliestireno Expandido
FS	Fator de Segurança
g	Gramas
Gr	Grampo
h	Horas
IL	Índice de liquidez
IP	Índice de plasticidade
kgf	Quilograma-força
kN	QuiloNewton
kPa	QuiloPascal
LEC	Laboratório de Materiais de Construção e Geotecnia da UFV
m	Metro

m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
min	Minuto
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
N.A.	Nível de água
NATM	New Austrian Tunneling Method
O	Oxigênio
P _L	Pressão limite
PMT	Pressiométrico tipo Ménard
PVC	Policloreto de Vinila
rpm	Rotação por minuto
s	Segundos
SAAE	Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Viçosa
SPT	Standard Penetration Test
tf	Tonelada força
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UU	Não consolidado e não drenado
μm	Micrômetro

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
σ'_z	Tensão efetiva do solo
"	Polegada
°	Grau
As	Área da seção transversal da barra de aço
bar	Unidade de pressão
c'	Intercepto de coesão efetiva
D	Diâmetro do grampo
d	Deslocamento
d _{CD}	Deslocamento total nos ciclos de descarregamento
d _{CP}	Deslocamento pelo critério de ruptura da carga de pico
d _{RL}	Deslocamento pelo critério de ruptura do recalque limite
e _h	Espaçamento horizontal
EI	Rigidez do grampo
E _M	Módulo pressiométrico de Ménard
e _v	Espaçamento vertical
F	Carga de ruptura
F _{arr}	Carga axial de tração
F _{CP}	Carga de ruptura pelo critério da carga de pico
F _{RL}	Carga de ruptura pelo critério do recalque limite
f _y	Tensão de escoamento do aço
H	Altura da camada de solo
k _b	Coefficiente de rigidez do grampo
k _f	Coefficiente de ancoragem
k _s	Coefficiente de reação horizontal
l _o	Comprimento de transferência de esforços
L _b	Comprimento ancorado do grampo
l _i	Leitura em cada intervalo de tempo
l _{pi}	Leitura parcial
n	Porosidade

N_{SPT}	Índice de resistência à penetração da sondagem SPT
q_s	Resistência ao cisalhamento de interface solo-grampo
q_{sadm}	Resistência ao cisalhamento admissível
q_{sCP}	Resistência ao cisalhamento pelo critério da carga de pico
q_{sRL}	Resistência ao cisalhamento pelo critério do recalque limite
S_u	Resistência ao cisalhamento aparente não drenada
T	Resistência à tração
t	Tempo
$T_{máx}$	Carga máxima de tração
U	Perímetro médio da seção transversal da ancoragem
v	Volume
W	Umidade
y	Deslocamento lateral do grampo
z	Coordenadas ao longo do grampo
α	Coefficiente redutor ao cisalhamento
ϕ	Ângulo de atrito
γ_w	Peso específico da água
ρ_w	Massa específica da água

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	Generalidades e justificativas	22
1.1.1	<i>Objetivo geral.....</i>	24
1.1.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	24
1.2	Estrutura da dissertação	25
2	REVISÃO DA LITERATURA	26
2.1	Histórico	26
2.2	Conceitos	27
2.3	Etapas de execução	29
2.3.1	<i>Escavação do talude.....</i>	29
2.3.2	<i>Instalação dos grampos</i>	31
2.3.2.1	Grampos cravados	31
2.3.2.2	Grampos injetados	32
2.3.2.3	Proteção contra corrosão	33
2.3.2.4	Geometria do grampo.....	33
2.3.3	<i>Injeção da calda.....</i>	34
2.3.3.1	Caracterização da calda de cimento	36
2.3.3.1.1	<i>Índice de fluidez.....</i>	38
2.3.3.1.2	<i>Vida útil.....</i>	39
2.3.3.1.3	<i>Resistência à compressão axial</i>	39
2.3.3.2	Tipos de Retração	40
2.3.4	<i>Proteção da face.....</i>	41
2.3.5	<i>Drenagem.....</i>	41
2.4	A técnica de grampeamento de solo	43
2.4.1	<i>Comparação com cortina atirantada e solo reforçado com geossintético</i>	44
2.5	Comportamento mecânico do solo grampeado	46
2.5.1	<i>Distribuição de tensões nos grampos.....</i>	47
2.5.2	<i>Resistência ao cisalhamento de interface solo-grampo.....</i>	48
2.5.2.1	Ensaio de arrancamento.....	49
2.5.2.2	Correlações empíricas.....	55
2.5.2.3	Método conforme ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006).....	56

2.5.3	<i>Resistência aos esforços cisalhantes e momentos fletores</i>	57
2.6	Tipos de ruptura	60
2.6.1	<i>Ruptura externa</i>	60
2.6.2	<i>Ruptura interna</i>	61
2.6.2.1	Ruptura dos grampos	61
2.6.2.2	Falta de aderência	61
2.6.2.3	Altura de escavação excessiva	61
2.6.2.4	Erosão regressiva (piping).....	62
2.6.3	<i>Ruptura mista</i>	62
2.7	Análise de estruturas de solo grampeado	62
2.7.1	<i>Métodos de análise</i>	64
2.7.1.1	Análise da estabilidade externa	65
2.7.1.2	Análise da estabilidade interna	66
2.7.2	<i>Roteiro para dimensionamento de estrutura em solo grampeado</i>	67
3	MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS	68
3.1	Materiais	70
3.1.1	<i>Cimento</i>	70
3.1.2	<i>Água</i>	72
3.1.3	<i>Aditivos</i>	72
3.1.3.1	Aditivo superplastificante: MC-PowerFlow 2150	72
3.1.3.2	Aditivo expensor: MC-Quellmittel	72
3.1.4	<i>Aço CA 50</i>	73
3.2	Equipamentos	73
3.2.1	<i>Funil de Marsh</i>	74
3.2.2	<i>Molde metálico</i>	75
3.2.3	<i>Rampa metálica</i>	76
3.2.4	<i>Centralizador em PVC</i>	78
3.2.5	<i>Misturador elétrico portátil</i>	80
3.2.6	<i>Triângulo metálico</i>	81
3.3	Métodos	82
3.3.1	<i>Caracterização do cimento Portland CP II E 32</i>	83
3.3.2	<i>Ensaio de tração do aço CA 50</i>	84
3.3.3	<i>Caracterização das caldas aditivada e convencional</i>	84
3.3.3.1	Medição da retração e expansão longitudinal	84

3.3.3.2	Calda aditivada.....	87
3.3.3.3	Calda convencional.....	88
3.3.4	Caracterização do talude experimental.....	88
3.3.4.1	Definição do talude.....	88
3.3.4.2	Ensaio de campo.....	90
3.3.4.2.1	<i>Sondagem SPT</i>	90
3.3.4.2.2	<i>Ensaio PMT</i>	93
3.3.4.3	Ensaio de laboratório.....	94
3.3.4.3.1	<i>Limites de Atterberg</i>	95
3.3.4.3.2	<i>Granulometria conjunta</i>	96
3.3.4.3.3	<i>Peso específico dos grãos</i>	97
3.3.4.3.4	<i>Cisalhamento direto</i>	97
3.3.4.3.5	<i>Compressão triaxial</i>	98
3.3.5	Execução dos grampos.....	98
3.3.5.1	Execução dos furos.....	99
3.3.5.2	Inserção das barras.....	103
3.3.5.3	Injeção das caldas.....	104
3.3.6	Ensaio de arrancamento.....	110
3.3.6.1	Acerto da face do talude.....	111
3.3.6.2	Montagem do painel de madeira e placa metálica.....	112
3.3.6.3	Macaco hidráulico e manômetro analógico.....	112
3.3.6.4	Travamento do macaco e instalação dos extensômetros.....	114
3.3.6.5	Layout das peças e equipamentos.....	115
3.3.6.6	Metodologia adotada.....	116
3.3.6.7	Procedimentos adotados.....	117
3.3.6.8	Critérios de ruptura adotados.....	118
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	120
4.1	Curvas Carga x Deslocamento.....	120
4.2	Estudos comparativos da resistência q_s.....	131
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	132
5.1	Sinopse e conclusões.....	132
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	133
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	134

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades e justificativas

No vasto campo da Engenharia Geotécnica, obras de contenção fazem parte de uma das demandas mais comuns e a instabilidade dos maciços terrosos representa um risco preocupante no processo de construção, sendo necessário, durante e após a conclusão da obra, o monitoramento do comportamento do maciço, além de vistorias preventivas ou mesmo corretivas ao longo da vida útil da estrutura de contenção.

O projeto e a execução de contenções são atividades inerentes aos profissionais especializados em geotecnia, dotados de conhecimento técnico para a realização da investigação, análise geotécnica e modelagem do maciço, imprescindíveis ao estudo da técnica mais favorável à estabilização, aliando segurança e economia.

No Brasil, a aplicação do solo grampeado iniciou-se na década de 70 e desde então, tem sido fortemente disseminado, devido às vantagens da técnica: economia; adaptabilidade durante a obra; utilização de equipamentos simples e de pequeno porte e rápida execução, quando comparada a outras técnicas de mesma eficiência, além do bom desempenho na estabilização de solos tropicais (JUNIOR, 2007).

O grampeamento de solo promove o reforço *in situ* de taludes naturais, cortes ou escavações, através da introdução de elementos passivos denominados grampos. Esses conferem ao maciço ganho de resistência à tração e aumento da resistência ao cisalhamento, através da mobilização do atrito entre a superfície do grampo e o solo circundante, denominado de resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo (q_s), parâmetro responsável pelo surgimento de tensões de tração nos grampos (CLOUTERRE, 1991).

Os grampos trabalham predominantemente à tração; quanto maior o valor da resistência q_s , melhor o desempenho dos reforços. São inclusões passivas por não receberem protensão. Para que haja a mobilização do atrito na interface solo-grampo são necessários pequenos deslocamentos entre ambos, que progridem à medida que o desconfinamento do solo é executado através das etapas de escavação, dado que o maciço tende a se deslocar no sentido da escavação (FRANÇA, 2007).

A resistência q_s , um dos principais parâmetros para elaboração de projetos de estruturas em solo grampeado, pode ser quantificada a partir de ensaios de arrancamento *in loco* ou estimada por meio de correlações empíricas propostas por alguns autores, como por exemplo: Clouterre (1991), Ortigão (1997) e Springer (2006),

que correlacionam o valor da resistência q_s com parâmetros obtidos pelos ensaios de simples reconhecimento (SPT) e pressiométricos tipo Ménard (PMT). Além desses, a resistência q_s pode ser estimada a partir de metodologia descrita na ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006): Execução de tirantes ancorados no terreno. É fundamental que os valores obtidos por correlações (fase de projetos), sejam comprovados por ensaios de arrancamento em campo, durante a fase de construção da obra (FRANÇA, 2007).

Existem dois tipos de grampos, o cravado e o injetado. O segundo é um elemento composto por barra de aço circundada por calda endurecida. Nota-se na literatura científica escassez de conteúdo sobre dosagens de caldas de cimento Portland para a injeção em grampos e, atualmente, não há uma normativa específica para tal. São utilizadas como referências a ABNT NBR 7681 (ABNT, 2013): Calda de cimento para injeção, concebida para a injeção de bainhas e dutos de armaduras de protensão de peças de concreto protendido, e a ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006).

A aplicação da calda de cimento na confecção dos grampos pode ser realizada por dois processos: injeção em fase única (denominada de preenchimento da bainha) e injeção em múltiplas fases. Os resultados de diversos estudos, como exemplo, Pitta et al. (2003), Souza et al. (2005) e Springer (2006), evidenciam que as reinjeções propiciam o preenchimento dos vazios existentes na superfície do grampo, causados pela retração da calda e por falha executiva durante o processo de injeção da bainha, conferindo aos grampos, ganho de rigidez e aumento da resistência q_s .

Em busca à literatura especializada, notou-se carência de estudos relativos à influência do traço da calda de cimento na resistência q_s . As pesquisas indicaram a necessidade de cuidados especiais nos processos executivos de perfuração, inserção da barra e injeção, de forma a garantir um completo preenchimento do furo pela calda, além do uso adequado do fator água/cimento (a/c), à incorporação de aditivos na mistura e à utilização de centralizadores para garantir um recobrimento homogêneo da barra de aço pela calda endurecida (PITTA, ZIRLIS, 2000).

Com o objetivo de promover aumentos na resistência q_s , via melhorias no contato solo-grampo e no processo executivo, neste trabalho é proposto o emprego de uma calda aditivada, combinado com o desenvolvimento e adoção de peças e equipamentos. Estes visaram favorecer a dosagem e a medição da retração em caldas, a execução de grampos homogêneos (mesmo diâmetro, comprimento e inclinação), o preparo das caldas em campo e o processo de enchimento das bainhas e, ainda, facilitar a realização dos ensaios de arrancamento.

Com a adoção desses dois procedimentos espera-se que no processo de injeção de bainha haja redução ou eliminação dos vazios na interface solo-grampo, decorrentes de retração da calda e/ou de falhas no processo executivo.

Inicialmente foi executada uma dosagem para obter o melhor traço da calda aditivada, sem retração e conforme requisitos descritos na ABNT NBR 7681 (ABNT, 2013) e ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006). No processo de dosagem variou-se o fator a/c e os percentuais dos aditivos, sendo o melhor traço definido a partir de tratamento estatístico dos dados. Para efeitos comparativos, também foi realizada uma dosagem de calda convencional (sem aditivos), na qual variou-se apenas o fator a/c .

Na etapa seguinte foram executados treze grampos com injeção de bainha, sendo seis injetados com calda aditivada e seis com calda convencional, além de um grampo teste. Após um período de cura de 45 dias, foram realizados os respectivos ensaios de arrancamento, para os quais foram obtidas as cargas de ruptura segundo dois critérios clássicos: carga de pico e carga correspondente ao recalque limite. A partir dos valores das resistências, q_s , determinadas nos ensaios foram realizados os estudos comparativos correspondentes aos dois tipos de calda utilizada.

1.1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo principal estudar a influência na resistência ao cisalhamento de interface solo-grampo, devido ao uso de calda aditivada e calda convencional, através de ensaios de arrancamento.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver e adotar peças e equipamentos que possam garantir maior uniformidade na execução dos grampos (mesmo diâmetro, comprimento e inclinação), propiciar melhorias no preparo das caldas em campo e no processo de enchimento das bainhas, facilitar a realização dos ensaios de arrancamento e viabilizar a medição da retração das caldas;
- Estudar um traço de calda de cimento Portland que elimine a retração através da incorporação de aditivos na mistura e que atenda aos requisitos

de fluidez, vida útil e resistência à compressão, tendo como referências a ABNT NBR 7681 (ABNT, 2013) e a ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006);

- Realizar ensaios de arrancamento em grampos com injeção de bainha, para fins comparativos da resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo, com o uso de calda aditivada e calda convencional.

1.2 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos e sete apêndices. O Capítulo 2, seguido ao Capítulo 1 introdutório, apresenta uma revisão da literatura sobre a técnica: histórico, conceituação, processo construtivo, vantagens e desvantagens, comparação com outras técnicas, mecanismos de comportamento, tipos de ruptura e métodos de análise da estrutura grampeada, além de um breve roteiro das etapas do dimensionamento do solo grampeado.

O Capítulo 3 trata do programa experimental. São apresentadas detalhadamente as etapas do experimento, através de um organograma contendo todas as atividades realizadas. Apresentam-se os valores obtidos na caracterização do cimento CP II E 32 e do aço CA 50, nas dosagens das caldas aditivada e convencional, nos ensaios de campo e de laboratório e na calibração do macaco hidráulico.

No Capítulo 4 são apresentadas as curvas Carga x Deslocamento dos grampos e feitas as discussões sobre os valores obtidos das resistências q_s , segundo os critérios de ruptura da carga de pico e do recalque limite. Por fim são apresentados os resultados de quatro estudos comparativos realizados da resistências q_s , em função do tipo de calda utilizada e dos critérios de ruptura adotados.

O quinto e último capítulo trata das considerações finais, onde são apresentadas a sinopse e as conclusões desta pesquisa, além das sugestões para trabalhos futuros.

Complementam este trabalho a relação das referências bibliográficas citadas no texto e sete apêndices: (A) caracterização do cimento CP II E 32 e do aço CA 50; (B) análise estatística realizada no software Minitab 18 para caracterização da calda aditivada e tabelas com os traços das caldas; (C) dados e curvas pressiométricas do ensaio PMT; (D) dados e gráficos do ensaio de cisalhamento direto; (E) dados e gráficos do ensaio de compressão triaxial; (F) dados da calibração do macaco hidráulico e da curva para verificação de significância estatística; (G) curvas dos testes de normalidade das resistências q_s obtidas pelos dois critérios de ruptura adotados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Histórico

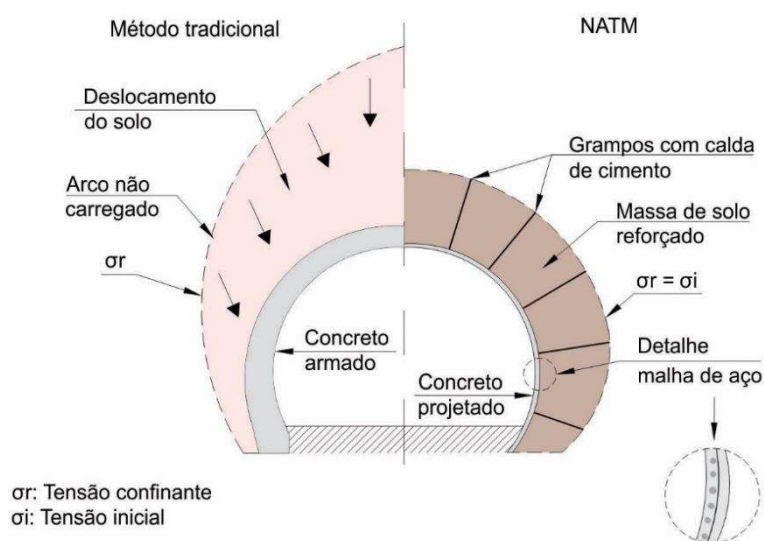
A técnica de solo grampeado teve sua origem associada ao processo NATM (New Austrian Tunneling Method), desenvolvido pelo professor Ladislau Von Rabcewicz entre os anos de 1945 e 1950, utilizado em construções de túneis na década de 70.

A funcionalidade do método NATM é atribuída à atenuação de forma controlada dos esforços atuantes no maciço. Através dos deslocamentos da massa de solo-rocha e mobilização da resistência interna do material, forma-se uma zona de deformação plastificada e reforçada pela interação entre o solo e o grampo (FEIJÓ, 2007).

Após a etapa de escavação, a cavidade fica submetida ao efeito do peso do maciço e das tensões confinantes. Para a estabilização, elementos metálicos de reforço (chumbadores curtos radiais) são introduzidos na zona plástica injetados com calda de cimento, e em seguida as paredes da escavação são revestidas com tela metálica e uma fina camada de concreto projetado (SARÉ, 2007).

Em contrapartida, no método convencional de execução de túneis, os deslocamentos do terreno são impedidos por uma espessa camada de concreto armado, de custo mais elevado, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Comparação da técnica NATM com o método tradicional



Fonte: Adaptado de Ortigão *et al.*, 1993.

Ortigão et al. (1993) alegaram que é possível relacionar o método NATM com a execução do solo grampeado, da mesma forma que a solução convencional de túneis se compara a uma cortina atirantada.

A primeira obra registrada em solo grampeado foi executada em 1972 na França com o nome de *sol clué*, que consistiu em um grampeamento e aplicação do concreto na face do talude ferroviário próximo à cidade de Versailles, onde foi feita a estabilização do corte de aproximadamente 18 m de altura (FLORIANO, 2009).

Em 1986, o governo da França financiou um projeto de pesquisa denominado Clouterre, cujo objetivo era promover o uso do solo grampeado através de recomendações e normalizações. O projeto envolveu estudos experimentais com muros-modelo e análise de dados dos ensaios realizados pelas empresas participantes. Os resultados destas análises contribuíram para produção de um volume contendo recomendações em 1991 (FRANÇA, 2007).

O grampeamento do solo no Brasil teve início na década de 70, de maneira intuitiva, por construtores de túneis com o processo NATM para estabilização do emboque do túnel de adução do sistema Cantareiras no estado de São Paulo. Segundo Pitta et al. (2003), entre 1983 e 2003 foram executados 72.763 m² de obras de solo grampeado, sendo 60% apenas entre 1996 a 2003.

2.2 Conceitos

O solo grampeado, conhecido como *soil nailing*, é uma técnica de reforço do solo *in situ* de taludes naturais, cortes ou escavações. Essa técnica consiste na introdução de elementos passivos de reforço, resistentes aos esforços de tração. Estes elementos, denominados grampos, podem ser barras de aço, barras sintéticas de seção cilíndrica ou retangular, microestacas, ou em casos especiais, estacas. São introduzidos horizontalmente (grampos cravados) ou sub-horizontalmente (grampos injetados revestidos com calda de cimento) (ORTIGÃO et al., 1993).

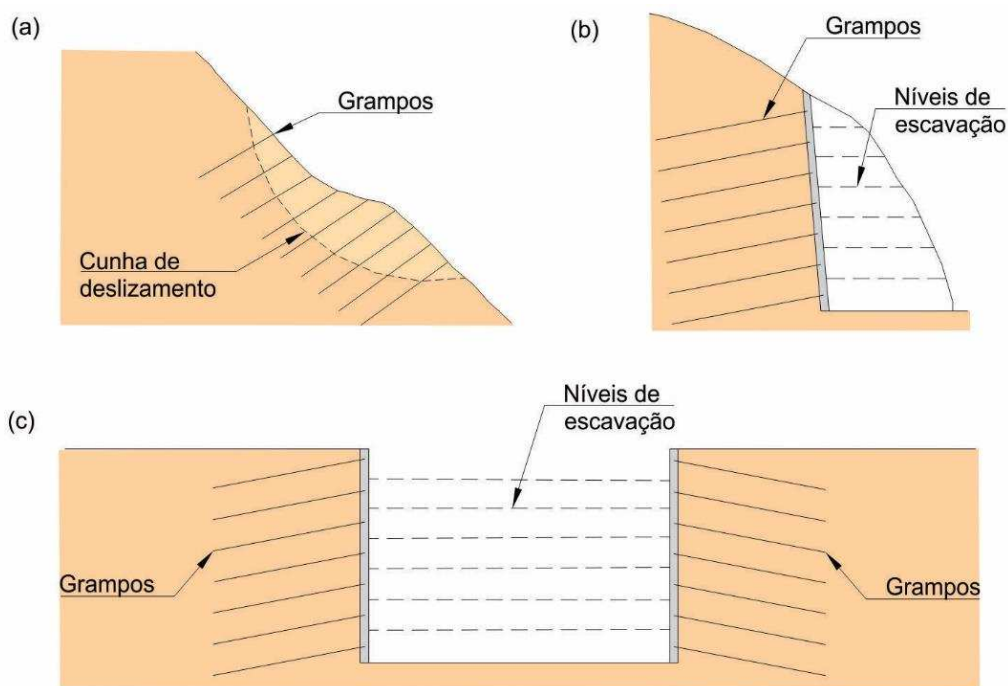
A função dos grampos é de reduzir os deslocamentos do maciço originados pelo acréscimo de forças internas que são contrárias ao sistema natural de acomodação da massa. Os deslocamentos laterais são gerados pela descompressão progressiva do solo, devido às etapas de escavação, ou pela configuração de ruptura do maciço (SARÉ, 2007).

Os reforços trabalham predominantemente à tração e a sua resistência está relacionada à mobilização do atrito na interface solo-grampo. Quanto maior o atrito entre esses materiais, melhor será o desempenho do grampo (SARÉ, 2007).

O solo grampeado pode ser aplicado em situações diversas, sejam em grandes ou em pequenas obras, tais como:

1. Reforço de talude natural em condição insatisfatória de estabilidade;
2. Corte de maciço terroso com geometria resultante instável para implantação de sistema viário, edificação em solo inclinado, cabeceira de ponte, entre outros;
3. Escavação de maciço para construção de obra subterrânea.

Figura 2 – Aplicações da técnica do solo grampeado



(a) Reforço de talude natural instável; (b) corte em talude; (c) escavação de subsolo.

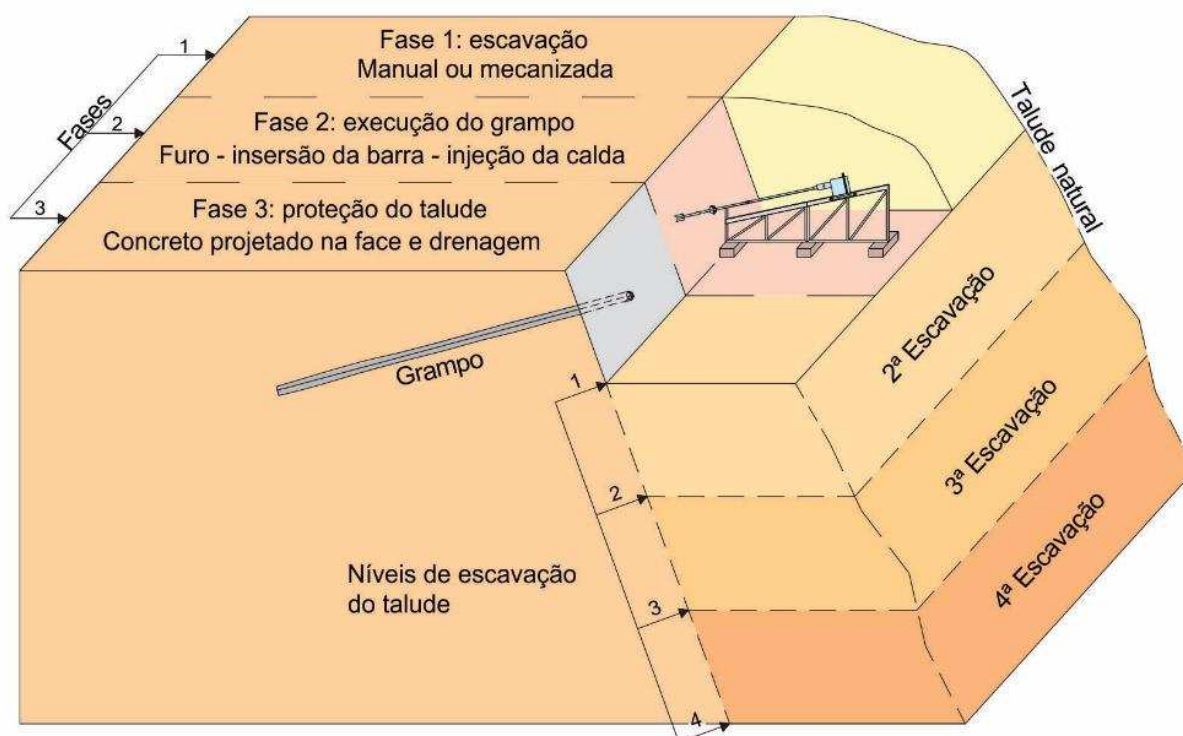
Fonte: Adaptado de Ortigão et al., 1993.

Na estabilização de taludes naturais, os reforços têm a função de reduzir os deslocamentos do solo instável, aumentando o seu fator de segurança. Nestes casos os grampos são instalados, em geral, perpendicularmente à superfície de ruptura e os esforços de cisalhamento e os momentos fletores atuantes não devem ser desprezados. Já nos casos de contenções de cortes e escavações, os esforços no grampo são basicamente de tração (SCHLOSSER, 1982 *apud* SILVA, 2005).

2.3 Etapas de execução

O processo construtivo do solo grampeado em cortes ou escavações consiste basicamente na escavação do maciço por camadas (etapas), instalação dos grampos, proteção da face e execução do sistema de drenagem (Figura 3). Para a estabilização de taludes naturais, o processo de escavação é dispensado, sendo realizado apenas a instalação dos grampos e a proteção da face (LIMA, 2009b).

Figura 3 – Fases construtivas do solo grampeado



Fonte: Autor

2.3.1 Escavação do talude

O processo de estabilização do maciço inicia-se pela escavação descendente, podendo ser realizada manual ou mecanicamente, de acordo com as condições geotécnicas do terreno. Ortigão et al. (1993) afirmam que este procedimento é feito em etapas, e a profundidade varia entre 1,0 e 2,5 m, conforme indicado na Tabela 1 em que Gässler (1990) propõe recomendações acerca da altura de escavação para os diferentes tipos de solo em cortes verticais. Após o término completo de um ciclo, inicia-se a escavação da próxima camada.

Tabela 1 – Altura de escavação para diferentes tipos de solo

Solo	Altura de escavação em cortes verticais (m)
Silte	1,2 a 2,0
Argila	1,5 (normalmente adensada) 2,5 (pré-adensada)
Areia	1,2 (medianamente densa com cimentação) 1,5 (densa com cimentação) 2,0 (cimentada)
Pedregulho	0,5 (com coesão aparente) 1,5 (cimentado)

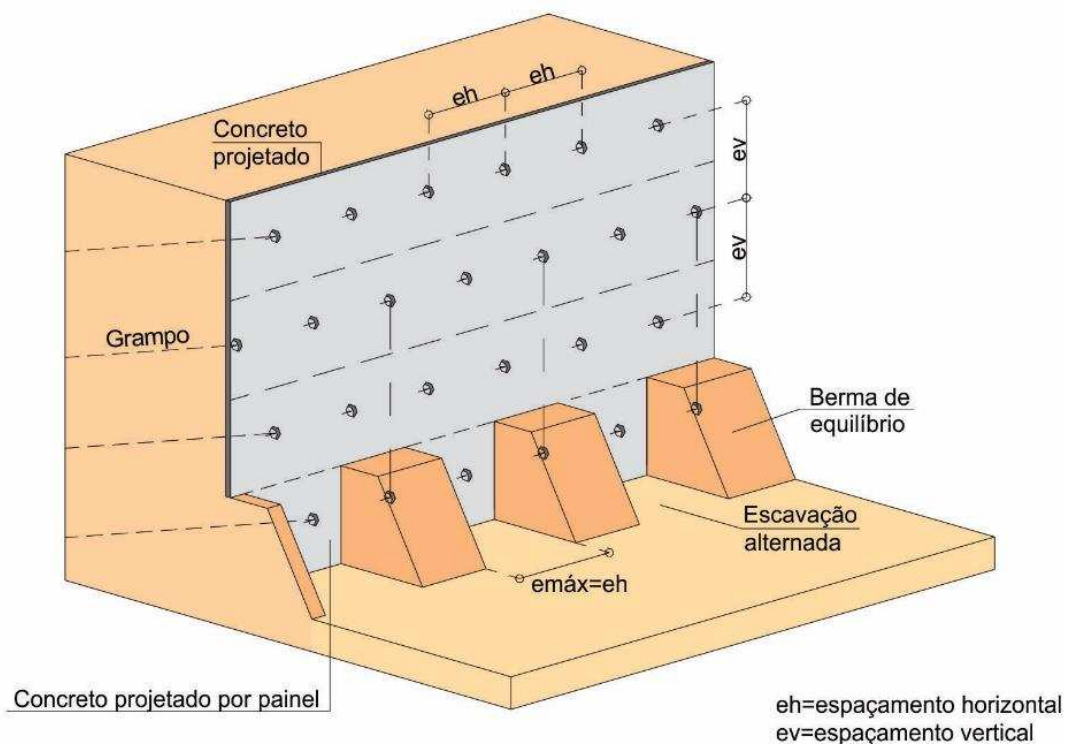
Fonte: Adaptado de Gässler, 1990.

O tipo de solo e a inclinação da face da escavação influenciam na altura de cada camada, dado que a superfície escavada deve permanecer estável até a execução da proteção da face. Por esta razão, os equipamentos utilizados para a escavação devem causar o mínimo de desordem no maciço, e havendo áreas desagregadas de solo na superfície escavada, essas devem ser retiradas e tratadas adequadamente (SPRINGER, 2001).

Ortigão et al. (1993) propõem que para a escavação prosseguir normalmente, o material a ser escavado deve apresentar uma resistência ao cisalhamento aparente não drenada (S_u) mínima de 10 kPa para se manter estável. Essa resistência é obtida na maioria dos solos argilosos e arenosos, mesmo em areias puras úmidas, devido ao efeito da capilaridade. Em contrapartida, terrenos compostos por areias secas, sem cimentação entre grãos ou em solos argilosos muito moles, este processo dificilmente teria êxito.

França (2007) sugere algumas recomendações para execução da técnica em solos com comportamento geotécnico limitado, como o umedecimento de solos secos não coesivos, o pré-jateamento em concreto da face recém-escavada e a escavação em trechos horizontais intercalados (em *slots*) criando bermas de equilíbrio (Figura 4).

Figura 4 – Execução do solo grampeado em escavações intercaladas



Fonte: Autor

2.3.2 Instalação dos grampos

Os grampos devem ser executados imediatamente após a escavação. As formas mais comuns de instalação dos grampos são a cravação ou a perfuração, seguida da inserção da barra e injeção de calda de cimento. A inserção dos grampos no solo pode ser feita na direção horizontal (grampos cravados) ou levemente inclinada para o caso de grampos injetados, permitindo a injeção satisfatória da calda de cimento por gravidade, sendo imprescindível o preenchimento completo do furo (LIMA, 2009a).

2.3.2.1 Grampos cravados

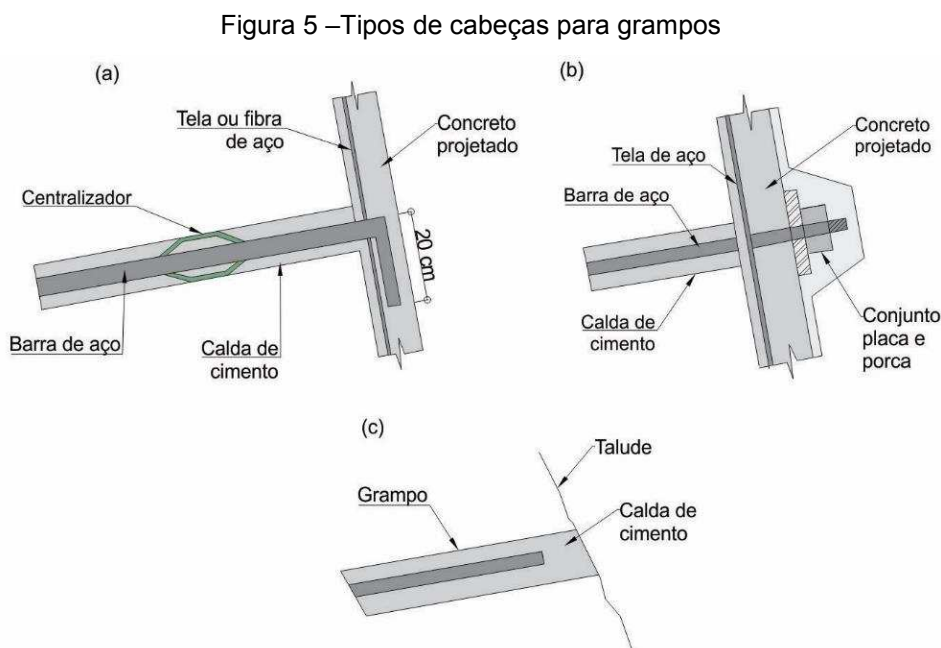
De acordo com Lima (2009b), os grampos cravados são inseridos no maciço manualmente ou com o auxílio de equipamentos mecânicos, como martelos pneumáticos ou hidráulicos. Não é necessário passar pela etapa de perfuração, tampouco aguardar a cura da calda de cimento, e por este motivo, esta técnica é simples e de rápida execução, uma vez que é feita a cravação direta de elementos metálicos, tais como barras ou tubos de aço (FRANÇA, 2007). Em contrapartida, o processo de cravação no solo em obras permanentes torna-se inadequado, em virtude da dificuldade de proteger os grampos contra corrosão, limitando a vida útil da obra.

2.3.2.2 Grampos injetados

Ortigão et al. (1993) afirmam que o processo de injeção é mais usual. Inicia-se com a perfuração do solo, executando furos de diâmetro entre 50 e 100 mm, com auxílio de equipamentos mecânicos ou trados manuais. Com o objetivo de facilitar a perfuração é comum o uso de fluidos como água ou ar comprimido, e caso necessário, de lama bentonítica para estabilizar as paredes do furo (FRANÇA, 2007), entretanto, Springer (2006), não a recomenda, já que o seu uso poderia reduzir o atrito entre o solo e o reforço. Acrescenta que os furos pré-lavados produzem grampos de maior rigidez e resistência ao arrancamento (na ordem de 27%) que os furos não lavados.

Executada a perfuração, o processo segue com a montagem e a inserção das barras, cujos diâmetros variam normalmente entre 12,5 e 25 mm (ORTIGÃO et al., 1993). França (2007) recomenda o uso de centralizadores, de modo a garantir a continuidade e o posicionamento adequado da barra de aço no centro do furo, garantindo o recobrimento especificado em projeto. É necessário garantir a fixação do centralizador à barra para evitar o seu deslocamento durante a inserção no furo. Em seguida injeta-se a calda de cimento.

Conforme Silva (2010), as barras de aço normalmente são dobradas a 90°, com 20 cm de sua extremidade livre. Apresenta-se na Figura 5 as práticas mais usuais de conexão dos grampos à estrutura de faceamento.



(a) Embutida por dobra no aço; (b) fixada por placa metálica, rosca e porca; (c) sem ancoragem.

Fonte: Adaptado de Silva, 2010.

Entre as opções apresentadas, destaca-se que a fixação através de rosca e porca pode mobilizar maiores tensões nos grampos junto à face. Em contrapartida, com a aplicação de uma leve protensão, promove-se uma melhor interação inicial entre o reforço e o solo, principalmente em casos de pequenos vazios na interface, o que tende a reduzir o deslocamento lateral do maciço.

Pitta e Zirlis (2000) constataram a importância de uma correta injeção da calda na execução dos grampos, atentando-se ao uso adequado da relação água/cimento, à incorporação de aditivos na mistura, utilização de centralizadores e tubos auxiliares para injeção. Por meio de estudos, comprovaram uma melhora em torno de 50% na aderência do contato entre o solo e o grampo com a calda de cimento injetada adequadamente no furo, quando comparado aos grampos cravados.

2.3.2.3 Proteção contra corrosão

A calda de cimento age como proteção primária aos grampos contra a corrosão (TURNER, 2004). Conforme Lazarte et al. (2015), a injeção de calda de cimento, devido à sua baixa permeabilidade, fornece proteção contra a corrosão química e física e ao ambiente alcalino criado ao redor da barra de aço. A proteção química presente na calda previne e atrasa a ação dos carbonatos e cloretos do solo e evita o contato do oxigênio e umidade do ar com o aço. Em ambientes agressivos não se pode utilizar apenas a calda como proteção, sendo necessário uma proteção extra, diante de algum nível de fissuração esperada.

De acordo com a ABNT NBR 11682 (ABNT, 2009a): Estabilidade de taludes, devem ser atendidas as condições de proteção anticorrosiva indicadas na ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006, 2018a): Execução de tirantes ancorados no terreno.

Além da proteção oferecida pela calda de cimento, pelos tubos de plástico ou metálico, as barras metálicas poderão receber tratamento anticorrosivo através de pintura, sendo os mais utilizados resinas epóxi ou proteção eletrolítica (SPRINGER, 2006).

2.3.2.4 Geometria do grampo

De acordo com Springer (2001), a altura e ângulo de inclinação da face do talude, o tipo e a quantidade de grampos, a resistência mobilizada no contato solo-grampo e

as variáveis ambientais, são fatores que influenciam no comprimento, diâmetro, ângulo de instalação e espaçamentos horizontal (e_h) e vertical (e_v) entre os grampos.

Embora os grampos sejam mais eficientes no controle de deslocamentos laterais da estrutura quando instalados horizontalmente, geralmente, os grampos são dispostos em linhas e suavemente inclinados em relação à horizontal, adotando-se ângulos de inclinação entre 5 a 15° (SPRINGER, 2001). Contudo, Lazarte et al. (2003) afirmam que a inclinação do grampo abaixo de 10° não deveria ser utilizada, devido ao potencial de criação de vazios na calda de cimento. Os vazios afetam a capacidade de carga do grampo e reduzem a proteção contra a corrosão provida pela calda.

Springer (2001) sugere que os grampos sejam executados com o mesmo diâmetro, comprimento e ângulo de inclinação. A utilização de diferentes inclinações é justificada diante de interferências, como por exemplo, presença de fundações de edificações vizinhas, redes de esgoto e drenagem pluvial, cabos, entre outros.

2.3.3 Injeção da calda

O processo de injeção da calda de cimento pode ser realizado por qualquer fluido cimentante, sendo comum o emprego da calda de cimento para solos e resinas epóxi para materiais rochosos, principalmente em locais de difícil acesso (SOLOTRAT, 2015).

A aplicação da calda de cimento na confecção dos grampos pode ser realizada, basicamente, por dois processos: injeção em fase única (denominada de preenchimento da bainha, região entre as paredes do furo e a barra de aço) e injeção em múltiplas fases. Neste caso, após a cura de 12 horas da bainha, são executadas as injeções das demais fases, sendo necessária, para cada fase de injeção, a inserção prévia (juntamente com a barra de aço do grampo) de tubulação acessória, provida de válvula manchete. Esta peça tem a função de impedir o retorno da calda à bomba e rompe-se em ponto vulnerável com a aplicação da pressão de injeção na faixa de 2,0 a 3,0 MPa.

Springer (2006) afirma que o processo de injeção da bainha (1ª injeção) é executado com o auxílio de tubulação acessória, cuja extremidade é posicionada na parte inferior da perfuração, de modo que a injeção da calda, por gravidade, ocorra de baixo para cima, preenchendo totalmente o furo. Lazarte et al. (2015) acrescentam que a retirada da mangueira de injeção deve ser controlada para garantir que a ponta

sempre esteja abaixo da superfície da calda de cimento. Recomendam-se que esta injeção seja feita a baixas pressões, aproximadamente 0,5 MPa.

Souza et al. (2005), após a exumação de grampos executados em fase única, observaram que as peças apresentaram vazios em grande parte do seu comprimento, devido à retração, prejudicando o atrito na interface solo-grampo. Pitta et al. (2003) relataram que em grampos com injeção da bainha e mais duas fases de injeção, os vazios foram preenchidos, houve aumento do confinamento, preenchimento de fissuras e melhora sensível nas características geotécnicas do maciço.

Beloni (2010), no estudo da resistência q_s em doze grampos injetados somente com a bainha, constatou que duas peças apresentaram valores desta resistência muito abaixo das demais. Após a exumação de uma delas, observou que em alguns pontos a calda apresentava problemas de vazios, além de pontos falhos no contato solo-grampo. O autor atribuiu o ocorrido, provavelmente, a um erro executivo durante a injeção, causado pela retirada prematura da mangueira e/ou pela alta velocidade de lançamento imposta, que não permitiu uma acomodação adequada da calda na cavidade do furo.

Após a realização de 25 ensaios de arrancamento, Springer (2006) concluiu que os grampos reinjetados (bainha + 1 injeção), executados em solo residual maduro, obtiveram um ganho de, aproximadamente, 37% na resistência q_s em relação ao grampo com injeção somente da bainha. Já em solo residual jovem, este percentual foi em torno de 27%. Acrescentou que os grampos reinjetados apresentaram-se mais rígidos que os grampos executados somente com a injeção da bainha.

Os estudos evidenciam que as reinjeções propiciam o preenchimento de vazios causados pela retração e por falhas executivas na injeção das caldas. Favorecem a selagem de fissuras e um ganho de rigidez no grampo, além do aumento significativo na resistência ao cisalhamento de interface solo-grampo.

Em buscas em literaturas especializadas, não foram encontrados estudos sobre a influência do uso simultâneo de aditivos expansor e plastificante nas caldas, para redução, ou mesmo eliminação desses vazios na injeção da bainha, em vez de se executar as reinjeções. Esses aditivos são capazes de eliminar a retração da calda e melhorar a resistência à compressão, mantendo uma fluidez satisfatória, com redução significativa do fator água-cimento.

Estudos realizados por Anagnostopoulos (2014) utilizando aditivo superplastificante, concluíram que sua utilização na calda de cimento proporcionou

uma redução de até 30% de água na mistura durante o preparo, aumento da trabalhabilidade, melhor hidratação da pasta de cimento e redução da retração.

2.3.3.1 Caracterização da calda de cimento

A calda de cimento é caracterizada como uma suspensão química de partículas sólidas de cimento e mistura de água. Dependendo do teor de água, pode-se atingir o comportamento de um fluido viscoso, até um material com atrito. As propriedades como viscosidade e atrito interno são desejáveis para garantir a trabalhabilidade e boa performance durante o processo de injeção, e dependem do fator a/c (água/cimento), tamanho dos grãos e formato (DOMES, 2015).

Não há normalização específica para a dosagem da calda de cimento para solo grampeado. Por este motivo é recomendado o uso da ABNT NBR 7681 (ABNT, 2013), concebida para o preenchimento de bainhas e dutos de armaduras de protensão de peças de concreto protendido, em conjunto com a ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006, 2018a), diante da especificidade da primeira.

Segundo a ABNT NBR 7681-1 (ABNT, 2013), o cimento a ser empregado deve atender aos seguintes requisitos:

- teor de cloro proveniente de cloretos menor ou igual a 0,10%;
- teor de enxofre proveniente de sulfetos menor ou igual a 0,20%;
- temperatura máxima para aplicação de 40°C.

Em nota, a ABNT NBR 7681 (ABNT, 2013) não recomenda a utilização dos cimentos Portland CP II E e CP III na produção de calda de cimento para a injeção em bainhas de protensão, por conterem teores de enxofre na forma de sulfeto, historicamente maiores que o percentual limite de 0,20%. Porém, pela ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006, 2018a), não há nenhuma restrição quanto à utilização de qualquer cimento Portland.

A ABNT NBR 7681-1 (ABNT, 2013) recomenda a adoção do fator a/c da calda de cimento menor ou igual a 0,40, enquanto que a ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006) recomenda um fator a/c = 0,50 para injeção da bainha, sendo aceita outra dosagem, desde que comprovada por ensaios específicos, uma resistência aos 28 dias superior à 25 MPa e de 15 MPa segundo a ABNT NBR 5629 (ABNT, 2018a). Para as injeções posteriores, o fator a/c pode variar entre 0,50 e 0,70.

É importante atentar-se quanto à escolha da relação água/cimento, uma vez que o excesso de água causa exsudação e aumento da retração, além da redução da resistência e da durabilidade da peça. Durante a mistura, a temperatura deve ser controlada e a calda, imediatamente após a sua fabricação, deve ser submetida aos ensaios descritos na ABNT NBR 7681-1 (ABNT, 2013) para análise do índice de fluidez, vida útil, expansão, exsudação e resistência à compressão.

Segundo Ortigão (1997) o fator água/cimento empregado na dosagem das caldas deve propiciar fluidez satisfatória para garantir o perfeito preenchimento do furo, além de resistência suficiente para garantir uma rigidez ao grampo. A utilização de aditivo expensor na calda evita a retração e, conseqüentemente, melhora o atrito na interface solo-grampo.

Segundo a ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006, 2018a), em caldas de cimento não é permitido o uso de aditivos que contenham agentes agressivos e somente podem ser utilizados se comprovado que não atacam quimicamente nenhum dos elementos constituintes da barra de aço durante sua vida útil. Essa norma ainda acrescenta que, com o uso de aditivos, devem ser respeitados os novos tempos de cura indicados pelos fabricantes.

O endurecimento da calda de cimento é acompanhado pela retração e processo de redução de volume da massa da calda. A utilização de aditivos é realizada para incorporar propriedades físicas e mecânicas desejadas, bem como alcançar a estabilidade esperada da massa ensaiada (AZADI et al., 2017). Como exemplo, busca-se melhorar a fluidez, reduzir o fator a/c, eliminar a retração e aumentar a resistência à compressão de uma calda de cimento com o uso simultâneo de dois aditivos: superplastificante e expensor (incorporador de ar).

Os ensaios de compatibilidade entre cimento e aditivo são relevantes para estabelecer o ponto de saturação ótimo de aditivos em caldas de cimento, assegurando a obtenção de melhor fluidez, sem exsudação, a qual ocasiona a maior parte da retração do material.

Aitcin et al (1994 *apud* MONTEIRO et al, 2012) afirmam que existe um teor máximo de aditivo capaz de desenvolver aumento da fluidez, denominado de ponto de saturação, e pode ser definido a partir de ensaios em calda de cimento. O procedimento para determinar o ponto de saturação, consiste em variar o teor de aditivo, realizando-se as medições em cada ponto. A saturação ocorre quando o

aumento no teor de aditivo não promove mais alterações significativas no resultado dos ensaios.

2.3.3.1.1 Índice de fluidez

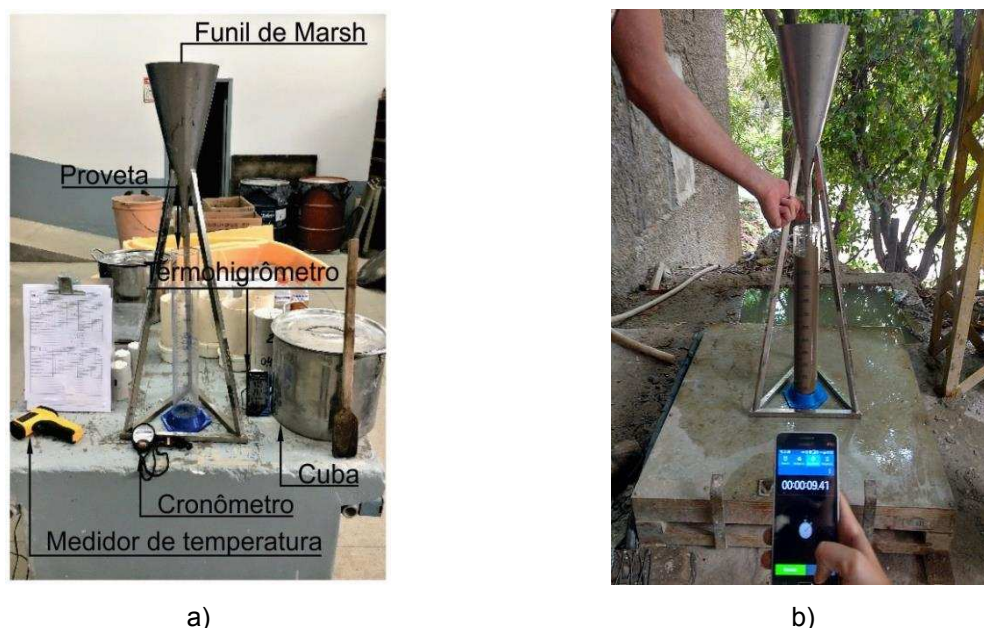
Conforme a ABNT NBR 7681-2 (ABNT, 2013), o índice de fluidez é o tempo, em segundos, que 1000 cm³ de calda levam para escoar pelo funil de Marsh. O índice de fluidez da calda, imediatamente antes de ser injetada, não deve exceder o tempo de 12 s. Para medição desse tempo foi utilizada uma proveta de 1000 ± 10 cm³ e um cronômetro com precisão de 0,01 s. O volume mínimo da amostra a ser ensaiada é de 3000 cm³ e deve ser utilizado em seu preparo, recipiente com tampa e sem reentrâncias, com capacidade mínima de 10000 cm³, isento de substâncias que possam alterar as características da calda.

Inicialmente no preparo da calda, conforme a ABNT NBR 7681-1 (ABNT, 2013), deve-se introduzir a água no recipiente de mistura e acionar o misturador a baixa rotação. Adiciona-se o cimento gradualmente, não permitindo o ingresso de grandes massas. Aumenta-se a rotação para o mínimo de 1200 rpm e após 1 min e 30 s, adicionam-se os aditivos e deixa-se o misturador girar por, no mínimo, mais 3 min e 15 s, totalizando 4 min e 45 s ou até que se atinja a fluidez de aplicação desejada.

Na realização deste ensaio deve-se umedecer inicialmente as paredes internas do funil de Marsh, utilizando-o na condição que não apresente gotejamento. O funil deve ser apoiado em local adequado e nivelado, livre de vibrações, que facilite o seu preenchimento e favoreça a leitura na proveta (Figura 6a).

A seguir descreve-se as etapas do ensaio: posiciona-se a proveta sob o funil com os eixos coincidentes e obstrui-se manualmente o seu bico com o dedo indicador. Preenche-se lentamente o funil até atingir a borda (volume de 1800 ± 50 cm³), passando previamente a calda por uma peneira com abertura de malha de 2,36 mm. Retira-se o dedo e deixa-se a calda escoar livremente. Ao atingir o fundo da proveta, inicia-se a contagem do tempo necessário para o preenchimento do volume de 1000 cm³ (Figura 6b).

Figura 6 – Equipamentos e realização de teste de fluidez



(a) Equipamentos para o teste do índice de fluidez; (b) realização de teste de fluidez.

Fonte: Autor.

2.3.3.1.2 Vida útil

De acordo com a ABNT NBR 7681-2 (ABNT, 2013), a vida útil da calda é o tempo necessário para que 1000 cm^3 da mistura escoe pelo funil de Marsh, sem ultrapassar o valor de 12 s, em medições sucessivas, a intervalos máximos de 30 min, contados a partir do término do preparo da calda. Não é admitida calda que não tenha vida útil mínima de 30 min. O ensaio deve ser realizado com a mesma amostra reservada e ensaiada anteriormente.

Entre as determinações sucessivas do índice de fluidez, o recipiente deve permanecer tampado e a calda mantida em repouso, devendo ser homogeneizada imediatamente antes da realização de cada intervalo do ensaio, com o auxílio de uma haste de madeira ou metálica.

2.3.3.1.3 Resistência à compressão axial

A obtenção da resistência à compressão simples é efetuada conforme a ABNT NBR 7215 (ABNT, 1996): Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. A tensão mínima deve ser de 25 MPa aos 28 dias, segundo a ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006). Na versão atualizada em 2018, a tensão mínima foi reduzida para 15 MPa.

De acordo com a ABNT NBR 7681-4 (ABNT, 2013), a calda deve ser coletada no recipiente de estocagem imediatamente após o término do seu preparo e, em seguida, deve ser passada na Peneira nº 8 (malha de 2,36 mm). O volume da amostra deve ser no mínimo 1,5 vezes o necessário para a moldagem de seis corpos de prova cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Devem ser moldados em local abrigado, sobre superfície horizontal, não sujeita a vibração ou choques, onde devem permanecer nas primeiras 24 horas.

