

**AUGUSTO GOMES YOSHIDA  
FELIPE BARROS KOUWEN DE MENDONÇA  
GIOVANA BEVILACQUA FROTA**

**CONDICIONANTES TÉCNICOS, ECONÔMICOS E LOGÍSTICOS DO  
PROJETO, EXECUÇÃO E MONITORAMENTO DE UMA  
CONTENÇÃO EM SOLO GRAMPEADO EM ÁREA URBANA**

Projeto de Formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo, no âmbito do Curso de  
Engenharia Civil.

São Paulo  
2014

**AUGUSTO GOMES YOSHIDA  
FELIPE BARROS KOUWEN DE MENDONÇA  
GIOVANA BEVILACQUA FROTA**

**CONDICIONANTES TÉCNICOS, ECONÔMICOS E LOGÍSTICOS DO  
PROJETO, EXECUÇÃO E MONITORAMENTO DE UMA  
CONTENÇÃO EM SOLO GRAMPEADO EM ÁREA URBANA**

Projeto de Formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo, no âmbito do Curso de  
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Waldemar Coelho  
Hachich

Coorientador: Eng. Ms. Eugenio Pabst  
Vieira da Cunha

Coorientador: Geol. Cairbar Azzi Pitta

São Paulo

2014



**Yoshida, Augusto Gomes**

**Condicionantes técnicos, econômicos e logísticos do projeto, execução e monitoramento de uma contenção em solo grampeado em área urbana / A.G. Yoshida, F.B.K. de Mendonça, G.B. Frota. -- São Paulo, 2014.**

**233 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.**

**1.Geotecnia 2.Ensaio de cisalhamento 3.Estabilização do solo I.Mendonça, Felipe Barros Kouwen de II.Frota, Giovana Bevilacqua III.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica IV.t.**

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos às contribuições daqueles, sem as quais esse trabalho não seria possível,

da Escola Politécnica, USP: ao orientador Prof. Waldemar Hachich e ao Prof. Paulo Neme;

da Interact: ao coorientador Eng. Eugenio Cunha e ao Eng. Danilo França;

da Solotrat: ao coorientador Geól. Cairbar Pitta, ao Supervisor de obras Ademar Peruchi, aos Engs. Alberto Zirlis e Mateus Dechen, à Tecg<sup>a</sup> Sheila Henn, ao Encarregado Francisco dos Santos e a toda equipe envolvida;

da Ribeiro Caram: ao Eng. Thiago Gonçalves, ao Mestre de obras Valmir, à Tecg<sup>a</sup> Ziria Corado, ao estagiário Augusto e a toda equipe envolvida.

## RESUMO

O trabalho faz um apanhado da literatura sobre solo grampeado com ênfase na aplicabilidade técnica em contenções de obras urbanas em todas suas fases, da concepção à operação e relatou detalhadamente a execução de uma contenção em solo grampeado instrumentada para um edifício em São Paulo com três subsolos em seus aspectos técnicos, econômicos e logísticos. Acompanharam-se os ensaios de arrancamento e os relatórios de medição de deslocamentos. Adicionalmente, estudou-se como hipóteses de cálculo alteram o fator de segurança da estabilidade global do maciço de solo e investigou-se o solo por meio de ensaios de caracterização física e de classificação.

Palavras-chave: solo grampeado; área urbana; ensaio de arrancamento; instrumentação; estabilidade global.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 9.1.1 - Evolução da tração nos grampos ao longo das fases de escavação. (Clouterre, 1991)....                                                                                                                        | 8  |
| Figura 9.1.2 - Mobilização da tração com os deslocamentos. (Clouterre, 1991).....                                                                                                                                           | 9  |
| Figura 9.1.3 - Influência da orientação dos grampos (Clouterre, 1991) .....                                                                                                                                                 | 10 |
| Figura 9.2.1 - deslocamentos de um muro de solo grampeado (Clouterre, 1991).....                                                                                                                                            | 11 |
| Figura 9.3.1 - Modos de ruptura (FHWA, 2003).....                                                                                                                                                                           | 12 |
| Figura 10.3.1 - Hastes individuais ancoradas (Zirlis e Pitta, 1992) .....                                                                                                                                                   | 15 |
| Figura 10.3.2 - Detalhe de inclinômetro .....                                                                                                                                                                               | 16 |
| Figura 10.3.3 - Processo de medição usando inclinômetro .....                                                                                                                                                               | 16 |
| Figura 10.3.4 - Estação total.....                                                                                                                                                                                          | 17 |
| Figura 10.4.1 - Montagem do equipamento para o ensaio de arrancamento (FHWA, 2003).....                                                                                                                                     | 19 |
| Figura 11.3.1 - Modelo do método Alemão (Stocker et al., 1979 apud Clouterre, 1991) .....                                                                                                                                   | 23 |
| Figura 11.4.1 - Modelo do Método de Davis (Shen, 1978 apud Clouterre, 1991) .....                                                                                                                                           | 25 |
| Figura 11.5.1 - (a) Modelo e (b) ábacos do Método de Juran (1990) em Clouterre (1991).....                                                                                                                                  | 27 |
| Figura 11.6.1 - Diagrama Multicritério (Schlosser, 1982 apud Clouterre, 1991) .....                                                                                                                                         | 29 |
| Figura 13.1 - Planta geral do projeto da contenção.....                                                                                                                                                                     | 33 |
| Figura 13.2 - Detalhes típicos dos cavaletes .....                                                                                                                                                                          | 35 |
| Figura 13.3 - (a) e (b) Pilares recém-concretados .....                                                                                                                                                                     | 35 |
| Figura 13.4 - Elevação 8 do projeto.....                                                                                                                                                                                    | 36 |
| Figura 13.5 - Elevação 14 do projeto.....                                                                                                                                                                                   | 37 |
| Figura 13.6 - Elevações 10 e 11 .....                                                                                                                                                                                       | 38 |
| Figura 13.7 - Elevação 12 .....                                                                                                                                                                                             | 38 |
| Figura 13.8 - Elevação 9.....                                                                                                                                                                                               | 39 |
| Figura 13.9 - Alterações no grampeamento .....                                                                                                                                                                              | 40 |
| Figura 13.10 - Alteração da viga baldrame .....                                                                                                                                                                             | 41 |
| Figura 13.11 - Região em que os cavaletes foram retirados.....                                                                                                                                                              | 41 |
| Figura 14.1 - Vista do fundo do canteiro (11/04/14). .....                                                                                                                                                                  | 42 |
| Figura 14.2 - Detalhe da ligação entre cavaletes, a viga baldrame existente e a viga de coroamento. ....                                                                                                                    | 43 |
| Figura 14.3 - Localização dos cavaletes.....                                                                                                                                                                                | 44 |
| Figura 14.4 - Vista do fundo do terreno, com detalhe dos muros das casas vizinhas (09/04/14).....                                                                                                                           | 44 |
| Figura 14.5 - Detalhe do muro da casa localizada próxima ao fundo do terreno. Região em que o muro de divisa possui maior altura, como pode ser visualizado na figura anterior (09/04/14). .....                            | 45 |
| Figura 14.6 - Foto do terreno, em que é possível visualizar o prédio residencial vizinho (Torre Ipê – Condomínio Vergê Perdizes), localizado ao fundo (11/04/14). .....                                                     | 45 |
| Figura 14.7 - Foto da lateral do terreno, em que é possível visualizar parte do prédio residencial vizinho (Torre Figueira – Condomínio Vergê Perdizes), localizado na lateral do terreno oposta às casas (30/04/14). ..... | 46 |
| Figura 14.8 - Detalhe da contenção dos prédios vizinhos (11/04/14). .....                                                                                                                                                   | 46 |
| Figura 14.9 - Detalhe da localização dos inclinômetros (círculos azuis). .....                                                                                                                                              | 48 |
| Figura 14.10 - Detalhe da localização dos pinos de recalque (círculos vermelhos).....                                                                                                                                       | 48 |
| Figura 14.11 - Instalação de inclinômetro (11/04/14). .....                                                                                                                                                                 | 49 |
| Figura 14.12 - Detalhe das telas já entregues no canteiro (09/04/14). .....                                                                                                                                                 | 50 |

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 14.13 - Detalhes das telas já entregues no canteiro e andaimes (vermelhos), dispostos atrás das telas (11/04/14).   | 50 |
| Figura 14.14 - Execução dos cavaletes (11/04/14).                                                                          | 51 |
| Figura 14.15 - Detalhe do local de execução dos cavaletes. (11/04/14)                                                      | 51 |
| Figura 14.16 - Detalhe 1 da fenda no muro das casas (11/04/14)                                                             | 52 |
| Figura 14.17 - Detalhe 2 da fenda no muro das casas (11/04/14)                                                             | 52 |
| Figura 14.18 - Cavaletes concluídos (16/04/14).                                                                            | 53 |
| Figura 14.19 - Complementação dos furos com calda de cimento após injeções (16/04/14).                                     | 53 |
| Figura 14.20 - Ajuste da bomba de injeção (16/04/14).                                                                      | 54 |
| Figura 14.21 - Controle do volume de calda de cimento (16/04/14).                                                          | 54 |
| Figura 14.22 - Execução concreto projetado (23/04/14).                                                                     | 55 |
| Figura 14.23 - Execução concreto projetado (23/04/14).                                                                     | 55 |
| Figura 14.24 - Primeira linha de grampos do fundo da contenção (25/04/14).                                                 | 56 |
| Figura 14.25 - Perfuratriz do segundo inclinômetro posicionada na entrada do terreno (23/04/14).                           | 57 |
| Figura 14.26 - Muro de divisa das casas, com detalhe da parte do muro retirada (25/04/14).                                 | 57 |
| Figura 14.27 - Detalhe da execução dos pilares (25/04/14).                                                                 | 58 |
| Figura 14.28 - Detalhe concretagem pilar (25/04/14).                                                                       | 58 |
| Figura 14.29 - Cavaletes do local de remoção do muro (30/04/14).                                                           | 59 |
| Figura 14.30 - Local da remoção do muro (30/04/14).                                                                        | 59 |
| Figura 14.31 - Vista geral do canteiro. (30/04/14)                                                                         | 60 |
| Figura 14.32 - Detalhe do fim da viga baldrame (30/06/14).                                                                 | 61 |
| Figura 14.33 - Vista dos pilares concluídos e da locação dos pontos da parede de contenção (30/04/14).                     | 61 |
| Figura 14.34 - Furo Preenchido com calda de cimento (07/05/14).                                                            | 62 |
| Figura 14.35 - Linha de grampos (07/05/14).                                                                                | 63 |
| Figura 14.36 - Perfuração de grampo. (07/05/14)                                                                            | 63 |
| Figura 14.37 - Detalhe da solução da viga (09/05/14).                                                                      | 64 |
| Figura 14.38 - Detalhe do piso elevado da casa vizinha (07/05/14).                                                         | 64 |
| Figura 14.39 - Detalhe da proteção da colocação das ripas (09/05/14).                                                      | 65 |
| Figura 14.40 - Acabamento do paramento (14/05/14).                                                                         | 66 |
| Figura 14.41 - Linhas de furos dos grampos. (14/05/14).                                                                    | 66 |
| Figura 14.42 - Detalhe furo em escavação alternada (14/05/14).                                                             | 67 |
| Figura 14.43 - Vista geral escavação alternada (16/05/14).                                                                 | 67 |
| Figura 14.44 - Detalhe entrada do terreno sem o muro e já na cota do térreo (16/05/14).                                    | 68 |
| Figura 14.45 - Execução de grampo (21/05/14).                                                                              | 69 |
| Figura 14.46 - Solo grampeado até a cota do térreo 101,14 (21/05/14).                                                      | 69 |
| Figura 14.47 - Execução do acabamento em concreto projetado (23/05/14).                                                    | 70 |
| Figura 14.48 - "Alisamento" do paramento (23/05/14).                                                                       | 70 |
| Figura 14.49 - Topo do inclinômetro após corte de uma parte de seu tubo (21/05/14).                                        | 71 |
| Figura 14.50 - Perfuração grampo vertical (28/05/14).                                                                      | 72 |
| Figura 14.51 - Linha de grampos verticais (30/05/14).                                                                      | 72 |
| Figura 14.52 - Preenchimento grampo horizontal (28/05/14).                                                                 | 73 |
| Figura 14.53 - Perfuração de grampo vertical. Pode-se visualizar o caminho feito para a água correr até a vala (30/05/14). | 74 |

|                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 14.54 - Detalhe dos caminhos para a água da lavagem dos furos seguir até a vala de armazenamento. (28/05/14)..... | 74  |
| Figura 14.55 - Vala escavada para a coleta de água. (28/05/14).....                                                      | 75  |
| Figura 14.56 - Retorno de calda de cimento. (28/05/14) .....                                                             | 76  |
| Figura 14.57 - Segunda linha de grampos no fundo (05/06/14).....                                                         | 76  |
| Figura 14.58 - Execução da segunda linha de grampos (05/06/14).....                                                      | 77  |
| Figura 14.59 - Vista da parede lateral (05/06/14).....                                                                   | 77  |
| Figura 14.60 - Topo de grampos verticais (05/06/14).....                                                                 | 79  |
| Figura 14.61 - Gabarito na parede de contenção (05/06/14).....                                                           | 79  |
| Figura 14.62 - Vista perfis de aço da contenção do prédio vizinho lateral (05/06/14).....                                | 80  |
| Figura 14.63 - Vista geral do canteiro (05/06/14).....                                                                   | 81  |
| Figura 14.64 - Escavação para execução da contenção (11/06/14).....                                                      | 81  |
| Figura 14.65 - Execução de concreto projetado (11/06/14).....                                                            | 82  |
| Figura 14.66 - Reservatório de água para a bomba de concreto projetado (11/06/14). ....                                  | 82  |
| Figura 14.67 - Tenda das bombas e operador fazendo a irrigação das britas (11/06/14).....                                | 83  |
| Figura 14.68 - Vista geral do canteiro (11/06/14).....                                                                   | 83  |
| Figura 14.69 - Vista da parede lateral das casas (11/06/14).....                                                         | 84  |
| Figura 14.70 - Vista da escavação em bermas, na região do fundo do terreno (19/06/14).....                               | 85  |
| Figura 14.71 - Vista da região do fundo do terreno, já sem as bermas (20/06/14).....                                     | 85  |
| Figura 14.72 - Execução da junta de dilatação (19/06/14). ....                                                           | 86  |
| Figura 14.73 - Execução de grampo a ser ensaiado e demolição da parede de solo grampeado (19/06/14).....                 | 87  |
| Figura 14.74 - Grampo de ensaio já executado (20/06/14).....                                                             | 87  |
| Figura 14.75 - Vista geral do canteiro no início da semana (25/06/14).....                                               | 89  |
| Figura 11.76 - Escavação deixando faixa de trabalho (25/06/14).....                                                      | 91  |
| Figura 11.77 - Trabalhos na região da frente do terreno (25/06/14). ....                                                 | 92  |
| Figura 11.78 - Execução da contenção na região da frente do terreno (27/06/14). ....                                     | 92  |
| Figura 11.79 - Solo grampeado na parede do subsolo na região da frente do terreno (27/06/14). ....                       | 93  |
| Figura 11.80 - Solo grampeado na parede do subsolo na região da frente do terreno (27/06/14). ....                       | 93  |
| Figura 11.81 - Lavagem do furo (27/06/14). ....                                                                          | 94  |
| Figura 14.82 - Vista geral do canteiro (02/07/14).....                                                                   | 95  |
| Figura 14.83 - Atividades na lateral do terreno, na divisa com as casas (02/07/14). ....                                 | 95  |
| Figura 14.84 - Vista da lateral e da frente do terreno (02/07/14). ....                                                  | 96  |
| Figura 14.85 - Escavação na região da frente do terreno (02/07/14).....                                                  | 96  |
| Figura 14.86 - Fio de prumo (02/07/14).....                                                                              | 97  |
| Figura 14.87 - Vista geral do canteiro no início da semana (08/07/14).....                                               | 98  |
| Figura 14.88 - Remoção da tela de armação (08/07/14). ....                                                               | 99  |
| Figura 14.89 - Evolução da escavação no fundo do terreno (08/07/14). ....                                                | 99  |
| Figura 14.90 - Execução de solo grampeado na região lateral do terreno (11/07/14).....                                   | 100 |
| Figura 14.91 - Drenos posicionados (11/07/14).....                                                                       | 100 |
| Figura 14.92 - Vala de coleta de água utilizada na lavagem dos furos da contenção (11/07/14). ....                       | 101 |
| Figura 14.93 - Vista da lateral e da região da frente do terreno (11/07/14). ....                                        | 101 |
| Figura 14.94 - Solo grampeado na parede do subsolo (11/07/14). ....                                                      | 102 |
| Figura 14.95 - Água aflorando no terreno (17/07/14). ....                                                                | 103 |
| Figura 14.96 - Blocos de alvenaria na contenção do prédio vizinho (17/07/14). ....                                       | 103 |

|                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 14.97 - Região onde foram encontrados os blocos de alvenaria (17/07/14). ....                                        | 104 |
| Figura 14.98 - Perfuração (16/07/14). ....                                                                                  | 104 |
| Figura 14.99 - Rampa (16/07/14). ....                                                                                       | 105 |
| Figura 14.100 - Execução do concreto projetado e acabamento com sarrafeamento (17/07/14). ....                              | 105 |
| Figura 14.101 - Vista da parede do subsolo da frente do terreno (17/07/14). ....                                            | 106 |
| Figura 14.102 - Vista geral do canteiro no final da semana (17/07/14). ....                                                 | 106 |
| Figura 14.103 - Região aterrada (25/07/14). ....                                                                            | 107 |
| Figura 14.104 - Vista geral do canteiro no início da semana (23/07/14). ....                                                | 108 |
| Figura 14.105 - Vista geral do canteiro ao final da semana, já sem as bermas (25/07/14). ....                               | 109 |
| (b) .....                                                                                                                   | 110 |
| Figura 14.106 - (a) primeira linha de DHPs, abaixo dos grampos (23/07/14); (b) Linha de grampos na lateral (25/07/14). .... | 110 |
| Figura 14.107 - Realização de atividades de topografia (23/07/14). ....                                                     | 111 |
| Figura 14.108 - Vista geral do canteiro no início da semana (29/07/14). ....                                                | 112 |
| Figura 14.109 - Execução de grampos na lateral do terreno (29/07/14). ....                                                  | 112 |
| Figura 14.110 - Fixação de gabarito (29/07/14). ....                                                                        | 113 |
| Figura 14.111 - Rampa retirada para execução da fundação (29/07/14). ....                                                   | 114 |
| Figura 14.112 - Vista geral (01/08/14). ....                                                                                | 114 |
| Figura 14.113 - Vala de coleta de água (29/07/14). ....                                                                     | 115 |
| Figura 14.114 - Tubos para os DHP's (somente os não revestidos) (29/07/14). ....                                            | 115 |
| Figura 14.115 - Detalhe tubos DHPs (29/07/14). ....                                                                         | 116 |
| Figura 14.116 - G.4 (06/08/14). ....                                                                                        | 116 |
| Figura 14.117 - G.5 e G.6 na parede do subsolo na entrada do terreno (06/08/14). ....                                       | 117 |
| Figura 14.118 - Desenvolvimento de atividades na parede do fundo (06/08/14). ....                                           | 117 |
| Figura 14.119 - Execução de grampo no fundo do terreno (06/08/14). ....                                                     | 118 |
| Figura 14.120 - Perfuratriz posicionada na região da frente do terreno (06/08/14). ....                                     | 118 |
| Figura 14.121 - Vista geral do canteiro no final da semana (08/08/14). ....                                                 | 119 |
| Figura 14.122 - Vista geral do canteiro no começo da semana (13/08/14). ....                                                | 120 |
| Figura 14.123 - Vista da parede chanfrada na região da frente do terreno (13/08/14). ....                                   | 120 |
| Figura 14.124 - Nova vala posicionada próxima à rampa, na frente do terreno (13/08/14). ....                                | 121 |
| Figura 14.125 - Execução de grampos na parede lateral, próxima à entrada do terreno (13/08/14). ....                        | 121 |
| Figura 14.126 - Vista geral do canteiro no final da semana (15/08/14). ....                                                 | 122 |
| Figura 14.127 - Vista geral do canteiro no início da semana (20/08/14). ....                                                | 122 |
| Figura 14.128 - Vista do fundo (20/08/14). ....                                                                             | 123 |
| Figura 14.129 - Execução de grampos na lateral do terreno (20/08/14). ....                                                  | 123 |
| Figura 14.130 - Panos da lateral e do canto da frente (20/08/14). ....                                                      | 124 |
| Figura 14.131 - Grampos nas paredes lateral e da frente, já sem as bermas (22/08/14). ....                                  | 124 |
| Figura 14.132 - Evolução dos serviços na parede do fundo (22/08/14). ....                                                   | 125 |
| Figura 14.133 - Paredes lateral e da frente do terreno (22/08/14). ....                                                     | 125 |
| Figura 14.134 - Vista geral do canteiro no começo da semana (27/08/14). ....                                                | 126 |
| Figura 14.135 - Ajuste na colocação de DHP (27/08/14). ....                                                                 | 126 |
| Figura 14.136 - Perfuração para DHP (27/08/14). ....                                                                        | 127 |
| Figura 14.137 - Rampa reconstruída (27/08/14). ....                                                                         | 127 |
| Figura 14.138 - Vista geral do canteiro no final da semana (29/08/14). ....                                                 | 128 |
| Figura 14.139 - Parede lateral com bermas (29/08/14). ....                                                                  | 128 |

|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 14.140 - Vista do fundo do terreno (29/08/14) .....                                                          | 129 |
| Figura 14.141 - Vista geral do canteiro no início da semana (03/09/14).....                                         | 129 |
| Figura 14.142 - Estoque de material na entrada do terreno (03/09/14).....                                           | 130 |
| Figura 14.143 - Grampos no canto da frente (03/09/14) .....                                                         | 130 |
| Figura 14.144 - Vista da parede lateral do terreno, na divisa com as casas (03/09/14).....                          | 131 |
| Figura 14.145 - Vista do fundo do terreno (03/09/14) .....                                                          | 131 |
| Figura 14.146 - Vista do canto no fundo do terreno (03/09/14) .....                                                 | 132 |
| Figura 14.147 - Vista geral do canteiro. (11/09/14).....                                                            | 132 |
| Figura 14.148 - Aço estocado na rampa de acesso (11/09/14) .....                                                    | 133 |
| Figura 14.149 - Vista da lateral e do canto ao fundo do terreno (11/09/14) .....                                    | 133 |
| Figura 14.150 - Estoque de material na entrada do terreno (11/09/14).....                                           | 134 |
| Figura 14.151 - Vista dos grampos da parede lateral, na divisa com as casas (11/09/14) .....                        | 134 |
| Figura 14.152 - Vista do fundo do terreno (11/09/14) .....                                                          | 135 |
| Figura 14.153 - Chanfro na região da frente do terreno (11/09/14) .....                                             | 135 |
| Figura 14.154 - Vista geral do canteiro no início da semana (17/09/14).....                                         | 136 |
| Figura 14.155 - Tubos de revestimento para estacas raiz armazenados no canteiro (17/09/14) .....                    | 137 |
| Figura 14.156 - Vala de coleta de água localizada na região da frente do terreno (17/09/14).....                    | 137 |
| Figura 14.157 - Caminhão entrando com entulho para aterro (17/09/14) .....                                          | 138 |
| Figura 14.158 - Vista do fundo do terreno (17/09/14) .....                                                          | 138 |
| Figura 14.159 - Parede da frente da contenção (17/09/14) .....                                                      | 139 |
| Figura 14.160 - Parede lateral da contenção (17/09/14).....                                                         | 139 |
| Figura 14.161 - Equipamento de execução das estacas-raiz posicionado na região da frente do terreno (18/09/14)..... | 140 |
| Figura 14.162 - Vista geral do canteiro (18/09/14).....                                                             | 140 |
| Figura 14.163 - Grampo para ensaio G.7 (18/09/14).....                                                              | 141 |
| Figura 14.164 - Grampo para ensaio G.8 (18/09/14).....                                                              | 141 |
| Figura 14.165 - Vista geral do canteiro no início da semana. (25/09/14).....                                        | 142 |
| Figura 14.166 - Vista do chanfro na região da frente do terreno (25/09/14).....                                     | 142 |
| Figura 14.167 - Trabalhos no fundo do terreno (25/09/14) .....                                                      | 143 |
| Figura 14.168 - Perfuração de estaca raiz nas proximidades da parede lateral (25/09/14).....                        | 143 |
| Figura 14.169 - Vista do fundo do canteiro no final da semana (26/09/14).....                                       | 144 |
| Figura 14.170 - Vista do fim da rampa e dos trabalhos na região do fundo do terreno (26/09/14) ..                   | 145 |
| Figura 14.171 - Vista para a frente do terreno (26/09/14) .....                                                     | 145 |
| Figura 14.172 - Vista da rampa (26/09/14) .....                                                                     | 146 |
| Figura 14.173 - Armação da estaca raiz (01/10/14).....                                                              | 147 |
| Figura 14.174 - Canto da frente. (01/10/14).....                                                                    | 147 |
| Figura 14.175 - Lateral na divisa com as casas (01/10/14). .....                                                    | 148 |
| Figura 14.176 - Parede lateral (01/10/14). .....                                                                    | 148 |
| Figura 14.177 - Vista Geral do canteiro. (03/10/14) .....                                                           | 149 |
| Figura 14.178 - Topo da rampa (03/10/14).....                                                                       | 149 |
| Figura 14.179 - Vista geral do canteiro. (08/10/14).....                                                            | 150 |
| Figura 14.180 - Armação dos blocos. (08/10/14).....                                                                 | 150 |
| Figura 14.181 - Vista das atividades ao fundo do terreno. (08/10/14).....                                           | 151 |
| Figura 14.182 - Vista do chanfro da frente do terreno. (08/10/14).....                                              | 151 |
| Figura 14.183 - Vista da lateral do terreno, na divisa com as casas. (08/10/14) .....                               | 152 |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 14.184 - Rampa. (08/10/14) .....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 152 |
| Figura 14.185 - Vista geral do canteiro. (15/10/14) .....                                                                                                                                                                                                                                                   | 153 |
| Figura 14.186 - Local onde a rampa estava. (15/10/14) .....                                                                                                                                                                                                                                                 | 153 |
| Figura 14.187 - Armação dos blocos. (15/10/14) .....                                                                                                                                                                                                                                                        | 154 |
| Figura 14.188 - Canto do fundo (15/10/14) .....                                                                                                                                                                                                                                                             | 154 |
| Figura 14.189 - Vista da parede lateral, na divisa com as casas. (17/10/14) .....                                                                                                                                                                                                                           | 155 |
| Figura 14.190 - Vista geral do canteiro no final da semana. (17/10/14) .....                                                                                                                                                                                                                                | 155 |
| Figura 14.191 - Região da frente do terreno. (15/10/14) .....                                                                                                                                                                                                                                               | 156 |
| Ao final da obra, foi possível fechar o orçamento da contenção, cujos principais custos se encontram abaixo, não foram incluídos os ensaios de arrancamento pela Solotrat, pois seu custo é muito inferior frente ao preço global de execução (item 1 do orçamento). O custo do projeto também foi omitido. |     |
| .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 156 |
| O preço do sistema de contenção em solo grampeado foi, portanto, aproximadamente R\$1.870/m <sup>2</sup> de área de revestimento do concreto projetado.....                                                                                                                                                 | 156 |
| Figura 15.2.1 – Solução com garateia + tela soldada .....                                                                                                                                                                                                                                                   | 162 |
| Figura 15.2.2 – Geometria para cálculo da capacidade à flexão (FHWA, 2003) .....                                                                                                                                                                                                                            | 163 |
| Figura. 16.1.1 – Mobilização dos esforços no grampo.....                                                                                                                                                                                                                                                    | 170 |
| Figura 16.1.2 – Esforços em uma lamela genérica.....                                                                                                                                                                                                                                                        | 170 |
| Figura 16.1.3 – Seção 19 do projeto .....                                                                                                                                                                                                                                                                   | 173 |
| Figura 16.2.1 – Superfície crítica obtida no projeto.....                                                                                                                                                                                                                                                   | 174 |
| Figura 16.2.2 – Superfície crítica dos modelos 1 e 2.....                                                                                                                                                                                                                                                   | 174 |
| Figura 16.2.3 – Superfície crítica do modelo 3.....                                                                                                                                                                                                                                                         | 175 |
| Figura 16.2.4 – Superfície crítica do modelo 4.....                                                                                                                                                                                                                                                         | 175 |
| Figura 16.2.5 – Superfície crítica do modelo 5.....                                                                                                                                                                                                                                                         | 176 |
| Figura 16.2.6 – Superfície crítica do modelo 6.....                                                                                                                                                                                                                                                         | 176 |
| Figura 16.2.7 – Superfície crítica do modelo 7.....                                                                                                                                                                                                                                                         | 177 |
| Figura 16.2.8 – Superfície crítica do modelo 8.....                                                                                                                                                                                                                                                         | 177 |
| Figura 16.2.9 – Comparação entre as superfícies críticas .....                                                                                                                                                                                                                                              | 178 |
| Figura 17.1 - Seção típica dos grampos a serem utilizado para os ensaios. ....                                                                                                                                                                                                                              | 182 |
| Figura 17.3 - posição dos grampos G.3 G.4 e G.7 na elevação 8 do projeto. ....                                                                                                                                                                                                                              | 183 |
| Figura 17.5 - posição do grampo G.6 na elevação 10 do projeto. ....                                                                                                                                                                                                                                         | 184 |
| Figura 17.6 - Localização dos Grampos de ensaio G.1, G.2 e G.3. (20/06/14).....                                                                                                                                                                                                                             | 185 |
| Figura 17.7 - (a), (b) e (c) Montagem dos equipamentos de ensaio de arrancamento. (Solotrat, 2014) .....                                                                                                                                                                                                    | 187 |
| Figura 17.8 - Detalhe dos equipamentos posicionados na cabeça do grampo para a execução do ensaio. (Fonte: Porterfield et.al – 1994 apud FHWA – 2003) .....                                                                                                                                                 | 187 |
| Figura 17.9 - Chegada dos equipamentos dos ensaios e funcionários da Solotrat carregando a mesa de reação para posicioná-la no grampo G.1. (02/07/14).....                                                                                                                                                  | 188 |
| Figura 17.10 - Posicionamento da mesa de reação para o grampo G.3. (02/07/14).....                                                                                                                                                                                                                          | 189 |
| Figura 17.11 - Funcionário tentando encaixar o cravete na barra do grampo G.2. (02/07/14) .....                                                                                                                                                                                                             | 190 |
| Figura 17.12 - Apoio com base magnética e deflectômetro. (02/07/14) .....                                                                                                                                                                                                                                   | 191 |
| Figura 17.13 - Andaime posicionado para a execução do ensaio no grampo G.1. (02/07/14).....                                                                                                                                                                                                                 | 191 |
| Figura 17.14 - Base magnética apoiada sobre o macaco hidráulico com o auxílio de fita adesiva. (02/07/14) .....                                                                                                                                                                                             | 192 |
| Figura 17.15 - Ajuste de comprimento livre da barra para o grampo G.3. (02/07/14). ....                                                                                                                                                                                                                     | 193 |

|                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 17.16 - Funcionário carregando a bomba hidráulica para o local do primeiro ensaio. (02/07/14)    | 193 |
| Figura 17.17 - Ensaio do Grampo G.1. (02/07/14)                                                         | 194 |
| Figura 17.18 - Ensaio do Grampo G.2. (02/07/14)                                                         | 194 |
| Figura 17.19 - Ensaio do Grampo G.3. (02/07/14)                                                         | 194 |
| Figura 17.20 - Ensaio do Grampo G.3 por outro ângulo, olhando para o fundo do terreno. (02/07/14)       | 195 |
| Figura 17.21 - G.4 (06/08/14)                                                                           | 196 |
| Figura 17.22 - G.5 e G.6 (à esquerda) na parede do subsolo na entrada do terreno. (06/08/14)            | 196 |
| Figura 17.23 - Montagem do equipamento para o ensaio do grampo G.4. (15/08/14)                          | 197 |
| Figura 17.24 - calibração da bomba hidráulica. (15/08/14)                                               | 197 |
| Figura 17.25 - Localização de G.4. (15/08/14)                                                           | 198 |
| Figura 17.26 - Posicionamento do deflectômetro para o ensaio de G.4. (15/08/14)                         | 198 |
| Figura 17.27 - Deflectômetro. (15/08/14)                                                                | 199 |
| Figura 17.28 - Execução do ensaio de G.4. (15/08/14)                                                    | 199 |
| Figura 17.29 - Execução do ensaio de G.6. (15/08/14)                                                    | 200 |
| Figura 17.30 - Execução do ensaio de G.6 (15/08/14)                                                     | 200 |
| Figura 17.31 - Execução do ensaio de G.5. (15/08/14)                                                    | 201 |
| Figura 17.32 - Execução do ensaio de G.5. (15/08/14)                                                    | 201 |
| Figura 17.33 - Grampo para ensaio G.7 (18/09/14)                                                        | 202 |
| Figura 17.34 - Grampo para ensaio G.8. (18/09/14)                                                       | 203 |
| Figura 17.35 - Montagem do equipamento para o ensaio de G.7. (18/09/14)                                 | 203 |
| Figura 17.36 - Posicionamento do deflectômetro para o ensaio de G.7. (18/09/14)                         | 204 |
| Figura 17.37 - Execução do ensaio de G.7. (18/09/14)                                                    | 204 |
| Figura 17.38 - Transporte da bancada para o ensaio de G.8. (18/09/14)                                   | 205 |
| Figura 17.39 - Execução do ensaio de G.8. (18/09/14)                                                    | 205 |
| Figura 17.40 - Correlação de $q_s$ com NSPT e $p_1$ (Bustamente, Doix apud Springer, 2006)              | 207 |
| Figura 17.41 - Valores de $q_s$ a partir da adaptação de Décourt-Quaresma (1996).                       | 209 |
| Figura 18.1.1 - Mapa geomorfológico de São Paulo (Ab'Saber, 1957)                                       | 210 |
| Figura 18.1.2 - Amostras (a) 01; (b) 02                                                                 | 211 |
| Figura 18.1.3 - Sedimentação das amostras: (a) 01; (b) 02                                               | 211 |
| Figura 18.1.4 - Amostra em agitador antes do peneiramento fino                                          | 212 |
| Figura 18.1.5 - Amostras secas para determinação dos limites de Atterberg: (a) 01; (b) 02               | 213 |
| Figura 18.2.1 - Curva granulométrica da amostra 01                                                      | 213 |
| Figura 18.2.2 - Curva do ensaio de limite de liquidez da amostra 01                                     | 214 |
| Figura 18.2.3 - Curva granulométrica da amostra 02                                                      | 215 |
| Figura 18.2.4 - Curva do ensaio de limite de liquidez da amostra 02                                     | 215 |
| Figura 18.3.1 - Carta de plasticidade: argilas duras e rijas do Espigão Central (Vargas, 2002)          | 218 |
| Figura 18.3.2 - Carta de plasticidade: argilas superficiais vermelhas do Espigão Central (Vargas, 2002) | 218 |
| Figura 19.1 - Carta de classificação                                                                    | 220 |
| Figura 20.1 - Localização dos inclinômetros e pinos de recalque. (Moretti, 2014)                        | 221 |
| Figura 20.2 - Deslocamentos cumulativos do inclinômetro 1 – INC-01. (Moretti, 2014)                     | 223 |
| Figura 20.3 - Deslocamentos cumulativos do inclinômetro 2 – INC-02. (Moretti, 2014)                     | 224 |
| Figura 20.5 - Deformações dos extensômetros do nicho 01. (Solotrat, 2014)                               | 227 |

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 20.6 - Deformações dos extensômetros do nicho 02. (Solotrat, 2014) .....                  | 228 |
| Figura 20.7 - Parâmetro de deformação $\delta h/H$ de acordo com o nicho. (Solotrat, 2014) ..... | 229 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 9.2.1 – Recomendações para deslocamentos (Clouterre, 1991) .....                 | 10  |
| Tabela 11.2.1 - Características de métodos de análise de estabilidade tradicionais..... | 22  |
| Tabela 13.1 - Resumo do projeto de solo grampeado .....                                 | 39  |
| Tabela 14.1 - Orçamento da contenção.....                                               | 157 |
| Tabela 15.1.1 - Parâmetros das camadas de solo adotadas no modelo do Slide .....        | 158 |
| Tabela 15.2.1 – Fatores CF (Byrne et al., 1998).....                                    | 163 |
| Tabela 17.1 – Plano de carga do ensaio .....                                            | 181 |
| Tabela 17.2 – Quadro resumo dos ensaios .....                                           | 206 |
| Tabela 17.3 – $q_s$ a partir de ensaios de arrancamento em solos de São Paulo .....     | 208 |
| Tabela 18.2.1 - Resultados dos ensaios de granulometria e limites .....                 | 216 |
| Tabela 18.3.1 - Limites de Atterberg de alguns solos brasileiros (Pinto, 2006) .....    | 216 |
| Tabela 19.1 - Resultados do método das pastilhas.....                                   | 220 |
| Tabela 20.1 - Medições dos pinos de recalque a partir do relatório da Moretti.....      | 222 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|               |                                                                                    |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$      | Ângulo de inclinação da escavação                                                  |
| $a_{hm}$      | Área de armadura por largura na direção horizontal entre grampos                   |
| $a_{hn}$      | Área de armadura por largura na direção horizontal na cabeça do grampo             |
| $a_{vm}$      | Área de armadura por largura na direção vertical entre grampos                     |
| $a_{vn}$      | Área de armadura por largura na direção vertical na cabeça do grampo               |
| $A_s$         | Área de armadura de aço                                                            |
| $\beta$       | Coefficiente do método de Décourt-Quaresma que depende do tipo de solo e de estaca |
| $B_L$         | Comprimento da base da cunha de deslizamento                                       |
| $c$           | Coesão do solo                                                                     |
| $c_t$         | Contração diametral média no método das pastilhas                                  |
| $c'^{(1)}$    | Coesão efetiva do solo                                                             |
| $c'^{(2)}$    | Coefficiente de contração diametral no método das pastilhas                        |
| $C_F$         | Fator que considera a não uniformidade das pressões do solo no paramento           |
| $C_{FP}$      | Fator de correção para a contribuição da capacidade de suporte pelo solo           |
| $\delta$      | Ângulo de atrito entre a cunha de solo e o solo da base                            |
| $\delta_h$    | Deslocamento horizontal no topo do paramento                                       |
| $\delta_v$    | Deslocamento vertical no topo do paramento                                         |
| $\Delta x$    | Largura de uma lamela genérica                                                     |
| $\Delta \ell$ | Comprimento do grampo no trecho de 1m do $N_{SPT}$                                 |
| $\Delta L$    | Deslocamento total do grampo no ensaio de arrancamento                             |
| $D$           | Diâmetro do grampo                                                                 |
| $D'_c$        | Diâmetro efetivo da superfície cônica de punção                                    |
| $E_A$         | Empuxo ativo                                                                       |
| $E_s$         | Módulo de elasticidade do aço                                                      |
| $\phi^{(1)}$  | Ângulo de atrito do solo                                                           |
| $\phi^{(2)}$  | Diâmetro da barra de aço                                                           |
| $\phi^{(3)}$  | Diâmetro característico dos grãos de solo                                          |
| $\phi'$       | Ângulo de atrito efetivo do solo                                                   |
| $f_y$         | Resistência ao escoamento do aço                                                   |
| $f_{yk}$      | Resistência ao escoamento do aço característica                                    |
| $f'_c$        | Resistência à compressão do concreto projetado                                     |
| $F$           | Fator de segurança                                                                 |
| $F_{at}$      | Força atuante no deslizamento                                                      |

|                |                                                                                     |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| $F_{ens}$      | Força admissível teórica do grampo para o ensaio de arrancamento                    |
| $F_{ens,máx}$  | Carga de ruptura do grampo no ensaio de arrancamento                                |
| $F_{mín}$      | Fator de segurança da pesquisa de círculo crítico                                   |
| $F_{resist}$   | Força resistente ao deslizamento                                                    |
| $F_{SD}$       | Fator de segurança ao deslizamento                                                  |
| $\gamma$       | Peso específico do solo                                                             |
| $\gamma_{nat}$ | Peso específico natural do solo                                                     |
| $\gamma_{sat}$ | Peso específico saturado do solo                                                    |
| $\gamma_s$     | Coeficiente de segurança do aço                                                     |
| $\eta$         | Ângulo do grampo com a direção normal à base de uma lamela genérica                 |
| $G$            | Tração desenvolvida nos grampos                                                     |
| $h$            | espessura do paramento                                                              |
| $h_c$          | Profundidade efetiva a superfície cônica de punção                                  |
| $H$            | Altura de escavação final                                                           |
| $I_a$          | Índice de atividade                                                                 |
| $IP$           | Índice de plasticidade                                                              |
| $\kappa$       | Parâmetro de influência do campo de deslocamentos                                   |
| $k_s$          | Coeficiente de reação lateral do solo                                               |
| $K_a$          | Coeficiente de empuxo ativo                                                         |
| $\lambda$      | Distância de influência do campo de deslocamentos                                   |
| $\ell$         | Comprimento da base de uma lamela genérica                                          |
| $\ell_0$       | Comprimento do grampo entre a superfície de ruptura e a formação de rótula plástica |
| $\ell_b$       | Comprimento de ancoragem do grampo                                                  |
| $\ell_{b,ens}$ | Comprimento de ancoragem do grampo no ensaio de arrancamento                        |
| $\ell_L$       | Comprimento livre do grampo                                                         |
| $L$            | Comprimento do grampo                                                               |
| $LL$           | Limite de liquidez                                                                  |
| $LP$           | Limite de plasticidade                                                              |
| $N$            | Adimensional de resistência à flexão do método de Juran                             |
| $N_{SPT}$      | Número de golpes do ensaio SPT                                                      |
| $\bar{N}$      | Força normal atuando na base de uma lamela genérica                                 |
| $\mu^*$        | Coeficiente de atrito aparente                                                      |
| $p$            | Pressão lateral do grampo no solo                                                   |
| $p_1$          | Pressão limite do pressiômetro de Ménard                                            |
| $p_0$          | Pressão de plastificação do solo                                                    |
| $p_u$          | Pressão máxima resistente do aço                                                    |

|                   |                                                                          |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| P                 | Peso de solo em uma lamela genérica                                      |
| $\theta$          | Ângulo da superfície de ruptura com a vertical em uma lamela genérica    |
| $\theta_1$        | Ângulo 1 da superfície de ruptura com a vertical do método Alemão        |
| $\theta_2$        | Ângulo 2 da superfície de ruptura com a vertical do método Alemão        |
| $q_s$             | Resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo                     |
| Q                 | Resultante da sobrecarga em uma lamela genérica                          |
| $Q_s$             | Força de arrancamento do grampo                                          |
| R                 | Raio do círculo de ruptura                                               |
| $R_c$             | Resistência ao cisalhamento no grampo no método Alemão                   |
| $R_{FF}$          | Capacidade à flexão                                                      |
| $R_{FP}$          | Capacidade à punção                                                      |
| $R_c$             | Resistência à tração no grampo no método Alemão                          |
| $\sigma'_h$       | Tensão horizontal efetiva                                                |
| $\sigma'_v$       | Tensão vertical efetiva                                                  |
| $S_h$             | Espaçamento horizontal entre grampos                                     |
| $S_{m\acute{a}x}$ | Espaçamento máximo entre grampos                                         |
| $S_v$             | Espaçamento vertical entre grampos                                       |
| $T_o$             | Tração na cabeça do grampo                                               |
| $T_c$             | Força de cisalhamento no grampo                                          |
| $T_{c0}$          | Força de cisalhamento no grampo para plastificação no grampo             |
| $T_{c1}$          | Força de cisalhamento no grampo para plastificação do solo               |
| $T_{c2}$          | Força de cisalhamento no grampo para plastificação da armadura do grampo |
| TC                | Adimensional de força cortante máxima do método de Juran                 |
| $T_{c,f}$         | Tração crítica de fluência                                               |
| $T_G$             | Tração limite de escoamento do aço                                       |
| $T_{m\acute{a}x}$ | Tração limite no grampo                                                  |
| $T_L$             | Tração limite de arrancamento                                            |
| $T_{LE}$          | Tração limite de arrancamento estimada                                   |
| $T_n$             | Força de tração no grampo                                                |
| TN                | Adimensional de força de tração máxima do método de Juran                |
| u                 | Pressão neutra                                                           |
| $V_P$             | Força cortante de punção                                                 |
| W                 | Peso da cunha de solo                                                    |
| $X_c$             | Abcissa de centro do círculo crítico                                     |
| $Y_c$             | Ordenada de centro do círculo crítico                                    |
| z                 | Profundidade                                                             |

## SUMÁRIO

|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                                                                               | 1   |
| <b>2. OBJETIVOS</b>                                                                                | 2   |
| <b>3. METODOLOGIA</b>                                                                              | 2   |
| <b>4. JUSTIFICATIVA</b>                                                                            | 3   |
| Parte I: Revisão bibliográfica sobre contenções em solo grampeado                                  | 4   |
| <b>5. ORIGEM</b>                                                                                   | 4   |
| <b>6. DESCRIÇÃO</b>                                                                                | 4   |
| <b>7. MÉTODOS EXECUTIVOS</b>                                                                       | 5   |
| <b>8. VANTAGENS E DESVANTAGENS NA APLICAÇÃO</b>                                                    | 6   |
| <b>9. COMPORTAMENTO DO SOLO GRAMPEADO</b>                                                          | 8   |
| 9.1. Esforços                                                                                      | 8   |
| 9.2. Deslocamentos                                                                                 | 10  |
| 9.3. Modos de ruptura                                                                              | 11  |
| <b>10. CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO</b>                                                               | 13  |
| 10.1. Controle dos materiais                                                                       | 13  |
| 10.2. Controle executivo                                                                           | 14  |
| 10.3. Medição das deformações                                                                      | 14  |
| 10.4. Ensaio de arrancamento em grampos                                                            | 18  |
| <b>11. MÉTODOS DE ANÁLISE</b>                                                                      | 20  |
| 11.1. Classificação dos métodos                                                                    | 20  |
| 11.2. Análise de equilíbrio limite                                                                 | 21  |
| 11.3. Método Alemão                                                                                | 23  |
| 11.4. Método de Davis                                                                              | 24  |
| 11.5. Método de Juran                                                                              | 25  |
| 11.6. Método Multicritério                                                                         | 27  |
| <b>12. ASPECTOS GEOTÉCNICOS DA BACIA DE SÃO PAULO</b>                                              | 29  |
| Parte II: O Projeto e a execução da contenção em solo grampeado do Edifício Corporativo – Turiassu | 33  |
| <b>13. PROJETO DA CONTENÇÃO</b>                                                                    | 34  |
| <b>14. EXECUÇÃO DA OBRA</b>                                                                        | 42  |
| <b>15. CÁLCULOS DO PROJETO ESTRUTURAL DO SOLO GRAMPEADO</b>                                        | 158 |
| 15.1. Parâmetros do solo e dos grampos                                                             | 158 |



|            |                                                          |            |
|------------|----------------------------------------------------------|------------|
| 15.2.      | Metodologia de cálculo .....                             | 159        |
| 15.3.      | Análise de estabilidade por seções no <i>Slide</i> ..... | 165        |
| <b>16.</b> | <b>ESTUDO DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE</b> .....           | <b>168</b> |
| 16.1.      | Hipóteses do modelo .....                                | 168        |
| 16.2.      | Resultados .....                                         | 173        |
| 16.3.      | Interpretação dos resultados .....                       | 178        |
| <b>17.</b> | <b>ENSAIOS DE ARRANCAMENTO</b> .....                     | <b>179</b> |
| <b>18.</b> | <b>ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA</b> .....            | <b>209</b> |
| <b>19.</b> | <b>ENSAIO DO MÉTODO DAS PASTILHAS</b> .....              | <b>219</b> |
| <b>20.</b> | <b>LEITURAS DA INSTRUMENTAÇÃO</b> .....                  | <b>220</b> |
| <b>21.</b> | <b>CONCLUSÕES</b> .....                                  | <b>229</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....                  | <b>232</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Nosso projeto de Trabalho de Formatura é na área de contenções, mais precisamente contenções em solo urbano, onde a ocorrência de deslizamentos de terra e recalques acentuados seria muito mais grave, pois eles provocariam uma grande variedade de problemas e acidentes envolvendo a região de vizinhança da obra.

Para conter a terra durante as fases de escavação do empreendimento, as alternativas são várias: taludes, tirantes, pranchões, grampos etc, cada uma com suas vantagens e desvantagens no que tange a preço, método executivo, carga suportada e outros.

Em nosso trabalho, estamos nos focando na contenção por solo grampeado. Ele guarda algumas semelhanças com o atirantamento, por requerer inclusões no terreno, mas completamente diferente no princípio de funcionamento: enquanto os tirantes impõem ao solo uma força para garantir o equilíbrio com pequena movimentação, o solo grampeado é mais um reforço do solo, passivo, ou seja, primeiro o solo precisa mover-se um pouco para mobilizar a resistência ao longo do grampo.

Os estudos de solo grampeado são bem mais recentes que os de tirantes e, portanto, muito de sua execução é mais baseada em experiências práticas do que nas especificidades de cada caso. E é nessa região relativamente obscura que encontramos um campo interessante de pesquisa e análise para desenvolver nosso Trabalho de Formatura.

Não estamos aqui nos preocupando exclusivamente com o projeto, mas também com outros aspectos decorrentes do uso desse tipo de contenção, como os legais, ambientais, logísticos e econômicos.

A princípio, a necessidade de que haja um deslocamento antes de qualquer resposta por parte do grampo pode ser vista como impeditivo do seu uso em diversas situações, afinal, são esses deslocamentos que causam rachaduras em residências vizinhas e pavimentos da redondeza, criam sensação de insegurança e podem desalinhar postes e outras redes de serviços. No entanto, um bom projeto de solo grampeado é capaz de minimizar os recalques, neutralizando seus efeitos negativos. Naturalmente, para reduzir movimentos, a densidade dos grampos é sempre maior do que a dos tirantes, mesmo assim a um custo inferior.

## **2. OBJETIVOS**

Nosso objetivo com esse trabalho é acompanhar e analisar criticamente o emprego desse tipo de contenção em situações que deixariam muitos engenheiros ou empresas receosos em adotá-la. No caso, estamos acompanhando uma obra em fase inicial de escavação que terá, ao final, 3 subsolos, totalizando mais de 9 metros de solo que será contido usando a técnica de solo grampeado.

Pela pouca difusão de estudos e pequena abrangência de situações solucionadas com solo grampeado, o uso dessa técnica em área urbana era muitas vezes preterido, ainda que possa proporcionar maior economia e agilidade para uma obra. Essa situação vem mudando bastante nos últimos anos.

Para o caso que estamos acompanhando, de uma aplicação bastante incomum do solo grampeado, essa será uma alternativa viável? Os deslocamentos afetarão consideravelmente os vizinhos? Gerir os suprimentos e frentes de trabalho é mais fácil para essa alternativa do que para outras? O caso estudado pode servir de modelo para outras obras do tipo? São essas as perguntas que tentaremos responder ao longo desse trabalho.

## **3. METODOLOGIA**

Para a parte I do trabalho, foram consultados artigos técnicos, trabalhos acadêmicos (principalmente no que se refere ao comportamento e ao dimensionamento do solo grampeado) e manuais (com ênfase nos métodos executivos) para elaboração da revisão bibliográfica, cujo objetivo era a contextualização e o levantamento dos assuntos a serem investigados no desenvolvimento do trabalho.

A parte II é o estudo de caso da contenção em solo grampeado do Edifício Corporativo - Turiassu, que foi elaborado a partir de informações colhidas durante as visitas à obra do empreendimento na fase de execução da contenção, entre os meses de 04/14 a 10/14, e do projeto da contenção, disponibilizado pela empresa projetista. Outros subsídios para essa parte foram: coleta de amostras de solo desse local para ensaios; relatórios da instrumentação; relatórios de controle e execução da empresa que realizou a contenção; e o relatório dos ensaios de arrancamento.

#### **4. JUSTIFICATIVA**

A aplicação do solo grampeado como contenção para subsolos de edifícios em áreas urbanas no Brasil, apesar de diversas experiências acumuladas ao longo das últimas três décadas, ainda não é o mais usual. Muitos projetos são feitos a partir de dimensionamentos empíricos ou, na melhor das hipóteses, de normas estrangeiras, sem que haja uma norma brasileira que padronize o projeto de estruturas em solo grampeado, resguardando o engenheiro ao assinar o projeto. Similarmente, a ausência de norma para controle e execução de estruturas em solo grampeado é prejudicial às empresas que realizam esse serviço e às construtoras dos edifícios.

Apesar disso, há vários trabalhos científicos publicados no Brasil, além de banco de dados das empresas que executam solo grampeado, que são adequados às condições dos solos tropicais e à realidade brasileira. Ademais, essa solução já mostrou que, além da viabilidade, pode ser técnica e economicamente a mais indicada dependendo das particularidades de uma determinada obra e a disponibilidade de equipamentos, materiais e mão de obra.

## **Parte I: Revisão bibliográfica sobre contenções em solo grampeado**

### **5. ORIGEM**

A origem da técnica de solo grampeado é o NATM (“New Austrian Tunneling Method”), que consiste em uma técnica de execução de suportes de túneis e galerias. O NATM consiste na inserção de reforços de aço ditos passivos na rocha seguidos pela aplicação de concreto projetado. Esta combinação entre reforço de aço passivo e concreto projetado também vem sendo utilizada na estabilização de encostas desde o começo da década de 60. (Lima, 2002)

A primeira aplicação de solo grampeado foi feita em 1972 para o projeto de expansão de uma ferrovia próxima a Versailles, França. Grampos foram utilizados para estabilizar um talude de 18m de altura composto por solo arenoso. A técnica provou ter melhor custo-benefício e ao também reduziu o tempo de construção quando comparado a outros métodos de estabilização ditos convencionais. A Alemanha foi o país seguinte a estudar a técnica do solo grampeado. Os EUA aplicaram solo grampeado pela primeira vez em 1976 para estabilizar uma escavação de fundação de 13,7m de altura composta por solo siltoso-arenoso denso. Solo grampeado também foi utilizado na expansão do hospital “The Good Samaritan” em Portland, Oregon. A estabilização foi concluída em aproximadamente metade do tempo e 85% do custo de sistemas de estabilização convencionais. (Lima, 2002)

A Universidade da Califórnia, em Davis, preocupada com a falta de dados sobre resultados da aplicação de solos grampeados conduziu um programa de pesquisa que incluiu testes em centrífuga, ensaios em escala real e análises de elementos finitos. (Lima, 2002)

O solo grampeado, como é conhecido no Brasil, passou a ser utilizado em São Paulo, de maneira intuitiva, no final dos anos 70.

### **6. DESCRIÇÃO**

O solo grampeado é um tipo de contenção bastante prática e eficiente para a estabilização de taludes de escavações através do reforço do solo e, além disso, apresenta as vantagens de ser mais econômico e rápido de executar do que outras técnicas de estabilização equivalentes baseadas em suportes rígidos, que neste caso impedem a deformação do terreno.

A técnica de solo grampeado consiste em reforçar o solo através da inserção de elementos flexíveis, resistentes à flexão composta, para permitir que o terreno se deforme. Esses elementos flexíveis, denominado grampos, podem ser composto por barras de aço, barras sintéticas, microestacas, etc e podem ser instalados no solo horizontalmente, verticalmente ou mesmo inclinados (mais comum), introduzindo no maciço esforços resistentes de tração e cisalhamento. É um tipo de contenção que pode ser permanente ou temporária.

Solo grampeado é um tipo de contenção dita passiva, em função de que este necessita de um deslocamento no maciço de solo para mobilizar sua estrutura de reforço. Para que possa ser utilizado, é necessário que o solo tenha uma coesão permanente não-desprezível.

Para a estabilização geral do maciço são necessários os grampos (chumbadores), a drenagem, e o concreto projetado, que dá estabilidade local junto ao paramento.

## **7. MÉTODOS EXECUTIVOS**

A execução de uma contenção de Solo Grampeado em taludes ou escavações pode ser feita de cima para baixo ou de baixo para cima, de acordo com o que for mais conveniente em cada projeto.

Inicialmente são executados grampos verticais nas extremidades do terreno, como ferramenta de melhoria do solo.

As etapas presentes na execução deste tipo de contenção são: escavação, execução do Chumbador e aplicação do concreto projetado. A seguir há uma descrição mais detalhada do processo.

Inicia-se o corte do solo, de acordo com as necessidades do projeto e é necessário que o solo mantenha-se estável durante as etapas de escavação, que geram instabilidades locais no maciço. Essas instabilidades podem ser amenizadas ao se deixar uma pequena inclinação na região de corte, o que garante um ganho na estabilidade global do maciço, ou mesmo ao se executar os cortes através de bermas. (Lima, 2002)

Em seguida, executa-se a primeira linha de chumbadores e a aplicação do revestimento de concreto projetado. Cabe ressaltar que conforme os serviços vão avançando é necessária a execução de DHPs e de drenos de paramento, assim como de canaletas, para permitir a saída da água presente no maciço que poderia gerar instabilidades. (Lima, 2002)

As perfurações são executadas por equipamentos leves e de fácil manuseio. O fluido utilizado para perfurar e limpar o furo pode ser água (mais usual), lama ou mesmo ar.

## **8. VANTAGENS E DESVANTAGENS NA APLICAÇÃO**

Comparando a contenção por solo grampeado àquela normalmente utilizada em obras similares à que estamos estudando, a cortina atirantada, apontamos as seguintes vantagens:

- Menor porte dos equipamentos necessários

Para a contenção em solo grampeado, os equipamentos necessários são apenas de pequeno porte, como perfuratrizes (que podem inclusive ser manuais) e equipamento de injeção, o que facilita o acesso a locais difícil e/ou com pouco espaço disponível.

- Menor emissão de ruído e vibrações

Equipamentos usados no solo grampeado são de muito menor emissão do que outros usados na cortina atirantada, notadamente o bate-estacas.

- Menor tempo de execução

A execução, a perfuração e a injeção dos chumbadores podem ser feitas de forma contínua em várias frentes de trabalho. Como não necessita de pausas para cura ou protensão, a obra caminha mais rapidamente.

- Menor custo total

Devido as equipamentos menores e mais baratos, ao tempo de execução inferior e ao menor volume de materiais empregados.

- Grande adaptabilidade do projeto

Conhecendo-se as características do solo, pode-se facilmente adaptar o projeto com o avanço das escavações para obter melhor custo-benefício.

- Menor invasão dos terrenos vizinhos

Como a dimensão de comprimentos dos grampos é menor que a dos tirantes, a invasão dos solos vizinhos é menor.

Já dentre as desvantagens, têm-se:

- Menor prática e difusão das técnicas

Significando que nem sempre é fácil encontrar uma empresa disposta e capaz para executar o projeto.

- Difícil execução em solos não-coesivos

Como não há nada que impeça os movimentos de solo no período entre escavação e execução dos grampos e concretagem do paramento, o seu uso em solos arenosos se torna mais perigoso. (Springer, 2006)

- Difícil execução em solos argilosos com baixo número de  $N_{SPT}$

Pela mesma razão indicava acima: não é possível garantir a estabilidade dos taludes escavados.

- Necessidade de deslocamentos

Por ser contenção passiva, é preciso que o solo se desloque antes de mobilizar a resistência dos grampos. Assim, deve-se atentar a todos os problemas que esses recalques podem causar nas vizinhanças.

O uso em locais de alto nível d'água também é visto como complicação adicional, ainda que possa ser contornada com o uso de equipamentos e técnicas de drenagem. (Springer, 2006)



## 9. COMPORTAMENTO DO SOLO GRAMPEADO

### 9.1. Esforços

Ao longo das fases de escavação, o solo se descomprime lateralmente ao mesmo tempo em que se desloca e mobiliza a tração nos grampos, que é variável ao longo de todo seu comprimento, de modo que ao término da construção, as deformações horizontais e verticais são máximas no topo do muro, como mostra a figura 9.1.1.

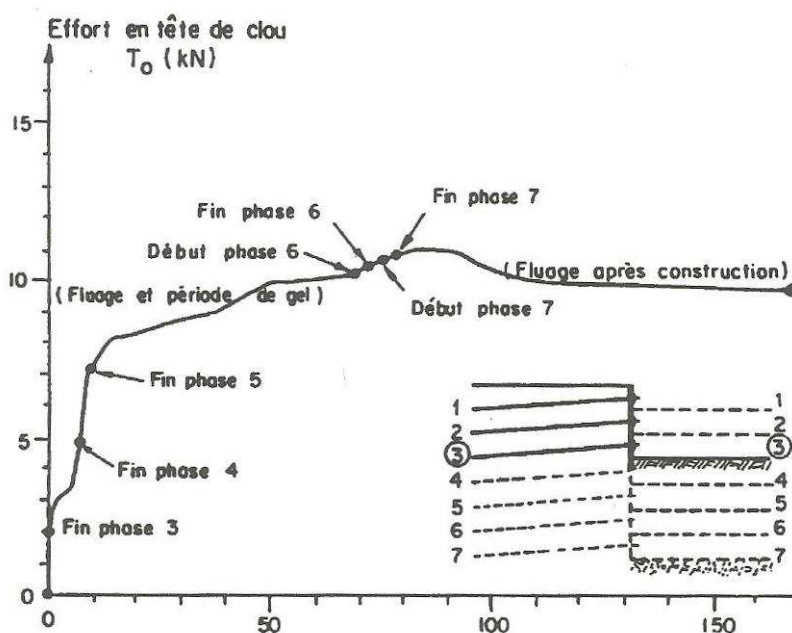


Figura 9.1.1 - Evolução da tração nos grampos ao longo das fases de escavação. (Clouterre, 1991)

Os pontos de máxima tração nos grampos em uma seção transversal ocorrem no interior do maciço, formando uma linha de ruptura potencial que divide o maciço em uma zona passiva, logo atrás do paramento, em que as tensões de atrito lateral são exercidas pelo solo sobre os grampos no sentido do paramento e uma zona ativa ou resistente, em que essas tensões são dirigidas para o interior. Essa linha de ruptura potencial tem forma diferente daquela sem as inclusões.

A interação solo-grampo ocorre principalmente por atrito lateral, pelo deslocamento horizontal do solo (que não precisa ser grande), colocando o grampo em tração (conforme a figura 9.1.2) e também pela reação do solo ao deslocamento lateral do grampo, mobilizando forças cortantes e momentos fletores.

Nos grampos com rigidez suficiente, como é o caso dos grampos envolvidos por calda de cimento, além da tração, pode ocorrer mobilização não desprezível de forças cortantes e momentos fletores se houver desenvolvimento de uma superfície cisalhante. No entanto esses esforços colaboram em menos de 10% com a resistência da contenção e não ocorrem na obra em serviço, exceto na região do paramento em concreto projetado.

A resistência ao cisalhamento  $q_s$  (eq. 9.1.1) é praticamente constante em toda a região, pois a diminuição do coeficiente de atrito aparente ( $\mu^*$ ) com a profundidade, pelo impedimento da dilatação é compensado pelo aumento da tensão normal vertical.

$$q_s = \mu^*(z) \cdot \gamma z \quad (9.1.1)$$

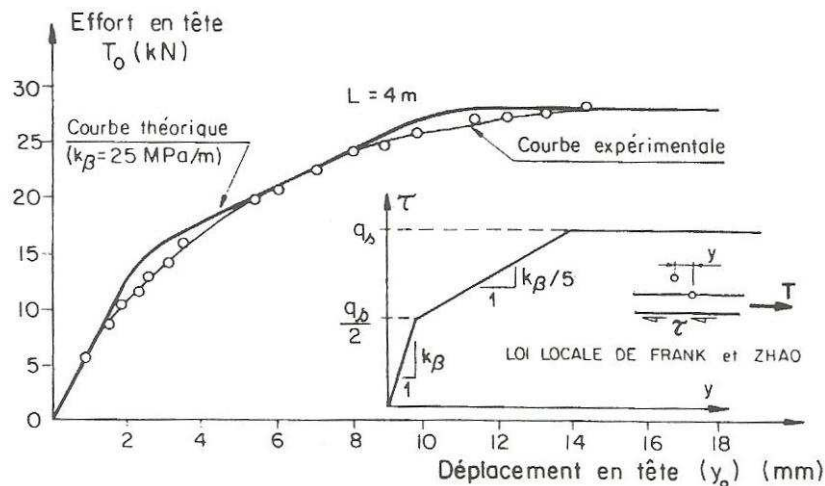


Figura 9.1.2 - Mobilização da tração com os deslocamentos. (Clouterre, 1991)

Quanto à influência da umidade do solo sobre o atrito, em solos granulares com fração importante de finos, o esforço que leva ao arrancamento dos grampos é reduzido à metade após a umidade ótima do ensaio Proctor normal e a deformação necessária para isso se reduz a um terço. Em solos finos, a saturação pode levar ao desaparecimento do atrito lateral à curto prazo (restando apenas a coesão não drenada). (Clouterre, 1991)

A orientação dos grampos em relação à superfície de ruptura altera a relação entre as forças de tração ( $T_n$ ) e cisalhantes ( $T_c$ ), sendo grandes inclinações reduzem a tração mobilizada para um dado deslocamento na superfície de ruptura (figura 9.1.3).

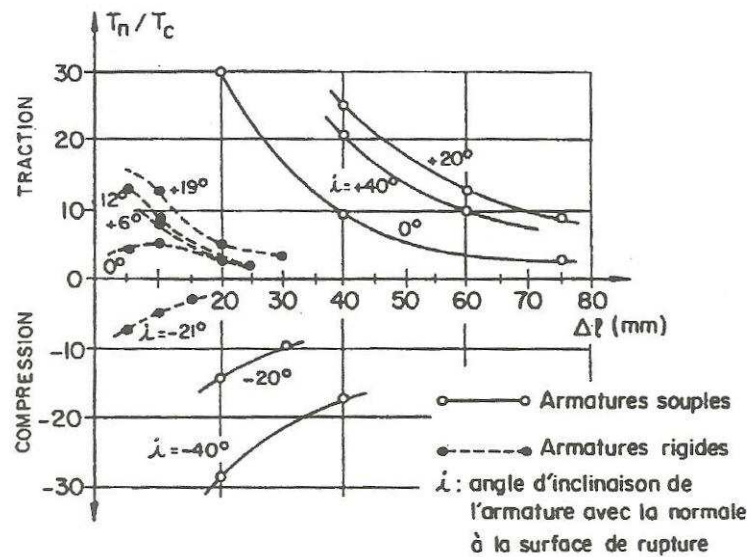


Figura 9.1.3 - Influência da orientação dos grampos (Clouterre, 1991)

O paramento de concreto é submetido às trações localizadas  $T_0$  dos grampos e à pressão de terra  $p_0(z)$  entre os grampos, gerando esforço equivalentes ao de uma laje típica.

## 9.2. Deslocamentos

A partir de observações de obras instrumentada, notou-se que o deslocamento horizontal no topo do paramento ( $\delta_h$ ) é aproximadamente igual ao deslocamento vertical no topo do paramento ( $\delta_v$ ) e depende da natureza do solo, como mostra a tabela abaixo, em que está presente também o parâmetro  $\kappa$ .

Tabela 9.2.1 – Recomendações para deslocamentos (Clouterre, 1991)

|                       | Alteração de rocha | Areias   | Argilas  |
|-----------------------|--------------------|----------|----------|
| $\delta_v = \delta_h$ | H/1 000            | 2H/1 000 | 4H/1 000 |
| $\kappa$              | 0,8                | 1,25     | 1,5      |

A influência do campo de deslocamentos provocado pela escavação afeta uma região no topo de um muro vertical que dista aproximadamente  $\lambda$  do paramento até se amortecer, devendo-se verificar que as estruturas existentes resistem aos correspondentes deslocamentos.  $\alpha$  é o ângulo de inclinação da escavação com a vertical

$$\lambda = H (1 - \tan \alpha) \kappa \quad (9.2.1)$$

O deslocamento horizontal na superfície que delimita o muro, que compreende toda a extensão dos grampos, é em geral compreendido entre  $4H/10\,000$  e  $5H/10\,000$ . Esse valor varia inversamente à relação  $L/H$  e também depende da natureza do solo (Clouterre, 1991).

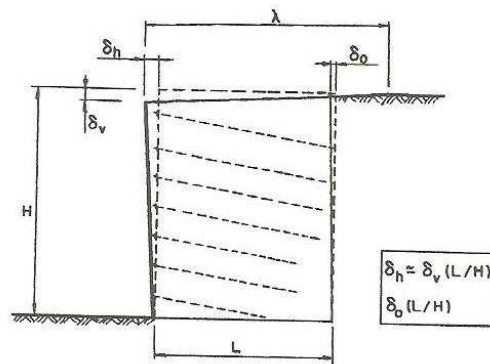


Figura 9.2.1 - deslocamentos de um muro de solo grampeado (Clouterre, 1991)

### 9.3. Modos de ruptura

São distinguidos os tipos de ruptura externa, interna e mista, caracterizando estados limites últimos, em que as cargas aplicadas superam a resistência do sistema ou de seus componentes.

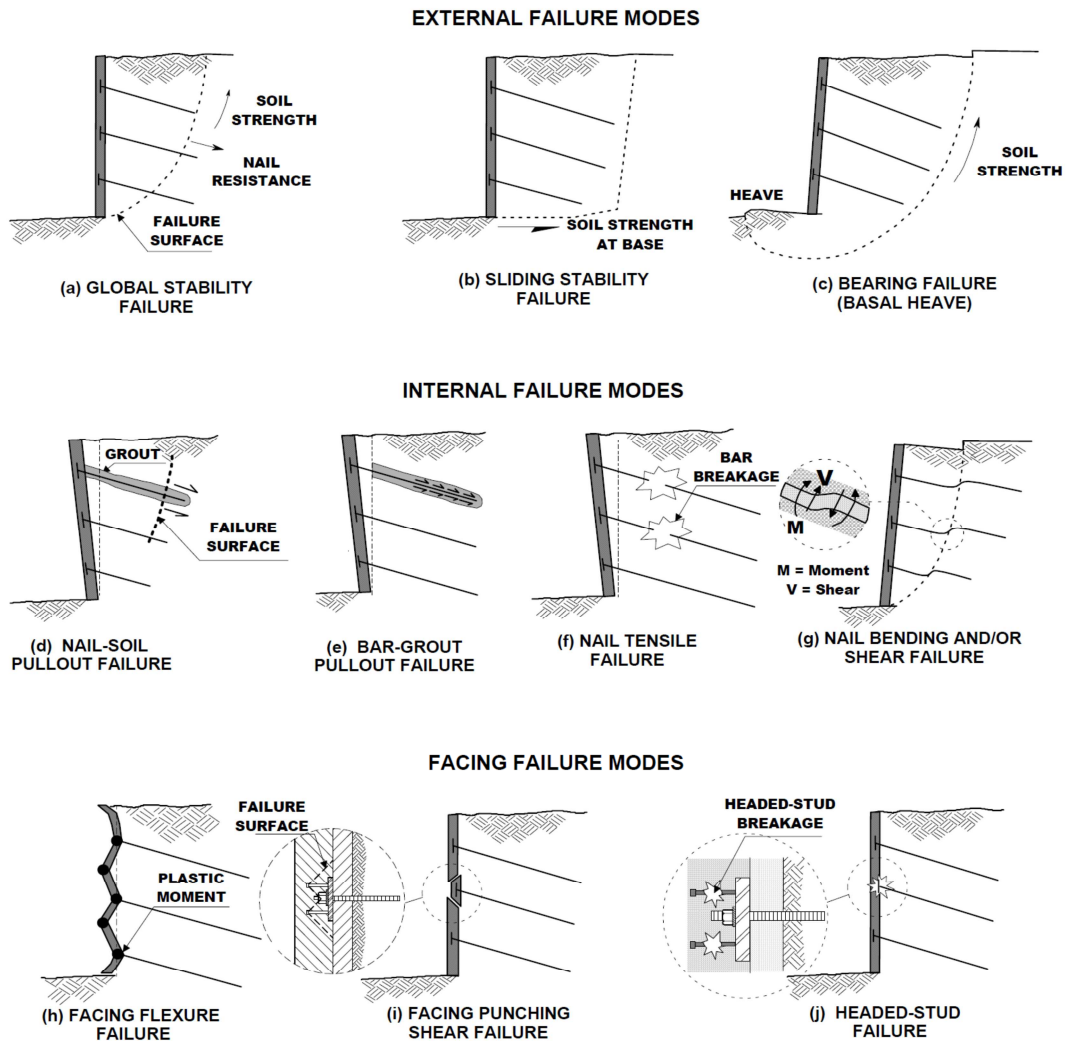


Figura 9.3.1 - Modos de ruptura (FHWA, 2003)

As análises de estabilidade, que consideram os esforços resistentes e solicitantes atuando na cunha de ruptura, verificam a capacidade da contenção de resistir aos esforços introduzidos pela escavação, cargas de serviço e cargas extremas. Fatores que controlam a estabilidade externa incluem altura do muro, largura da região reforçada, estratigrafia atrás e abaixo do muro, propriedades do grampo e da interface com o solo.

A ruptura externa ocorre com o desenvolvimento de uma superfície de ruptura passado por trás dos grampos e o maciço é considerado como um monólito. A avaliação da estabilidade externa antes da construção da obra deve ser considerada, pois as consequências podem ser de grande magnitude.

Os tipos de ruptura externa possíveis, sendo as duas últimas mais raras, são: ruptura global; deslizamento; e ruptura do solo da fundação. A ruptura global é analisada por equilíbrio limite, considerando todas as ações que podem atuar na cunha de ruptura. O

deslizamento pode ocorrer quando pressões laterais de solo são mobilizadas com a escavação, superando a resistência da base ao deslizamento. A capacidade da fundação pode ser um problema em escavações de solos finos e fracos; pelo fato de o muro em solo grampeado não continuar abaixo da escavação, o desbalanceamento de carga causado pela escavação pode mobilizar essa resistência.

A ruptura interna pode ocorrer por: quebra dos grampos; arrancamento dos grampos; e perda de aderência entre a armadura e o graute.

A quebra dos grampos ocorre por esforços internos de tração, principalmente. Os grampos de armadura revestida de concreto tem ruptura mais dúctil quanto maior for a mobilização à flexão. Em caso contrário, a linha de ruptura corresponde bem à linha formada pela máxima tração nos grampos. Essa ruptura pode ocorrer por subdimensionamento da seção de armadura, pela corrosão da armadura (menos dúctil), sobrecargas no topo do talude, saturação do maciço e formação de coloides junto ao paramento em solos com alta gelividade.

A ruptura por arrancamento dos grampos, que normalmente é dúctil, ocorre por falta de aderência, caracterizada pelo comprimento insuficiente dos grampos na zona resistente, não permitindo o equilíbrio da tração imposta ao grampo. Essa ruptura pode ocorrer por redução das propriedades mecânicas com a saturação do maciço, diminuindo o atrito solo-grampo.

A ruptura mista ocorre por formação de uma superfície de cisalhamento que passa por alguns grampos e uma região sem grampos. Em geral ocorre por comprimento insuficiente dos grampos na zona resistente associado a uma diminuição da resistência dos solo ou do atrito solo-grampo.

Por fim, a ruptura no paramento pode ocorrer por flexão no concreto, punção no concreto, e tração nos parafusos usados para fixar o grampo no paramento, sendo necessário verificar a seção resistente do concreto e dos parafusos aos respectivos esforços.

## **10. CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO**

### **10.1. Controle dos materiais**

Para o controle do concreto projetado com fibra sintética, caso esse seja o material usado no paramento, submetem-se amostras retiradas de placas pré-moldadas a ensaios de compressão simples (conforme a NBR 13.070) e corpos de prova prismáticos a ensaios de

determinação de resistência à tração na flexão (conforme a NBR 12.142). (Val, Neme, Zirlis, 1999)

### **10.2. Controle executivo**

Visando a garantia da resistência da contenção, admite-se uma variação de até 15%, no espaçamento (horizontal e vertical) entre grampos, mantida a densidade de grampos e de até 5° na inclinação dos mesmos.

Para a proteção contra a corrosão do aço, deve-se garantir o recobrimento da armadura, com centralizadores. O tratamento anticorrosivo pode ser feito por pintura eletrolítica, o procedimento para trecho ancorado da NBR 5629 de acordo com a agressividade do meio e a duração da obra (Zirlis et al. In: Hachich et al., 1998). Além disso pode ser realizado ensaio de tracionamento, em um mínimo de 10% dos chumbadores (Zirlis et al., 1992).

Quanto à calda de cimento, seu fator água/cimento deve ser ajustado à permeabilidade do maciço, não usando cimentos agressivos às armaduras. Alguns minutos após a injeção da calda ou de resina, deve-se verificar se não há decantação na face do talude para que não haja perdas de materiais. (Zirlis et al. In: Hachich et al., 1998).

O concreto projetado pode ter espessura controlada por gabaritos posicionados, um a cada 4,0 m<sup>2</sup>, e deve seguir as especificações das normas sobre concreto projeto da ABNT.

Para melhor confiabilidade, os chumbadores devem receber ao menos uma fase de injeção, além da bainha. Outras vantagens desse procedimento são o aumento da homogeneização do solo, com ganho de adensamento no solo e preenchimento de fissuras e a redução das deformações necessárias para mobilização da resistência de atrito solo-grampo.

### **10.3. Medição das deformações**

A importância de se acompanhar as deformações do solo reforçado está ligada ao fato de que elas necessariamente ocorrem para mobilizar a resistência do reforço. As deformações verticais no topo devem ser limitadas, especialmente em áreas urbanas, para não causarem recalques diferenciais nas construções adjacentes.

Zirlis et al. (1992) sugerem a instalação de extensômetros de diferentes comprimentos a diferentes profundidades, nas posições em que se prevê maiores deformações (conforme a figura 10.3.1), cujos comprimentos são de: 3m além do comprimento dos

chumbadores, para o maior; pelo menos 3m de trecho livre, para o menor; e o comprimento médio entre os anteriores, para o intermediário.

Os autores também indicam que a instalação de dois conjuntos de extensômetros em uma mesma linha vertical, um a 2m abaixo da crista e o outro a 1,5m acima da base, permite obter o comportamento do reforço como um todo. Recomendam também que a leitura de suas deformações deve ser diária, durante a fase de escavação e semanal, até três meses após o término da construção da contenção.

Para que as medições sejam representativas, devem ser feitas no mínimo três leituras de deformação de pinos de recalque, com aparelho de topografia, em três faixas verticais. É ideal que os extensômetros sejam acessíveis a aferições durante toda a vida útil.

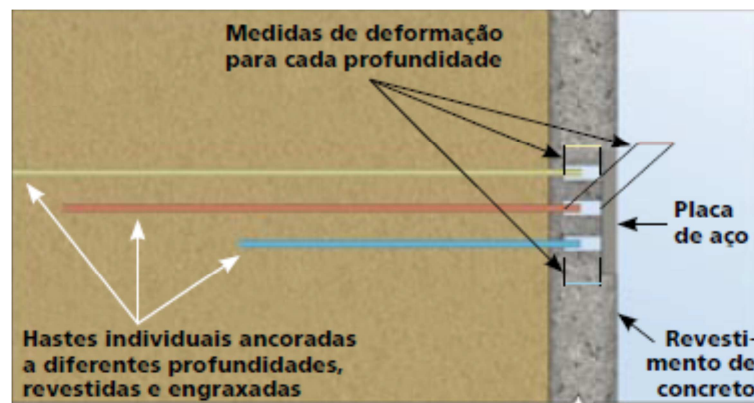


Figura 10.3.1 - Hastes individuais ancoradas (Zirlis e Pitta, 1992)

O inclinômetro, usado para medir deformações horizontais do solo, é instalado em furo aberto com trado à percussão de diâmetro 2½". É composto por uma haste cilíndrica com sensor de inclinação, dotado de duas ou quatro rodas e um tubo flexível, que deve ser cravado no solo.



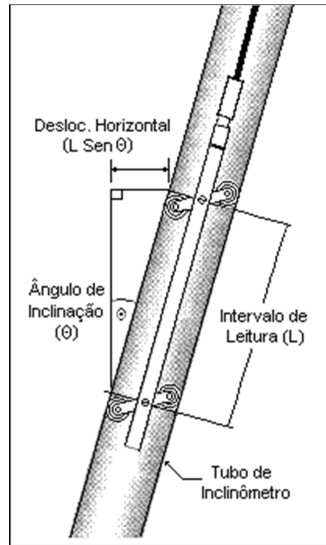


Figura 10.3.2 - Detalhe de inclinômetro

O interior do tubo possui ranhuras, que servem de “caminho” para as rodas do sensor. A medição é feita em intervalos constantes, de acordo com as dimensões do sensor, e o deslocamento horizontal do solo é calculado através do ângulo de inclinação encontrado em cada segmento:

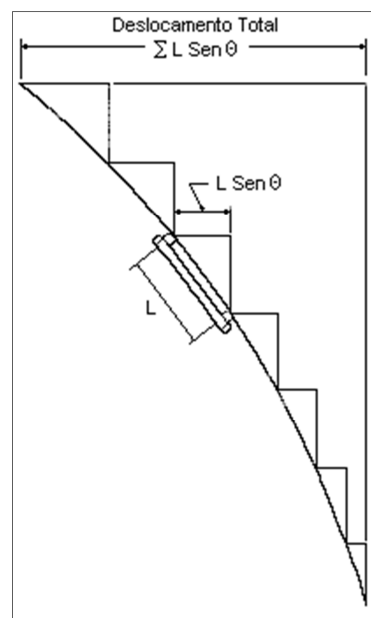


Figura 10.3.3 - Processo de medição usando inclinômetro

Esse procedimento pode ser feito através de inclinômetros fixos ou removíveis. No fixo, comumente usado apenas quando o instrumento será instalado em locais de difícil acesso (pelo seu alto custo), vários sensores são instalados em intervalos iguais e a medição pode ser

conferida a qualquer momento. Já no removível, um único sensor é colocado no fundo do tubo e, no momento da medição, vai sendo içado até a superfície em intervalos iguais ao seu comprimento.

A primeira medição estabelece o perfil inicial da área e as seguintes detectam as movimentações ocorridas.

Os pinos de recalque são utilizados para medição de movimentos verticais de estruturas. O processo é bastante simples: primeiramente é preciso solidarizar os pinos a elementos importantes e visíveis, como paredes de edificações vizinhas, onde o deslocamento vertical pode trazer maiores problemas. Em seguida, estabelece-se um nível de referência (RN), que não pode se alterar durante o desenvolvimento da obra. Através de instrumentos de topografia (como estação total) é possível encontrar o desnível entre o RN e os pinos e, já que o da RN é suposto fixo, consegue-se acompanhar a variação da posição vertical dos pinos entre as medições.



Figura 10.3.4 - Estação total

O uso de marcos superficiais na região do entorno acima da contenção é difundido e permite aferir os deslocamentos horizontais e verticais por meio de leituras com aparelhos de topografia. Para medição das pressões neutras desenvolvidas no maciço, podem ser instalados tanto piezômetros como tensiômetros.

Outros instrumentos mais caros e menos utilizados incluem inclinômetros e tell tales para medição dos deslocamentos horizontais e strain gauges em alguns grampos para medição

das deformações e estimativa das cargas nos grampos. Os mesmos devem ser posicionados em uma mesma seção ao longo da altura do maciço contido e devem ser devidamente calibrados (Nunes et al., 2006).

A vantagem do uso desses dispositivos está na obtenção de dados em tempo real, permitindo identificar um início de ruptura a tempo e acompanhar a evolução das deformações ao longo da escavação, além de confirmar as medidas obtidas com os extensômetros.

#### **10.4. Ensaio de arrancamento em grampos**

O principal parâmetro para dimensionamento é a resistência de atrito solo-grampo ou resistência ao arrancamento ( $q_s$ ), que depende das características do solo, tensão de confinamento, tipo de perfuração e limpeza dos furos, característica da calda de cimento, uso de aditivos, além das condições ambientais, como temperatura e umidade.

O método mais eficiente para obtê-lo é pelo ensaio de arrancamento, em que uma força estática é aplicada na cabeça do grampo, até às proximidades da ruptura pelo desenvolvimento de cisalhamento entre o grampo e o solo. Em fase de anteprojeto pode-se usar relações empíricas com  $N_{SPT}$  e tipo de solo para obter uma estimativa de  $q_s$  (Ortigão, 1997). Além disso, o parâmetro pode ser estimado a partir de ensaios pressiométricos.

Os ensaios podem ser em diferentes momentos da execução do muro de solo grampeado, sendo: preliminares (opcional, para técnicas inovadoras), de conformidade (para validar as hipóteses para  $q_s$  em nível de projeto), ou de controle (em estágio avançado da obra).

Os modos operatórios do ensaio possíveis são: deformação controlada (velocidade constante) e tensão controlada. Em ambos, a tração máxima aplicada deve ser limitada a 90% da tração limite de escoamento do aço.

Os grampos, executados especialmente para o ensaio devem possuir um trecho de comprimento livre de 1,0 m, para diminuir a influência da compressão gerada pela placa de reação no paramento e um trecho ancorado com injeção  $\ell_b$  superior a 3 m. A tração é aplicada pelo macaco hidráulico, com precisão de 0,5% a 1% na leitura. Os deslocamentos da cabeça do grampo são medidos com deflectômetros. Com isso se obtém a curva carga x deslocamento, da qual se determina a tração limite ( $T_{máx}$ ). Com a fórmula abaixo se obtém  $q_s$ . Pitta, Souza e Zirlis (2003) recomendam 1 ensaio para cada 10 grampos permanentes.

$$q_s = \frac{T_L}{\pi D q \ell_b} \quad (10.4.1)$$

O equipamento é composto por: macaco hidráulico; placa de reação, que centraliza a tração na armadura; grade de reação, que o mantém na mesma inclinação do grampo; célula de carga, que mede a carga transferida ao grampo; placa de referência, que permite a leitura dos deslocamentos e em que se apoia o extensômetro; porca para fixar a placa de referência; e suporte externo rígido para o extensômetro.