A moldagem dos corpos de prova deve ser efetuada imediatamente após o preparo da calda. Com um recipiente de capacidade superior a do molde, verte-se a calda lentamente, em uma só etapa. Decorridas 24 horas, procede-se a desmoldagem. Posteriormente, armazena-se os corpos de prova imersos no tanque de água para cura, onde devem permanecer até a data de ruptura.

2.3.3.2 Tipos de Retração

Os materiais compostos por cimento Portland apresentam três tipos de retração: química, autógena e plástica. Na retração química, também chamada de contração de Le Chatelier, ocorre uma diminuição do volume absoluto, que é a soma dos compostos sólidos e líquidos de uma mistura (VIEIRA, 2018). Os reagentes, cimento e água, passam a apresentar um volume menor nos produtos gerados durante o processo de hidratação da pasta (SILVA, 2007 *apud* BENTUR, 2002).

A retração autógena, que também possui caráter químico, é verificada junto ao início do tempo de pega, onde conseqüentemente o fenômeno de autodessecação (mecanismo responsável pela retração autógena), também se inicia. Esse processo consiste na migração da água presente nos poros da pasta de cimento para auxiliar na reação de hidratação, ocorrendo uma redução do volume aparente que se caracteriza pela soma das fases sólidas e líquidas mais o volume de vazios (SILVA, 2007).

Um dos fatores que pode afetar a retração autógena é o fator *a/c*. A utilização de uma relação água-material cimentante menor, é um dos agentes mais agravantes, porém, aumentar a relação *a/c* não é uma opção benéfica, já que reduz a resistência. Silva (2007) considera determinante a utilização de aditivos na massa para melhorar a fluidez e reduzir a retração, sem prejudicar a resistência.

De acordo com Mehta e Monteiro (2006), a retração plástica ocorre devido à saída de água decorrente da exsudação, fenômeno que ocorre após o início da pega

com a mistura ainda fresca, ou seja, em estado plástico e se limita ao tempo de 48 horas após o preparo da composição. A água que não foi utilizada nas reações de hidratação sobe para a superfície, separando-se do restante do material.

Existem fatores externos agravantes que aceleram este processo, como a infiltração da água exsudada no solo, absorção da mesma por formas de madeira, ação do vento, baixa umidade e temperatura ambiente elevada. A principal característica que demonstra que a exsudação ocorreu de forma brusca e elevada é o surgimento de fissuras de retração ao longo da estrutura, comprometendo-a permanentemente.

2.3.4 Proteção da face

A proteção é executada através de jateamento de concreto com espessura entre 5 e 10 cm sobre uma malha metálica. A utilização de tela eletrossoldada é a forma mais tradicional no revestimento da face, entretanto, a malha de aço tem sido substituída por fibras metálicas adicionadas diretamente na betoneira, sob forma de uma mistura homogênea. As fibras reduzem o tempo de execução do faceamento e a espessura do concreto projetado, viabilizando o seu uso (LIMA, 2009b).

O revestimento da face do talude não possui função estrutural, no entanto, é responsável pela estabilização do faceamento, pois absorve pequenos carregamentos, impede rupturas localizadas e o protege contra processos erosivos causados pelas intempéries (SILVA, 2010).

Saramago et al. (2005) afirmam que a utilização de blocos pré-moldados se tornou um grande aliado para a técnica, pois acrescenta uma vantagem estética à obra, uma vez que possibilita a execução do faceamento com um acabamento mais satisfatório.

2.3.5 Drenagem

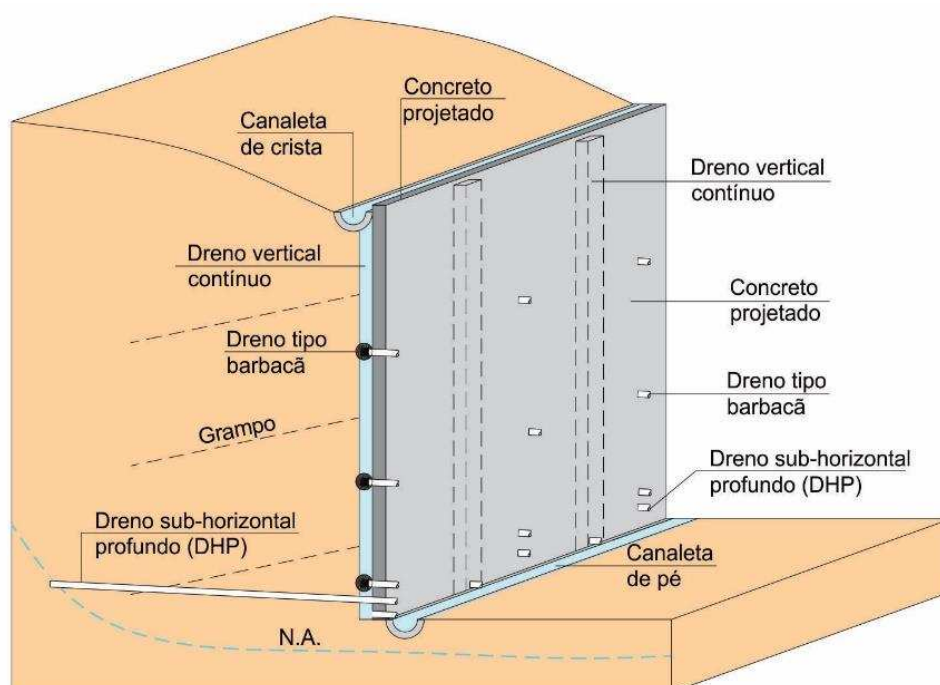
A técnica de grampeamento do solo é recomendada somente acima do nível d'água (N.A.). A presença da água, além de reduzir o atrito na interface solo-grampo, promove a corrosão das barras, reduzindo a resistência da estrutura e sua vida útil. Diante da incidência inevitável das chuvas no solo é imprescindível que a estrutura esteja protegida por um sistema de drenagem eficiente, que impeça a geração de poropressão no interior do maciço, caso contrário, carregamentos na face podem

causar deslizamento ou ruptura do solo (SPRINGER, 2001). Para garantia da estabilidade da obra ao longo de sua vida útil, recomenda-se a execução de drenagem profunda com drenos sub-horizontais (DHP) e drenagem de superfície com drenos tipo barbacã, drenos lineares contínuos e canaletas.

Segundo Lima (2009), os drenos profundos devem ser mais compridos que os grampos de forma a protegê-los, com a função de captar as águas distantes da face do talude e conduzi-las às canaletas localizadas no lado externo. Processos de colmatação nos drenos podem ocorrer com frequência, por isso, manutenções periódicas devem ser realizadas para verificação da eficiência do sistema.

Os drenos tipo barbacã são responsáveis por uma drenagem pontual e devem ser projetados para abranger toda a superfície do faceamento (LIMA, 2009a). De acordo com França (2007), os drenos lineares contínuos são colocados na direção vertical atrás da parede do paramento, da crista até o pé do talude. Na crista e no pé do paramento devem ser previstas canaletas (moldadas in loco ou pré-moldadas) para receberem as contribuições da parte superior do talude e dos drenos tipo barbacã, verticais contínuos e sub-horizontais, conforme indicado na Figura 7.

Figura 7 – Sistemas de drenagem profunda e de superfície



Fonte: Autor

2.4 A técnica de grampeamento de solo

A técnica de grampeamento tem sido utilizada frequentemente por apresentar uma série de prós em relação às outras técnicas de contenção do solo. Dentre as vantagens, pode-se citar:

- Economia: o maciço terroso é utilizado como elemento estrutural e os grampos têm o preço relativamente baixo. O revestimento da face com concreto projetado sem função estrutural propicia uma camada esbelta, o que reduz consideravelmente o consumo de material. Trata-se de obra de rápida execução, que acarreta certa diminuição nos custos com mão-de-obra (LIMA, 2009a). Possibilita a execução de muros inclinados no sentido do terreno, o que melhora a estabilidade global da estrutura e reduz as perdas de material no revestimento da face (FRANÇA, 2007);
- Equipamentos: são necessários poucos equipamentos e de pequeno porte, que produzem pouco ruído e permitem a execução em áreas urbanas, onde há limitações de acesso, vibrações e ruídos (SARÉ, 2007);
- Velocidade de execução: a sequência executiva permite que serviços sejam executados simultaneamente (escavação, execução dos grampos e revestimento da face). A utilização do concreto projetado confere uma melhor velocidade à obra (LIMA, 2009b);
- Adaptação do projeto: as estruturas em solo grampeado podem sofrer adaptações juntamente com o andamento da obra. Espaçamentos entre grampos, altura das etapas de escavação e comprimento dos reforços são alguns exemplos de parâmetros que podem ser alterados ao longo da execução (LIMA, 2009b).

As principais limitações do grampeamento estão relacionadas ao tipo do terreno, nível do lençol freático e à flexibilidade da estrutura. Podem ser citadas as seguintes desvantagens:

- Tipo de solo: no intervalo entre a etapa de escavação e a proteção (revestimento) da face, é necessário que o solo mantenha-se estável e para isso, deve apresentar algum tipo de coesão ou cimentação e atrito entre os grãos (LIMA, 2009a). Por isso, em areias puras e secas e argilas moles, o grampeamento não é recomendado (FRANÇA, 2007);

- Nível d'água: a técnica não é recomendada em escavações abaixo do N.A. A execução se torna dificultosa com probabilidade elevada de surgimento de instabilidades e de redução da vida útil dos grampos por corrosão (FRANÇA, 2007), além da redução do atrito solo-reforço;
- Flexibilidade: a principal desvantagem citada por Ortigão et al. (1993), refere-se aos deslocamentos horizontais provocados pela flexibilidade inerente à concepção da técnica. Para reduzi-los é imprescindível a aplicação do grampeamento logo após a escavação, além de estimar, antecipadamente, a magnitude dos mesmos, de forma a evitar danos às estruturas vizinhas.

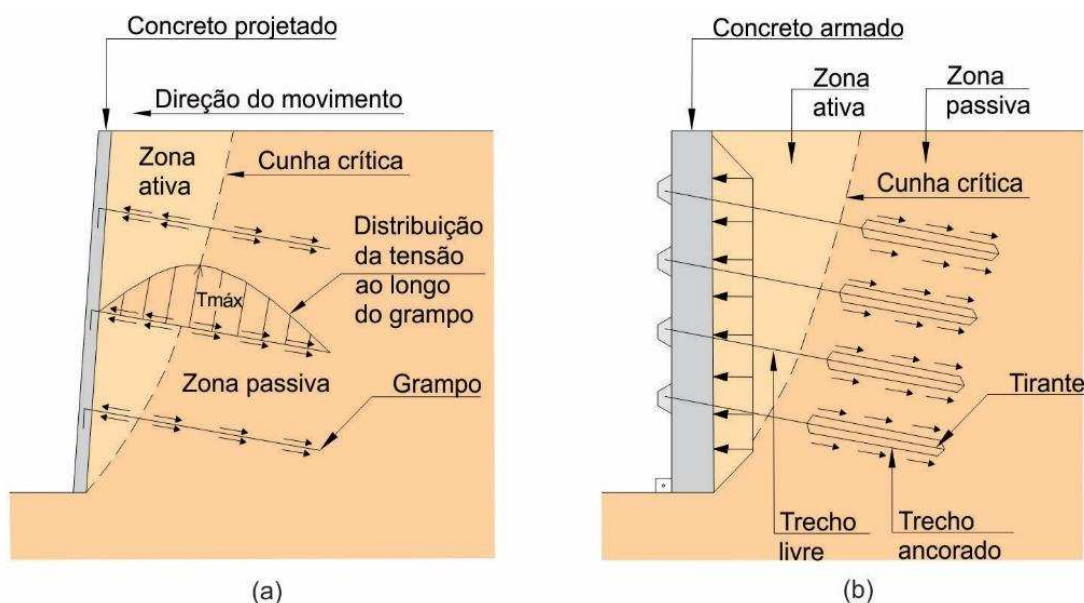
2.4.1 Comparação com cortina atirantada e solo reforçado com geossintético

Os grampos são intervenções com mobilização passiva, uma vez que só desenvolvem esforços após o deslocamento do solo, porém, podem ser submetidos a uma leve protensão (grampos fixados com placa metálica, rosca e porca), com a finalidade de garantir a ligação com o concreto projetado, principalmente em paramentos verticais (ORTIGÃO et al., 1993), além de propiciar uma mobilização inicial no atrito solo-grampo, antes das etapas posteriores de escavação. Já os tirantes apresentam mobilização ativa, pois são pré-tensionados com cargas elevadas, visando a prevenção dos deslocamentos da cortina (FEIJÓ, 2007).

As paredes das cortinas são geralmente em concreto armado moldadas na vertical com grandes espessuras (15 a 30 cm), elevada taxa de aço e são dimensionadas para absorverem esforços elevados de punção junto aos tirantes. Já as paredes do solo grampeado são normalmente moldadas em concreto projetado, podendo ser executadas na vertical ou inclinada com espessuras reduzidas (5 a 10 cm) e baixa taxa de aço; não têm função estrutural, mas são capazes de absorverem pequenos carregamentos.

De acordo com Ortigão et al. (1993), os grampos, ao contrário das ancoragens, não possuem trecho livre. A transferência de tensões para o solo é feita ao longo de todo o seu comprimento, enquanto que nos tirantes a transferência é realizada somente pela zona passiva (resistente), por esta razão, as distribuições de tensões na massa de solo são diferentes (Figura 8).

Figura 8 – Mecanismos de transferência de tensões no solo grampeado e na cortina



(a) Muro em solo grampeado; (b) cortina atirantada.

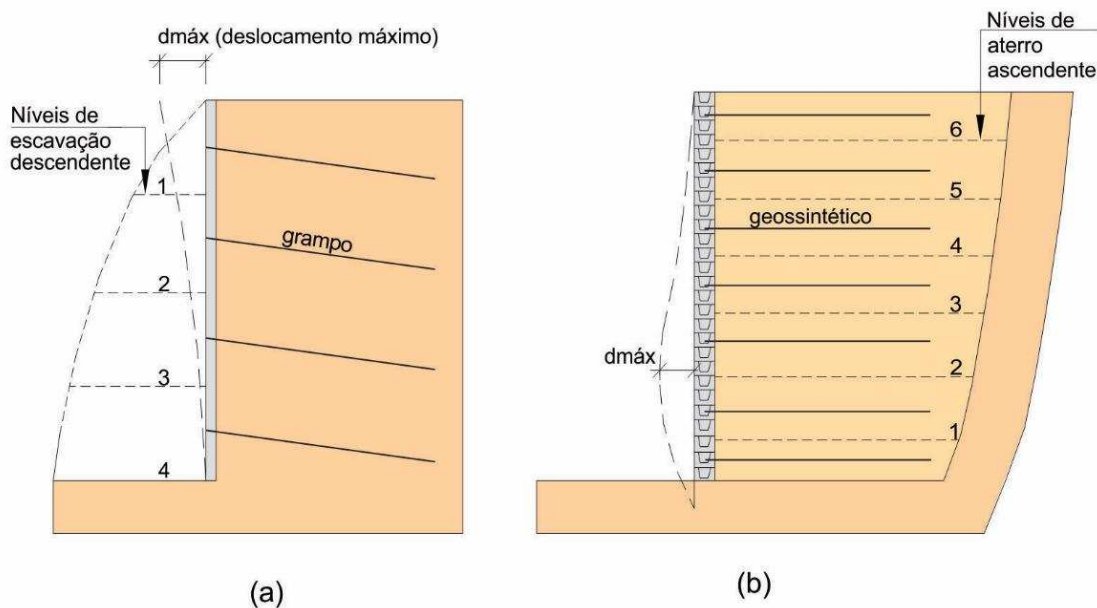
Fonte: Autor

Quando comparado com a técnica do solo reforçado com geossintético, o solo grampeado apresenta semelhanças na conceituação e no método de análise. Em ambas, os reforços são instalados sem pré-tensão e trabalham basicamente através da mobilização do atrito na interface solo-reforço, a partir das deformações do maciço.

A principal divergência entre ambas refere-se ao método construtivo. No solo reforçado com geossintético a execução é ascendente, através de aterros por camadas, com a instalação simultânea do reforço e os maiores deslocamentos horizontais ocorrem na parte inferior do paramento.

No solo grampeado, a execução é descendente, através de cortes gradativos no talude; os reforços são executados após a conclusão de cada etapa de escavação e os maiores deslocamentos horizontais ocorrem na parte superior do faceamento (SARÉ, 2007), conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Pontos de deslocamentos horizontais máximos em muros de solo grampeado e solo reforçado com geossintético



(a) Muro em solo grampeado; (b) muro em solo reforçado com geossintético.

Fonte: Autor

2.5 Comportamento mecânico do solo grampeado

De acordo com o projeto Clouterre (1991), a interação solo-grampo pode desenvolver-se de duas formas diferentes na estrutura de solo grampeado. A principal é a resistência ao cisalhamento de interface entre o solo e o grampo, que induz o surgimento de tensões de tração nos grampos. A outra interação está relacionada à tensão de terra sobre os grampos, causada pelo peso da cunha crítica que propicia a mobilização de esforços cisalhantes e de flexão nos reforços.

Para que haja a mobilização da resistência q_s são necessários pequenos deslocamentos entre o solo e o grampo, que progridem à medida que o desconfinamento do solo é executado através das etapas de escavação, dado que o maciço terroso tende a se deslocar no sentido da escavação (FRANÇA, 2007).

De acordo com Springer (2001), esses deslocamentos dependem de diversos fatores, dentre eles é possível citar: a sequência construtiva, a altura e a inclinação da escavação, o espaçamento vertical e horizontal entre os grampos, a razão entre o comprimento do grampo e a altura do muro, o diâmetro e a inclinação dos grampos.

Springer (2001) afirma que para o caso de deslocamentos laterais excessivos, são empregadas estruturas mistas, que consistem em uma estrutura de solo grampeado enrijecido com ancoragem ativa no topo. Acrescenta ainda, que é de

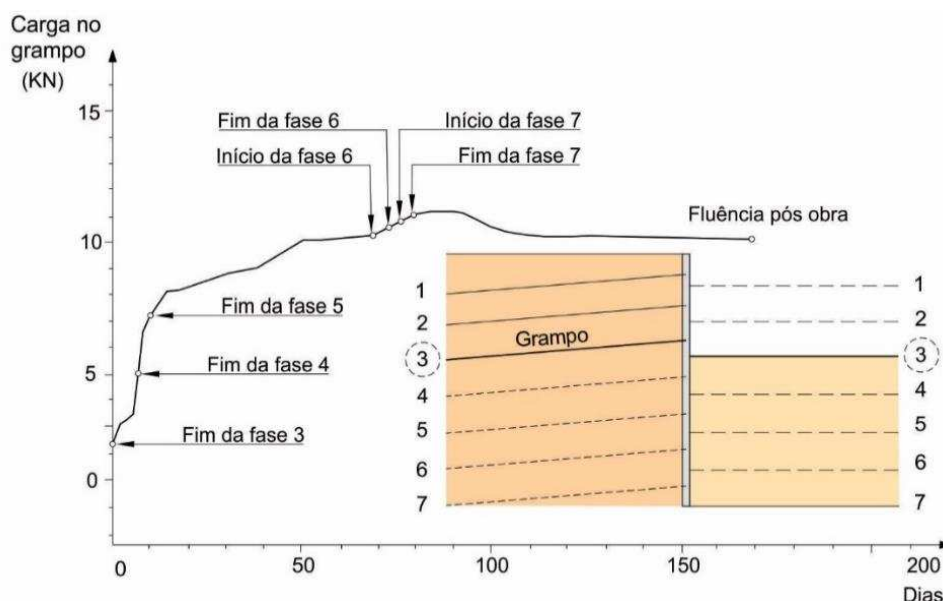
extrema importância que estas ancoragens possuam comprimentos superiores aos dos grampos e devem ser fixadas em uma área fora da massa de solo grampeado.

2.5.1 Distribuição de tensões nos grampos

Durante a fase construtiva do solo grampeado, quando as deformações do solo são reduzidas, os grampos são essencialmente solicitados por esforços de tração. Com a progressão das deformações surgem também esforços cisalhantes e de flexão. Pode-se dizer então que os grampos são solicitados por esforços de tração, cisalhantes e fletores (LIMA, 2009a).

Na Figura 10 exemplifica-se um aumento gradativo nas solicitações axiais nos grampos em relação às etapas de escavação.

Figura 10 – Carregamento progressivo no Grampo 3 durante e após o processo de escavação



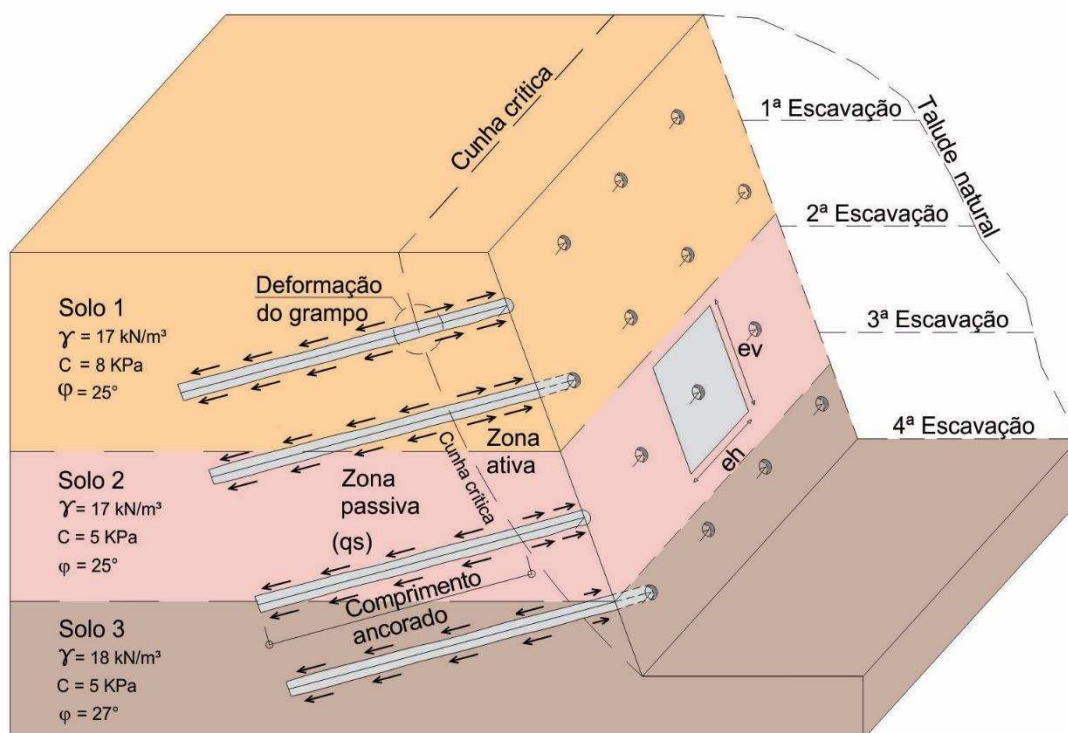
Fonte: Adaptado de Clouterre, 1991.

As tensões cisalhantes na interface solo-grampo são máximas dentro da massa de solo grampeado e não na face da parede (CLOUTERRE, 1991). A distribuição dos esforços de tração ao longo dos grampos possibilita a identificação do ponto de tração máxima, que divide o maciço em zona ativa e passiva (SARÉ, 2007).

Silva (2010) afirma que é por meio dos grampos que ocorre a “costura” da zona instável (ativa) e da zona resistente (passiva), obtendo como consequência uma melhora na estabilidade do maciço. Acrescenta ainda, que os deslocamentos de uma zona em relação à outra permitem a mobilização dos esforços nos grampos.

O atrito mobilizado ao longo dos grampos possui sentidos opostos nas zonas ativa e passiva. Na zona ativa, a força de atrito lateral nos grampos é direcionada para fora do maciço, enquanto que na zona passiva, a força tem sentido contrário, ou seja, é direcionado para dentro do maciço (CLOUTERRE, 1991), conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Mobilização dos esforços nos grampos nas zonas ativa e passiva



Fonte: Autor

2.5.2 Resistência ao cisalhamento de interface solo-grampo

O principal mecanismo de interação solo-grampo refere-se à mobilização do atrito existente entre a superfície do reforço e o solo (LIMA, 2002). Por meio dessa interação ocorre a transferência de esforços de tração dos grampos ao solo.

A estabilidade de uma contenção em solo grampeado é analisada em seu estado limite último, portanto, a obtenção da resistência ao cisalhamento de interface solo-grampo q_s é essencial para o projeto de estruturas grampeadas. A carga axial de tração, F_{arr} , nos grampos é introduzida como força estabilizante, que corresponde à resistência ao arrancamento mobilizada (SPRINGER, 2006).

A resistência q_s depende das características físicas da superfície do grampo (cravado ou injetado), do processo executivo (cravação, perfuração e injeção), do tipo,

densidade e teor de umidade do solo. A sua verdadeira quantificação é obtida através de ensaios de arrancamento (prova de carga) executados em campo (SPRINGER, 2001). Pode-se estimar o valor de q_s para a fase de projeto por meio de correlações empíricas da literatura e pela metodologia segundo a ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006). Entretanto, os ensaios *in loco* são essenciais para a real avaliação do atrito solo-grampo durante a construção (FEIJÓ, 2007).

2.5.2.1 Ensaios de arrancamento

A execução dos ensaios de arrancamento em grampos não é regulamentada por norma técnica, portanto, nestes ensaios, os procedimentos, as recomendações, os esquemas de montagem, as interpretações do comportamento Tensão x Deformação e as estimativas da capacidade de carga dos grampos são baseados na literatura especializada e em norma para estacas, ABNT NBR 12123 (ABNT, 1992b): Estacas - Prova de carga estática – Método de ensaio.

O ensaio de arrancamento consiste na aplicação de cargas de tração à barra de aço por meio de macaco hidráulico. A cada carga aplicada, medida através de um manômetro ou célula de carga, registra-se o deslocamento da cabeça do grampo por meio de extensômetros. Traça-se a curva Carga x Deslocamento e obtém-se a carga máxima de tração do grampo (SILVA, 2010).

A resistência ao cisalhamento de interface é obtida pela Equação 1.

$$q_s = \frac{F_{arr}}{U \cdot L_b} \quad (1)$$

Sendo:

q_s = resistência ao cisalhamento de interface solo-grampo;

F_{arr} = carga máxima de arrancamento;

U = perímetro médio da seção transversal da ancoragem, $U = \pi \cdot D$;

D = diâmetro do grampo;

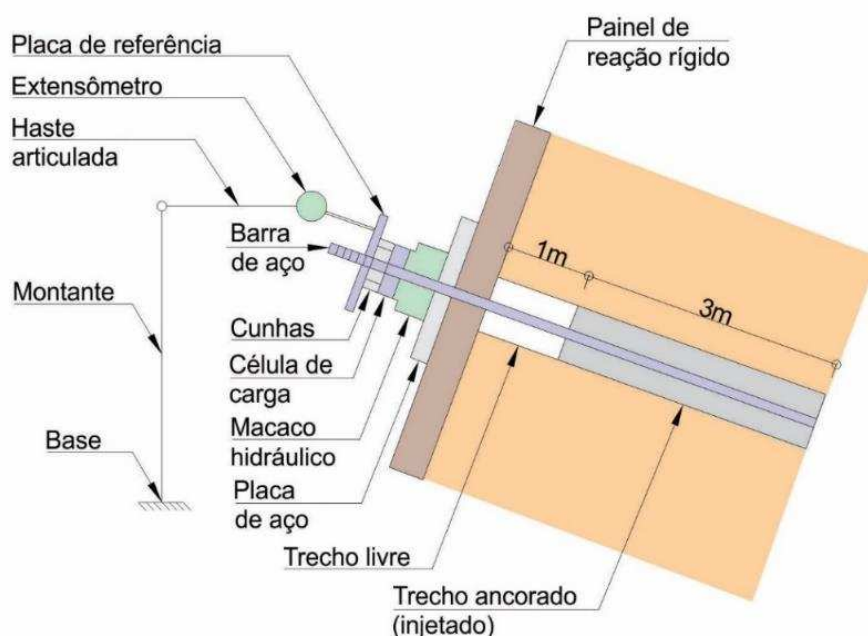
L_b = comprimento ancorado do grampo.

Segundo Lima (2009), para a realização do ensaio de arrancamento, executa-se o grampo com um trecho ancorado (comprimento mínimo de 3 m) e um trecho livre (comprimento mínimo de 1 m), a partir do faceamento. Este recuo mínimo (sem injeção de calda de cimento) evita a influência no trecho injetado das tensões de

compressão aplicadas ao maciço por meio do painel de reação, instalado junto à face do talude. Para evitar que a calda penetre no trecho livre utilizam-se obturadores (geralmente de espuma) que circundam a barra de aço (SILVA, 2009).

Na Figura 12 ilustra-se o esquema de montagem para o ensaio de arrancamento. Observa-se em sequência: os trechos ancorado (3 m) e livre (1 m) do grampo; o painel de reação (rígido, para distribuição uniforme das tensões de compressão na face do talude); a placa rígida de aço (evita a concentração de tensões oriundas do macaco hidráulico no painel de reação), o macaco hidráulico (vazado e devidamente calibrado para aplicação do carregamento); a célula de carga ou manômetro (para medição das cargas aplicadas); as cunhas (para travamento da barra de aço ao sistema e promoção da ação e reação entre os equipamentos); a placa de referência (para distribuição adequada de dois ou mais extensômetros, sendo fixada por parafusos à barra de aço); e o extensômetro (para medição dos deslocamentos da cabeça do grampo, sendo interligado pela haste articulada e pelo montante, a uma base externa, assentada firmemente em local sem interferências com os demais equipamentos).

Figura 12 – Detalhes dos equipamentos e do grampo no ensaio de arrancamento



Fonte: Adaptado de Ortigão, Sayão, 2000.

Para que não ocorram acidentes no ensaio de arrancamento, a seção da barra de aço deve ser superdimensionada, de forma a evitar o seu rompimento brusco antes da ruptura no atrito solo-grampo. A carga máxima de tração, F_{arr} , aplicada à barra não deve ultrapassar o valor conforme a Equação 2.

$$F_{arr} = 0,90 \cdot f_y \cdot A_s \quad (2)$$

Sendo:

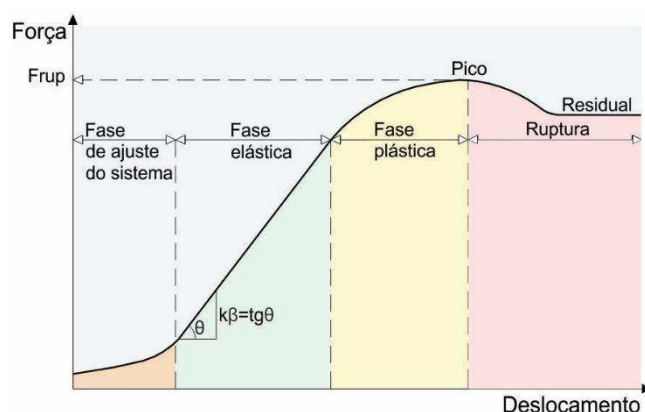
f_y = tensão de escoamento do aço;

A_s = área da seção transversal da barra.

Conforme Clouterre (1991), os ensaios de arrancamento podem ser executados de duas formas: em estágios de carregamento (força controlada) ou com deslocamento controlado (velocidade constante). Ambos requerem basicamente os mesmos equipamentos e devem levar aos mesmos resultados (mesma força máxima de arrancamento), para o mesmo tipo de solo. Por meio desses ensaios é possível obter a força máxima de arrancamento, a força residual e o coeficiente k_b (rigidez do grampo), que corresponde à inclinação inicial da curva Carga x Deslocamento. No Brasil, os ensaios em estágios de carregamento são mais usuais.

A curva típica do ensaio de arrancamento apresenta três trechos distintos. Um trecho inicial com rigidez crescente do grampo (fase de ajuste do sistema); uma parte intermediária com rigidez máxima e constante (fase elástica), em que se verifica proporcionalidade entre forças e deslocamentos e um trecho final de rigidez decrescente (fase plástica), com grandes deslocamentos para pequenos acréscimos de carga, que antecede a ruptura, conforme ilustrado na Figura 13, (COUTO, 2002).

Figura 13 – Curva de ensaio de arrancamento com pico

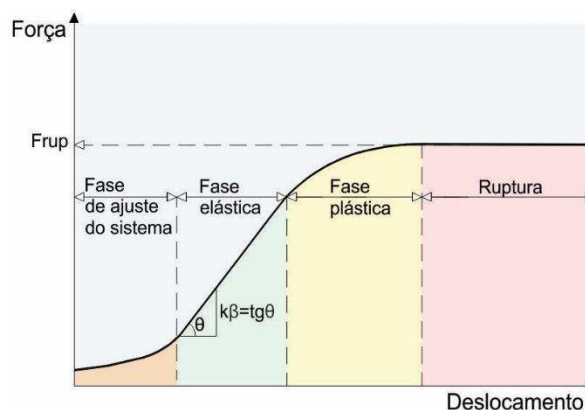


Fonte: Adaptado de Clouterre, 1991.

O manual de encostas da Geo-Rio (ORTIGÃO, SAYÃO, 2000) sugere que a carga máxima resistente do grampo seja o valor de pico da curva Carga x Deslocamento. Clouterre (1991) também considera que a carga de arrancamento do

grampo seja obtida do pico desta curva. Quando a curva não apresentar um valor de pico bem definido, a carga de arrancamento é a necessária para que os deslocamentos ocorram sem acréscimo de carga (Figura 14).

Figura 14 – Curva de ensaio de arrancamento sem pico



Fonte: Adaptado de Clouterre, 1991.

A ABNT NBR 12131 (ABNT, 1992c) prescreve o método de prova de carga em estacas, que visa fornecer dados para avaliar o comportamento Carga x Deslocamento e estimar a capacidade de carga da peça ensaiada. A prova de carga consiste, basicamente, em aplicar esforços estáticos crescentes à estaca, registrando os deslocamentos correspondentes. Segundo essa norma, a critério do projetista, o ensaio pode ser realizado através de duas formas de carregamento: lento ou rápido.

O ensaio lento é realizado em estágios iguais e sucessivos de carregamento, e a carga aplicada em cada estágio não deve ultrapassar a 20% da carga de trabalho prevista para a peça ensaiada. Em cada estágio, mantendo-se a aplicação da carga constante, registram-se os deslocamentos nos seguintes intervalos de tempo: 0 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min e 30 min e posteriormente a cada 30 min, até se atingir a estabilização. Esta é admitida quando a diferença dos deslocamentos medidos entre duas leituras sucessivas, for menor ou igual a 5%, em relação ao deslocamento acumulado no mesmo estágio, conforme a Equação 3.

$$l_{pi} = \frac{l_i - l_{i-1}}{\sum_{i=0}^i l_i} \cdot 100 \leq 5\% \quad (3)$$

Sendo: l_{pi} = leitura parcial

l_i = leitura em cada intervalo de tempo

Após a ruptura da peça e a estabilização dos deslocamentos, o descarregamento deve ser feito no mínimo em quatro estágios. Cada estágio é mantido até a estabilização dos deslocamentos, com os registros segundo o critério descrito anteriormente, porém, cada etapa de descarregamento deverá ter a duração mínima de 15 min. Finalizado o descarregamento total, a leitura dos deslocamentos deve continuar até a sua estabilização.

O ensaio rápido também é realizado em estágios iguais e sucessivos de carregamento, sendo que a carga aplicada em cada estágio não deve ser superior a 10% da carga de trabalho prevista para a peça ensaiada. Em cada estágio, a aplicação da carga constante, deve ser mantida durante 5 min, independente da estabilização dos deslocamentos, sendo que as leituras dos mesmos são realizadas, obrigatoriamente, no início e no final do estágio. Atingida a carga máxima do ensaio, o descarregamento deve ser feito em quatro estágios. Cada estágio deve ser mantido por 5 min, com a leitura dos respectivos deslocamentos. Após 10 min do descarregamento total, deve ser feita uma leitura final.

Falconi e Alonso (1996) sugerem ciclos de carga com valores reduzidos, da ordem de 5 kN (500 kgf) em intervalos de 5 minutos em cada estágio, para propiciar um maior número de leituras Carga x Deslocamento. Para um ajuste e acomodação inicial dos equipamentos (painel rígido, placa de apoio, macaco e extensômetros), Feijó e Ehrlich (2001) sugerem a aplicação de uma pequena carga na barra, antes dos ciclos de carregamento e leituras oficiais do ensaio.

Para a obtenção de resultados reais da resistência ao atrito na interface solo-grampo, é imprescindível que o grampo seja submetido somente a esforço de tração. Para isso, inicialmente, deve-se executar um acerto criterioso da face do talude, de forma que os equipamentos estejam alinhados e instalados perpendicularmente à barra. Este procedimento evita o uso de cunhas entre as peças, o que pode dificultar a montagem do sistema e/ou gerar excentricidades. Caso contrário, o grampo poderá ser submetido a esforços de flexão e os resultados do ensaio não serão confiáveis.

Para leituras favoráveis dos deslocamentos da cabeça do grampo, deve-se instalar ao menos dois extensômetros (precisão de 0,01 mm), sendo o deslocamento definido pela média aritmética das leituras. É importante atentar quanto às posições das hastes e montantes em relação aos demais equipamentos, para que não sofram impactos acidentais. A ação da chuva e de ventos fortes também podem prejudicar as

leituras. A montagem de uma tenda é fundamental para a proteção dos equipamentos e dos operadores, considerando que os ensaios podem ter duração prolongada.

Quando é aplicada uma força de tração na cabeça do grampo ele se move em relação ao maciço, mobilizando a resistência lateral e gerando um campo de tensão-deformação.

Segundo Clouterre (1991), as deformações e as tensões de tração, inicialmente, são maiores próximo ao trecho de fixação do grampo (cabeça) e mobilizadas gradualmente até a extremidade (ponta), onde são menores. À medida que se aumenta a força de arrancamento, a tensão de atrito se aproxima do limite de ruptura, e a tração desenvolve-se ao longo de todo o comprimento do grampo. Quanto maior a extensão do grampo, menos uniforme será a distribuição de tensões de cisalhamento ao longo do seu comprimento.

Como no Brasil não há uma definição da quantidade mínima de ensaios de arrancamento a ser realizada nas estruturas grampeadas, recomenda-se uma quantidade tal que garanta a representatividade dos resultados (FALCONI; ALONSO, 1996). O projeto Clouterre (1991) sugere um número mínimo de grampos a serem ensaiados de acordo com a área da face a ser executada (Tabela 2).

Tabela 2 – Quantidades de ensaio de arrancamento de acordo com a área da face

Área da face (m ²)	Número de ensaios
Até 800	6
De 800 a 2000	9
De 2000 a 4000	12
De 4000 a 8000	15
De 8000 a 16000	18
De 16000 a 40000	25

Fonte: Clouterre, 1991.

Pitta et al. (2003) e Falconi e Alonso (1996) sugerem a realização de ensaios de arrancamento na proporção de um para cada dez grampos permanentes do maciço a ser grampeado.

Conforme recomendado por Clouterre (1991), os grampos destinados aos ensaios de arrancamento (grampos de sacrifício) devem ser executados igualmente aos grampos de trabalho da construção, com a mesma inclinação, perfuração, introdução no furo, traço da calda e injeção.

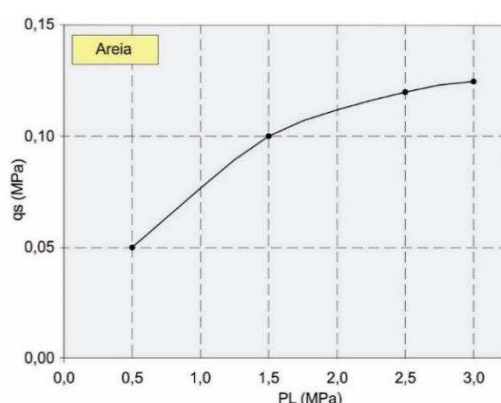
França (2007) ressalta a importância de distribuir os ensaios por toda estrutura. Os grampos a serem ensaiados devem ser previamente preparados; são mais curtos e instalados entre os grampos permanentes.

2.5.2.2 Correlações empíricas

Na ausência de ensaios de arrancamento ou na fase de pré-dimensionamento de estruturas grampeadas, estima-se a resistência q_s por meio de correlações empíricas apresentadas na literatura (SPRINGER, 2006).

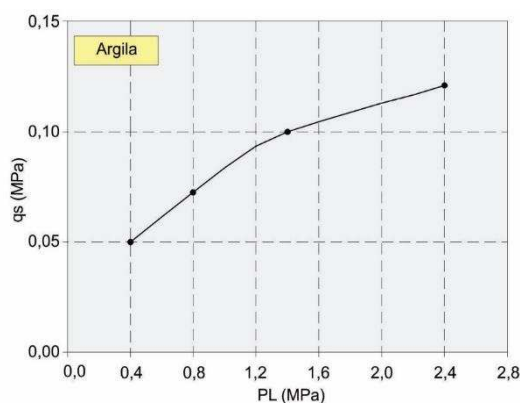
Clouterre (1991) apresenta uma correlação empírica baseada no método proposto por Bustamante e Gianeselli (1981) para determinação da resistência lateral em estacas a partir de ensaios pressiométricos. São representadas curvas de resistência ao arrancamento q_s em MPa para areias e argilas em função da pressão limite (P_L), obtidas através de ensaios realizados com o pressiômetro tipo Ménard (Figuras 15 e 16).

Figura 15 – Correlações empíricas para q_s e P_L para areias



Fonte: Adaptado de Clouterre, 1991.

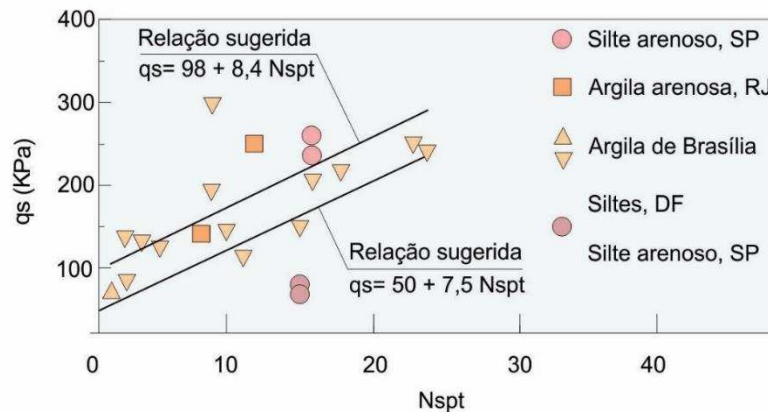
Figura 16 – Correlações empíricas para q_s e P_L para argilas



Fonte: Adaptado de Clouterre, 1991.

Ortigão (1997) determinou correlações a partir dos ensaios de arrancamento realizados no Rio de Janeiro, São Paulo e Brasília, conforme a Figura 17. Todos os grampos destes ensaios foram executados em furos com diâmetros entre 75 e 150 mm, com injeção de calda de cimento sem pressão.

Figura 17 – Correlações empíricas para q_s e N_{SPT}



Fonte: Adaptado de Ortigão, 1997.

Através dos resultados obtidos, Ortigão (1997) propôs uma estimativa inicial da resistência ao arrancamento para projeto, a partir da correlação entre q_s e N_{SPT} , conforme a Equação 4:

$$q_s = 50 + 7,5 \cdot N_{SPT} \quad (\text{kPa}) \quad (4)$$

Através de ensaios de arrancamento em um solo residual de gnaiss, Springer (2006) propôs uma correlação para estimar q_s em função de N_{SPT} pela Equação 5:

$$q_s = 45,12 \cdot \ln(N_{SPT}) - 14,99 \quad (\text{kPa}) \quad (5)$$

2.5.2.3 Método conforme ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006)

A ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006), estabelece uma metodologia para determinação da resistência à tração (T) de uma ancoragem em solos arenosos pela Equação 6:

$$T = \sigma'_z \cdot U \cdot L_b \cdot k_f \quad (6)$$

Sendo:

σ'_z = tensão efetiva no ponto médio da ancoragem;

U = perímetro médio da seção transversal da ancoragem;

L_b = comprimento ancorado do grampo;
 k_f = coeficiente de ancoragem indicado na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes de ancoragem k_f

Solo	Compacidade		
	Fofa	Compacta	Muito compacta
Silte	0,1	0,4	1,0
Areia fina	0,2	0,6	1,5
Areia média	0,5	1,2	2,0
Areia grossa	1,0	2,0	3,0

Fonte: ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006).

Para os solos argilosos, a resistência T pode ser obtida através da seguinte equação:

$$T = \alpha \cdot U \cdot L_b \cdot Su \quad (7)$$

Onde:

α = coeficiente redutor ao cisalhamento;

U = perímetro médio da seção transversal da ancoragem;

Su = resistência ao cisalhamento não drenada do solo argiloso.

Para valores de $Su \leq 40$ kPa, utiliza-se $\alpha = 0,75$ e para $Su \geq 100$ kPa, $\alpha = 0,35$. Entre esses dois valores de Su , utiliza-se para α , o valor interpolado linearmente.

Como a carga máxima de arrancamento (F_{arr}) da Equação 1 corresponde à resistência à tração (T) das Equações 6 e 7, as resistências q_s para solos arenosos e argilosos, podem ser obtidas, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$q_s = \sigma'_z \cdot k_f \quad (8)$$

$$q_s = \alpha \cdot Su \quad (9)$$

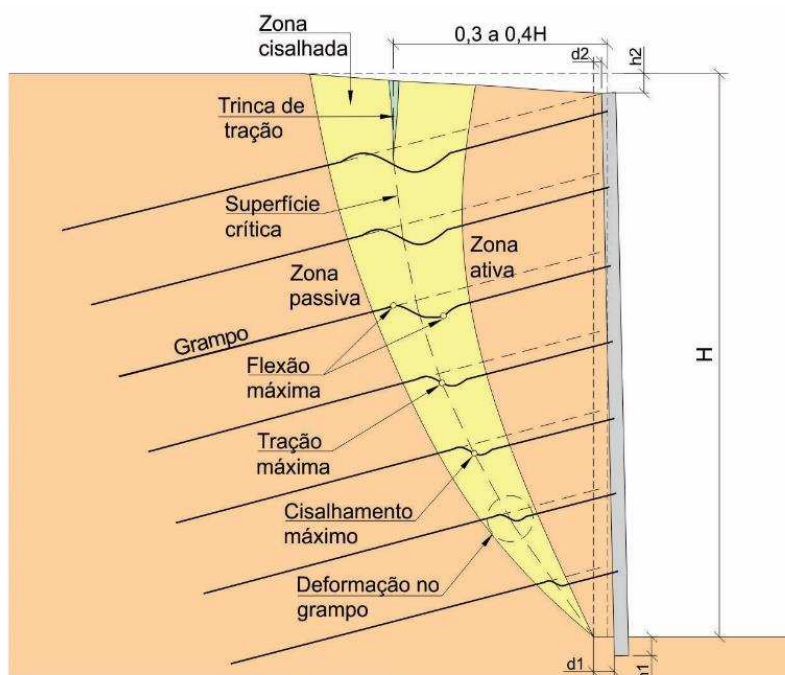
2.5.3 Resistência aos esforços cisalhantes e momentos fletores

De acordo com Feijó (2007), as solicitações que ocorrem nos grampos são geralmente esforços normais de tração. No entanto, podem surgir esforços cisalhantes e fletores, cujas magnitudes estão associadas à rigidez do grampo; à inclinação do reforço em relação à direção da deformação principal maior e à

concentração de deformações (ocorrem no entorno da superfície potencial de ruptura, à medida que se aproxima da ruptura).

Segundo França (2007), durante o cisalhamento da massa de solo grampeado, a ruptura dos grampos se dá por tração na interseção com o plano de ruptura (ponto de tração máxima no grampo) ou por plastificação nos pontos máximos de momentos fletores (Figura 18).

Figura 18 – Desenvolvimento de zona de cisalhamento em massa grampeada



Fonte: Adaptado de Clouterre, 1991.

Feijó (2007) sugere que as deformações nos grampos sejam calculadas pelo método simplificado do coeficiente de reação horizontal conforme a Equação 10, considerando os reforços como sendo estacas submetidas a esforço horizontal lateral, oriundos do peso do solo delimitado pela cunha crítica.

$$EI \cdot \frac{d^4 y}{dz^4} + K_s \cdot D \cdot y = 0 \quad (10)$$

Onde:

El = rigidez do grampo;

K_s = coeficiente de reação horizontal;

y = deslocamento lateral do grampo;

z = coordenadas ao longo do grampo;

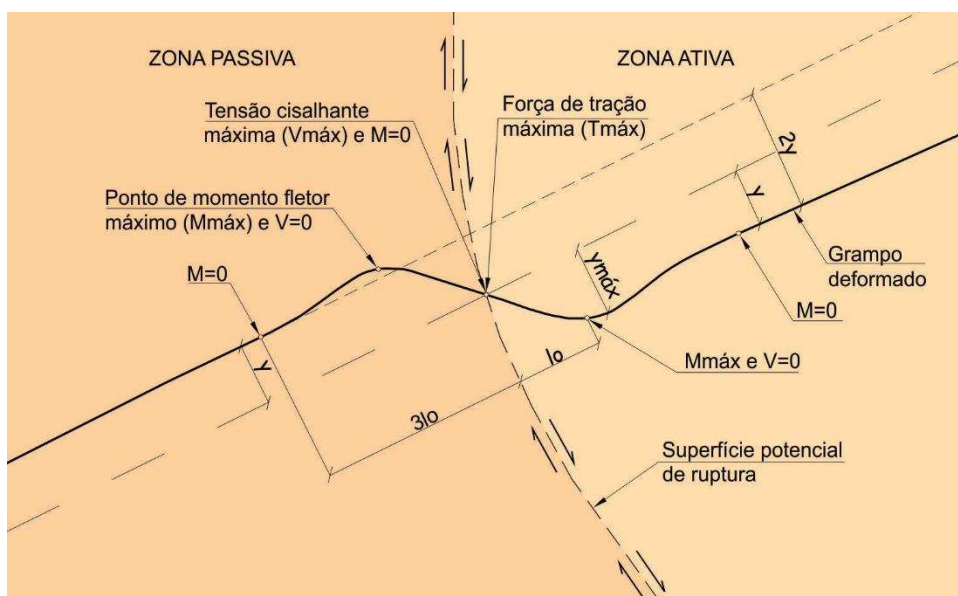
D = diâmetro do grampo.

A solução dessa equação introduz o conceito de comprimento de transferência de esforços (l_0) conforme a Equação 11:

$$l_0 = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot EI}{k_s \cdot D}} \quad (11)$$

No ponto de interseção da superfície potencial de ruptura e grampo, a tensão cisalhante atinge seu valor máximo, correspondente ao momento fletor nulo. Nos pontos onde o momento fletor atinge seu valor máximo, a tensão cisalhante é nula. O comprimento l_0 é definido como sendo a distância entre o ponto de momento fletor máximo e força de tração máxima (FEIJÓ, 2007). A partir da distância $3l_0$, obtém-se o ponto em que os momentos fletores no grampo se tornam nulos, conforme ilustrado na Figura 19:

Figura 19 – Deformação em grampo submetido à flexão composta



Fonte: Adaptado de Clouterre, 1991.

Segundo Plumelle *et al.* (1990), a mobilização dos esforços de cisalhamento e flexão ocorre somente próximo à ruptura, quando elevadas deformações se manifestam na massa grampeada. Mitchell e Villet (1987) acrescentam que o deslocamento relativo entre o solo e o grampo, requerido para a mobilização desses esforços são maiores que os necessários para a mobilização dos esforços de tração. Entretanto, dependendo da inclinação com a horizontal e da rigidez do grampo, os

esforços cisalhantes e fletores podem solicitar mais significativamente os grampos que os esforços de tração.

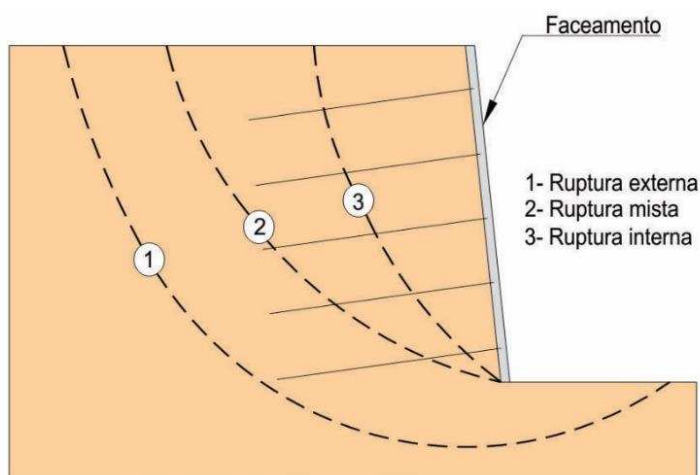
Juran *et al.* (1983) ressaltam que as aplicações em que os esforços de cisalhamento são mobilizados nos grampos, devem ser projetadas verificando os deslocamentos admissíveis em relação às estruturas circunvizinhas. Em condições de serviço, geralmente, os esforços de flexão nos grampos são mobilizados modestamente.

2.6 Tipos de ruptura

Segundo França (2007), uma estrutura de solo grampeado pode comportar-se como um bloco monolítico, apresentando, desta forma, três tipos de ruptura: externa, interna e mista.

A ruptura externa desenvolve-se fora da massa de solo reforçada pelos grampos. A ruptura interna ocorre dentro da massa, na zona ativa, passiva ou em ambas (SILVA, 2010). A ruptura mista desenvolve-se dentro e fora da massa, portanto, intercepta alguns níveis de grampos. Na Figura 20 exemplifica-se esses três tipos de ruptura possíveis de ocorrer no maciço grampeado.

Figura 20 – Tipos de ruptura em maciço grampeado



Fonte: Adaptado de França, 2007.

2.6.1 Ruptura externa

A ruptura externa em solos grampeados ocorre geralmente por comprimento insuficiente do grampo ou baixa qualidade do solo de fundação, com o

escorregamento do maciço através da superfície de ruptura, afetando toda a área da estrutura, além dos limites dos grampos (FRANÇA, 2007).

2.6.2 Ruptura interna

Segundo França (2007), a ruptura interna pode ocorrer de quatro formas: ruptura dos grampos, falta de aderência solo-grampo, altura de escavação excessiva e erosão regressiva (piping).

2.6.2.1 Ruptura dos grampos

Os grampos rompem-se por subdimensionamento da seção transversal (diâmetros do reforço e da barra insuficientes), corrosão das barras e aplicação de sobrecargas não previstas em projeto (STOCKER *et al.*, 1979).

2.6.2.2 Falta de aderência

Considerada mais comum que a ruptura dos grampos, a ruptura por falta de aderência no contato solo-grampo advém, principalmente, de uma estimativa errônea da resistência cisalhante de interface, além de falhas executivas na injeção das caldas e pelo efeito da saturação em solos com alto teor de finos (FRANÇA, 2007).

Geralmente se caracteriza pelo comprimento insuficiente do grampo na zona passiva no topo da escavação. Por isso, o reforço não promove o equilíbrio de forças em relação às trações contrárias oriundas da zona ativa. O colapso não é repentino e desenvolvem-se grandes deformações antes da ruptura, exceto em situações adversas durante a construção (CLOUTERRE, 1991). Além disso, pode ocorrer também a falta de aderência entre a calda de cimento e a barra de aço. Traços inadequados ou a utilização de materiais lisos ou de pinturas inadequadas na proteção das barras, podem provocar a ruptura do grampo.

2.6.2.3 Altura de escavação excessiva

Uma elevada altura de escavação pode provocar uma ruptura repentina em função de uma instabilidade local, que pode se propagar até o topo e levar o colapso de toda a estrutura (FRANÇA, 2007). Para prevenir esse tipo de ruptura, recomenda-se que nas etapas de escavação sejam mantidas alturas inferiores à altura crítica, para que não haja a eliminação do efeito de arqueamento do solo ou alternativamente,

pode-se realizar as escavações em forma de nichos (slots) para melhorar a estabilidade local (SILVA, 2010), conforme ilustrado na Figura 4.

2.6.2.4 *Erosão regressiva (piping)*

Este tipo de ruptura se assemelha ao tipo anterior, entretanto, ocorre pela presença do fluxo de água no maciço. Durante a escavação, as forças de percolação promovem o arrastamento de partículas do solo através de seus vazios, enfraquecendo-o granulometricamente e reduzindo sua estabilidade local no trecho escavado. A heterogeneidade do solo e a falta de sistemas de drenagem durante a construção podem ocasionar a ruptura por *piping* (FRANÇA, 2007).

2.6.3 *Ruptura mista*

A ruptura mista combina instabilidades interna e externa, já que se refere a uma superfície de ruptura que intercepta tanto a massa de solo reforçada pelos grampos, quanto a parte externa. Ocorre geralmente devido ao comprimento insuficiente dos grampos na zona passiva, associado às deficiências na resistência à tração dos reforços ou no atrito de interface solo-grampo (CLOUTERRE, 1991).

2.7 **Análise de estruturas de solo grampeado**

A estabilidade interna e externa de uma massa grampeada deve ser assegurada pelo comprimento, diâmetro, inclinação e espaçamentos horizontal e vertical dos grampos. A definição desses parâmetros depende das propriedades físicas e mecânicas do solo; altura e inclinação da face do talude; características do revestimento do faceamento (incluindo o tipo de conexão com os grampos); inclinação do terreno adjacente; atrito na interface solo-grampo (que depende do tipo do grampo e do processo executivo de sua instalação); além das variáveis ambientais incidentes.

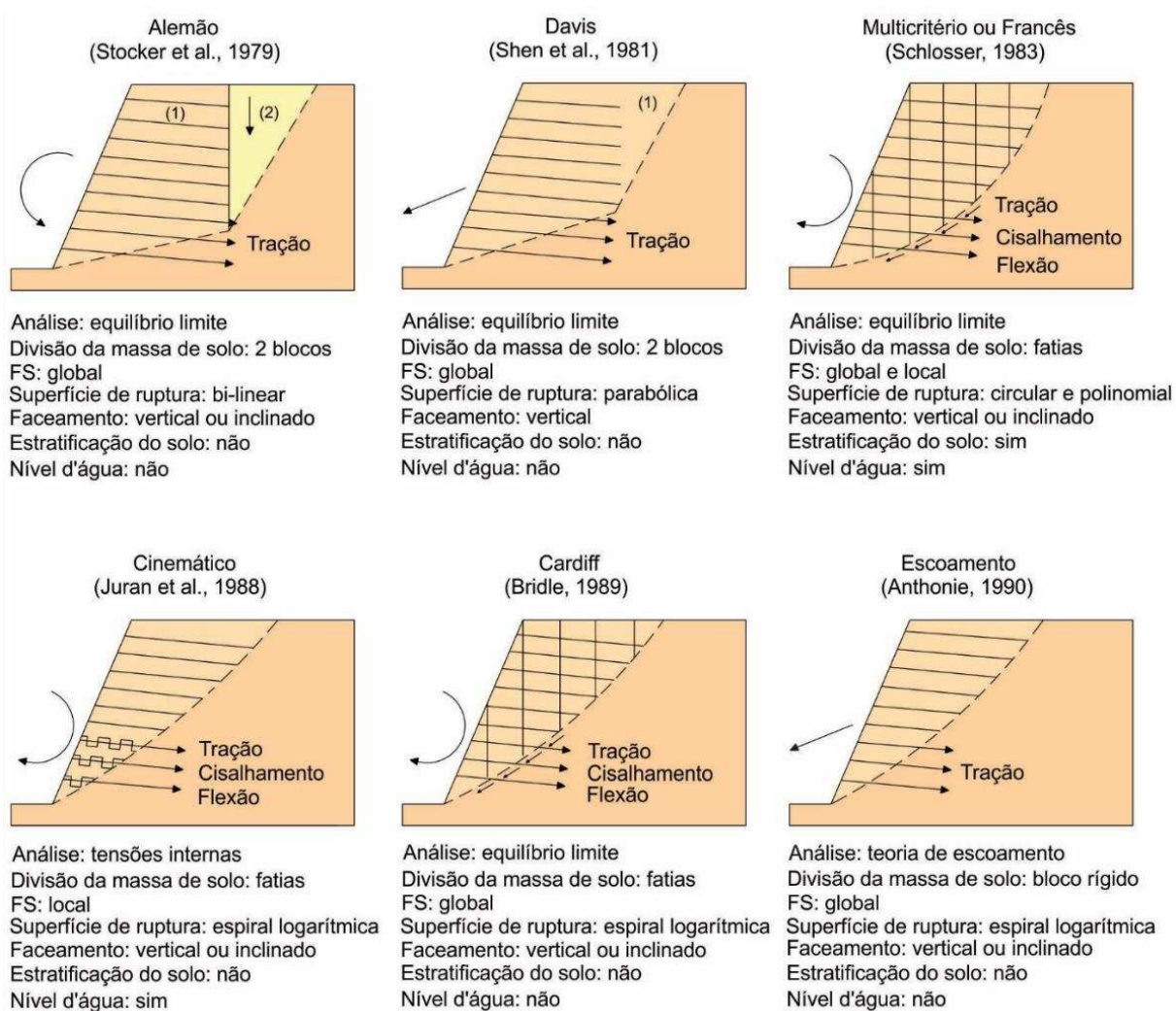
Através da resistência ao cisalhamento (atrito) na interface solo-grampo, ocorre a transferência de forças de tração resistentes dos grampos ao solo. Esta é a principal condição para análise das estruturas de solo grampeado. A interação entre os reforços e o solo circundante limita a movimentação do maciço grampeado durante e após a escavação (SILVA, 2010), estabilizando-o.

A partir do ponto de força de tração máxima nos grampos, divide-se a massa grampeada em zona ativa, onde tensões de cisalhamento de interface são

mobilizadas para restringir o movimento do solo, e em zona passiva (resistente), onde forças desenvolvidas nos grampos, em sentido contrário, são transferidas ao maciço reforçado através da resistência ao cisalhamento solo-grampo, promovendo o equilíbrio do sistema.

Os métodos clássicos de análise de estruturas em solo grampeado propostos por diversos autores estão sumarizados e ilustrados na Figura 21, identificando as considerações relativas ao modelo de análise, tipo de superfície de ruptura, limites de aplicação, limitações, entre outros (SILVA, 2010; SPRINGER, 2006).

Figura 21 – Ilustração e considerações principais dos métodos de análise de estruturas grampeadas



Fonte: Adaptado de Springer, 2006.

Em todos os métodos, o terreno adjacente ao muro é subdividido em zona ativa (cunha ativa), limitada por uma superfície potencial de deslizamento e em zona passiva, onde os grampos são fixados (ORTIGÃO, PALMEIRA, 1992).

Em análise à Figura 21, observa-se que a maioria dos métodos baseia-se em análises determinísticas (equilíbrio limite), onde a superfície potencial de ruptura é verificada (FEIJÓ, 2007). A contribuição das forças de tração, cisalhamento e flexão dos grampos são consideradas em 50% destes métodos, entretanto, a favor da segurança, geralmente a contribuição das forças de cisalhamento e flexão não são consideradas. Observa-se também que são adotadas cinco hipóteses diferentes para as superfícies de ruptura, permitindo desta forma, a consideração simultânea de aspectos do equilíbrio externo e interno.

2.7.1 Métodos de análise

Segundo Clouterre (1991) e Schaefera *et al.* (1997) para a elaboração de projetos em solo grampeado, as estruturas podem ser verificadas por duas principais metodologias.

A mais usual refere-se aos métodos de equilíbrio limite (equilíbrio estático de forças e momentos), em que se avalia somente um fator de segurança global da estrutura grampeada, relativo à ruptura ao longo da superfície provável de deslizamento, considerando as contribuições dos grampos (resistência à tração, cisalhamento, flexão ou resistência ao arrancamento) que atravessam a superfície crítica de ruptura.

Nessa metodologia, as estabilidades externa e interna da estrutura são verificadas através do equilíbrio estático da parte da massa de solo, limitada por uma superfície potencial de ruptura e sujeita às forças externas e às tensões ou forças mobilizadas no solo e nos grampos. Para esta análise utilizam-se os métodos clássicos de equilíbrio limite: Fellenius, Bishop Simplificado, Spencer, Janbu e Morgenstern e Price.

Uma desvantagem desses métodos é referente a impossibilidade de se calcular a interação entre as forças nos diferentes níveis de grampos, quando a estrutura é submetida às condições de serviço (CLOUTERRE, 1991). A verificação da estabilidade local em cada nível de grampos se torna imprescindível, pois esta pode ser significativamente mais crítica que a estabilidade global.

A outra metodologia, considerada mecanicamente mais rigorosa, refere-se às análises do estado de tensões internas na massa de solo. São estimadas as forças de tração e cisalhamento nos grampos durante as etapas de construção, de acordo

com as condições de carregamento, sendo que a estabilidade local é avaliada em cada nível de grampo.

Esses métodos estudam o equilíbrio estático de uma porção do sistema limitado pela superfície potencial de ruptura, sendo submetida às forças externas e às forças que podem ser mobilizadas no solo e nos grampos, ao longo da superfície potencial de ruptura e de acordo com os critérios de ruptura dos materiais envolvidos.

Pode-se citar nesta categoria, o método proposto por Juran *et al.* (1988), cujo mecanismo de ruptura desenvolve-se pela falência progressiva dos reforços. Nesse método, utiliza-se uma análise limite cinemática, considerando o equilíbrio local na zona ativa e a flexibilidade dos grampos, avaliando as tensões máximas de tração e cisalhamento em cada linha de reforços.

Em ambas as metodologias (equilíbrio limite e estado de tensões internas), os grampos são considerados vetores de força aplicados nos pontos em que atravessam a superfície potencial de ruptura. Essas forças são determinadas através do conhecimento das modalidades de ruptura da estrutura grampeada, dos critérios de ruptura solo-reforço e da interação solo-grampo (CLOUTERRE, 1991).

A validação prática dessas metodologias, considera a possibilidade de mobilização simultânea do estado limite do solo e dos grampos. Isto implica na compatibilização da tensão de ruptura dos grampos e do solo, rigidez dos grampos e deformação plástica gradativa do solo.

Segundo Clouterre (1991), a suposição de mobilização simultânea de todas as resistências envolvidas no conjunto solo-grampo (tração, cisalhamento, flexão e arrancamento dos grampos, cisalhamento do solo e pressão normal do solo sobre o grampo) é uma forma satisfatória para a previsão do comportamento das estruturas em solo grampeado.

Um projeto seguro de solo grampeado depende de uma avaliação racional das forças de trabalho dos grampos para verificação da estabilidade global da estrutura e da estabilidade interna local em cada nível de grampo.

2.7.1.1 *Análise da estabilidade externa*

Segundo Lazarte *et al.* (2003) as análises da estabilidade externa objetivam a verificação da capacidade de absorção da estrutura grampeada das forças induzidas pela escavação, tensões de serviço e carregamentos externos.

Ehrlich (2003) descreve que a massa grampeada pode ser analisada como um muro de gravidade, que garanta a estabilidade da zona adjacente não reforçada. A estabilidade externa da massa de solo reforçada deve ser assegurada com a atuação do empuxo ativo da zona não reforçada, evitando o deslizamento (escorregamento), o tombamento (rotação), a ruptura do solo de fundação e a ruptura geral, que compreende uma superfície de colapso que passa sob a base da zona grampeada.

A magnitude dos empuxos atuantes na estrutura grampeada oriundos da massa não reforçada, pode ser calculada através das teorias clássicas fundamentadas no equilíbrio limite (Coulomb e Rankine) para verificação do escorregamento, do tombamento e das tensões nas fundações. Enquanto que a ruptura geral é verificada pelos métodos clássicos de equilíbrio limite citados anteriormente.

Silva (2010) sugere que a verificação da estabilidade externa seja realizada a partir da adoção de fatores de segurança globais (análise determinística) ou de fatores de segurança parciais (análise probabilística), semelhante ao que ocorre na análise da estabilidade dos muros convencionais.

2.7.1.2 Análise da estabilidade interna

Segundo Ehrlich (2003), a análise da estabilidade interna trata-se de um aspecto particular na estabilização de uma estrutura grampeada. No projeto de solo grampeado deve-se garantir um embutimento mínimo do grampo na zona resistente, de modo a evitar o seu arrancamento.

Para isso, o valor da tração máxima atuante no grampo nesta zona, não deve ser superior ao valor de sua resistência q_s , resguardado um fator de segurança adequado. Deve-se garantir também uma quantidade (densidade definida pelos espaçamentos horizontal e vertical) de reforços suficientes para que as tensões de tração atuante, não ultrapassem a capacidade resistente de cálculo do elemento, evitando a sua ruptura pelo aço. A aderência entre a barra e a calda endurecida deve ser assegurada para promover essa transferência de esforços.

O faceamento, analisado do ponto de vista mecânico, tem a função de garantir a estabilidade local da massa do solo entre os grampos, no entorno da face. Não possui função estrutural relevante e a estabilidade global da estrutura grampeada pode ser obtida sem a presença do mesmo, entretanto, desempenha papel importante na proteção contra agentes ambientais.

2.7.2 Roteiro para dimensionamento de estrutura em solo grampeado

Schaefer *et al.* (1997 apud SILVA, 2010), apresentaram uma sequência de etapas necessárias à análise das estruturas grampeadas, visando a estabilidade da obra com fatores de segurança adequados. A rotina proposta para o dimensionamento envolve definições, estimativas, cálculos e verificações, listadas a seguir:

- Definição da altura e inclinação do faceamento, dos perfis geológico e geotécnico do maciço e das sobrecargas atuantes;
- Estimativa da posição e geometria da superfície potencial de ruptura e das forças de trabalho dos grampos;
- Definição do tipo, diâmetro, comprimento, inclinação, espaçamentos horizontal e vertical e resistência dos grampos;
- Verificação da estabilidade local de cada nível de grampo, ou seja, compatibilização entre a resistência do grampo e as forças de trabalho estimadas com um fator de segurança apropriado;
- Verificação dos modos de ruptura, da estabilidade global da estrutura e da sustentação da massa grampeada durante e após a construção, com um fator de segurança adequado;
- Dimensionamento do faceamento considerando a estimativa do empuxo ativo atuante e das forças dos grampos nas conexões;
- Definição da proteção contra corrosão para estruturas permanentes;
- Definição do sistema de drenagem profunda e de superfície.

3 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

A principal finalidade do programa experimental desta pesquisa consistiu em realizar ensaios de arrancamento em doze grampos com injeção de calda de cimento somente na bainha (seis injetados com calda aditivada e seis com calda convencional), com o objetivo de comparar a resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo, q_s , em função do tipo de calda utilizada.

Procurou-se neste trabalho adotar e aperfeiçoar os procedimentos indicados na literatura especializada relativos à execução de grampos e à realização de ensaios de arrancamento, além de desenvolver e fabricar peças e equipamentos com o objetivo de otimizar todas as etapas do experimento.

A primeira parte dos trabalhos foi desenvolvida em oficinas de serralheria e usinagem e no laboratório de materiais da concreteira Pedreira Um Valemix, empresas situadas no Vale do Aço-MG, uma vez que o autor é residente dessa região.

Nas oficinas das cidades de Coronel Fabriciano-MG e Timóteo-MG foram fabricados as seguintes peças e equipamentos: funil de Marsh conforme a ABNT NBR 7681-2 (ABNT, 2013); moldes metálicos para medição da retração das caldas; rampa metálica para execução dos furos dos grampos; centralizador em PVC; misturador elétrico portátil para preparo das caldas em campo e um gabarito metálico para facilitar o acerto da face do talude para montagem do sistema de arrancamento.

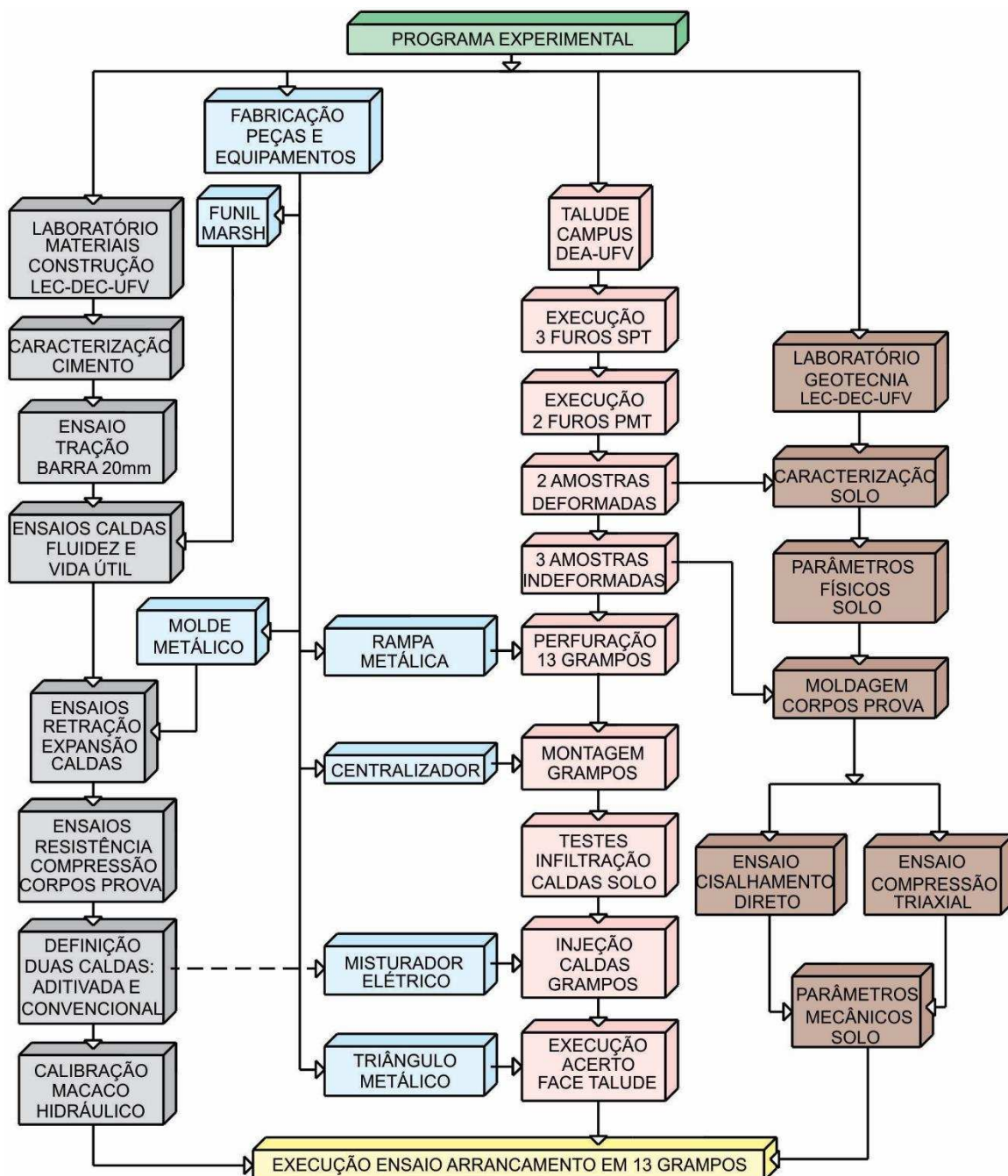
No laboratório de materiais da concreteira Pedreira Um Valemix em Timóteo-MG (prontamente disponibilizado para a realização dos primeiros testes em caldas), foram realizados ensaios de fluidez, vida útil e resistência à compressão, a partir de vários traços de caldas, usando dosagens com três tipos de cimento e duas marcas diferentes de aditivos plastificante e expensor. Esses ensaios foram fundamentais para verificação da eficiência do funil de Marsh fabricado e principalmente, para o direcionamento inicial do tipo de cimento e da marca dos aditivos a serem utilizados no prosseguimento da pesquisa.

A segunda etapa dos estudos foi desenvolvida nos laboratórios de Materiais de Construção e Geotecnia (LEC) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (DEC-UFV), onde foram realizados os seguintes ensaios: caracterizações do cimento, do aço CA 50 e das caldas (fluidez, vida útil, resistência à compressão axial e medição da retração/expansão longitudinal); caracterização física e geotécnica do solo do talude, além da calibração do macaco hidráulico.

A parte final dos experimentos foi realizada no talude localizado nos fundos do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), no campus da UFV, onde foram executados ensaios de sondagens SPT e PMT, testes de infiltração das caldas no solo, além da execução de treze grampos e dos respectivos ensaios de arrancamento.

No organograma da Figura 22 são indicadas as principais atividades desenvolvidas no programa experimental, com a interação entre elas, desde a fabricação das peças e equipamentos até a realização dos ensaios de arrancamento.

Figura 22 – Organograma das principais atividades do Programa Experimental



Fonte: Autor

3.1 Materiais

A pesquisa contemplou o emprego dos seguintes materiais: cimento Portland CPII E 32 (fabricado e fornecido gratuitamente pela empresa Lafarge Holcim Ltda); água potável fornecida pelo SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Viçosa); aditivos superplastificante PowerFlow 2150 e expensor Quellmittel (fabricados e fornecidos gratuitamente pela empresa MC-Bauchemie Brasil) e barras de aço CA 50 de 20 mm de diâmetro (fabricado pela empresa Gerdau S.A.).

3.1.1 Cimento

Nesta pesquisa seriam usados três tipos de cimento Portland fornecidos pela empresa Lafarge Holcim Ltda: o CP II E 32 (cimento composto), o CP III 40 (cimento de alto forno) e o CP V ARI (cimento de alta resistência inicial).

A proposta inicial seria estudar e definir um melhor traço para cada um desses cimentos, traços esses sem retração, a ser suprimida com a incorporação de aditivos (superplastificante e expensor) na mistura, resistência à compressão mínima de 25 MPa aos 28 dias e vida útil mínima da calda de 60 min. Após a definição dos três traços, aquele que havia proporcionado a maior expansão volumétrica do material após a cura de 48 horas, o cimento desta dosagem seria o escolhido para a realização das etapas seguintes do experimento.

Porém, após a realização dos ensaios iniciais de fluidez, vida útil e resistência à compressão com o uso dos três cimentos citados anteriormente, foi constatada a inviabilidade dessa proposta diante das inúmeras variáveis envolvidas e combinações requeridas no processo para a definição de cada traço, além do agravante do tempo necessário à cura final dos corpos de prova (28 dias).

Estimou-se que o tempo necessário à obtenção de uma amostragem representativa de traços para cada tipo de cimento, que viabilizasse um tratamento estatístico para o direcionamento aos parâmetros desejados, não seria compatível com o tempo disponível para a efetivação de todas as atividades previstas no programa experimental.

Definiu-se então usar o CP II E 32, devido à adição de escória granulada de alto forno em sua composição, que lhe confere maior granulometria e melhor trabalhabilidade (fluidez), quando comparado aos outros dois tipos de cimento. Essa vantagem do cimento CP II E 32 em relação aos cimentos CP III 40 e CP V ARI, foi

constatada durante a realização dos ensaios de fluidez e vida útil, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Ensaio de fluidez / vida útil

Tipo de cimento Fornecedor: Lafarge-Holcim	a/c	Fluidez (s) / vida útil (min)				
		0 min	30 min	60 min	90 min	120 min
CPII E 32	0,50	8,91	9,93	10,60	11,27	12,72
CP III 40	0,50	9,28	10,18	11,25	12,15	-
CP V ARI	0,50	20,25	-	-	-	-
CPII E 32	0,60	7,28	7,43	7,83	8,20	8,60
CP III 40	0,60	8,45	8,93	9,71	9,81	10,02
CP V ARI	0,60	11,84	13,20	-	-	-

Fonte: Autor

Nos ensaios realizados nas caldas de cimento em laboratório foram consumidos dez sacos de cimento de 50 Kg e em campo vinte sacos, totalizando trinta sacos de CP II E 32. Estes cimentos foram retirados gradativamente pelo autor na fábrica da Lafarge Holcim Ltda em Pedro Leopoldo-MG, ao longo das etapas do experimento.

Foi realizada a caracterização em amostras do CP II E 32, segundo as normas da ABNT, relacionadas a seguir:

- ABNT NBR 16605 (ABNT, 2017): Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica;
- ABNT NBR 11579 (ABNT, 2012): Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (n° 200);
- ABNT NBR 16372 (ABNT, 2015b): Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine);
- ABNT NBR 16606 (ABNT, 2018b): Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal;
- ABNT NBR 16607 (ABNT, 2018c): Cimento Portland – Determinação do tempo de pega;
- ABNT NBR 11582 (ABNT, 2016e): Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier;
- ABNT NBR 7215 (ABNT, 2019): Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos;
- ABNT NBR 5738 (ABNT, 2015a): Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

3.1.2 Água

A água fornecida pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) da cidade de Viçosa-MG, utilizada no preparo das caldas nos ensaios de laboratório, quanto no preparo das caldas usadas para a execução dos grampos, não foi caracterizada. Sendo assim, não se verificou os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 15900-1 (ABNT, 2009b): Água para amassamento do concreto.

3.1.3 Aditivos

Para a realização dos ensaios e testes nas caldas de cimento em laboratório e no talude experimental, além da execução dos treze grampos, a MC-Bauchemie Brasil forneceu uma amostra de 3 litros do superplastificante PowerFlow 2150 e um saco de 20 Kg do expensor Quellmittel. Esses aditivos não foram caracterizados conforme os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 11768 (ABNT, 2011): Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Sendo então, consideradas satisfatórias as especificações fornecidas pelo fabricante, descritas a seguir.

3.1.3.1 Aditivo superplastificante: MC-PowerFlow 2150

De acordo com o fabricante MC-Bauchemie Brasil, esse aditivo líquido de cor marrom é um superplastificante sintético baseado na nova tecnologia de polímeros policarboxilatos (PCE) desenvolvida pela MC, indicado para aplicações que requerem alta fluidez e alto desempenho. O produto promove grande redução na quantidade de água e mantém longos tempos de trabalhabilidade, sem prejuízo à resistência inicial. Apresenta boa compatibilidade com incorporadores de ar, boa estabilização em altas consistências, dosagem econômica e é fornecido comercialmente em tambores de 210 kg. A densidade do MC-PowerFlow 2150 é de 1,06 g/cm³ e a dosagem recomendada é de 0,2 a 5,0% em relação ao peso do cimento.

3.1.3.2 Aditivo expensor: MC-Quellmittel

As propriedades do aditivo MC-Quellmittel em pó de cor bege/cinza, indicadas pelo fabricante MC-Bauchemie Brasil são: expansão, formação de microporos e isenção de cloretos. Indicado para concretos, argamassas e caldas de cimento a fim de recompor, reforçar e selar pequenas cavidades, como trincas. Sua atuação na calda de cimento ocorre através da propriedade de formação de microporos e o

aumento do volume influencia a redução da sedimentação. A expansão completa é determinada aproximadamente entre 2 a 4 horas, dependendo da temperatura ambiente e devido à formação de poros. A resistência do material pode ser levemente reduzida. A densidade do MC-Quellmittel é de $1,40 \text{ g/cm}^3$ e a dosagem recomendada é de 0,1 a 1,0% em relação ao peso do cimento, sendo fornecido comercialmente em sacos de 20 kg.

3.1.4 Aço CA 50

O CA 50 fabricado pela Gerdau S.A. foi caracterizado segundo os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 7480 (ABNT, 2007): Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação e na ABNT NBR 6152 (ABNT, 1992a): Materiais Metálicos – Determinação das propriedades mecânicas à tração.

Foram utilizadas catorze barras de 20 mm de diâmetro, com 6,0 m de comprimento cada. Treze barras foram usadas na confecção dos grampos (Figura 23a). A barra restante foi subdividida em dez pedaços, sete deles usados no travamento dos equipamentos de perfuração e três no ensaio de resistência à tração (Figura 23b).

Figura 23 – Barras de aço utilizadas nos experimentos



a)

b)

(a) Barras de aço com centralizadores; (b) barras de aço do ensaio de tração.

Fonte: Autor

3.2 Equipamentos

Considerando que os aditivos expansores disponíveis comercialmente foram concebidos para a redução ou eliminação da retração, ou mesmo para a promoção de uma leve expansão em concretos, argamassas e caldas de cimento, e não para produzirem expansões volumétricas nesses materiais durante a cura, buscou-se

recursos para evitar as falhas e os erros relatados em outros experimentos, que se repetidos, certamente influenciariam negativamente nos resultados, diante da sensibilidade e precisão requeridas no estudo comparativo proposto.

Visto desta forma e considerando ainda as inúmeras variáveis inerentes à própria origem, complexibilidade e constituição dos solos, que de certa forma poderiam influenciar naturalmente nos resultados, procurou-se reduzir ou eliminar as variáveis inerentes às falhas nos processos executivos. Para isso foram desenvolvidos e fabricados pelo autor algumas peças e equipamentos para auxílio na execução de todas as etapas do experimento.

Foram fabricados as seguintes peças e equipamentos:

- Funil de Marsh;
- Molde metálico;
- Rampa metálica;
- Centralizador em PVC;
- Misturador elétrico portátil;
- Gabarito metálico.

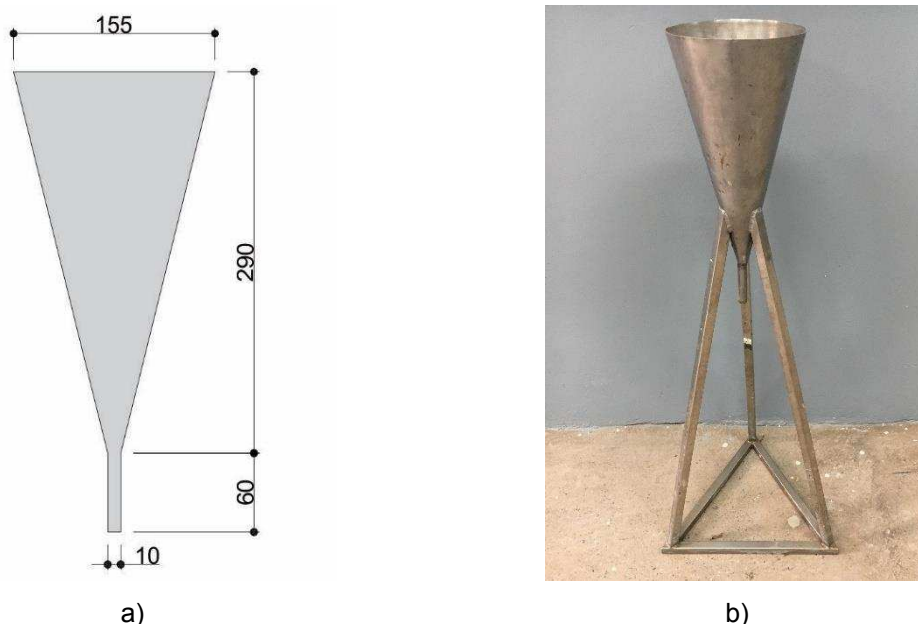
3.2.1 *Funil de Marsh*

Segundo a ABNT NBR 7681-2 (ABNT, 2013), este equipamento é feito de material metálico, indeformável de paredes internas sem irregularidades, devendo ser apoiado em suporte confeccionado com o mesmo material. Na Figura 24a são indicadas as dimensões internas do equipamento.

O funil foi confeccionado em aço inoxidável 304 (Figura 24b) de acordo com as especificações da ABNT NBR 7681-2 (ABNT, 2013). O uso do aço inoxidável deveu-se às qualidades do material, como por exemplo:

- Baixa rugosidade superficial, que proporciona um atrito favorável com a calda de cimento e propicia uma limpeza rápida e eficiente;
- Alta durabilidade;
- Resistência à corrosão;
- Resistente às variações bruscas de temperatura;
- Material inerte (não reage com os componentes químicos do cimento).

Figura 24 – Funil de Marsh



(a) Dimensões internas do funil de Marsh (mm); (b) funil de Marsh em aço inox 304.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7681-2 (ABNT, 2013).

3.2.2 Molde metálico

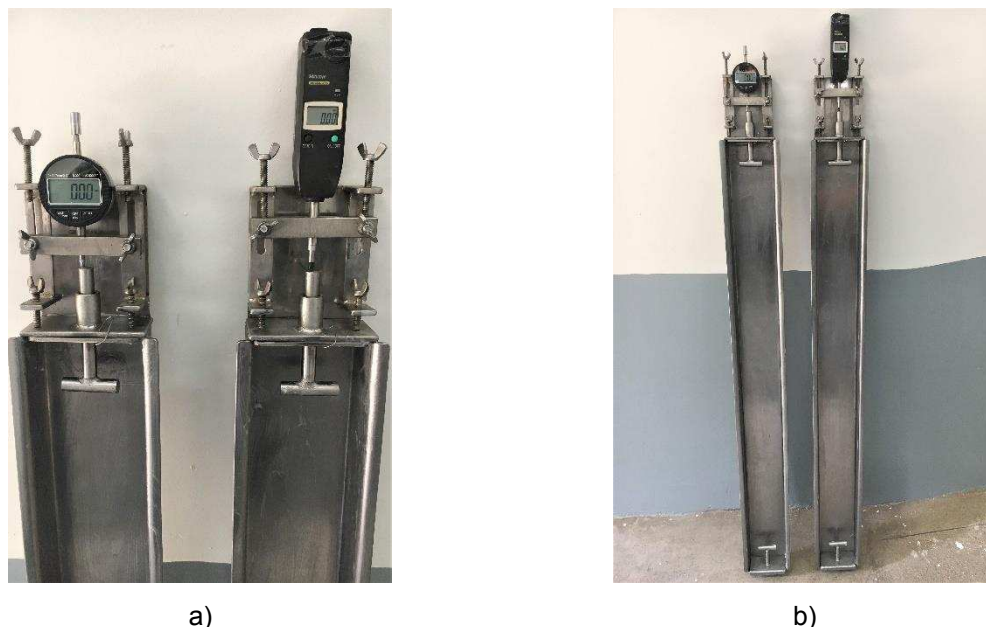
Atualmente não existem normalizações da ABNT referentes à medição da retração em caldas de cimento. Em busca à literatura científica, foram encontrados alguns modelos de equipamentos desenvolvidos para a medição da retração, denominados de “bancadas de retração”. São equipamentos de alta precisão (0,01 μm) e geralmente, utilizam um molde metálico de pequenas dimensões, interligado a transdutores de deslocamento para as leituras dos deslocamentos.

Neste estudo foi proposto um molde metálico em aço inox 304 para medição da retração das caldas com base em um modelo utilizado por Souza (2013). A justificativa para o uso deste modelo, partiu da ideia de que a medição da retração longitudinal da calda poderia ser realizada precisamente, mesmo utilizando relógio comparador com precisão de 0,01 mm, diante da grande dimensão longitudinal do mesmo, quando comparado com as dimensões das bancadas de retração.

Foram fabricados quatro moldes, com 1220 mm de comprimento, sendo 120 mm reservados à instalação do relógio comparador e da peça de engastamento da calda (Figura 25a). Nesta extremidade, o eixo da peça de engastamento interliga-se ao relógio comparador, com liberdade de deslocamento longitudinal. Na outra extremidade a peça de engastamento é fixa. Internamente, o molde tem as seguintes

dimensões: 1100 mm de comprimento, 100 mm de largura e 50 mm de altura, que totalizam um volume de 5,5 litros (Figura 25b)

Figura 25 – Moldes metálicos em aço inox



(a) Detalhe do sistema de leitura do molde; (b) vista geral do molde.

Fonte: Autor.

3.2.3 Rampa metálica

Mediante buscas realizadas no mercado da Construção Civil, foram encontrados inúmeros modelos de equipamentos para perfuração de solo para grampos e tirantes, desde perfuratrizes hidráulicas automatizadas até os trados manuais (Figura 26a).

Durante o acompanhamento de obras de contenções em solo grampeado e cortinas atirantadas na região do Vale do Aço-MG e nas visitas técnicas realizadas em obras semelhantes em Viçosa-MG, foi observado pelo autor o uso frequente de aparelhagens adaptadas para a perfuração do solo, compostas de motor a gasolina, célula hidráulica, hastes de sondagem SPT e ponteira cortante.

Tratam-se de equipamentos operados manualmente por dois funcionários que, inicialmente, direcionam a inclinação do furo pelas hastes através de um gabarito instalado rente à face do talude. As hastes são interligadas à ponteira cortante em uma extremidade e à célula hidráulica na outra e se interligam ao motor a gasolina. A perfuração é realizada com recirculação d'água através de uma bomba convencional, interligada por mangueira transparente à célula hidráulica. Esta direciona a água (ou lama) às hastes, no sentido da ponteira cortante. O material da perfuração é

direcionado a um reservatório instalado abaixo da boca do furo, onde é inserido o mangote de sucção da bomba, realizando desta forma, a recirculação da lama produzida. Na execução dos furos próximos ao pé do talude, a perfuração é realizada sem a recirculação d'água (mais onerosa), diante da impossibilidade da instalação do reservatório, conforme pode ser observado na Figura 26b.

Figura 26 – Perfuração do solo com uso de trado e equipamento adaptado



(a) Vista de um trado manual; (b) perfuração sem recirculação d'água.

Fonte: Autor.

O processo executado desta forma exige experiência, habilidade e resistência física dos operários para a realização de furos homogêneos (mesmo diâmetro, alinhamento e inclinação). A produtividade do serviço depende de um terceiro funcionário para revezamento, devido ao grande esforço físico exigido, que além de suportarem o peso dos equipamentos, devem aplicar uma força adicional com movimentos de vai-e-vem no furo para a penetração da ponteira cortante.

Diante do exposto e considerando a necessidade de execução de furos homogêneos neste experimento, foi projetada e fabricada uma rampa metálica para o apoio dos equipamentos de perfuração (ponteira cortante, hastes, célula hidráulica e motor), a fim de garantir precisão no alinhamento e inclinação do furo.

Trata-se de uma rampa treliçada simples, fabricada com cantoneiras de aço laminado A-36 e perfis dobrados enrijecidos (U de 75 mm, SAE-1020), que permitem o deslizamento de uma peça composta de quatro rodas metálicas, onde são apoiados o motor a gasolina e a célula hidráulica (Figura 27a). Possui 2,88 m de comprimento; alturas de 1,01 m e 0,40 m nas extremidades; ângulo de 12° com a horizontal; três peças de madeira paraju com 1,20 m de comprimento (fixadas na base para garantia

da estabilidade transversal) e uma peça de madeira na extremidade com regulagem de altura, que serve de apoio inicial para a ponteira cortante. A rampa é bipartida para facilitar o transporte e permitir, caso necessário, a execução de furos em locais com espaços limitados. Na Figura 27b são indicados os detalhes da rampa instalada junto ao talude experimental e na Figura 28, um corte longitudinal do projeto concebido, indicando as dimensões da estrutura e alguns detalhes dos componentes da rampa.

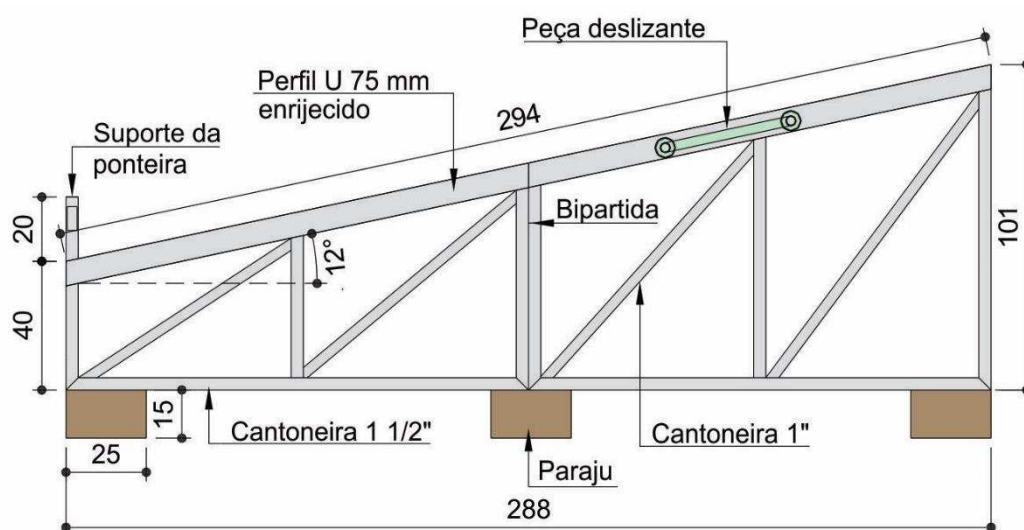
Figura 27 – Disposição e detalhes dos equipamentos de perfuração



(a) Detalhe do motor a gasolina, peça deslizante, célula hidráulica e haste; (b) detalhe do suporte móvel para apoio inicial da ponteira cortante.

Fonte: Autor.

Figura 28 – Detalhes, dimensões e componentes da rampa metálica (cm)



Fonte: Autor

3.2.4 Centralizador em PVC

No acompanhamento das obras mencionadas anteriormente e buscas em publicações científicas, observou-se o uso de modelos diferentes de centralizadores

(espaçadores) em PVC na montagem dos grampos e tirantes. Estas peças têm a função de posicionar adequadamente o aço no centro do furo, para garantir um recobrimento homogêneo e proteção da barra pela calda endurecida.

Um modelo de centralizador de uso recorrente nas obras visitadas, é confeccionado com tubo de PVC para água fria, com aproximadamente 0,40 m de comprimento e mesmo diâmetro (ou um diâmetro acima) das barras dos grampos e tirantes. Para a confecção deste modelo, o tubo é cortado longitudinalmente com serra circular em vários trechos sem atingir as pontas, sendo fixo à barra de aço com arame recozido pelas duas extremidades, de modo a proporcionar a geometria indicada na Figura 29a, cuja parte central define o diâmetro da peça.

No acompanhamento da confecção de alguns desses centralizadores pelo autor, foi observada uma certa morosidade e riscos iminentes de acidentes durante a fabricação. Foram também observados problemas na inserção dos tirantes nos furos. As peças deslocavam-se ao longo da barra, modificando o espaçamento inicial concebido, além do diâmetro. Para travá-las firmemente na barra de aço e reduzir os deslocamentos eram necessárias muitas voltas de arame recozido.

Diante desses problemas observados, foi desenvolvido e fabricado um novo modelo de centralizador, utilizando-se tubo de PVC de esgoto de 100 mm (mesmo diâmetro da cabeça cortante usada na perfuração). Trata-se de uma peça de confecção simplificada, fixação eficiente e baixo custo, sendo afixada diretamente na barra de aço somente em uma das extremidades. Este procedimento permite uma leve deformação da peça que otimiza a introdução da barra no furo.

Esse modelo mantém a barra centralizada no furo e permite, diante de suas medidas e geometria, a passagem com facilidade da mangueira de injeção, além de tubos de reinjeções, se necessários. Possui área superficial muito reduzida (55% menor quando comparado ao modelo descrito anteriormente), o que favorece a passagem e a acomodação final da calda, reduzindo a possibilidade de formação de nichos no entorno das peças.

Na montagem dos treze grampos foram usados sessenta e cinco centralizadores, cinco unidades por grampo conforme indicado na Figura 29b. As medidas e os detalhes do posicionamento da peça inserida no furo são indicados na Figura 30a e o detalhe da fixação na barra de aço na Figura 30b. Para confecção das 65 peças foram necessários apenas 2,40 m de tubo de PVC de 100 mm, enquanto

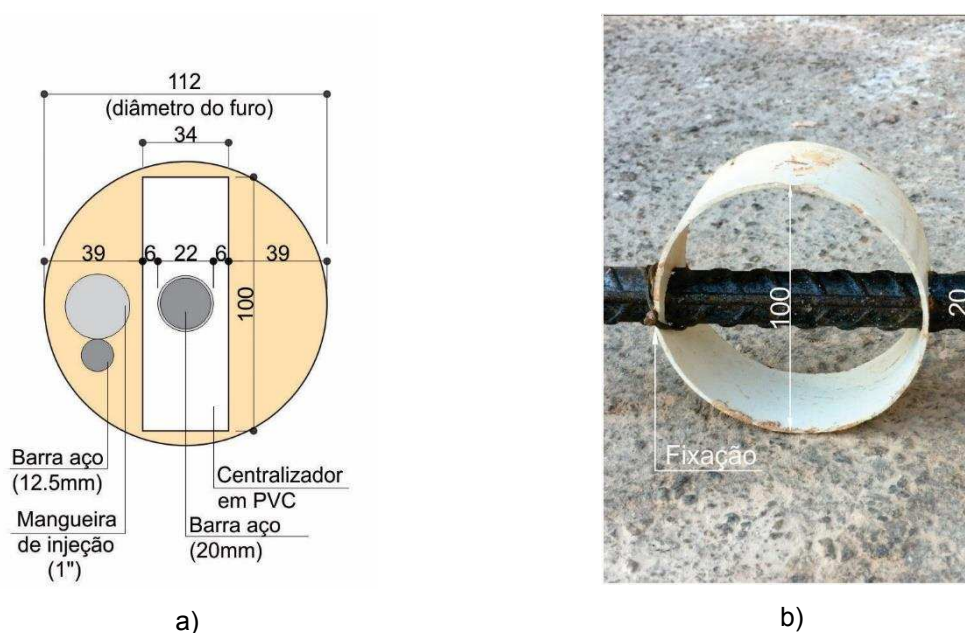
que para fabricação da mesma quantidade do modelo anterior (PVC de água fria), seriam necessários 26,0 m de tubo de 20 mm de diâmetro.

Figura 29 – Tipos de centralizadores



(a) Modelo de centralizador utilizado em obras no Vale do Aço-MG; (b) novo modelo de centralizador.
Fonte: Autor.

Figura 30 – Detalhes do novo centralizador



(a) Dimensões e posicionamento do centralizador no furo (mm); (b) detalhe do centralizador fixado na barra somente em uma extremidade (mm).

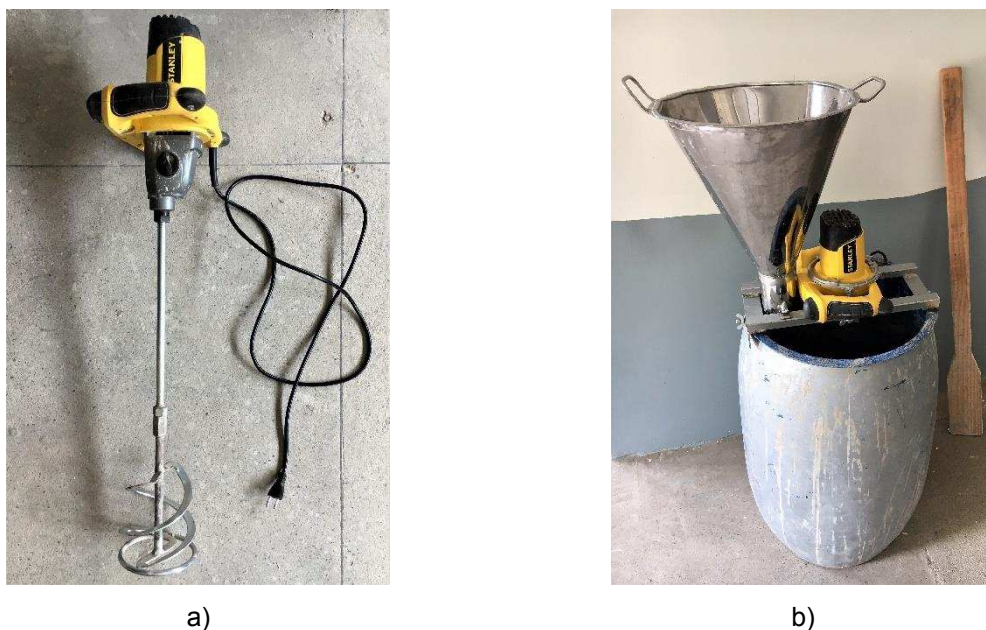
Fonte: Autor.

3.2.5 Misturador elétrico portátil

Com o objetivo de preparar as caldas em campo de forma idêntica às caldas executadas no laboratório, foi fabricado um misturador elétrico portátil e de fácil manuseio. Na confecção deste equipamento foram utilizados um tambor circular de plástico resistente com capacidade de 120 litros; um motor elétrico da marca Stanley

(127 v) com rotação ajustável, acoplado a uma haste metálica helicoidal (Figura 31a) e um funil de inox de ponta longa, para introdução direcionada do cimento (sem os riscos de perda de material). O motor elétrico é afixado a uma base metálica e esta pode ser presa na borda do tambor por parafusos borboleta ou manuseada pelo operador, a fim de atingir o fundo e as paredes laterais do tambor (Figura 31b).

Figura 31 – Modelo de misturador elétrico para calda de cimento



(a) Motor elétrico com haste metálica helicoidal; (b) misturador elétrico: tambor, base metálica, motor e funil de inox.

Fonte: Autor.

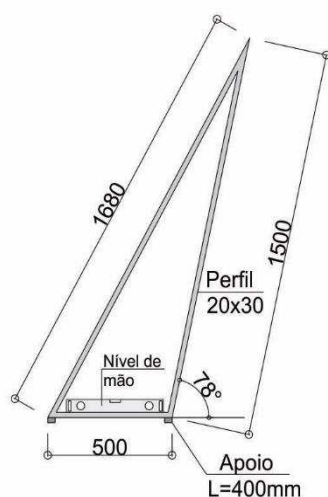
3.2.6 Gabarito metálico

Na montagem dos equipamentos para realização dos ensaios de arrancamento é imprescindível que haja um perfeito alinhamento entre as peças principais do ensaio (painel rígido de madeira, base metálica e macaco hidráulico) e a barra de aço, de modo que atuem somente esforços de tração no grampo. Para isso, é preciso que a face do talude esteja perpendicular ao alinhamento da barra (nas direções vertical e horizontal), caso contrário, são necessárias cunhas entre as peças para obter essa perpendicularidade. O uso das cunhas geralmente dificulta a montagem do sistema e quando mal instaladas, podem gerar esforços de flexão no grampo.

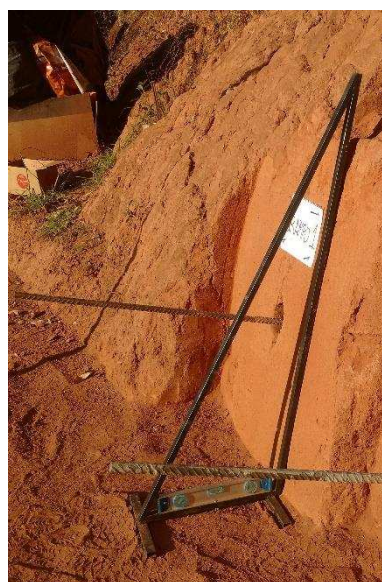
Para evitar o uso das cunhas foi desenvolvido um gabarito metálico de geometria triangular para direcionar o acerto da face do talude. A peça foi fabricada com barras retangulares de seção 20x30 mm (aço dobrado SAE 1020), conforme as medidas e os ângulos indicados na Figura 32a. Como foi definida uma inclinação de 12° para os

grampos, o ângulo do lado do gabarito em contato com o talude é de 78° , direcionado por um nível de mão instalado na base da peça. Com o auxílio desse gabarito e de um esquadro, foi possível obter uma perpendicularidade precisa (nas direções vertical e horizontal) entre a face do talude e a barra de aço (Figura 32b).

Figura 32 – Triângulo metálico para acerto da face do talude



a)



b)

(a) Geometria do triângulo metálico (mm); (b) triângulo metálico instalado junto ao talude.

Fonte: Autor.

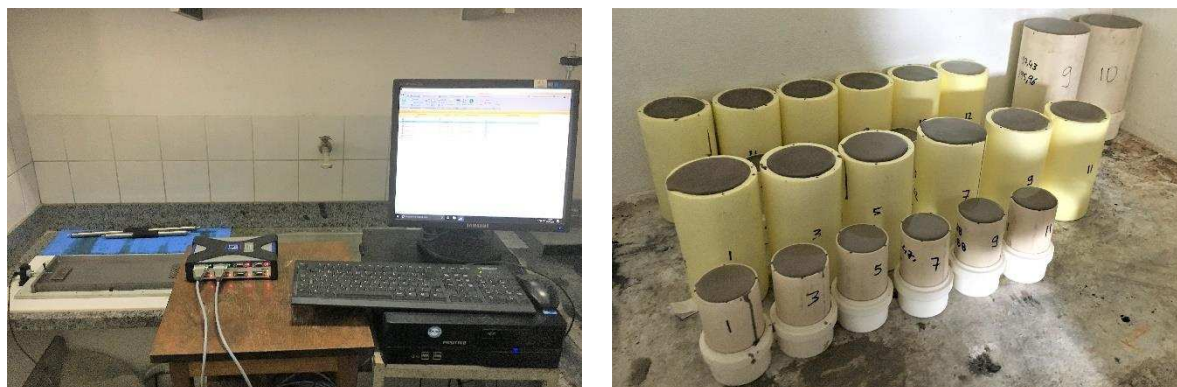
3.3 Métodos

Inicialmente, foi realizada a caracterização do cimento CP II E 32 e do aço CA 50, seguida dos ensaios nas caldas de cimento, objetivando a caracterização e definição das duas caldas usadas na execução dos grampos: calda aditivada (com a incorporação dos aditivos superplastificante PowerFlow 2150 e expensor Quellmittel) e a calda convencional (sem aditivos).