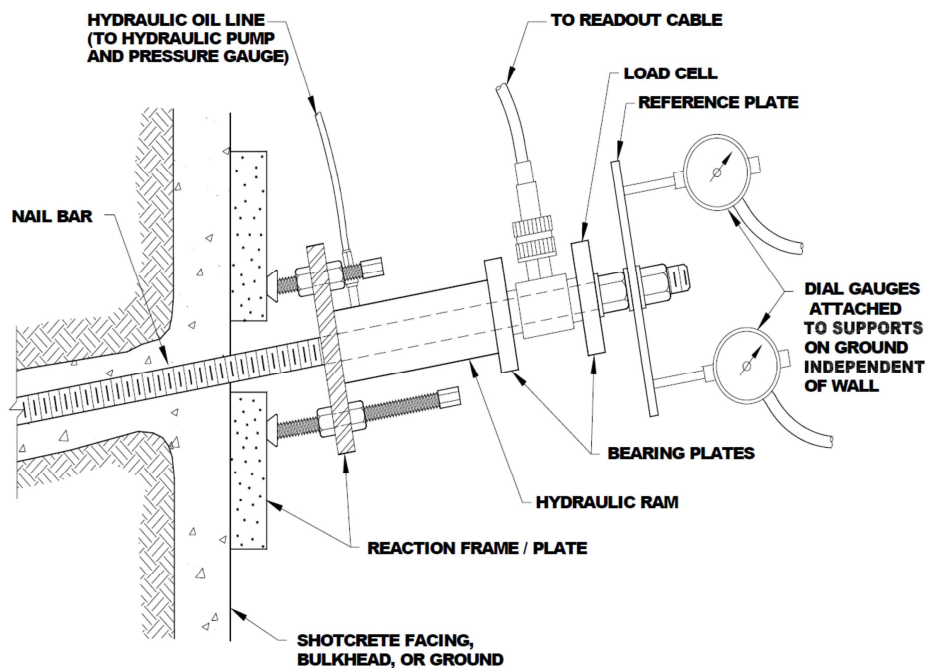


Figura 10.4.1 - Montagem do equipamento para o ensaio de arrancamento (FHWA, 2003)

O ensaio de deformação controlada permite obter a tração limite ( $T_{máx}$ ), a tração residual e a inclinação à origem da curva carga x deslocamento na cabeça do grampo. É mais recomendado para solos com baixo índice de plasticidade ( $IP < 20$ ).

Nele, o grampo é carregado com velocidade de deformação constante de 1,0 mm/min. São tomadas leituras de carga para  $t$  (s) = 1, 6, 12, 18, 24, 30, 60, continuando a cada 30 s até se atingir a força residual ou uma variação da tração no grampo inferior a 1% para um deslocamento de 1,0 mm. No descarregamento, são feitas as leituras a cada 1/10 do valor da força máxima atingida.

O ensaio de força controlada permite determinar a tração crítica de fluência ( $T_{c,f}$ ) e eventualmente a tração limite, que também pode ser estimada por correlações com o tipo de solo e a tração crítica de fluência.

Nele o grampo é carregado sucessivamente até a tração limite de arrancamento estimada ( $T_{LE}$ ), devendo ser inferior a 60% da carga de escoamento do aço ( $T_G$ ). Os carregamentos são de 10 em 10% de  $T_{LE}$ , a começar por 20%  $T_{LE}$ , com duração de 60 minutos (exceto para 70% $T_{LE}$ , que é mantido por três horas).

O primeiro valor de deslocamento, no entanto, é anotado para 10% $T_{LE}$ . Os deslocamentos são medidos para os instantes  $t$  (min) = 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 45 e 60 (e a cada 15 min para 70% $T_{LE}$ ). Em caso de não ser verificada a ruptura, as fases de carregamento continuam de 10 em 10% de  $T_{LE}$  até a fase 15, não ultrapassando 0,9 $T_G$ . No descarregamento, são feitas as leituras a cada 1/10 do valor da força limite de arrancamento.

## 11. MÉTODOS DE ANÁLISE

### 11.1. Classificação dos métodos

O fundamento dos métodos de métodos de análise para dimensionamento do solo grampeado são as propriedades mecânicas do solo e dos grampos. Os mais utilizados se baseiam na análise por equilíbrio limite, como: Stocker e outros (1979), Gigan (1986), Jewel (1986 e 1990) e Schlosser (1982). Seus modelos são mais simples e utilizam parâmetros usuais de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito), mas não permitem a previsão de deslocamentos. Os modelos devem ser bem calibrados (com parâmetros e condições de contorno) para fornecerem boas previsões de comportamento.

Os métodos baseados em tensões internas, como Juran et al (1988) e na teoria de escoamento, como Anthoine (1990) e Silva (2006) são menos usados na prática. Os modelos de tensões internas são mais complexos, utilizam parâmetros de deformabilidade e permitem a previsão dos deslocamentos. Essa informação é desejável, considerando que os grampos dependem das deformações do solo para mobilizarem a resistência por atrito e estas devem ser limitadas, para não prejudicar estruturas vizinhas.

As análises são normalmente bidimensionais, o que é adequado para reforços com continuidade longitudinal e é usual que considerem o solo como material homogêneo isotrópico e regime elástico linear.

### **11.2. Análise de equilíbrio limite**

Todos os métodos de equilíbrio-limite têm a limitação de considerar comportamento rígido-plástico antes da ruptura. Além disso, todos levam em conta o esforço de tração nos grampos e que seu valor máximo é atingido na interseção com a superfície de ruptura, permitem considerar os efeitos das pressões neutras, mas não têm proposta de cálculo do paramento de concreto projetado.

Esses métodos podem diferir na forma de representação da superfície de escorregamento, na influência dos grampos sobre a forma da superfície de ruptura e na contribuição dos grampos quanto aos esforços. Em alguns métodos não é levada em conta a resistência à flexão e a forças cortantes (desprezando a rigidez da seção transversal dos grampos). A contribuição individual dos grampos e a consideração de fatores de segurança parciais também são outras divergências encontradas.

É comum a adaptação de métodos tradicionais de cálculo de estabilidade para considerar o efeito dos grampos na determinação do coeficiente de segurança global. Dentre esses métodos, pode-se citar Spencer, Morgenstern-Price e Bishop simplificado, o mais usualmente empregado.

No método de Bishop simplificado o efeito dos grampos pode ser considerado como acréscimos ao momento resistente, multiplicando-se a força de cada grampo pelo respectivo braço de alavanca em relação ao centro da circunferência adotada para a superfície de ruptura. Também é possível se considerar a força dos grampos na equação de equilíbrio de cada lamela interceptada em sua base por um grampo.

Tabela 11.2.1 - Características de métodos de análise de estabilidade tradicionais

| Método                                           | Multicritério                                                              | Alemão                                            | Davis                                                   | Davis modificado                                        | Cardiff                                                                    | Escoamento                                  | Cinemático                                        | Homogeneização                                    |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Referência                                       | Schlosser (1982 e 1983)                                                    | Stocker et al. (1979), Gässler e Gudehus (1981)   | Shen et al. (1981)                                      | Elias e Juran (1990)                                    | Bridle (1989), Bridle e Barr (1990)                                        | Anthoine (1990)                             | Juran et al.(1988 e 1990)                         | Hachich (1997)                                    |
| Análise                                          | Equilíbrio limite - momentos<br>Estabilidade global                        | Equilíbrio limite - forças<br>Estabilidade global | Equilíbrio limite - forças<br>Estabilidade global       | Equilíbrio limite - forças<br>Estabilidade global       | Equilíbrio limite - forças<br>Estabilidade global                          | Teoria do Escoamento<br>Estabilidade global | Análise de tensões internas<br>Estabilidade local | Equilíbrio limite - forças<br>Estabilidade global |
| Parâmetros do solo                               | $c', \phi'$                                                                | $c, \phi$                                         | $c, \phi$                                               | $c, \phi$                                               | $c, \phi$                                                                  | $c, \phi$                                   | $c', \phi'$                                       | $c', \phi'$                                       |
| Parâmetros dos grampos/<br>interface solo-grampo | força limite e rigidez à flexão dos grampos, resistência de atrito lateral | resistência de atrito lateral                     | força limite dos grampos, resistência de atrito lateral | força limite dos grampos, resistência de atrito lateral | força limite e rigidez à flexão dos grampos, resistência de atrito lateral | força limite dos grampos                    | Adimensional de rigidez à flexão (N)              | força limite e resistência de atrito lateral      |
| Solicitações nos grampos                         | Tração, cisalhamento e flexão                                              | Tração                                            | Tração                                                  | Tração                                                  | Tração, cisalhamento e flexão                                              | Tração                                      | Tração, cisalhamento e flexão                     | Tração                                            |
| Forma da superfície de ruptura                   | Circular ou poligonal                                                      | Bilinear                                          | Parabólica                                              | Parabólica                                              | Espiral logarítmica                                                        | Espiral logarítmica                         | Espiral logarítmica                               | Circular ou poligonal                             |
| Mecanismo de ruptura                             | Misto                                                                      | Arrancamento dos grampos                          | Misto                                                   | Misto                                                   | Misto                                                                      | Misto                                       | Misto                                             | Misto                                             |
| Influência do NA                                 | Sim                                                                        | Não                                               | Não                                                     | Não                                                     | Não                                                                        | Não                                         | Sim                                               | Sim                                               |
| Solo estratificado                               | Sim                                                                        | Não                                               | Não                                                     | Não                                                     | Não                                                                        | Não                                         | Sim                                               | Sim                                               |
| Geometria da estrutura                           | Qualquer                                                                   | Face vertical ou inclinada                        | Face vertical                                           | Face vertical ou inclinada                              | Face vertical ou inclinada                                                 | Face vertical ou inclinada                  | Face vertical ou inclinada                        | Face vertical ou inclinada                        |

O valor da força de cada grampo, no entanto, pode levar a problemas de convergência no método de Bishop simplificado, que é iterativo, e até levar a um mecanismo de ruptura inconsistente. A consideração da rigidez transversal dos grampos, e portanto da resistência à flexão dos grampos é pouco significativa para grampos com diâmetros usuais, cerca de 10% de acréscimo na resistência (Schosser, 1991 apud Clouterre, 1991).

### 11.3. Método Alemão

O modelo proposto por Stocker et al. (1979) apud Clouterre (1991), que se baseia em uma superfície de ruptura potencial de forma Bilinear, resultou de experiências em modelos reduzidos em laboratório. O cálculo do coeficiente de segurança global, razão entre as forças resistentes (reações do solo ao longo da superfície de ruptura e tração dos grampos) e as forças solicitantes (peso, sobrecargas) usa a aproximação cinemática da análise limite.

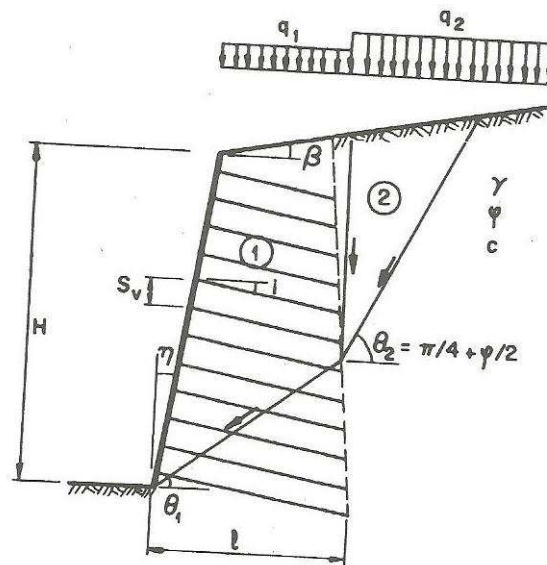


Figura 11.3.1 - Modelo do método Alemão (Stocker et al., 1979 apud Clouterre, 1991)

A resistência à ruptura dos grampos é dada pelo menor valor entre a resistência à tração do aço e a resistência ao arrancamento. O ângulo  $\theta_2$  é fixado em  $\pi/4 + \phi/2$  e o ângulo  $\theta_1$  da superfície linear passando pelo pé da contenção é obtido iterativamente até se obter o mínimo fator de segurança global.

O cálculo considera o equilíbrio de dois blocos com uma superfície vertical de escorregamento em comum. As diferentes camadas de solo devem ser consideradas como um



único maciço homogêneo com propriedades mecânicas ponderadas pela respectiva resistência ao cisalhamento e não se considera presença d'água.

Posteriormente o método passou a ser formulado com coeficientes de segurança parciais para os parâmetros  $c$ ,  $\phi$ ,  $q_s$  e a resistência à tração da armadura dos grampos (Gässler e Gudehus, 1983 apud Clouterre, 1991).

O método apresenta pontos problemáticos: as experiências mostram que a superfície de ruptura interna é curva e não pode ser modelada por uma reta e o mecanismo de ruptura mista proposto, por dois blocos, apesar de ser observado em experimentos com sobrecargas localizadas atrás do muro, não é sempre o modo de ruptura mais desfavorável na realidade.

#### **11.4. Método de Davis**

Apresentado na Universidade de Davis, Califórnia e Formulado por Shen (1978) apud Clouterre (1991), o método considera como superfícies de ruptura potenciais parábolas com vértices no pé do paramento.

Supõe solo homogêneo e sem presença d'água, com geometria simples: paramento vertical, superfície do topo horizontal e linhas de grampos paralelas, igualmente espaçadas e de mesmos comprimentos, resistindo apenas à tração.

Considera ainda dois blocos separados por uma vertical, que passa pelas extremidades dos grampos, em que atuam entre os blocos uma força que considera a razão entre a tensão horizontal e a vertical igual a 0,4 em solos granulares e 0,5 em solos coesivos.

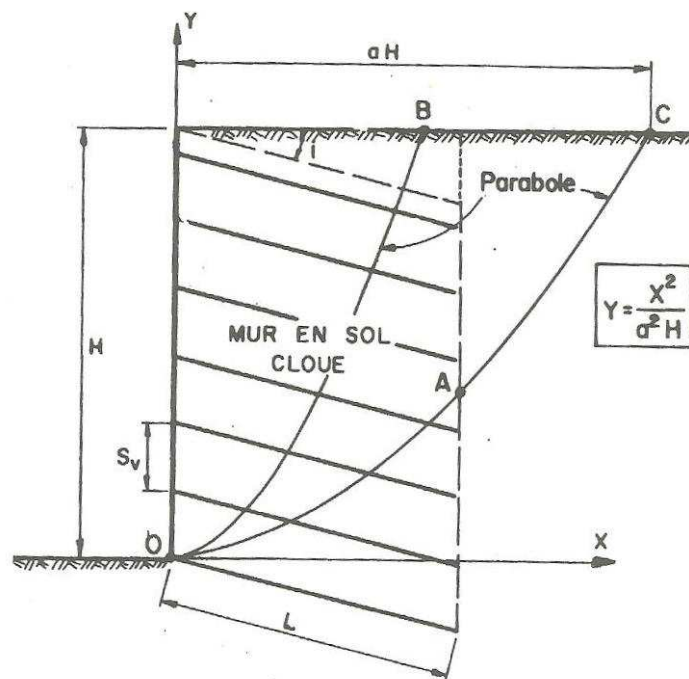


Figura 11.4.1 - Modelo do Método de Davis (Shen, 1978 apud Clouterre, 1991)

O fator de segurança global ( $F$ ) é o mesmo para a coesão ( $c$ ) e o atrito interno ( $\tan\phi$ ), sendo a resistência de ruptura o menor valor entre a resistência à tração do aço ( $TG$ ) e ao arrancamento ( $TL$ ). O coeficiente é calculado para a parábola mais crítica.

O modelo condiz com algumas experiências de rupturas em muros de solo grampeado com a geometria por ele proposta e recebeu modificações posteriores para atender a geometrias mais complexas.

### 11.5. Método de Juran

Análogo ao método de Juran para cálculo de terra armada, Juran et al (1988) apud Clouterre (1991) considera superfície de ruptura potencial com forma de espiral logarítmica passando pelo pé da contenção. O maciço por ela delimitado é dividido em lamelas paralelas aos grampos, de modo que, pelo modelo, a componente horizontal dos esforços entre lamelas se anula. O solo é considerado homogêneo e sem presença d'água.

O método permite o cálculo do esforço de cada grampo (tração e força cortante) a partir do equilíbrio local de cada lamela, permitindo o dimensionamento de cada fileira de grampos de modo a prevenir contra os efeitos de acréscimo de esforços de uma eventual ruptura progressiva. No entanto não é possível a previsão de rupturas mistas.

O esforço cortante resistente é considerado máximo na interseção com a superfície de ruptura potencial. A resistência à flexão é determinada pelo adimensional N. Força cortante e tração máximas são definidas pelos adimensionais TC e TN respectivamente em ábacos para um N pré-definido.

$$N = \frac{k_s D \ell_o^2}{\gamma H S_v S_h} \quad (11.5.1)$$

$$TC = \frac{T_c}{\gamma H S_v S_h} \quad (11.5.2)$$

$$TN = \frac{T_n}{\gamma H S_v S_h} \quad (11.5.3)$$

As grandezas envolvidas nesses parâmetros são: coeficiente de reação lateral do solo ( $k_s$ ), comprimento de ancoragem dos grampos ( $\ell_b$ ), diâmetro dos grampos (D), espaçamento vertical entre grampos ( $S_v$ ), espaçamento horizontal entre grampos ( $S_h$ ), peso específico do solo ( $\gamma$ ) e altura do muro em solo grampeado (H).



A ruptura dos grampos pode ocorrer por combinação de tração e cisalhamento na interseção com a superfície de ruptura potencial ou por plastificação onde há momentos fletores máximos, fora dessa superfície. Com barras de ferro dúcteis esse último modo não ocorre, sendo que a pressão lateral do solo impede grandes deformações. Nesse processo pode ocorrer formação de rótulas plásticas. A plastificação ocorre para uma pressão máxima na superfície de ruptura ( $p_0$ ).

A ruptura na interface solo-grampo pode se dar pela falta de aderência, quando o atrito lateral atinge  $q_s$  ou por punção quando a pressão lateral ( $p$ ) exercida pelo grampo sobre o solo atinge o valor de sua resistência ( $p_u$ ).

Isso deu origem ao Método Multicritério, em que os esforços nos grampos na interseção com a superfície de ruptura (onde não há esforço de flexão) são representados no plano de força normal e cortante ( $T_n$ ,  $T_c$ ) delimitados pelos seguintes critérios de ruptura:

- 1) Atrito lateral solo grampo (falta de aderência):

$$T_n = q_s \pi D \ell_b \quad (11.6.1)$$

- 2) Pressão lateral solo –grampo

$$p_0 = \frac{2T_{c0}}{D_c \ell_0} \quad (11.6.2)$$

–  $p_u \leq p_0$  (plastificação do solo antes do aço):

$$T_{c1} = p_u D \ell_0 / 2 \quad (11.6.3)$$

–  $p_u > p_0$  (rótulas plásticas na armadura):

$$T_{c2} = 1,62 \frac{M_0}{\ell_0} \left[ 1 - \left( \frac{T_n}{R_n} \right)^2 \right] + 0,24 p_u D \ell_0 \quad \text{eq. 11.6.4}$$

- 3) Tração e cisalhamento no grampo:

$$(T_c/R_c)^2 + (T_n/R_n)^2 = 1$$

(11.6.5)

4) Plastificação do grampo:

$$T_{c0} = 3,12 \frac{M_0}{\ell_0} \left[ 1 - \left( \frac{T_n}{R_n} \right)^2 \right]$$

(11.6.6)

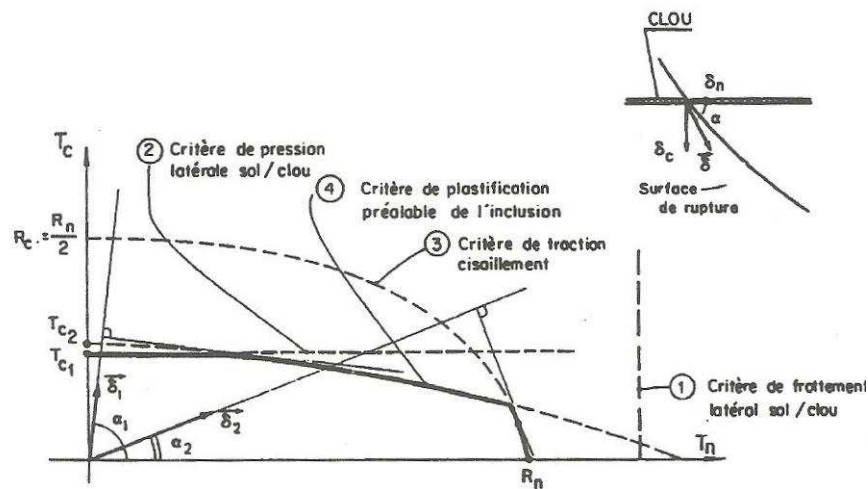


Figura 11.6.1 - Diagrama Multicritério (Schlosser, 1982 apud Clouterre, 1991)

Algumas hipóteses simplificadoras feitas são: a ruptura do solo em repouso ocorre com plastificação de um primeiro ponto do solo (o que é a favor da segurança, mas é possível considerar a plastificação ao longo de um certo comprimento de grampo); plastificação da armadura de aço em apenas duas seções com formação de rótulas (a plastificação não necessariamente é completa na seção, e pode ser desenvolvida ao longo de um comprimento de grampo, que pode aumentar de acordo com a solicitação).

## 12. ASPECTOS GEOTÉCNICOS DA BACIA DE SÃO PAULO

Como o estudo de caso desse trabalho é de uma contenção na cidade de São Paulo, faz-se necessária uma introdução aos aspectos geotécnicos de seus solos típicos. Os sedimentos de São Paulo podem ser agrupados, segundo Milton Vargas (2002), em: areias basais; argilas e areias cinza-esverdeadas; camadas intermediárias de argilas e areias; argilas vermelhas rijas; argilas porosas; aluviões antigos entre outras.

Podem ser feitas associações entre essas camadas e as formações geológicas tradicionais (São Paulo, Resende, Tremembé e Itaquaquecetuba). A formação Resende corresponderia às areias basais, argilas pouco arenosas cinza-esverdeadas e areias cinzentas pouco argilosas, abaixo da cota 750m.

A formação Tremembé corresponderia a sedimentos argilosos lacustres encontrados nas escavações da Estação Barra Funda da linha vermelha. A formação São Paulo estaria relacionada às areias e argilas siltosas com lentes de areias argilosas finas e médias e às argilas vermelhas entre as cotas 750 e 820m, com camadas superficiais do espigão central bastante intemperizadas, com lateritas e afetadas pela pedogênese.

A formação Itaquaquecetuba, por fim, corresponderia a camadas de matriz arenosa, sem argila, com conglomerados, blocos e matacões em vales sob aluviões recentes com argila orgânica na superfície. Outra forma de classificação, geomorfológica, introduzida por Ab'Saber em 1957 adequa-se bem à caracterização geotécnica.

A partir das investigações acumuladas pelo IPT desde 1938 e no Departamento de Geologia da USP, com especial importância dos cortes geológicos de Vera Cozzolino, foram traçados cortes geotécnicos N-S (figura 12.1) e E-W (figura 12.2), que resumem a estratigrafia (aproximada) das camadas terciárias de São Paulo do ponto de vista geotécnico de acordo com Ab'Saber (Vargas, 2002), listadas a seguir.

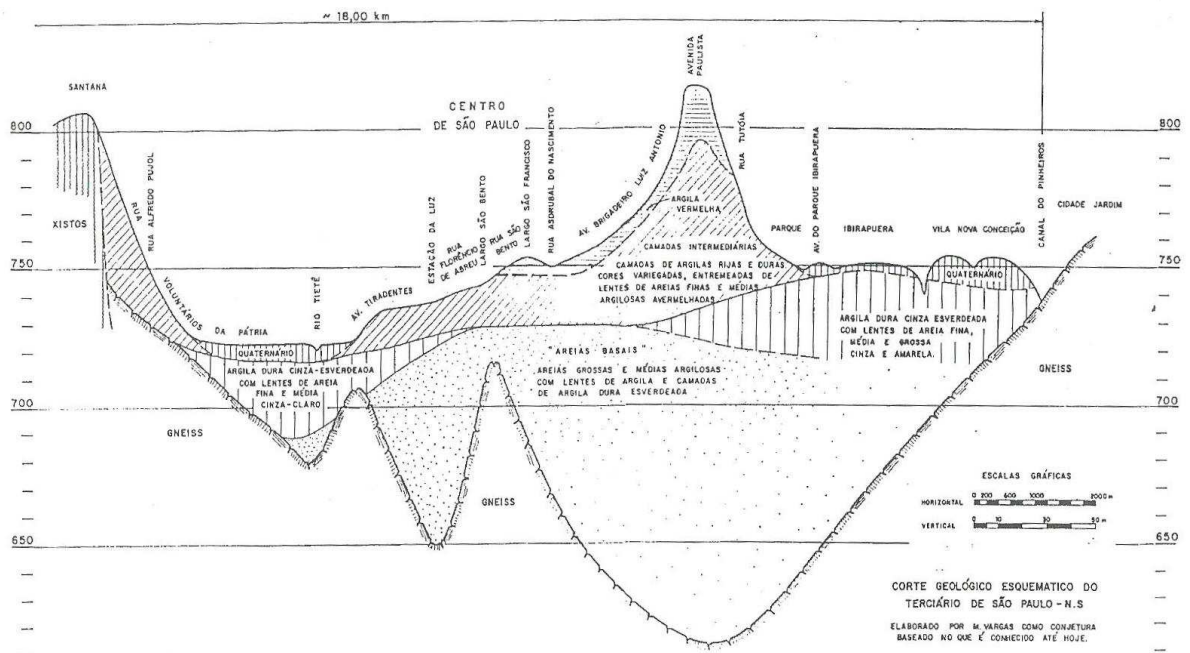


Figura 12.1 - Corte esquemático N-S da bacia de São Paulo. (Vargas, 2002)

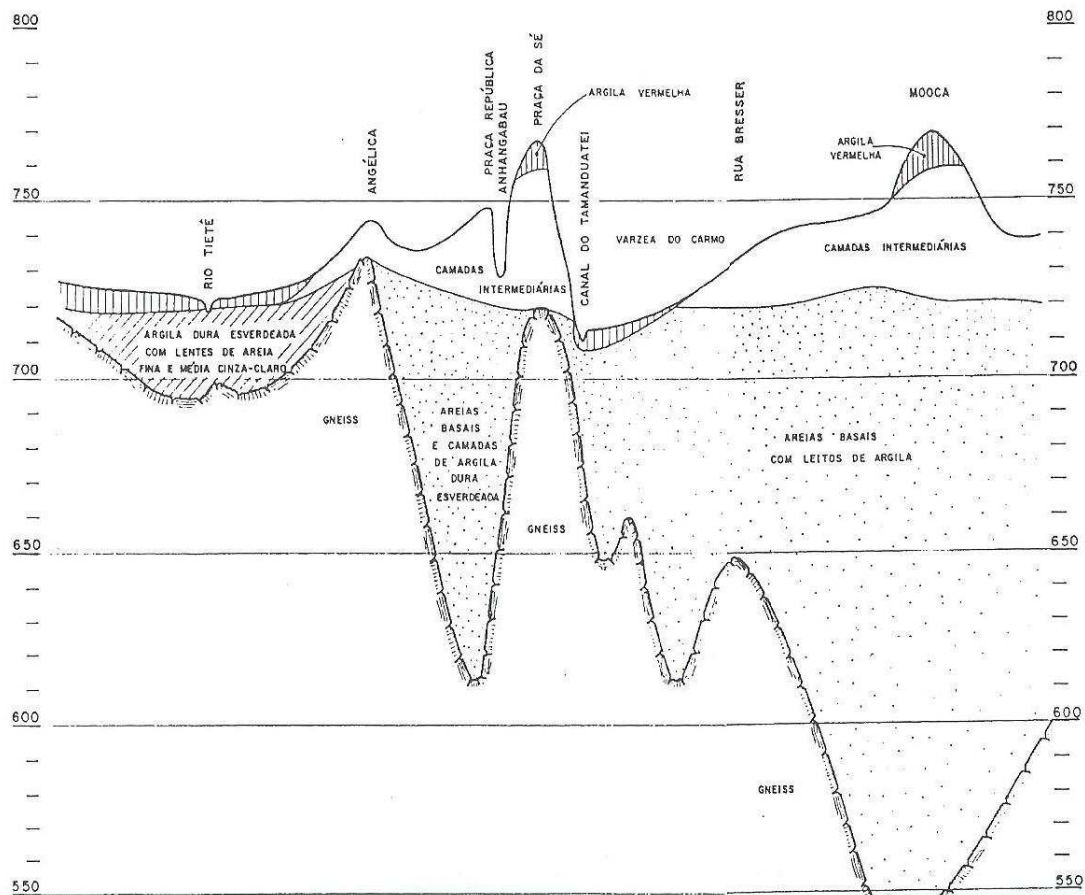


Figura 12.2 - Corte esquemático E-W da bacia de São Paulo (Vargas, 2002)



a) Alteração de rocha: solos residuais areno-argilosos derivados da decomposição do embasamento cristalino granito-gnaissico. É encontrado próximo à superfície nos vales do Tietê e Pinheiros além dos bairros de Higienópolis e Santa Cecília. Possui espessura média de 50 a 70m.

b) Areias basais: são areias grossas ou médias argilosas de coloração amarela avermelhada de compactidade variando de fofa à compacta horizontal e verticalmente. São encontradas em todo o Centro da Cidade sob as argilas, siltes e areias finas variegadas abaixo do nível d'água (na cota aproximada 720).

c) Argilas duras cinza esverdeada – com manchas marrom e brancas: de consistência dura, pré-adensadas. São encontradas nos vales do Tietê, Pinheiros e Tamanduateí e bairros do Ipiranga e Itaquera. Sua posição em relação às areias basais no Centro da Cidade aparece na figura 12.1. Evidências sugerem sua presença em toda a bacia de São Paulo, sobre o leito de alteração de rocha ou as areias basais.

d) Argilas rijas, siltes e areias finas de cores variegadas: são as Camadas Intermediárias, encontradas em todo o Centro da Cidade. Aparecem como camadas finas alternadas, segundo ambiente fluvial meandrante ou de praia. Há evidências de que ocorrem em todos os terraços ao redor do Espigão Central.

e) Argilas duras vermelhas e amarelas: Aparecem no Espigão da Av. Paulista ao Jabaquara, sob camada de argilas porosas vermelhas de espessura média 8m, entre as cotas aproximadas 750 e 800.

f) Argilas porosas vermelhas: solos que passaram por processo de laterização, com macroestruturas que mostram poros visíveis a olho nu. Entre essa camada e as argilas duras vermelhas e amarelas formou-se um leito de concreções de limonita responsável pelas pressões de pré-adensamento das últimas.

Além dessas camadas do terciário, foram identificadas coberturas quaternárias de areias e pedregulhos puros sobre os vales dos rios atuais, da formação Itaquaquetuba e camadas de argila orgânica preta mole muito compressíveis.

A sedimentação da Bacia de São Paulo teria começado por depósitos fluviais meandantes e lacustres em toda sua área, atingindo a cota 820 e sendo erodida formando o relevo atual. (Vargas, 2002)

## Parte II: O Projeto e a execução da contenção em solo grampeado do Edifício Corporativo – Turiassu

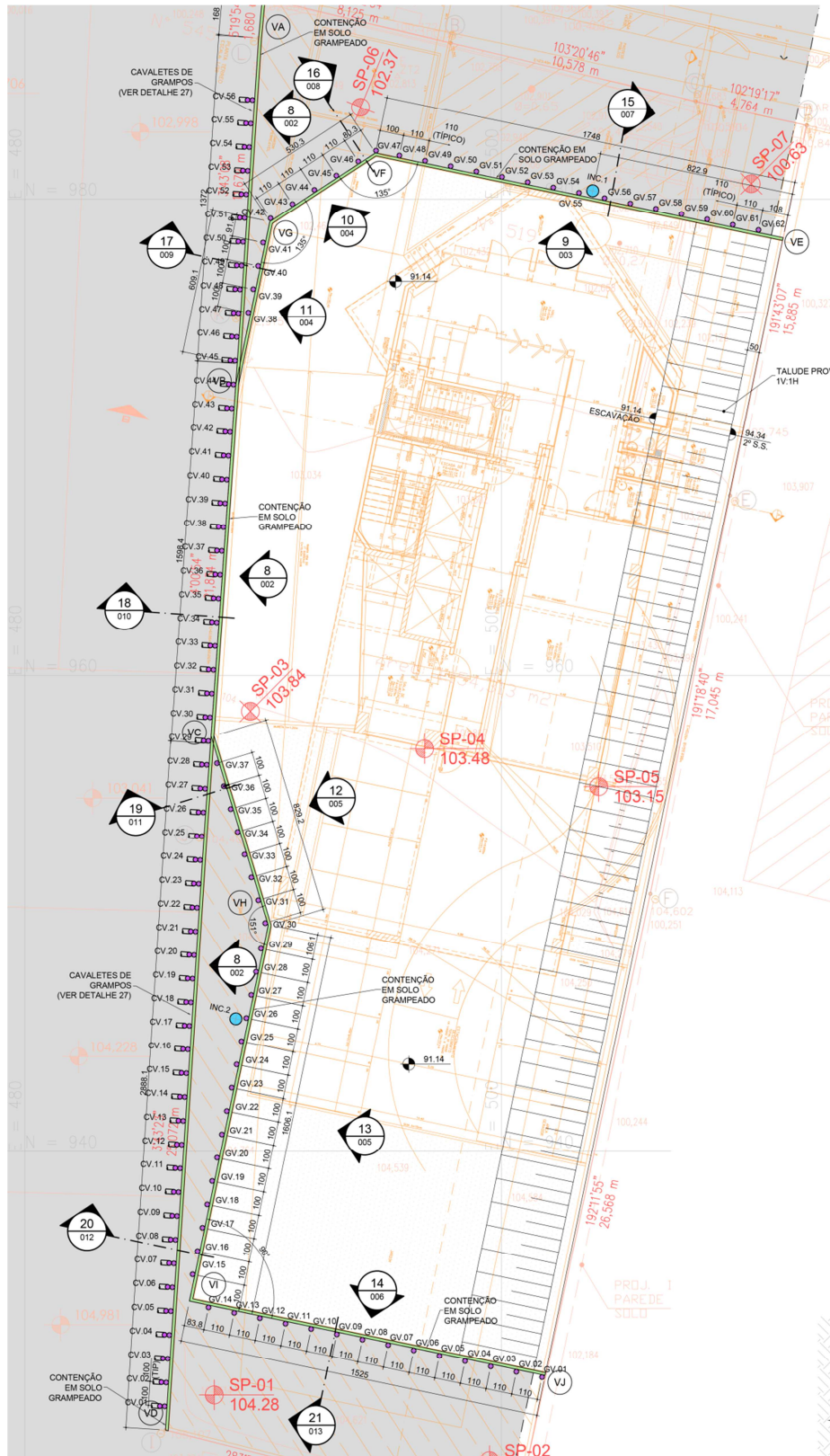


Figura 13.1 - Planta geral do projeto da contenção

### 13. PROJETO DA CONTENÇÃO

A contenção do Edifício Corporativo – Turiassu foi concebida para ser obra permanente e parede acabada para seus três subsolos, funcionando como um sistema independente da estrutura principal. A opção por solo grampeado decorreu de um estudo de viabilidade conduzido pela arquitetura e a Interact, empresa de consultoria e projetos em engenharia.

O motivo principal dessa escolha foi a necessidade de espaço para vagas de garagem: o solo grampeado, por ter parede de pequena espessura (paramento) ocupa menos área que a opção por contenção em perfis metálicos e pranchas (perfil pranchado) ou cortina atirantada com parede de alvenaria.

A área a ser grampeada é de 984m<sup>2</sup>, detalhada no projeto executivo da Interact conforme a planta geral (figura 13.1). No total, o projeto prevê 950 grampos e 299 drenos horizontais profundos (DHPs) além de 890m de drenos de paramento, cujas distribuições serão expostas nos parágrafos seguintes. O uso de DHPs pode rebaixar o nível d'água, fazendo os vizinhos (casas) recalcarem. Os DHPs também não estão na condição de máxima eficiência, que corresponderia à área anelar pequena e extensão até camada de areia.

A lateral esquerda (figura 13.1) concentra as maiores alturas de escavação – aproximadamente 12m - e preocupações relacionadas à execução da contenção, pois nelas há pequenas casas antigas com fundações diretas do tipo alicerce, que são mais suscetíveis aos problemas decorrentes de deslocamentos do solo.

Por isso o projeto previu a execução de um reforço do solo em reticulado de cavaletes de grampos nessa lateral, anterior à escavação dos subsolos. Os cavaletes também resistem a esforços horizontais. Cada um deles é composto de dois grampos subverticais, com inclinações de 5° e 15° solidarizados a uma viga de coroamento de seção 32 x 30, conforme a figura 10.2.

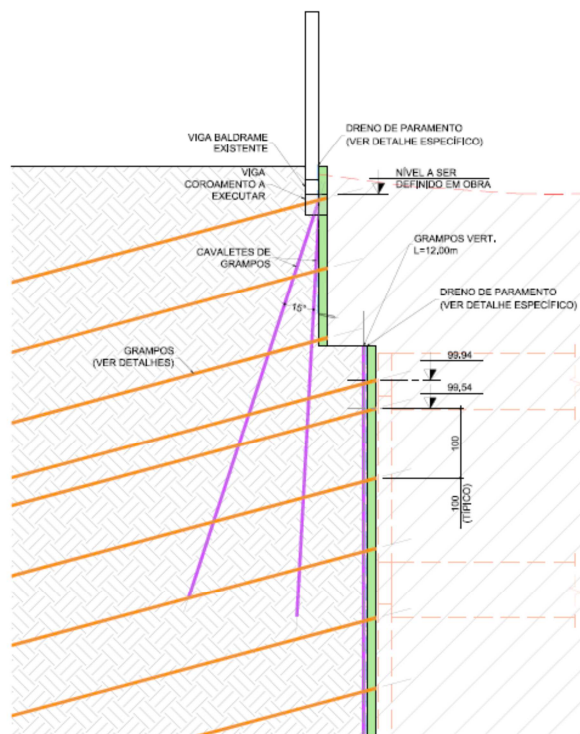


Figura 13.2 - Detalhes típicos dos cavaletes

Para garantir a estabilidade das casas e seus muros, o projeto previu pilares apoiados na viga baldrame que percorrerá o terreno na mesma cota da fundação das casas (figura 13.3).



(a)



(b)

Figura 13.3 - (a) e (b) Pilares recém-concretados

A seguir serão quantificados os grampos e DHPs.

Na lateral esquerda, serão executados 328 grampos e 60 DHPs, dispostos conforme as imagens abaixo:

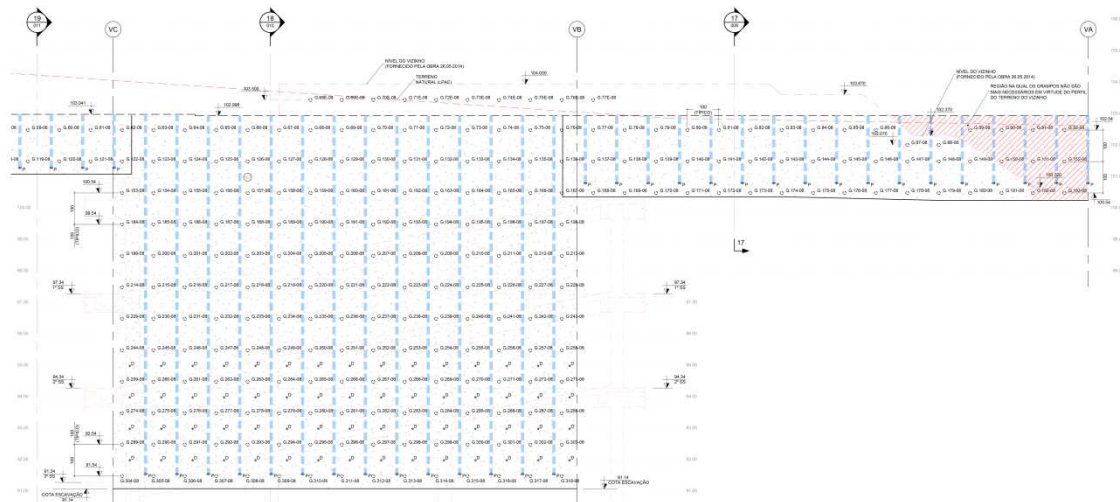
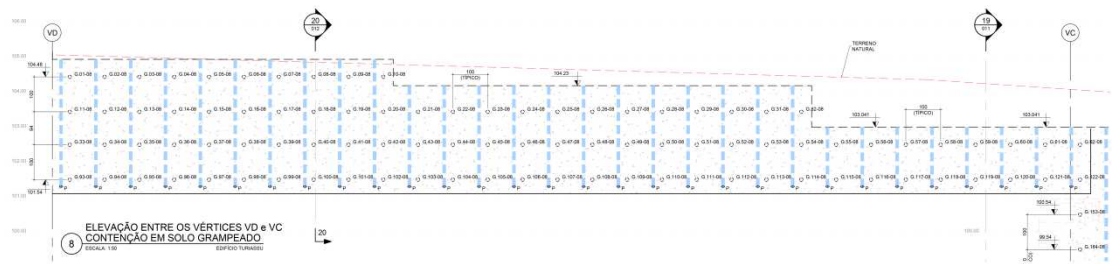


Figura 13.4 - Elevação 8 do projeto



Já nos fundos do terreno (vista 14), serão usados 126 grampos e 52 DHPs, conforme figura abaixo.