Foram realizados ensaios normalizados de fluidez, vida útil e resistência à compressão axial; medição da retração (longitudinal) através do molde metálico descrito no item 3.2.2 e pela bancada de retração (Figura 33a), disponibilizada pelo DEC-UFV, (dimensões internas: 400 mm de comprimento, 150 mm de largura, 15 mm de altura e volume de 0,9 litros) – projetada originalmente pelo *Institut National de Sciences Appliquées (INSA)* de Toulouse, França, conforme Bastos (2001); além de medição da retração e expansão longitudinal através de moldes de poliestireno expandido (EPS),

com dimensões internas aproximadas de 68 x 135 mm, e de PVC, com dimensões internas aproximadas de 48 x 96 mm e 98 x 196 mm (Figura 33b).

Figura 33 – Bancada de retração e moldes de EPS e PVC



a)

b)

(a) Esquema de montagem da bancada de retração; (b) moldes cilíndricos de EPS e PVC.

Fonte: Autor.

Na etapa seguinte foram realizadas a caracterização física e geotécnica do talude através de ensaios de laboratório (granulometria conjunta, massa específica, limites de liquidez e plasticidade, cisalhamento direto e compressão triaxial) e ensaios de campo (SPT e PMT). Também foram realizados o levantamento planialtimétrico, testes de infiltração das caldas no talude e a calibração do macaco hidráulico.

Na etapa final dos experimentos foram executados os treze grampos, os acertos da face do talude e os ensaios de arrancamento. De posse dos valores das resistências q_s dos grampos, foi realizada a análise comparativa proposta, precedida de tratamento estatístico dos dados.

3.3.1 Caracterização do cimento Portland CP II E 32

Os valores obtidos nos ensaios de caracterização do cimento Portland CP II E 32 são apresentados na Tabela 5 e atenderam aos requisitos da ABNT NBR 11578 (ABNT, 1991): Cimento Portland Composto.

Tabela 5 – Caracterização do cimento Portland CP II E 32

Características e propriedades	Unidade	Resultados Caracterização	
Massa inicial	g	50	
Resíduo	g	0,63	
Índice de finura	%	1,26	
Massa específica do cimento	g/cm ³	3,030	
Tempo de início de pega	h:min	03:52	
Tempo de fim de pega	h:min	04:43	
Expansibilidade à quente	mm	0,37	
Expansibilidade à frio	mm	0,00	
Resistência à compressão	3 dias	MPa	18,5
	7 dias	MPa	29,3
	28 dias	MPa	45,1

Fonte: Autor

3.3.2 Ensaio de tração do aço CA 50

Os principais resultados do ensaio de tração do aço utilizado na execução dos grampos são apresentados na Tabela 6. O certificado oficial do ensaio com informações complementares encontra-se no Apêndice A. O aço da Gerdau S.A. apresentou limite de escoamento médio de 655 MPa, valor consideravelmente superior (31%) ao valor de 500 MPa especificado na ABNT NBR 6152 (ABNT, 1992).

Tabela 6 – Dados do ensaio de tração do aço CA 50

Número do CP	Diâmetro (mm)	Comp. (mm)	Limite de escoamento (kgf)	Limite de resistência (kgf)	Alongamento (mm)
01	20	599	20.430	25.250	41,0
02	20	597	20.260	25.070	37,8
03	20	597	20.760	25.390	41,4

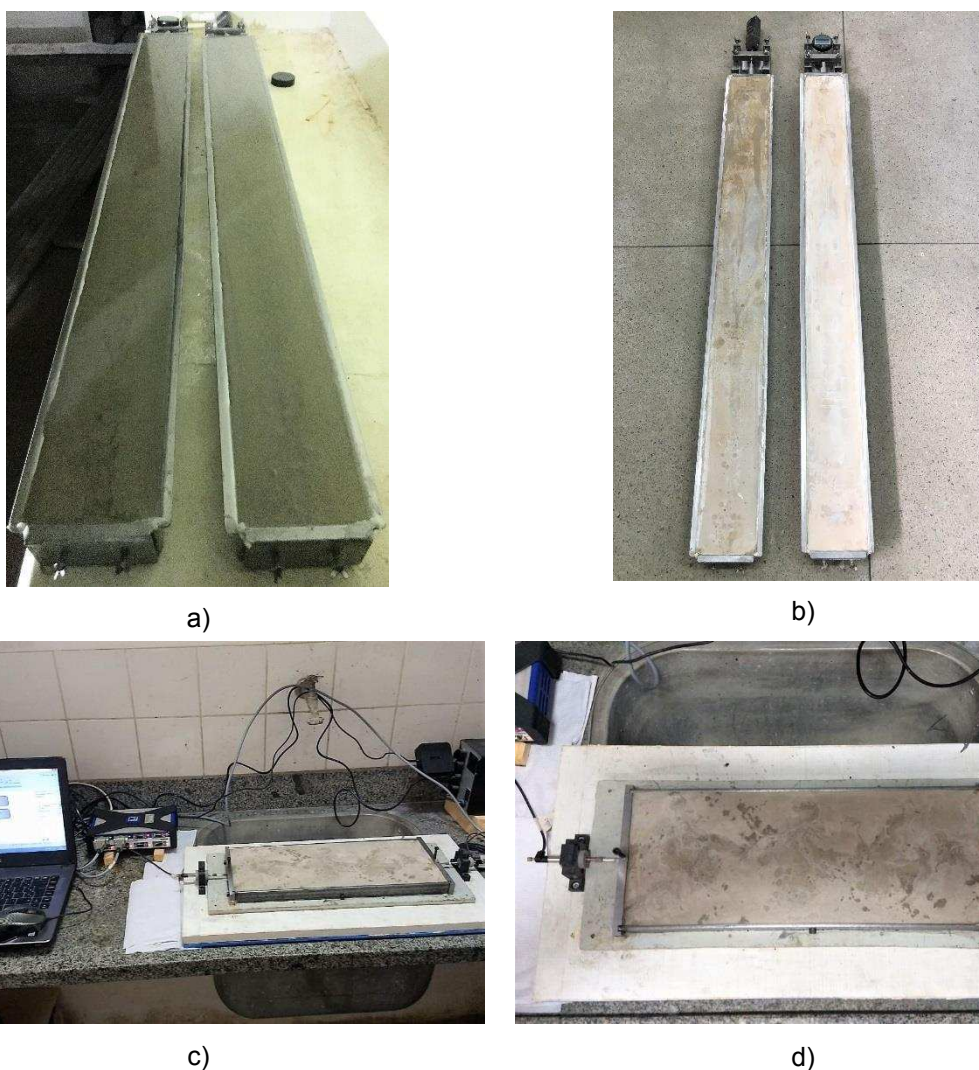
Fonte: Autor

3.3.3 Caracterização das caldas aditivada e convencional

3.3.3.1 Medição da retração e expansão longitudinal

As medições das retrações das caldas no estado fresco e endurecido foram realizadas, inicialmente, utilizando-se os moldes metálicos e a bancada de retração descritos anteriormente. Tratam-se de moldes horizontais, concebidos para a medição da retração do corpo de prova somente na direção longitudinal (Figura 34).

Figura 34 – Medição da retração longitudinal em calda de cimento



(a) Molde metálico em cura na câmara úmida; (b) corpo de prova após a cura de 28 dias; (c) medição da retração pela bancada de retração; (d) detalhe do corpo de prova após 24 h de ensaio

Fonte: Autor.

Durante e após a cura dos corpos de prova com o uso desses dois modelos, observou-se, visualmente, uma redução significativa na altura dos mesmos devido à exsudação, quando comparada à variação do comprimento dos corpos de prova.

A retração média obtida nos corpos de prova ensaiados no molde metálico proposto foi de 0,03 mm, enquanto que na bancada de retração foi de 0,01 mm. O percentual médio obtido de retração longitudinal pelo molde metálico foi de 0,0027% e na bancada de retração o percentual foi de 0,0025%.

Constatou-se então, que esses modelos são viáveis para medição da retração autógena em caldas de cimento, responsável por uma parcela reduzida da retração volumétrica da peça, que acontece ao longo da vida útil do material.

Diante desses resultados, buscou-se uma terceira alternativa para a viabilização da medição da retração plástica, causada pela exsudação e responsável pela parcela significativa da redução volumétrica do material ainda no estado fresco e que ocorre nas primeiras 48 horas.

Foram então utilizados os moldes verticais cilíndricos de EPS (material inerte) e de PVC (fabricados pelo autor). Esses moldes, inicialmente, eram medidos internamente com paquímetro digital (precisão de 0,01 mm), através de duas medidas ortogonais do diâmetro e quatro medidas da altura espaçadas de 90°. As medidas da largura e da altura dos moldes eram definidas pela média desses valores.

A cada traço executado, eram moldados três corpos de prova para medição da retração. Após a cura de 48 horas em câmara úmida, realizava-se a desforma e a medição dos corpos de prova da mesma forma descrita acima. Essas medidas eram subtraídas das medidas dos moldes, obtendo-se assim, os valores da retração (ou expansão) longitudinal e transversal do corpo de prova (Figura 35).

Figura 35 – Corpos de prova moldados no EPS e PVC



(a) Corpos de prova com fator a/c de 0,43 e 0,60; (b) corpos de prova com fator a/c entre 0,43 e 0,70.

Fonte: Autor.

Durante as medições internas dos moldes foi constatada uma certa maleabilidade no diâmetro dos mesmos. Em função dessa deformabilidade transversal apresentada, os dados obtidos nesta direção foram desprezados, sendo avaliada somente a variação dimensional da altura (longitudinal).

3.3.3.2 Calda aditivada

Para definição da calda aditivada foram executados, inicialmente, em torno de trinta traços com as seguintes faixas de trabalho: fator a/c entre 0,40 e 0,70; superplastificante PowerFlow 2150 entre 0,2 e 2,0% e expansor Quellmittel entre 0,2 e 1,0%. Os traços que apresentaram alguma inconsistência, como alta viscosidade, resistência à compressão muito reduzida, sedimentação acentuada (sem trabalhabilidade) ou incompatibilidade entre os percentuais dos dois aditivos, foram descartados.

Com isso, restaram-se dezesseis traços designados de 1 a 16, considerados aptos para um tratamento estatístico, com o objetivo de direcionar à dosagem da calda aditivada. As novas faixas de trabalho foram então reduzidas: fator a/c de 0,40 a 0,60, superplastificante de 0,2 a 0,5% e expansor de 0,5 a 1,0% e foram impostos os seguintes limites ao software: vida útil mínima da calda de 60 min, resistência à compressão mínima de 25 MPa aos 28 dias e expansão longitudinal do corpo de prova entre 0,5 e 1,0%.

Os dezesseis traços foram então tratados no *software* Minitab 18, que direcionou à seguinte dosagem: fator a/c=0,43; expansor Quellmittel=0,80%; superplastificante PowerFlow 2150=0,28%.

Em seguida, foram executados mais quatro traços designados de 17 a 20, para confirmação da dosagem direcionada pelo *software* e definição do traço da calda aditivada. Realizaram-se ensaios de fluidez, vida útil, resistência à compressão e retração/expansão, sendo que o traço 17 foi realizado com a dosagem direcionada pelo Minitab 18 e os outros três com variações mínimas nos percentuais dos aditivos. Os resultados desses quatro traços testados confirmaram a dosagem obtida pelo *software*.

Assim, definiu-se o traço da calda aditivada no laboratório com as seguintes características: fator a/c de 0,43; expansor Quellmittel de 0,80%; superplastificante PowerFlow de 0,28%; massa específica de 1,90 g/cm³; vida útil de 60 min; resistência à compressão aos 28 dias de 41,64 MPa e expansão longitudinal de 1,95%.

No Apêndice B são apresentados detalhadamente os procedimentos realizados no Minitab 18, incluindo as tabelas e os gráficos gerados pelo *software*. São apresentadas também as tabelas com os traços 1 a 16 e os traços 17 a 20, incluindo massa específica, temperaturas da calda e ambiente, umidade ambiente, valores de

fluidez e vida útil, resistência à compressão axial aos 7, 14 e 28 dias e os percentuais da expansão ou retração longitudinal.

3.3.3.3 *Calda convencional*

Para definição da calda convencional foram testados três diferentes fatores a/c: 0,50 (traço 15), 0,60 (traço 16) e 0,70 (traço 21). Foi constatado pelo autor em obras de solo grampeado, o uso corriqueiro de traços com fatores a/c variando entre 0,50 e 0,70, mesmo para a injeção da bainha. Diante disso, a calda convencional foi definida com um fator a/c de 0,60, por ser a média do intervalo acima.

Assim, definiu-se o traço da calda convencional no laboratório com as seguintes características: fator a/c de 0,60; massa específica de 1,74 g/cm³; vida útil de 120 min, resistência à compressão aos 28 dias de 21,14 MPa e retração longitudinal de 6,23%.

No Apêndice B são apresentados os detalhes dos traços 15, 16 e 17, incluindo massa específica, temperaturas da calda e ambiente, umidade ambiente, valores de fluidez e vida útil, resistência à compressão axial aos 7, 14 e 28 dias e os percentuais da retração longitudinal.

3.3.4 **Caracterização do talude experimental**

A caracterização física e geotécnica do talude foi realizada pelo levantamento planialtimétrico e por ensaios de campo e laboratório.

Em campo foram realizados três furos SPT (*Standard Penetration Test*) e dois furos PMT (*Pressiométrico tipo Ménard*), para obtenção dos parâmetros necessários à estimativa da carga de ruptura dos grampos por correlações empíricas e pela metodologia descrita na ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006).

Em laboratório foram realizados os ensaios de caracterização física: granulometria conjunta; limites de liquidez e plasticidade; peso específico dos sólidos e de caracterização geotécnica: cisalhamento direto e compressão triaxial.

3.3.4.1 *Definição do talude*

Nesta pesquisa era imprescindível que o talude experimental apresentasse uma homogeneidade física e geotécnica satisfatória, a fim de reduzir as variáveis inerentes à origem e constituição dos solos. Variações geotécnicas relevantes no solo de aplicação dos grampos poderiam mascarar os efeitos dos aditivos na redução dos

vazios oriundos da retração, para obtenção de ganho de resistência no atrito de interface solo-grampo.

Foi escolhido um talude dentro do campus da UFV, localizado nos fundos do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), próximo ao galpão da serralheria, conforme indicado na planta de localização da Figura 36.

O talude experimental possui altura uniforme de aproximadamente 4,00 m, inclinação do faceamento em torno de 47° e extensão aproximada de 18,00 m, conforme indicado na Figura 37. Na parte superior do talude existe uma plantação experimental de eucaliptos e uma canaleta de drenagem próxima à crista. Na Figura 38 apresenta-se uma seção típica do mesmo.

Figura 36 – Planta de localização do talude experimental



Fonte: Google Earth, 2019.

Figura 37 – Talude experimental



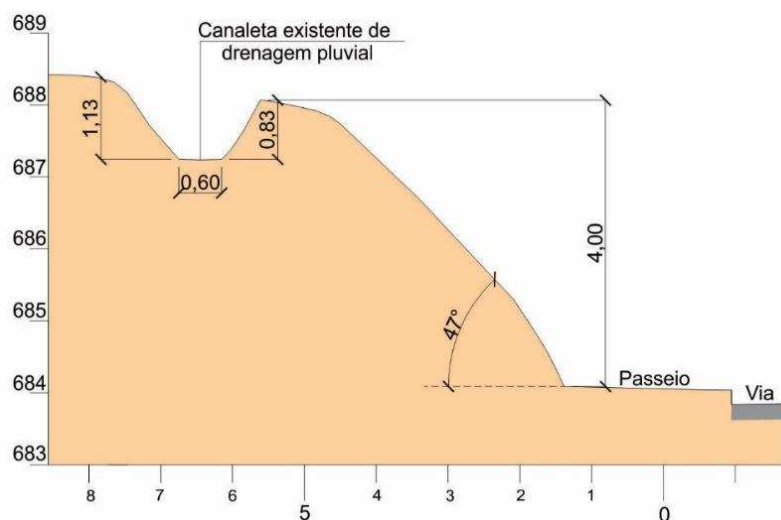
a)

b)

(a) Vista geral do talude; (b) vista parcial do talude.

Fonte: Autor.

Figura 38 – Seção típica do talude (medidas em m)



Fonte: Autor

3.3.4.2 Ensaios de campo

Os ensaios de campo objetivaram a obtenção dos parâmetros necessários à estimativa de uma faixa de variação da resistência q_s para o solo do talude, através de correlações empíricas existentes na literatura e pela metodologia descrita na ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006), conforme detalhado nas seções 2.5.2.2 e 2.5.2.23.

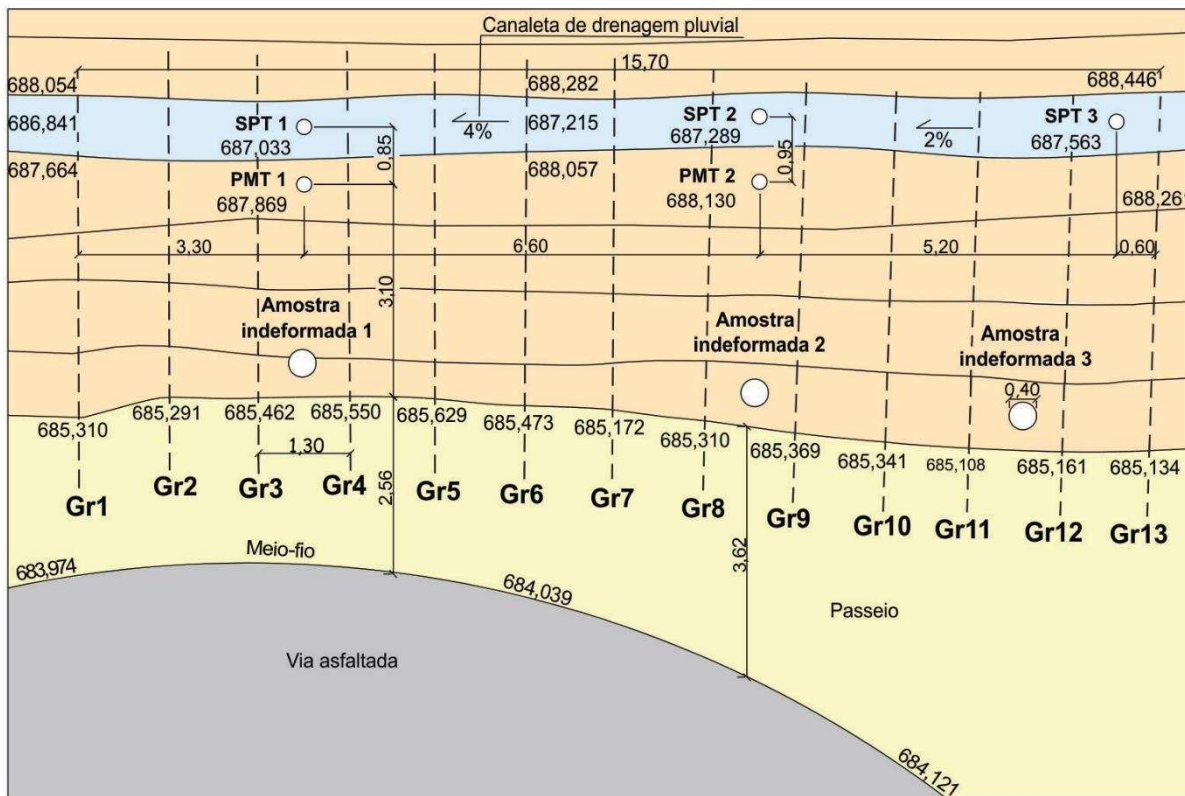
De posse dos valores estimados de q_s , foram definidos a geometria do grampo, o diâmetro da barra de aço, o macaco hidráulico e o manômetro a serem utilizados.

3.3.4.2.1 Sondagem SPT

A sondagem de simples reconhecimento com SPT, ou sondagem SPT, normalizada pela ABNT NBR 6484 (ABNT, 2001): Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio, foi utilizada para a identificação das camadas de solo e obtenção dos valores do N_{SPT} , necessários à estimativa da resistência q_s por correlações empíricas e pela ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006).

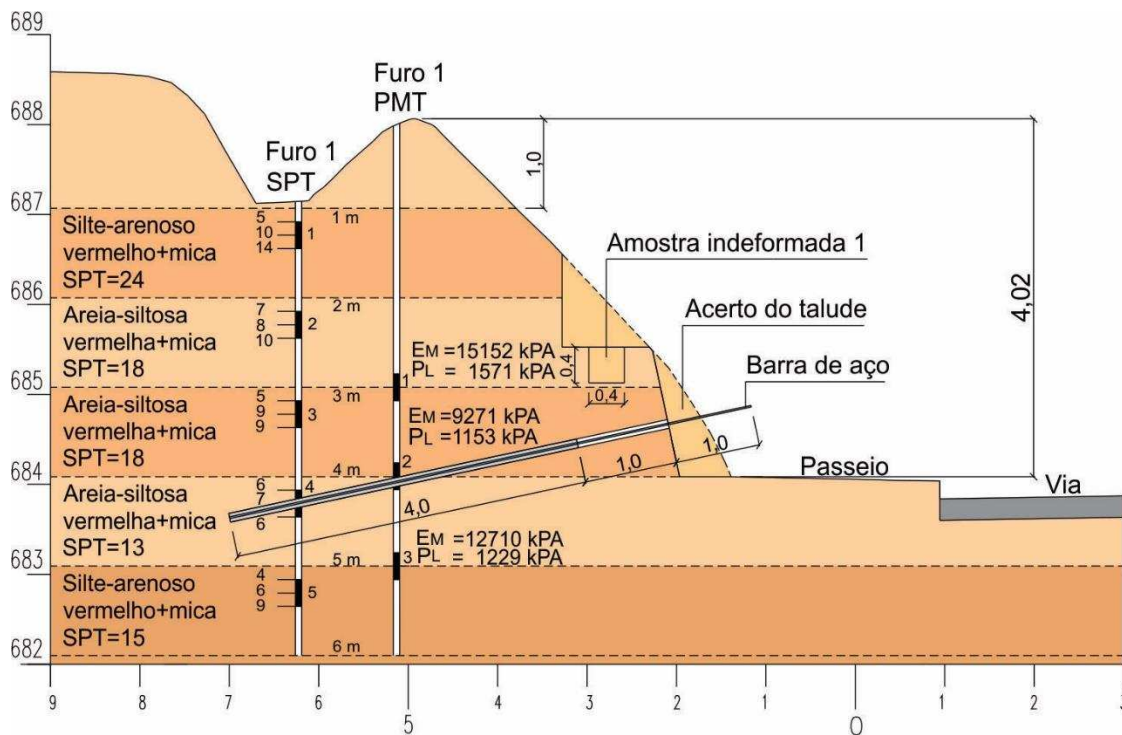
Foram realizados três furos de sondagem SPT com 5,00 m de profundidade, a partir do fundo da canaleta existente, escavados por meio de trado manual. A localização dos furos e dos grampos, designados de Gr 1 a Gr 13 estão indicadas na Figura 39 e nas seções esquemáticas 1, 2 e 3 das Figuras 40 a 42, são indicados o tipo de solo e o valor do N_{SPT} encontrados por camada.

Figura 39 – Planta de localização: 13 grampos, 3 furos SPT, 2 furos PMT e 3 amostras indeformadas (medidas em m)



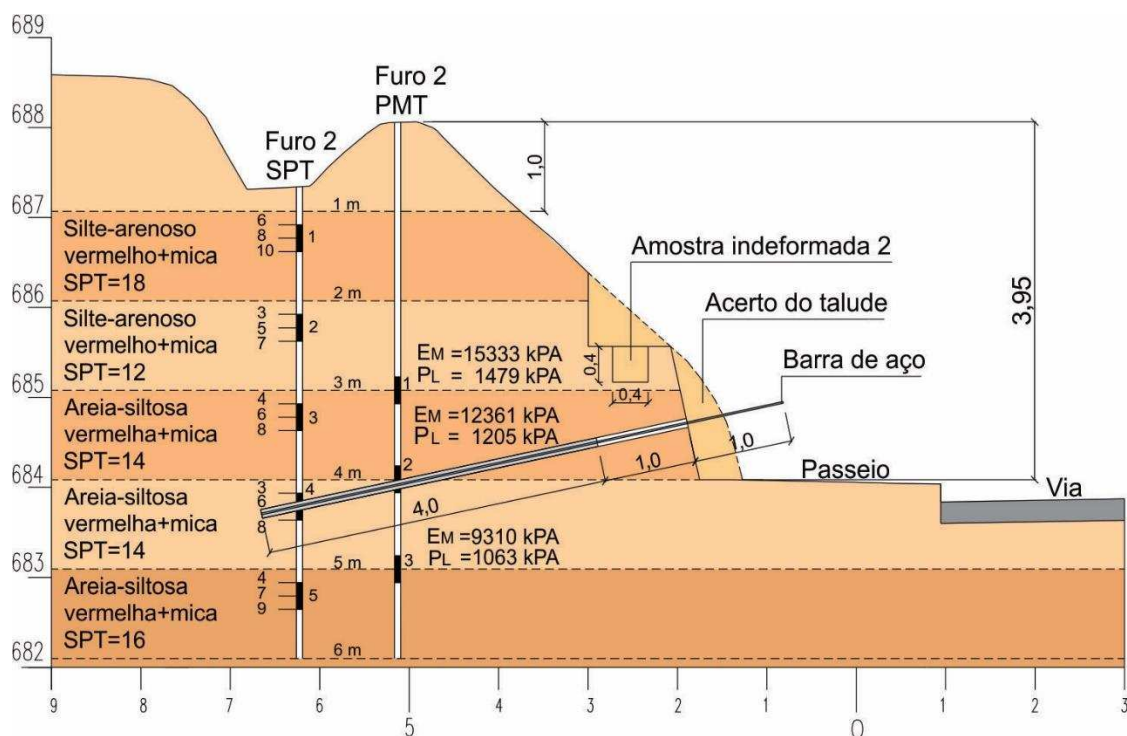
Fonte: Autor

Figura 40 – Resultados da sondagem SPT e ensaio PMT - seção esquemática 1 entre Gr 3 e Gr 4



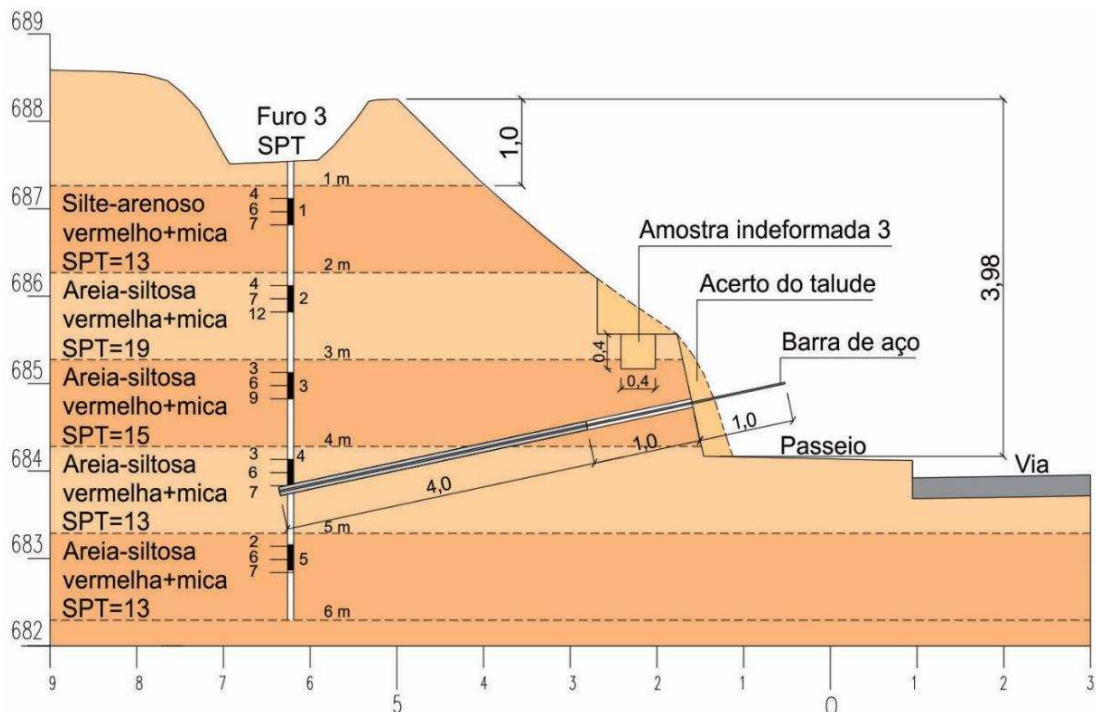
Fonte: Autor

Figura 41 – Resultados da sondagem SPT e ensaio PMT - seção esquemática 2 entre Gr 8 e Gr 9



Fonte: Autor

Figura 42 – Resultado da sondagem SPT - seção esquemática 3 entre Gr 12 e Gr 13



Fonte: Autor

Inicialmente, foi calculada a média do N_{SPT} nas camadas entre as profundidades de 3,0 e 5,0 m, trechos onde foram implantados os grampos, obtendo-se para os furos 1, 2 e 3, respectivamente, o N_{SPT} de 15, 14 e 14. Em seguida, foi calculada a média

desses três valores, obtendo um N_{SPT} médio de 14 relativos às camadas dos grampos, cujo solo foi classificado como areia-siltosa nos três furos. A partir das correlações empíricas indicadas nas Equações 4 e 5 (seção 2.5.2.2), foram obtidos, respectivamente, os seguintes valores de resistências: $q_{s1} = 155$ kPa e $q_{s2} = 104$ kPa.

Em seguida, foi calculado o valor da resistência q_{s3} pela Equação 8 (seção 2.5.2.3). Para isso, foi considerada uma ancoragem inicial de 4,0 m para os grampos nas seções 1, 2 e 3, e calculou-se a altura média do solo sobre os mesmos, obtendo-se em torno de 3,0 m. O peso específico do maciço foi estimado em 16 kN/m³, sendo obtida uma tensão efetiva média de 48 kN/m². O valor do coeficiente de ancoragem indicado na Tabela 3 foi definido considerando uma areia média compacta, diante da classificação tátil-visual da sondagem SPT, portanto, $k_f = 1,2$.

Assim, foi obtido o valor de $q_{s3} = 58$ kPa, conforme a metodologia sugerida na ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006).

3.3.4.2.2 Ensaio PMT

O ensaio pressiométrico tipo Ménard (PMT) foi realizado para obtenção dos valores da pressão limite P_L , necessários à estimativa da resistência q_s por correlação empírica, além do módulo pressiométrico (E_M). O equipamento usado foi fabricado pela empresa francesa Apageo Segelm, composto de um sistema de aquisição de dados automatizado e sonda pressiométrica de 60 mm diâmetro (Figura 43a).

Foram realizados dois furos de 63 mm de diâmetro, com 6,00 m de profundidade, iniciados a partir da crista do talude, escavados por meio de trado manual de formato cônico (Figura 43b), locados conforme indicado na Figura 39.

Nas seções esquemáticas das Figuras 40 e 41, são indicados os valores obtidos da pressão limite e do módulo pressiométrico nas profundidades de 3,0, 4,0 e 5,0 m. O valor da pressão limite P_L foi definido pela média dos seis valores obtidos nos dois furos realizados, sendo assim, $P_L = 1283$ kPa (1,283 MPa).

Figura 43 – Ensaio pressiométrico de Ménard (PMT)



a) Esquema de montagem do PMT (furo 1); (b) Detalhe do trado manual cônico.

Fonte: Autor.

Por fim, estimou-se o valor de q_s pela metodologia proposta por Bustamante e Gianeselli (1981), a partir da curva para areia apresentada na Figura 15. Desta forma, foi obtida aproximadamente a resistência $q_{s4} = 91$ kPa.

As curvas de calibração, pressiométrica, de fluência e pressão limite dos dois furos do ensaio PMT encontram-se no Apêndice C.

Assim, os valores estimados das resistências q_s , incluindo os três primeiros obtidos a partir do N_{SPT} , foram: 155, 104, 58 e 91 kPa, com valor médio de 102 kPa.

3.3.4.3 Ensaios de laboratório

A caracterização física do talude foi realizada por meio de duas amostras deformadas de solo, retiradas próximas ao Gr 2 (Amostra A) e ao Gr 12 (Amostra B). Foram realizados os seguintes ensaios: ABNT NBR 6459 (ABNT, 2016b): Solos – Determinação do limite de liquidez; ABNT NBR 7180 (ABNT, 2016c): Solos – Determinação do limite de plasticidade; ABNT NBR 7181 (ABNT, 2016d): Solos – Análise granulométrica por peneiramento e ABNT NBR 6508 (ABNT, 1984): Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica.

A caracterização geotécnica foi realizada por meio de três amostras indeformadas de solo, retiradas entre os grampos Gr 3 e Gr 4 (Amostra 1), Gr 8 e Gr 9 (Amostra 2) e entre os grampos Gr 11 e Gr 12 (Amostra 3), conforme indicado na locação da Figura 39 e nas seções esquemáticas das Figuras 40 a 42.

Na Figura 44a são indicados os pontos de retirada dessas amostras a partir da vista frontal do talude e na Figura 44b são apresentados os detalhes da retirada da Amostra 2, incluindo as dimensões.

Figura 44 – Localização dos pontos de retirada de amostras no talude



(a) Vista dos pontos de retirada das amostras indeformadas e dos testes de infiltração; (b) detalhe da retirada de amostra indeformada cilíndrica.

Fonte: Autor.

Os corpos de prova foram moldados (Figura 45) e os ensaios de cisalhamento direto e compressão triaxial (CD) realizados nas três amostras, para obtenção dos parâmetros médios do intercepto de coesão (c') e do ângulo de atrito (ϕ°) do maciço.

Figura 45 – Moldagem de corpos de prova para ensaios de cisalhamento direto e compressão triaxial



(a) Moldagem para ensaio de cisalhamento direto; (b) moldagem para ensaio de compressão triaxial.

Fonte: Autor.

3.3.4.3.1 Limites de Atterberg

A Tabela 7 apresenta os valores obtidos da umidade natural e dos limites de plasticidade e liquidez das amostras A e B.

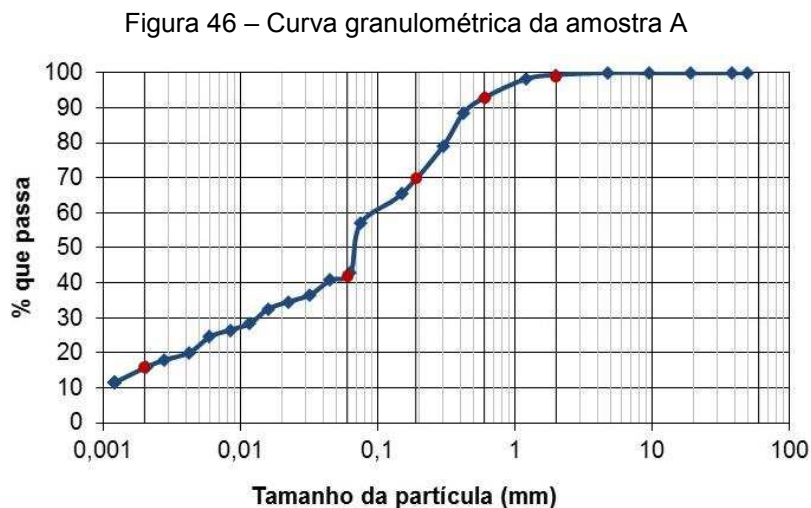
Tabela 7 – Resultados dos ensaios dos limites de Atterberg

Amostra	W_{nat} (%)	LP (%)	LL (%)
A	36,23	36,23	40,00
B	28,13	28,50	38,10

Fonte: Autor

3.3.4.3.2 Granulometria conjunta

Na Figura 46 apresenta-se a curva de distribuição granulométrica da amostra A, e na Tabela 8 as frações.



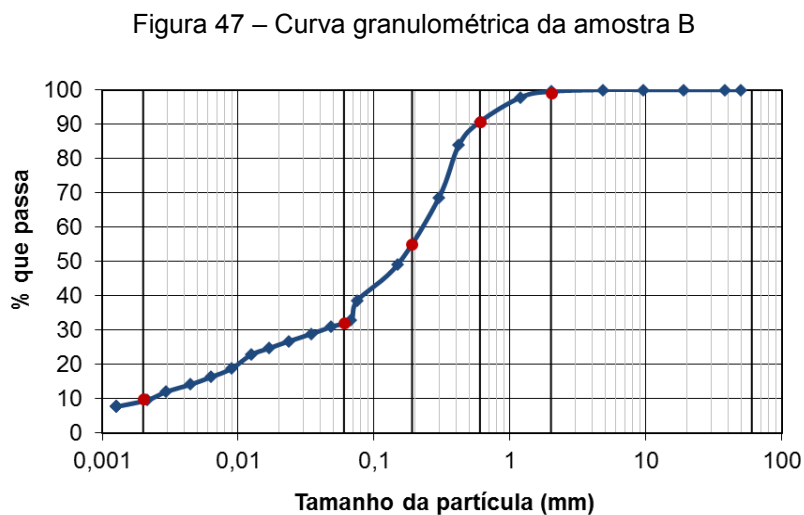
Fonte: Autor

Tabela 8 – Frações granulométricas da amostra A segundo a ABNT NBR 7181 (ABNT, 2016d)

Classificação do solo	Porcentagem
Argila	16%
Silte	26%
Areia	57%
Pedregulho	1%

Fonte: Autor

Na Figura 47 é apresentada a curva de distribuição granulométrica da amostra B, e na Tabela 9 as frações.



Fonte: Autor

Tabela 9 – Frações granulométricas da amostra B segundo a ABNT NBR 7181 (ABNT, 2016d)

Classificação ABNT	Porcentagem
Argila	10%
Silte	22%
Areia	67%
Pedregulho	1%

Fonte: Autor

Observa-se semelhança nos percentuais obtidos das frações das amostras A e B, podendo o solo do talude experimental ser classificado como areia-silto-argilosa.

3.3.4.3.3 Peso específico dos grãos

Na Tabela 10 apresentam-se os valores dos pesos específicos dos sólidos das duas amostras A e B.

Tabela 10 – Resultados do peso específico dos sólidos

Amostra	γ_s (kN/m ³)
A	28,75
B	27,76

Fonte: Autor

3.3.4.3.4 Cisalhamento direto

Os valores obtidos nos ensaios de cisalhamento direto realizados nas três amostras indeformadas 1, 2 e 3, são apresentados na Tabela 11. Observa-se que as amostras apresentaram elevados valores de intercepto de coesão, com valores médios variando entre 118,7 kPa (máximo) e 77,7 kPa (residual), tendo em vista que esses ensaios foram realizados na condição não inundada.

No Apêndice D são encontradas as curvas da Tensão cisalhante x Tensão normal, Tensão cisalhante x Deformação horizontal, Deformação vertical x Deformação horizontal das três amostras.

Tabela 11 – Parâmetros obtidos nos ensaios de cisalhamento direto

Amostra	Valores máximos		Valores residuais		Peso específico natural (kN/m ³)	Peso específico seco (kN/m ³)	Teor de umidade (%)
	c' (kPa)	ϕ°	c' (kPa)	ϕ°			
1	134	32	114	22	15,40	13,54	13,79
2	137	33	74	26	15,08	13,29	13,46
3	85	35	45	30	15,05	13,73	9,69
Valor médio	118,7	33,3°	77,7	26°	15,18	13,52	12,31

Fonte: Autor

3.3.4.3.5 Compressão triaxial

Pelo ensaio de compressão triaxial adensado drenado (CD) realizado nas três amostras indeformadas 1, 2 e 3, foram obtidos os valores apresentados na Tabela 12. Observa-se que as amostras apresentaram intercepto de coesão médio de 28,6 kPa e ângulo de atrito médio de 22°, valores muito inferiores aos obtidos no cisalhamento direto, realizado na condição não inundada, como dito anteriormente.

No Apêndice E encontram-se as curvas da Trajetória de tensões efetivas, Tensão x Deformação, Deformação axial x Deformação volumétrica e Envoltórias de Mohr-Coulomb das três amostras.

Tabela 12 – Parâmetros obtidos nos ensaios de compressão triaxial

Amostra	c'(kPa)	ϕ°	Peso específico natural (kN/m ³)	Peso específico seco (kN/m ³)	Teor de umidade (%)
1	29,6	19,6°	15,88	14,00	13,40
2	24,6	24,2°	15,23	13,43	13,46
3	31,7	22,3°	15,33	13,99	9,60
Valor médio	28,6	22,0°	15,48	13,81	12,15

Fonte: Autor

3.3.5 Execução dos grampos

Para definição da geometria do grampo (diâmetro e comprimento ancorado) foram utilizados os quatro valores de q_s obtidos nas seções 3.3.4.2.1 e 3.3.4.2.2, através de correlações empíricas e metodologia descrita na ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006), utilizando os parâmetros obtidos na sondagem SPT e no ensaio PMT.

A geometria inicial dos grampos foi considerada com uma ancoragem de 4,0 m e um diâmetro de 0,10 m (diâmetro da ponteira cortante), perfazendo uma área lateral de 1,26 m². Multiplicou-se os quatro valores estimados de q_s (155, 104, 58 e 91 kPa) por essa área, resultando, respectivamente, em 195, 131, 73 e 115 kN, valores correspondentes à faixa de variação da carga de tração resistente do grampo, cujo valor médio é de 128,5 kN.

A carga máxima de tração a ser aplicada na barra de 20 mm no ensaio de arrancamento foi calculada pela Equação 2 (seção 2.5.2.1). Foi utilizada para a tensão de escoamento do aço o valor médio de 655 MPa, obtido no ensaio de tração realizado. O valor resultante da carga foi de 185 kN, valor 5% abaixo da carga de tração máxima estimada (195 kN), porém, 44% acima do valor médio (128,5 kN).

Diante desses percentuais, foram consideradas satisfatórias a utilização da barra de 20 mm; a geometria inicial dos grampos (diâmetro de 100 mm e ancoragem de 4,0 m) e a utilização do macaco hidráulico disponibilizado pelo DEC-UFV, com capacidade de carga de 500 kN. A inclinação dos grampos foi definida em 12°, conforme sugerido na literatura especializada (10 a 15°).

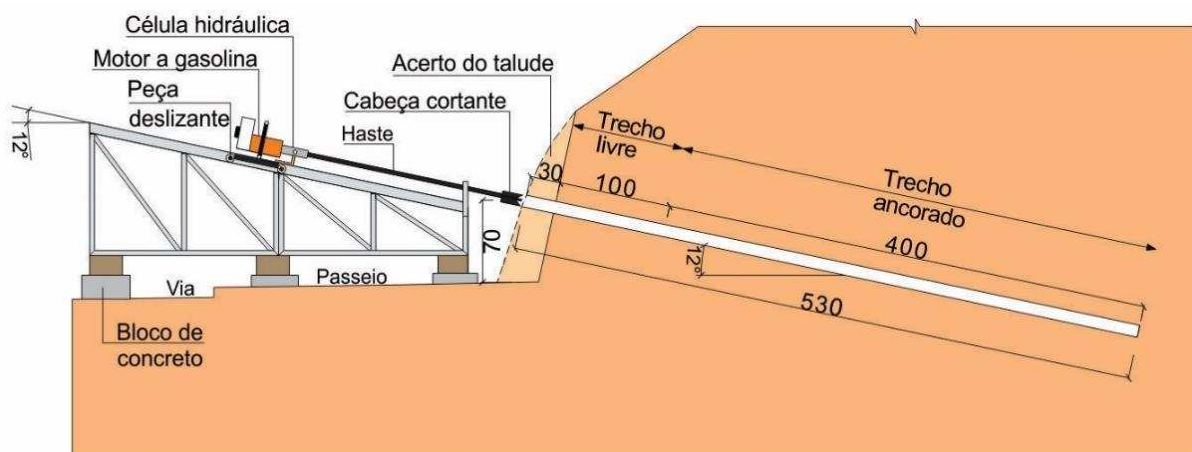
Os grampos foram executados de forma alternada, sendo os grampos ímpares injetados com a calda aditivada e os pares com a calda convencional, exceto o grampo Gr 13, injetado com a calda convencional e utilizado como grampo teste nas etapas do experimento.

Sendo assim, os procedimentos sempre se iniciavam pelo grampo Gr 13S e esta metodologia foi adotada para que possíveis falhas constatadas durante a perfuração, injeção da calda ou no ensaio de arrancamento, não fossem cometidas nos demais grampos, de forma a evitar a redução da amostragem prevista inicialmente de doze grampos para a realização do estudo comparativo proposto.

3.3.5.1 Execução dos furos

Inicialmente, foi realizada a locação dos treze furos, espaçados de 1,30 m, com altura de 0,70 m, a partir do pé do talude. A perfuração foi executada com circulação d'água e trado mecanizado, utilizando-se a rampa metálica (esquematizada na Figura 48); uma bomba (potência de 2 cv); duas caixas d'água; uma mangueira de 1" interligando a bomba à célula hidráulica (instalada entre o motor a gasolina e as hastes); um mangote de sucção de 2" (com uma ponta colocada no fundo da caixa d'água e a outra interligada à bomba); três hastes vazadas de 2,0 m de comprimento (utilizadas em sondagens SPT) e uma cabeça metálica cortante (provida de furo central e composta de quatro dentes, perfazendo um diâmetro de 10 cm).

Figura 48 – Detalhes do sistema de perfuração (cm)



Fonte: Autor

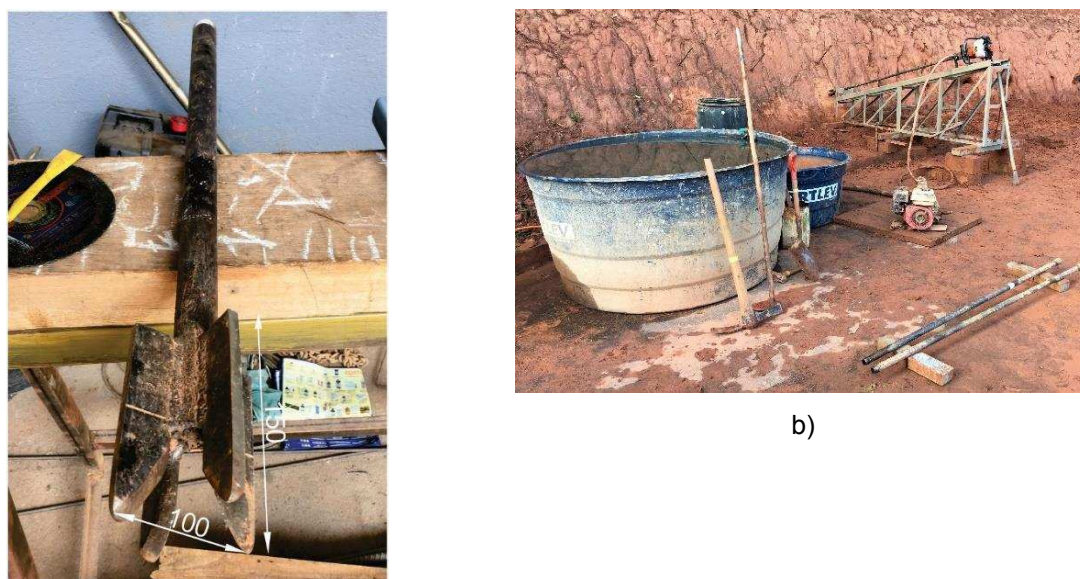
A rampa metálica era posicionada no alinhamento previsto para o grampo, nivelada longitudinal e transversalmente com o auxílio de um nível de mão e de blocos de concreto cheio (diante dos desníveis existentes entre o passeio e a via). Travava-se a rampa nas laterais junto às bases de paraju, por pedaços de barras de 20 mm, para manter o seu alinhamento durante a perfuração. A disposição dos equipamentos, esquemas de montagem e demais detalhes estão indicados nas Figuras 49 e 50.

Figura 49 – Montagem do sistema de perfuração no talude



Fonte: Autor

Figura 50 – Equipamentos para perfuração



(a) Detalhe da cabeça cortante (mm); (b) layout dos equipamentos de perfuração.

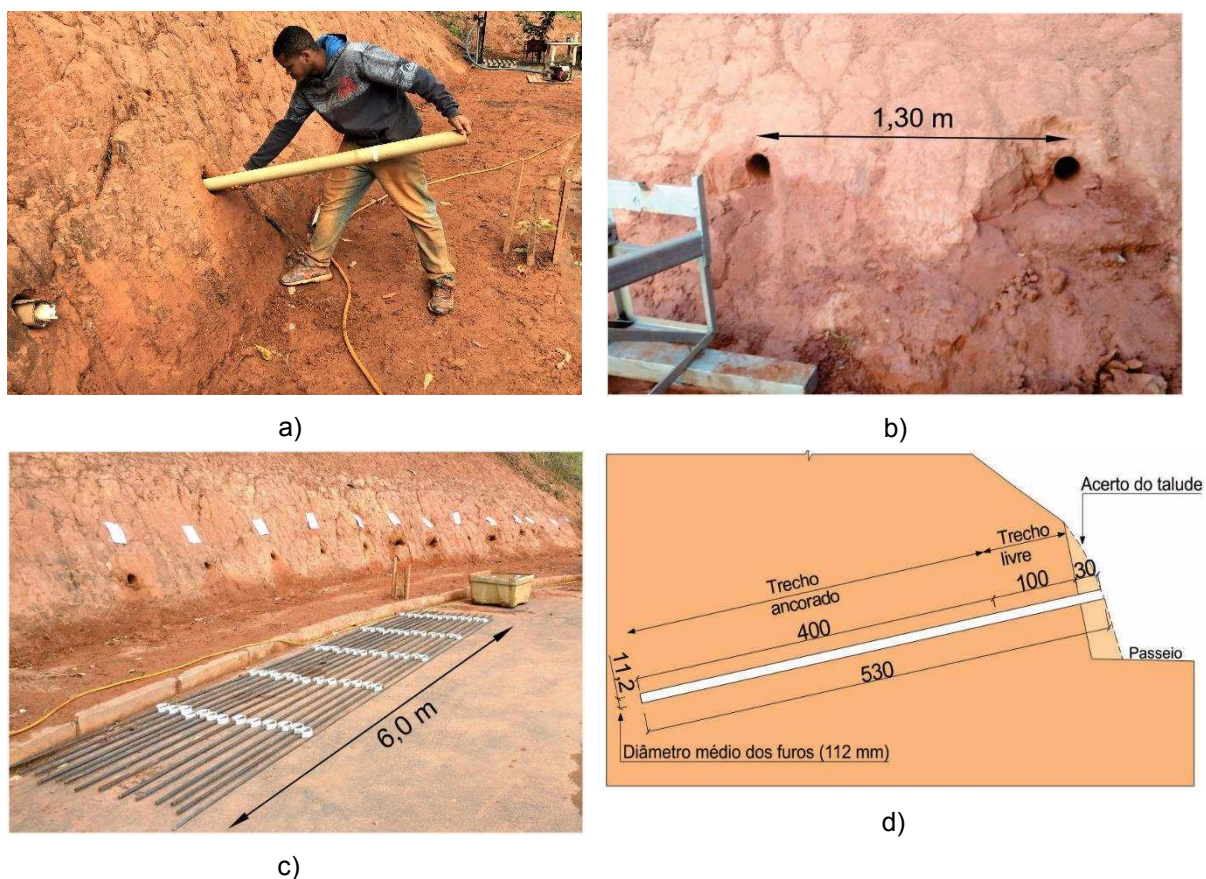
Fonte: Autor.

Os furos foram executados com 5,30 m de comprimento, prevendo-se um acerto posterior de 0,30 m da face do talude para a instalação dos equipamentos do ensaio de arrancamento, 1,0 m livre, além de 4,0 m de ancoragem. Ao atingir o comprimento da perfuração era realizada a lavagem do furo com água limpa reservada em uma das caixas (sem recirculação) durante três minutos. Durante a retirada das hastes também era utilizada água limpa sem recirculação.

No dia seguinte, com uma régua de alumínio de 6,0 m de comprimento era conferida a profundidade dos furos. Notou-se por este procedimento, o acúmulo de lama endurecida no fundo dos mesmos, que eram retiradas com o auxílio de um tubo de PVC de esgoto de 75 mm de diâmetro e 6,0 m de comprimento (Figura 51a).

Todos os furos foram finalizados exatamente com 5,30 m de comprimento e diâmetro médio de 11,3 cm, em função da perfuração por lavagem, acrescido de possíveis vibrações das hastes (Figuras 51b, 51c e 51d).

Figura 51 – Preparação dos furos para inserção dos grampos



(a) Retirada da lama no fundo do furo; (b) detalhe do espaçamento e da cabeça dos furos; (c) vista geral dos furos e das barras com centralizadores; (d) perfil do furo no talude (cm).

Fonte: Autor.

Durante a perfuração do Gr 7, a solda de fixação do eixo de uma das rodas da peça deslizante, se rompeu, o que causou vibrações excessivas nas hastes. Por esse motivo, o grampo 7 foi finalizado com um diâmetro muito acima da média. A medição dos diâmetros dos furos foi realizada a 0,60 m de profundidade, com o auxílio de duas pequenas peças de madeira deslizantes e um paquímetro digital.

Na Tabela 13 são apresentados os dados dos furos dos grampos, incluindo a data da perfuração, geometria final do furo e o volume inicial estimado das caldas, considerando a ancoragem prevista de 4,0 m.

Observa-se que, devido ao processo de perfuração por recirculação d'água e possíveis vibrações das hastes, o diâmetro médio dos furos foi finalizado com 11,3 cm. Já o diâmetro do Gr 7 (12,6 cm) ficou muito superior aos demais, devido ao problema ocorrido durante sua perfuração.