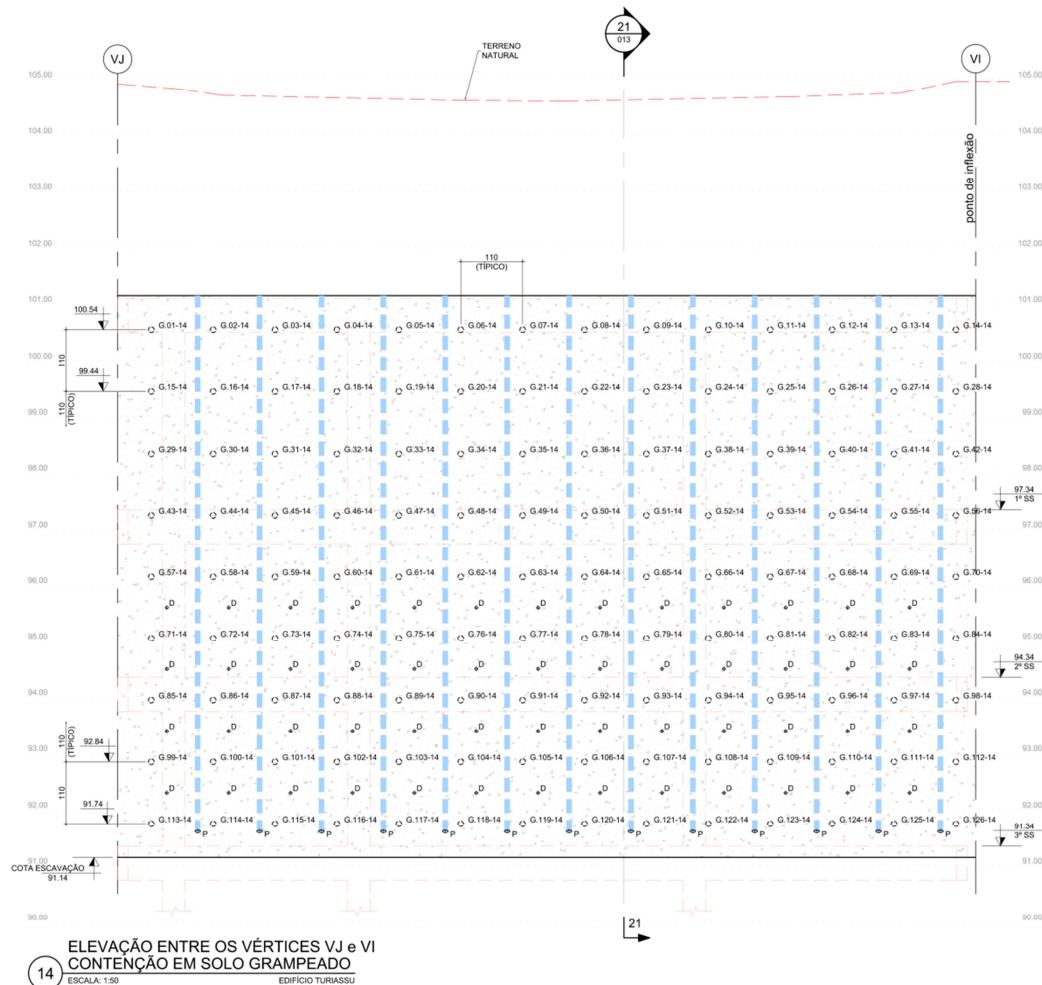


Figura 13.5 - Elevação 14 do projeto

Nos chanfros que ligam a lateral esquerda à frente do terreno (vistas 10 e 11), a disposição dos grampos e drenos é mostrada a seguir, somando 115 grampos e 43 DHPs:

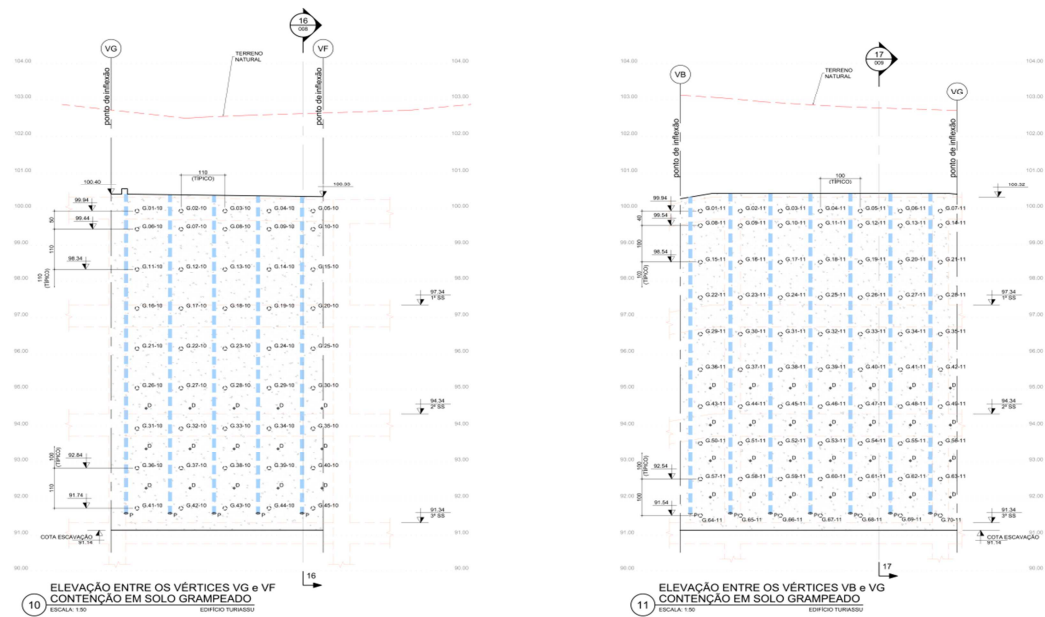


Figura 13.6 - Elevações 10 e 11

Já nos chanfros 12 e 13, que ligam a lateral esquerda do terreno aos fundos, serão executados mais 240 grampos e 96 DHPs.

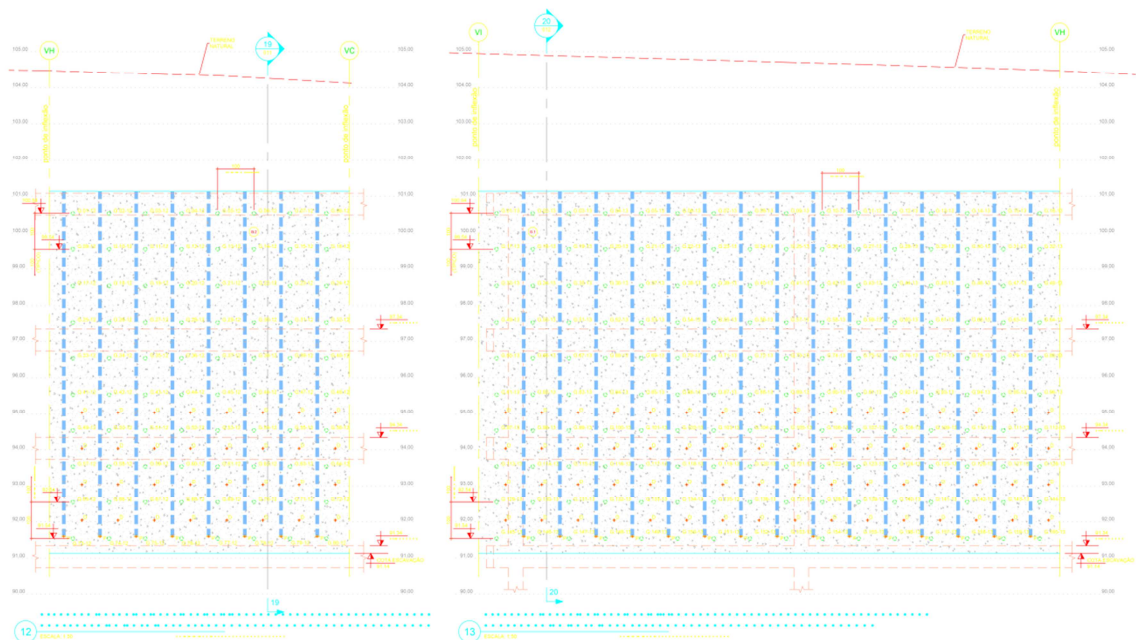


Figura 13.7 - Elevação 12

Por fim, na frente do terreno (vista 9), o projeto prevê 141 grampos e 48 DHPs.

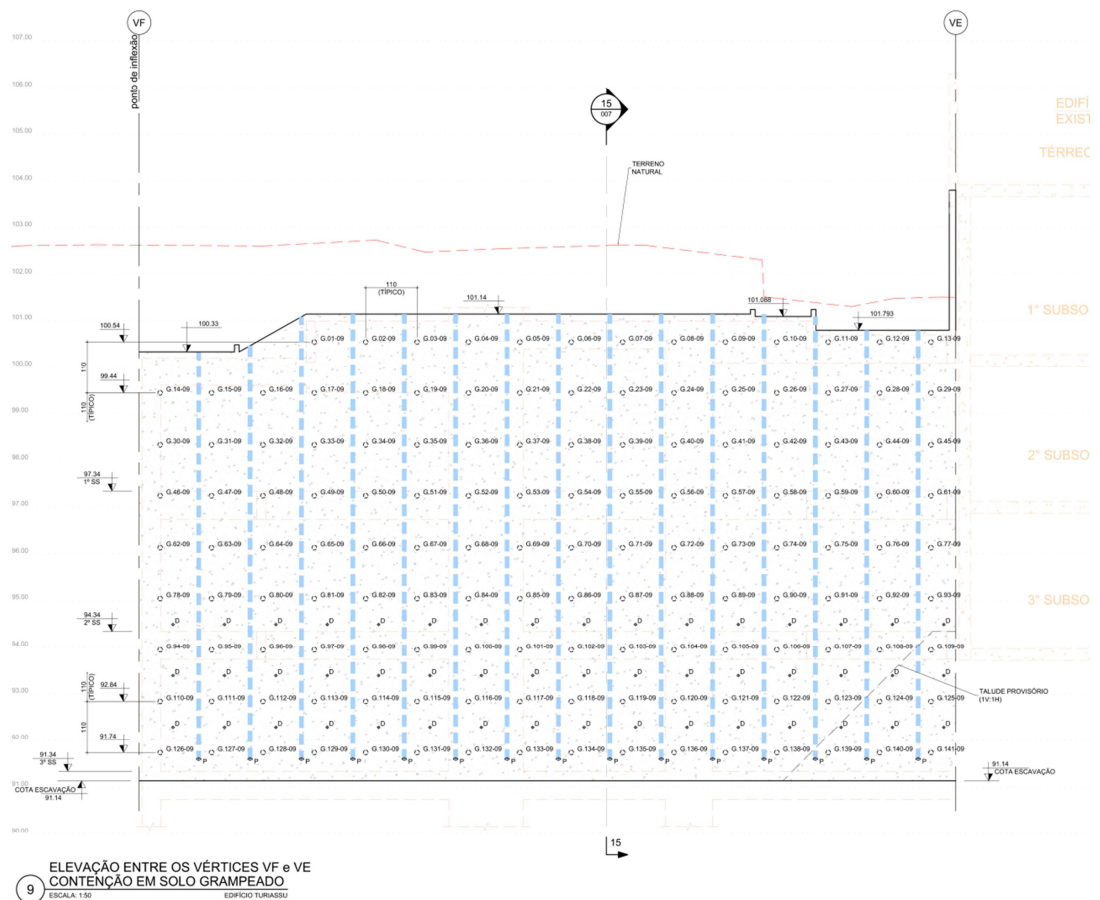


Figura 13.8 - Elevação 9

Na lateral direita do terreno há uma contenção em perfil pranchado de um prédio existente: a Torre Figueira do condomínio Vergê Perdizes, também com três subsolos, sendo que o terceiro está 2,7m acima da cota final de escavação do Edifício Corporativo – Turiassu.

Se por um lado isso dispensa a necessidade de criar uma contenção nessa região, por outro, traz preocupações: o edifício, esbelto, talvez sofra grandes deformações uma vez que as escavações aumentarem, diminuindo o empuxo resistente de solo; a ficha da contenção pode ficar com comprimento insuficiente durante a escavação e descalçar a fundação da torre.

A tabela que segue apresenta um resumo de quantidades do projeto.

Tabela 13.1 - Resumo do projeto de solo grampeado

| Vista | Grampos | Espaçamento Horizontal (cm) | Espaçamento Vertical (cm) | Área de solo grampeado (m²) | DHPs |
|-------|---------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|------|
| 8     | 328     | 100                         | 100 ou 94                 | 306,55                      | 60   |
| 9     | 141     | 110                         | 110                       | 170,04                      | 48   |
| 10    | 115     | 110                         | 110 ou 50                 | 48,4                        | 43   |
| 11    |         | 100                         | 100 ou 40                 | 62,2                        |      |



|       |     |     |     |        |     |
|-------|-----|-----|-----|--------|-----|
| 12    | 240 | 100 | 100 | 82,8   | 96  |
| 13    |     | 100 | 100 | 160,64 |     |
| 14    | 126 | 110 | 110 | 153,38 | 52  |
| Total | 950 | -   | -   | 984,01 | 299 |

Foram feitas adaptações no projeto conforme a execução da obra avançava e eram levantadas novas informações de campo. As principais ocorreram próximas da seção 17 (canto noroeste do terreno, próximo à rua Turiassu):

1. Estavam previstos grampos horizontais que invadiriam o corredor da residência vizinha. Eles foram retirados do projeto.

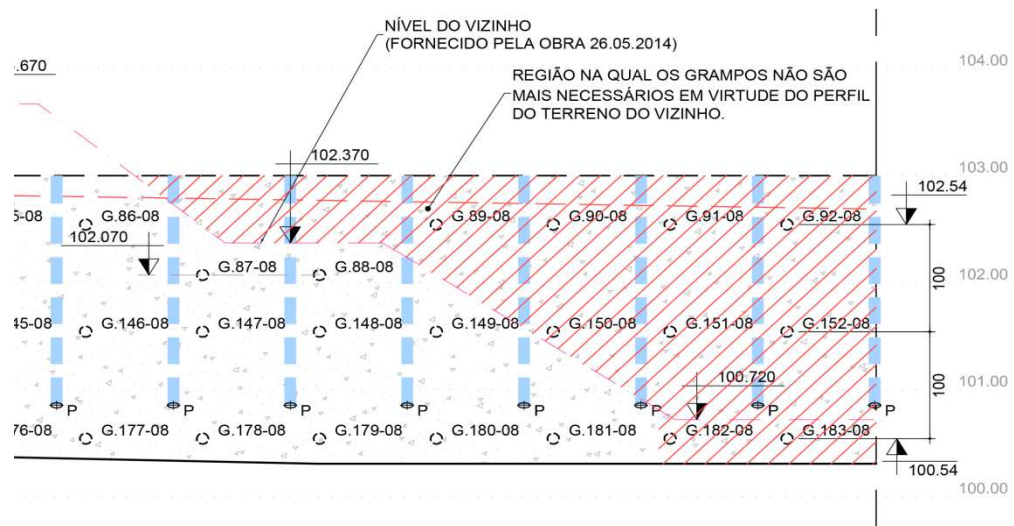


Figura 13.9 - Alterações no grampeamento

2. A fundação de uma das casas termina em uma cota 1 metro acima das vizinhas. Essa faixa de terra não prevista no projeto inicial será contida com uma mudança na viga baldrame. Ela vira 90° para cima, caminhará um metro envolve segue ao longo da faixa de terra e depois vira mais 90° para baixo, até voltar para sua cota inicial, de onde prossegue até a frente do terreno.



Figura 13.10 - Alteração da viga baldrame

3. Quatro cavaletes próximos da frente do terreno foram também descartados, pois estariam numa região do terreno em que não haverá escavação, o que os torna desnecessários.

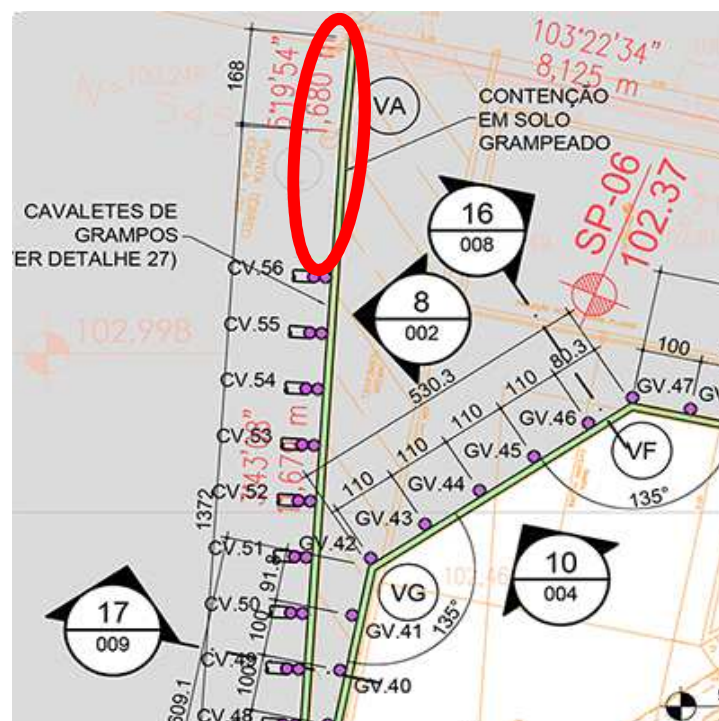


Figura 13.11 - Região em que os cavaletes foram retirados

## 14. EXECUÇÃO DA OBRA

Para o desenvolvimento dos estudos apresentados neste trabalho, acompanhamos a execução do Edifício Corporativo – Turiassu pela Construtora Ribeiro Caram, localizado na Rua Turiassu, em Perdizes, São Paulo-SP. Na Figura 14.1 pode-se visualizar uma foto do canteiro de obras.



Figura 14.1 - Vista do fundo do canteiro (11/04/14).

O empreendimento consiste em um edifício comercial composto por 12 pavimentos-tipo, térreo, cobertura, mezanino e três subsolos. O terreno possui um muro de 4m de altura na entrada pela R. Turiassu. Conforme descrito anteriormente, nas vizinhanças do terreno há dois edifícios residenciais com três subsolos, do Condomínio Vergê Perdizes: a Torre Figueira na lateral esquerda (Figura 14.7) tendo como referência a vista a partir da Rua Turiassu e a Torre Ipê ao fundo do terreno (Figura 14.6). Cabe salientar que a cota de fundo do último subsolo do empreendimento em análise está a aproximadamente 3 metros abaixo da cota de fundo do último subsolo do prédio vizinho da lateral (Figura 14.8).

Na lateral oposta ao prédio residencial, há um conjunto de casas antigas (Figura 14.4), de fundação direta do tipo alicerce, suas lajes são apoiadas diretamente no solo e em vigas baldrame; uma delas avança ao longo do perímetro do terreno. O muro que separa essas casas do terreno em que a obra será feita é de tijolos, sendo que em grande parte dele, os tijolos estão dispostos em apenas uma direção. Por outro lado, em alguns trechos do muro

mais ao fundo do terreno, em que este tem grande altura, os tijolos estão dispostos nas duas direções, garantindo uma maior rigidez (Figura 14.5).

Pelos riscos de recalques e abertura de trincas nessas casas, esse muro será reforçado por uma contenção de cavaletes de grampos voltados para o terreno do edifício, que serão solidarizados a uma viga de coroamento sob a viga baldrame já existente (Figuras 14.2 e 14.3).

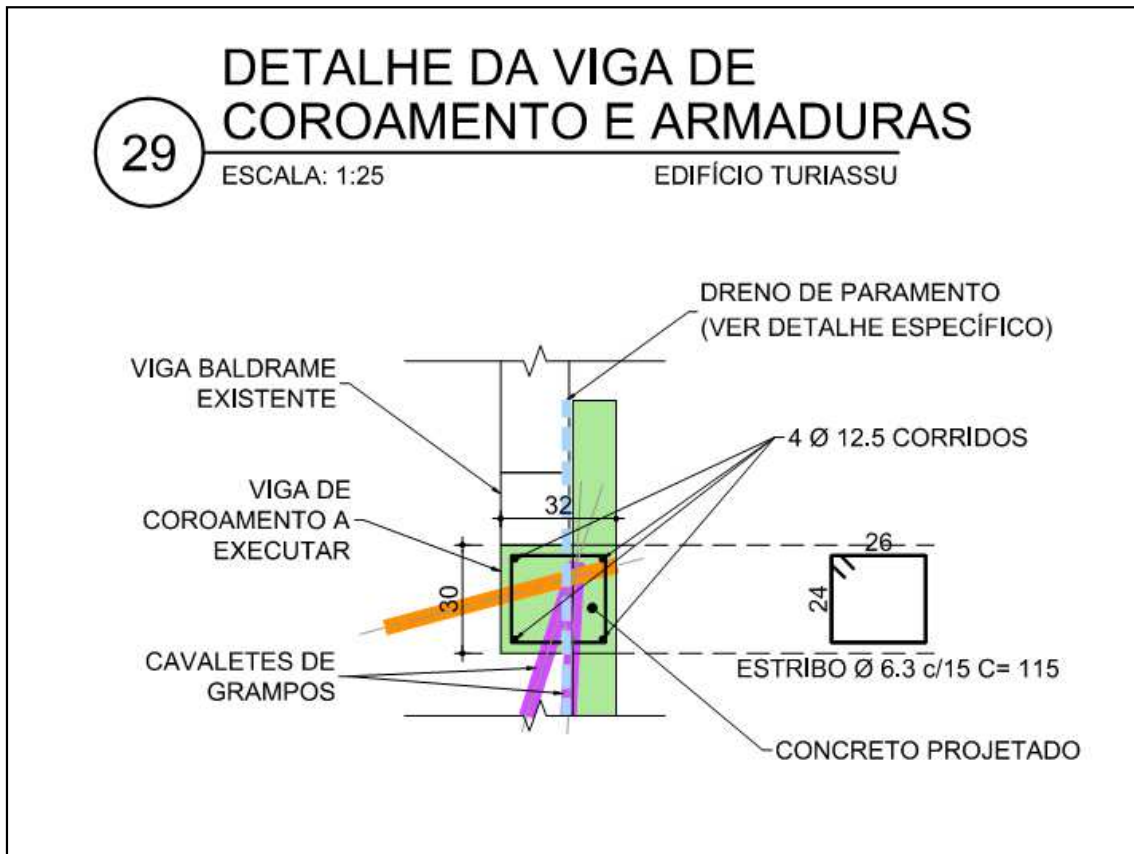


Figura 14.2 - Detalhe da ligação entre cavaletes, a viga baldrame existente e a viga de coroamento.



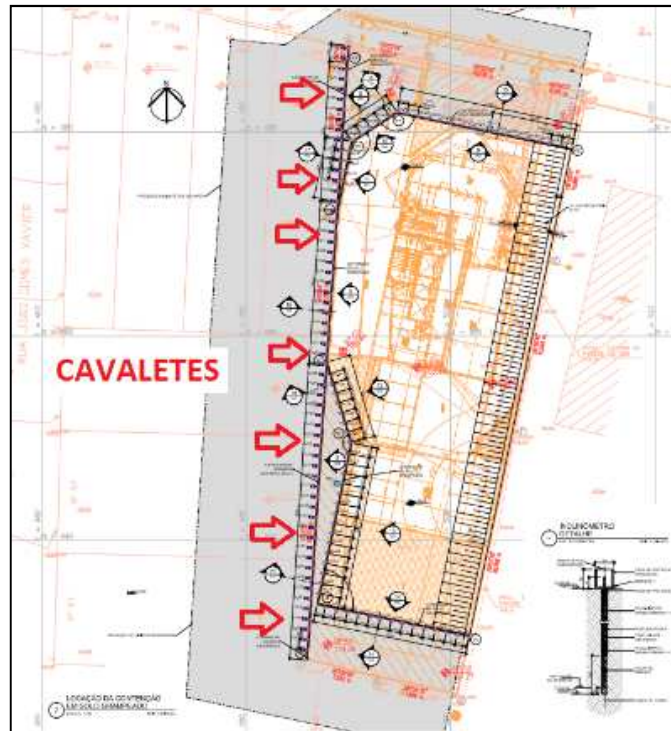


Figura 14.3 - Localização dos cavaletes.



Figura 14.4 - Vista do fundo do terreno, com detalhe dos muros das casas vizinhas (09/04/14).



Figura 14.5 - Detalhe do muro da casa localizada próxima ao fundo do terreno. Região em que o muro de divisa possui maior altura, como pode ser visualizado na figura anterior (09/04/14).



Figura 14.6 - Foto do terreno, em que é possível visualizar o prédio residencial vizinho (Torre Ipê – Condomínio Vergê Perdizes), localizado ao fundo (11/04/14).





Figura 14.7 - Foto da lateral do terreno, em que é possível visualizar parte do prédio residencial vizinho (Torre Figueira – Condomínio Vergê Perdizes), localizado na lateral do terreno oposta às casas (30/04/14).



Figura 14.8 - Detalhe da contenção dos prédios vizinhos (11/04/14).

Como um dos focos deste trabalho é analisar o projeto da contenção, elaborado pela empresa projetista Interact, visitamos a obra três vezes por semana de forma a acompanhar sua execução pela empresa de serviços geotécnicos Solotrat. Nessas visitas tiramos fotos e conversamos com o engenheiro residente ou, na ausência desse, com o mestre de obras, de forma a nos atualizarmos sobre eventuais novidades que ocorreram na obra desde a última visita. Essas novidades que buscamos se traduzem não apenas em elementos relacionados à execução da contenção, mas também em outros tópicos importantes ligados ao dia a dia nas obras urbanas, tais como interferências com os vizinhos, problemas de acesso, dificuldade de estacionar caminhões transportando materiais, dificuldade em receber entregas de materiais, etc.

De forma a controlar deformações que ocorressem no terreno ao longo das escavações, foram previstos, a princípio, dois tipos de instrumentos de medição, a serem instalados em diferentes pontos do canteiro. O primeiro deles são os inclinômetros, sendo um localizado na frente do terreno e o outro na lateral direita, próximo ao muro das casas antigas, locais estes em que são previstas as maiores deformações do terreno e que podem ser críticas para a integridade das casas (Figura 14.7). O segundo tipo de instrumento de medição utilizado são os pinos de recalque, serão instalados cinco pinos, nas regiões mais críticas, sendo dois no muro do prédio vizinho localizado na lateral esquerda do terreno, dois no muro do prédio vizinho ao fundo e um no muro de divisa com as casas, em que este possui maior altura (Figura 14.8).

Abrangendo a maior parte do perímetro da contenção há uma área permeável, que deve ser de no mínimo 15% da área do lote de acordo com a Lei Municipal 11.228/92, que não participa do sistema de drenagem subterrânea instalado sob os solos. Apesar da instalação de DHPs, a infiltração de água pode trazer riscos à contenção pela saturação do solo colapsível. Uma opção seria impermeabilizar essa área com geotêxtil e revestir com grama, dificultando a infiltração direta.

O concreto projetado é aplicado de maneira convencional (100% da água é adicionada no anel d'água, sem pré-umidificação) com fluxo de água controlado pelo mangoteiro. O compressor de ar tem vazão 900 pcm, o diâmetro do mangote é 2", a pressão de ar é de 8 kgf/cm<sup>2</sup> no compressor, caindo para 4 kgf/cm<sup>2</sup> próximo à bomba de projeção. Não é colocado aditivo no cimento.



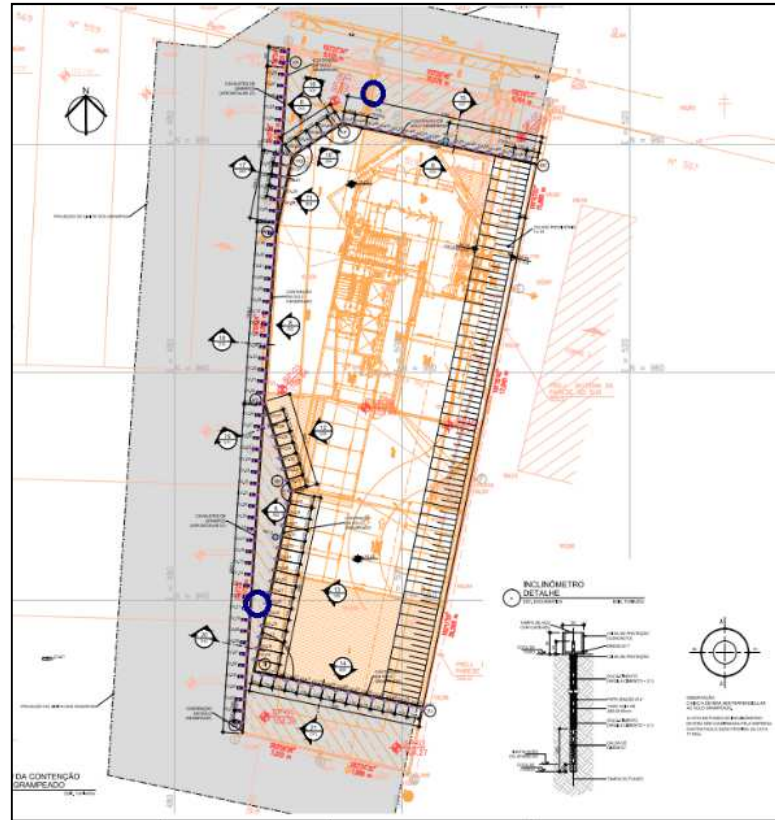


Figura 14.9 - Detalhe da localização dos inclinômetros (círculos azuis).

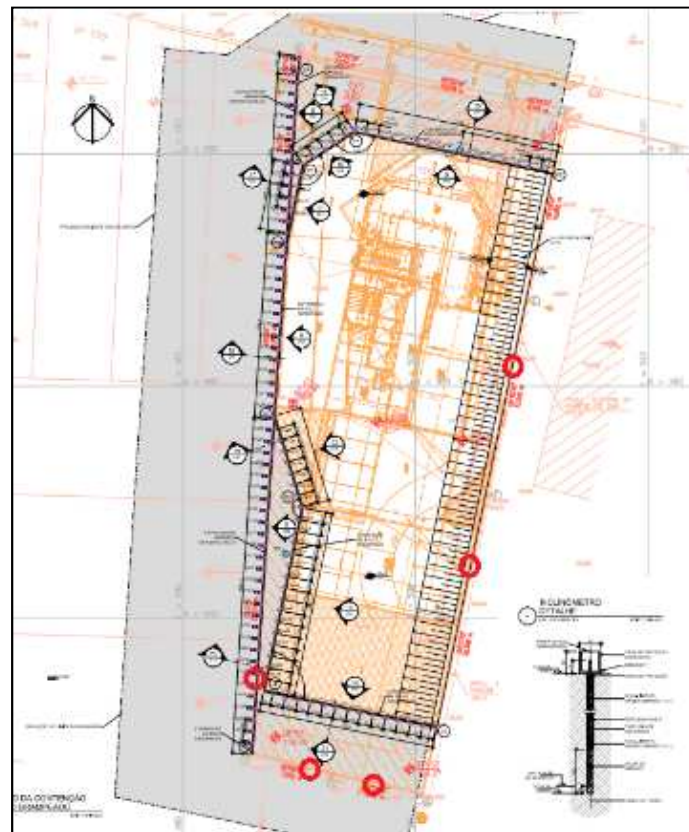


Figura 14.10 - Detalhe da localização dos pinos de recalque (círculos vermelhos).

Abaixo, é exposto um panorama semanal que mostra as etapas da execução da contenção com detalhes dos métodos construtivos.

04.04.14-11.04.14

O primeiro inclinômetro foi instalado, localizado no lado direito do terreno (vista da R. Turiassu), próximo ao muro das casas.



Figura 14.11 - Instalação de inclinômetro (11/04/14).

Ainda não haviam sido instalados os nichos para os pinos de recalque nos prédios vizinhos.

Havia uma preocupação em relação ao risco de perfuração de uma piscina localizada numa das casas vizinhas no momento da execução dos grampos inclinados naquela cota. Foi verificado através de transpasse de níveis topográficos que a piscina, na verdade, não estava na região dos grampos.

Já havia telas de armação da contenção que foram entregues no canteiro. Também foram entregues andaimes (Figuras 14.10 e 14.11 respectivamente).





Figura 14.12 - Detalhe das telas já entregues no canteiro (09/04/14).



Figura 14.13 - Detalhes das telas já entregues no canteiro e andaimes (vermelhos), dispostos atrás das telas (11/04/14).

Os cavaletes já estavam sendo executados. Destaca-se que em 4 dos 15 cavaletes executados houve perda de água após a injeção, o que pode indicar a presença de lentes de areia, vazios e heterogeneidade, que criam caminhos de percolação no solo e permitem escape de injeção.





Figura 14.14 - Execução dos cavaletes (11/04/14).



Figura 14.15 - Detalhe do local de execução dos cavaletes. (11/04/14)

Abriu-se uma grande fenda no muro de tijolos das casas, em um trecho em que os tijolos estavam dispostos em um único sentido.

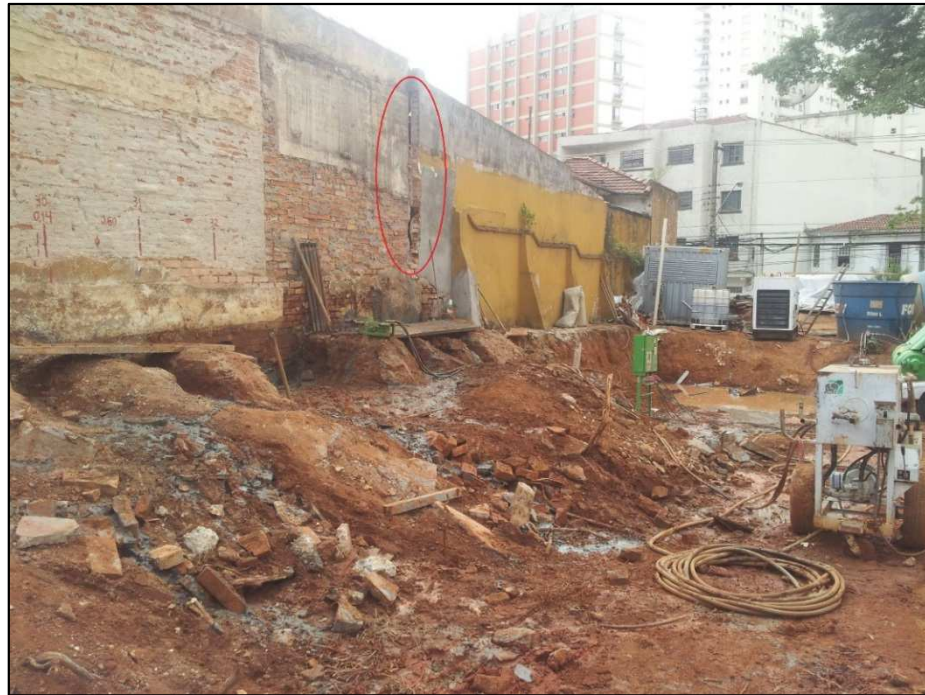


Figura 14.16 - Detalhe 1 da fenda no muro das casas (11/04/14).



Figura 14.17 - Detalhe 2 da fenda no muro das casas (11/04/14).



14.04.14-18.04.14

Alguns cavaletes da lateral do terreno foram concluídos com posterior solidarização destes à viga de coroamento sob a viga baldrame existente.



Figura 14.18 - Cavaletes concluídos (16/04/14).



Figura 14.19 - Complementação dos furos com calda de cimento após injeções (16/04/14).

Para os cavaletes, o volume da calda de cimento estipulado para cada injeção foi de até 21 litros. No caso de o tubo de injeção perdido estourar, esse volume não é atingido e o operador da bomba anota que o tubo estourou.



Figura 14.20 - Ajuste da bomba de injeção (16/04/14).



Figura 14.21 - Controle do volume de calda de cimento (16/04/14).



21.04.14-25.04.14

Foram iniciadas a execução do concreto projetado para o paramento e a abertura dos furos dos grampos inclinados.



Figura 14.22 - Execução concreto projetado (23/04/14).



Figura 14.23 - Execução concreto projetado (23/04/14).



Sete furos da primeira linha de grampos da parte do fundo da contenção foram abertos no mesmo dia.

A primeira injeção do dia é feita a partir da 08h, pois verifica-se que antes desse horário ocorrem reclamações por parte dos vizinhos devido ao barulho dessa etapa. A lei do Silêncio em São Paulo (Lei Municipal 15.133/10), no entanto, permite maior nível de ruído a partir das 07h. A segunda injeção ocorre de tarde, por volta das 13h30, respeitando um intervalo mínimo entre fases de injeção de um mesmo grampo.

Houve vazamento das injeções para o terreno vizinho (grampos da parte do fundo da contenção).



Figura 14.24 - Primeira linha de grampos do fundo da contenção (25/04/14).

O segundo inclinômetro previsto foi instalado (entrada do terreno). Cada inclinômetro possui 29m e foi instalado em 3 dias com uma equipe de três funcionários. A empresa responsável pela instalação foi a Moretti Engenharia Consultiva.



Figura 14.25 - Perfuratriz do segundo inclinômetro posicionada na entrada do terreno (23/04/14).

Uma parte do muro da casa lateral foi retirada para aumentar a segurança.



Figura 14.26 - Muro de divisa das casas, com detalhe da parte do muro retirada (25/04/14).



Estavam sendo executados 8 pilares no muro de divisa das casas vizinhas, fixados ao muro por cola estrutural e apoiados na viga baldrame executada. Esses pilares foram feitos para aumentar a rigidez do muro.



Figura 14.27 - Detalhe da execução dos pilares (25/04/14).

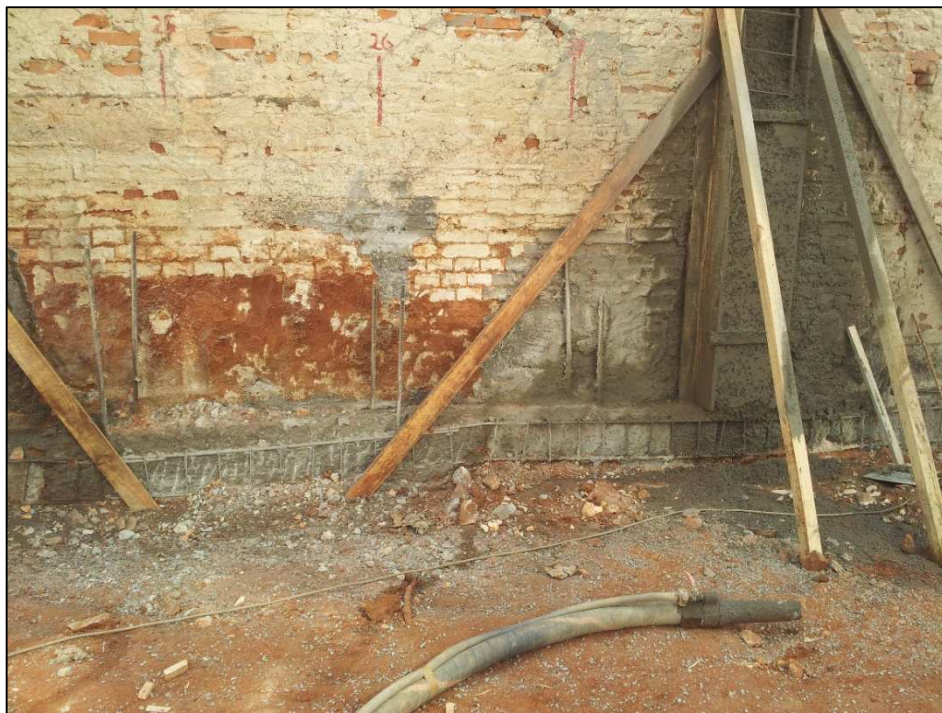


Figura 14.28 - Detalhe concretagem pilar (25/04/14).



28.04.14-02.05.14

Foram executados 11 cavaletes na divisa com as casas ao longo da semana.



Figura 14.29 - Cavaletes do local de remoção do muro (30/04/14).

Remoção do muro de uma das casas vizinhas em função da falta de estabilidade:



Figura 14.30 - Local da remoção do muro (30/04/14).



Figura 14.31 - Vista geral do canteiro. (30/04/14)

Os vazamentos durante a execução de alguns grampos para o terreno do condomínio vizinho ocorreram mesmo com pressão de injeção nula.

Pelo projeto da contenção, a viga baldrame sob os pilares termina sobre uma inflexão no encontro de trechos de paredes de contenção. Desse modo, ela não avançaria sob uma região da casa alugada pela construtora em que o nível do piso está aproximadamente um metro acima. O muro da divisa nesse trecho trincara e já havia sido removido pela falta de estabilidade (fotos acima). Essa casa localiza-se na lateral da região da entrada do terreno. Haveria pressão lateral exercida por essa altura de um metro de terra, em que não é prevista uma fileira de grampos. A solução proposta pelo engenheiro da obra foi a continuação da viga até final do terreno (com possibilidade de criar uma fileira de grampos) e sobre ela, o erguimento de um muro em alvenaria armada no espaço vazio deixado pelo trecho de muro removido. A solução foi a inclusão de uma fileira de grampos no projeto; a geometria da viga foi mantida (como será descrito adiante), impossibilitando que a parede de alvenaria armada fosse levantada.





Figura 14.32 - Detalhe do fim da viga baldrame (30/06/14).

Foi feita a locação dos pontos da parede de contenção, que começaria a ser executada a partir do dia 05/05, na semana seguinte, juntamente com a continuação dos reforços (cavaletes, pilares e viga baldrame).

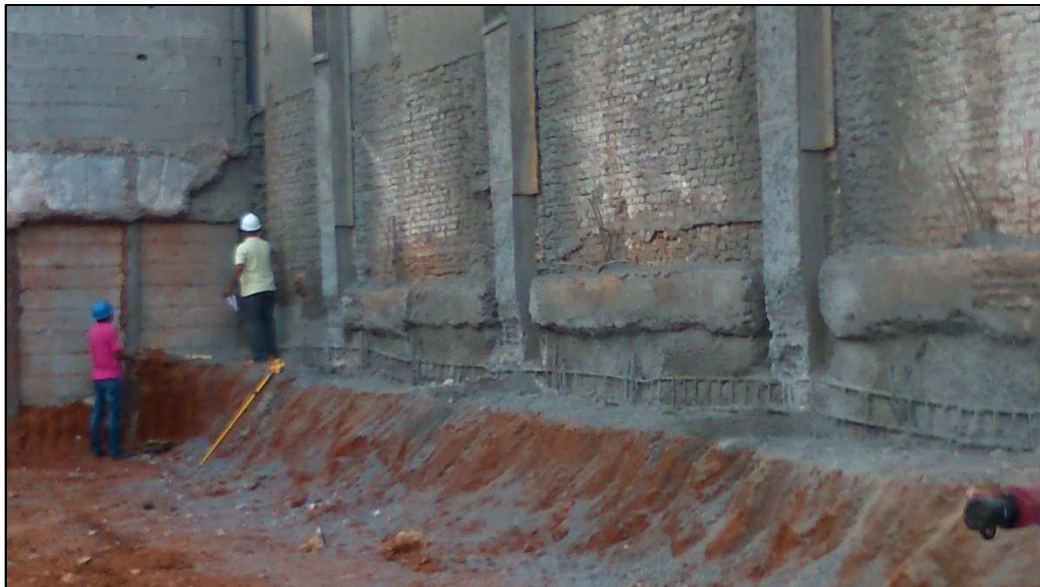


Figura 14.33 - Vista dos pilares concluídos e da locação dos pontos da parede de contenção (30/04/14).



A medição dos deslocamentos da parede de contenção do edifício vizinho será feita de dentro da área do condomínio e conforme combinado, pela manhã. Ressalta-se que os moradores ficaram apreensivos quanto à estabilidade do edifício com a instalação dos pinos.