Tabela 13 – Dados relativos à execução dos furos

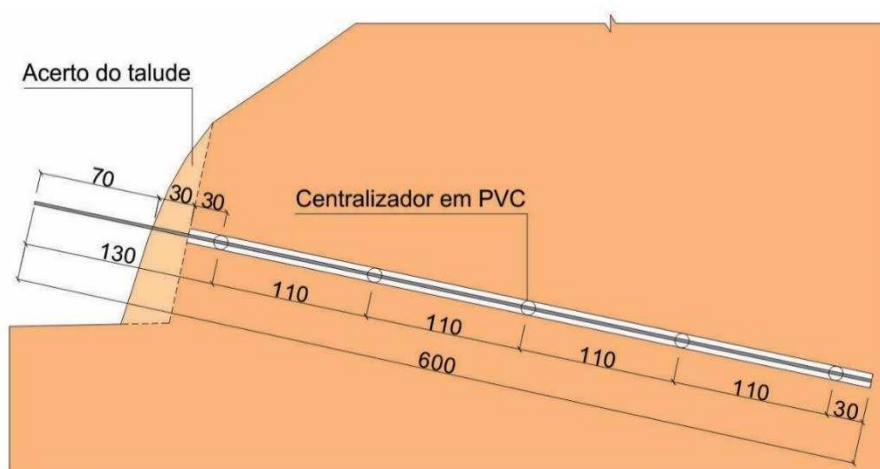
Grampos	Data	Comprimento (m)	Diâmetro (cm)	Área transversal (m ²)	Vol. (l) inicial grampo (L _b =4m)
Gr 1	12/07/18	5,30	10,8	0,0092	36,8
2	12/07/18	5,30	10,8	0,0092	36,8
3	12/07/18	5,30	11,2	0,0099	39,6
4	11/07/18	5,30	11,8	0,0109	43,6
5	11/07/18	5,30	10,8	0,0092	36,8
6	11/07/18	5,30	11,6	0,0106	42,4
7	11/07/18	5,30	12,6	0,0125	50,0
8	10/07/18	5,30	11,4	0,0102	40,8
9	10/07/18	5,30	11,6	0,0106	42,4
10	10/07/18	5,30	10,8	0,0092	36,8
11	10/07/18	5,30	11,4	0,0102	40,8
12	09/07/18	5,30	11,2	0,0099	39,6
Valor médio	-	5,30	11,3	0,0101	40,5

Fonte: Autor

3.3.5.2 Inserção das barras

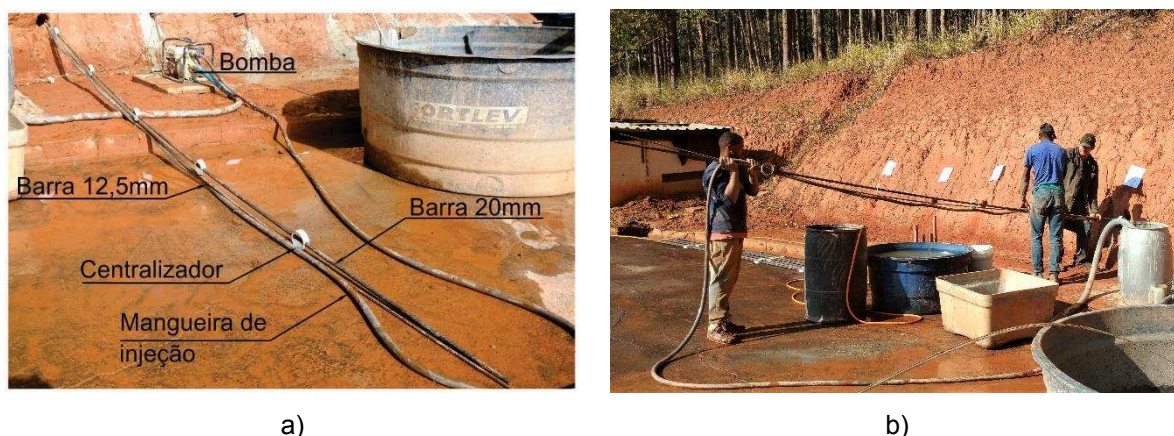
As barras de aço de 20 mm de diâmetro e 6,0 m de comprimento foram montadas com cinco centralizadores, espaçados de 1,10 m (Figura 52). Foram inseridas nos furos juntamente com uma mangueira transparente de 1", fixada em uma barra de aço de 12,5 mm, para promover uma melhor rigidez na inserção e facilitar a retirada da mangueira durante o processo de injeção das caldas (Figura 53). Não foi realizado tratamento anti-corrosivo nas barras, uma vez que foram utilizadas somente para o experimento.

Figura 52 – Detalhe dos espaçamentos dos centralizadores



Fonte: Autor

Figura 53 – Inserção da barra de aço com centralizadores



(a) Detalhe da barra de aço e mangueira de injeção; (b) inserção da barra de aço no furo.

Fonte: Autor.

3.3.5.3 Injeção das caldas

Inicialmente, foram realizados testes de infiltração das caldas aditivada e convencional no talude, com o objetivo de verificar o consumo de materiais para dosagem dos volumes das caldas a serem preparadas por grampo.

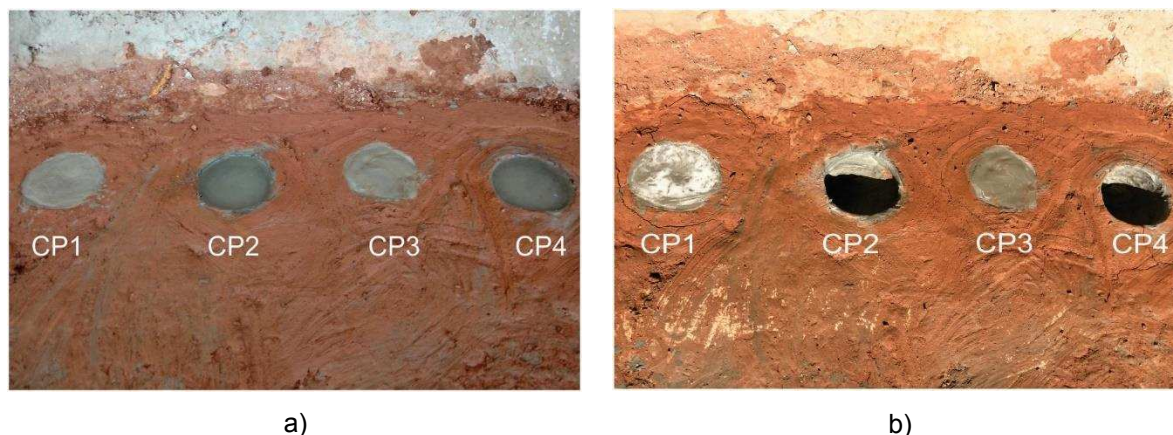
Em seguida foram executados quatro furos de 10 cm de diâmetro por 100 cm de profundidade no pé do talude com trado manual, identificados pelos corpos de prova CP1, CP2, CP3 e CP4 (Figura 54a). O volume de cada furo era de 7,85 litros aproximadamente. Injetava-se a calda no furo até atingir o topo e de forma gradativa, completava-se o furo durante um intervalo de 10 minutos, computando os volumes dos acréscimos realizados. Desta forma foi obtido o volume total injetado em cada furo. O CP1 e CP3 foram preenchidos com calda aditivada, e o CP2 e CP4 com calda convencional.

Na injeção do CP1 e CP3 foram acrescidos, respectivamente, 0,99 e 0,94 litros de calda no intervalo de 10 min estipulado para o teste, que correspondem a um percentual médio de infiltração em torno de 12%. Na injeção do CP2 e CP4 foram acrescidos, respectivamente, 1,78 e 2,03 litros, que correspondem a uma infiltração média em torno de 24%.

Após 24 horas de cura dos corpos de prova foram medidos os valores referentes à retração e à expansão longitudinal (Figura 54b). Foi verificado que o CP1 e CP3 apresentaram uma expansão média em torno de 0,50% e o CP2 e CP4 apresentaram uma retração média de aproximadamente 6,0%. O valor obtido da expansão da calda

aditivada foi abaixo dos valores obtidos no laboratório (1,00 e 1,95%). Já o valor obtido da retração da calda convencional foi compatível ao obtido em laboratório (6,23%).

Figura 54 – Teste de infiltração em corpos de prova executados no pé do talude



(a) Teste de infiltração após 3 horas de cura; (b) teste de infiltração após 24 horas de cura.

Fonte: Autor.

Esses percentuais de infiltração obtidos (12% para a calda aditivada e 24% para a calda convencional), foram acrescidos ao volume inicial previsto para cada grampo (Tabela 13). De posse dos valores das massas específicas das caldas, foi calculado o volume final a ser injetado por grampo.

No preparo de cada dosagem eram acrescidos 5 litros de calda, para que a ponta do mangote de sucção ficasse sempre imersa na calda, com o objetivo de evitar a entrada de ar e assim, manter a vazão constante até o término das injeções.

Além desse controle de volume, foi também realizado um controle do tempo de injeção, de forma a não atingir o trecho livre de 1,0 m, uma vez que não foram utilizados obturadores como limitadores. Inicialmente foram realizados testes prévios para medição da vazão de injeção de cada calda, mantendo-se a bomba sempre na mesma velocidade de rotação.

Os valores obtidos das vazões foram de 1,21 l/s (calda aditivada) e de 1,46 l/s (calda convencional). Com esses dados e o volume final estimado de cada grampo, foi calculado o tempo necessário à injeção dos 4,0 m ancorados.

Baseado nos procedimentos acima, foram preparadas as caldas para as injeções dos treze grampos, com a utilização do misturador elétrico descrito na seção 3.2.5. Na dosagem da água de cada traço (aditivado e convencional) em campo, foi utilizado um balde de 32 litros, previamente preparado no laboratório com marcas internas, que indicava os volumes de água necessários à execução de traços

com um, ou meio saco de cimento de 50 kg. Os aditivos expander e superplastificante foram pesados previamente no laboratório e reservados em recipientes hermeticamente fechados (Figura 55).

Figura 55 – Preparativos para execução da calda em campo



a) (a) Materiais: cimento, aditivos e água ; (b) layout do processo de injeção em campo.

Fonte: Autor.

A mangueira de injeção de 1", fixada à barra de 12,5 mm, era inserida no furo em conjunto com a barra de 20 mm do grampo, mantendo-a 30 cm do fundo e era retirada gradativamente, de acordo com o tempo e os volumes estimados, sempre com a ponta imersa no interior da calda já injetada.

Em cada traço executado, era dosado um volume suficiente para a injeção de dois grampos. Iniciou-se pelos grampos Gr 13 e Gr 12 (calda convencional), seguidos dos grampos Gr 11 e Gr 9 (calda aditivada) e assim sucessivamente. Após a conclusão de cada dupla, era feita a recirculação d'água no sistema de forma abundante, para garantir a limpeza adequada da bomba, da mangueira e do mangote.

Um dia após a injeção, com a calda já endurecida, eram verificadas as profundidades dos furos. Nos grampos injetados com calda convencional era observado um pequeno aumento do trecho livre (média de 20 cm, causado pela retração). Complementava-se então o furo com nova injeção. (Figura 56).

Figura 56 – Vista dos grampos executados no talude



a)

b)

(a) Talude após a injeção dos treze grampos; (b) talude sinalizado para a cura dos grampos.

Fonte: Autor.

Apresentam-se na Tabela 14 para cada grampo a data da injeção; o volume final estimado; o tempo estimado de injeção; o diâmetro; o comprimento final ancorado e o trecho livre inicial. Observa-se que os comprimentos variaram entre 3,75 e 4,20 m, cujo valor médio é de 3,95 m (valor próximo ao estimado inicialmente de 4,00 m).

Tabela 14 – Dados relativos à injeção, geometria do furo e do grampo

Grampo	Data injeção	Vol. (l) final estimado calda (L _b =4 m)	Tempo injeção (s)	Diâmetro (cm)	Comp. final (m) ancorado (L _b)	Trecho livre inicial (m)
1	16/07/18	41,2	34	10,8	3,95	1,35
2	16/07/18	45,6	31	10,8	4,00	1,30
3	14/07/18	44,4	37	11,2	3,75	1,55
4	14/07/18	54,1	37	11,8	3,75	1,55
5	14/07/18	41,2	34	10,8	3,90	1,40
6	14/07/18	52,6	36	11,6	3,80	1,50
7	14/07/18	56,0	46	12,6	3,95	1,35
8	14/07/18	50,6	35	11,4	3,75	1,55
9	14/07/18	47,5	39	11,6	3,95	1,35
10	14/07/18	45,6	31	10,8	4,20	1,10
11	14/07/18	45,7	38	11,4	4,20	1,10
12	13/07/18	49,1	34	11,2	4,20	1,10
Valor médio	-	47,8	36	11,3	3,95	1,35

Fonte: Autor

Em campo foram realizados testes de fluidez das caldas e a moldagem de vinte corpos de prova em moldes de EPS, para medição da retração/expansão e para a realização dos ensaios de resistência à compressão (Figura 57).

Figura 57 – Teste de fluidez e moldagem de corpos de prova em campo



a)

b)

(a) Teste de fluidez; (b) moldagem de corpos de prova em EPS.

Fonte: Autor.

O processo de injeção nos treze grampos ocorreu normalmente e a mangueira de injeção era retirada com facilidade. Atribui-se este êxito ao enrijecimento promovido pela barra de 12,5 mm; à inserção da mangueira em conjunto com o grampo e principalmente, aos espaçamentos existentes entre o centralizador de PVC utilizado e as paredes do furo, conforme pode ser observado na Figura 30.

Os dados das caldas executadas em campo (Traços 22 e 23) são apresentados no Apêndice B. Os valores obtidos apresentaram-se próximos aos resultados de laboratório, exceto a resistência à compressão aos 28 dias da calda aditivada, que apresentou uma redução de 22,4%, mas, favorável de 32,31 MPa.

No final dos experimentos (após a realização dos ensaios de arrancamento), foram moldados no solo mais quatro corpos de prova, designados de CP 5, CP 6, CP 7 e CP 8 de mesma geometria dos anteriores (10 cm de diâmetro e 100 cm de profundidade), porém inseridos no interior do talude a 1,2 m de altura do pé.

Essas moldagens tinham por objetivos: verificação dos percentuais de infiltração das caldas novamente; realização da exumação dos corpos de prova após a cura de 28 dias, para uma análise tátil-visual da rugosidade das paredes e do solo do entorno durante o processo de escavação e a realização de ensaios de resistência à compressão. O CP 5 e CP 7 foram moldados com calda aditivada e o CP 6 e CP 8 com calda convencional, sendo que o CP 5 e CP 6 foram executados no lado esquerdo do talude e o CP 7 e CP 8 no lado direito (Figuras 44a, 58a e 58b)

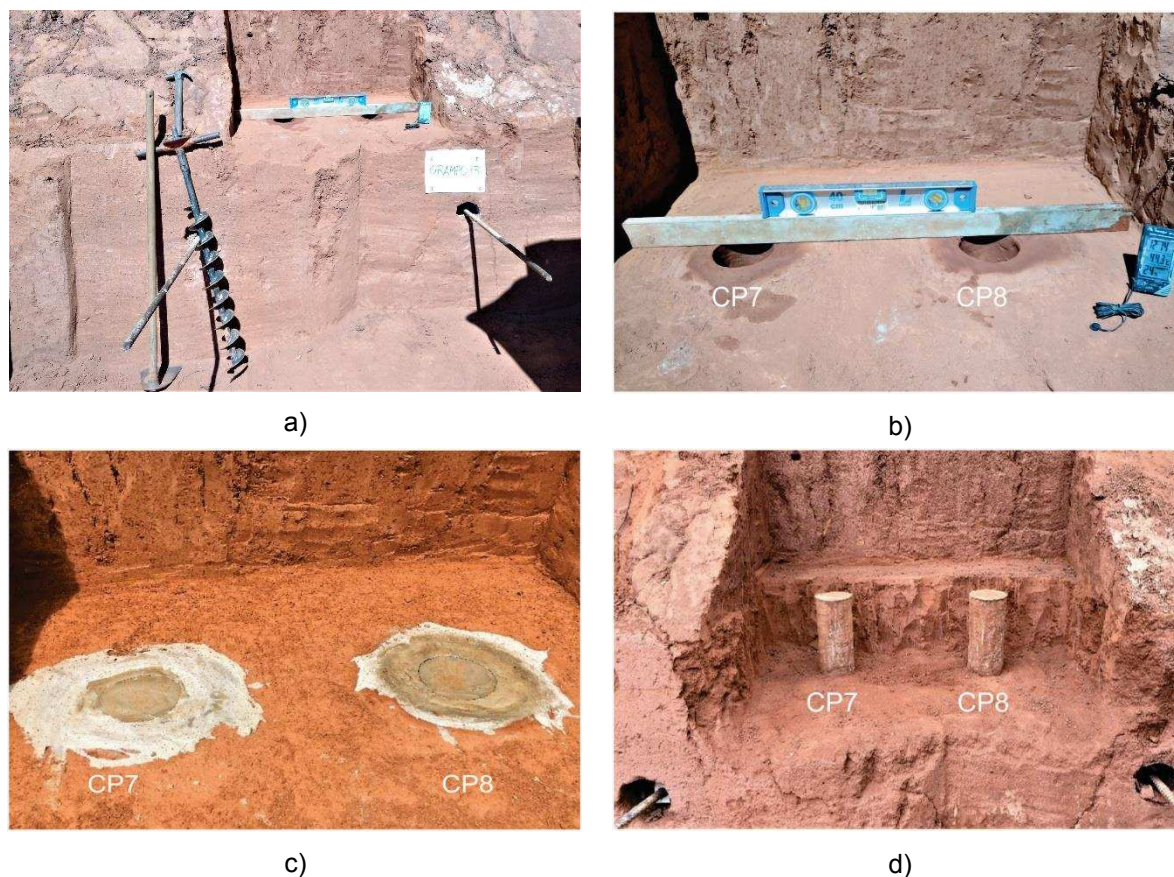
As caldas foram lançadas gradativamente no furo e com controle de volume, porém, durante 50 minutos, tempo gasto para que apresentassem completa

estabilização no topo. Em seguida, foi realizado o cálculo dos percentuais de infiltração, da mesma forma realizada nos testes iniciais no pé do talude.

Na moldagem do CP 5 e CP 7 foi necessário um acréscimo de calda de, respectivamente, 1,26 e 1,06 litros no intervalo de tempo até à estabilização. Esses volumes correspondem a um percentual médio de infiltração em torno de 15%. Na moldagem do CP 6 e CP 8 foram necessários, respectivamente, 2,32 e 2,41 litros, que correspondem a uma infiltração média em torno de 30%.

Observa-se que nos dois testes de infiltração realizados (no pé e no interior do talude), a calda convencional infiltrou na ordem do dobro da calda aditivada. Após a cura de 24 horas dos corpos de prova, foi verificada uma retração uniforme em torno de 0,50% nos mesmos (Figura 58c) e após 28 dias de cura, foi realizada a exumação (Figura 58d). Na análise tátil-visual realizada durante a escavação não foi verificada nenhuma alteração no solo do entorno dos corpos de prova, nem tampouco, diferenças relevantes na rugosidade de suas paredes.

Figura 58 – Teste de infiltração das caldas no solo



(a) Furos locados no lado direito do talude; (b) acabamento final da borda dos furos; (c) testes de infiltração após 24 horas de cura; (d) escavação para exumação dos corpos de prova após 28 dias

Fonte: Autor.

No laboratório, para cada peça exumada, foram preparados dois corpos de prova com dimensões aproximadas de 100 x 200 mm. Os ensaios de compressão axial realizados indicaram uma resistência média de 39,90 MPa para o CP 5 e o CP 7 (calda aditivada) e de 22,09 MPa para o CP 6 e o CP 8 (calda convencional). Esta resistência obtida para o CP 5 e o CP 7, foi semelhante aos resultados obtidos em laboratório (Traço 14 com 41,69 MPa e Traço 17 com 41,64 MPa), porém, superior ao valor obtido da calda injetada nos grampos (Traço 22 com 32,31 MPa). Em relação ao CP 6 e o CP 8, o valor obtido foi compatível aos valores obtidos em laboratório (Traço 16 com 21,14 MPa) e na injeção dos grampos (Traço 23 com 19,23 MPa).

Diante dos valores das resistências à compressão axial aos 28 dias, obtidos em laboratório e em campo para a calda aditivada (entre 32,31 e 41,69 MPa) e para a calda convencional (entre 19,23 e 22,09 MPa), constata-se que somente a calda dosada com a incorporação dos aditivos, atende ao valor mínimo de 25 MPa aos 28 dias, conforme prescrito na ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006).

Após a conclusão dos experimentos, passou a vigorar a ABNT NBR 5629 (ABNT, 2018a) que prescreve para a resistência à compressão axial aos 28 dias, o valor mínimo de 15 MPa. Assim, a calda convencional usada na pesquisa com fator $a/c = 0,60$, também passou a atender ao quesito de resistência à compressão.

3.3.6 Ensaios de arrancamento

A estabilização do solo grampeado depende, primordialmente, da mobilização do atrito entre a superfície do reforço e o solo circundante. Através dessa interação ocorre a transferência dos esforços resistentes do grampo ao solo, induzindo forças estabilizantes de tração e cisalhamento ao maciço. Por isso, compreende-se a importância dos ensaios de arrancamento para obtenção fundamentada da resistência q_s , e conseqüentemente, para a garantia da segurança das estruturas grampeadas.

Neste experimento, diante da inexistência de normalização referente ao ensaio e com base nos procedimentos e nas recomendações da literatura especializada, buscou-se otimizar a execução dos ensaios de arrancamento de forma a obter resultados consistentes, imprescindíveis ao estudo comparativo da resistência q_s com a incorporação de aditivos na calda de cimento.

Para isso, providenciou-se equipamentos de fabricantes reconhecidos e calibrados periodicamente; executou-se adaptações em algumas peças disponibilizadas pelo DEC-UFV e fabricou-se novos modelos (a fim de propiciar um

melhor ajuste e montagem do sistema de arrancamento); desenvolveu-se uma planilha eletrônica que possibilitasse realizar o traçado imediato da curva Carga x Deslocamento (de forma a acompanhar o comportamento do grampo em tempo real) e preocupou-se com o layout do local com o objetivo de reduzir ou evitar falhas acidentais, além de interferências externas.

Os ensaios de arrancamento foram realizados após uma cura média de 45 dias dos grampos, sendo iniciados pelo grampo Gr 13 (grampo teste), seguido do grampo Gr 12 e assim sucessivamente até o grampo Gr 1.

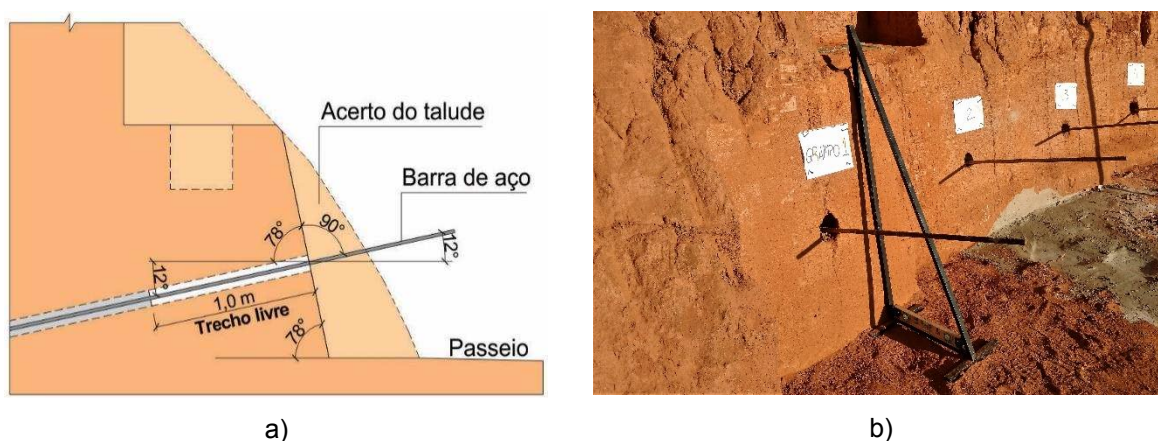
A seguir será apresentado um detalhamento das etapas dos ensaios de arrancamento realizados, desde o preparo da face do talude, até a descrição da metodologia, dos procedimentos e dos dois critérios de ruptura adotados.

3.3.6.1 Acerto da face do talude

Primeiramente, foi executado o acerto da face do talude de forma criteriosa, conformando a inclinação existente em um ângulo de 78° com a horizontal, a fim de proporcionar perpendicularidade com a barra de aço de inclinação de 12° (Figura 59a), evitando assim, o uso de cunhas entre as peças do sistema de arrancamento.

O acerto do faceamento foi direcionado pelo triângulo metálico descrito no item 3.2.6 e por um esquadro de 60 cm de lado, além do uso de régua de alumínio para sarrafear a face, deixando-a sem irregularidades (Figura 59b).

Figura 59 – Posicionamento da barra de aço no talude



(a) Detalhe da perpendicularidade entre a barra de aço e a face do talude; (b) posicionamento do triângulo metálico junto à face do talude.

Fonte: Autor.

O acerto realizado com essas precauções proporcionou uma montagem favorável e ágil dos equipamentos; garantiu a centralização perfeita da barra de aço, eliminando a possibilidade de surgimento de esforços de flexão na mesma.

3.3.6.2 Montagem do painel de madeira e placa metálica

Para distribuir uniformemente as tensões de compressão na face do talude, oriundas da aplicação do carregamento na barra de aço, foi fabricado pelo autor um painel rígido de madeira (paraju) com dimensões de 1,0 x 1,0 m, enrijecido por duas peças verticais, dispostas de acordo com a largura da peça metálica que lhe apoia (Figura 60a e Figura 60b).

Figura 60 – Painel rígido de madeira e trecho livre da barra



a) Detalhe do painel rígido de madeira; (b) detalhe do trecho livre da barra

Fonte: Autor.

Para apoio do macaco hidráulico foi utilizada uma peça metálica rígida, composta de uma chapa de 1" de espessura e furo central de 50 mm de diâmetro, enrijecida por duas vigas Tipo I de 100 mm de altura (Figura 61a).

3.3.6.3 Macaco hidráulico e manômetro analógico

O macaco hidráulico disponibilizado pelo laboratório de Materiais de Construção (LEC-DEC-UFV), foi fabricado pela Pollegato Indústria de Equipamentos Hidráulicos Ltda. Possui capacidade de carga de 50 tf, eixo central vazado com cursor de 200 mm de diâmetro, sendo o diâmetro externo de 80 mm e o diâmetro do furo de 35 mm. É composto de um cilindro de força de 200 mm de diâmetro, que possui duas alças nas laterais para facilitar o manuseio, além da caixa de comando e óleo interligada por duas mangueiras ao cilindro. O sistema é acionado manualmente por duas

alavancas de comando e o controle da tensão aplicada é realizado por um manômetro analógico instalado junto à caixa de comando (Figura 61b).

Figura 61 – Instalação da peça metálica e do macaco hidráulico



a)

b)

(a) Detalhe da peça metálica rígida para apoio do macaco hidráulico; (b) detalhe da instalação do macaco hidráulico para o ensaio

Fonte: Autor.

Esse macaco foi previamente calibrado no laboratório de Materiais de Construção (LEC-DEC-UFV), utilizando-se a prensa de ensaio de compressão de corpos de prova de concreto (Figura 62a). No Apêndice E são apresentados os dados dessa calibração, incluindo os gráficos da análise estatística realizada pela metodologia de Lilliefors, que comprovaram o aferimento do equipamento com um nível de significância de 0,05 (nas duas calibrações realizadas).

O primeiro ensaio de arrancamento foi realizado no Gr 13 (grampo teste), utilizando-se um manômetro analógico com limite de pressão de 200 bar e intervalos de leitura de 5 bar. Durante este ensaio observou-se oscilações em seu ponteiro na aplicação dos ciclos de carga, principalmente para a realização das leituras finais. Por isso, e diante da escala reduzida do aparelho, que não favorecia as leituras em ciclos de 2,5 bar com precisão, optou-se por trocá-lo.

Os ensaios seguintes foram realizados utilizando-se um manômetro com limite de pressão de 100 bar e intervalos de leitura de 2 bar. Esse modelo apresentava escala favorável às leituras dos ciclos de carga, além de compatibilidade com o número máximo de ciclos estimado para os ensaios.

Pela calibração realizada do macaco hidráulico, cada ciclo de 2 bar desse novo manômetro correspondia a aplicação de uma carga aproximada de 4,1 kN (410 kgf), e a capacidade limite de pressão de 100 bar era equivalente a 201 kN (20,1 tf).

Figura 62 –Calibração do macaco hidráulico e manômetro analógico



a)

b)

(a) Ensaio de calibração do macaco hidráulico; (b) detalhe da escala do manômetro.

Fonte: Autor.

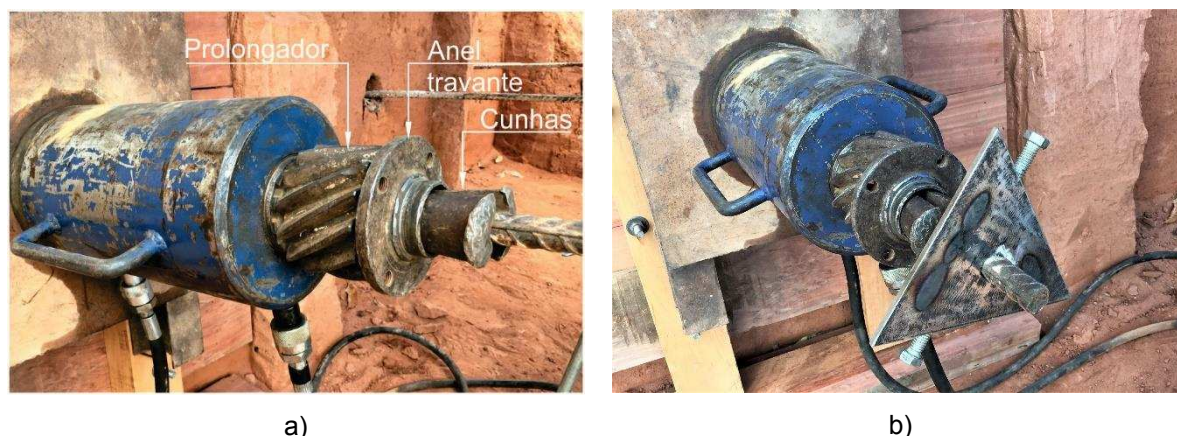
3.3.6.4 Travamento do macaco e instalação dos extensômetros

O travamento do painel de madeira, da placa metálica e do macaco hidráulico foi garantido por duas cunhas travadas por atrito à barra de aço em conjunto com duas peças auxiliares cilíndricas, um prolongador e um anel travante (Figura 63a).

Para o apoio dos extensômetros foi utilizada uma chapa metálica triangular de 8 mm de espessura e lados iguais de 15 cm, fixada à barra de aço por dois parafusos (Figura 63b). Essa chapa foi adaptada (ampliada) para o experimento, sendo soldada sobre a peça anterior de 10 cm de lado.

Esse procedimento foi adotado para garantir uma melhor distribuição dos três extensômetros digitais usados no ensaio, da marca Mitutoyo com precisão de 0,01 mm (Figura 64a). Os extensômetros foram posicionados perpendicularmente à chapa triangular, através de hastes articuladas, fixadas por conectores em montantes de aço galvanizado, engastados em uma base de concreto de 20 x 20 x 20 cm, embutida no solo (Figura 64b).

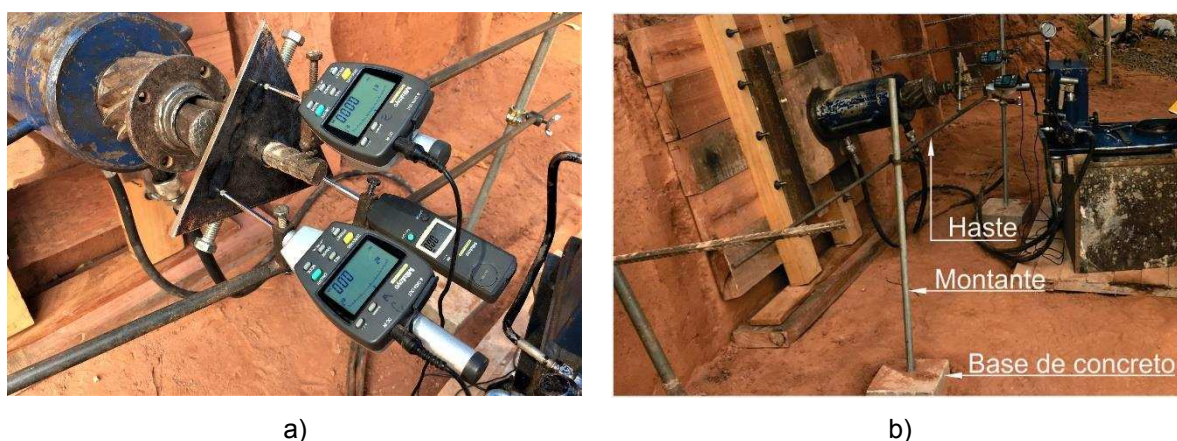
Figura 63 – Montagem do macaco hidráulico



(a) Peças de travamento do macaco; (b) chapa de apoio dos extensômetros

Fonte: Autor.

Figura 64 – Montagem dos extensômetros e sistema de apoio



(a) Detalhe dos extensômetros; (b) Detalhes das hastes, montantes e bases de apoio.

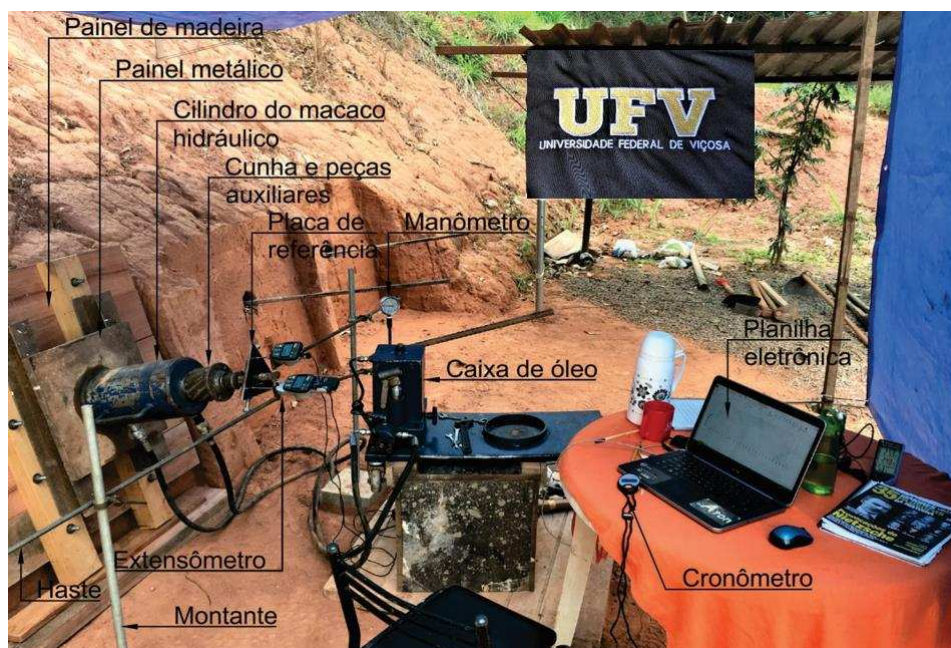
Fonte: Autor.

A disposição e os detalhes de montagem adotados nessas peças propiciaram uma visibilidade favorável para a leitura dos extensômetros, além de firmeza no sistema e independência dos demais equipamentos, de modo a evitar impactos acidentais que pudessem prejudicar a medição do deslocamento do grampo.

3.3.6.5 Layout das peças e equipamentos

Para evitar que agentes externos prejudicassem os ensaios e para proteção dos próprios operadores e dos equipamentos, montou-se uma tenda com lona na lateral, diante dos ventos fortes do local, que traziam muitas folhas da plantação de eucalipto existente acima do talude, além da proteção contra o sol e chuva. Os detalhes da montagem final dos equipamentos e do layout adotado estão indicados na Figura 65.

Figura 65 – Detalhes dos equipamentos e layout do ensaio de arrancamento



Fonte: Autor

Após a montagem dos equipamentos e antes do início das leituras oficiais do ensaio, era aplicada uma carga inicial 13 kN (em torno de 10% da carga de ruptura estimada) para um ajuste e acomodação inicial do sistema, conforme sugerido por Feijó e Ehrlich (2001). Em seguida era feito o alívio de pressão no macaco para zerar o manômetro. Os três extensômetros eram então zerados para o início do ensaio.

3.3.6.6 Metodologia adotada

Os ensaios de arrancamento realizados seguiram a metodologia prescrita pela ABNT NBR 12123 (ABNT, 1992b), para o ensaio lento em estágios iguais e sucessivos de carregamento, conforme descrito na seção 2.5.2.1.

Com base nessa metodologia, desenvolveu-se uma planilha eletrônica no excel. A cada incremento de carga, os valores lidos dos deslocamentos pelos três extensômetros eram lançados na planilha, que calculava a média dos valores e registrava o deslocamento parcial e o acumulado nos intervalos de tempo indicados na metodologia da norma. Registrava o percentual de estabilização e após esta, gerava a curva Carga x Deslocamento. Pela análise da curva, definiam-se as cargas de ruptura, que divididas pela área lateral do grampo, resultavam nas resistências q_s segundo os critérios de ruptura da carga de pico e do recalque limite.

3.3.6.7 Procedimentos adotados

A estratégia de se executar o grampo teste (Gr 13) mostrou-se pertinente, diante do problema ocorrido no ponteiro do primeiro manômetro e da falta de precisão constatada nas leituras, devido à escala reduzida do aparelho. Constatou-se também que a realização dos ensaios sem a utilização da planilha eletrônica retarda a verificação da estabilização dos deslocamentos, principalmente na fase plástica quando os deslocamentos são maiores, além de não permitir o acompanhamento e a análise em tempo real do comportamento do grampo, através do traçado imediato da curva Carga x Deslocamento.

O procedimento adotado de se aplicar valores reduzidos (em torno de 5 kN) nos estágios de cargas, conforme sugerido por Falconi e Alonso (1996), mostrou-se vantajoso, tendo em vista que proporcionou uma quantidade satisfatória de ciclos de carga (média de 35 estágios por ensaio), e conseqüentemente, possibilitou o traçado das curvas Carga x Deslocamento com maior precisão. Proporcionou também a estabilização dos deslocamentos em um curto intervalo de tempo (entre 2 e 4 min), na aplicação de cada ciclo de carga. O elevado módulo de elasticidade do maciço de 12356 kPa (valor médio obtido pelo ensaio PMT), contribuiu significativamente para a estabilização apresentada.

O ensaio de arrancamento do grampo Gr 13, a princípio, foi finalizado satisfatoriamente, rompendo-se com uma carga de 104 kN. Porém, diante do problema ocorrido no manômetro durante a leitura dos carregamentos, optou-se por excluir esse grampo da amostragem para a realização dos estudos comparativos propostos, uma vez que os ensaios seguintes foram realizados com a utilização do novo manômetro e com a adoção da planilha eletrônica. Porém, o grampo Gr 13 cumpriu a função de peça teste, evitando a redução da amostragem prevista inicialmente de doze grampos, para a realização do estudo comparativo proposto.

Não ocorreram outros imprevistos durante a realização dos demais ensaios de arrancamento e o novo manômetro proporcionou leituras dos ciclos de carga com precisão satisfatória. A utilização da planilha eletrônica mostrou-se interessante e vantajosa, uma vez que foi possível observar as mudanças das fases (ajuste do sistema, elástica e plástica) durante os estágios de carga, além de permitir a execução do ensaio por dois operadores.

A carga máxima de tração aplicada nos grampos foi de 175 kN, que dividida pela área do painel de madeira (1,0 m²), obtém-se uma pressão de 1,75 kgf/cm², aplicada na face do talude. Diante dos parâmetros geotécnicos obtidos para o maciço, o trecho livre de 1,0 m adotado mostrou-se satisfatório para o espraiamento dessa tensão, evitando a aplicação de pressões excessivas no trecho ancorado do grampo.

As curvas Carga x Deslocamento apresentaram-se consistentes, comprovando a viabilidade dos equipamentos, peças, procedimentos e metodologias adotadas.

Na Tabela 15 são apresentados: a data do ensaio, o tempo de cura do grampo, o acerto da face do talude, o trecho livre final, a geometria e a área do grampo.

Tabela 15 – Dados dos ensaios de arrancamento e geometria dos grampos

Grampo	Data ensaio arrancamento	Tempo cura grampo (dia)	Acerto face talude (m)	Trecho livre final (m)	Comprimento grampo L _b (m)	Perímetro grampo (m)	Área lateral grampo (m ²)
1	31/08/18	46	0,35	1,00	3,95	0,3393	1,34
2	30/08/18	45	0,30	1,00	4,00	0,3393	1,36
3	30/08/18	47	0,55	1,00	3,75	0,3519	1,32
4	29/08/18	46	0,60	0,95	3,75	0,3707	1,39
5	29/08/18	46	0,40	1,00	3,90	0,3393	1,32
6	28/08/18	45	0,50	1,00	3,80	0,3644	1,38
7	28/08/18	45	0,35	1,00	3,95	0,3958	1,56
8	27/08/18	44	0,45	1,10	3,75	0,3581	1,34
9	27/08/18	44	0,35	1,00	3,95	0,3644	1,44
10	26/08/18	43	0,15	0,95	4,20	0,3393	1,43
11	25/08/18	42	0,20	0,90	4,20	0,3581	1,50
12	24/08/18	42	0,20	0,90	4,20	0,3519	1,48

Fonte: Autor

3.3.6.8 Critérios de ruptura adotados

A definição da ruptura dos grampos foi feita a partir da análise das curvas Carga x Deslocamento segundo dois critérios clássicos de ruptura: carga de pico e recalque limite.

Pelo critério do recalque limite foram adaptadas três metodologias para o caso dos grampos. As metodologias para estacas de Terzaghi e Davisson, descritas por Niyama et al. (1998), e a prescrita na ABNT NBR 6122 (ABNT, 2010). No método de Terzaghi a carga de ruptura é aquela correspondente ao recalque de valor igual a 10% do diâmetro da estaca, enquanto no método de Davisson a carga de ruptura é aquela referente a um valor de recalque (S_r) calculado conforme a Equação 12. Segundo a ABNT (2010), o valor da carga de ruptura pode ser considerada como aquela correspondente ao recalque (S_r) calculado conforme a Equação 13.

$$S_r = \frac{D}{120} + 3,8 + \frac{P \cdot L_b}{A \cdot E} \quad (12)$$

$$S_r = \frac{D}{30} + \frac{P \cdot L_b}{A \cdot E} \quad (13)$$

Sendo: S_r = recalque de ruptura convencional, em mm;

D = diâmetro do grampo, em mm;

P = carga de ruptura convencional, em kN;

L_b = comprimento ancorado do grampo, em mm;

A = área da seção transversal do grampo, em cm^2 ;

E = módulo de elasticidade do grampo (calda endurecida e aço), em kN/cm^2 .

O módulo de elasticidade dos grampos foi definido considerando somente a contribuição da barra de aço CA 50 ($E = 210 \text{ GPa}$), conforme valor indicado na ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014). Por esse critério, os valores da carga de ruptura e do deslocamento correspondente foram definidos pela média dos valores obtidos conforme as três metodologias adotadas.

De posse das cargas de ruptura dos grampos (F_{rup}), relativas aos dois critérios de ruptura adotados, foram obtidas as resistências q_s a partir da Equação 14. Pela metodologia de Lilliefors foram verificadas as normalidades estatísticas dos dados.

$$q_s = \frac{F_{rup}}{A_L} \quad (14)$$

Sendo: F_{rup} = carga de ruptura;

A_L = área da superfície lateral do grampo.

Em função dos comportamentos apresentados pelos grampos Gr 8 e Gr 9, foi realizado um segundo estudo comparativo, com a exclusão de ambos da amostragem, sendo então realizados dois estudos comparativos das resistências q_s dos grampos em função do tipo de calda utilizada e dos critérios de ruptura adotados.

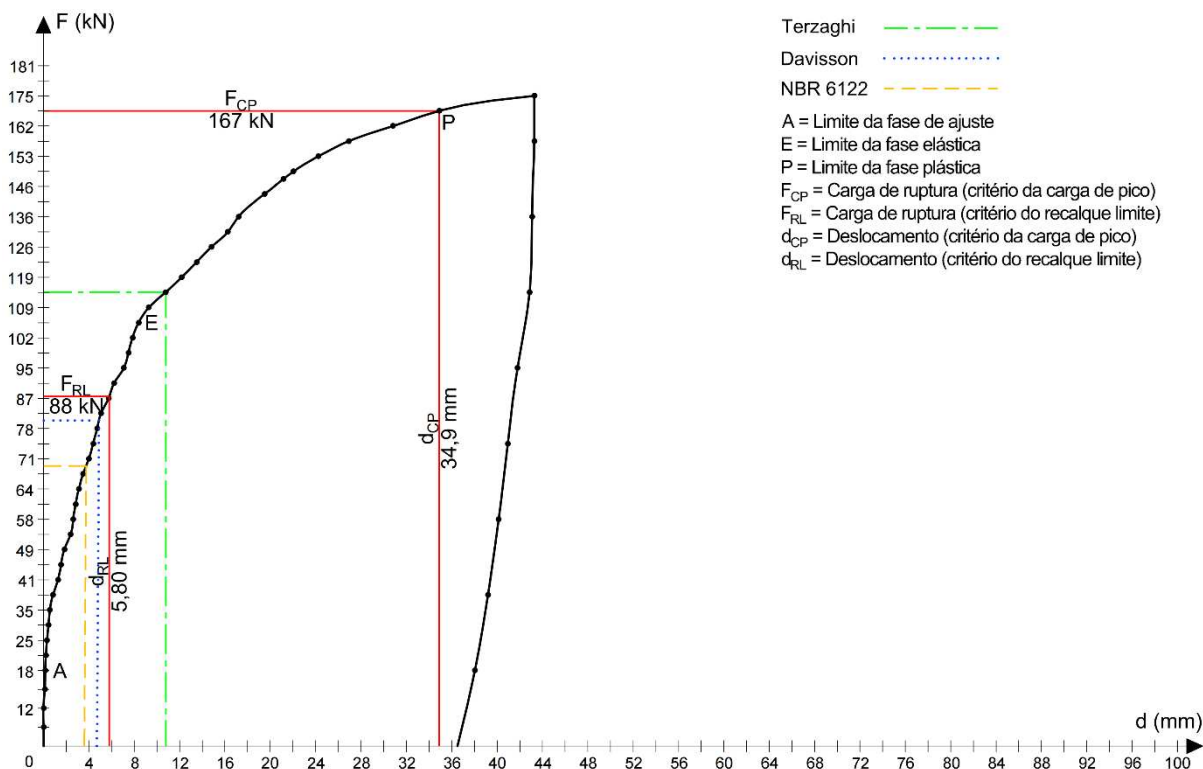
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentadas as curvas Carga x Deslocamento dos grampos Gr 1 ao Gr 12, as discussões e os resultados dos estudos comparativos realizados entre as resistências q_s dos grampos injetados com a calda aditivada (Gr 1, Gr 3, Gr 5, Gr 7, Gr 9 e Gr 11) e os grampos injetados com a calda convencional (Gr 2, Gr 4, Gr 6, Gr 8, Gr 10 e Gr 12), segundo os dois critérios de ruptura adotados.

4.1 Curvas Carga x Deslocamento

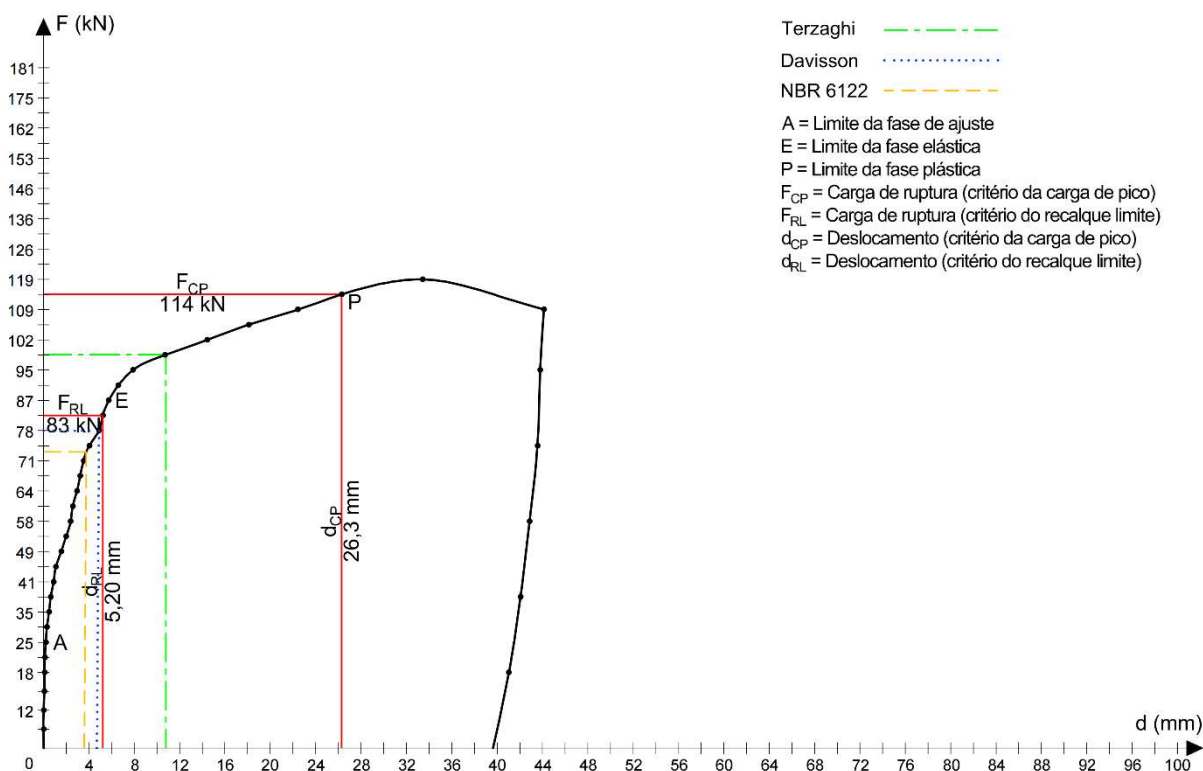
Nas Figuras 66 a 77 são apresentadas as curvas Carga x Deslocamento dos doze grampos e na Figura 78, apresentam-se as curvas sobrepostas. Em cada curva são indicadas as cargas de ruptura segundo os critérios da carga de pico (F_{CP}) e do recalque limite (F_{RL}) e os deslocamentos correspondentes (d_{CP} e d_{RL}); os limites definidos para as fases de ajuste do sistema (A), elástica (E) e plástica (P); os traçados das retas correspondentes às metodologias de Terzaghi, de Davisson e da ABNT NBR 6122 (ABNT 2010), além do traçado dos ciclos de descarregamento.