05.05.14-09.05.14

Estava sendo executada a segunda linha de grampos horizontais (inclinação de 15°) na lateral direita do terreno.



Figura 14.34 - Furo Preenchido com calda de cimento (07/05/14).



Figura 14.35 - Linha de grampos (07/05/14).



Figura 14.36 - Perfuração de grampo. (07/05/14)

A solução para a viga foi manter sua seção até o lugar previsto no projeto para seu término. A partir dessa seção, ela vira 90° para cima, sobe 1m e depois volta à horizontal, formando um pórtico sustentado por pilaretes.





Figura 14.37 - Detalhe da solução da viga (09/05/14).



Figura 14.38 - Detalhe do piso elevado da casa vizinha (07/05/14).

Três pinos de recalque foram instalados (prédio vizinho lateral e muro de divisa com as casas).

O muro da frente do terreno estava sendo protegido com ripas de madeira e para ser derrubado na semana seguinte, pois estava inclinando em direção à rua.



Figura 14.39 - Detalhe da proteção da colocação das ripas (09/05/14).

12.05.14-16.05.14

Foi feita a segunda leitura dos pinos de recalque (a primeira foi feita dia 09/05) e dos inclinômetros. Serão feitas leituras nas quartas-feiras pela manhã (às 9h). No entanto, a leitura dos inclinômetros ainda não pôde ser aproveitada, pois a parede do solo grampeado na frente deles ainda não começou a ser feita.

A contenção estava na quarta linha de grampos (ainda acima do nível da laje de teto do primeiro subsolo). As atividades em cada grampo duram três dias; no primeiro dia, o paramento é executado parcialmente, o furo é aberto e há injeção da bainha; no segundo dia são feitas duas fases de injeção; no terceiro dia é feita a terceira injeção e o paramento é concluído. O intervalo mínimo entre a bainha e as demais injeções é de 12 horas, enquanto que o intervalo mínimo entre as outras injeções é menor, possibilitando esse cronograma.





Figura 14.40 - Acabamento do paramento (14/05/14).



Figura 14.41 - Linhas de furos dos grampos. (14/05/14).

A solução para o detalhe de fim da viga baldrame de coroamento, como já fora mencionado, foi mantê-la como no projeto, acrescentando uma linha de grampos no solo sob o piso da casa alugada, que faria empuxo de 1m. Essa solução tem o inconveniente de não permitir que se erga uma parede de alvenaria elevada para completar o muro, pois a viga ficou com largura igual à espessura do paramento. Ao contrário, caso a viga baldrame fosse prolongada, poderia se erguer uma parede alta de alvenaria, pois é robusta (tem largura de 32cm).

A escavação na parede direita é alternada em cachimbos. Dessa maneira, foi possível atingir a cota do térreo mais rapidamente para liberar frentes. No entanto, isso apresenta inconvenientes para a execução do solo grampeado, pelas emendas de telas do paramento, perda de alinhamento da contenção, diminuição temporária da reação das vigas ao peso dos pilares (pois sob elas fica uma grande altura sem estar feito o paramento de concreto; caso a escavação fosse progressiva, o paramento seguiria a escavação).



Figura 14.42 - Detalhe furo em escavação alternada (14/05/14).



Figura 14.43 - Vista geral escavação alternada (16/05/14).



Foi necessário incluir uma correção no projeto da contenção em função de terem sido considerados grampos na região em que há uma escada para acesso a uma das casas vizinhas.

Foi decidido que a contenção que será executada na região lateral do terreno abaixo da contenção do subsolo do prédio vizinho será de cortina maciça (2,5m de altura)

O muro da frente do terreno foi retirado. O nível na entrada do terreno chegou à cota do térreo da edificação.



Figura 14.44 - Detalhe entrada do terreno sem o muro e já na cota do térreo (16/05/14).

19.05.14-23.05.14

Restavam ainda alguns cavaletes a serem executados. Os grampos horizontais acima dos subsolos, em quatro linhas, já haviam sido abertos ou concluídos. O acabamento com concreto projetado fora executado na sexta-feira anterior.

O acabamento da parede de concreto projetado é feito com sarrafeamento e desempeno, sendo esse último essencial para aumentar a coesão e a resistência superficial. A Figura 14.48 mostra desempenadeiras e a execução do acabamento.



Figura 14.45 - Execução de grampo (21/05/14).



Figura 14.46 - Solo grampeado até a cota do térreo 101,14 (21/05/14).





Figura 14.47 - Execução do acabamento em concreto projetado (23/05/14).



Figura 14.48 - "Alisamento" do paramento (23/05/14).



Figura 14.49 - Topo do inclinômetro após corte de uma parte de seu tubo (21/05/14).

Os responsáveis da Moretti pela leitura dos inclinômetros não compareceram no dia 21/05 pela manhã (apesar de quarta-feira ser o dia combinado de medição). Seus serviços são cobrados por dia, ao valor de R\$ 1.300,00; não é vantajoso que as medições ocorram à tarde, pois serão pagas, mas podem não ser concluídas.

26.05.14-30.05.14

No dia 28/05 se iniciou a execução dos grampos verticais que acompanharão a parede do solo grampeado, com grampos executados na lateral e no fundo. Prevvia-se a conclusão para dia 30/05 (duração de três dias para o serviço). No mesmo dia também chegou um carregamento de cimento.

O método executivo dos grampos verticais segue: perfuração (com a perfuratriz Zazá), lavagem do furo (que se faz necessária pela presença de camada de areia), colocação da barra (já com os espaçadores) e preenchimento do furo com a calda em uma única fase.





Figura 14.50 - Perfuração grampo vertical (28/05/14).



Figura 14.51 - Linha de grampos verticais (30/05/14).

Na Figura 14.51 é possível ver a saída dos drenos de paramento na parede de concreto projetado e também o topo dos grampos verticais da lateral direita do fundo do terreno.





Figura 14.52 - Preenchimento grampo horizontal (28/05/14).

Foi definido que seriam executados os grampos de teste (ensaio de arrancamento) na parede que pertencerá ao subsolo (pois a parede externa já está finalizada com concreto projetado). Serão executados 3 grampos para cada camada de solo (em função do  $NSPT_{médio}$ ) – Os primeiros 3 grampos serão executados até a cota 97,00, que possui  $NSPT_{médio} < 5$ . Os grampos de ensaio terão 7,0m de comprimento, sendo que apenas 4 m serão ancorados.

São escavadas valas na periferia do terreno que servem para coletar a água utilizada na perfuração dos grampos verticais, de forma a ser possível reutilizá-la.



Figura 14.53 - Perfuração de grampo vertical. Pode-se visualizar o caminho feito para a água correr até a vala (30/05/14).



Figura 14.54 - Detalhe dos caminhos para a água da lavagem dos furos seguir até a vala de armazenamento. (28/05/14)





Figura 14.55 - Vala escavada para a coleta de água. (28/05/14)

Na sexta-feira (30/05), o prazo previsto para finalização dos grampos verticais mudou para segunda-feira (02/06), ainda faltava executar os grampos da lateral direita próximos à entrada do terreno (vista da rua) e os da região da entrada do terreno.

Durante a execução de um grampo da parede lateral próxima à frente do canteiro houve a perfuração de uma tubulação, talvez de esgoto sanitário. Consequentemente, houve perda de água e dificuldades para o preenchimento do furo. A Figura 14.56 mostra um refluxo de calda de cimento (colocada sem pressão).



Figura 14.56 - Retorno de calda de cimento. (28/05/14)

02.06.14-06.06.14

A contenção dos subsolos estava na segunda linha de grampos.



Figura 14.57 - Segunda linha de grampos no fundo (05/06/14).





Figura 14.58 - Execução da segunda linha de grampos (05/06/14).



Figura 14.59 - Vista da parede lateral (05/06/14).



A movimentação de terra está sendo feita com a retroescavadeira Hyundai R80-7, que enche a caçamba de caminhão carregando ela 43 vezes, em aproximadamente 15 minutos. Diariamente chegam a sair 29 caminhões carregados da obra. (a escavadeira anterior, a Hyundai R210 LC-7, carregava o caminhão 19 vezes, em aproximadamente 5 minutos).

A previsão de início da execução dos grampos do ensaio é segunda-feira 09/06 com a injeção da bainha. Como os grampos especiais são de três fases (exceto a bainha) e são necessários 7 dias de cura, o ensaio está previsto para ocorrer na quarta-feira 18/06. O grampo será feito na horizontal (inclinação 0°) e a barra de aço CA-50 terá comprimento total de 8 m.

São deixados ferros de  $\phi$  8 mm para marcar a posição dos grampos, para gabaritos em geral e até para ajudar na fixação das telas de armação. Após o posicionamento da tela de flexão e o jateamento parcial do paramento esses ferros são retirados e a perfuratriz abre o furo.

A contenção em solo grampeado não permite apoio de lajes e vigas do subsolo, ao contrário da parede diafragma, que é mais robusta e permite que nela sejam deixados nichos para solidarização, com engastamento, de vigas de fundação. Salienta-se que a parede de solo grampeado está afastada da estrutura de 3 cm no fundo e um pouco mais de 3 cm na lateral.

O atirantamento, ao contrário do solo grampeado, pode ser temporário, sendo retirado após o travamento da parede com a laje de subsolo, prática comum. Isso é conveniente para futuras edificações no terreno vizinho, que tem seu subterrâneo preservado de interferência com a contenção.

Quando um prédio for construído ao lado, os grampos terão de ser exumados e cortados na escavação dos subsolos, o que é inconveniente para o vizinho. Isso deixará a parede de concreto do solo grampeado em balanço, já que não se apoia na estrutura.



Figura 14.60 - Topo de grampos verticais (05/06/14).



Figura 14.61 - Gabarito na parede de contenção (05/06/14).

Quando o solo não está firme e pode desbarrancar, recebe jateamento ralo antes do posicionamento da tela de flexão. A parede também serve de suporte temporário para gabaritos (Figura 14.61).

A cortina de contenção do condomínio ao lado termina 3m abaixo da cota da laje do 3º SS do Edifício Corporativo – Turiassu e o projeto da contenção desse lado a princípio não seria feito pela Interact. Os perfis de aço, de altura pequena, dessa cortina aparentam não terem sido bem especificados, pois perfis de largura de 400 mm (de maior inércia) seriam mais adequados para esse uso (Figura 14.62).



Figura 14.62 - Vista perfis de aço da contenção do prédio vizinho lateral (05/06/14).





Figura 14.63 - Vista geral do canteiro (05/06/14).

09.06.14-13.06.14

Durante esta semana, deu-se prosseguimento à execução da contenção na região lateral, em direção à frente do terreno.



Figura 14.64 - Escavação para execução da contenção (11/06/14).





Figura 14.65 - Execução de concreto projetado (11/06/14).



Figura 14.66 - Reservatório de água para a bomba de concreto projetado (11/06/14).



Figura 14.67 - Tenda das bombas e operador fazendo a irrigação das britas (11/06/14).

Já na região do fundo do terreno, a escavação avançou para cotas mais profundas, ainda no primeiro subsolo.



Figura 14.68 - Vista geral do canteiro (11/06/14).





Figura 14.69 - Vista da parede lateral das casas (11/06/14).

16.06.14-20.06.14

O subsolo é escavado em patamares de aproximadamente 1,5m abrindo-se cachimbos e mantendo-se bermas entre eles, mesmo procedimento usado para que a escavação chegasse ao nível do térreo. Esse tipo de escavação é usado pela equipe da construtora mesmo para contenções em cortina atirantada e perfil pranchado. A altura e o espaçamento (vão) das bermas é ajustado de acordo com a trabalhabilidade, relacionada à resistência e à deformabilidade do solo. Se o solo estiver assoreando, por exemplo, pode-se diminuir o vão (preferencialmente) ou a altura. O solo foi considerado de boa trabalhabilidade pelo engenheiro da obra.

Foi atingido o segundo patamar de escavação do 1º Subsolo, na cota da laje, com a 4ª linha de grampos. No começo da semana seguinte, essa etapa seria concluída e essa frente de escavação na face do fundo seria interrompida parcialmente.

Será aberta uma outra na parte da frente do terreno (que ainda não tinha sido escavada por causa dos caminhões) para executar as estacas raiz. Elas são de argamassa de cimento e areia com armação de 6 barras de 16 mm (envolvidas por armação em espiral).



Figura 14.70 - Vista da escavação em bermas, na região do fundo do terreno (19/06/14).



Figura 14.71 - Vista da região do fundo do terreno, já sem as bermas (20/06/14).

Por sugestão do Eng. Alberto Zirlis (Solotrat), está sendo deixada uma junta de dilatação vertical na parede dos subsolos a cada 6m. Nessas juntas não há transpasse das telas, impedida por um sarrafo que é colocado durante a execução. Depois o sarrafo é retirado e seu espaço é preenchido. Com a retração do concreto e a movimentação do solo, ocorre a fissura



nesse local. Para a parede do fundo, de largura 14m, optou-se por uma junta única no meio dela.



Figura 14.72 - Execução da junta de dilatação (19/06/14).

Foi aberta uma nova vala para acumular água de lavagem dos furos ao fundo. Uma parte pequena da lateral da parede de solo grampeado teve que ser demolida para permitir transpasse das telas de armação.

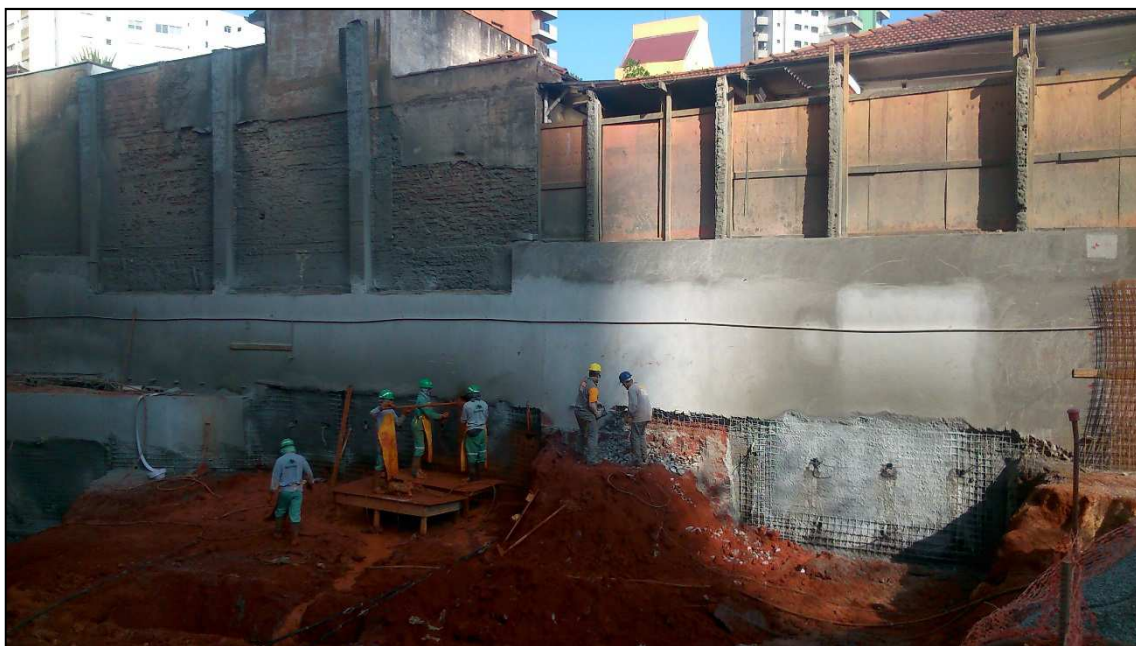


Figura 14.73 - Execução de grampo a ser ensaiado e demolição da parede de solo grampeado (19/06.14).



Figura 14.74 - Grampo de ensaio já executado (20/06/14).

De acordo com o engenheiro da obra, o tempo de execução dessa parede em solo grampeado, previsto para 4,5 meses, supera em muito os de soluções como cortina atirantada, de aproximadamente 2,5 meses e perfil pranchado, de aproximadamente 1,5 mês (considerando-se um prazo com folga para essas duas últimas contenções).

A contenção já está durando 2,5 meses e está cerca de 60% concluída apenas. Isso se deve às diversas etapas: colocação da tela interna, jateamento, perfuração, bainha, três fases de injeção, tela externa, jateamento e acabamento, além dos ajustes e transpasse das telas de armação onde havia bermas.

O uso de duas telas de contenção, que é questionável, está se mostrando prejudicial à execução. Zirlis disse que elas não eram necessárias e que poderiam ser usadas fibras de aço como armação. Além disso, não se usam mais tela externa de armação em solo grampeado.

O acabamento da contenção está no caminho crítico, algo que não ocorre para contenções de cortina atirantada ou perfil pranchado, em que poderia ser executado no ano seguinte, por exemplo. Na escavação com perfil pranchado, deixam-se bermas de um vão (entre perfis metálicos) espaçadas de dois vãos. O avanço é rápido: em 1 hora se colocam as pranchas de quatro vãos de uma laje a outra do subsolo.

A opção por solo grampeado, como fora mencionado, resultou de um estudo de viabilidade da Interact (Eugenio) e arquitetura, sendo um dos motivadores da escolha a pequena espessura da parede (12 cm) em comparação aos perfis metálicos, que seriam de 350 ou 400mm. A arquitetura estava com espaço dos subsolos no limite para vagas de garagem.

Houve o deslocamento de um dos grampos na parede do fundo, de comprimento 6m adjacente ao condomínio, pois a barra de aço estava atingindo um perfil da contenção do edifício vizinho. Esse deslocamento foi de aproximadamente entre 20 e 30 cm na horizontal. Acomodações como essa são permitidas sem problemas no solo grampeado, ao contrário da cortina atirantada, em que uma revisão do projeto é necessária.

Atualmente o condomínio vizinho tem problemas com água no subsolo, bombeando vários litros por dia, segundo o engenheiro da obra. Como os subsolos do Edifício Corporativo terão cota inferior a das torres do condomínio Vergê (3m abaixo da Torre Ipê e 7m abaixo da Torre Figueira), essas terão o bombeamento reduzido, pois a água passará a percolar para o Edifício Corporativo.

Uma preocupação com o vizinho é que caso haja chuva forte no estágio atual, pode ocorrer passagem de lama para o vizinho, pois há um vão entre perfis pranchados que não está devidamente preenchido na cota do térreo.



23.06.14-27.06.14



Figura 14.75 - Vista geral do canteiro no início da semana (25/06/14).

Foi aberta a frente de escavação do subsolo na face da frente do subsolo, com altura de aproximadamente 2,5m. Em um trecho da lateral serão abertos cachimbos. Essa escavação avança até os cavaletes previamente executados. Pequenas partes da superfície lateral, principalmente próxima ao topo, de alguns deles são ajustadas com marreta e cinzel.

Foi deixada uma faixa de trabalho de aproximadamente 4m de largura para permitir as atividades do solo grampeado. Atrás dela a escavação está em um nível mais baixo. Essa faixa tem o inconveniente de limitar muito a escavação de terrenos estreitos, como é o caso. Em uma obra com grande espaço, a influência dessas faixas seria menor e elas poderiam ser eliminadas mais rapidamente, liberando-se mais frentes para o grampeamento.

Nessa condição, uma equipe maior diminuiria o prazo de execução. Mas no caso, trazer mais operários não levaria a um aumento significativo da produtividade, pois não vai haver frentes suficientes o tempo todo, implicando em ociosidade. A equipe da Solotrat naquele momento era de 16 operários e em considerável parte do tempo alguns deles ficavam ociosos.

Conforme o planejado, em seguida essa parte da parede da frente receberia duas linhas de grampos, depois seria escavada em mais um nível até chegar a mesma cota que o fundo do terreno. Só depois disso poderia começar a execução das estacas hélice, que dependem da liberação da parte da frente do subsolo (a parte do fundo dos subsolos voltaria a



ser escavada no meio de agosto, depois da execução das estacas hélice). No entanto, elas deveriam ter entrado no começo de julho.

Para diminuir esse atraso do estaqueamento, o Eng. Thiago surgiu com a opção de em vez de grampear as duas primeiras linhas, apenas colocar a tela de armação mais interna, fazer a primeira camada de concreto projetado e em seguida prosseguir à escavação de um talude íngreme até a cota para liberar a execução das estacas.

Nessa opção, o gabarito dessas estacas seria feito dentro de uma semana, com as marcações sendo feitas em aproximadamente três dias e os grampos seriam executados apenas na terceira ou quarta semana de julho. Devido ao risco de perda de estabilidade do talude sem os grampos, o Eng. Thiago apresentaria essa opção ao Eng. Eugênio, mas adiantou que dificilmente ela seria aceita.

Algumas Interferências nos grampos das primeiras linhas da frente do terreno que o Thiago iria tratar com o Eugênio: a presença de uma caixa de concreto da NET sob o passeio do lado do edifício, que irá limitar o comprimento de um grampo e a presença da árvore na frente do terreno que impediria a execução de grampos. Para a primeira, o supervisor da Solotrat Ademar recomendou que a perfuração ocorresse normalmente e parasse quando a parede da caixa fosse atingida.

Será construída uma caixa de água pluvial na frente do terreno em uma região grampeada. O supervisor Ademar disse que não havia problema em cortar o grampo no lugar de execução da caixa. Ele também disse que um grampo da primeira fileira da frente do terreno terá que ser feito com inclinação superior a 15° para não aflorar na superfície.

Nesse ponto da obra, poderiam ocorrer problemas com areia submersa, cuja presença fora detectada por algumas sondagens, sem aparentemente constituir uma camada contínua. A solução apontada para o caso de se atingir uma camada de areia submersa é diminuir o vão entre os cachimbos, que estava sendo de cerca de 2,5m. Essa distância é ajustada no momento de acordo com a trabalhabilidade do solo: se estiver desbarrancando, aplica-se uma camada de concreto projetado e diminui-se esse vão.

Se a areia submersa não for uma camada contínua na horizontal, permitem-se soluções localizadas. Mas se a camada é contínua, o prazo de execução aumenta devido aos cuidados, principalmente se o nível d'água for elevado, podendo derrubar a parede de concreto projetado, que pode ter que ser refeita mais de uma vez.

Se a situação for muito crítica, com alto nível d'água e a parede não ficar estável, a solução seria fazer um rip-rap de solo cimento (ensacado) rapidamente na frente do talude.

Então o solo grampeado é feito na frente dessa barreira. De preferência o rip-rap já deve ter os furos no local dos grampos.

É recomendável nesses casos que o projeto da contenção seja de cortina atirantada, aplicando-se carga estabilizadora de 5tf logo após a bainha. Então são aplicados os acréscimos de força até se chegar à carga de trabalho (por exemplo, de 30tf). A desvantagem principal da cortina atirantada em relação ao solo grampeado é o preço alto.

Outros aspectos tratados foram: a arquiteta Luiza estava achando que a parede de concreto projetado poderia estar avançando muito, ocupando espaço de vagas na garagem. O supervisor Ademar disse que o acabamento do concreto projetado bruto, sem alisamento e desempenho, é também bonito, bastando aplicar massa e tinta sobre ele. O alisamento do concreto projetado foi inventado pelo Geol. Pitta.



Figura 11.76 - Escavação deixando faixa de trabalho (25/06/14).



Figura 11.77 - Trabalhos na região da frente do terreno (25/06/14).



Figura 11.78 - Execução da contenção na região da frente do terreno (27/06/14).





Figura 11.79 - Solo grampeado na parede do subsolo na região da frente do terreno (27/06/14).



Figura 11.80 - Solo grampeado na parede do subsolo na região da frente do terreno (27/06/14).





Figura 11.81 - Lavagem do furo (27/06/14).

30.06.14-04.07.14



Figura 14.82 - Vista geral do canteiro (02/07/14).

Nessa semana foram ensaiados grampos de teste denominados G.1, G.2 e G.3. Esses ensaios serão abordados com maior enfoque em tópico específico.

O ciclo de escavação, isto é, o avanço de um patamar, nessa fase de execução dos subsolos, dura cinco dias, com escavações de altura 1,5m e vãos de 6m. Anteriormente, mais acima, o ciclo durava sete dias, com a abertura de vãos de 2,5m.



Figura 14.83 - Atividades na lateral do terreno, na divisa com as casas (02/07/14).



Naquele momento, as escavações na face do fundo do subsolo estavam interrompidas e a escavação iria prosseguir apenas nas faces da frente e na lateral para liberar a hélice contínua. Por isso, cogitava-se que seriam feitos novos grampos de teste na parte posterior do terreno, próximos à cota de escavação, o que facilitaria a montagem do equipamento do ensaio. Posteriormente, como no fundo do terreno não haverá estacas hélice, sua escavação até o 2º subsolo seria feita com talude.



Figura 14.84 - Vista da lateral e da frente do terreno (02/07/14).



Figura 14.85 - Escavação na região da frente do terreno (02/07/14).

Foram instalados insertos no topo das paredes dos subsolos para descer fios de prumo para garantir a verticalidade e não retirar espaço de vagas da garagem, uma vez que já se verificara que na parte superior da parede do subsolo, o gabarito estava correto e não houve avanço da parede para dentro do subsolo. Logo, a preocupação era apenas manter a verticalidade.

As perdas de concreto projetado por reflexão e de nata de cimento foram estimadas em 30%.



Figura 14.86 - Fio de prumo (02/07/14).

07.07.14-11.07.14

Como o dia 08/07 amanheceu chuvoso, não poderia haver deposição de solo removido no bota-fora, portanto os caminhões que chegaram para serem carregados foram dispensados. Estava previsto para se remover os taludes da frente e do meio do terreno, para se atingir a cota 96,54, mas não houve tanta movimentação de terra. Poderiam ser enchidos



cerca de 22 caminhões com esse volume de terra. O volume de terra escavado é levado para ser usado em aterros de obras da Camargo Corrêa.

Até o fim do expediente, haveria a conclusão da abertura de alguns furos de grampos em um trecho da parede entre cachimbos e o jateamento de camada de 3 cm de concreto nas paredes, nos barrancos ao fundo do terreno e fazes dos taludes.

A remoção de terra continuou no dia 10/07 (após o feriado), incluindo a parte que deveria ser feita no dia 08 e uma parte da rampa usada pelos caminhões, que ficou mais íngreme a partir de um afloramento de rocha até chegar na cota do terreno ao fundo.

Começou a aparecer argila siltosa amarela, de 1,5 m de espessura, entre as cotas 96,00 e 94,50. Abaixo dela, deveria ser encontrada uma camada de argila siltosa cinza.



Figura 14.87 - Vista geral do canteiro no início da semana (08/07/14).

Uma parte das telas de armação estava sendo removida na parte superior da parede do subsolo na frente do terreno, pois ultrapassava a cota do topo da parede. Haverá um caimento do terreno acima em direção a ela.

O talude na parte posterior do canteiro estava sendo usado para estocar material para concreto e barras CA-50, que teriam que ser removidos para se chegar à cota do 2º subsolo.

Nesse momento, a equipe da Solotrat possuía um efetivo de 14; na semana seguinte voltaria um outro operário.



Figura 14.88 - Remoção da tela de armação (08/07/14).

Deu-se prosseguimento à escavação na região do fundo do terreno.



Figura 14.89 - Evolução da escavação no fundo do terreno (08/07/14).





Figura 14.90 - Execução de solo grampeado na região lateral do terreno (11/07/14).



Figura 14.91 - Drenos posicionados (11/07/14).





Figura 14.92 - Vala de coleta de água utilizada na lavagem dos furos da contenção (11/07/14).



Figura 14.93 - Vista da lateral e da região da frente do terreno (11/07/14).





Figura 14.94 - Solo grampeado na parede do subsolo (11/07/14).

14.07.14-18.07.14

Nesta semana, com a evolução da escavação no terreno, foi atingido o nível do lençol freático.

Até o final da semana estava previsto o grampeamento de toda a parede até a cota 96,54 (intermediário entre as lajes do 1º e 2º subsolos) na lateral (exceto na proximidade da face do fundo) e na frente do terreno. Durante a escavação até a cota 96,94 começou a aparecer a camada de argila siltosa cinza.

Até esse momento, o cronograma da obra já havia sido alterado duas vezes. Um dos principais motivos foi a demora na execução dos cavaletes no térreo.

As pressões de abertura dos furos estavam entre 30 e 40 kgf/cm<sup>2</sup>, as de injeção entre 13 e 14 kgf/cm<sup>2</sup>, com duração de injeções de aproximadamente 1 minuto. Ambas as pressões aumentaram em relação ao começo da execução da parede pela menor quantidade de vazios e maior resistência do solo. O tempo de perfuração não aumentou, pois depende além desses fatores, da força dos operadores da perfuratriz (manual).





Figura 14.95 - Água aflorando no terreno (17/07/14).

Foram encontrados blocos de alvenaria na contenção do vizinho lateral, que por motivos de segurança, deveriam ser substituídos.



Figura 14.96 - Blocos de alvenaria na contenção do prédio vizinho (17/07/14).





Figura 14.97 - Região onde foram encontrados os blocos de alvenaria (17/07/14).

No dia 16/07 estavam sendo feitas a primeira fase de injeção nos grampos da lateral (5ª e 6ª linha), a terceira fase nos grampos de um dos panos da frente (3ª e 4ª linha) e a perfuração no outro pano da frente (4ª linha).



Figura 14.98 - Perfuração (16/07/14).





Figura 14.99 - Rampa (16/07/14).



Figura 14.100 - Execução do concreto projetado e acabamento com sarrafeamento (17/07/14).





Figura 14.101 - Vista da parede do subsolo da frente do terreno (17/07/14).



Figura 14.102 - Vista geral do canteiro no final da semana (17/07/14).

21.07.14-25.07.14

Foi feito um aterro de 20cm na frente do terreno, acima do nível do 2º subsolo, para cobrir o afloramento do lençol freático, pois a perfuratriz da hélice (sobre esteiras) pesa 90tf e poderia afundar com o solo mole com lençol alto, dada a alta sobrecarga.



Figura 14.103 - Região aterrada (25/07/14).

Foi locada a primeira linha de DHPs, de um total de quatro linhas previstas. A perfuração para instalação dos DHPs ocorre após a conclusão dos grampos das linhas imediatamente acima e abaixo. Caso fossem feitas injeções após o furo do DHP, haveria uma perda de aproximadamente 70% da calda de cimento do grampo para o furo do DHP.





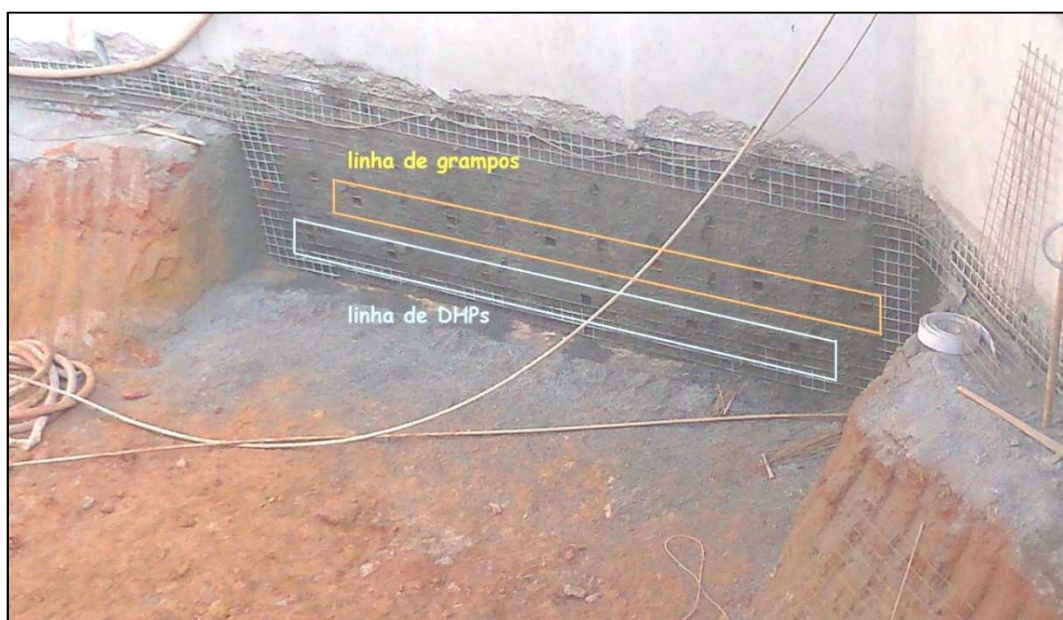
Figura 14.104 - Vista geral do canteiro no início da semana (23/07/14).

Estavam sendo executadas atividades referentes aos grampos da 7ª linha, incluindo perfurações em dois panos da lateral e injeção da 1ª fase em um pano da lateral mais ao meio do terreno.

Até o final da semana previa-se que fossem perfurados todos os grampos da 7ª linha, retirando-se as bermas da lateral. Também deveria ser concluída a remoção de um trecho do talude ao fundo do terreno.



Figura 14.105 - Vista geral do canteiro ao final da semana, já sem as bermas (25/07/14).



(a)





(b)

Figura 14.106 - (a) primeira linha de DHPs, abaixo dos grampos (23/07/14); (b) Linha de grampos na lateral (25/07/14).

Para executar o solo grampeado sob o lençol freático, diminuem-se os vãos entre bermas e fazem-se mais elementos drenantes, podendo ser necessário acrescentar barbacãs, algo que não foi previsto nesse projeto. Também pode ser necessário o uso de aditivo acelerador de pega no concreto projetado.

Uma equipe de topografia da empresa Zetti estava aferindo com estação total os pontos do limite do terreno para locar as estacas hélice.

Pela manhã do dia 23/07 não houve escavação (nem enchimento de caminhão de terra), pois o descarregamento de areia e brita, feito após as 23h, ocorreu sobre a rampa, impedindo o trânsito do caminhão de bota-fora. Provavelmente quem fez o descarregamento estava com medo de descer a rampa nesse horário e deixar os agregados ao fundo do terreno.



Figura 14.107 - Realização de atividades de topografia (23/07/14).



28.07.14-01.08.14



Figura 14.108 - Vista geral do canteiro no início da semana (29/07/14).

O equipamento da hélice contínua chegou no dia 28/07, com previsão para ficar na obra por sete dias. Durante esse período, foi dada continuidade à execução de solo grampeado na região do fundo do terreno, que havia sido interrompida.

Durante essa semana estava prevista a conclusão dos grampos da lateral e da frente até a cota do 2º subsolo. Almejava-se a escavação de um nível na parede do fundo e seu grampeamento, sabendo-se que o ritmo de execução seria prejudicado pela hélice contínua.



Figura 14.109 - Execução de grampos na lateral do terreno (29/07/14).



Pela manhã do dia 29/07 foi feita a 1ª fase de injeção em 7 grampos da lateral e 4 da frente. Estavam sendo perfurados mais grampos e ainda haveria injeções em alguns grampos.

Não foi possível fazer os três grampos de teste seguintes, acima do nível do 2º subsolo (G.5, G.6 e G.7), pela presença dos gabaritos das estacas e; portanto, só foram executados após as estacas hélice.

A equipe de topografia da Zetti estava locando os pontos dos eixos do gabarito no subsolo e das estacas e iria cravar os piquetes das estacas até o final do dia 29/07 para iniciar as perfurações e concretagens no dia seguinte.



Figura 14.110 - Fixação de gabarito (29/07/14).



Figura 14.111 - Rampa retirada para execução da fundação (29/07/14).



Figura 14.112 - Vista geral (01/08/14).



A perfuração e concretagem das estacas hélice começou na quinta-feira (30/07).

A vala de coleta de água para perfuração dos grampos, de 2m de profundidade foi coberta com entulho para permitir a movimentação do equipamento da hélice. Naquele momento não se sabia onde seria aberta uma nova vala. Levantou-se a possibilidade de desmobilizar a equipe da Solotrat para essa semana.



Figura 14.113 - Vala de coleta de água (29/07/14).

Chegaram os tubos de PVC (que receberam as ranhuras) para os DHP's.



Figura 14.114 - Tubos para os DHP's (somente os não revestidos) (29/07/14).





Figura 14.115 - Detalhe tubos DHPs (29/07/14)

04.08.14-08.08.14

Os três grampos logo acima do 2° SS, na cota 95,00 (G.4 – elevação 12, G.5 – elevação 9, G.6 – elevação 10) foram executados na segunda-feira 04.08.



Figura 14.116 - G.4 (06/08/14).



Figura 14.117 - G.5 e G.6 na parede do subsolo na entrada do terreno (06/08/14).

Pela manhã do dia 06/08 estavam sendo feitos 10 furos de grampos, das linhas 5 e 6 em um pano que ocupa metade da parede ao fundo.



Figura 14.118 - Desenvolvimento de atividades na parede do fundo (06/08/14).

Observou-se que a presença da perfuratriz da hélice tira espaço para a execução dos grampos, então as atividades do solo grampeado dependem do posicionamento da perfuratriz. Enquanto essa estava ao fundo do terreno, a equipe da Solotrat estava na frente do canteiro,



depois que o equipamento foi para frente, foi possível escavar uma parte do talude ao fundo e fazer os 10 furos mencionados.

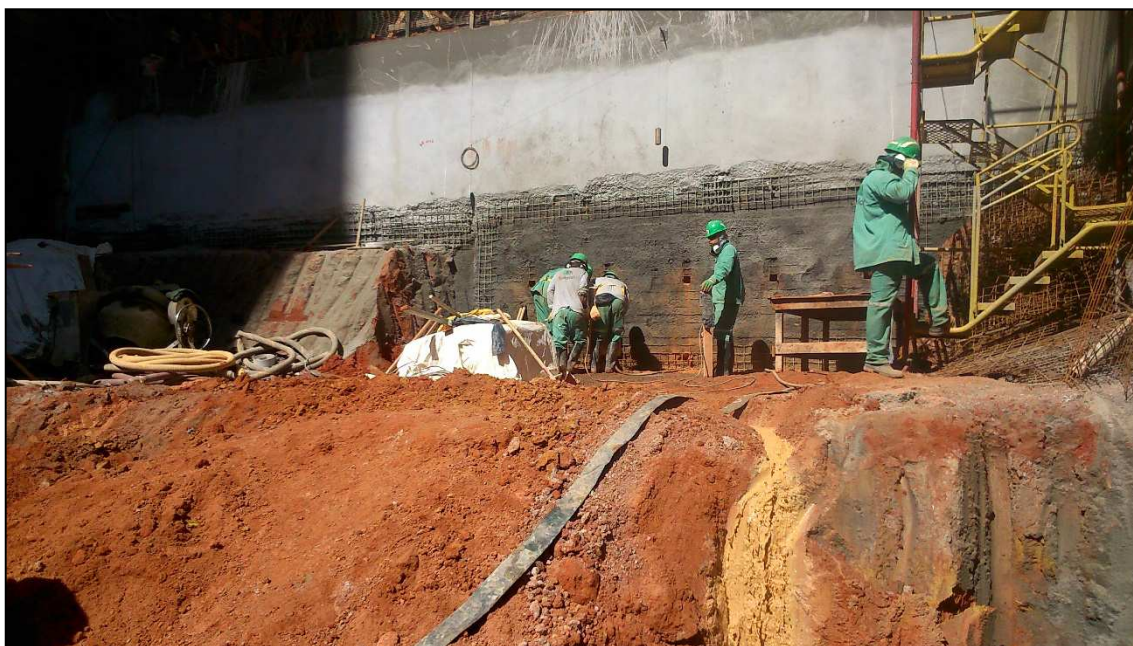


Figura 14.119 - Execução de grampo no fundo do terreno (06/08/14).



Figura 14.120 - Perfuratriz posicionada na região da frente do terreno (06/08/14).



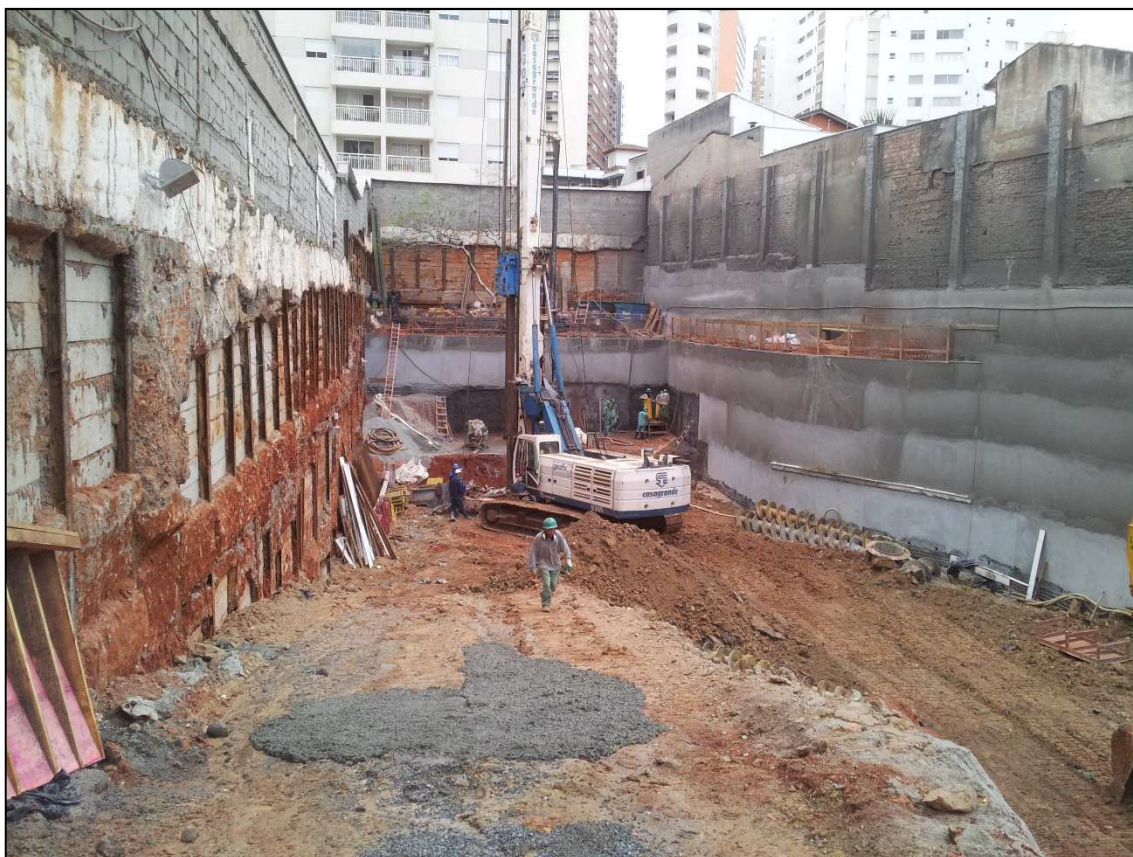


Figura 14.121 - Vista geral do canteiro no final da semana (08/08/14).

11.08.14-15.08.14

Durante a manhã do dia 13/08 houve garoa fina intermitente. Até às 11h, haviam saído três caminhões de solo, enquanto o normal seriam 15 caminhões, provavelmente o bota-fora havia fechado. O ritmo de escavação foi reduzido, as atividades do dia estavam praticamente paralisadas.