Figura 66 – Curva Carga x Deslocamento: Grampo Gr 1



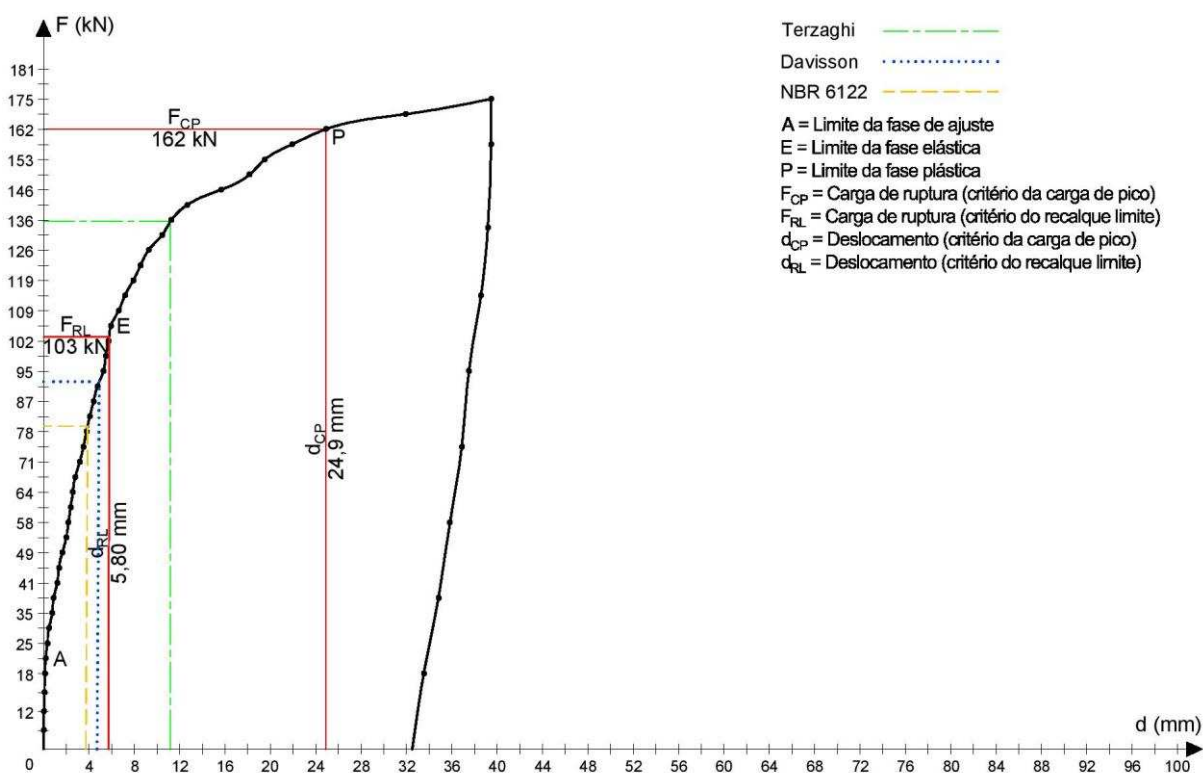
Fonte: Autor

Figura 67 – Grampo Gr 2



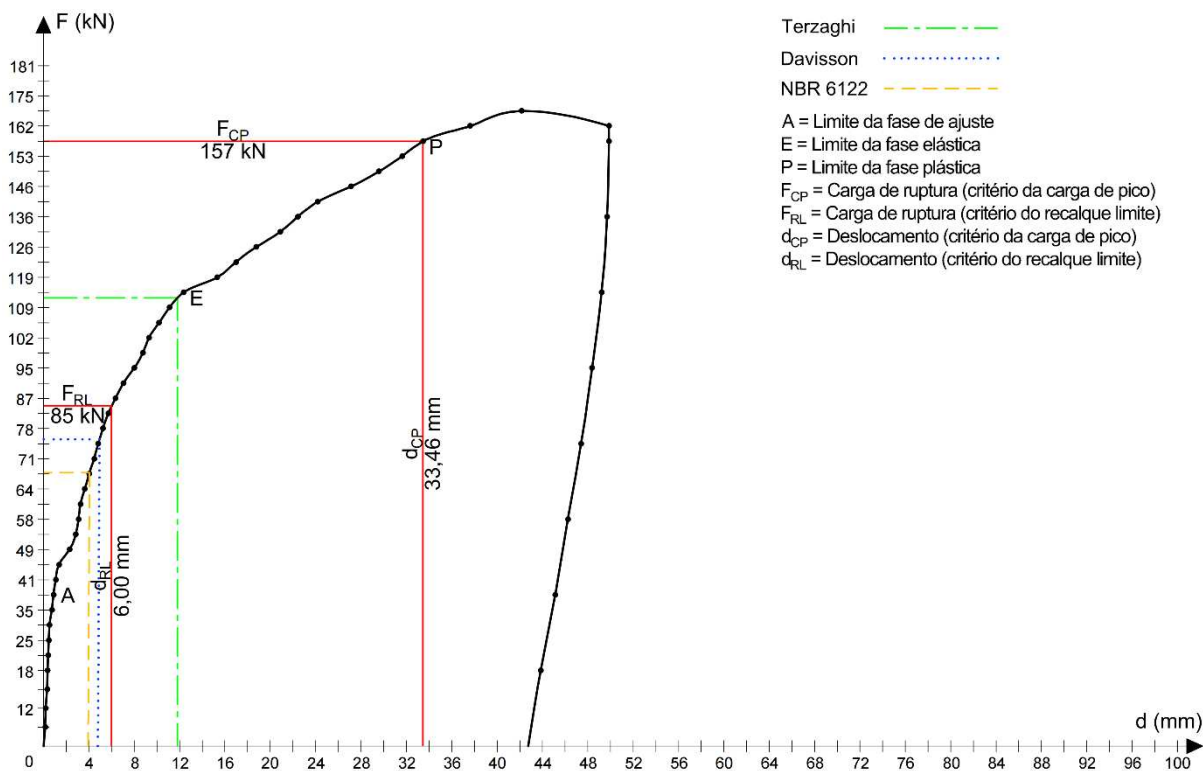
Fonte: Autor

Figura 68 – Grampo Gr 3



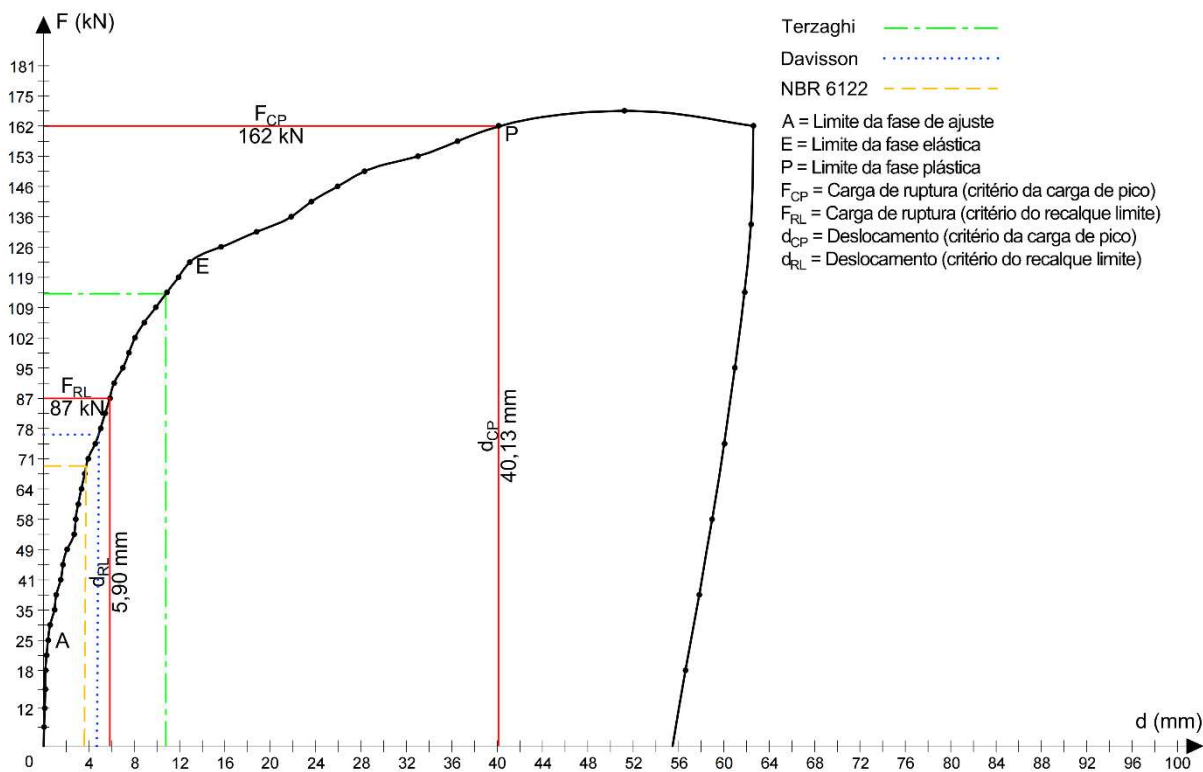
Fonte: Autor

Figura 69 – Grampo Gr 4



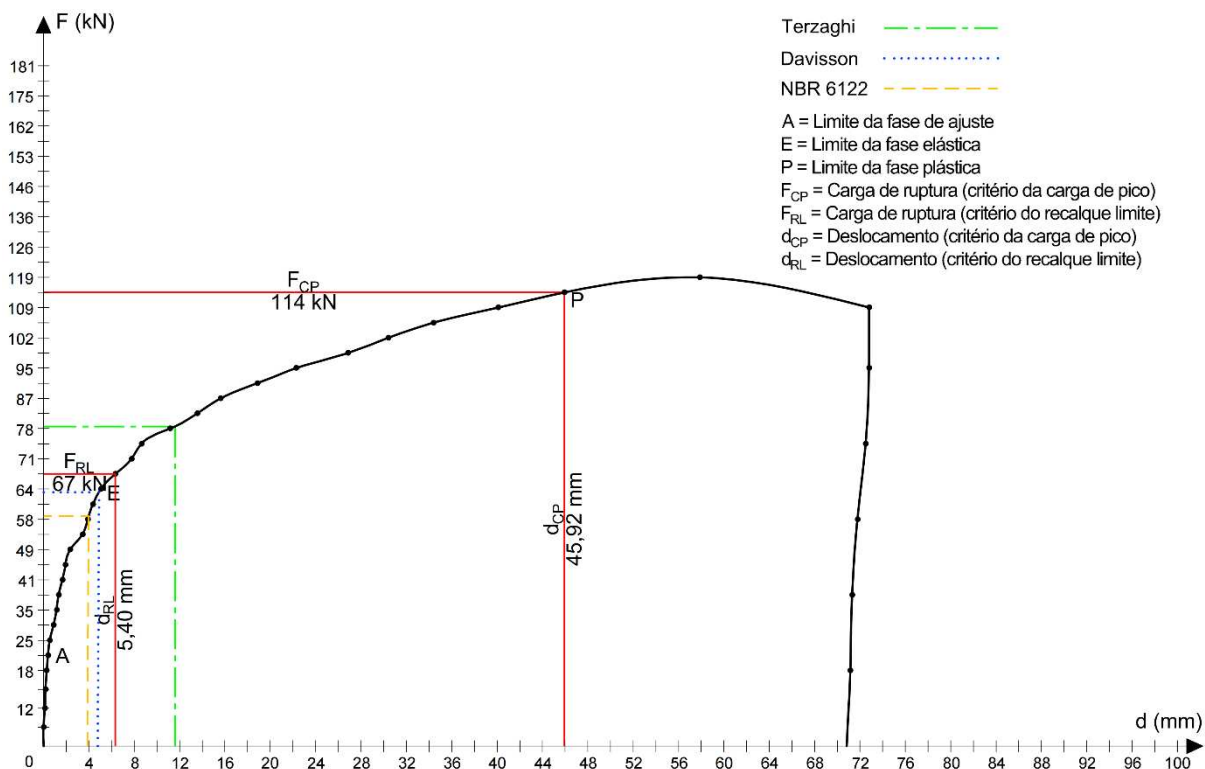
Fonte: Autor

Figura 70 – Grampo Gr 5



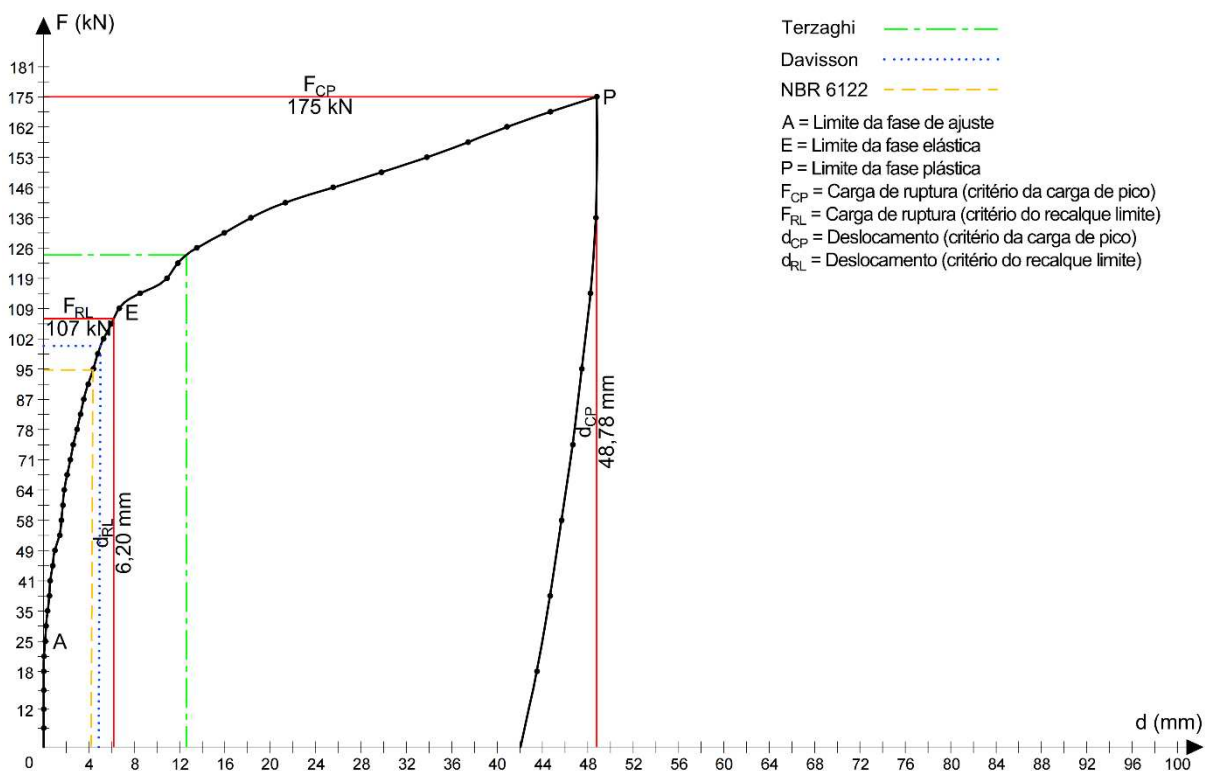
Fonte: Autor

Figura 71 – Grampo Gr 6



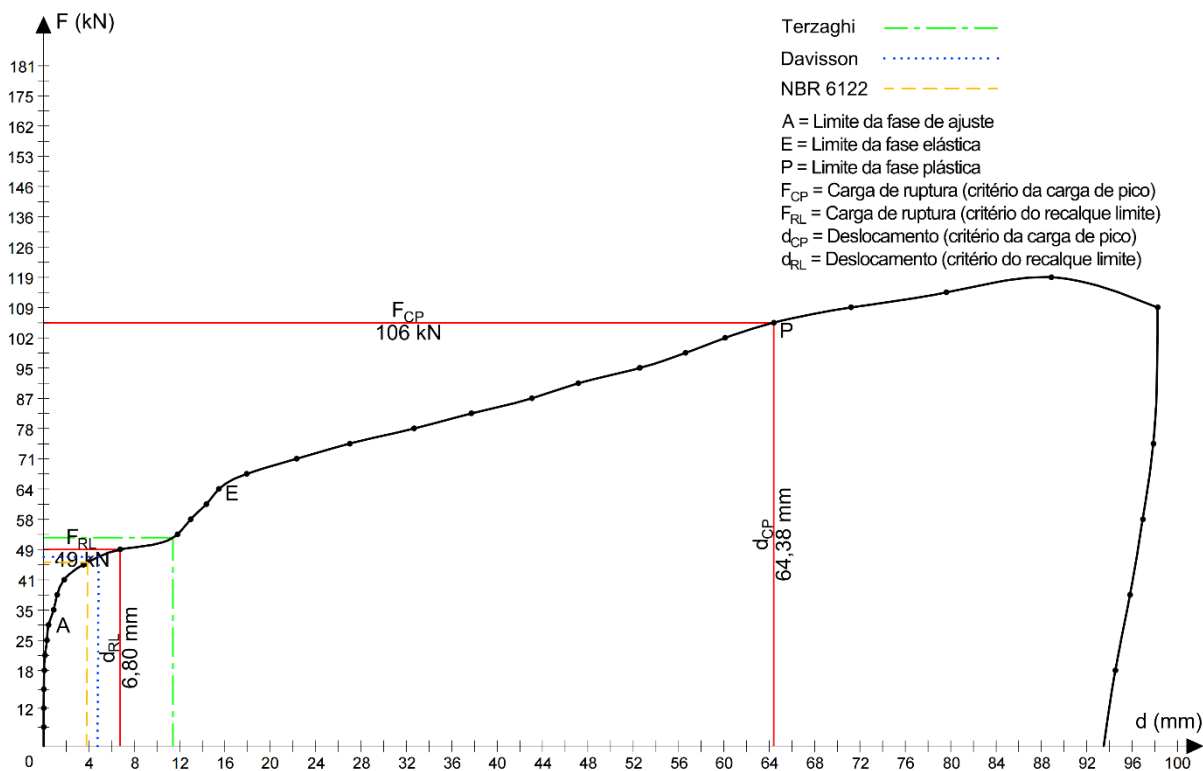
Fonte: Autor

Figura 72 – Grampo Gr 7



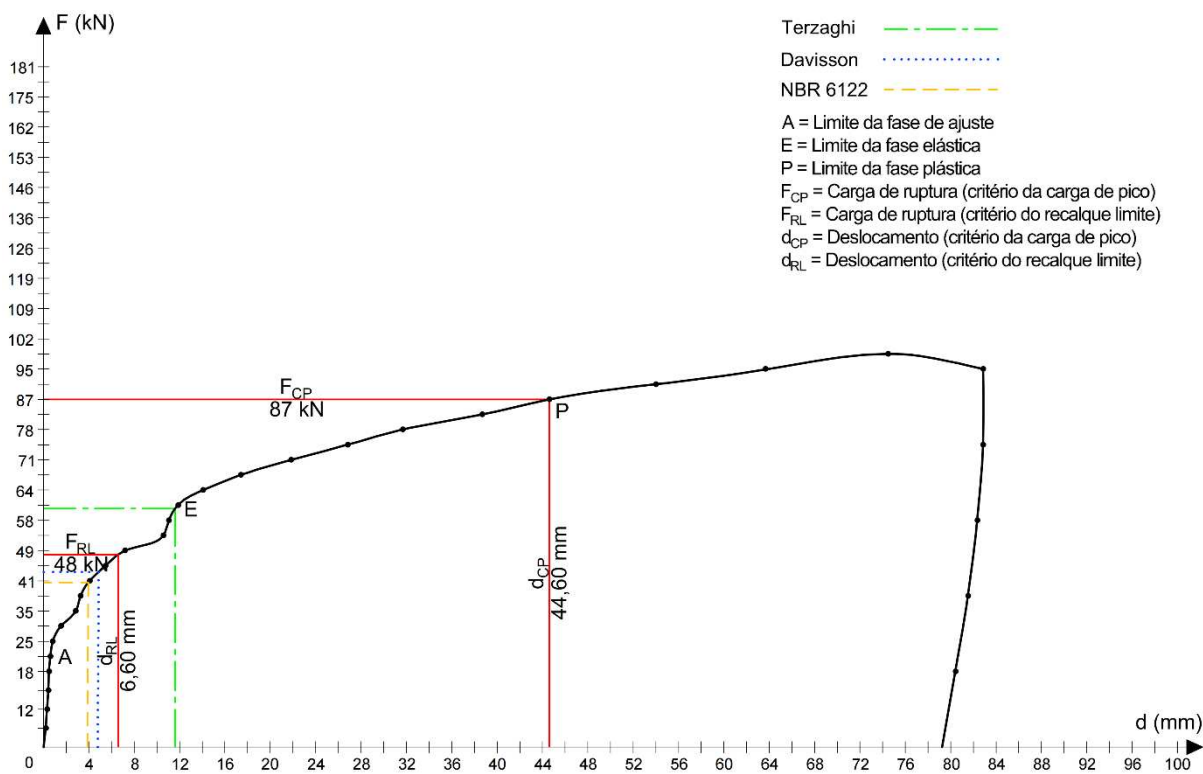
Fonte: Autor

Figura 73 – Grampo Gr 8



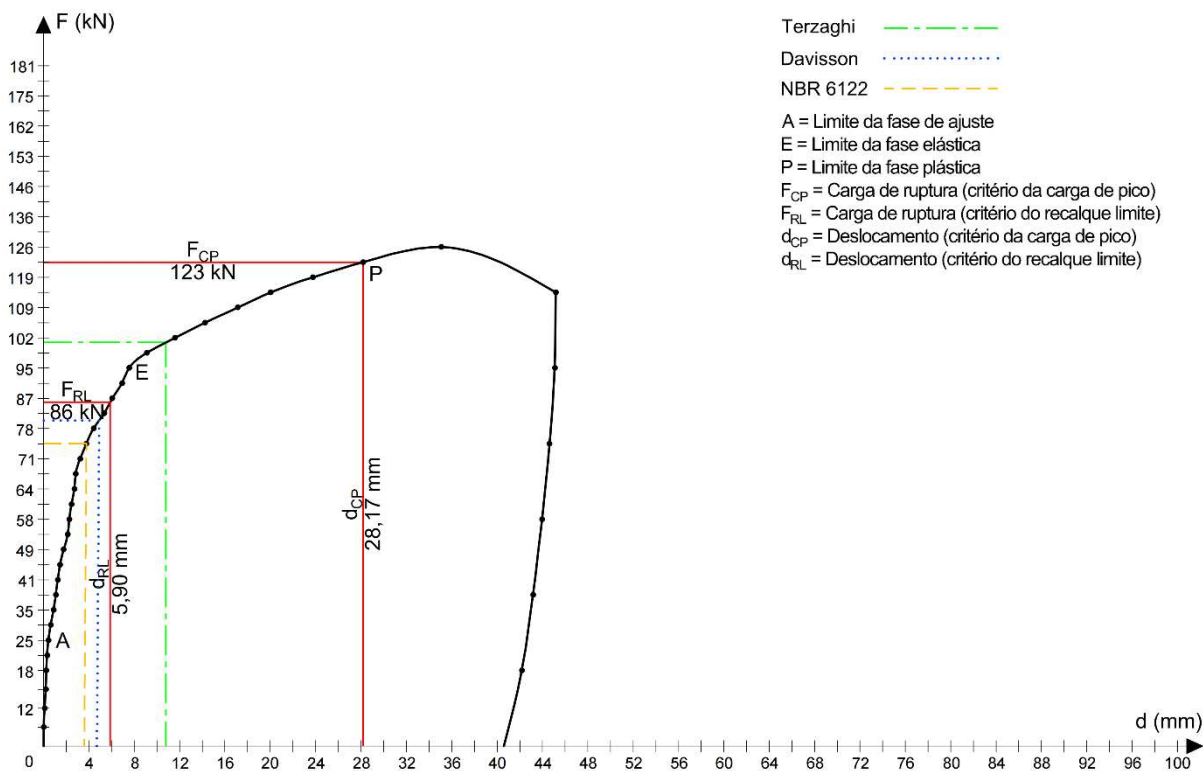
Fonte: Autor

Figura 74 – Grampo Gr 9



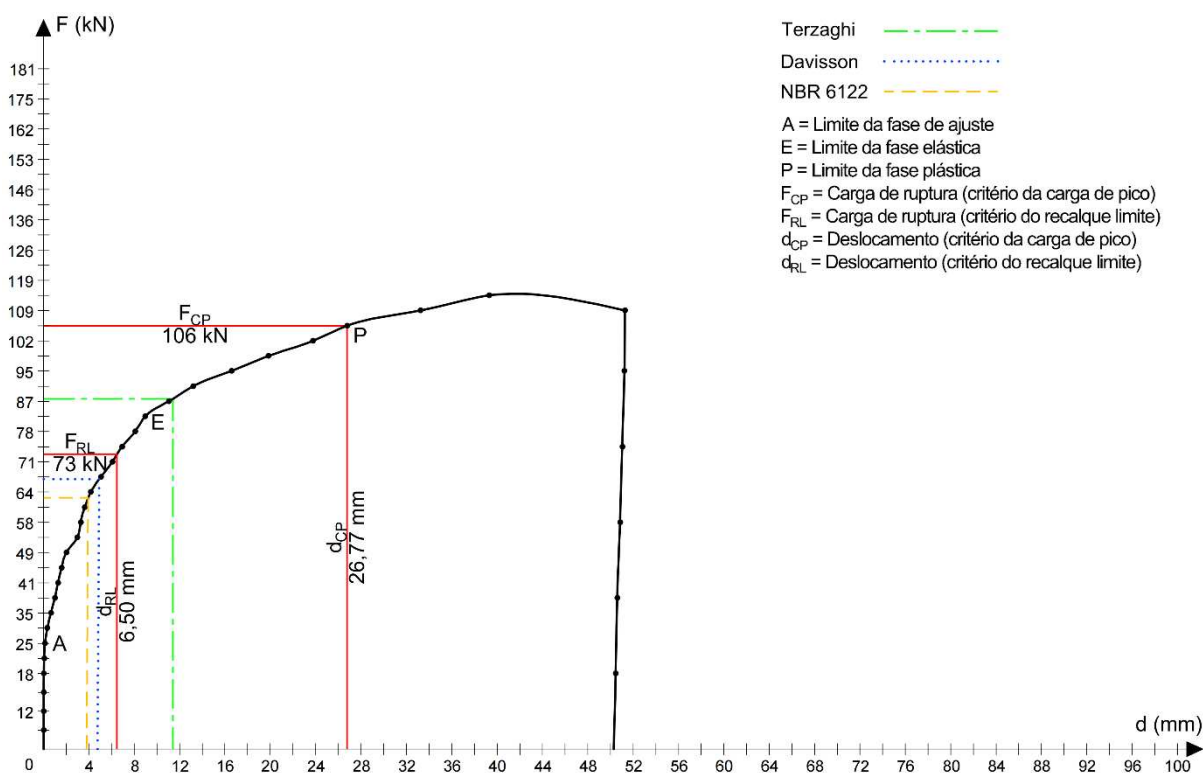
Fonte: Autor

Figura 75 – Grampo Gr 10



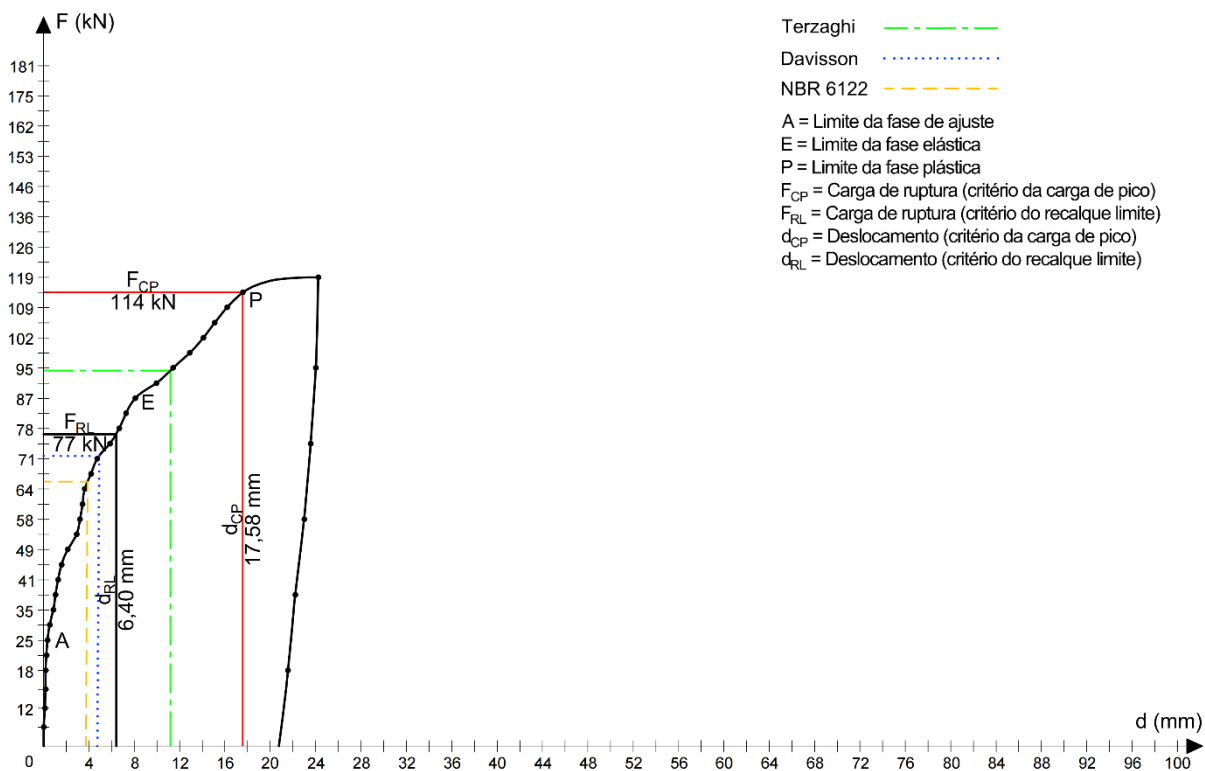
Fonte: Autor

Figura 76 – Grampo Gr 11



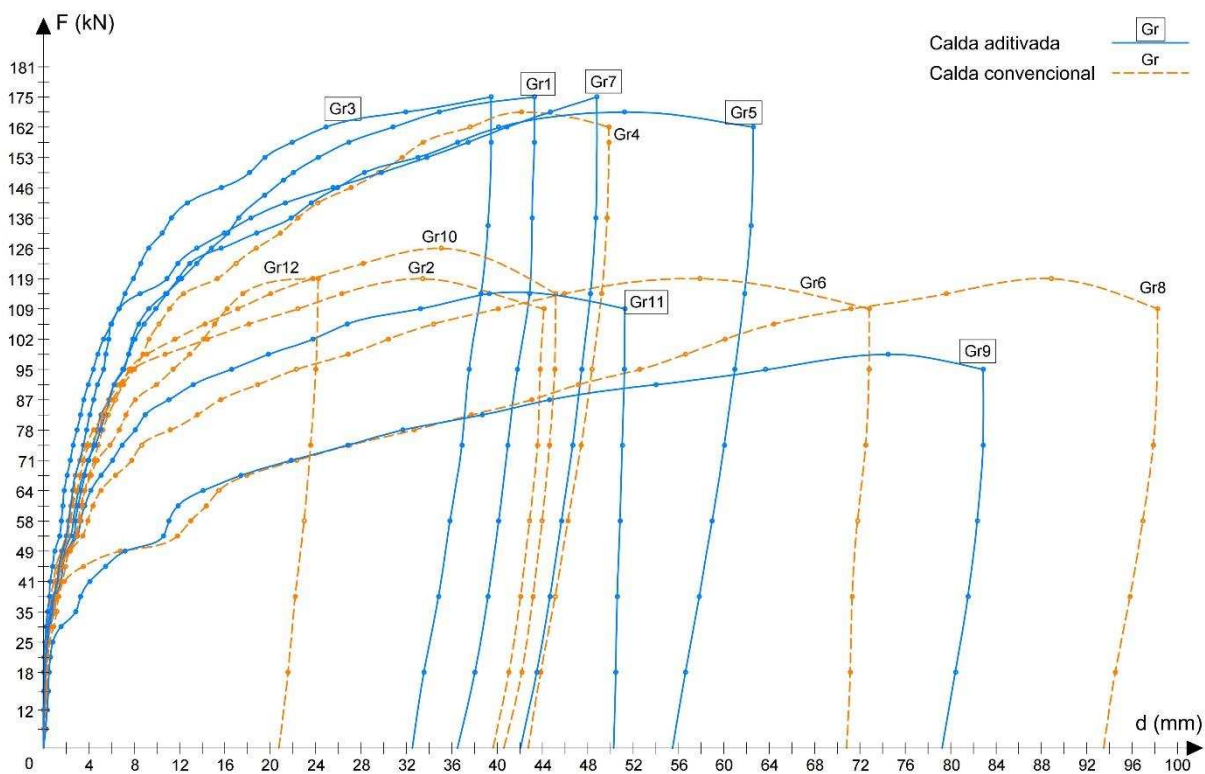
Fonte: Autor

Figura 77 – Grampo Gr 12



Fonte: Autor

Figura 78 – Curva Carga x Deslocamento: Grampos Gr 1 ao Gr 12



Fonte: Autor

Pela análise das curvas Carga x Deslocamento observa-se que os grampos Gr 1, Gr 3 e Gr 7 não apresentaram o pico como os demais, tendo em vista a interrupção dos ensaios de arrancamento devido à limitação de 185 kN imposta à barra de aço. Assim sendo, para fins comparativos com os demais segundo o critério da carga de pico e homogeneidade dos dados, a ruptura foi definida antes do pico, no ciclo de carga que antecede uma leve redução da inclinação da curva, com deslocamento superior a 50% do ciclo anterior, comportamento este apresentado por todos os grampos.

A análise das curvas dos doze grampos permite ponderar os seguintes resultados: os grampos Gr 1, Gr 2, Gr 3, Gr 4, Gr 5, Gr 6, Gr 7, Gr 10, Gr 11 e Gr 12 apresentaram as inclinações das fases de ajuste do sistema, elástica e plástica-rúptil bem definidas; o comportamento dos grampos Gr 8 e Gr 9 foi consideravelmente divergente dos demais, com deslocamentos muito superiores e não apresentaram a inclinação da fase elástica bem definida. Atribui-se ao comportamento apresentado pelos grampos Gr 8 e Gr 9, a uma possível presença de um veio menos resistente no maciço que os interceptaram. Descarta-se a ocorrência de falha executiva, diante do comportamento muito semelhante entre ambos, principalmente até o carregamento de 87 kN. Com a utilização de uma retroescavadeira, foi realizada a tentativa de retirada do grampo Gr 9 para exumação, porém sem sucesso.

A Tabela 16 apresenta as cargas máximas de tração ($T_{m\acute{a}x}$) aplicadas aos grampos nos ensaios de arrancamento e os valores dos deslocamentos totais (d_{CD}) obtidos nos ciclos de descarregamento realizados.

Tabela 16 – Cargas máximas de tração e deslocamentos totais nos ciclos de descarregamento

Grampo	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 5	Gr 6	Gr 7	Gr 8	Gr 9	Gr10	Gr11	Gr12
$T_{m\acute{a}x}$ (kN)	175	119	175	167	167	119	175	119	99	126	114	119
d_{CD} (mm)	6,76	4,50	6,95	7,11	7,10	1,99	6,63	4,74	3,60	4,56	1,00	4,41

Fonte: Autor

Em análise à Tabela 16, observa-se que os grampos Gr 1, Gr 3, Gr 4, Gr 5 e Gr 7 apresentaram as cargas máximas e os deslocamentos semelhantes, assim como os grampos Gr 2, Gr 8, Gr 9, Gr 10 e Gr 12. Já os grampos Gr 6 e Gr 11 apresentaram deslocamentos muito divergentes dos demais nos ciclos de descarregamento.

Na Tabela 17 são apresentados os dados obtidos a partir das curvas Carga x Deslocamento dos doze grampos, referentes às fases de ajuste, elástica, plástica, além da tensão de ruptura com base no critério da carga de pico (q_{sCP}), com o

respectivo deslocamento do grampo (d_{CP}). Para cada fase são apresentados os valores das cargas (F_a , F_e , F_p) e dos deslocamentos (d_a , d_e , d_p) medidos durante o carregamento dos grampos.

Tabela 17 – Resumo dos dados das curvas Carga x Deslocamento e q_{SCP} pelo critério da carga de pico

Grupo	Ajuste do sistema		Fase elástica			
	ΔF_a (kN)	d_a (mm)	Intervalo F_e (kN)	ΔF_e (kN)	Intervalo d_e (mm)	Δd_e (mm)
Gr 1	0 - 35	0 - 0,56	35 - 107	72	0,56 - 8,38	7,82
Gr 2	0 - 25	0 - 0,20	25 - 87	62	0,20 - 5,75	5,55
Gr 3	0 - 21	0 - 0,19	21 - 106	85	0,19 - 6,64	6,45
Gr 4	0 - 38	0 - 0,87	38 - 114	76	0,87 - 12,35	11,48
Gr 5	0 - 25	0 - 0,39	25 - 123	98	0,39 - 12,89	12,50
Gr 6	0 - 21	0 - 0,39	21 - 64	43	0,39 - 5,06	4,67
Gr 7	0 - 25	0 - 0,15	25 - 109	84	0,15 - 6,66	6,51
Gr 8	0 - 29	0 - 0,44	29 - 64	35	0,44 - 15,46	15,02
Gr 9	0 - 21	0 - 0,61	21 - 61	40	0,61 - 1,85	11,24
Gr 10	0 - 25	0 - 0,42	21 - 95	74	0,42 - 7,54	7,12
Gr 11	0 - 25	0 - 0,12	25 - 83	58	0,12 - 8,96	8,84
Gr 12	0 - 25	0 - 0,36	25 - 87	62	0,36 - 8,07	7,71

Grupo	Fase plástica				Tensão de ruptura (carga de pico)	
	Intervalo F_p (kN)	ΔF_p (kN)	Intervalo d_p (mm)	Δd_p (mm)	q_{SCP} (kPa)	d_{CP} (mm)
Gr 1	107 - 167	60	8,38 - 34,89	26,51	125	34,89
Gr 2	87 - 114	27	5,75 - 26,29	20,54	84	26,29
Gr 3	106 - 162	56	6,64 - 24,89	18,25	123	24,89
Gr 4	114 - 157	43	12,35 - 33,46	21,11	113	33,46
Gr 5	123 - 162	39	12,89 - 40,13	27,24	123	40,13
Gr 6	64 - 114	50	5,06 - 45,92	40,86	83	45,92
Gr 7	109 - 175	66	6,66 - 48,78	45,12	112	48,78
Gr 8	64 - 106	42	15,46 - 64,38	48,92	79	64,38
Gr 9	61 - 87	26	11,85 - 44,60	32,75	60	44,60
Gr 10	95 - 123	28	7,54 - 28,17	20,63	86	28,17
Gr 11	83 - 106	23	8,96 - 26,17	17,21	71	26,77
Gr 12	87 - 114	27	8,07 - 17,58	9,51	77	17,58

Fonte: Autor

Em análise à Tabela 17 e à Figura 78, observa-se que na fase de ajuste do sistema, todos os grampos apresentaram comportamento semelhante, com deslocamentos reduzidos (entre 0,12 e 0,87 mm). Esse comportamento dos grampos comprova que a aplicação de um carregamento inicial em torno de 10% da carga de ruptura estimada, para um ajuste e acomodação do sistema de arrancamento, apresenta-se oportuno e vantajoso, conforme sugerido por Feijó e Ehrlich (2001).

Na fase elástica, é possível observar três grupos com deslocamentos absolutos distintos. O primeiro grupo é composto pela dupla Gr 2 e Gr 6 com deslocamento médio de 5,11 mm; o segundo pelos grampos Gr 1, Gr 3, Gr 7, Gr 10, Gr 11 e Gr 12,

deslocamento médio de 7,41 mm e o terceiro pelos grampos Gr 4, Gr 5, Gr 8 e Gr 9, cujo deslocamento médio foi de 12,56 mm.

Assim como na fase elástica, na fase plástica observa-se três grupos distintos. O primeiro é composto pelo grampo Gr 12, deslocamento de 9,51 mm; o seguinte pelos grampos Gr 1 ao Gr 5 e Gr 9 ao Gr 11, com deslocamento médio de 23,03 mm e o terceiro pelos grampos Gr 6, Gr 7 e Gr 8, deslocamento médio de 44,97 mm.

Na Tabela 18 são apresentados os valores das cargas de ruptura (F_{RL}), dos respectivos deslocamentos (d_{RL}) e das tensões de ruptura (q_{sRL}) dos grampos, obtidos segundo o critério do recalque limite, definidos conforme os critérios de Terzaghi, de Davisson e da ABNT NBR 6122 (ABNT, 2010).

Tabela 18 – Dados das curvas Carga x Deslocamento e q_{sRL} pelo critério do recalque limite

Grupo	Terzaghi		Davisson		ABNT NBR 6122		Valor médio		q_{sRL} (kPa)
	F (kN)	d (mm)	F (kN)	d (mm)	F (kN)	d (mm)	F_{RL} (kN)	d_{RL} (mm)	
Gr 1	114	10,80	81	4,90	69	3,80	88	5,80	66
Gr 2	99	10,80	78	4,90	73	3,80	83	5,20	61
Gr 3	136	11,20	92	4,90	80	3,90	103	5,80	78
Gr 4	112	11,80	76	4,90	67	4,00	85	6,00	61
Gr 5	114	10,80	77	4,90	69	3,80	87	5,90	66
Gr 6	79	11,60	63	4,90	59	4,00	67	5,40	49
Gr 7	124	12,60	101	5,00	95	4,40	107	6,20	69
Gr 8	53	11,40	47	4,80	46	3,90	49	6,80	37
Gr 9	60	11,60	43	4,80	41	4,00	48	6,60	33
Gr 10	101	10,80	81	4,90	75	3,80	86	5,90	60
Gr 11	88	11,40	67	4,90	63	3,90	73	6,50	49
Gr 12	94	11,20	72	4,90	66	3,90	77	6,40	52
Valor médio	98	11,33	73	4,89	67	3,93	79	6,04	57

Fonte: Autor

Em análise à Tabela 18, observa-se que segundo o critério do recalque limite, e considerando a média das três metodologias adotadas, os grampos apresentaram deslocamentos semelhantes (entre 5,20 e 6,80 mm), com valor médio de 6,04 mm.

Na Tabela 19 são apresentados os valores das resistências de ruptura (q_{sCP} e q_{sRL}) e os deslocamentos correspondentes (d_{CP} e d_{RL}), segundo os critérios da carga de pico e do recalque limite, como também os valores das resistências admissíveis (q_{sCPadm} e q_{sRLadm}), além dos valores médios relativos às duas metodologias. Pelo critério da carga de pico foi utilizado um fator de segurança (FS) de 2,0 e pelo critério do recalque limite um FS de 1,5 para obtenção das tensões admissíveis, conforme descrito na ABNT NBR 6122 (ABNT, 2010).

Tabela 19 – Resumo das resistências q_s de ruptura e admissível com os respectivos deslocamentos pelos critérios da carga de pico e do recalque limite

Grupo	Carga de pico		Recalque limite		Carga de pico	Recalque limite	Valor médio
	q_{sCP} (kPa)	d_{CP} (mm)	q_{sRL} (kPa)	d_{RL} (mm)	q_{sCPadm} (kPa)	q_{sRLadm} (kPa)	q_{sadm} (kPa)
Gr 1	125	34,89	66	5,80	63	44	54
Gr 2	84	26,29	61	5,20	42	41	42
Gr 3	123	24,89	78	5,80	62	52	57
Gr 4	113	33,46	61	6,00	57	41	49
Gr 5	123	40,13	66	5,90	62	44	53
Gr 6	83	45,92	49	5,40	42	33	38
Gr 7	112	48,78	69	6,20	56	46	51
Gr 8	79	64,38	37	6,80	40	25	33
Gr 9	60	44,60	33	6,60	30	22	26
Gr 10	86	28,17	60	5,90	43	40	42
Gr 11	71	26,77	49	6,50	36	33	35
Gr 12	77	17,58	52	6,40	39	35	37
Valor médio	95	36,32	57	6,04	48	38	43

Fonte: Autor

Em análise à Tabela 19, observa-se que o valor médio obtido da resistência de ruptura pelo critério da carga de pico (q_{sCP}) foi de 95 kPa e o deslocamento correspondente de 36,32 mm. Já pelo critério do recalque limite, o valor médio da resistência de ruptura (q_{sRL}) foi de 57 kPa e o deslocamento respectivo de 6,04 mm.

Considerando os valores médios obtidos das tensões admissíveis, 48 kPa pelo critério da carga de pico e 38 kPa segundo o critério do recalque limite, aponta-se a conveniência em se usar a média desses valores, ou seja, a tensão de 43 kPa para fins de dimensionamento de estruturas em solo grampeado em maciços com características geotécnicas semelhantes ao do talude experimental.

Os valores estimados inicialmente da resistência q_s por correlações empíricas e pela metodologia descrita na ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006), nas seções 3.3.4.2.1 e 3.3.4.2.2, foram: 155, 104, 58 e 91 kPa (valor médio de 102 kPa). Observa-se variações consideráveis nessas resistências, valores entre 58 kPa, segundo a ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006) e 155 kPa, segundo a correlação proposta por Ortigão (1997). Assim como, os valores obtidos das resistências q_s pelo critério da carga de pico (Tabela 19), também apresentaram variações significativas, entre 60 kPa e 125 kPa, valores compatíveis aos estimados acima. Ao excluir os grupos Gr 8 e Gr 9 da amostragem, diante do comportamento divergente dos demais, obtém-se uma resistência média de 100 kPa segundo o critério da carga de pico, valor este equivalente à média estimada inicialmente (102 kPa).

4.2 Estudos comparativos da resistência q_s

No primeiro estudo comparativo realizado com amostragem de doze grampos, segundo o critério de ruptura da carga de pico, os valores obtidos de q_{sCP} (Tabela 19), apresentaram significância estatística (p-value) de 0,05 pela metodologia de Lilliefors. O valor médio da resistência q_{sCP} dos grampos Gr 1, Gr 3, Gr 5, Gr 7, Gr 9 e Gr 11 (calda aditivada) foi de 102,3 kPa, enquanto para os grampos Gr 2, Gr 4, Gr 6, Gr 8, Gr 10 e Gr 12 (calda convencional) foi de 87,0 kPa. Assim, o incremento de resistência q_s , em função do uso da calda aditivada foi de 17,6%.

Com base no critério do recalque limite, os valores obtidos de q_{sRL} (Tabela 19), apresentaram significância estatística (p-value) de 0,05. O valor médio da resistência q_{sRL} dos grampos executados com a calda aditivada (Gr 1, Gr 3, Gr 5, Gr 7, Gr 9, e Gr 11) foi de 60,2 kPa, sendo que a dos grampos executados com a calda convencional (Gr 2, Gr 4, Gr 6, Gr 8, Gr 10 e Gr 12) foi de 53,3 kPa. Portanto, o ganho na resistência q_s devido ao uso de aditivos na calda de cimento foi de 12,9%.

No segundo estudo realizado foi considerada uma amostragem de dez grampos, tendo em vista a exclusão dos grampos Gr 8 e Gr 9, por apresentarem comportamento divergente dos demais. Pelo critério de ruptura da carga de pico, os valores obtidos de q_{sCP} apresentaram significância estatística de 0,05 pela metodologia de Lilliefors. O valor médio da resistência q_{sCP} dos grampos Gr 1, Gr 3, Gr 5, Gr 7, e Gr 11 (calda aditivada) foi de 110,8 kPa, enquanto para os grampos Gr 2, Gr 4, Gr 6, Gr 10 e Gr 12 (calda convencional) foi de 88,6 kPa. Portanto, o incremento de resistência q_s devido ao uso da calda aditivada foi de 25,1%.

Com base no critério do recalque limite, a amostragem dos dez grampos também apresentou significância estatística de 0,05. O valor médio da resistência q_{sRL} dos grampos executados com a calda aditivada (Gr 1, Gr 3, Gr 5, Gr 7, e Gr 11) foi de 65,6 kPa, sendo que a dos grampos executados com a calda convencional (Gr 2, Gr 4, Gr 6, Gr 10 e Gr 12) foi de 56,6 kPa. O ganho de resistência q_s foi de 15,9%, devido ao uso de aditivos na calda de cimento.

Considerando os percentuais obtidos (17,6%, 12,9%, 25,1% e 15,9%) conforme as duas metodologias adotadas e a as duas amostragens consideradas, os grampos executados com a calda aditivada proposta apresentaram um incremento médio de resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo (q_s) de 17,9%, em relação àqueles executados com a calda convencional adotada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Sinopse e conclusões

Motivou esta pesquisa o fato dos grampos executados com injeção de bainha apresentarem vazios ao longo da superfície, causados pela retração da calda de cimento e por falhas no processo executivo, acarretando a redução da resistência q_s e a durabilidade do grampo, além do aumento do deslocamento da estrutura grampeada, até que haja o confinamento completo do grampo pelo solo circundante.

Neste trabalho propôs-se um estudo comparativo sobre o emprego de caldas de cimento, com (calda aditivada) e sem aditivos plastificante e expensor (calda convencional), para a injeção somente da bainha em obras de solo grampeado, visando o aumento da resistência q_s , através da supressão da retração da calda. Foi também proposto o desenvolvimento e adoção de peças e equipamentos que visaram sobretudo assegurar a execução de grampos homogêneos e a redução ou eliminação dos vazios geralmente presentes nas peças oriundos de falhas no processo executivo.

No processo de dosagem para obter o melhor traço da calda aditivada, sem retração e conforme requisitos descritos na ABNT NBR 7681 (ABNT, 2013) e ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006), buscou-se variar o fator a/c e os percentuais dos aditivos, sendo o melhor traço definido a partir de tratamento estatístico dos dados. Na dosagem da calda convencional (sem aditivos), variou-se apenas o fator a/c .

Foram executados treze grampos com injeção de bainha, seis injetados com calda aditivada, seis com calda convencional e um grampo teste. Após a cura de 45 dias dos grampos, foram realizados os respectivos ensaios de arrancamento. As cargas de ruptura foram obtidas segundo dois critérios clássicos de ruptura: carga de pico e recalque limite. A partir dos valores obtidos das resistências q_s foram realizados os estudos comparativos correspondentes aos dois tipos de calda utilizada.

O estudo experimental realizado neste trabalho mostrou que o uso da calda aditivada se apresentou vantajoso em relação ao da calda convencional com fator $a/c = 0,60$. Esta afirmação se baseia nos seguintes resultados obtidos: incremento médio de 17,9% na resistência q_s ; aumento significativo na resistência à compressão da calda (68%), que assegura a redução da porosidade e maior durabilidade ao grampo; redução relevante (12%) da infiltração da calda no solo, que favorece a cura e economia no volume de material; além de fluidez, vida útil e injetabilidade favoráveis.

Diante dos valores médios obtidos das resistências q_s dos grampos (Tabela 19), e dos valores estimados inicialmente para a definição da geometria dos grampos (155, 104, 91 e 58 kPa), observa-se convergência entre a tensão (q_{sCP}) de 95 kPa obtida pelo critério da carga de pico e o valor de 104 kPa obtido pela correlação empírica proposta por Springer (2006), assim como, entre o valor da tensão (q_{sRL}) de 57 kPa obtida a partir do critério do recalque limite e o valor de 58 kPa estimado pelo critério descrito na ABNT NBR 5629 (ABNT, 2006).

Considerando as faixas de variações das resistências q_s obtidas neste experimento (Tabela 19), entre 60 e 125 kPa pelo critério da carga de pico e entre 33 e 78 kPa segundo o critério do recalque limite, demonstra-se que, além dos parâmetros geotécnicos do solo e da técnica executiva adotada para a execução dos grampos, o traço da calda de cimento têm influência relevante na magnitude da resistência de interface solo-grampo.

Conforme as condições e metodologia utilizada nesta pesquisa, conclui-se que o uso de calda aditivada se apresenta como uma opção tecnicamente viável para o confinamento de grampos executados com injeção somente de bainha, que além do aumento da resistência q_s , pode trazer como benefícios a redução do deslocamento inicial do maciço reforçado e o aumento da durabilidade da estrutura grampeada.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Embora esta pesquisa tenha contribuído para uma melhor compreensão da influência na resistência q_s em grampo com a injeção de bainha, com o uso de calda aditivada, sugere-se novos estudos e procedimentos para a avaliação da retração/expansão em caldas de cimento, utilizando-se outros aditivos (fabricantes diferentes) e outros cimentos, como por exemplo, o CP III 40 e o CP V ARI.

Sugere-se também a realização de um estudo semelhante ao apresentado neste trabalho, porém em aterro experimental homogêneo na escala 1:1, com o objetivo de reduzir substancialmente as variáveis inerentes à origem e à constituição do solo, além de possibilitar a escavação do maciço após o término dos ensaios de arrancamento. Desta forma, seria possível realizar a exumação dos grampos, possibilitando a verificação pormenorizada da geometria e dos possíveis vazios existentes ao longo da superfície das peças, causados pela retração da calda e/ou por falha no processo executivo, além de possibilitar a verificação da formação de nichos na região do entorno dos centralizadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANAGNOSTOPOULOS, C. A. **Effect of different plasticizers on the physical and mechanical properties of cement grouts**. In: Construction and Building Materials, n. 50, 2014, p. 162-168.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. São Paulo, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5629**: Execução de tirantes ancorados no terreno. Rio de Janeiro, 2016, 2018a.
- _____. **NBR 5732**: Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro, 1991a.
- _____. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991b.
- _____. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991c.
- _____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015a.
- _____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.
- _____. **NBR 6152**: Materiais Metálicos – Determinação das propriedades mecânicas à tração. Rio de Janeiro, 1992a.
- _____. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.
- _____. **NBR 6459**: Solos – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016b.
- _____. **NBR 6484**: Solo – Sondagens de simples reconhecimentos com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **NBR 7180**: Solos – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016c.
- _____. **NBR 7181**: Solos – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016d.
- _____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- _____. **NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificações. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **NBR 7681**: Calda de Cimento para Injeção – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 7681:** Calda de Cimento para Injeção – Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 7681:** Calda de Cimento para Injeção – Parte 3: Determinação dos índices de exsudação e expansão. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 7681:** Calda de Cimento para Injeção – Parte 4: Determinação da resistência a compressão. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 11578:** Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1991d.

_____. **NBR 11579:** Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (n° 200). Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 11582:** Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016e.

_____. **NBR 11682:** Estabilidade de taludes. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **NBR 11768:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 12123:** Estacas – Prova de carga estática – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992b.

_____. **NBR 12131:** Estacas – Prova de carga. Rio de Janeiro, 1992c.

_____. **NBR 15900-1:** Água para amassamento do concreto. Rio de Janeiro, 2009b.

_____. **NBR 16372:** Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015b.

_____. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16606:** Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018b.

_____. **NBR 16607:** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2018c.

_____. **NBR NM-ISO 3310-1:** Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação – Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro, 1997.

AZADI, M. R.; TAGHICHIAN, Ali; Taheri, Ali. **Optimization of cement-based grouts using chemical additives.** In: Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, v. 9, n. 4, 2017, p. 623-637.

BASTOS, P. K. X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento.** 2001. 172f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

BELONI, M.L. **Resistência ao arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2010. 126p.

BUSTAMANTE, M. e DOIX, B. **Une méthode pour le calcul des tyrants et des micropieux injectés.** – Bulletin des Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées, no. 140, pp. 75-92. Paris, 1985.

CLOUTERRE. **Recommendations Clouterre:** Soil nailing recommendations for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing, French National Project Clouterre, 1991, 302p.

DAS, B. M. **Earth Anchors.** Developments in Geotechnical Engineering 50, 1990.

DOMES, X. A. L. **Cement grouting during installation of ground anchors in non-cohesive soils.** Tese de Pós Doutorado. Norwegian University of Science and Technology, 2015, 225p.

EHRlich, M., AZAMBUJA, E. **“Muros de solo reforçado”, In: IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos e V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental,** volume único, Porto Alegre/RS, 2003.

FALCONI, F. F.; ALONSO, U.R. **Considerações sobre o dimensionamento de uma estrutura em solo grampeado.** In: 3º Seminário de engenharia de fundações especiais e geotecnia - SEFE, São Paulo/SP, 1996, vol 1, p. 301-308.

FEIJÓ, R. L., EHRlich, M. **Resultados de ensaios de arrancamento em grampos injetados em dois pontos do município do Rio de Janeiro.** In: III Conferência Brasileira Sobre Estabilidade De Encostas, Rio de Janeiro. 2001. v. 1, p.517 – 525.

FEIJÓ, R.L. **Monitoração de uma escavação experimental grampeada em solo residual gnáissico não saturado.** Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007, 157p.

FLORIANO, C.F. **Solo Grampeado:** comparação entre resultados de análises numéricas com dados de monitoramento. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009. 100p.

FRANÇA, F.A.N. **Ensaio de arrancamento em solo grampeado executados em laboratório.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

GÄSSLER, G. **In-situ techniques of reinforced soil. Proceedings of the International Reinforced Soil Conference.** Performance of Reinforced Soil Structures. A. McGown, K. C. Yeo and K. Z. Andrawes (ed.) British Geotechnical Society, 1990. p. 185-196.

NIYAMA, S.; AOKI, N.; CHAMECKI, O. R. Verificação de desempenho. *In:* HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. **Fundações: teoria e prática.** 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 723-751

JUNIOR, P. R. D. H. **Simulação numérica de ensaios de arrancamento de grampos.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

JURAN, I.; ELIAS, V. **Soil nailed retaining structures**: Analysis of case histories. In: A ten year update of soil improvement techniques, Geosynthetics for soil improvement. ASCE Geotechnical Special Publication No. 12, 1987, p. 232-244.

JURAN, I.; GEORGE, B.; ELIAS, V. **Kinematical limit analysis approach for the design of nailed soil retaining structures**. International Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement. Fukuoka Japan, oct. 1988.