Iniciou-se a escavação do 3º subsolo, com aberturas de cachimbos de altura 1,5m e vãos de 4m, atingindo a cota 92,84, mais de 1m abaixo do nível d'água, razão pela qual houve diminuição dos vãos em relação a níveis de escavação anteriores. A água do lençol é acumulada em valas para bombeamento. As bombas em geral ficam ligadas por 20 a 30 minutos, o bombeamento é interrompido quando começa a sair barro. A tubulação de recalque sobe pela parede da frente, contornando um talude e a rampa, até a rua.

Atualmente há 16 funcionários da Solotrat na obra; recentemente haviam chegado mais dois operários. As atividades relacionadas ao paramento são feitas por apenas dois operários.



Figura 14.122 - Vista geral do canteiro no começo da semana (13/08/14).

Até o final da semana era esperada a abertura de novos panos, mas não por todo o contorno da parede. O ritmo de escavação foi reduzido pelo mau tempo.



Figura 14.123 - Vista da parede chanfrada na região da frente do terreno (13/08/14).



Os furos do DHP usam a mesma perfuratriz dos grampos (Zazá), mas com tricône de diâmetro 40 mm (para os grampos, é usado diâmetro 3,5”).



Figura 14.124 - Nova vala posicionada próxima à rampa, na frente do terreno (13/08/14).



Figura 14.125 - Execução de grampos na parede lateral, próxima à entrada do terreno (13/08/14).



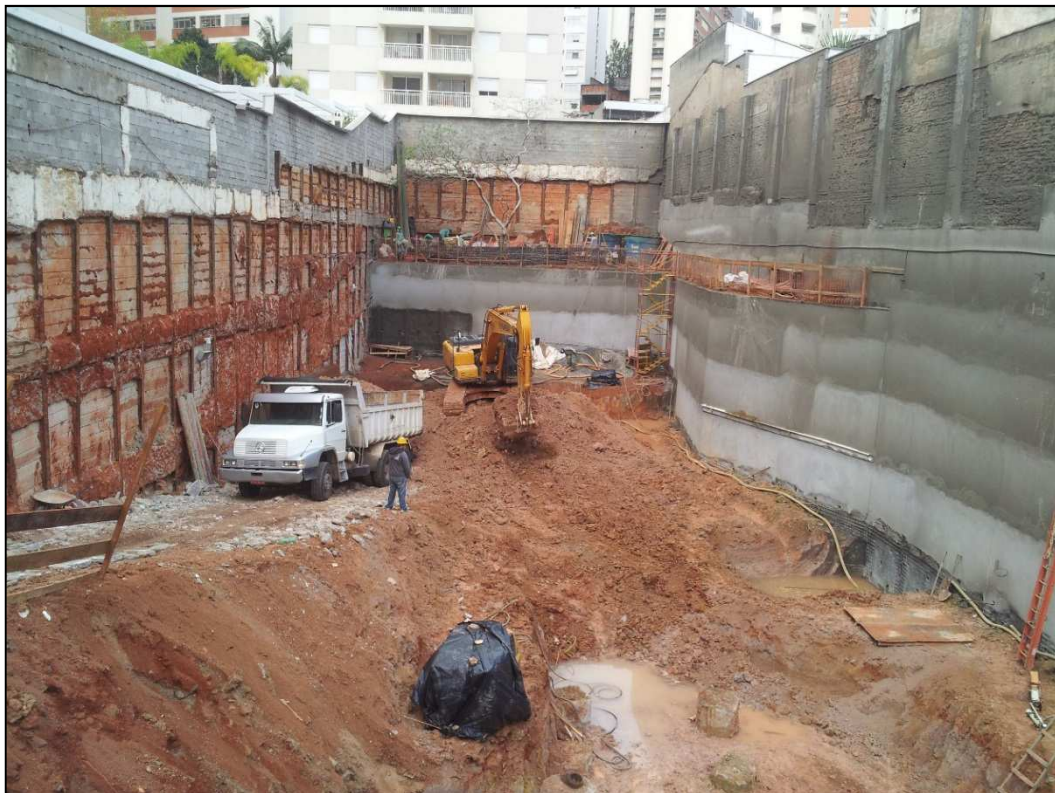


Figura 14.126 - Vista geral do canteiro no final da semana (15/08/14).

18.08.14-22.08.14

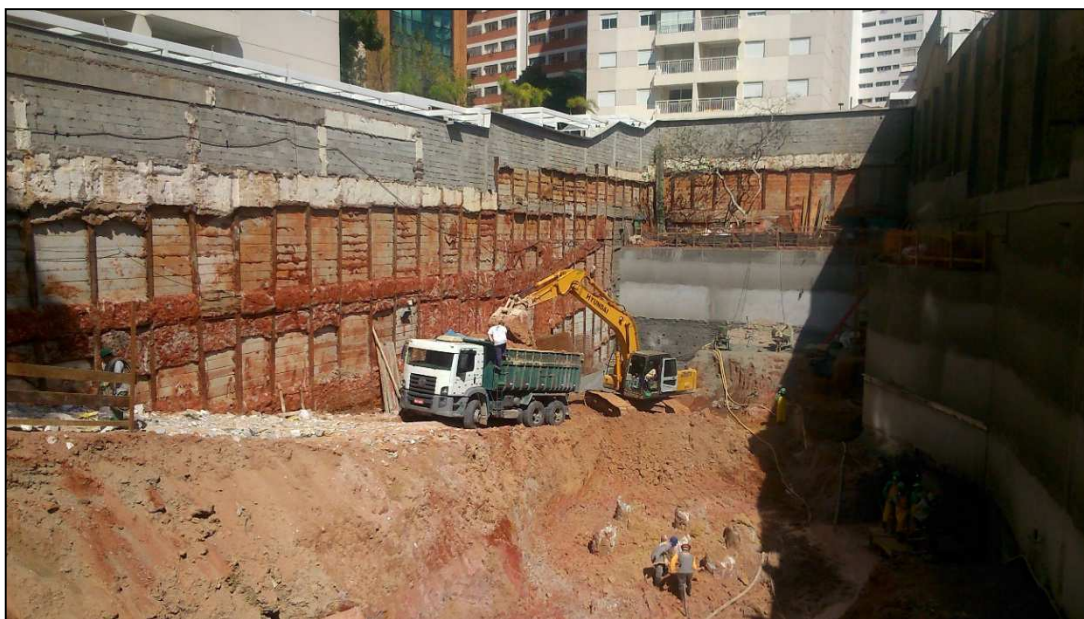


Figura 14.127 - Vista geral do canteiro no início da semana (20/08/14).



Nesse momento, estimava-se que a execução dos dois grampos de ensaios seguintes previstos (G.7 e G.8 no 3º subsolo) provavelmente seria possível em 15 dias e a conclusão da contenção (exceto no trecho atrás da rampa), em 30 dias. As lajes deveriam ser iniciadas em setembro, o que não será possível. A execução abaixo do lençol tem diminuindo o ritmo da obra pelos cuidados com escavação e drenagem.



Figura 14.128 - Vista do fundo (20/08/14).



Figura 14.129 - Execução de grampos na lateral do terreno (20/08/14).



Figura 14.130 - Panos da lateral e do canto da frente (20/08/14).



Figura 14.131 - Grampos nas paredes lateral e da frente, já sem as bermas (22/08/14).

No meio da semana, estavam sendo feitas injeções em panos da lateral e seriam feitas mais injeções no pano do fundo. Até o final da semana deveriam ser feitas perfurações em



quatro panos (2 na lateral e 2 na frente) da metade superior do 3º subsolo e abertura de mais cachimbos até a cota 92,84 (nível do patamar intermediário entre 2º e 3º subsolos), mas não em toda a parede. As medições de controle da Solotrat não indicaram deslocamento da parede.



Figura 14.132 - Evolução dos serviços na parede do fundo (22/08/14).



Figura 14.133 - Paredes lateral e da frente do terreno (22/08/14).

25.08.14-29.08.14



Figura 14.134 - Vista geral do canteiro no começo da semana (27/08/14).

Nessa semana começou a instalação das duas primeiras linhas de DHPs.



Figura 14.135 - Ajuste na colocação de DHP (27/08/14).





Figura 14.136 - Perfuração para DHP (27/08/14).

A frequência de visitas dos técnicos da Moretti foi reduzida pelo engenheiro da obra para uma vez a cada duas semanas, pois, segundo ele, as leituras não tinham demonstrado deslocamentos importantes e a precisão dos resultados era questionável, já que algumas medidas de deslocamentos na direção principal de um inclinômetro mostraram valores negativos, no sentido contrário ao empuxo (algo que ele considerou improvável) e também por não ter ocorrido trincas nos vizinhos nesse estágio da obra.



Figura 14.137 - Rampa reconstruída (27/08/14).



A projetista estava pensando em um novo tipo de contenção para a parede no lado do condomínio. Tratava-se de grampos verticais a serem executados a partir da cota em que termina o pranchamento. Eles seriam ligados por uma viga de coroamento aos perfis metálicos dessa contenção existente. Essa ideia foi descartada, como será visto adiante.



Figura 14.138 - Vista geral do canteiro no final da semana (29/08/14).



Figura 14.139 - Parede lateral com bermas (29/08/14).





Figura 14.140 - Vista do fundo do terreno (29/08/14).

01.09.14-05.09.14



Figura 14.141 - Vista geral do canteiro no início da semana (03/09/14).

A escavação na parede do condomínio vizinho será feita só até a cota de seu 3º subsolo para não descalçar a fundação, deixando-se um talude. Dessa cota serão feitas as estacas raiz e os blocos, retirando de terra apenas o suficiente para deixar espaço para as formas, sem área de trabalho, buscando-se perturbar menos o solo. Ficou definido que não seria feita contenção nessa parede, e o talude será retirado após a laje do 2º subsolo travar a contenção existente (escavação por método invertido).



Figura 14.142 - Estoque de material na entrada do terreno (03/09/14).



Figura 14.143 - Grampos no canto da frente (03/09/14)





Figura 14.144 - Vista da parede lateral do terreno, na divisa com as casas (03/09/14)



Figura 14.145 - Vista do fundo do terreno (03/09/14)

Durante esse estágio da contenção, as pressões de abertura do furo da primeira fase variaram entre 13 e 15kgf/cm<sup>2</sup>. Para a segunda e terceira fase, os valores são maiores e apresentam maior dispersão, chegando a 25kgf/cm<sup>2</sup> para alguns grampos.



Figura 14.146 - Vista do canto no fundo do terreno (03/09/14)

08.09.14-12.09.14



Figura 14.147 - Vista geral do canteiro. (11/09/14)





Figura 14.148 - Aço estocado na rampa de acesso (11/09/14)

Os grampos de teste G.7 e G.8 foram feitos nessa semana. A parede da frente (exceto a parte atrás da rampa) e da maior parte da lateral já estava na cota final (91,14), com a instalação dos drenos e injeções de grampos sendo concluídas. A parede ainda tinha que avançar na face do fundo.



Figura 14.149 - Vista da lateral e do canto ao fundo do terreno (11/09/14)





Figura 14.150 - Estoque de material na entrada do terreno (11/09/14)



Figura 14.151 - Vista dos grampos da parede lateral, na divisa com as casas (11/09/14)



Figura 14.152 - Vista do fundo do terreno (11/09/14)



Figura 14.153 - Chanfro na região da frente do terreno (11/09/14)



15.09.14-19.09.14



Figura 14.154 - Vista geral do canteiro no início da semana (17/09/14)

A máquina das estacas raiz chegou na terça-feira para execução de 28 estacas. As estacas raiz começaram a ser executadas na quinta-feira, com prazo previsto para uma semana, diminuindo o ritmo das atividades da contenção, incluindo bainha e injeções, que também dependem do ritmo da escavação, que já está quase concluída na lateral e ao fundo. Prevvia-se que a escavação restante nessa região seria concluída em até duas semanas.

A parte da frente da contenção, relativa à escavação da rampa, seria feita ao longo do mês seguinte.





Figura 14.155 - Tubos de revestimento para estacas raiz armazenados no canteiro (17/09/14)

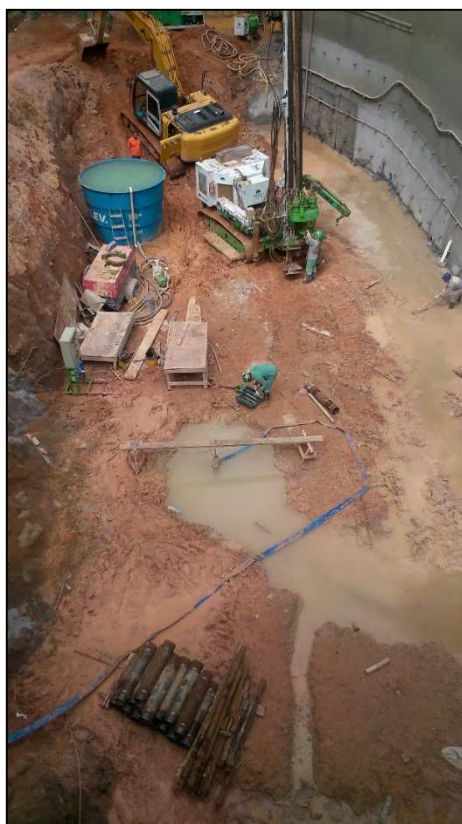


Figura 14.156 - Vala de coleta de água localizada na região da frente do terreno (17/09/14)



Figura 14.157 - Caminhão entrando com entulho para aterro (17/09/14)



Figura 14.158 - Vista do fundo do terreno (17/09/14)





Figura 14.159 - Parede da frente da contenção (17/09/14)



Figura 14.160 - Parede lateral da contenção (17/09/14)





Figura 14.161 - Equipamento de execução das estacas-raiz posicionado na região da frente do terreno (18/09/14)



Figura 14.162 - Vista geral do canteiro (18/09/14)

Foram ensaiados os grampos G.7 (lateral, cota 93,00) e G.8 (frente, cota 93,00).



Figura 14.163 - Grampo para ensaio G.7 (18/09/14)



Figura 14.164 - Grampo para ensaio G.8 (18/09/14)

22.09.11-26.09.14



Figura 14.165 - Vista geral do canteiro no início da semana. (25/09/14)



Figura 14.166 - Vista do chanfro na região da frente do terreno (25/09/14)





Figura 14.167 - Trabalhos no fundo do terreno (25/09/14)



Figura 14.168 - Perfuração de estaca raiz nas proximidades da parede lateral (25/09/14)

Até o final da semana deveria ser escavada toda a lateral (vizinha às casas) e o fundo até a cota 91,14. A escavação para a parede do fundo será feita com um cachimbo de 2,0m de distância de trabalho a partir da parede, para não descalçar a torre vizinha da lateral, em que não será feita contenção.

A apreensão com o atraso da obra foi motivo para reuniões na construtora.



Figura 14.169 - Vista do fundo do canteiro no final da semana (26/09/14)

A rampa termina na cota da laje do 2º subsolo (94,34); para a perfuração das estacas raiz na lateral em que há a rampa, ela será deixada na cota 93,54, em que a máquina irá perfurar.





Figura 14.170 - Vista do fim da rampa e dos trabalhos na região do fundo do terreno  
(26/09/14)



Figura 14.171 - Vista para a frente do terreno (26/09/14)



Serão abertos cachimbos pequenos, com largura suficiente apenas para a máquina conseguir executar as estacas, a serem concretadas até o 3º subsolo. Entre os cachimbos serão deixadas bermas de largura 0,6m no topo, altura 2,2m e largura 2,5m na base.

Os blocos das estacas estão previstos para serem executados a partir de 06/10. A rampa deve mudar de posição para essa fase, o que é um remanejamento trabalhoso. Depois de executada a laje do 2º subsolo, as bermas que ficaram embaixo dela serão retiradas com bobcat (abertura das lanternas).



Figura 14.172 - Vista da rampa (26/09/14)

29.09.14-03.10.14



Figura 14.173 - Armação da estaca raiz (01/10/14).

Como a perfuratriz das estacas raiz estava trabalhando no canto do fundo não era possível fazer injeções nos grampos na lateral na face posterior.

No dia 01/10 também seria escavado um trecho da rampa junto à parede do fundo, de altura 1,5m e largura de aproximadamente 3m. No dia 02/10, seria retirado o restante da rampa, abrindo toda a parede do fundo, com uma retroescavadeira maior.



Figura 14.174 - Canto da frente. (01/10/14).

Em duas semanas termina o solo grampeado no fundo e na lateral, restando apenas a parte da frente ocupada pela rampa.



Figura 14.175 - Lateral na divisa com as casas (01/10/14).



Figura 14.176 - Parede lateral (01/10/14).



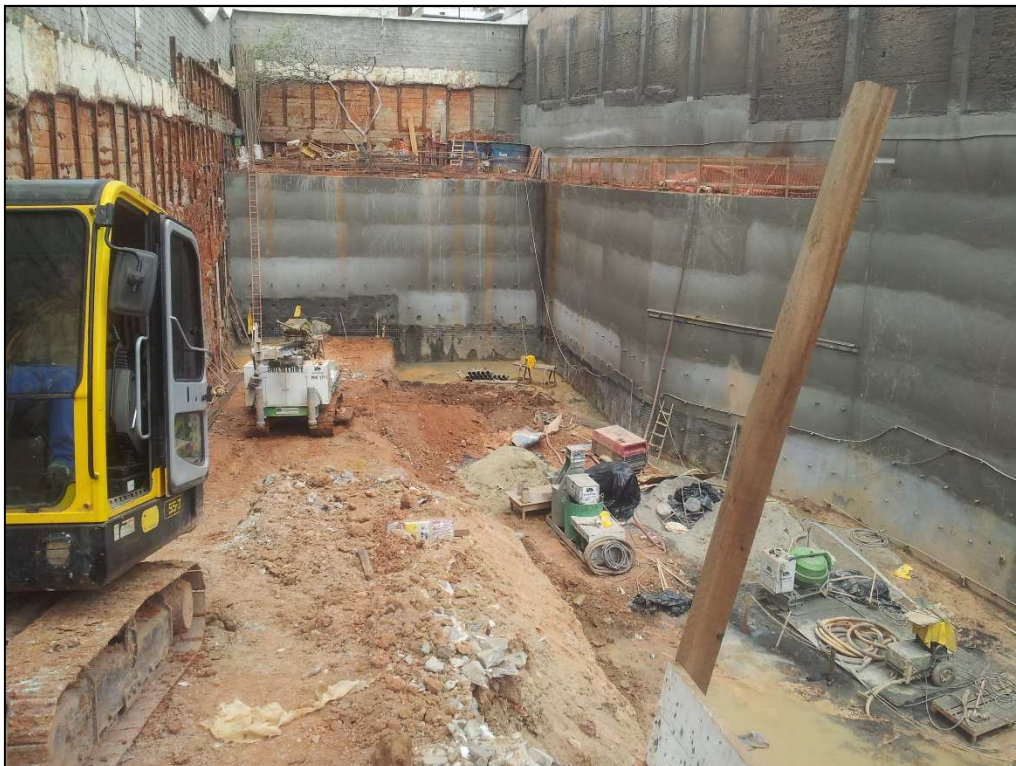


Figura 14.177 - Vista Geral do canteiro. (03/10/14)



Figura 14.178 - Topo da rampa (03/10/14).

06.10.14-10.10.14

O solo grampeado deve terminar na próxima semana, na face do fundo e na lateral.

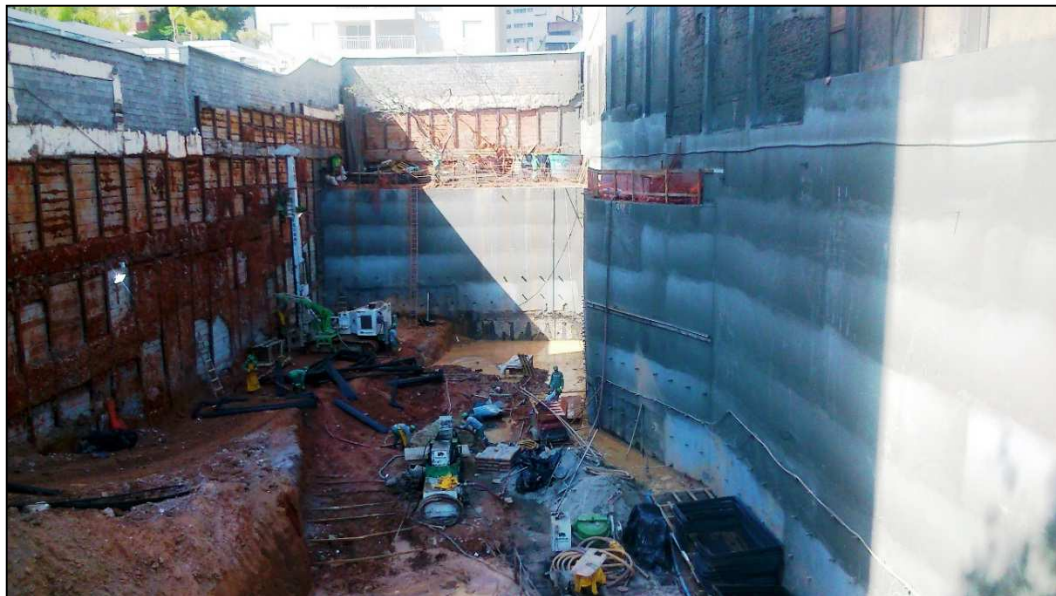


Figura 14.179 - Vista geral do canteiro. (08/10/14)

No entanto, nessa sexta começa a abertura dos blocos, com a escavadeira de 8t. Com isso, a área de trabalho fica mais estreita e depende da negociação com a equipe da empresa de fundações. Chegaram as armações dos blocos (estribos, ferros longitudinais, etc.).



Figura 14.180 - Armação dos blocos. (08/10/14)



No dia 08/10, não havia injeções por fazer, mas poderiam ser furados DHPs na face do fundo na lateral próxima a ela. Isso não foi possível, pois havia muita lama.



Figura 14.181 - Vista das atividades ao fundo do terreno. (08/10/14)



Figura 14.182 - Vista do chanfro da frente do terreno. (08/10/14)





Figura 14.183 - Vista da lateral do terreno, na divisa com as casas. (08/10/14)



Figura 14.184 - Rampa. (08/10/14)



13.10.14-17.10.14

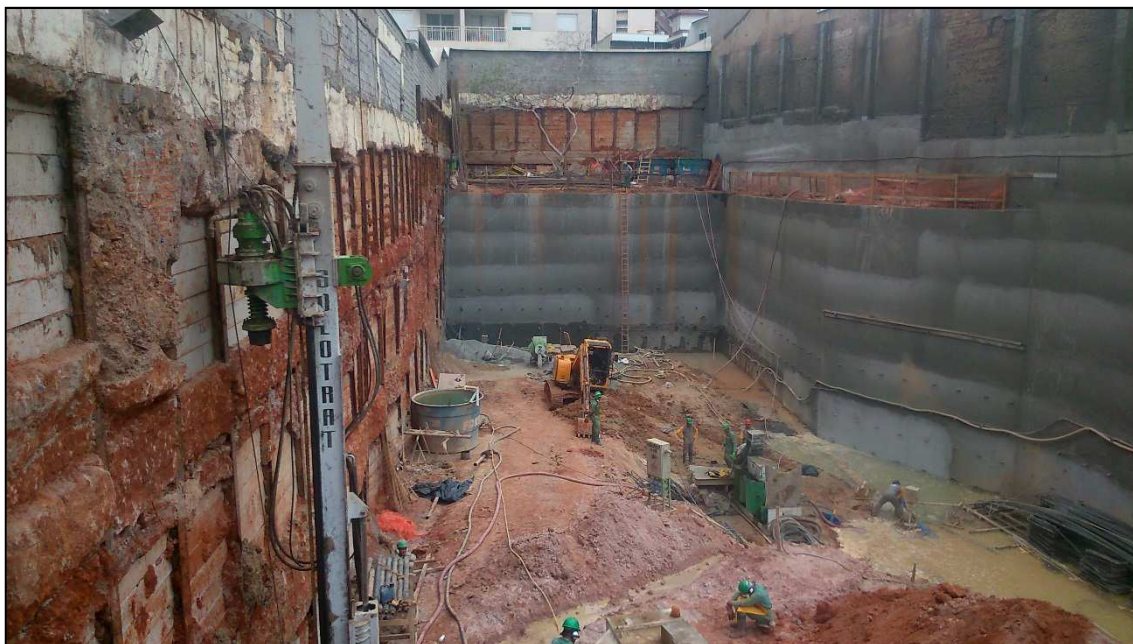


Figura 14.185 - Vista geral do canteiro. (15/10/14)

Como previsto, o solo grampeado terminou na face do fundo e na lateral nessa semana. Na quarta-feira faltavam apenas furos da última linha de DHPs. O restante dos serviços da Solotrat incluindo contenção e fundação deve ser concluído até sexta-feira da próxima semana. A rampa foi retirada completamente.

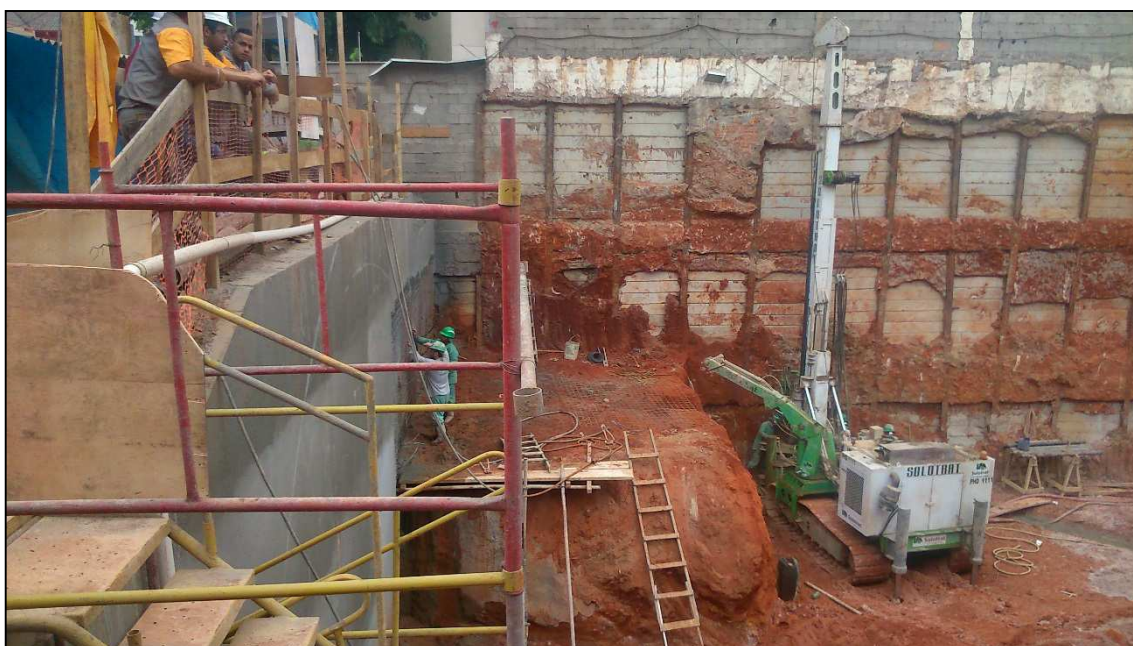


Figura 14.186 - Local onde a rampa estava. (15/10/14)

As armações dos blocos que haviam chegado à obra na semana anterior eram do bloco sob o poço do elevador e mais três blocos maiores.



Figura 14.187 - Armação dos blocos. (15/10/14)

Com a conclusão da contenção na face do fundo, seria aberto um caminho para drenagem da água acumulada na porção da lateral direita do subsolo.



Figura 14.188 - Canto do fundo (15/10/14)





Figura 14.189 - Vista da parede lateral, na divisa com as casas. (17/10/14)

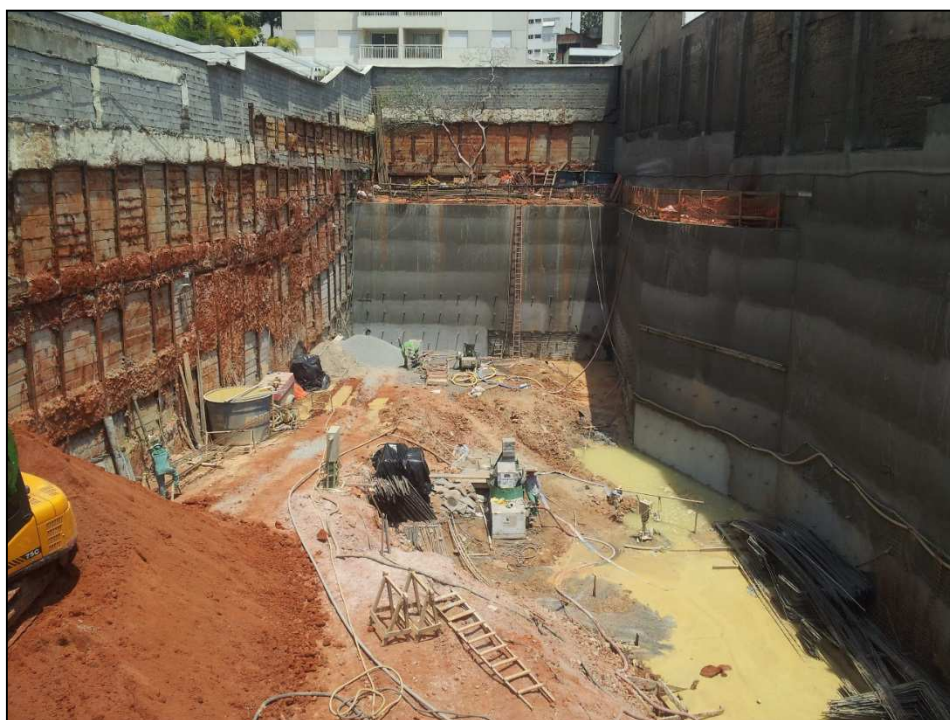


Figura 14.190 - Vista geral do canteiro no final da semana. (17/10/14)



Figura 14.191 - Região da frente do terreno. (15/10/14)

Ao final da obra, foi possível fechar o orçamento da contenção, cujos principais custos se encontram abaixo, não foram incluídos os ensaios de arrancamento pela Solotrat, pois seu custo é muito inferior frente ao preço global de execução (item 1 do orçamento). O custo do projeto também foi omitido.

O preço do sistema de contenção em solo grampeado foi, portanto, aproximadamente R\$1.870/m<sup>2</sup> de área de revestimento do concreto projetado.

Tabela 14.1 - Orçamento da contenção

|          |                                                                                                           |       |      | Preço (R\$)  |                  |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|--------------|------------------|
| ITEM     |                                                                                                           | QTDE  | UN   | unitário     | total            |
| <b>1</b> | <b>Mão de obra e execução de serviços geotécnicos, incl. materiais de drenagem e outros exceto item 2</b> | 1     | vb   | 1.200.000    | 1.200.000        |
| <b>2</b> | <b>Materiais</b>                                                                                          |       |      |              |                  |
| 2.1      | Cimento CPII-32-F - 50kg                                                                                  | 5910  | saco | 18,53        | 109.524          |
| 2.2      | Areia                                                                                                     | 344   | m³   | 58,00        | 19.952           |
| 2.3      | Pedrisco                                                                                                  | 358   | m³   | 58,00        | 20.764           |
| 2.4      | Barras de aço CA-50 Ø20mm                                                                                 | 37696 | kg   | 3,20         | 120.627          |
| 2.5      | Barras de aço CA-50 outras bitolas                                                                        | 6339  | kg   | 3,91         | 24.785           |
| 2.6      | Tela de aço soldada CA-60 Q-138                                                                           | 131   | pç   | 255,17       | 33.428           |
| 2.7      | Tela de aço soldada CA-60 Q-246                                                                           | 104   | pç   | 454,02       | 47.218           |
| <b>3</b> | <b>Leituras de instrumentação</b>                                                                         | 30    | dia  | 1.300        | 39.000           |
|          |                                                                                                           |       |      | <b>Total</b> | <b>1.615.298</b> |

Para um comparativo econômico adequado entre essa solução por solo grampeado e outros tipos de contenção, como parede diafragma, cortina atirantada, perfil pranchado e até mesmo uma outra solução em solo grampeado (com armação por tela única ou apenas fibras de polietileno) seria fundamental um dimensionamento que levasse em conta as particularidades dessa obra. Deve-se considerar também que o solo grampeado é o acabamento da vedação vertical, ao contrário desses outros sistemas. Também deve-se ter em mente, o passivo trabalhista, serventia de obra e um rateio do consumo de energia, água e produção de caçambas, aspectos pouco aprofundados em muitos orçamentos por composição de custos.

Alguns aspectos comparativos, no entanto, foram mencionados ao longo dessa descrição da execução da obra.



## 15. CÁLCULOS DO PROJETO ESTRUTURAL DO SOLO GRAMPEADO

### 15.1. Parâmetros do solo e dos grampos

Para a modelagem do solo, o mesmo foi dividido em camadas, a partir da sua caracterização nos relatórios dos sete furos de sondagem a percussão. As camadas foram divididas segundo o tipo de solo (predominantemente argila com frações silte e areia, porosa ou não) e faixas de  $N_{SPT}$ , que se correlaciona com a consistência ou compactidade. Com essas informações, estimaram-se os parâmetros geotécnicos do solo apresentados na tabela 15.1.1, que foram *input* para a análise de estabilidade global no software *Slide*.

Tabela 15.1.1 - Parâmetros das camadas de solo adotadas no modelo do Slide

| Símbolo | Camada        | Descrição                                                       | $N_{SPT}$                 | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $c'$ (kPa) | $\phi'$ (°) | Bond Strenght (kN/m) |
|---------|---------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|------------|-------------|----------------------|
| 1       | Aterro        | Argila Siltosa Arenosa                                          | < 4                       | 16,0                          | 5,0        | 20          | -                    |
| 3AgP1   | BSSP (Argila) | Argila Siltosa pco Arenosa, Porosa, muito mole a mole, vermelha | < 5                       | 15,0                          | 10,0       | 25          | 11                   |
| 3AgP1   | BSSP (Argila) | Argila Siltosa pco Arenosa, Porosa, mole a média, vermelha      | $5 \leq N_{spt} \leq 10$  | 15,0                          | 15,0       | 25          | 23                   |
| 3Ag1    | BSSP (Argila) | Argila Siltosa pouco Arenosa, mole a média                      | $5 \leq N_{spt} \leq 10$  | 18,0                          | 25,0       | 22          | 28                   |
| 3Ag1    | BSSP (Argila) | Argila Siltosa pouco Arenosa, média a rija                      | $11 \leq N_{spt} \leq 20$ | 20,0                          | 40,0       | 22          | 34                   |
| 3Ag1    | BSSP (Argila) | Argila Siltosa pouco Arenosa, dura                              | > 20                      | 20,0                          | 60,0       | 22          | 45                   |
| 3Ar1    | BSSP (Areia)  | Areia Fina e média, argilosa, medianamente compacta a compacta  | $11 \leq N_{spt} \leq 15$ | 19,0                          | 3,0        | 30          | 31                   |

Os valores dos parâmetros do solo (coesão  $c'$ , ângulo de atrito  $\phi'$ , peso específico  $\gamma$ ) foram adotados com base na bibliografia usual, incluindo as Normas Técnicas Complementares - NC03 da Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô de São Paulo). Também foi adotado o valor do coeficiente de permeabilidade para avaliar o sistema de drenagem a ser empregado de acordo com a estimativa da percolação.

Para se determinar a resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo ( $q_s$ ) do projeto, foram testadas duas correlações com base no  $N_{SPT}$ : Ortigão (1997) e Springer (2006). Verifica-se rapidamente que a correlação de Springer fornece estimativas de  $q_s$  mais conservadoras, pois varia com o logaritmo de  $N_{SPT}$ , ao contrário de Ortigão que estabelece variação linear de  $q_s$  com o  $N_{SPT}$ .

Como a correlação de Springer (2006) resultou em valores mais conservadores e não se dispunha de outros ensaios de campo nem de laboratório para fornecer dados mais

confiáveis, essa foi a correlação adotada. Os  $N_{SPT}$ s usados nessa fórmula correspondiam ao valor médio em cada camada ou o valor mais recorrente.

Ortigão (1997):

$$q_s = 50 + 7,5 N_{SPT} \text{ [kPa]} \quad (15.1.1)$$

Springer (2006):

$$q_s = 45,12 \ln(N_{SPT}) - 14,99 \text{ [kPa]} \quad (15.1.2)$$

A primeira correlação foi obtida com base em ensaios de arrancamento em solos de São Paulo, Brasília e Rio de Janeiro, em grampos de diâmetro 75mm e 150mm injetados sem pressão. A dispersão dos valores obtidos foi considerável.

A segunda correlação foi obtida para solo residual de gnaiss típico do Rio de Janeiro.

Outros inputs do *Slide* foram o atrito unitário solo-grampo  $q_s$  multiplicado pela área lateral do grampo (diâmetro  $D = 10\text{cm}$ ) em  $\text{kN/m}$ . e a força na cabeça do grampo ( $T_o$ ).

Os carregamentos usados foram: sobrecarga de tráfego, adotando-se  $20\text{kN/m}^2$ , valor próximo ao do trem tipo TB 45 homogeneizado; demais sobrecarga na calçada e no canteiro, adotando-se o valor mínimo de  $10\text{kN/m}^2$  recomendado pelo Metrô de São Paulo.

## 15.2. Metodologia de cálculo

Até o momento não existe no Brasil uma norma que regulamenta o projeto e a execução de estruturas em solo grampeado. As diretrizes do projeto, portanto seguiram as normas usuais de obras geotécnicas (NBR 6122 – Projeto e execução de fundações, NC03 do Metrô de São Paulo), a norma americana *Geotechnical Engineering Circular No. 7 – Soil Nail Walls* (2003) da FHWA e a experiência do engenheiro projetista. A seguir será sintetizada a rotina de cálculo.

Obteve-se a força máxima nos grampos ( $T_G$ ) para o aço da armadura (CA-50) considerando diminuição da seção resistente em 2mm por corrosão, por se tratar de uma estrutura permanente e pela ausência de ensaios de prova de carga previstos, conforme uma interpretação da norma de fundações, NBR 6122/96. Usou-se a fórmula:

$$T_G = A_s \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (15.2.1)$$

Em seguida foi estimado, para os grampos, o  $q_s$  a partir das correlações (como descrito em 15.1.) e a força na cabeça do grampo ( $T_o$ ), a partir da fórmula proposta pelo método da FHWA (2003), válida para espaçamento dos grampos na vertical ( $S_v$ ) ou na horizontal ( $S_h$ ), em metros,  $S_{m\acute{a}x} < 3m$ :

$$T_o = T_G [0,60 + 0,20 (S_{m\acute{a}x} - 1)] \quad (15.2.2)$$

Seguiram-se às verificações propostas pelo método da FHWA para ruptura externa, análogas às utilizadas para muros de arrimo: deslizamento, capacidade de carga e estabilidade global.

Para o deslizamento, consideraram-se as forças resistentes (atrito interno do material da base) e as forças atuantes (empuxo ativo do solo, calculado por Rankine – método adequado para a geometria do problema, implicando em  $\delta = 0^\circ$  – e empuxo da água) em uma cunha bilinear que envolve os grampos. Essa verificação foi feita apenas para a seção 18, pois é a mais crítica, maior altura do corte e nível d'água elevado. O fator de segurança deve ser superior a 1,5. As fórmulas usadas foram:

$$FS_D = \frac{\Sigma F_{resist}}{\Sigma F_{at}} \geq 1,5 \quad (15.2.3)$$

$$\Sigma F_{resist} = (W + E_A \sin \delta) \tan \phi'_{base} + c'_{base} \cdot B_L \quad (15.2.4)$$

$$\Sigma F_{at} = E_A \cos \delta \quad (15.2.5)$$

Em que

W: peso da cunha (até a extremidade do grampo) [kN/m largura]

B<sub>L</sub>: comprimento da base da cunha [m]

E<sub>A</sub>: empuxo ativo [kN/m largura]

$\delta$ : ângulo de atrito entre a cunha de solo e o solo da base [°]



Empuxo por Rankine:

$$\sigma'_h = K_a \sigma'_v - 2c' \sqrt{K_a} \quad (15.2.6)$$

Não foi calculada a segurança à ruptura do solo de fundação (apesar de ter sido verificada), pois a FHWA (2003) só exige esse procedimento em caso de solos moles. Portanto a fundação do paramento do solo grampeado não foi projetada para se alargar com o objetivo de reduzir as tensões no solo. O fator de segurança deve ser superior a 2,5.

A estabilidade global foi analisada no *Slide*, com os parâmetros detalhados em 15.1., e no *PLAXIS*. Esse é o modo de ruptura que define o dimensionamento da contenção. Foram feitas análises para cada geometria de seção típica em que se variaram o comprimento dos grampos (6m, 8m, 10m, 11m ou 12m), o espaçamento vertical e horizontal entre grampos (1,0m ou 1,1m), a bitola do aço (16mm ou 20mm) buscando-se atingir um fator de segurança superior a 1,5 em todas as seções, o que é recomendado para obras de contenção permanentes (a estrutura em solo grampeado em questão não terá grande solicitação após a construção do Edifício Corporativo – Turiassu, mas não será solidarizada a estrutura).

Outras formas de ruptura, verificadas pelo *Slide*, incluem rompimento dos chumbadores à tração, arrancamento dos grampos e ruptura na cabeça dos grampos. Seguindo-se o método da FHWA (2003), o paramento foi verificado à flexão e à punção (em que o fator de segurança deve resultar superior a 1,5) como uma laje solicitada pela tração na cabeça dos grampos concentrada e pela pressão do solo distribuída.

O cálculo resultou que o paramento não precisaria de armadura especial de flexão na cabeça do grampo (do tipo garateia, usado em obras da DERSA) juntamente com tela soldada Q-283, pois o fator de segurança mínimo de 1,5 foi atendido para armação em tela Q-246, que foi a solução adotada no projeto. A tela soldada na face do paramento oposta ao solo é construtiva, tendo sido adotada a tela soldada Q-138.

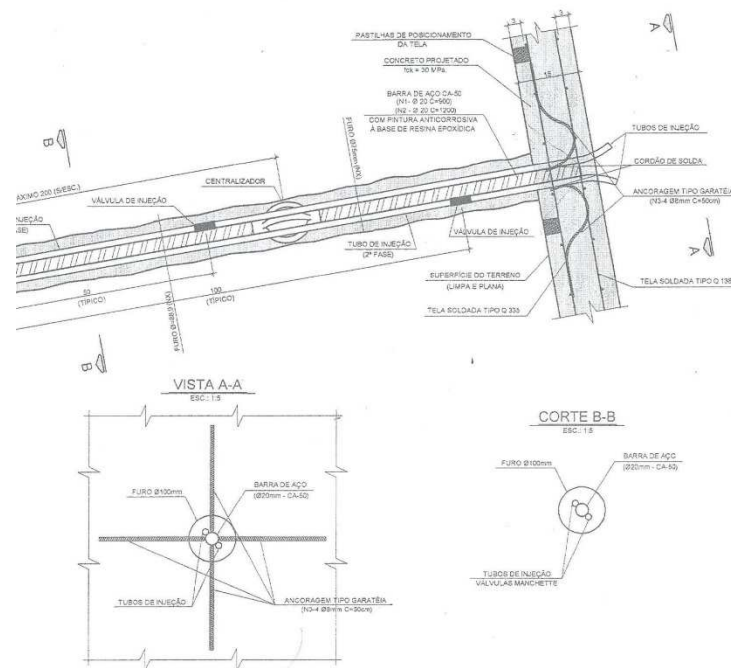


Figura 15.2.1 – Solução com garateia + tela soldada

O cálculo do paramento muitas vezes é dispensado nos projetos de solo grampeado, adotando-se espessura de parede e armação com base no empirismo, sendo usual a armação com fibras de aço. Nesse projeto atentou-se para a possibilidade de ruptura frágil da parede pela tração exercida na cabeça dos grampos, que não deve ser desprezada.

Segue a formulação da FHWA (2003) para cálculo da capacidade do paramento à flexão e à punção; nessa última, a força máxima de punção é calculada da maneira usual para lajes e pode ser maior caso se considere a contribuição do solo por  $C_p$  (que assume valor máximo de 1,15, mas pode ser considerado como 1,0, a favor da segurança).

Ruptura à flexão (FHWA,2003):

$$R_{FF} \leq \begin{cases} \frac{C_F}{265} (a_{vn} + a_{vm}) \left( \frac{S_h \cdot h}{S_v} \right) f_y \\ \frac{C_F}{265} (a_{nn} + a_{nm}) \left( \frac{S_v \cdot h}{S_h} \right) f_y \end{cases} \quad (15.2.7)$$

$$FS_{FF} = \frac{R_{FF}}{T_o} \geq 1,5 \quad (15.2.8)$$

Em que

RFF: capacidade à flexão ou máximo momento por unidade de largura [kN]  
CF: Fator que considera a não uniformidade das pressões do solo no paramento [-]  
h: espessura do paramento [m]  
avn: área de armadura por largura na direção vertical na cabeça do grampo [mm<sup>2</sup>/m]  
avm: área de armadura por largura na direção vertical entre grampos [mm<sup>2</sup>/m]  
ahn: área de armadura por largura na direção horizontal na cabeça do grampo [mm<sup>2</sup>/m]  
ahm: área de armadura por largura na direção horizontal entre grampos [mm<sup>2</sup>/m]  
fy: tensão de escoamento do aço [MPa]

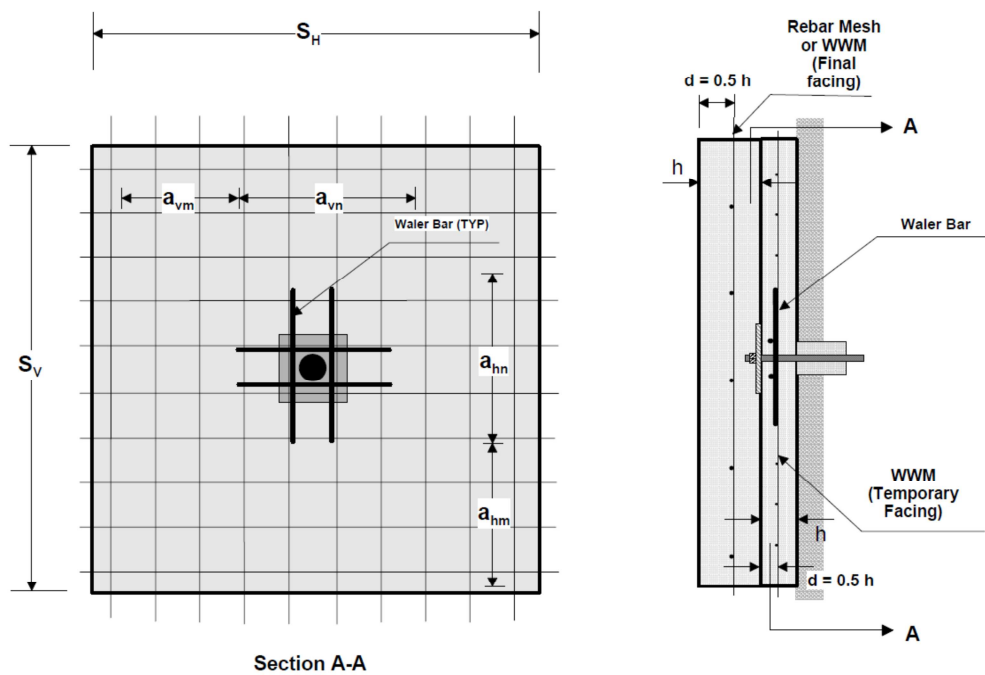


Figura 15.2.2 – Geometria para cálculo da capacidade à flexão (FHWA, 2003)

Tabela 15.2.1 – Fatores CF (Byrne et al., 1998)

| Type of Structure | Nominal Facing Thickness<br>mm (in.) | Factor<br>$C_F$ |
|-------------------|--------------------------------------|-----------------|
| Temporary         | 100 (4)                              | 2.0             |
|                   | 150 (6)                              | 1.5             |
|                   | 200 (8)                              | 1.0             |
| Permanent         | All                                  | 1.0             |

Ruptura à punção (FHWA,2003):



$$R_{FP} = C_P V_F \quad (15.2.9)$$

$$V_F = 330 \sqrt{f'_c} \pi D'_c h_c \quad (15.2.10)$$

$$FS_{FP} = \frac{R_{FP}}{T_o} \geq 1,5 \quad (15.2.11)$$

Em que

$R_{FP}$ : capacidade à punção [kN]

$C_P$ : fator de correção para a contribuição da capacidade de suporte pelo solo [-]

$V_F$ : força cortante de punção [kN]

$f'_c$ : resistência à compressão do concreto projetado [MPa]

$D'_c$ : diâmetro efetivo da superfície cônica de punção [m]

$h_c$ : profundidade efetiva a superfície cônica de punção [m]

Adicionalmente, foi feita uma análise de tensão-deformação em elementos finitos e de estabilidade no software *PLAXIS*. Os fatores de segurança globais resultaram inferiores aos obtidos na análise de estabilidade do *Slide*. Isso se deve aos diferentes dados de entrada, pois no *PLAXIS* se usam parâmetros de deformabilidade do solo ao contrário do *Slide*. Não é usual nos projetos a análise tensão-deformação de contenções em solo grampeado.

O arranjo de drenos de paramento e DHPs foi feito considerando o nível d'água elevado, baixa permeabilidade das camadas de solo argiloso e presença pouco marcante de lentes de areia, dispensando sistema de bombeamento a princípio.

Quanto ao dimensionamento, cabe comentar que a norma americana da FHWA foi elaborada baseando-se em diversos estudos de obras instrumentadas nos EUA. Buscando uniformizar o projeto de contenção em solo grampeado, foi elaborado um método prescritivo muito pragmático, que fornece regras que padronizam o dimensionamento de todos os elementos que compõe o projeto de contenção em solo grampeado.

Com a preocupação de que seu método fosse aplicado a solos ruins (notadamente aterros), este resultou claramente antieconômico para solos de boa resistência, incluindo alguns dos solos tropicais, como mostram diversos projetos de solo grampeado elaborados no Brasil.

As tensões de cisalhamento aplicadas pelos grampos no solo criam, a partir de um certo ponto no maciço, um campo de tensões de compressão, aumentando o confinamento do

solo. Isso é possível quando o solo tem coesão suficiente para resistir às tensões de cisalhamento, e por efeito de arqueamento, criar as tensões de compressão.

Em camadas de aterro, não coesivas, as tensões de cisalhamento não são assimiladas pelo maciço, resultando em grandes tensões de empuxo na parede de concreto projetado. Nesse caso, os grampos passam a funcionar na prática como se fossem apenas ancoragens passivas e não inclusões; isto é, são mobilizados com deslocamentos da parede, porém em sua extensão na camada, tem-se um comprimento livre (não ancorado).

O método, portanto, resulta em paredes de elevada espessura, normalmente, armadura dupla e placas de ancoragem, sendo dimensionadas como lajes, à flexão e à punção. Para solos bons, no entanto, diversas obras executadas no Brasil mostram que o uso de fibras de aço ou poliméricas (como de polietileno) aumentando a resiliência e a resistência à tração do concreto projetado fazem com que as armaduras sejam dispensáveis, bem como a grande espessura da parede. Nesse caso o concreto projetado funciona como uma membrana que resiste à tração. (Zirlis et al., 1999)

Para o caso particular da obra de contenção do Edifício Corporativo – Turiassu, no entanto, a parede do solo grampeado é a parede do subsolo e portanto precisava de um acabamento liso e não poderia deslocar ou fissurar, o que implica na necessidade de uso de armação à flexão com telas soldadas, questionando-se apenas a necessidade de tela dupla, visto que isso não é mais executado em obras de solo grampeado no Brasil, sem prejuízo do desempenho almejado para essa obra.

### **15.3. Análise de estabilidade por seções no *Slide***

Seguem alguns resultados do *Slide* para as análises de estabilidade de modelos das seções típicas de acordo com o projeto. variando-se alguns parâmetros como comprimento de barras, espaçamentos vertical e horizontal e até mesmo bitola da armadura, buscou-se atingir fator de segurança próximo a 1,5.

#### Seções 15 e 16

Trata-se de uma seção típica da contenção da frente do terreno, com reforço de grampos verticais e corte vertical de 10 m com as características:

- 9 linhas de grampos: as 6 primeiras com 12 m e as 3 últimas com 10 m
- espaçamento horizontal e vertical de 110 cm

Usando as camadas adotadas para a sondagem SP-06, testaram-se os modelos:

a)

- 11 linhas de grampos: as 6 primeiras com 12 m e as 5 últimas com 10 m
- espaçamento horizontal e vertical de 100 cm
- FS = 1,83

b)

- 10 linhas de grampos: as 6 primeiras com 12 m e as 4 últimas com 10 m
- espaçamento horizontal e vertical de 110 cm
- FS = 1,67

### Seção 17

Trata-se de uma seção típica da contenção da lateral do terreno, com reforço de grampos verticais e cavaletes e onde a parede externa está recuada em relação à parede dos subsolos. A sondagem detectou uma camada superficial de 1 m de aterro. São características da seção:

- corte de 2,0 m até a cota do térreo e corte de 9,9 m para os subsolos
- 13 linhas de grampos: as 7 primeiras com 12 m e as 6 últimas com 10 m
- espaçamento horizontal e vertical de 100 cm

Usando as camadas adotadas para a sondagem SP-06, testaram-se os modelos:

a)

- 13 linhas de grampos de 12 m
- espaçamento horizontal e vertical de 100 cm
- FS = 1,66

b)

- 10 linhas de grampos: as 6 primeiras com 12 m e as 7 últimas com 11 m
- espaçamento horizontal e vertical de 110 cm
- FS = 1,60

### Seção 18

Trata-se de uma seção típica da contenção da lateral do terreno, com reforço de grampos verticais e cavaletes e onde o corte é vertical desde o início da escavação.. São características da seção:

- corte de 11,9 m



- 12 linhas de grampos: as 6 primeiras com 12 m e as 6 últimas com 10 m
- espaçamento horizontal e vertical de 100 cm

Usando as camadas adotadas para a sondagem SP-03, testaram-se os modelos:

a)

- 12 linhas de grampos: as 4 primeiras com 12 m e as 8 últimas com 10 m
- espaçamento horizontal e vertical de 100 cm
- FS = 1,46

b)

- 12 linhas de grampos: as 4 primeiras com 12 m e as 8 últimas com 11 m
- espaçamento horizontal e vertical de 110 cm
- FS = 1,45

c)

- 13 linhas de grampos: as 4 primeiras com 12 m e as 9 últimas com 11 m
- espaçamento horizontal e vertical de 100 cm
- FS = 1,61

d)

- 13 linhas de grampos: as 6 primeiras com 12 m e as 7 últimas com 10 m
- espaçamento horizontal e vertical de 100 cm
- FS = 1,53

### Seção 21

Trata-se de uma seção típica da contenção no fundo do terreno, com reforço de grampos verticais. O comprimento das primeiras linhas de grampos foi limitado pelo subsolo da torre ao fundo. São características da seção:

- corte de corte 10,0 m
- 9 linhas de grampos: as 3 primeiras com 6 m e as 6 últimas com 8 m
- espaçamento horizontal e vertical de 100 cm

Usando as camadas adotadas para a sondagem SP-02, testaram-se os modelos:

a)

- 9 linhas de grampos: as 3 primeiras com 6 m e as 6 últimas com 8 m
- espaçamento horizontal e vertical de 100 cm
- FS = 1,68

Também foram testados modelos com barras de 8 e 12 m e com armadura dos grampos de  $\phi$  16 mm.

## 16. ESTUDO DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE

### 16.1. Hipóteses do modelo

Propõe-se aqui um modelo de cálculo para a análise de estabilidade global do solo reforçado, do tipo equilíbrio limite, baseado no método da Homogeneização. Nesse método, consideraram-se os esforços desenvolvidos nos grampos em duas parcelas: uma acrescida à tensão confinante, perpendicular ao plano de ruptura, e outra contrária ao esforço de cisalhamento, paralela ao plano de ruptura. Usou-se o mesmo fator de segurança global para a resistência do solo ( $c'$  e  $tg\phi'$ ) e para os esforços, apenas de tração, em cada ancoragem passiva (G), como se fossem o mesmo material, homogeneizado.

O fator de segurança das superfícies críticas, de forma circular, foi determinado pelo método de Bishop Simplificado, com a hipótese adicional de que as superfícies passam pelo pé do talude. Desprezou-se o efeito dos grampos verticais e cavaletes na resistência do solo. Eles são importantes para a estabilidade local na região do paramento; os grampos verticais, por se prolongarem 2,0m abaixo da cota de escavação, podem ainda mobilizar um empuxo passivo, apesar de a taxa de armadura de flexão ser  $3,15\text{cm}^2/\text{m}$ . Logo, a hipótese do círculo passar pelo pé do talude, a exemplo de outros métodos de análise de equilíbrio limite (como Alemão, Davis, Juran), é a favor da segurança.

Também desprezou-se o efeito do atrito lateral do solo com o paramento, que possui pequena espessura e não possui alargamento para fundação, não funcionando na prática como um muro de flexão.

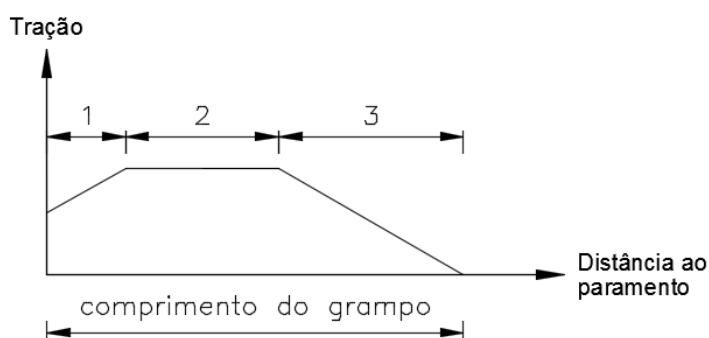
A mobilização de esforços nos grampos depende da orientação dos grampos em relação à direção normal à superfície de deslizamento no ponto de interseção do grampo com esta superfície. Nos modelos essa orientação é dada pelo ângulo  $\eta$ , de acordo com a figura 16.1.2. Clouterre cita resultados de ensaios de cisalhamento direto em modelo reduzido de amostras de solo arenoso com grampos que indicam que ocorre tração para  $\eta > -10^\circ$ .

Isso pode ser explicado porque em um primeiro momento da formação da superfície de ruptura, considerando movimento de corpo rígido do maciço, se o grampo estiver abaixo da normal à superfície de ruptura na zona passiva, pode haver essa compressão. No entanto, é esperado que após esse primeiro momento, o cisalhamento na interface solo-grampo seja mobilizado, ocorrendo então esforço de tração no grampo.

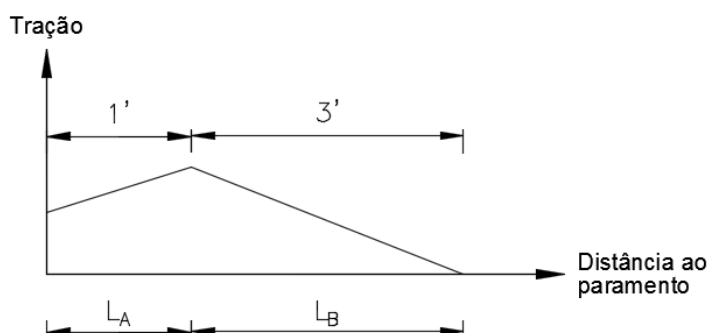
Foram testados alguns modelos variando o modo como se considera o esforço desenvolvido nos grampos no estado limite último.

O esforço de tração desenvolvido nos grampos (G) pode ser determinado da seguinte maneira, usada no software de geotecnia *Slide*: o grampo é dividido nas regiões 1, 2 e 3 (figura 16.1.1a) em que diferentes mecanismos de ruptura comandam a capacidade resistente. Esse modo de considerar os esforços foi considerado nos modelos do item 16.2 como diagramas tipo 1.

Na iminência da ruptura, considera-se que na região 1, o grampo atinge a capacidade da ancoragem junto ao paramento  $T_0$  e a tração cresce limitada pelo parâmetro  $q_s$ . Esse esforço aumenta até atingir a capacidade de tração do grampo  $T_{máx}$ , que depende do aço e da aderência entre o aço e a bainha (região 2). Na zona passiva, a tração é limitada por  $q_s$  até atingir  $T_{máx}$ . A tração suportada pelo grampo é determinada pela intersecção da superfície de ruptura com o grampo.



(a)





(b)

Figura. 16.1.1 – Mobilização dos esforços no grampo

Outra forma de considerar o diagrama dos grampos. Uma das principais conclusões dos estudos do Projeto Clouterre, foi a de que o esforço máximo nos grampos é atingido próximo à superfície de ruptura e o esforço na ancoragem, em geral, segue a relação  $T_o/T_{\max} \geq 0,6$ . Esse modo de considerar os esforços foi considerado nos modelos do item 16.2 como diagramas tipo 2.

As solicitações, que levam a ruptura, decorrem do peso próprio do maciço de solo, da sobrecarga e das pressão neutra, que diminui a tensão normal efetiva. As resultantes dos esforços solicitantes e resistentes são apresentadas na figura 16.1.2:

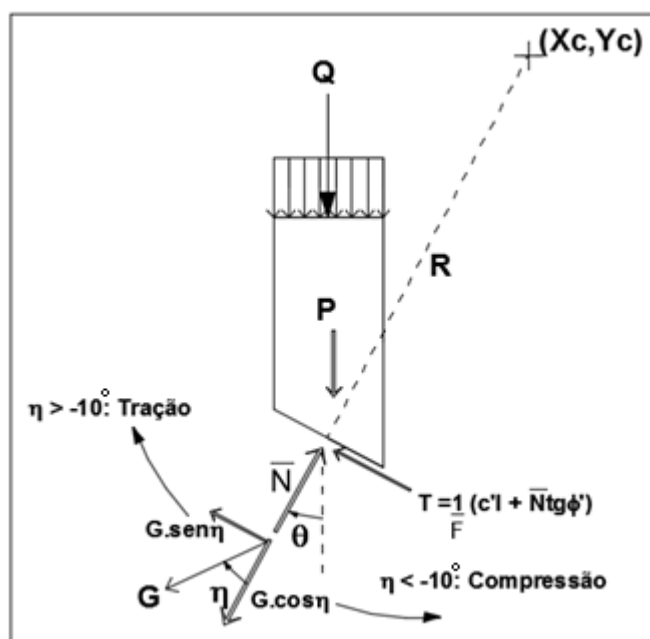


Figura 16.1.2 – Esforços em uma lamela genérica

O fator de segurança em uma lamela é definido pelas eqs. 16.1.1. (em uma lamela) e 16.1.2 (no maciço). Na eq. 16.1.2, a componente tangencial do esforço do grampo na base da lamela foi alocada considerada aumentando a resistência. Outra possibilidade seria considerá-la diminuindo a solicitação de cisalhamento na superfície de ruptura. Como os grampos são reforços (passivos) conceitualmente a formulação apresentada na eq. 16.1.2 é a mais correta.

$$T = \frac{1}{F}(c'\ell + \bar{N}.tg\phi')$$
(16.1.1)

$$F = \frac{\Sigma(c'\ell + \bar{N}.tg\phi' + G.sen\eta)}{\Sigma(P + Q)sen\theta}$$
(16.1.2)

Escrevendo o equilíbrio da lamela na direção vertical, conforme o método de Bishop Simplificado, tem-se:

$$(\bar{N} + U).cos\theta + T.sen\theta = P + Q + G.cos(\eta + \theta)$$
(16.1.3)

$$T = \frac{P + Q + G.cos(\eta + \theta) - (\bar{N} + U).cos\theta}{sen\theta}$$
(16.1.4)

Igualando-se as eqs. 16.1.3 e 16.1.4:

$$\bar{N}\left(cos\theta + \frac{tg\phi' sen\theta}{F}\right) = P + Q - u\Delta x + G.cos(\eta + \theta) - \frac{c'\Delta x.tg\theta}{F}$$
(16.1.5)

Isolando a força normal na eq. 16.1.5:

$$\bar{N} = \frac{P + Q - u\Delta x + G.cos(\eta + \theta) - \frac{c'\Delta x.tg\theta}{F}}{cos\theta + \frac{tg\phi' sen\theta}{F}}$$
(16.1.6)

Substituindo a eq. 16.1.6 na eq. 16.1.2, chega-se a fórmula iterativa do fator de segurança de Bishop simplificado:

$$F = \frac{\sum \left\{ c' \ell + \left[ \frac{P + Q - u \Delta x + G \cdot \cos(\eta + \theta) - \frac{c' \Delta x \cdot \tan \theta}{F}}{\cos \theta + \frac{\tan \phi' \sin \theta}{F}} \right] \tan \phi' + G \cdot \sin \eta \right\}}{\sum (P + Q) \sin \theta} \quad (16.1.7)$$

Por outro lado, considerando a componente tangencial do esforço no grampo reduzindo as solicitações ao invés de aumentar a resistência, tem-se a eq. 16.1.8, que será usada em alguns modelos do item 16.2.

$$F = \frac{\sum (c' \ell + \bar{N} \cdot \tan \phi')}{\sum (P + Q) \sin \theta - G \cdot \sin \eta} \quad (16.1.8)$$

Quanto à mobilização de esforços de acordo com a orientação do grampo, foram testados modelos que consideravam grampos tracionados para qualquer valor de  $\eta$  e para  $\eta > 10^\circ$ . Nos grampos comprimidos, a mobilização de esforços seguiu os diagramas da figura 1.2.1, porém com esforço nulo junto ao paramento. A componente normal  $G \cdot \cos \eta$  não é levada em conta, pois implicaria em desconfinamento (algo que não é provável de ocorrer) enquanto que a componente tangencial  $G \cdot \sin \eta$  é favorável.

Os parâmetros de resistência ( $c'$  e  $\tan \phi'$ ) e peso específico ( $\gamma_{\text{nat}}$  e  $\gamma_{\text{sat}}$ ) do solo e de resistência do reforço ( $q_s$ ,  $T_{\text{máx}}$  e  $T_o$ ) foram os mesmos adotados no projeto estrutural, bem como as sobrecargas, para cada seção típica da contenção calculada.

O valor de projeto para  $T_o$  foi de 66 kN (ou  $T_o/T_{\text{máx}} = 0,6$ ) o que dificilmente ocorreria, dada que a ancoragem da barra de aço é em curva de raio longo, em vez de placa metálica com porca e parafuso, em que se admite usualmente valores com 0,5 ou 0,6 para  $T_o/T_{\text{máx}}$ .

A geometria da seção avaliada (corte 19 no projeto), uma das mais críticas da contenção, foi baseada no desenho de detalhamento, conforme a figura 16.1.3 abaixo.



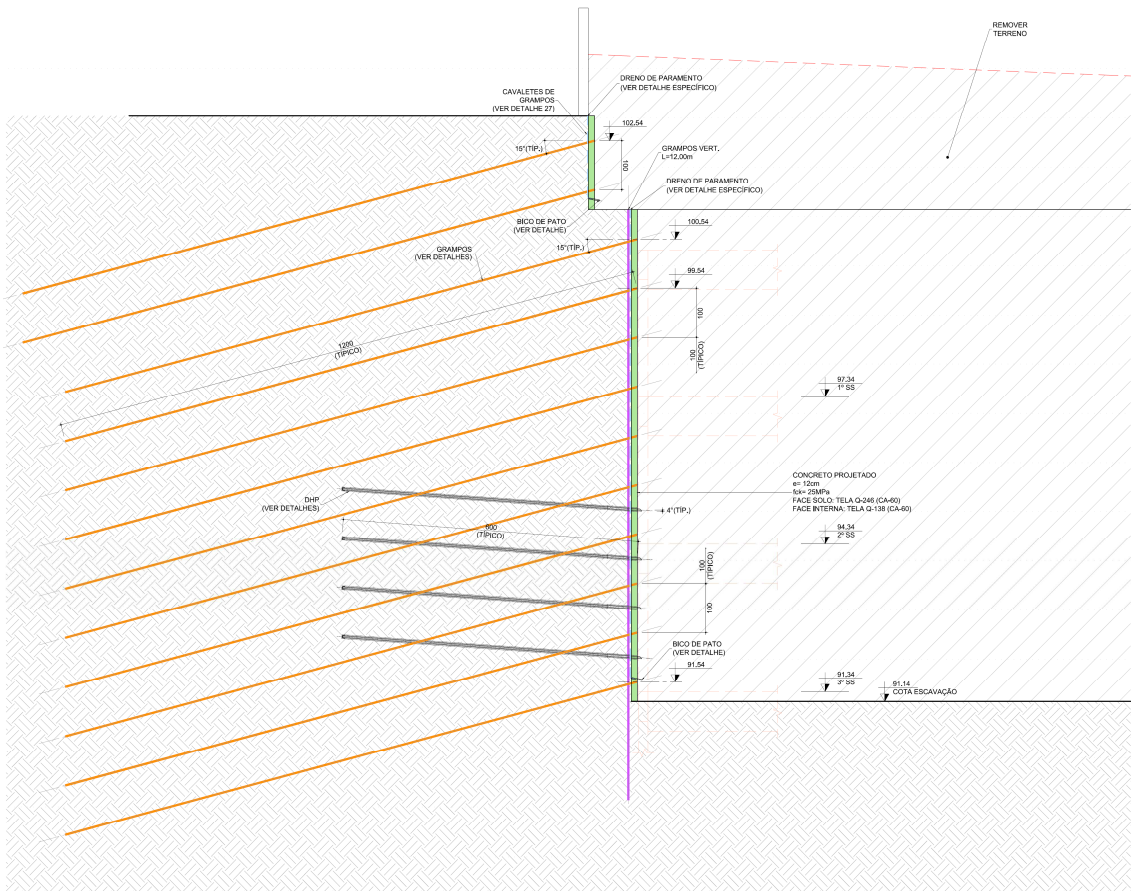


Figura 16.1.3 – Seção 19 do projeto

16.2. Resultados

Abaixo estão relacionadas as superfícies críticas às conjecturas de esforços nos grampos. O diagrama de esforços tipo 1 é o usado no software *Slide* (figura 16.1.1a) e o diagrama tipo 2 é o da figura 16.1.1b.

Tabela 16.2.1 – Hipóteses e resultados dos modelos

| Nº do Modelo | Diagrama de esforços |        | Mobilização da tração |                    | Componente G.sen $\eta$ |     | Superfície crítica   |                    |                    |       |
|--------------|----------------------|--------|-----------------------|--------------------|-------------------------|-----|----------------------|--------------------|--------------------|-------|
|              | Tipo 1               | Tipo 2 | todo $\eta$           | $\eta > -10^\circ$ | + R                     | - S | F <sub>mín</sub> (m) | X <sub>c</sub> (m) | Y <sub>c</sub> (m) | R (m) |
| Projeto      | x                    |        | x                     |                    | x                       |     | 1,73                 | 5,8                | 105,0              | 15,2  |
| 1            | x                    |        | x                     |                    | x                       |     | 1,56                 | 28,8               | 122,3              | 42,4  |
| 2            | x                    |        |                       | x                  | x                       |     | 1,56                 | 28,8               | 122,3              | 42,4  |
| 3            | x                    |        | x                     |                    |                         | x   | 1,68                 | 32,0               | 103,0              | 34,1  |
| 4            | x                    |        |                       | x                  |                         | x   | 1,79                 | 43,0               | 106,0              | 45,5  |
| 5            |                      | x      | x                     |                    | x                       |     | 1,35                 | 31,5               | 103,0              | 33,7  |
| 6            |                      | x      |                       | x                  | x                       |     | 1,41                 | 33,3               | 105,0              | 36,0  |
| 7            |                      | x      | x                     |                    |                         | x   | 1,13                 | 46,3               | 103,0              | 47,7  |
| 8            |                      | x      |                       | x                  |                         | x   | 1,27                 | 62,5               | 107,8              | 64,7  |

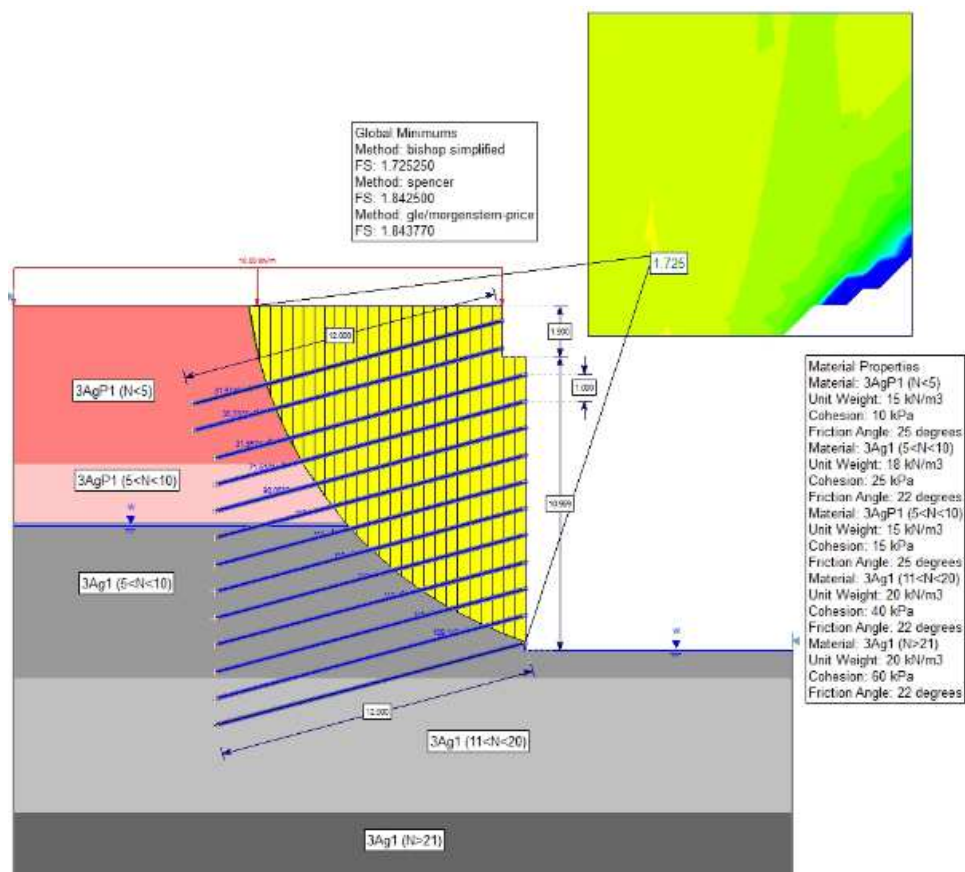


Figura 16.2.1 – Superfície crítica obtida no projeto

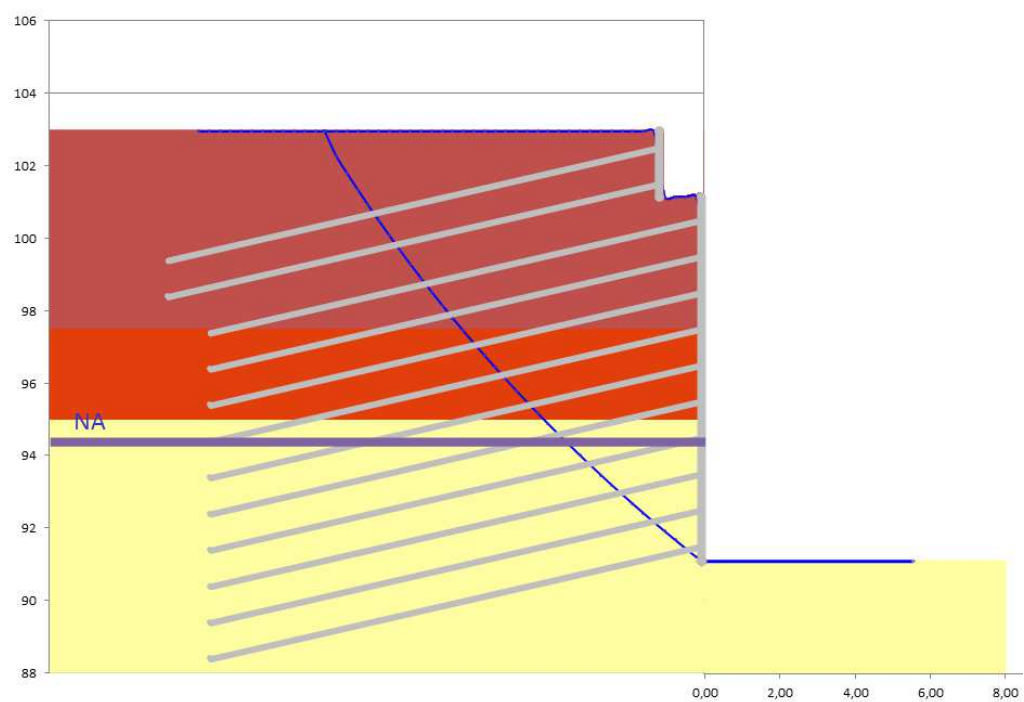


Figura 16.2.2 – Superfície crítica dos modelos 1 e 2

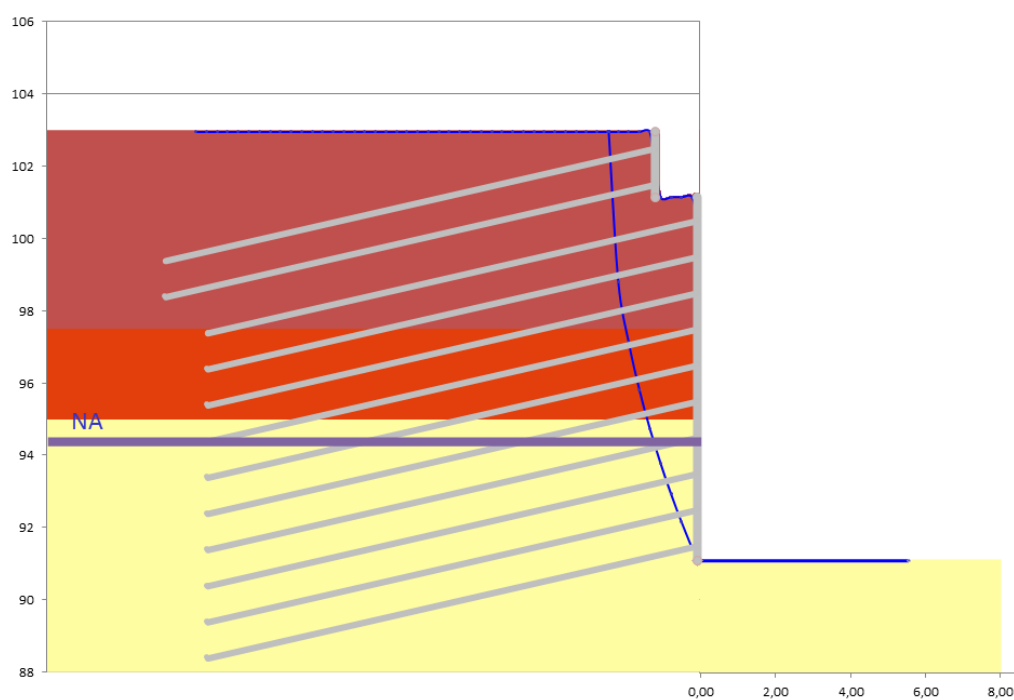


Figura 16.2.3 – Superfície crítica do modelo 3

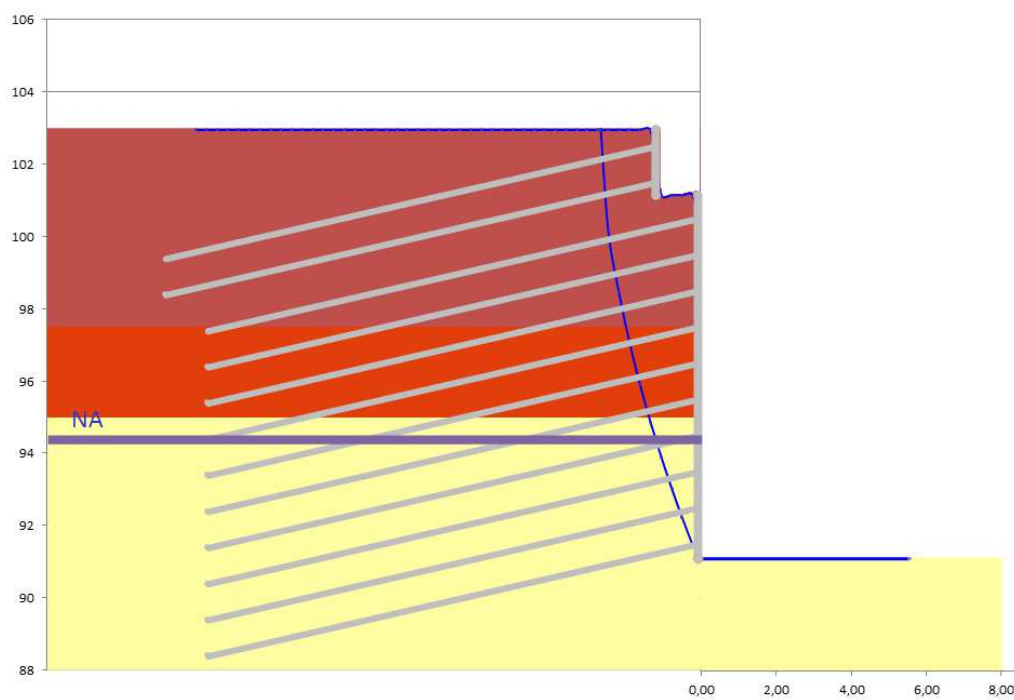


Figura 16.2.4 – Superfície crítica do modelo 4



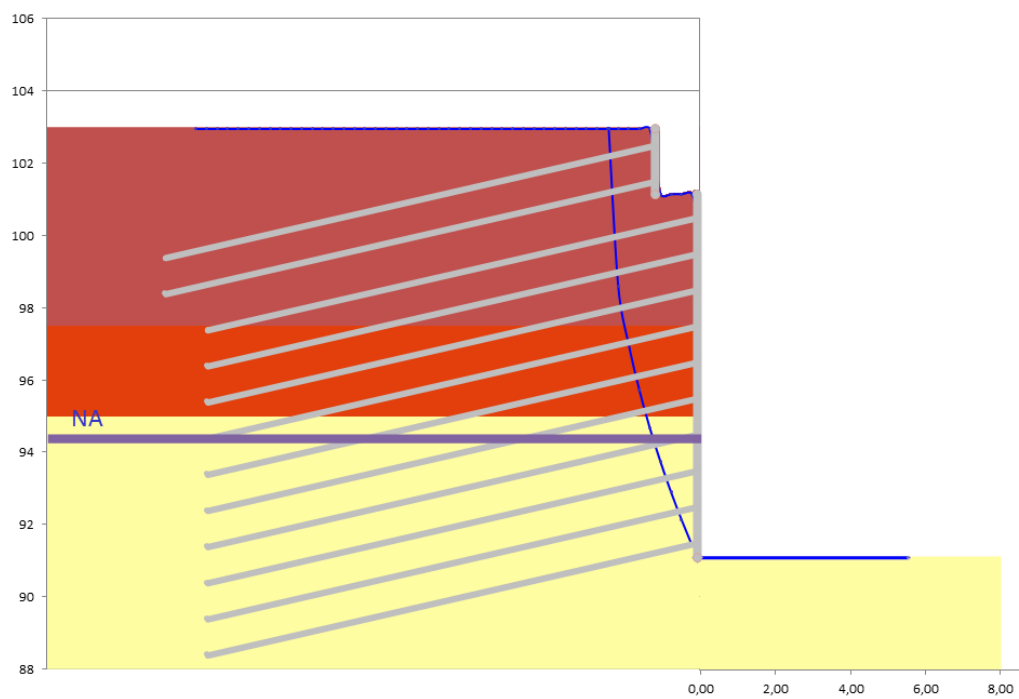


Figura 16.2.5 – Superfície crítica do modelo 5

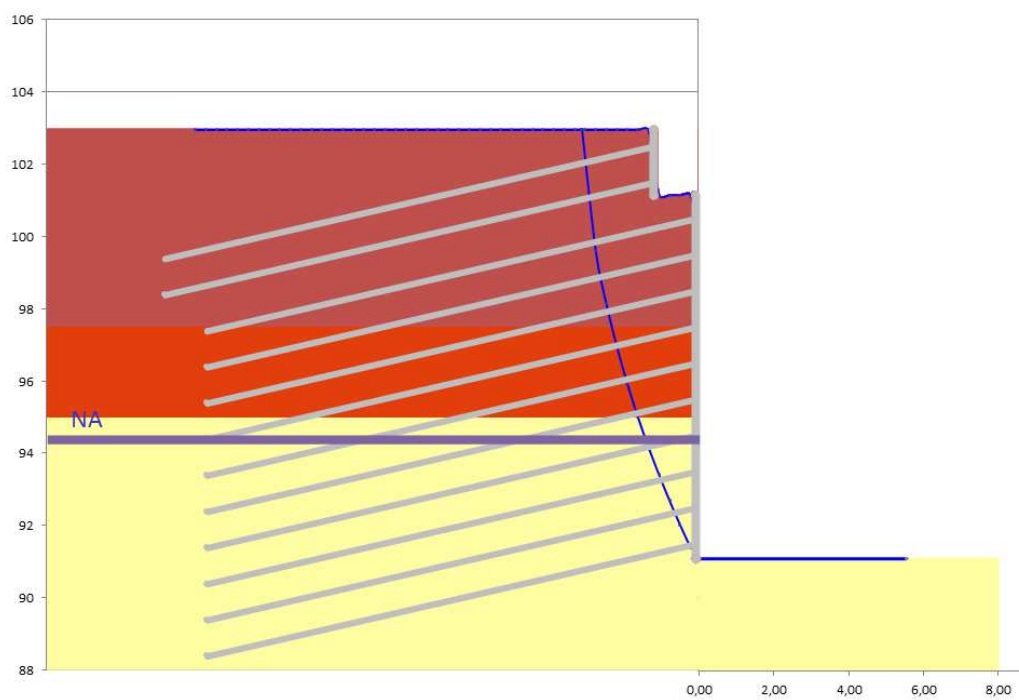


Figura 16.2.6 – Superfície crítica do modelo 6

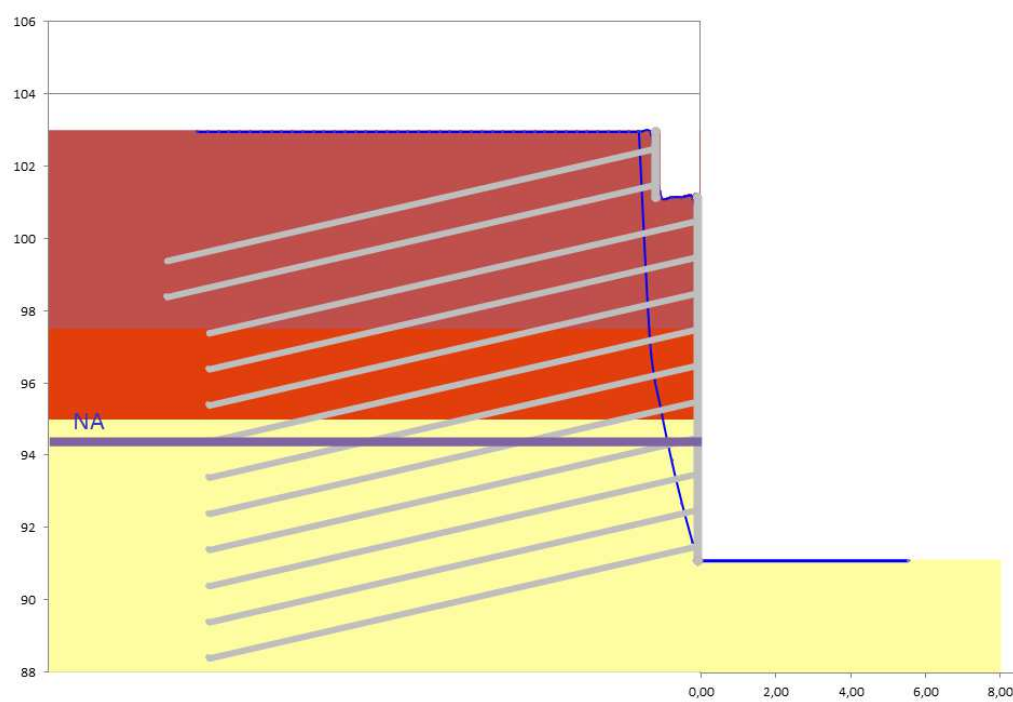


Figura 16.2.7 – Superfície crítica do modelo 7

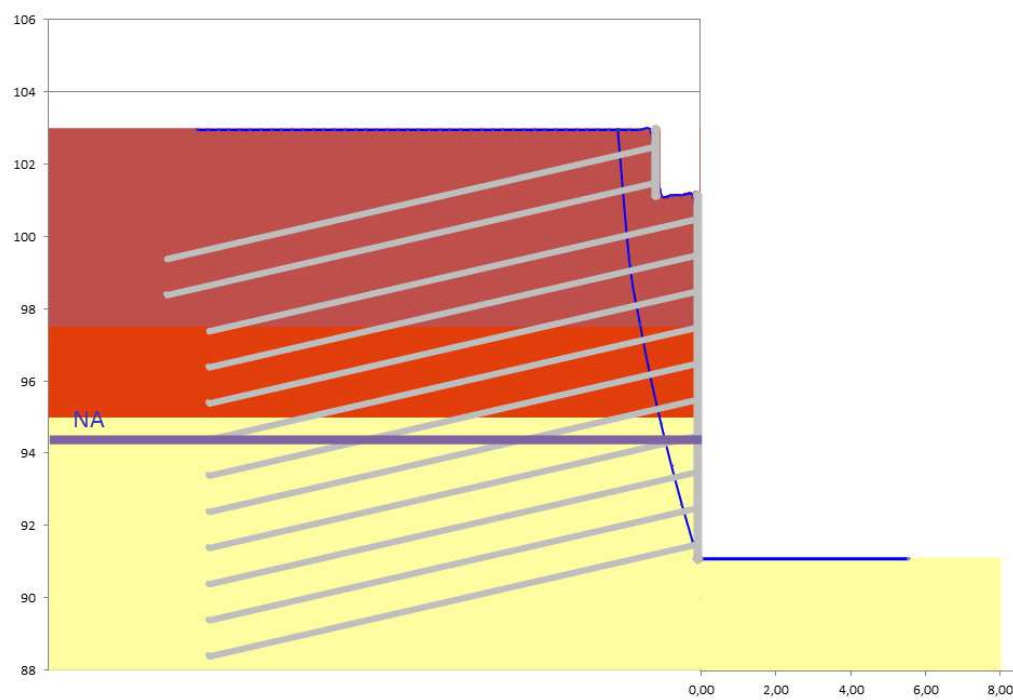


Figura 16.2.8 – Superfície crítica do modelo 8

A figura a seguir permite a comparação direta entre as superfícies. Algumas delas foram aproximadas por uma única, por serem praticamente coincidentes, facilitando a visualização.