LAZARTE, C.; ROBINSON, H.; GOMEZ, J. E.; BAXTER, A.; CADDEN, A.; BERG, R. **Geotechnical Engineering Circular No. 7. Soil Nail Walls – Reference Manual**. In: Report FHWA-NHI-14-007. U.S. Department of Transportation: Federal Highway Administration, Washington, 2015.

LAZARTE, C.; BAECHER, G. B. **LRFD for Soil Nailing Design and Specifications**. LSD2003: International Workshop on Limit State design in Geotechnical Engineering practice. Cambridge, Massachusetts, 2003.

LEITE, R. A. **Mobilização de resistência ao arrancamento de grampos com fibras de polipropileno**. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007. 152p.

LIMA, A. P. **Deformabilidade e estabilidade de taludes em solo grampeado**. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002. 180p.

LIMA, J.M.F. **Análise de Resistência ao Cisalhamento de Interface em Caldas de Cimento e Caldas de Solo-Cimento para utilização em solos grampeados**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009a. 96p.

LIMA, J.M.F. **Interação Solo-Grampo**: Comparação dos Resultados de Campo com Ensaio de Laboratório. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009b.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete**: Microstructure, Properties, and Materials. 3. ed. University of California at Berkeley, 2006.

MITCHELL J. K.; VILLET W. C. B.; **Reinforcement of Earth Slopes and Embankments**. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C., 1987.

MONTEIRO, A. B.; WOLENSKI, A. R. V.; MARAFON, C.; SANTOS, R. A.; PITANGUEIRA, R. L. S. **Determinação do teor ótimo de aditivos superplastificantes em pastas de cimento através do ensaio do cone de Marsh**. In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto. Maceió, IBRACON, 2012.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V.E. **The analysis of the stability of general slip surface**. Géotechnique, v. 15, 1965, p. 79-93.

National Research Project on Soil Nailing: CLOUTERRE, Geotechnical Special Publication, nº 25, 1990.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. 2. ed. 460p. England: Pearson, 2010.

OPRAVIL, T.; PTÁČEK, P.; ŠOUKAL, F.; HAVLICA, J.; BRANDŠTETR, J. **The synthesis and characterization of an expansive admixture for M-type cements I**. The influence of free CaO to the formation of ettringite. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 115, pp 1. Budapest, 2014.

ORTIGÃO, J.A.R. E SAYÃO, A.S.F.J. **Manual técnico de encostas**. GeoRio, 2. ed. 2000, 184p.

ORTIGÃO, J.A.R. **Ensaio de arrancamento para projetos de solo grampeado**, Nota Técnica, Solos & Rochas, ABMS. Vol. 20:1, pp. 39-43. 1997.

ORTIGÃO, J.A.R.; ZIRLIS, A.C.; PALMEIRA, E.M. **Experiência com solo grampeado no Brasil**, Revista Solos e Rochas, ABMS, V. 16, pp 291-304, São Paulo, 1993.

ORTIGÃO, J. A. R.; PALMEIRA, E. M. **Optimised design for soil nailed walls**. Proceedings of the 3rd Int Conf on Ground Improvement Geosystems, London, 1992.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica do Solos: Exercícios Resolvidos**. 1º edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2001.

PITTA, C.A.; SOUZA, G.J.T.; ZIRLIS, A.C. **Solo Grampeado, alguns detalhes executivos, ensaios – casos de obras**. In: Workshop Solo Grampeado. Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento. São Paulo: ABMS-Sinduscon, 2003, 20p.

PITTA, C.A.; ZIRLIS, A.C. **Chumbadores Injetados: A Qualidade do Solo Grampeado**. IV SEFE – Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 2000. V.2, p. 541-547.

PLUMELLE, C.; SCHLOSSER, F.; DELAGE, P.; KNOCHENMUS, G.; **French National Research Project on Soil Nailing: CLOUTERRE**, Geotechnical Special Publication, nº 25, 1990.

SARAMAGO, R. P., MENDONÇA, M. B., BRUGGER, P. J., FERREIRA JR., J. A. **Muro de solo grampeado com face em blocos pré-moldados**. In: IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), ABMS, v. 2, pp. 827-833, Salvador, 2005.

SARÉ, A.R. **Comportamento de Escavação Grampeada Instrumentada em Solo Residual**. Tese de Doutorado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SCHLOSSER, F. **Analogies et differences dans le comportement et le calcul des ouvrages de soutènement en terre armée et par clouage du sol**. Annales de L'Institut Technique de Batiment et des Travaux Publiques, nº 418, p 473, Sols et Fondations nº 184, p. 8-23. 1982.

SHETTY, M. S. **Concrete Technology: Theory and Practice**. New Delhi: S. Chand & Company Ltd., 2005. 656p.

- SILVA, D. P. **Análise de diferentes metodologias executivas de solo pregado a partir de ensaios de arrancamento realizados em campo e laboratório**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Carlos - São Paulo, 2009.
- SILVA, R. C. **Análise do Comportamento de Estruturas de Solo Grampeado através da Monitoração de Obra e Modelos Físicos (Escala 1:1)**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010. 354p.
- SILVA, T. P. da. **Resistência ao Arrancamento de Grampos em Solo Residual de Gnaise**. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- SOLOTRAT ENGENHARIA GEOTÉCNICA. **Manual de Serviços Geotécnicos Solotrat**. In: SOLOTRAT ENGENHARIA GEOTÉCNICA (Ed.). Manual técnico. 5. Ed. São Paulo: Solotrat Engenharia Geotécnica, 2015. p. 5-15.
- SOLOTRAT ENGENHARIA GEOTÉCNICA. **Solo Grampeado – Execução**. In: SOLOTRAT ENGENHARIA GEOTÉCNICA (Ed.). Manual técnico. 2. Ed. São Paulo: Solotrat Engenharia Geotécnica, 2006. Cap.1, p. 5-15.
- SOUZA, N. C. **Análise de desempenho do contrapiso autonivelante em relação ao sistema tradicional**. 2013. 181f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2013.
- SOUZA, G. J. T.; PITTA, C. A.; ZIRLIS, A. C. **Solo grampeado – aspectos executivos do chumbador**. IV COBRAE – Conferência Brasileira sobre estabilidade de encostas. Salvador/BA, 2005, p. 835-844.
- SPRINGER, F. O. **Ensaio de arrancamento de grampos em solo residual de gnaise**. Tese de Doutorado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- SPRINGER, F. O. **Estudos da deformabilidade de escavações com solo grampeado**. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001. 94p.
- TENÓRIO, J.A.S., ARAUJO, F.G.S., PEREIRA, S.S.R., FERREIRA, A.V., ESPINOSA, D.C.R., BARROS, A.M. **Decomposição da fase majoritária do cimento Portland - Parte II: alita com adições de Fe e Al**. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 56, n. 2, 2003.
- TURNER, J. B. **Influence of Grout Mix Design and Placement Procedures on the Integrity of Installed Soil Nails**. Dissertação de Mestrado – Texas Tech University, Texas, 2004, 49p.
- VIEIRA, A. P. **Avaliação Da Retração Autógena De Concretos De Alto Desempenho Produzidos Com Cinza Da Casca De Arroz**. Dissertação - Mestrado em Ciências em Engenharia Civil – Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Belo Horizonte, 2018. 163f.

APÊNDICES

Apêndice A – Certificado do ensaio de tração do aço CA 50



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Certificado
5969

Ensaio de tração e dobramento em aços para concreto armado - NBR 6152 e NBR 6153

Informações gerais

Interessado: Frederico Horta Miranda
Material: Aço para Construção
Local da coleta: Campo experimental

Obra: Pesquisa Pós-graduação UFV
Procedência: Gerdau

Data da coleta: 04/09/2018

Dados dos corpos de prova

Lote	Nº CP	Diâmetro (mm)	Comp. (mm)	Massa (g)	Área (mm ²)	Limite de escoamento		Limite de resistência		f _{st} /f _{yk}	Alongamento (mm)	Desbitolagem (%)	Dobramento	
						Força (kgf)	Tensão (MPa)	Força (kgf)	Tensão (MPa)				Cuteio (mm)	Ângulo (°)
01	02	20,0	597	1465,3	312,67	20,260	648	25,070	802	1,24	37,8	-0,5		CA - 50
01	01	20,0	599	1468,0	312,19	20,430	654	25,250	809	1,24	41,0	-0,6		CA - 50
03	03	20,0	597	1465,2	312,64	20,760	664	25,390	812	1,22	41,4	-0,5		CA - 50

Observações

Preparado por:
José Carlos Ferreira

Verificado por:
Leonardo Gonçalves Pedroti

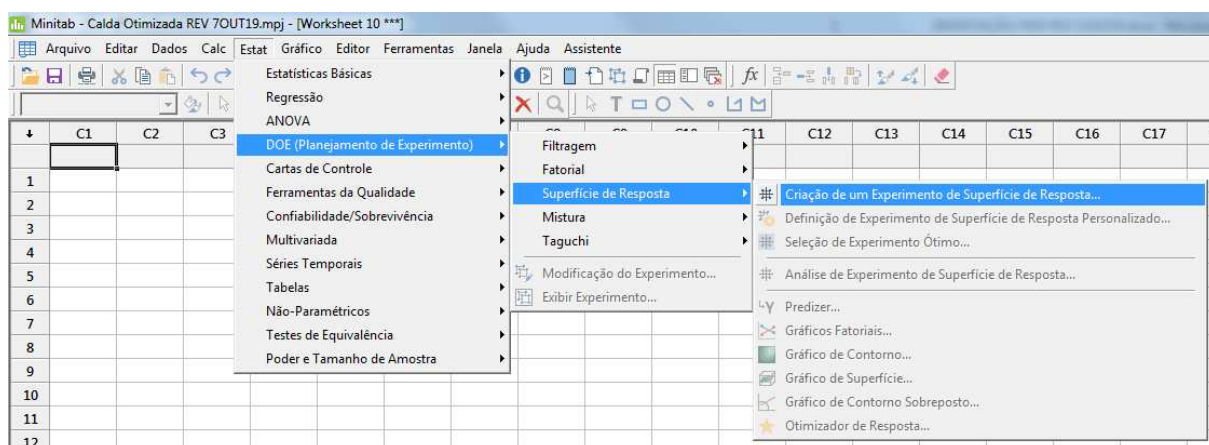
Data: 11/9/18
Folha: 01/01

Apêndice B – Análise no *software* Minitab 18. Tabelas de traços das caldas aditivada e convencional executados em laboratório e em campo.

B.1 Análise Minitab 18

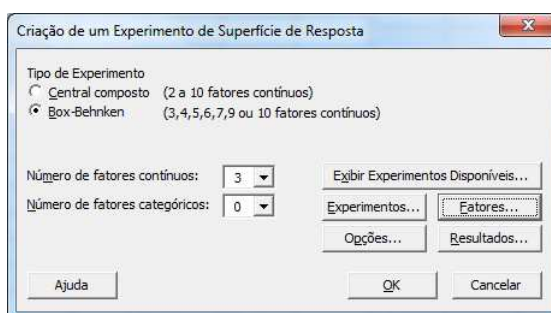
No *software* Minitab 18, após abrir uma nova *worksheet*, criou-se um experimento de superfície de resposta, conforme Figura B.1. Na janela que se abriu (Figura B.2) foi selecionada a opção Box-Behnken; Número de fatores contínuos igual a 3; e, na opção “Fatores...”, definiram-se os limites dos 3 fatores contínuos A, B e C como: fator a/c 0,4 - 0,6; aditivo expensor Quellmittel 0,5 – 1,0; e aditivo superplastificante PowerFlow 2150 0,2 – 0,5, respectivamente (Figura B.3).

Figura B.1 – Criação de experimento de superfície de resposta



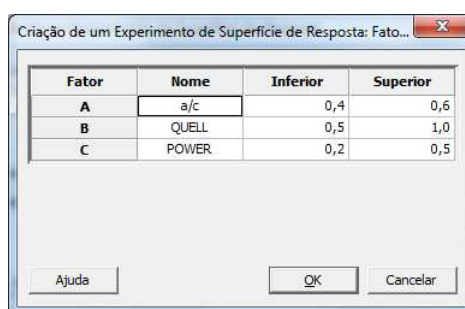
Fonte: Autor.

Figura B.2 – Janela para criação de experimento de superfície de resposta



Fonte: Autor.

Figura B.3 – Janela de fatores



Fonte: Autor.

Feito isso, o *software* gerou uma planilha com valores dispostos aleatoriamente, como indica a Figura B.4 abaixo.

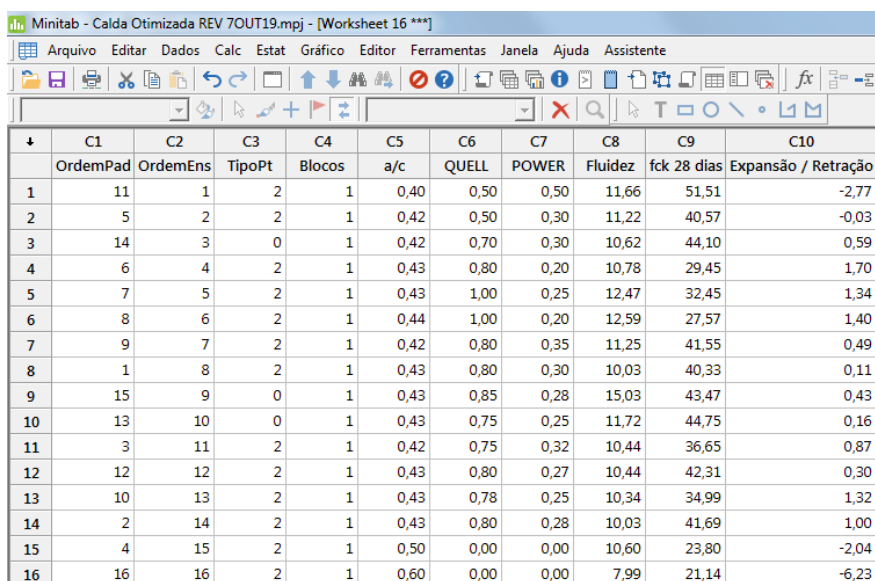
Figura B.4 – Planilha com valores aleatórios

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	OrdemPad	OrdemEns	TipoPt	Blocos	a/c	QUELL	POWER			
1	11	1	2	1	0,5	0,50	0,50			
2	5	2	2	1	0,4	0,75	0,20			
3	14	3	0	1	0,5	0,75	0,35			
4	6	4	2	1	0,6	0,75	0,20			
5	7	5	2	1	0,4	0,75	0,50			
6	8	6	2	1	0,6	0,75	0,50			
7	9	7	2	1	0,5	0,50	0,20			
8	1	8	2	1	0,4	0,50	0,35			
9	15	9	0	1	0,5	0,75	0,35			
10	13	10	0	1	0,5	0,75	0,35			
11	3	11	2	1	0,4	1,00	0,35			
12	12	12	2	1	0,5	1,00	0,50			
13	10	13	2	1	0,5	1,00	0,20			
14	2	14	2	1	0,6	0,50	0,35			
15	4	15	2	1	0,6	1,00	0,35			
16										

Fonte: Autor.

Foram, então, substituídos os valores das colunas C5, C6 e C7 pelos correspondentes traços utilizados no estudo, além do acréscimo dos resultados de fluidez, resistência à compressão axial aos 28 dias e retração/expansão nas colunas C8, C9 e C10, respectivamente (Figura B.5).

Figura B.5 – Planilha com os traços experimentais

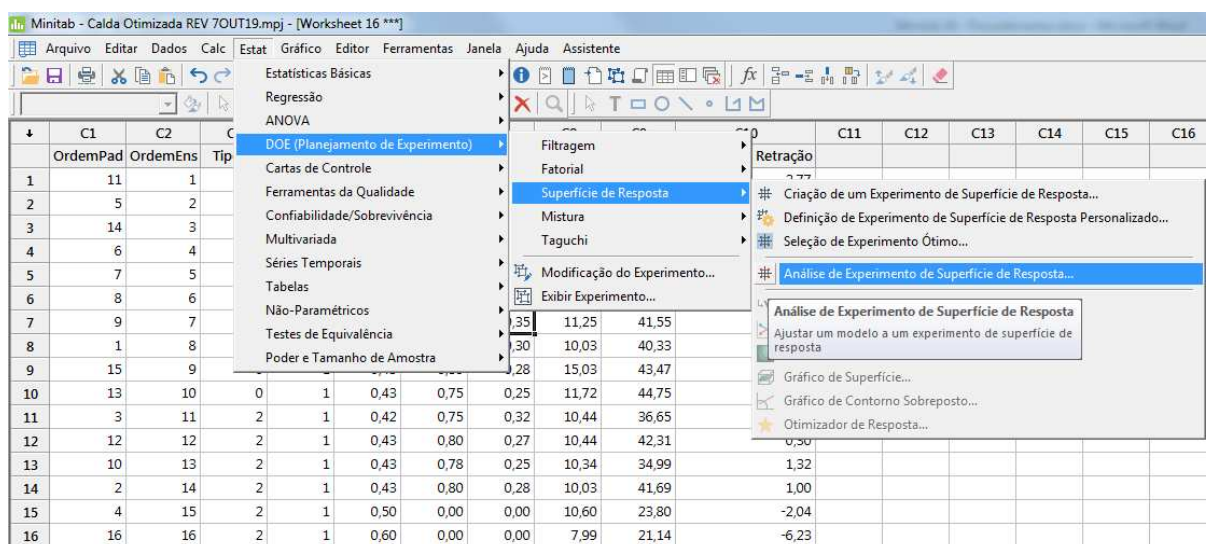


	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	OrdemPad	OrdemEns	TipoPt	Blocos	a/c	QUELL	POWER	Fluidez	fck 28 dias	Expansão / Retração
1	11	1	2	1	0,40	0,50	0,50	11,66	51,51	-2,77
2	5	2	2	1	0,42	0,50	0,30	11,22	40,57	-0,03
3	14	3	0	1	0,42	0,70	0,30	10,62	44,10	0,59
4	6	4	2	1	0,43	0,80	0,20	10,78	29,45	1,70
5	7	5	2	1	0,43	1,00	0,25	12,47	32,45	1,34
6	8	6	2	1	0,44	1,00	0,20	12,59	27,57	1,40
7	9	7	2	1	0,42	0,80	0,35	11,25	41,55	0,49
8	1	8	2	1	0,43	0,80	0,30	10,03	40,33	0,11
9	15	9	0	1	0,43	0,85	0,28	15,03	43,47	0,43
10	13	10	0	1	0,43	0,75	0,25	11,72	44,75	0,16
11	3	11	2	1	0,42	0,75	0,32	10,44	36,65	0,87
12	12	12	2	1	0,43	0,80	0,27	10,44	42,31	0,30
13	10	13	2	1	0,43	0,78	0,25	10,34	34,99	1,32
14	2	14	2	1	0,43	0,80	0,28	10,03	41,69	1,00
15	4	15	2	1	0,50	0,00	0,00	10,60	23,80	-2,04
16	16	16	2	1	0,60	0,00	0,00	7,99	21,14	-6,23

Fonte: Autor.

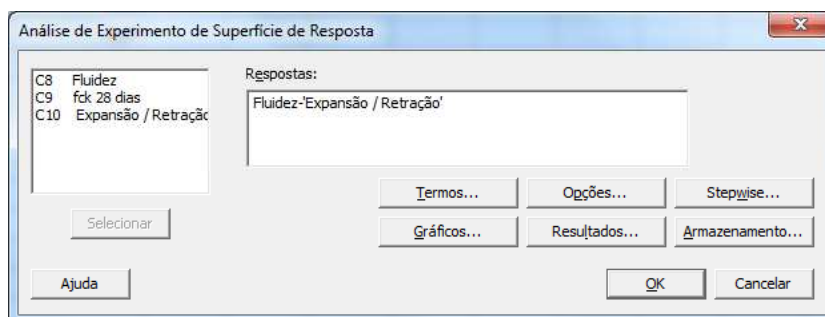
Procedeu-se, assim, para a definição da análise do experimento, como indicado na Figura B.6. Na janela para definição da análise (Figura B.7), todos os fatores foram definidos como resposta. Na opção “Termos...” selecionou-se, na lista suspensa, a opção “Linear + quadrados” (Figura B.8).

Figura B.6 – Definição da análise do experimento de superfície de resposta



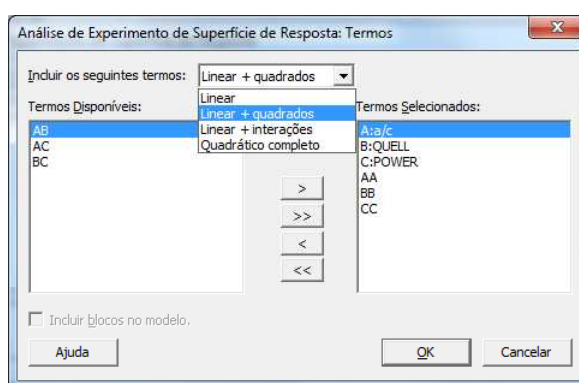
Fonte: Autor.

Figura B.7 – Janela para definição da análise do experimento



Fonte: Autor.

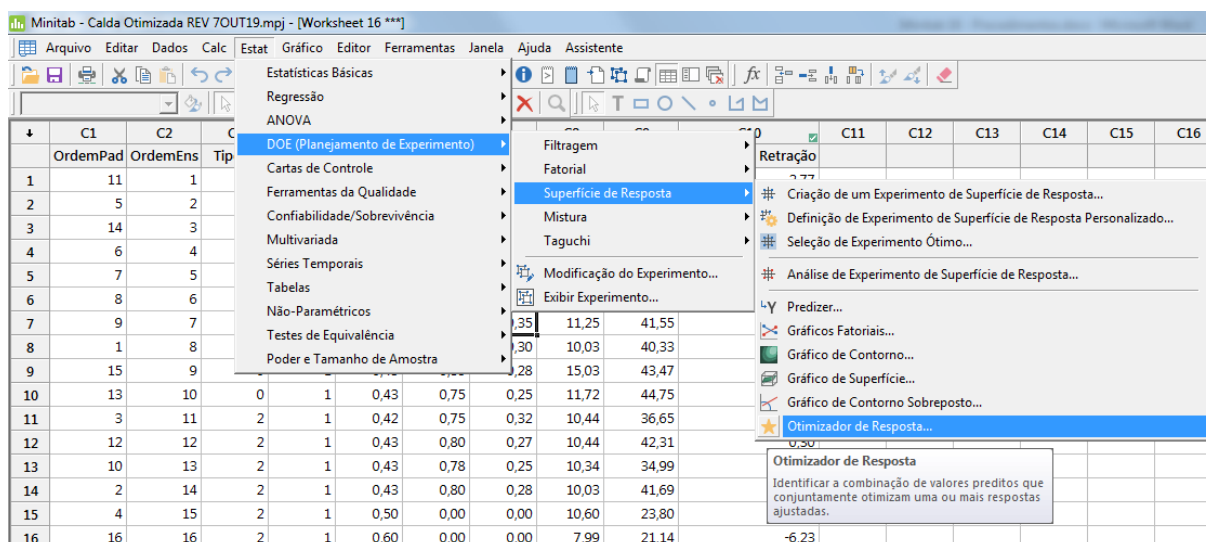
Figura B.8 – Termos da análise



Fonte: Autor.

O passo seguinte foi otimizar a resposta (Figura B.9) para atingir o traço ideal, segundo a análise do *software*, de acordo com os limites definidos nas etapas a seguir. Na janela de otimização da resposta, foram definidas as metas e alvos de cada resposta, conforme Figura B.10. Em “Configuração...” delimitaram-se os limites, alvos, pesos e importâncias de cada fator inicialmente definido, como indicado na Figura B.11.

Figura B.9 – Otimizador de resposta



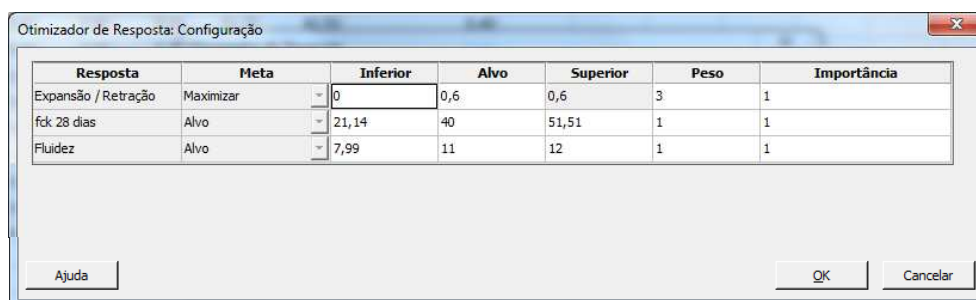
Fonte: Autor.

Figura B.10 – Janela do otimizador de resposta



Fonte: Autor.

Figura B.11 – Configurações da otimização das respostas



Fonte: Autor.

O *software* gerou o conjunto de gráficos dispostos na Figura B.12a. Analisando o conjunto, percebeu-se que na linha “Composto”, o resultado ótimo compreende a linha vermelha de cada fator no pico da curva preta. Foi observado que, para o aditivo expensor Quellmittel, havia um pico prolongado onde se podia deslocar a linha vermelha a fim de alcançar um resultado melhor, já que, para esta configuração

AMOSTRAGEM DOS TRAÇOS 1 A 16 ANALISADOS NO MINITAB 18 PARA DEFINIÇÃO DO TRAÇO DA CALDA ADITIVADA																
		QUELLMITTEL	POWERFLOW	DADOS DAS CALDAS E DO AMBIENTE				FLUIDEZ (s) / VIDA ÚTIL (min)					COMPRESSÃO AXIAL (MPa)			EXPANSÃO - RETRAÇÃO
Traço n°	a/c	%	%	ME (g/cm³)	Temp. Calda (°C)	Temp. Amb (°C)	Umid. Amb	0 min	30 min	60 min	90 min	120 min	7 dias	14 dias	28 dias	LONGITUDINAL %
1	0,40	0,50	0,50	1,92	24,80	24,40	72,00	10,40	11,32	11,66	11,84	13,78	34,84	45,96	51,51	-2,77
2	0,42	0,50	0,30	1,91	23,40	24,90	71,00	9,50	10,97	11,22	11,88	12,40	28,73	36,42	40,57	-0,03
3	0,42	0,70	0,30	1,90	23,60	23,70	65,00	9,76	10,07	10,62	11,12	12,06	28,15	38,83	44,10	+0,59
4	0,43	0,80	0,20	1,88	23,20	21,00	69,00	9,10	10,31	10,78	11,82	12,91	21,70	28,05	29,45	+1,70
5	0,43	1,00	0,25	1,86	24,20	24,70	68,00	9,97	11,57	12,47	-	-	20,84	27,75	32,45	+1,34
6	0,44	1,00	0,20	1,84	24,80	24,70	69,00	9,69	11,22	12,59	-	-	19,43	25,79	27,57	+1,40
7	0,42	0,80	0,35	1,88	22,70	22,90	66,00	10,03	10,72	11,25	11,69	11,97	27,48	31,96	41,55	+0,49
8	0,43	0,80	0,30	1,88	22,90	23,70	68,00	9,21	9,69	10,03	10,41	11,13	27,56	33,01	40,33	+0,11
9	0,43	0,85	0,28	1,88	23,90	23,30	60,00	10,59	11,38	15,03	-	-	27,83	31,13	43,47	+0,43
10	0,43	0,75	0,25	1,89	25,30	23,50	60,00	9,85	11,25	11,72	12,81	-	26,39	37,64	44,75	+0,16
11	0,42	0,75	0,32	1,87	24,10	24,30	63,00	8,95	9,66	10,44	11,17	12,99	26,60	35,24	36,65	+0,87
12	0,43	0,80	0,27	1,88	23,90	24,70	68,00	9,28	10,00	10,44	10,79	11,63	28,88	35,89	42,31	+0,30
13	0,43	0,78	0,25	1,88	22,90	23,60	66,00	9,33	9,88	10,34	11,04	13,20	27,12	33,22	34,99	+1,32
14	0,43	0,80	0,28	1,89	24,80	25,30	65,00	9,13	9,72	10,03	10,63	11,15	27,53	33,74	41,69	+1,00
15	0,50	-	-	1,78	23,80	24,20	65,00	8,91	9,93	10,60	11,27	12,72	11,04	17,10	23,80	-2,04
16	0,60	-	-	1,74	24,20	24,70	68,00	7,47	7,68	7,99	8,14	8,69	9,63	14,76	21,14	-6,23

TRAÇOS COMPLEMENTARES 17 A 20 EXECUTADOS PARA CONFIRMAÇÃO DO TRAÇO DA CALDA ADITIVADA																
		QUELLMITTEL	POWERFLOW	DADOS DAS CALDAS E DO AMBIENTE				FLUIDEZ (s) / VIDA ÚTIL (min)					COMPRESSÃO AXIAL (MPa)			EXPANSÃO - RETRAÇÃO
Traço n°	a/c	%	%	ME (g/cm³)	Temp. Calda (°C)	Temp. Amb (°C)	Umid. Amb	0 min	30 min	60 min	90 min	120 min	7 dias	14 dias	28 dias	LONGITUDINAL %
17	0,43	0,80	0,28	1,90	22,90	23,10	65,00	10,28	10,69	11,44	12,91	13,20	20,08	30,28	41,64	+1,95
18	0,43	0,78	0,27	1,89	24,50	24,90	63,00	8,62	9,37	9,90	10,63	12,95	25,12	31,69	31,99	+1,28
19	0,43	0,75	0,25	1,91	24,20	24,90	64,00	10,01	11,10	11,70	11,98	12,89	25,78	34,56	37,67	+0,88
20	0,43	0,80	0,30	1,89	23,80	24,50	65,00	8,90	9,34	10,20	10,78	11,45	27,56	32,99	39,45	+0,45

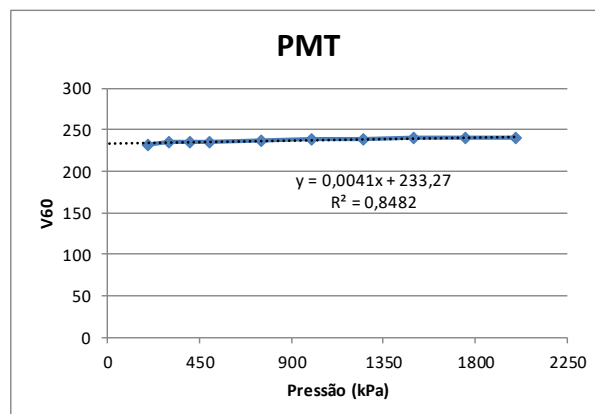
TRAÇOS EXECUTADOS PARA DEFINIÇÃO DO FATOR a/c DA CALDA CONVENCIONAL																
		QUELLMITTEL	POWERFLOW	DADOS DAS CALDAS E DO AMBIENTE				FLUIDEZ (s) / VIDA ÚTIL (min)					COMPRESSÃO AXIAL (MPa)			EXPANSÃO - RETRAÇÃO
Traço n°	a/c	%	%	ME (g/cm³)	Temp. Calda (°C)	Temp. Amb (°C)	Umid. Amb	0 min	30 min	60 min	90 min	120 min	7 dias	14 dias	28 dias	LONGITUDINAL %
15	0,50	-	-	1,78	23,80	24,20	65,00	8,91	9,93	10,60	11,27	12,72	11,04	17,10	23,80	-2,04
16	0,60	-	-	1,74	24,20	24,70	68,00	7,47	7,68	7,99	8,14	8,69	9,63	14,76	21,14	-6,23
21	0,70	-	-	1,64	24,40	26,30	65,00	6,03	6,66	6,91	6,97	7,03	10,00	14,07	17,56	-13,46

TRAÇOS EXECUTADOS NO TALUDE																
		QUELLMITTEL	POWERFLOW	DADOS DAS CALDAS E DO AMBIENTE				FLUIDEZ (s) / VIDA ÚTIL (min)					COMPRESSÃO AXIAL (MPa)			EXPANSÃO - RETRAÇÃO
Traço n°	a/c	%	%	ME (g/cm³)	Temp. Calda (°C)	Temp. Amb (°C)	Umid. Amb	0 min	30 min	60 min	90 min	120 min	7 dias	14 dias	28 dias	LONGITUDINAL %
22	0,43	0,80	0,28	-	25,80	26,30	65,00	10,31	11,12	11,20	12,00	-	20,15	25,92	32,31	+1,59
23	0,60	-	-	-	25,40	26,00	66,00	7,28	7,43	7,83	8,20	8,60	10,58	15,08	19,23	-6,76

Apêndice C – Ensaio PMT

Calibração - Curva Pressiométrica

PMT				
Pressão (kPa)	Volume (cm ³)			
	V ₁₅	V ₃₀	V ₆₀	V ₆₀ -V ₃₀
100	45	78	125	47
200	190	230	232	2
300	235	235	235	0
400	235	235	235	0
500	235	235	235	0
750	237	237	237	0
1000	239	239	239	0
1250	239	239	239	0
1500	240	240	240	0
1750	240	240	240	0
2000	240	240	240	0

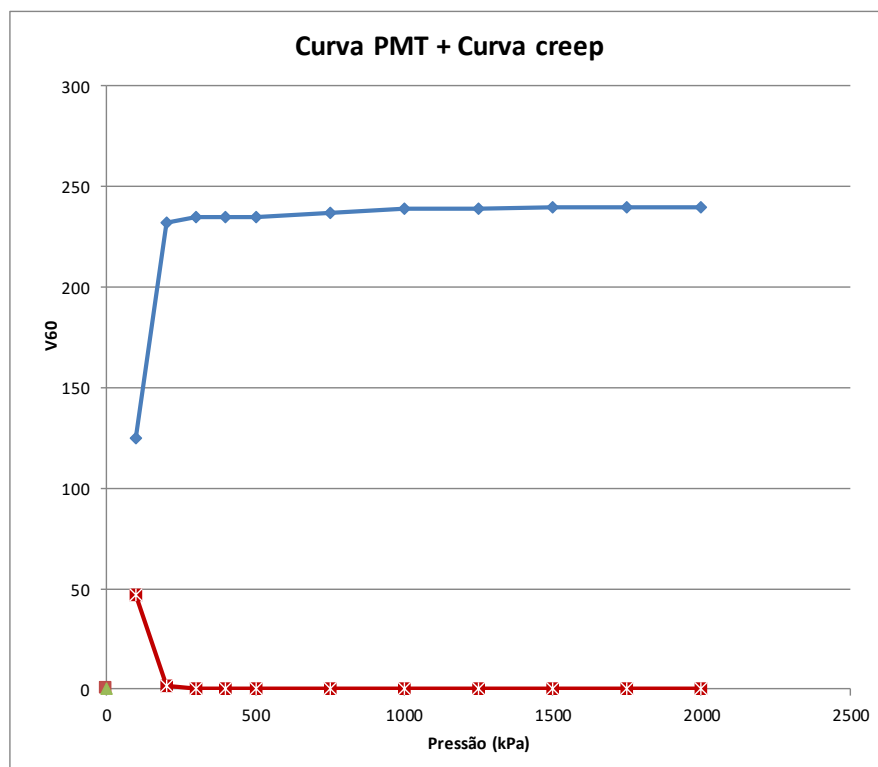


Curva Pressiométrica + Creep

Cálculos

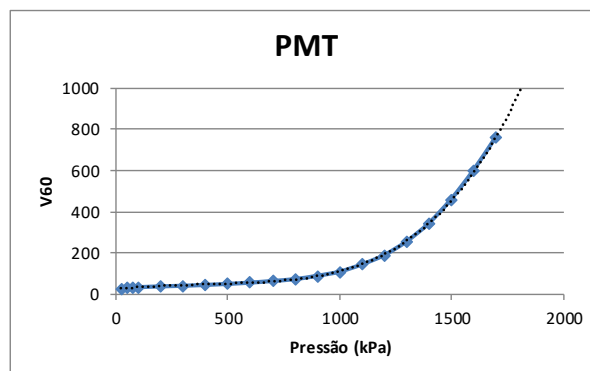
VALORES CARACTERÍSTICOS	
Volume do furo	
V ₀	0
Pressão de Campo	
P ₀	0
Volume de Fluência	
V _f	0
Pressão de Fluência	
P _f	0

MÓDULO PRESSIOMÉTRICO DE MERNARD	
μ	0,33
Em	#DIV/0!



Amostra 1 (3 metros) - Curva Pressiométrica

Pressão (kPa)	PMT			
	Volume (cm³)			
	V ₁₅	V ₃₀	V ₆₀	V _{60-V30}
25	27	27	27	0
50	30	31	31	0
75	33	33	33	0
100	35	35	35	0
200	39	39	39	0
300	42	42	42	0
400	45	46	46	0
500	50	50	51	1
600	56	56	57	1
700	62	64	65	1
800	72	73	74	1
900	85	87	90	3
1000	105	107	110	3
1100	130	137	145	8
1200	170	180	190	10
1300	222	236	256	20
1400	295	315	344	29
1500	390	417	460	43
1600	510	546	600	54
1700	665	703	760	57

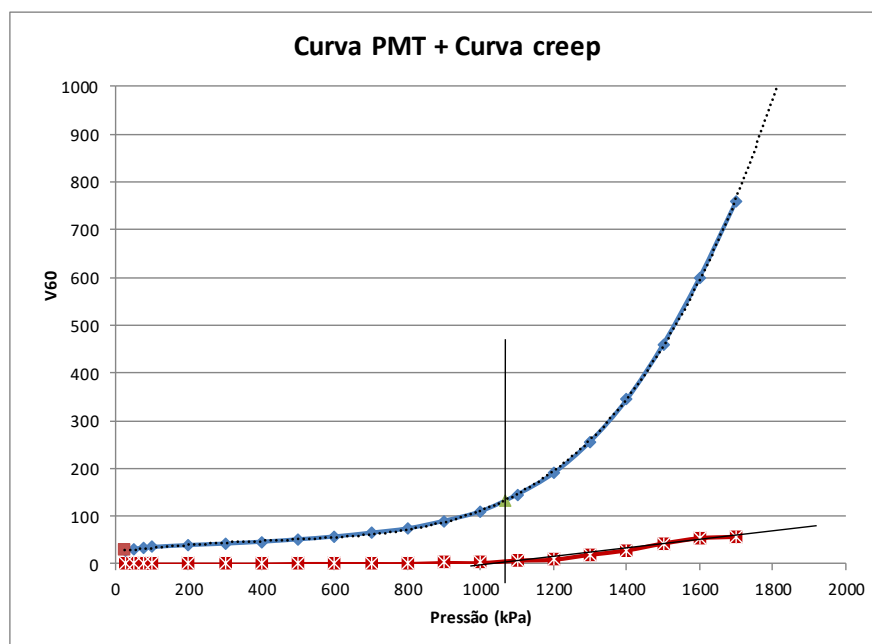


Curva Pressiométrica + Creep

Cálculos

VALORES CARACTERÍSTICOS	
Volume do furo	
V ₀	27
Pressão de Campo	
P ₀	25
Volume de Fluência	
V _f	134
Pressão de Fluência	
P _f	1066

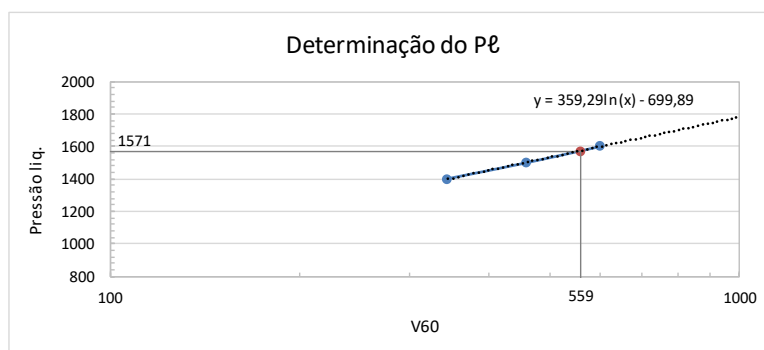
MÓDULO PRESSIOMÉTRICO DE MERNARD	
μ	0,33
E _m	15152,193



Determinação Pressão Limite

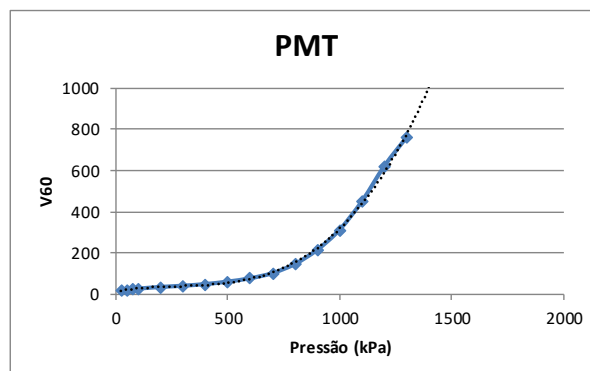
V ₆₀	Pressão liq.
344	1400
460	1500
600	1600

CÁLCULO DA PRESSÃO LIMITE	
V _s (cm³)	505
V _{s+2V₀}	559
P _{limite}	1571



Amostra 1 (4 metros) - Curva Pressiométrica

Pressão (kPa)	PMT			
	Volume (cm³)			
	V ₁₅	V ₃₀	V ₆₀	V _{60-V30}
25	18	19	19	0
50	20	21	21	0
75	23	23	24	1
100	27	27	27	0
200	35	35	35	0
300	41	41	41	0
400	47	48	49	1
500	58	60	61	1
600	74	76	77	1
700	95	100	102	2
800	130	140	146	6
900	184	200	215	15
1000	255	282	312	30
1100	366	400	450	50
1200	510	550	620	70
1300	693	740	760	
1400				
1500				
1600				
1700				

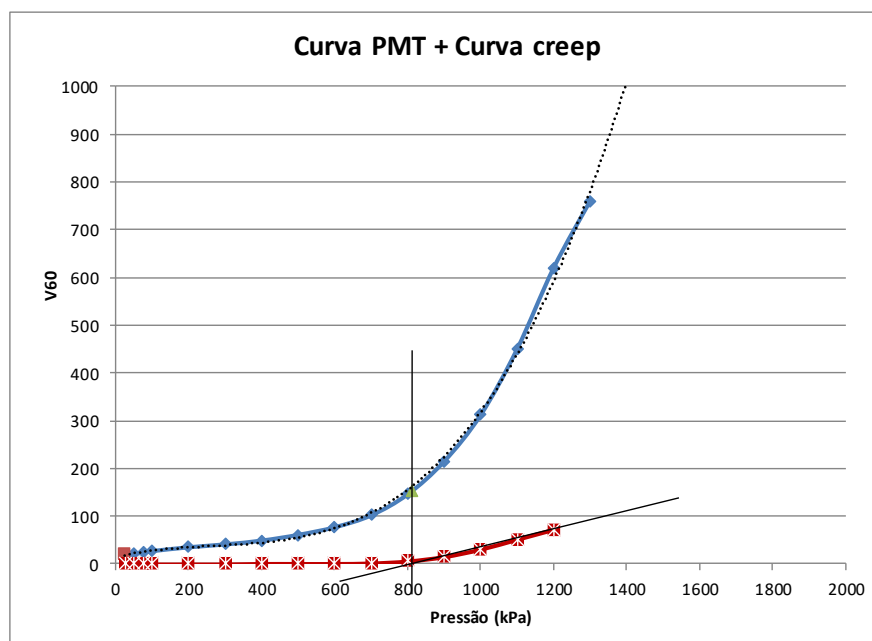


Curva Pressiométrica + Creep

Cálculos

VALORES CARACTERÍSTICOS	
Volume do furo	
V ₀	19
Pressão de Campo	
P ₀	25
Volume de Fluência	
V _f	152
Pressão de Fluência	
P _f	810

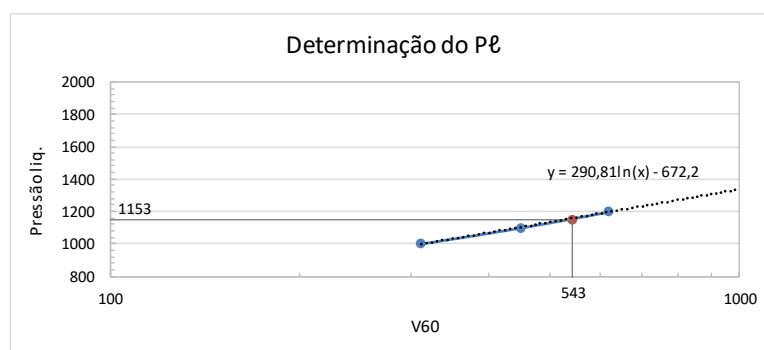
MÓDULO PRESSIOMÉTRICO DE MERNARD	
μ	0,33
E _m	9270,85



Determinação Pressão Limite

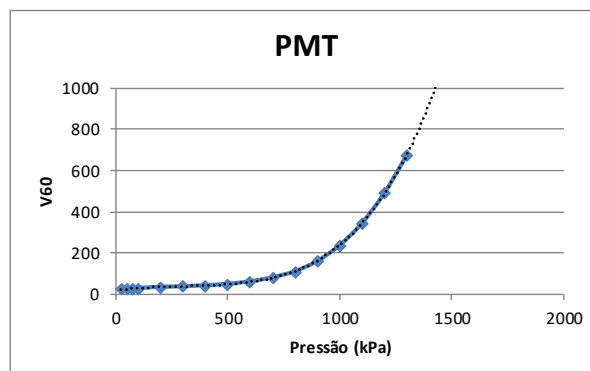
V ₆₀	Pressão liq.
312	1000
450	1100
620	1200

CÁLCULO DA PRESSÃO LIMITE	
V _s (cm³)	505
V _s +2V ₀	543
P _{limite}	1153



Amostra 1 (5 metros) - Curva Pressiométrica

Pressão (kPa)	PMT			
	Volume (cm³)			
	V ₁₅	V ₃₀	V ₆₀	V _{60-V30}
25	23	24	24	0
50	26	26	26	0
75	27	27	27	0
100	29	29	29	0
200	33	33	34	1
300	36	36	37	1
400	41	41	42	1
500	48	48	49	1
600	58	60	61	1
700	75	78	81	3
800	100	106	110	4
900	136	148	160	12
1000	196	215	237	22
1100	284	310	345	35
1200	400	435	492	57
1300	560	602	676	74
1400	750	760		
1500				
1600				
1700				

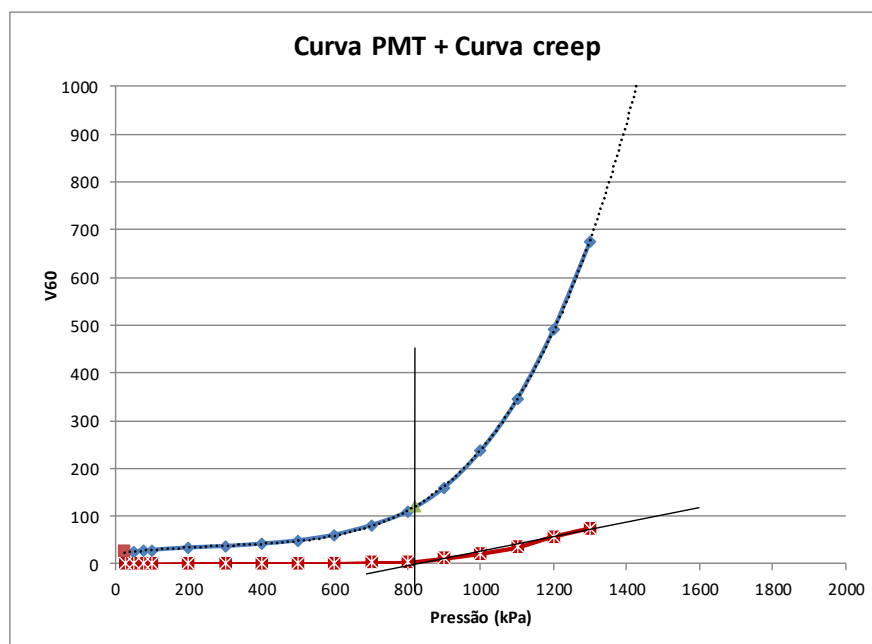


Curva Pressiométrica + Creep

Cálculos

VALORES CARACTERÍSTICOS	
Volume do furo	
V ₀	24
Pressão de Campo	
P ₀	25
Volume de Fluência	
V _f	120
Pressão de Fluência	
P _f	820

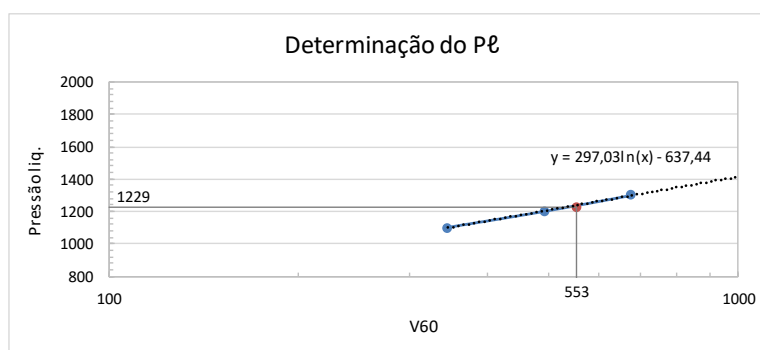
MÓDULO PRESSIOMÉTRICO DE MERNARD	
μ	0,33
Em	12710,228



Determinação Pressão Limite

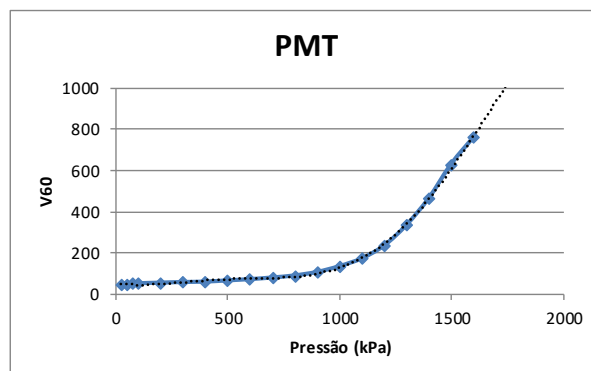
V ₆₀	Pressão liq.
345	1100
492	1200
676	1300

CÁLCULO DA PRESSÃO LIMITE	
V _s (cm³)	505
V _s +2V ₀	553
P _{limite}	1229



Amostra 2 (3 metros) - Curva Pressiométrica

Pressão (kPa)	PMT			
	Volume (cm ³)			
	V ₁₅	V ₃₀	V ₆₀	V _{60-V30}
25	38	44	45	1
50	46	47	48	1
75	49	49	50	1
100	51	52	52	0
200	55	55	55	0
300	58	58	58	0
400	60	60	60	0
500	65	65	66	1
600	72	72	72	0
700	78	79	80	1
800	88	89	90	1
900	103	105	107	2
1000	125	130	135	5
1100	155	163	173	10
1200	205	220	235	15
1300	276	300	335	35
1400	386	415	465	50
1500	525	565	630	65
1600	696	740	760	
1700				

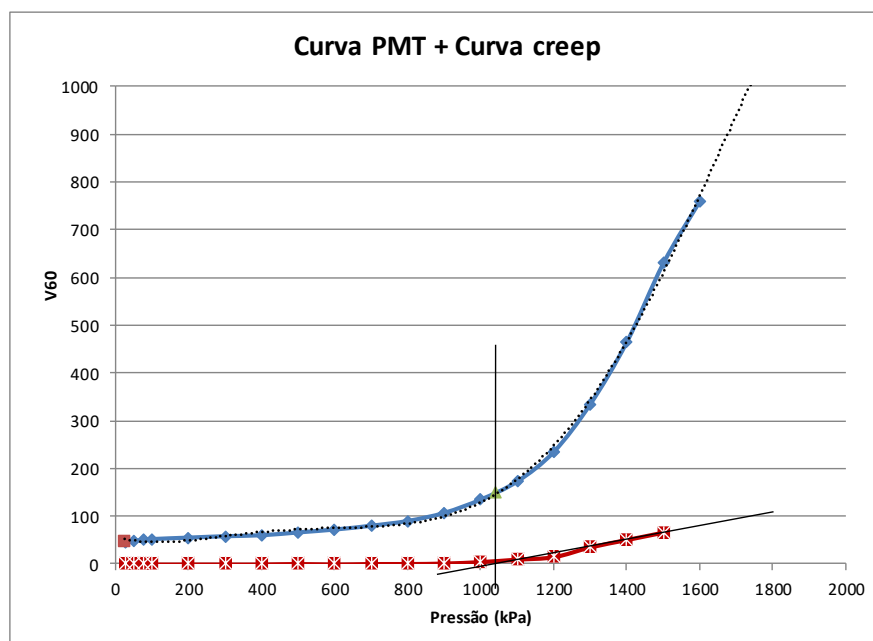


Curva Pressiométrica + Creep

Cálculos

VALORES CARACTERÍSTICOS	
Volume do furo	
V ₀	44
Pressão de Campo	
P ₀	25
Volume de Fluência	
V _f	150
Pressão de Fluência	
P _f	1040

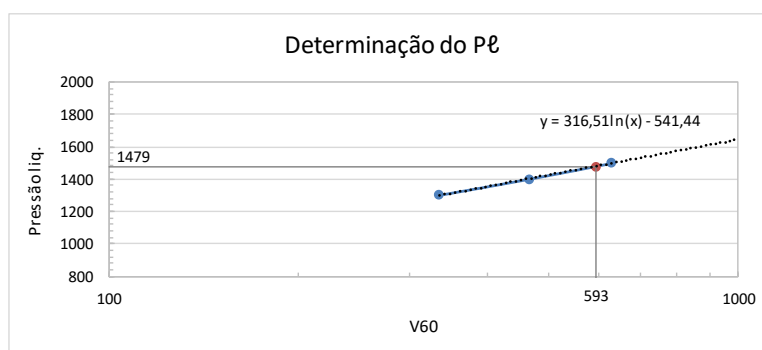
MÓDULO PRESSIOMÉTRICO DE MERNARD	
μ	0,33
E _m	15333,394



Determinação Pressão Limite

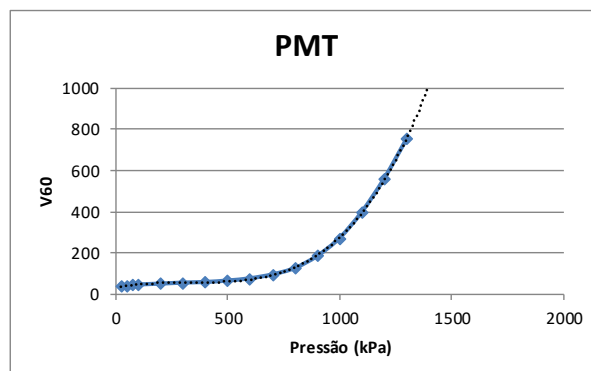
V ₆₀	Pressão liq.
335	1300
465	1400
630	1500

CÁLCULO DA PRESSÃO LIMITE	
V _s (cm ³)	505
V _{s+2V₀}	593
P _{limite}	1479



Amostra 2 (4 metros) - Curva Pressiométrica

Pressão (kPa)	PMT			
	Volume (cm³)			
	V ₁₅	V ₃₀	V ₆₀	V _{60-V30}
25	36	37	38	1
50	40	41	41	0
75	44	44	45	1
100	46	46	46	0
200	49	49	50	1
300	53	53	55	2
400	57	58	58	0
500	63	64	65	1
600	74	75	76	1
700	91	93	95	2
800	117	121	126	5
900	157	175	185	10
1000	225	245	272	27
1100	320	352	400	48
1200	460	495	562	67
1300	630	675	755	80
1400				
1500				
1600				
1700				

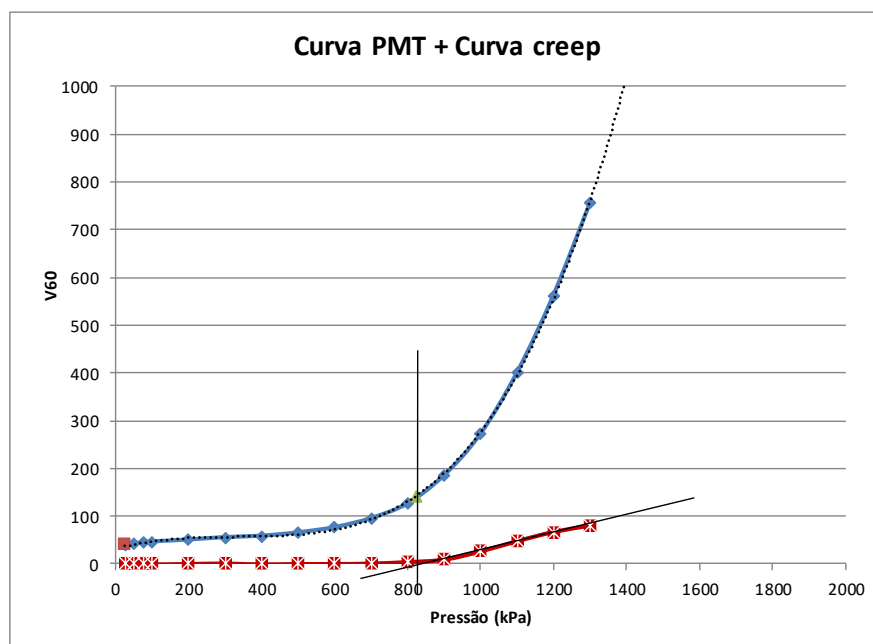


Curva Pressiométrica + Creep

Cálculos

VALORES CARACTERÍSTICOS	
Volume do furo	
V ₀	38
Pressão de Campo	
P ₀	25
Volume de Fluência	
V _f	140
Pressão de Fluência	
P _f	823

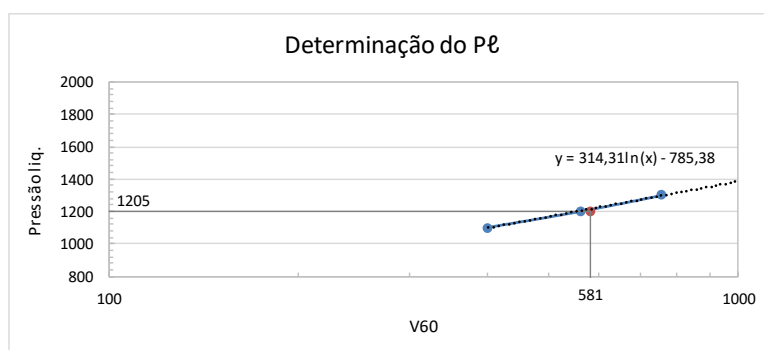
MÓDULO PRESSIOMÉTRICO DE MERNARD	
μ	0,33
E _m	12361,489



Determinação Pressão Limite

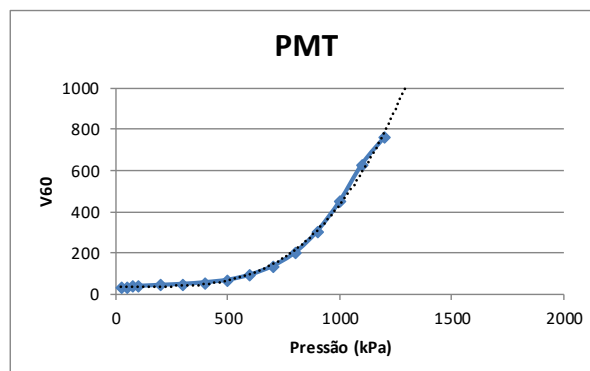
V ₆₀	Pressão liq.
400	1100
562	1200
755	1300

CÁLCULO DA PRESSÃO LIMITE	
V _s (cm³)	505
V _s +2V ₀	581
P _{limite}	1205



Amostra 2 (5 metros) - Curva Pressiométrica

Pressão (kPa)	PMT			
	Volume (cm³)			
	V ₁₅	V ₃₀	V ₆₀	V _{60-V30}
25	29	30	30	0
50	32	32	33	1
75	35	36	37	1
100	38	38	38	0
200	42	43	43	0
300	48	48	48	0
400	55	56	56	0
500	67	67	68	1
600	89	92	93	1
700	120	129	135	6
800	173	187	200	13
900	245	272	305	33
1000	360	395	450	55
1100	515	560	630	70
1200	705	745	760	
1300				
1400				
1500				
1600				
1700				

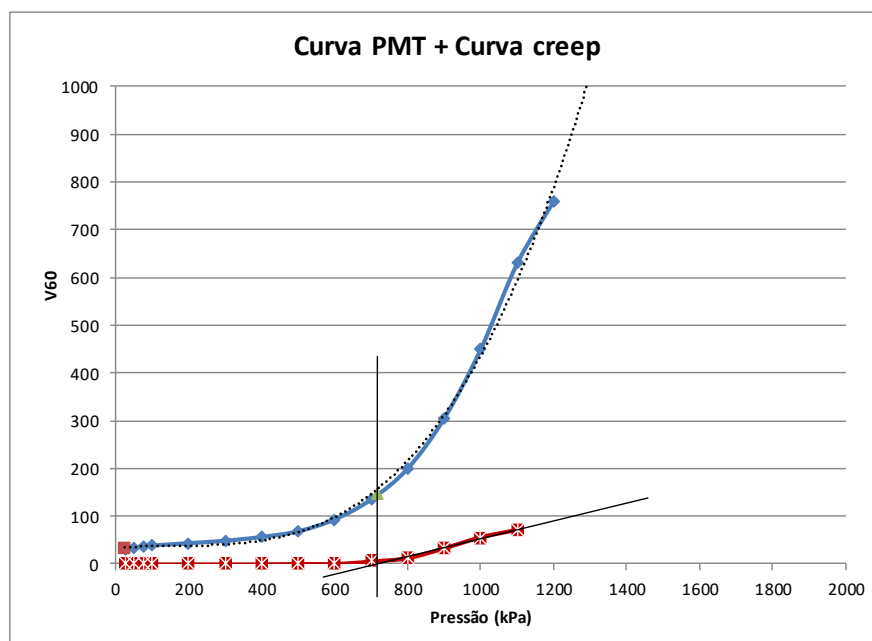


Curva Pressiométrica + Creep

Cálculos

VALORES CARACTERÍSTICOS	
Volume do furo	
V ₀	30
Pressão de Campo	
P ₀	25
Volume de Fluência	
V _f	147
Pressão de Fluência	
P _f	715

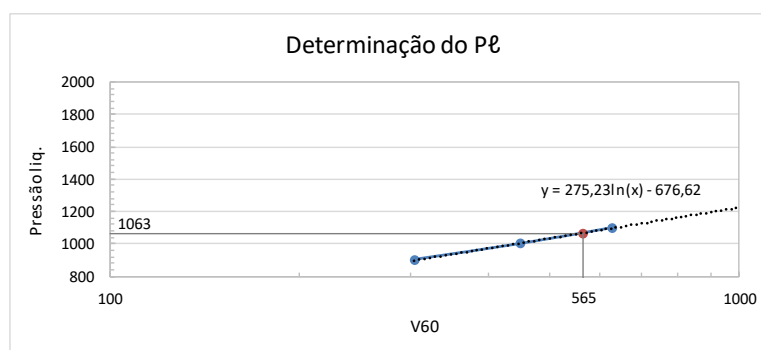
MÓDULO PRESSIOMÉTRICO DE MERNARD	
μ	0,33
E _m	9310,341



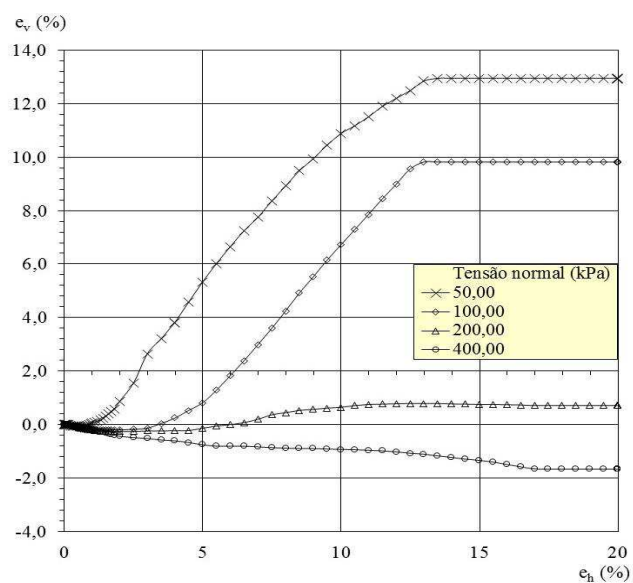
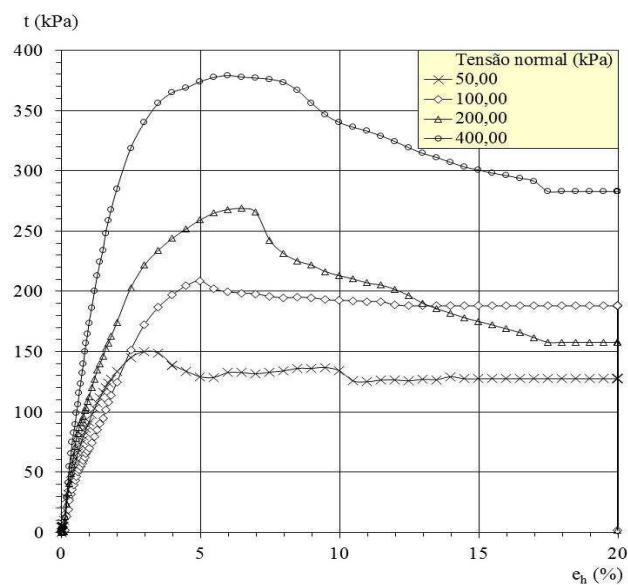
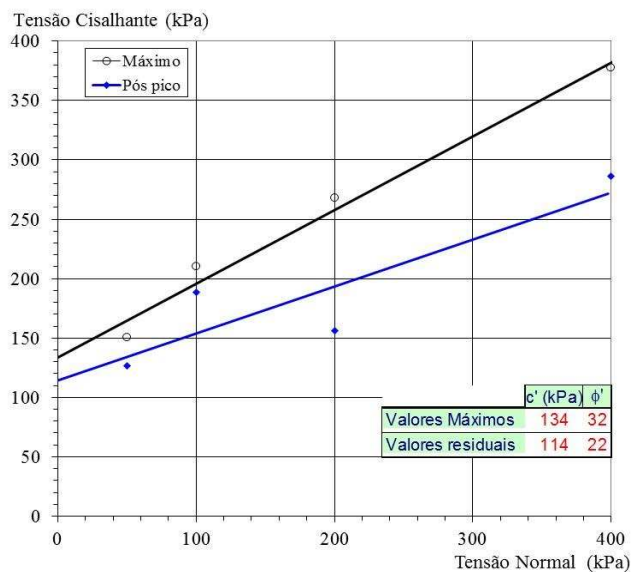
Determinação Pressão Limite

V ₆₀	Pressão liq.
305	900
450	1000
630	1100

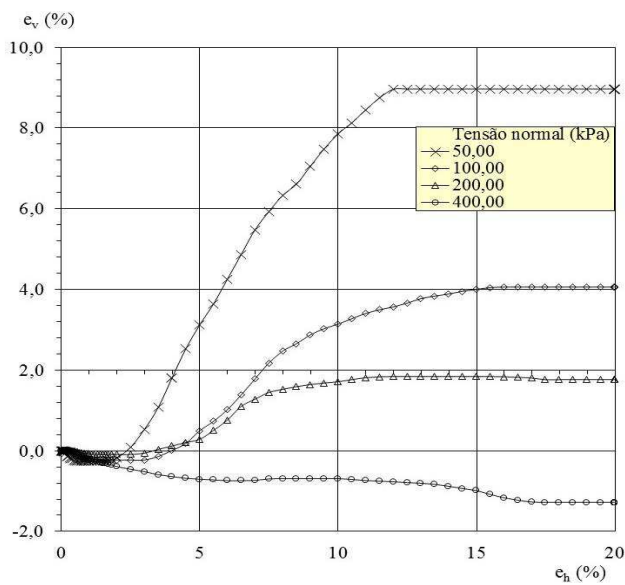
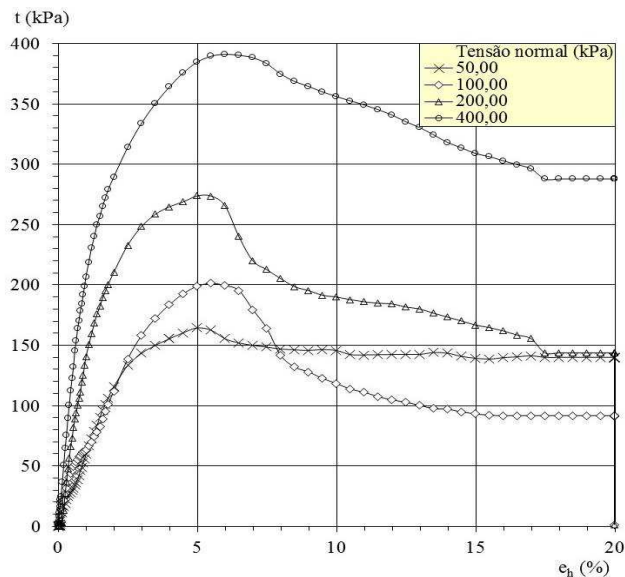
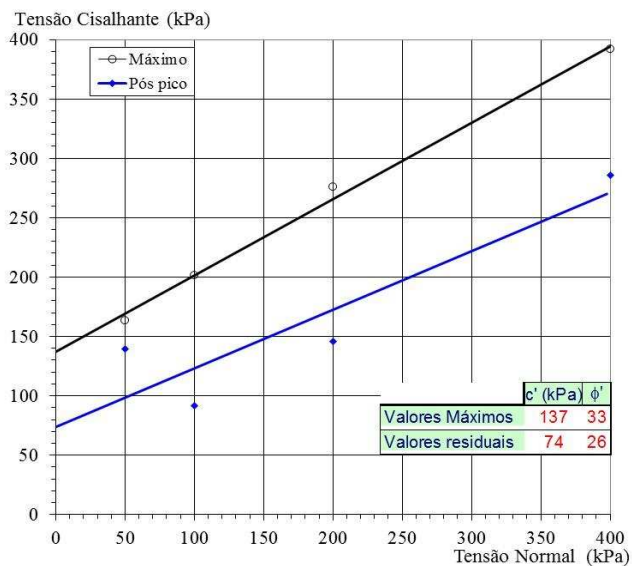
CÁLCULO DA PRESSÃO LIMITE	
V _s (cm³)	505
V _{s+2V₀}	565
P _{limite}	1063



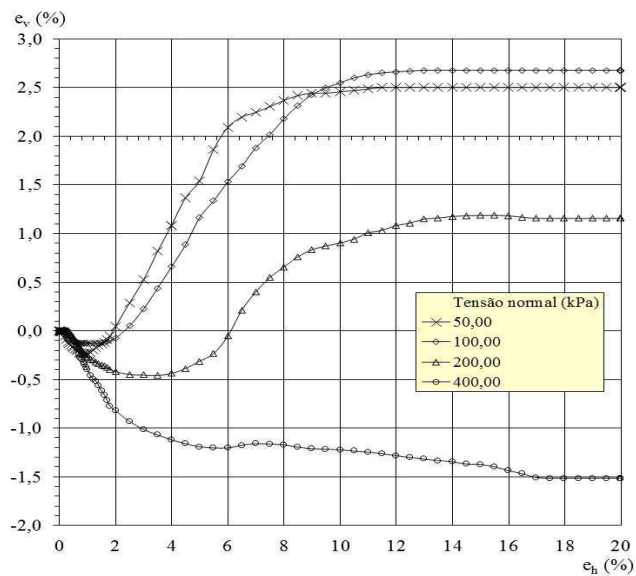
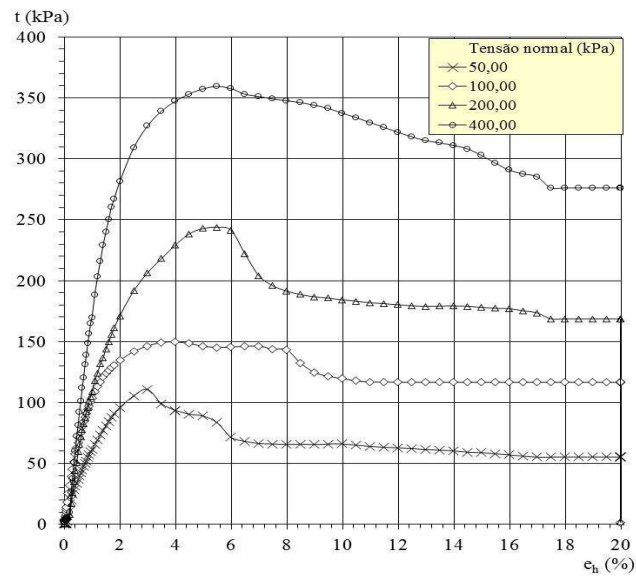
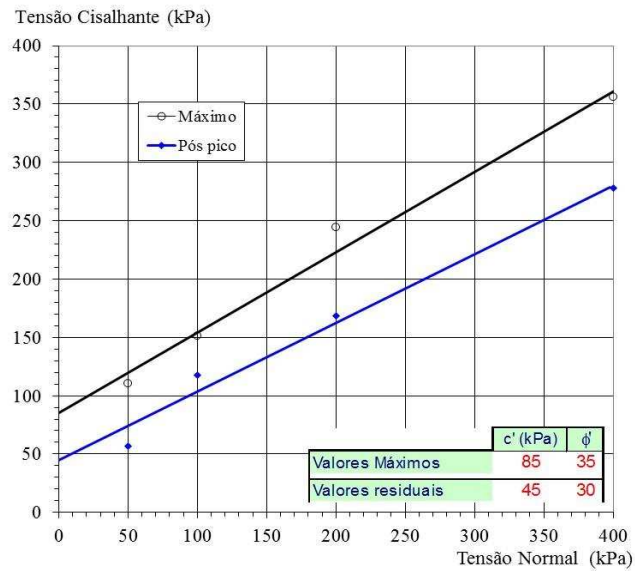
Apêndice D – Ensaio de Cisalhamento Direto: gráficos referentes à Amostra 1.



Gráficos referentes à Amostra 2.

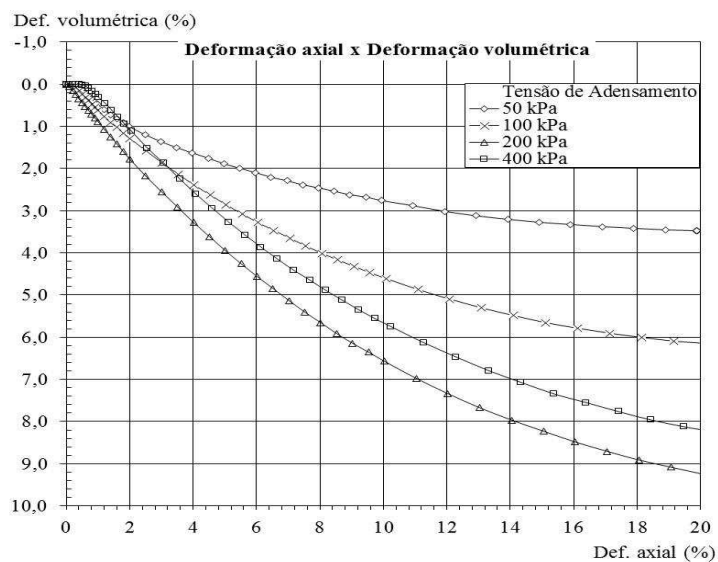
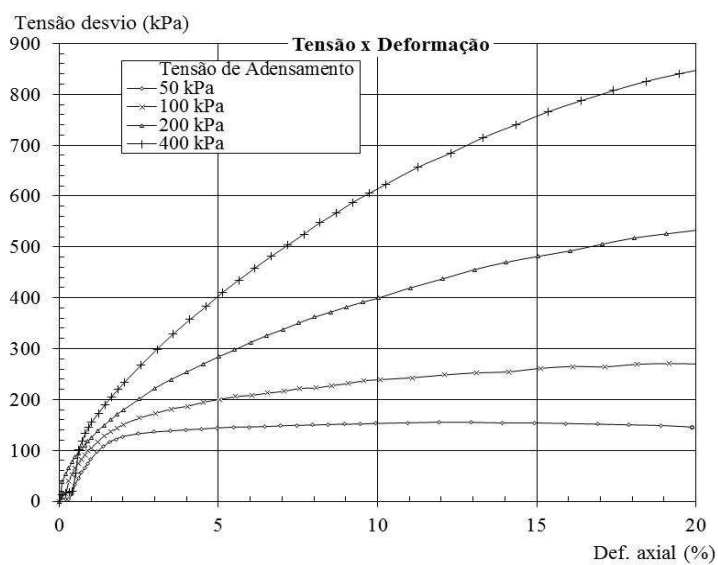
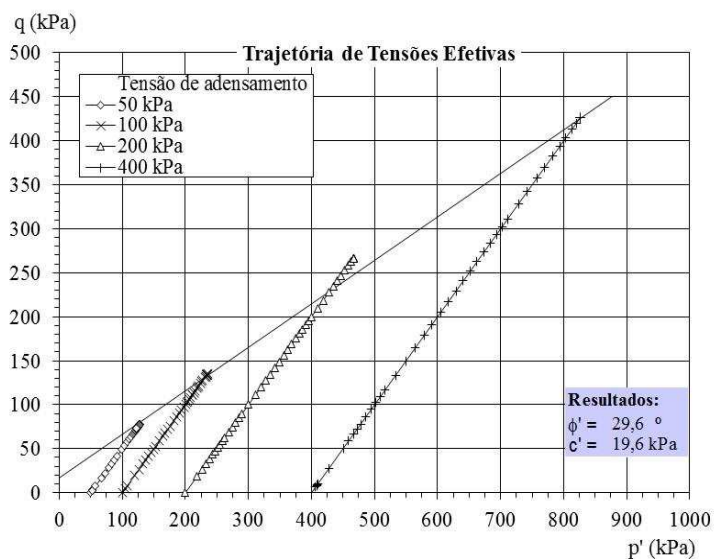


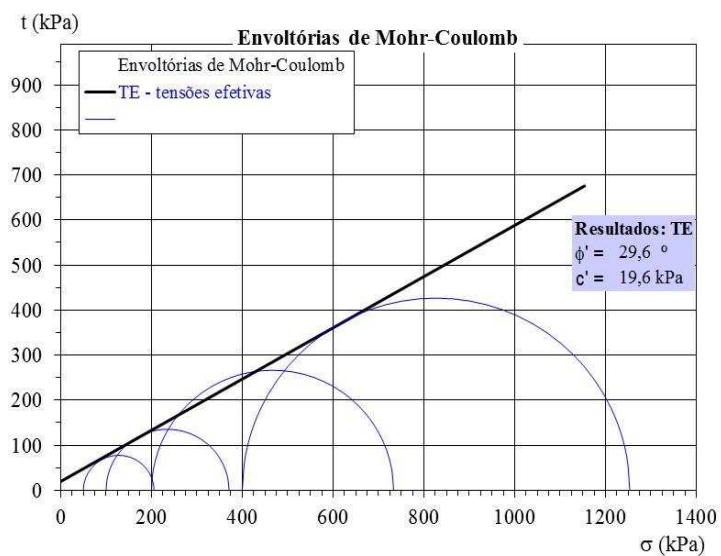
Gráficos referentes à Amostra 3.



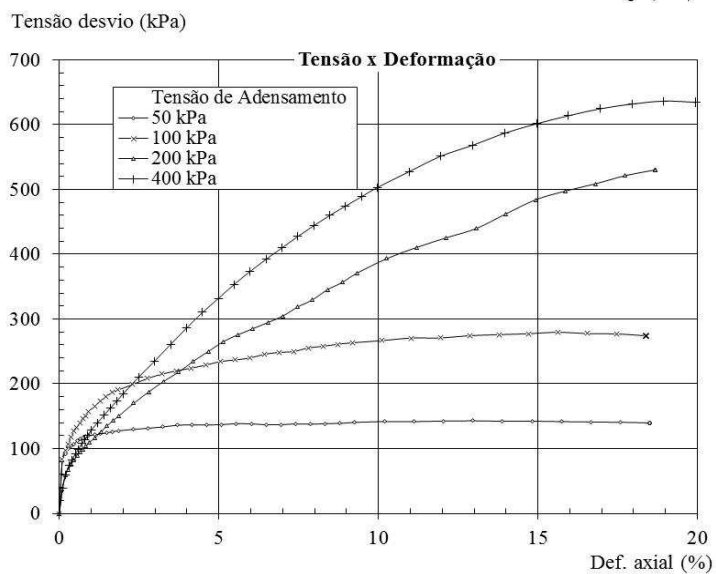
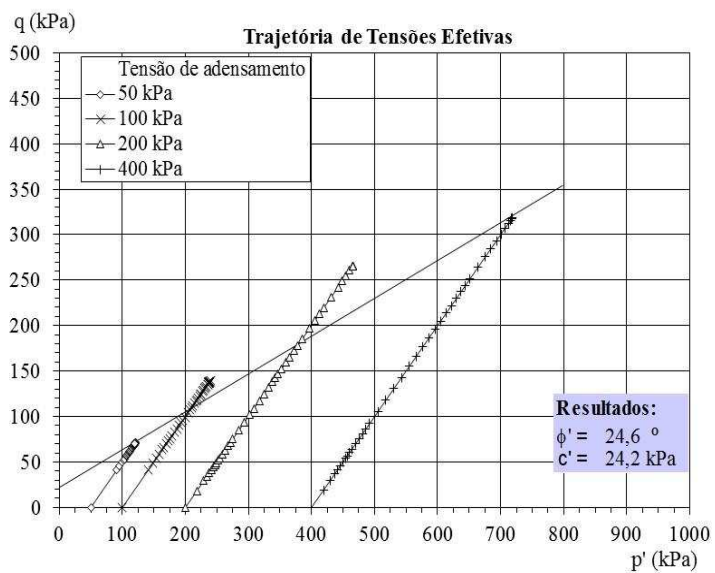
Apêndice E – Ensaio de Compressão Triaxial (Adensado Drenado)

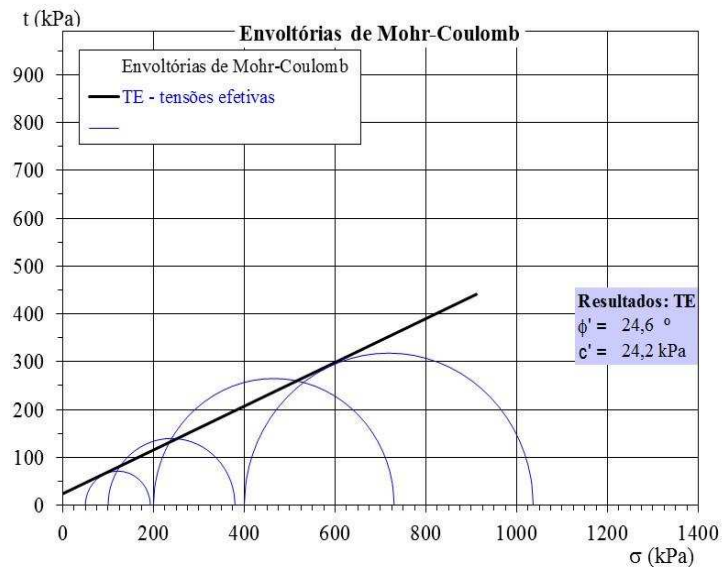
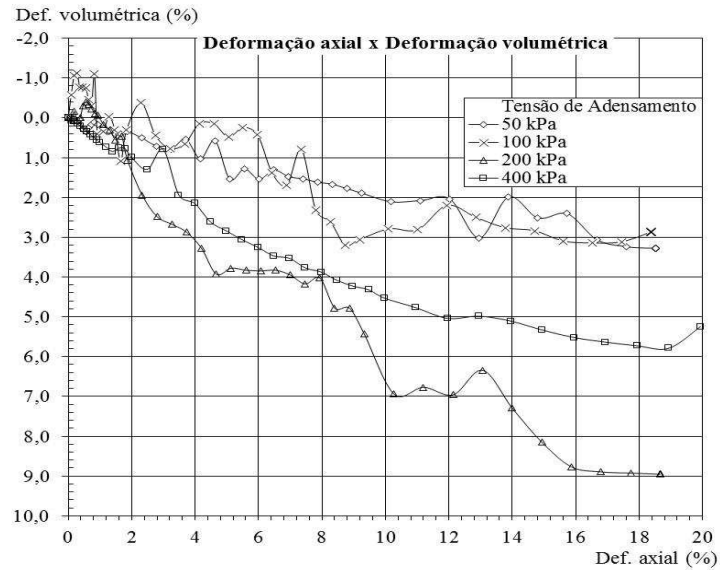
As quatro representações gráficas a seguir são referentes à Amostra 1.



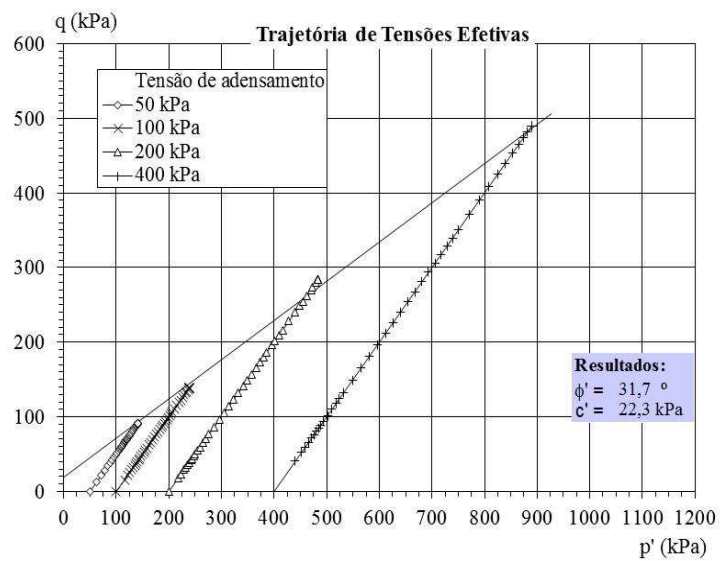


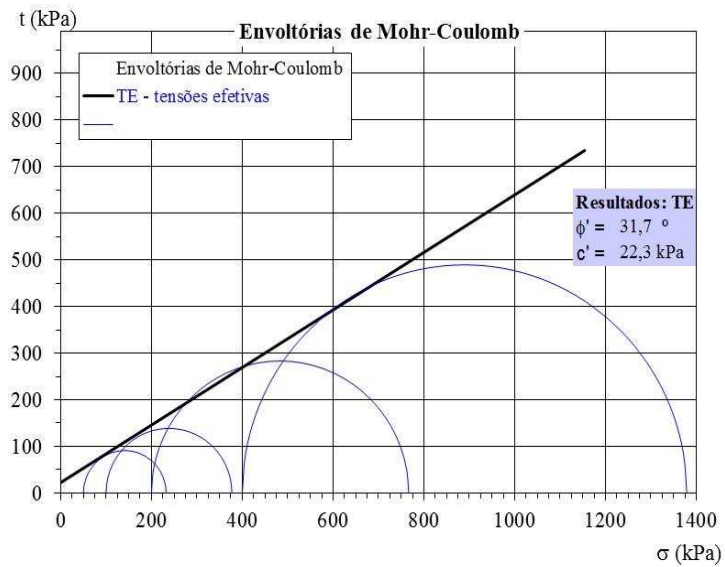
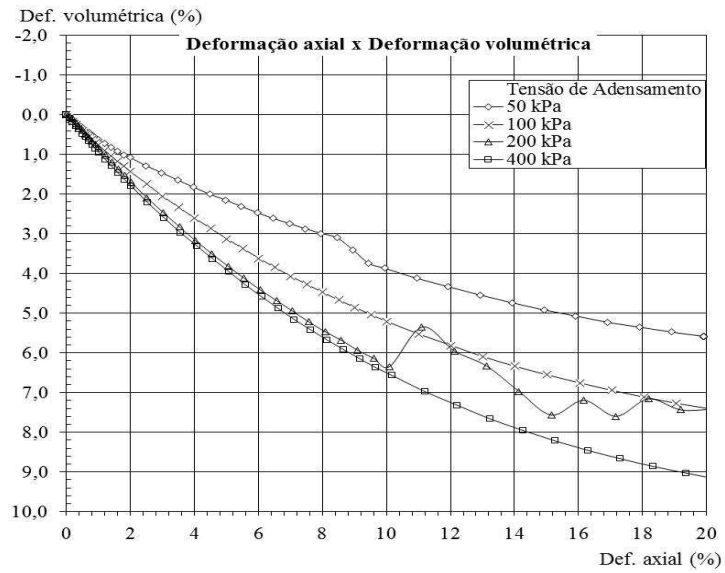
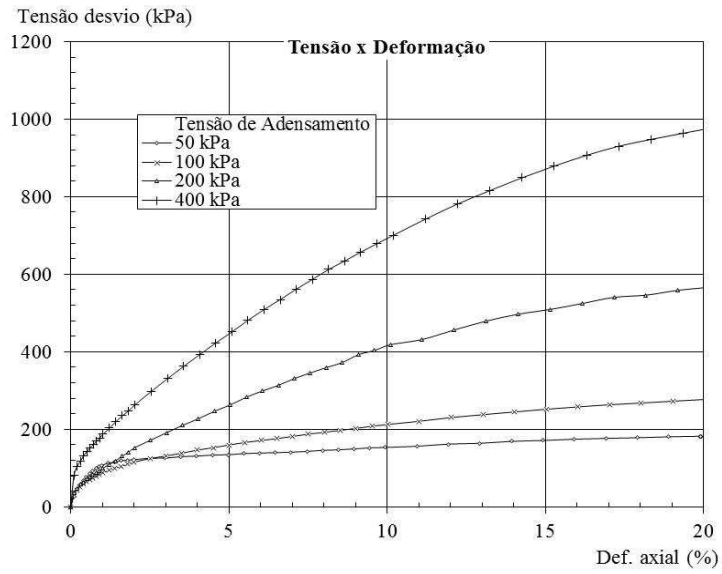
As quatro representações gráficas a seguir são referentes à Amostra 2.





As quatro representações gráficas a seguir são referentes à Amostra 3.

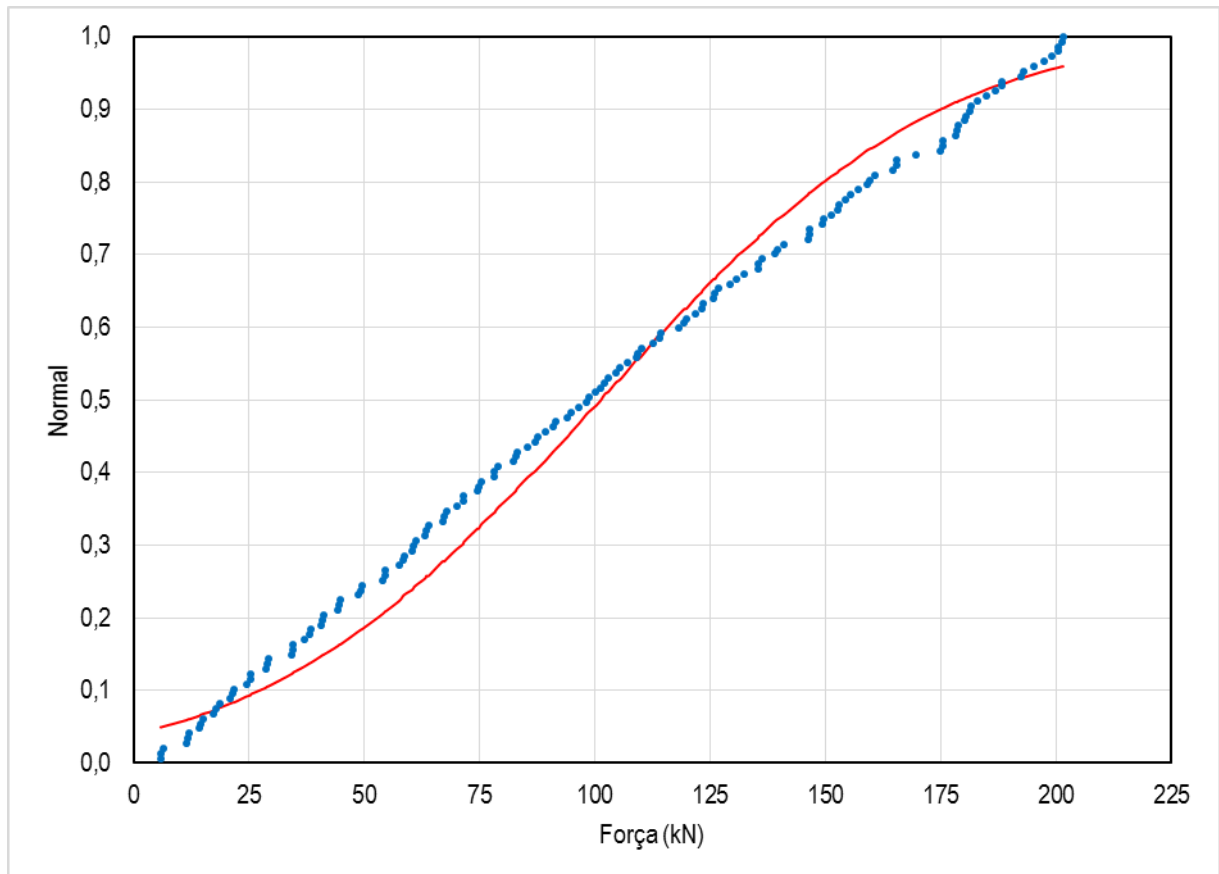




Apêndice F – Calibração do macaco e gráfico estatístico do método de Lilliefors

Ciclo (i)	P (bar)	F1 (kN)	F2 (kN)	F3 (kN)	F _{MÉD} (kN)	F _i -F _{i-1} (kN)
1	0	0	0	0	0	-
2	2,5	5,8	5,9	6,4	6,03	6,03
3	5	11,5	12,1	11,8	11,80	5,77
4	7,5	14,3	14,5	15,1	14,63	2,83
5	10	17,9	17,3	18,6	17,93	3,30
6	12	21,5	21	21,8	21,43	3,50
7	14	25,4	24,4	25,3	25,03	3,60
8	16	29,1	28,6	28,9	28,87	3,83
9	18	34,3	34,6	34,6	34,50	5,63
10	20	38,3	37,1	38,2	37,87	3,37
11	22	41	40,5	41,1	40,87	3,00
12	24	44,8	44,2	44,6	44,53	3,67
13	26	49,3	48,7	49,4	49,13	4,60
14	28	54,6	54,1	54,5	54,40	5,27
15	30	58,8	57,6	58,3	58,23	3,83
16	32	60,4	60,7	61,2	60,77	2,53
17	34	63,4	63,9	63,2	63,50	2,73
18	36	67,3	66,9	67,8	67,33	3,83
19	38	71,4	70	71,6	71,00	3,67
20	40	75,5	74,8	74,5	74,93	3,93
21	42	79	78,2	78,1	78,43	3,50
22	44	82,8	82,2	83,1	82,70	4,27
23	46	86,9	85,4	87,5	86,60	3,90
24	48	90,9	89,3	91,5	90,57	3,97
25	50	93,9	94,9	96,6	95,13	4,57
26	52	98,7	98,1	100,2	99,00	3,87
27	54	102,1	101,3	103	102,13	3,13
28	56	105,4	104,5	107	105,63	3,50
29	58	110	109	109,4	109,47	3,83
30	60	114,4	112,5	114,1	113,67	4,20
31	62	119,4	118,2	119,8	119,13	5,47
32	64	123,1	121,8	123,4	122,77	3,63
33	66	126	125,7	126,8	126,17	3,40
34	68	132,2	129,3	130,8	130,77	4,60
35	70	135,5	135,3	136,3	135,70	4,93
36	72	138,9	139,5	141	139,80	4,10
37	74	146,6	146,1	146,4	146,37	6,57
38	76	149,5	149,4	151,2	150,03	3,67
39	78	152,9	152,6	154,2	153,23	3,20
40	80	157	155,5	159	157,17	3,93
41	82	160,6	159,7	165,5	161,93	4,77
42	84	164,5	165,5	169,5	166,50	4,57
43	86	174,8	175,5	175,4	175,23	8,73
44	88	178,5	178,1	178,8	178,47	3,23
45	90	181,3	180,1	180,5	180,63	2,17
46	92	185	183	181,6	183,20	2,57
47	94	188,1	188,3	186,7	187,70	4,50
48	96	195,2	192,9	192,4	193,50	5,80
49	98	197,3	201,5	199	199,27	5,77
50	100	200,3	200,3	201,3	200,63	1,37
Valor médio do ciclo de carga						4,09

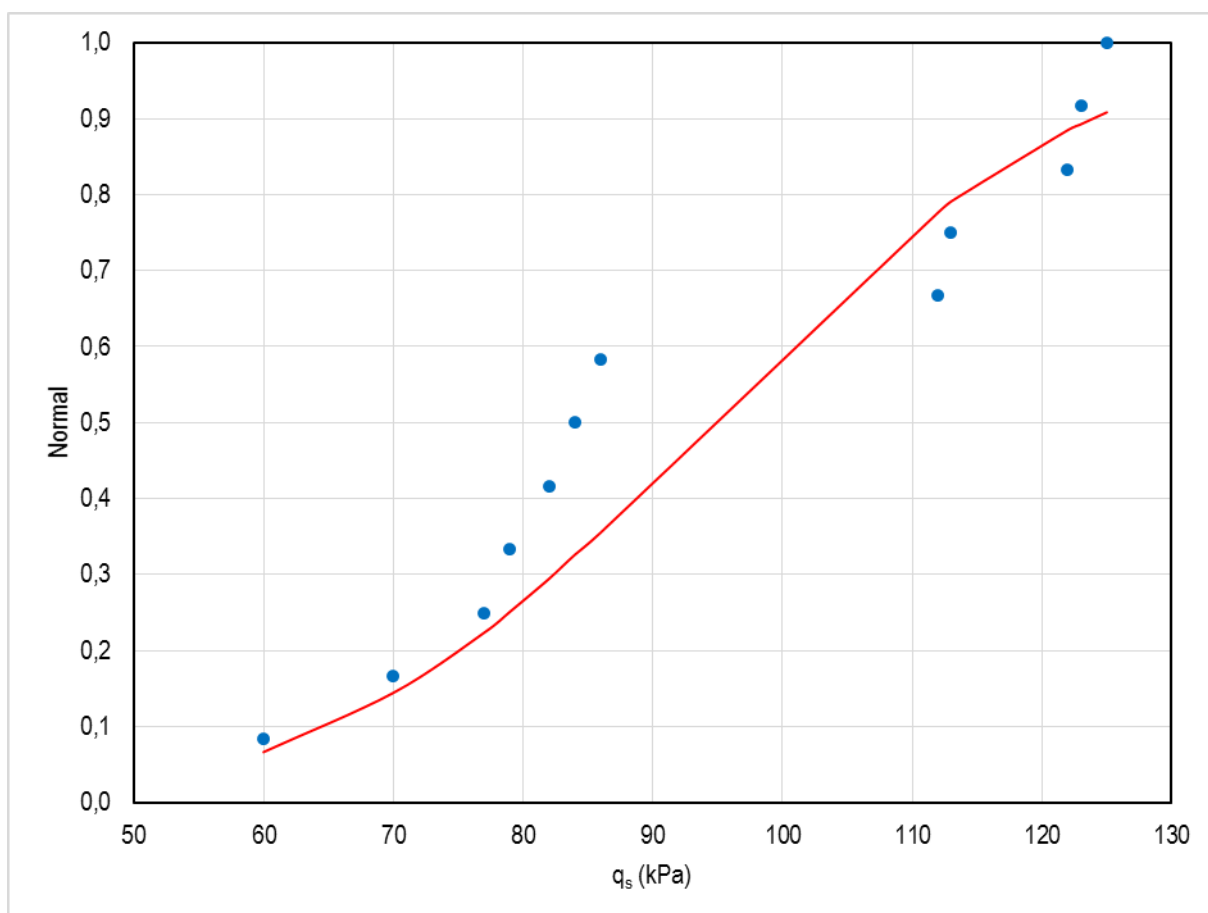
TESTE DE NORMALIDADE - MÉTODO DE LILLIEFORS				
n (amostra)	147	Máximo	0,069	Máximo < Objetivo Distribuição Normal Significância de 0,05
Média	101,11		0,05	
Desvio Padrão	57,59	Objetivo	0,073	



Apêndice G – Análises estatísticas das resistências q_s dos grampos pela metodologia de Lilliefors

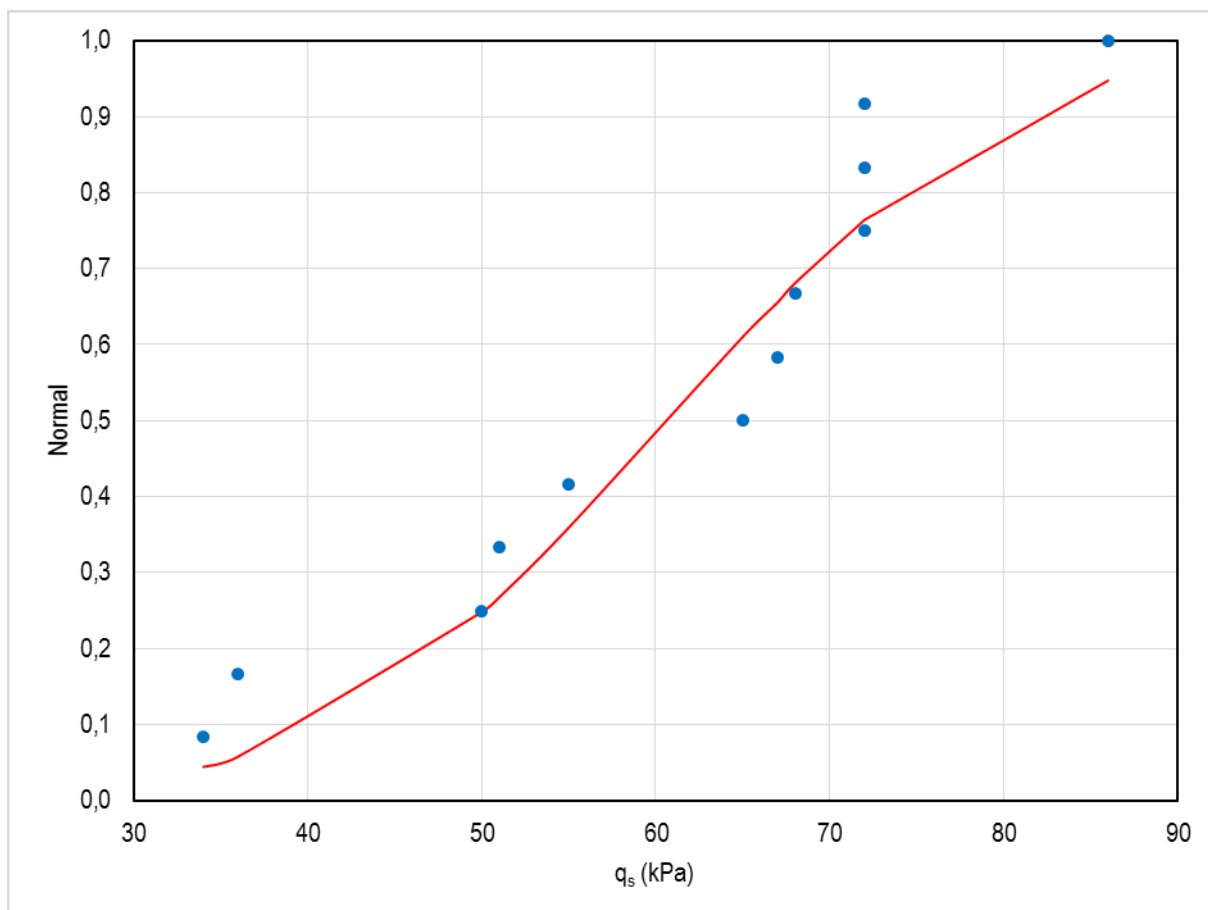
1º Estudo estatístico: critério da carga de pico (amostragem com 12 grampos).

TESTE DE NORMALIDADE - MÉTODO DE LILLIEFORS				
n (amostra)	12	Máximo	0,228	Máximo < Objetivo Distribuição Normal Significância de 0,05
Média	94,42			
Desvio Padrão	23,01	Objetivo	0,05	
			0,242	



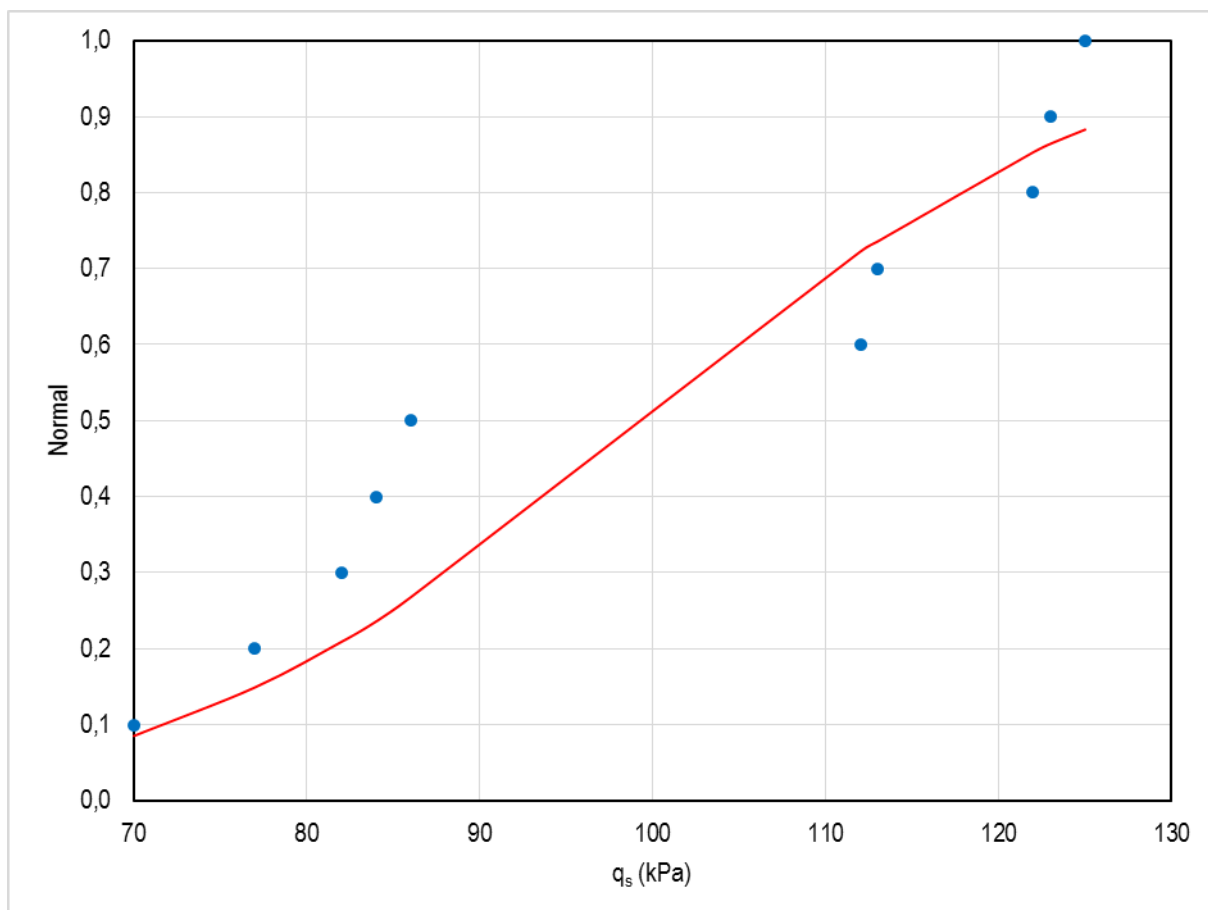
2º Estudo estatístico: critério do recalque limite (amostragem com 12 grampos).

TESTE DE NORMALIDADE - MÉTODO DE LILLIEFORS				
n (amostra)	12	Máximo	0,194	Máximo < Objetivo Distribuição Normal Significância de 0,05
Média	60,67			
Desvio Padrão	15,66	Objetivo	0,05	
			0,242	



3º Estudo estatístico: critério da carga de pico (amostragem com 10 grampos).

TESTE DE NORMALIDADE - MÉTODO DE LILLIEFORS				
n (amostra)	10	Máximo	0,232	Máximo < Objetivo Distribuição Normal Significância de 0,05
Média	99,40			
Desvio Padrão	21,48	Objetivo	0,05	
			0,258	



4º Estudo estatístico: critério do recalque limite (amostragem com 10 grampos).

TESTE DE NORMALIDADE - MÉTODO DE LILLIEFORS				
n (amostra)	10	Máximo	0,188	Máximo < Objetivo Distribuição Normal Significância de 0,05
Média	65,80			
Desvio Padrão	11,13	Objetivo	0,05	
			0,258	