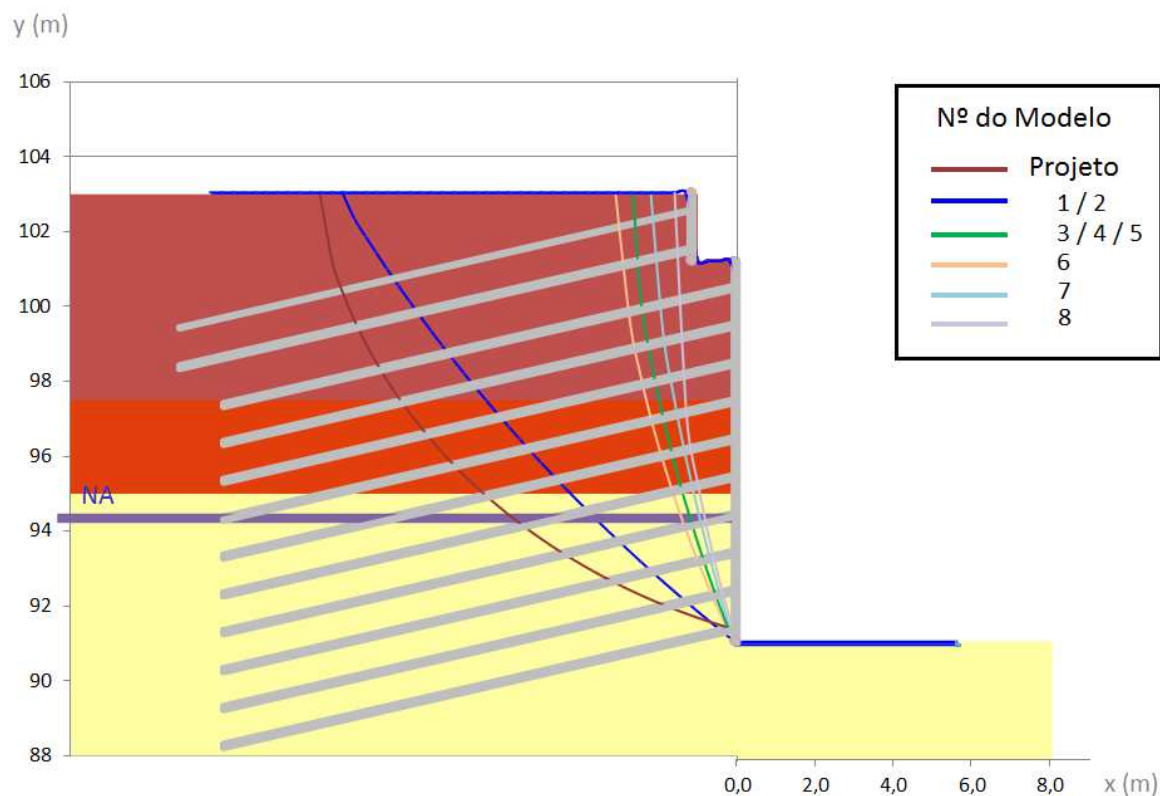


Figura 16.2.9 – Comparação entre as superfícies críticas

### 16.3. Interpretação dos resultados

Observa-se que aplicando os mesmos critérios usados pelo *Slide*, o círculo de ruptura é mais distante que o encontrado no projeto. Isso se deve à escolha das malhas e dos pontos em que a superfície de ruptura pode intersectar a geometria. O círculo crítico obtido aqui possui centro fora da malha pesquisada no projeto.

A esse mesmo círculo, corresponde uma superfície de ruptura com formato semelhante à cunha de Coulomb, o que não é muito plausível de acordo com Clouterre pela redistribuição das tensões no maciço provocadas pelo esforço dos grampos.

Os diagramas de esforços tipo 1 conduzem a maiores valores de  $F_{mín}$ . Pelo fato de considerarem que sempre será mobilizada toda a resistência na cabeça do grampo e também que ao longo do comprimento na zona ativa  $L_A$  todo o atrito  $q_s$  é mobilizado (ao contrário dos diagramas tipo 2), parece mais plausível a ocorrência de diagrama tipo 2 no deslizamento.



A consideração da componente tangencial  $G.\text{sen}\eta$  não influenciou claramente a forma da superfície de ruptura crítica, apenas os valores de  $F_{\text{mín}}$ . Nos modelos com diagramas tipo 1, obtiveram-se valores de  $F_{\text{mín}}$  maiores quando  $G.\text{sen}\eta$  era subtraída dos esforços solicitantes. Isso era esperado, pois diminuindo-se o denominador da expressão, o fator de segurança cresce mais rapidamente do que aumentando-se o numerador.

Já para os modelos com diagramas tipo 2, o contrário do esperado, os valores de  $F_{\text{mín}}$  foram maiores quando se considerou a componente  $G.\text{sen}\eta$  acrescida na resistência, isto é, aumenta o numerador, em vez de diminuir o denominador. Isso pode ser explicado porque as cunhas de ruptura críticas obtidas foram muito estreitas, com componente  $G.\text{sen}\eta$  negativa ( $\eta < 0^\circ$ ). O esperado seria que os valores de  $F_{\text{mín}}$  fossem menores quando se considera  $G.\text{sen}\eta$  aumentando a resistência; isso de fato ocorreu quando se buscaram centros de círculos de ruptura próximos à superfície do maciço (esses resultados não estão apresentados aqui).

A consideração de tração independente de  $\eta$  foi a favor da segurança de acordo com os resultados obtidos. Isso ocorre porque quando se considera compressão para  $\eta < -10^\circ$ ,  $G.\text{sen}\eta$  passa a ser favorável. E a componente normal  $G.\text{cos}\eta$  mesmo sendo desconsiderada, não diminui a resistência o suficiente para criar superfícies mais críticas.

Nota-se também que quando se considera tração independente de  $\eta$ , a superfície crítica tangencia o maciço em seu topo, ou seja a coordenada  $Y_c$  é a mesma do topo. Com tração apenas para  $\eta > -10^\circ$ , ocorre uma rotação da superfície de ruptura, e ela deixa de ser tangente ao maciço no topo, pois isso implicaria em ângulos de interseção dos grampos próximos a  $-15^\circ$  (a inclinação dos grampos determinada no projeto), o que causaria esforços favoráveis.

Como não parece razoável que o efeito dos grampos seja prejudicial para superfícies de ruptura próximas ao paramento, pode-se por fim concluir que o modelo mais adequado para os cálculos é o que considera diagramas tipo 2, tração apenas para  $\eta > -10^\circ$  e componente tangencial  $G.\text{sen}\eta$  contribuindo para os momentos resistentes.

## 17. ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

Tendo em vista os diversos fatores que influenciam o parâmetro  $q_s$ , foram encomendados ensaios de arrancamento para confirmar os valores usados no projeto ou identificar a necessidade de reavaliação do projeto ou método executivo.

A especificação técnica elaborada seguiu recomendações da FHWA (2003), que diferem das contidas em Clouterre (1991) (item 8.4) para ensaios de conformidade, principalmente quanto ao comprimento da bainha, intervalos das etapas do ensaio, valor da carga para o ensaio de fluência e número de grampos de teste.

Os grampos de teste, ao contrário dos demais, serão executados na horizontal, com comprimento ancorado de 4,0m, trecho livre de 3,0m até a face do paramento e trecho de 1,0m para fora dele, em que serão posicionados o macaco hidráulico, as placas de reação e os demais equipamentos. A barra de aço CA-50 determinada para o ensaio foi de  $\phi$  20mm, buscando-se garantir que a ruptura não ocorra na armadura e sim na interface solo-grampo. O comprimento ancorado ( $\ell_b$ ) foi delimitado por CAP e o trecho livre revestido por um tubo de PVC engraxado, garantindo que não haverá nenhuma contribuição além do comprimento ancorado. A boca do furo foi protegida com papelão.

Planejaram-se ensaios em três momentos da execução da contenção, de modo a avaliar a resistência  $q_s$  em três camadas de solo, descritas na tabela 15.1.1: 3AgP1 ( $NSPT < 5$ ), 3AgP1 ( $6 \leq NSPT \leq 10$ ) e 3Ag1 ( $5 \leq NSPT \leq 10$ ). Não foram previstos ensaios para a camada de areia 3Ar1 ( $11 \leq NSPT \leq 15$ ), pois ela foi encontrada em apenas dois dos sete furos de sondagem, em camada de pequena espessura e não se espera que ensaios nessa camada acrescentem segurança significativa que compense o custo dos ensaios para a construtora do Edifício Corporativo- Turiassu (R\$800,00 por ensaio).

Para cada uma dessas camadas de solo planejava-se realizar o ensaio em três grampos, sendo que a avaliação de  $q_s$  não deve resultar inferior à contida na tabela 15.1.1 e que determina a força admissível teórica  $F_{ens}$ , dada pela fórmula, em que  $D$  é o diâmetro do grampo,  $\ell_b$  é o comprimento ancorado e  $q_s$  é o determinado no projeto:

$$F_{ens} = \ell_{b,ens} q_s \pi D \quad (17.1)$$

O ensaio deve prosseguir aumentando-se a carga até a ruptura por arrancamento da barra, atingindo-se a força máxima para a qual ainda há estabilidade ao deslocamento  $F_{ens,máx}$ , que deve superar em 50% a carga  $F_{ens}$ . O  $q_s$  do ensaio é calculado com  $F_{ens,máx}$ , de acordo com a fórmula:

$$q_s = \frac{F_{ens,máx}}{\ell_{b,ens} \pi D} \quad (17.2)$$

O plano de carga do ensaio deve seguir as etapas de acréscimo de carga até a ruptura, conforme a tabela 16.1 contida na especificação técnica:

Tabela 17.1 – Plano de carga do ensaio

| Carga                                          | Intervalo de Tempo (minutos) |
|------------------------------------------------|------------------------------|
| 0,025.F <sub>ens</sub><br>(alinhamento)        | 1                            |
| 0,125.F <sub>ens</sub>                         | 10                           |
| 0,250.F <sub>ens</sub>                         | 10                           |
| 0,375.F <sub>ens</sub>                         | 10                           |
| 0,500.F <sub>ens</sub>                         | 10                           |
| 0,750.F <sub>ens</sub><br>(teste de fluência)  | 60                           |
| 0,875.F <sub>ens</sub>                         | 10                           |
| 1,000.F <sub>ens</sub>                         | 10                           |
| 1,250.F <sub>ens</sub>                         | 10                           |
| 1,500.F <sub>ens</sub>                         | 10                           |
| Prosseguir com os<br>incrementos até a ruptura | 10                           |
| 0,025.F <sub>ens</sub><br>(alinhamento)        | 1                            |

A carga de alinhamento deve ser mínima e não superar 2,5%F<sub>ens</sub>. Após sua aplicação os extensômetros são zerados. Após a aplicação de F<sub>ens,máx</sub>, a carga deve ser reduzida para esse valor, registrando-se as medições ao final do ensaio.

O ensaio de fluência será realizado para 75% F<sub>ens</sub>, sendo feitas leituras nos instantes (em minutos): 1, 2, 3, 5, 6, 10, 20, 30, 50 e 60. A carga não deve variar em mais de 2%. A quantidade de ensaios propostos (três por camada) e espaçamento (mínimo de 4m verificado no projeto) devem ser suficientes para que se possam estabelecer correlações estatísticas. A FHWA (2003) recomenda quatro ensaios, enquanto Clouterre (1991) recomenda um mínimo de seis ensaios.

Como critérios de aceitação, são explicitados: atendimento do valor de q<sub>s</sub> de projeto; máximo deslocamento igual a 2mm nos ensaios de fluência entre 6 e 60 minutos; leituras de deslocamentos devem apresentar, em função do tempo, taxas lineares ou decrescentes; deslocamento total ao final do ensaio (ΔL) superior a 80% do deslocamento elástico do





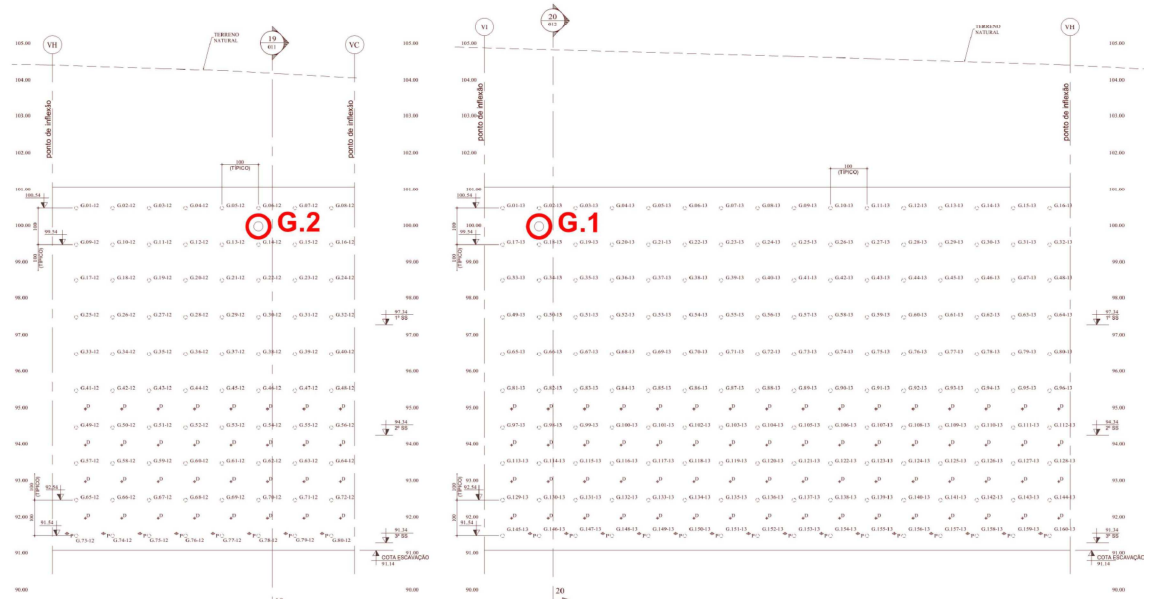


Figura 17.2 - posição dos grupos G.1 e G.2 nas elevações 13 e 12 do projeto.

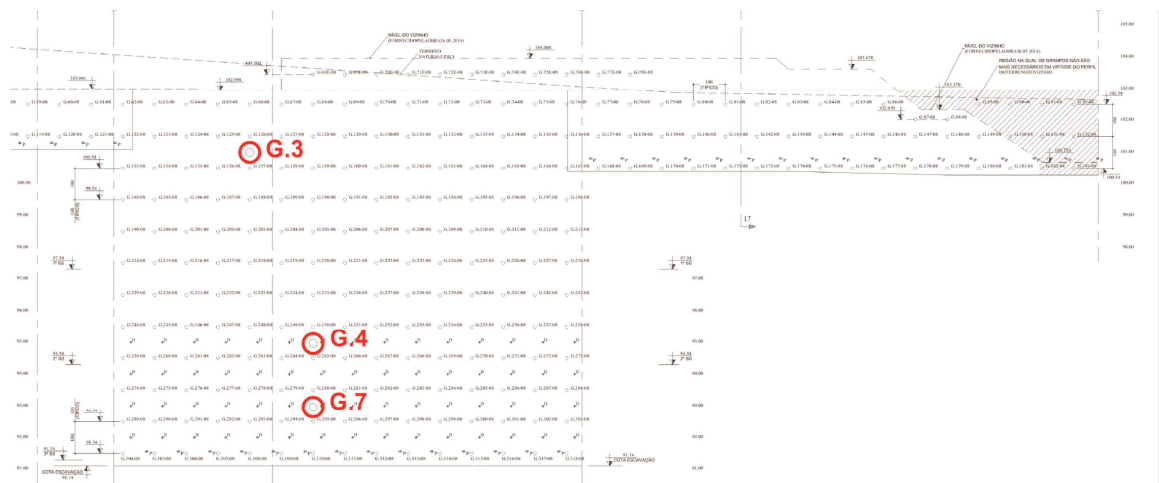


Figura 17.3 - posição dos grupos G.3 G.4 e G.7 na elevação 8 do projeto.

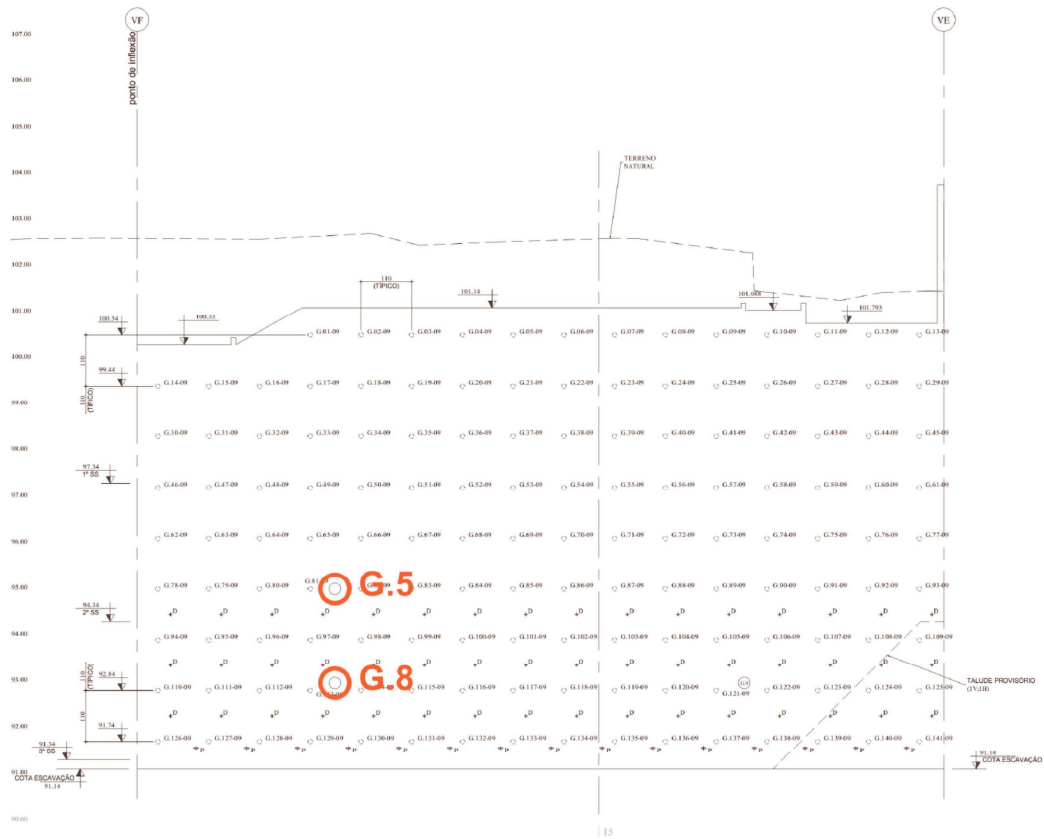


Figura 17.4 - posição dos grupos G.5 e G.8 na elevação 9 do projeto.

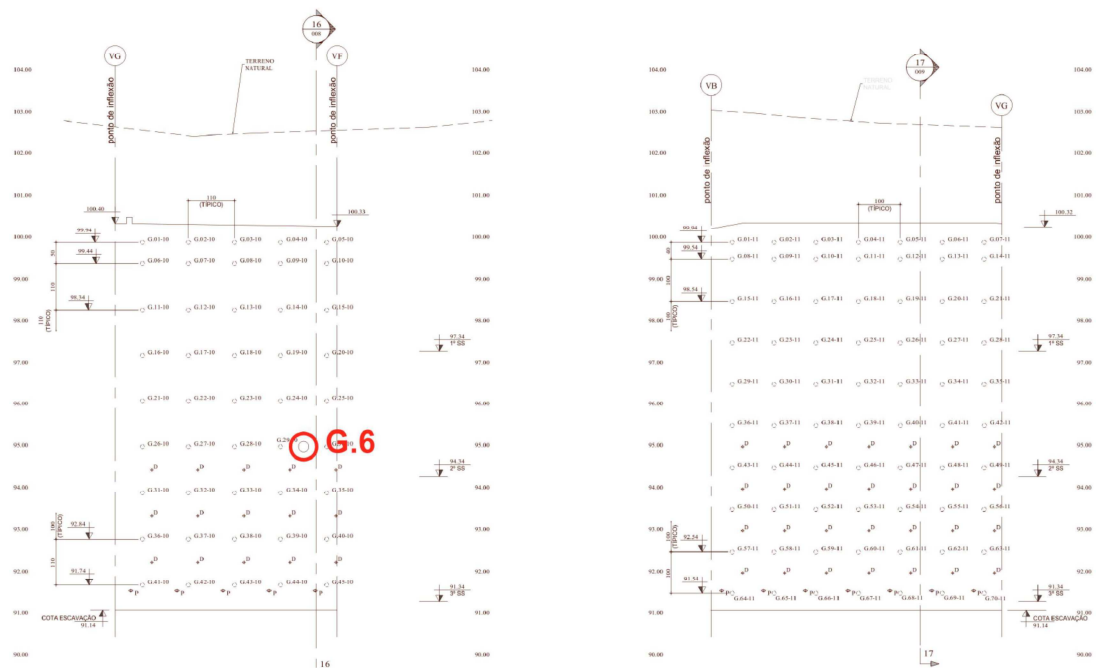


Figura 17.5 - posição do grupo G.6 na elevação 10 do projeto.





Figura 17.6 - Localização dos Grampos de ensaio G.1, G.2 e G.3. (20/06/14)

Os equipamentos usados foram: bomba hidráulica BPH-571, manômetro, macaco hidráulico MPH-571, cravete (em forma de cunha, que se encaixa na barra, travando-a, após a aplicação da carga), cabeça (que é colocada após o macaco hidráulico), base magnética (para fixar o deflectômetro, impedindo qualquer movimento que possa ser detectado pela precisão de centésimo de milímetro do deflectômetro), mesa de reação (composta de dois perfis de vigas), tábuas de apoio (que distribuem a carga na parede de concreto projetado, garantindo que não haja deslocamento da barra em relação à bacia) e deflectômetro.



(a)



(b)



(c)

Figura 17.7 - (a), (b) e (c) Montagem dos equipamentos de ensaio de arrancamento. (Solotrat, 2014)

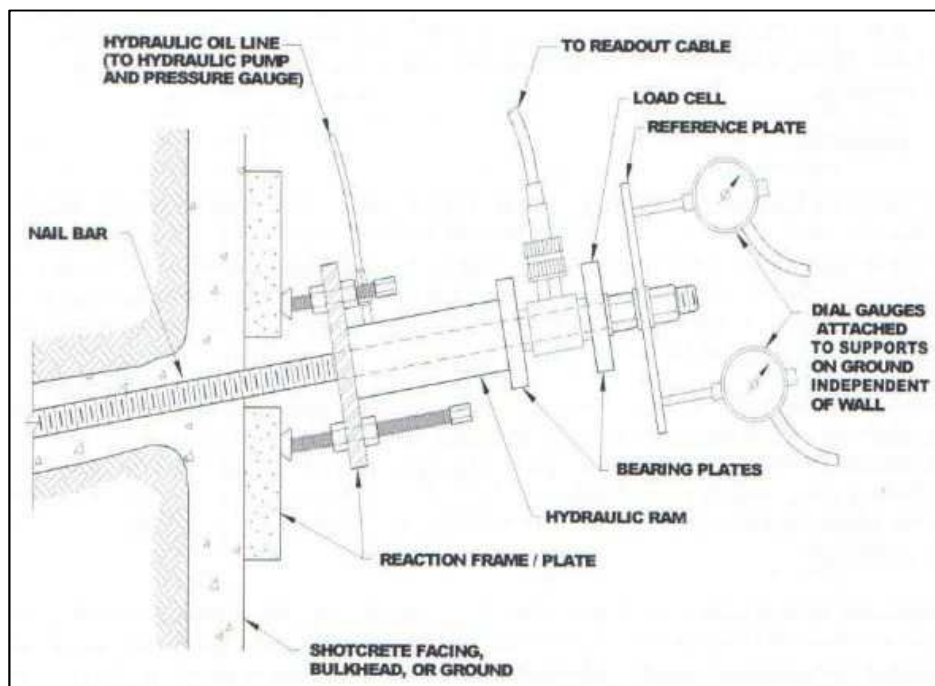


Figura 17.8 - Detalhe dos equipamentos posicionados na cabeça do grampo para a execução do ensaio. (Fonte: Porterfield et.al – 1994 apud FHWA – 2003)



No dia 02.07 (três meses após o início da obra), foram ensaiados os grampos de teste G.1, G.2 e G.3, da primeira camada de acordo com o projeto, cuja carga de ruptura corresponderia a 4,4 tf. O coeficiente de segurança buscado para o parâmetro de resistência de aderência solo-grampo ideal ( $q_s$ ) foi de 2,0 a 2,5. Essa camada, identificada como 3AgP1 (NSPT < 5), vai da superfície até a cota 97,00 nas faces da frente e do meio do terreno (em que estão os grampos G.2 e G.3) e até a cota 96,00 na face ao fundo (em que está o grampo G.1), de acordo com o perfil do terreno montado a partir das sondagens. Os grampos G.1 e G.2 estão na cota 100,00 e o grampo G.3 está na cota 101,00.

Os ensaios não seguiram os procedimentos da Solotart, que diferem da especificação técnica elaborada no projeto.



Figura 17.9 - Chegada dos equipamentos dos ensaios e funcionários da Solotrat carregando a mesa de reação para posicioná-la no grampo G.1. (02/07/14)



Figura 17.10 - Posicionamento da mesa de reação para o grampo G.3. (02/07/14)

Após os ensaios, os grampos foram retirados. Eles não foram incluídos no cálculo da contenção também. Em algumas obras os grampos de teste não são perdidos, sendo executados com manchetes, que permitem que após o ensaio, sejam feitas reinjeções.

Nesse primeiro dia de ensaios houve uma certa dificuldade para o cravete encaixar na barra, atrasando os ensaios, por ser diferente do especificado; chegou-se a pedir para que o cravete mais adequado fosse trazido).



Figura 17.11 - Funcionário tentando encaixar o cravete na barra do grampo G.2. (02/07/14)

Pela grande altura dos grampos de teste em relação ao chão, foi necessário montar andaimes. Normalmente a altura dos grampos testados é de 1,5 a 1,8m, permitindo que a base magnética na qual o deflectômetro é preso pelo braço ajustável da mesma seja apoiada em um quadripé, devidamente cravado no solo, formando-se um conjunto rígido independente do movimento do grampo e da barra.





Figura 17.12 - Apoio com base magnética e deflectômetro. (02/07/14)



Figura 17.13 - Andaime posicionado para a execução do ensaio no grampo G.1. (02/07/14)

No entanto, como esse quadripé não podia ser fixado sobre o andaime, a base magnética foi apoiada sobre o macaco hidráulico. Esse suporte não ficava estável sobre o macaco, pois o braço tinha que ser muito grande para que o deflectômetro fosse posicionado, tendendo a tombar a base magnética. Por isso, foi necessário reforço com fita adesiva, além do efeito magnético, para prender a base ao macaco.



Figura 17.14 - Base magnética apoiada sobre o macaco hidráulico com o auxílio de fita adesiva. (02/07/14)

Devido à dificuldade no posicionamento do deflectômetro, sua ponta de contato não ficou na extremidade da barra, e sim na cabeça. As barras tiveram o trecho do comprimento livre para fora da parede serrado para ajustá-las ao equipamento, permitindo que o macaco fosse montado. O comprimento ideal para isso foi de 75cm.



Figura 17.15 - Ajuste de comprimento livre da barra para o grampo G.3. (02/07/14).

A pressão de referência no início do ensaio era de 20kgf/cm<sup>2</sup>. A carga do ensaio é controlada pela pressão na bomba; o operador do ensaio solicitava um acréscimo de pressão de 10kgf/cm<sup>2</sup>, esperava o deflectômetro estabilizar, anotando o deslocamento e em seguida solicitava novo aumento de pressão. Os ensaios foram rápidos, aproximadamente de 10 a 15 minutos.

Após a ruptura era feito o descarregamento, à pressão de 75kgf/cm<sup>2</sup>. A carga é tabelada em função da pressão na bomba.



Figura 17.16 - Funcionário carregando a bomba hidráulica para o local do primeiro ensaio. (02/07/14)





Figura 17.17 - Ensaio do Grampo G.1. (02/07/14)



Figura 17.18 - Ensaio do Grampo G.2. (02/07/14)



Figura 17.19 - Ensaio do Grampo G.3. (02/07/14)



Figura 17.20 - Ensaio do Grampo G.3 por outro ângulo, olhando para o fundo do terreno.

(02/07/14)

O ensaio do grampo G.3, o primeiro a ser ensaiado, resultou em carga de ruptura 11,0tf com residual de 5,5tf. O ensaio atrasou consideravelmente por ser o primeiro e precisar de muitos ajustes na montagem do conjunto, dadas as condições atípicas de ensaio.

Para o ensaio do grampo G.2, o segundo a ser ensaiado, a barra de aço teve que ser desentortada, o que causou atraso. O ensaio teve que ser recommençado, pois o cravete interferiu na ponta do deflectômetro, que estava em contato com a cabeça do conjunto. A carga de ruptura foi 10,5tf com residual de 7tf.

O ensaio no grampo G.1 resultou em carga de ruptura 17,5tf com residual de 15tf, correspondendo ao escoamento da barra de  $\phi$  20mm. Isso pode ser explicado por esse grampo estar no canto do fundo, onde há reforço de grampos verticais e cavaletes próximos e o solo ao redor fica ainda mais reforçado pelo emaranhado de grampos nas duas direções. Por isso, cogitou-se que nos ensaios seguintes a barra de aço ensaiada seria de diâmetro maior,  $\phi$  32mm por exemplo.

No dia 15/08 foram ensaiados os grampos G.4, G.5 e G.6, na cota 95,00, representativos da camada 3AgP1 ( $6 \leq \text{NSPT} \leq 10$ ), que atinge a cota 92,00 aproximadamente, dependendo do local no terreno. Os grampos foram executados seguindo os mesmos procedimentos dos grampos ensaiados anteriormente.

A ordem de execução dos ensaios foi: G.4, G.5 e G.6. A carga esperada era de no mínimo 15tf para garantir um coeficiente de segurança razoável. Todos os grampos atingiram a carga máxima do ensaio (17,5tf).



Figura 17.21 - G.4 (06/08/14).



Figura 17.22 - G.5 e G.6 (à esquerda) na parede do subsolo na entrada do terreno. (06/08/14)





Figura 17.23 - Montagem do equipamento para o ensaio do grampo G.4. (15/08/14)



Figura 17.24 - calibração da bomba hidráulica. (15/08/14)





Figura 17.25 - Localização de G.4. (15/08/14)



Figura 17.26 - Posicionamento do deflectômetro para o ensaio de G.4. (15/08/14)





Figura 17.27 - Deflectômetro. (15/08/14)



Figura 17.28 - Execução do ensaio de G.4. (15/08/14)





Figura 17.29 - Execução do ensaio de G.6. (15/08/14)



Figura 17.30 - Execução do ensaio de G.6 (15/08/14).





Figura 17.31 - Execução do ensaio de G.5. (15/08/14)

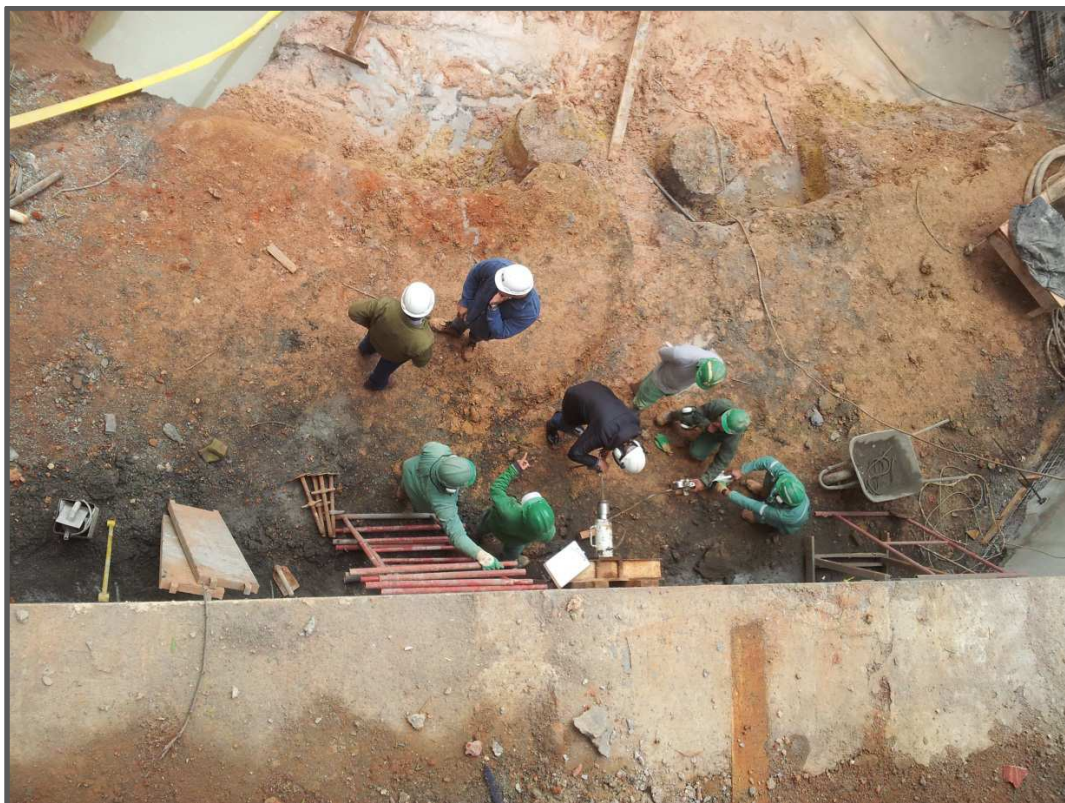


Figura 17.32 - Execução do ensaio de G.5. (15/08/14)

No dia 18/09 foram feitos os ensaios dos grampos G.7 (lateral, cota 92,84) e G.8 (frente, cota 92,84). A camada de solo do modelo do projeto tinha  $q_s$  estimado em 89kPa, e portanto o atrito unitário deveria resultar superior a 28kN/m (ou 11tf no ensaio, sem coeficiente de segurança parcial).

Confirmando a tendência dos últimos ensaios, não houve arrancame18/09, a carga atingiu o limite de escoamento do aço ou a deformação máxima (11mm).

O grampo G.9 (frente, cota 92,84) não foi executado, pois só poderia ser feito com a remoção da rampa.

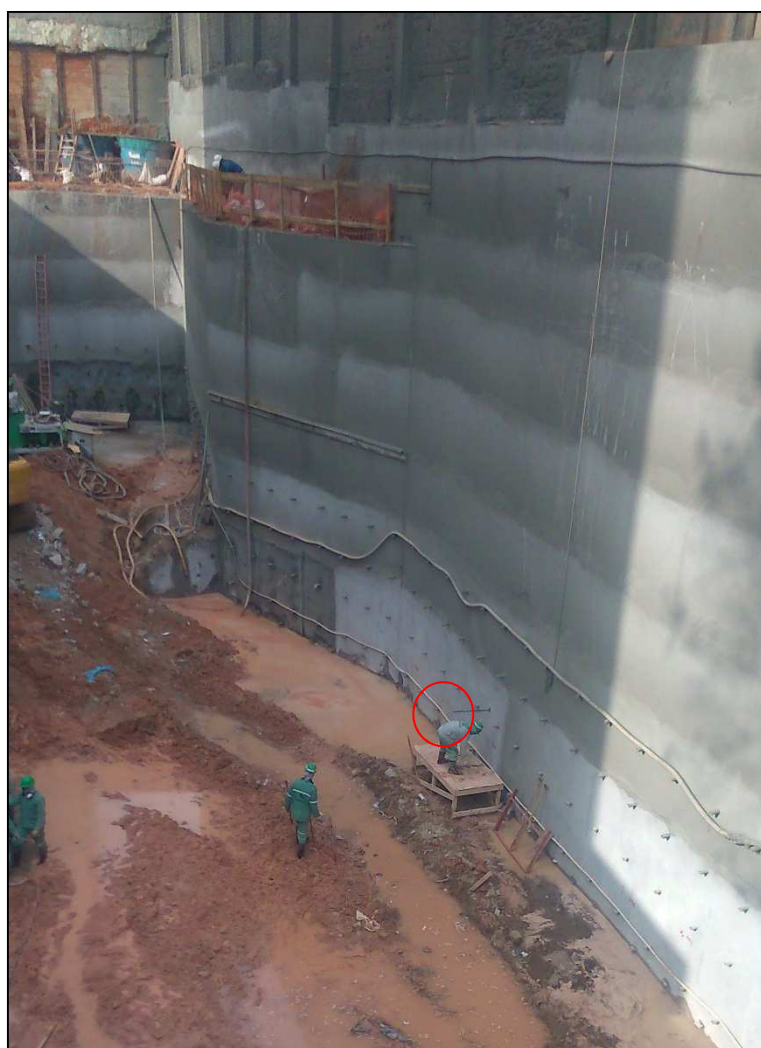


Figura 17.33 - Grampo para ensaio G.7 (18/09/14)





Figura 17.34 - Grampo para ensaio G.8. (18/09/14)



Figura 17.35 - Montagem do equipamento para o ensaio de G.7. (18/09/14)



Figura 17.36 - Posicionamento do deflectômetro para o ensaio de G.7. (18/09/14)



Figura 17.37 - Execução do ensaio de G.7. (18/09/14)



Figura 17.38 - Transporte da bancada para o ensaio de G.8. (18/09/14)

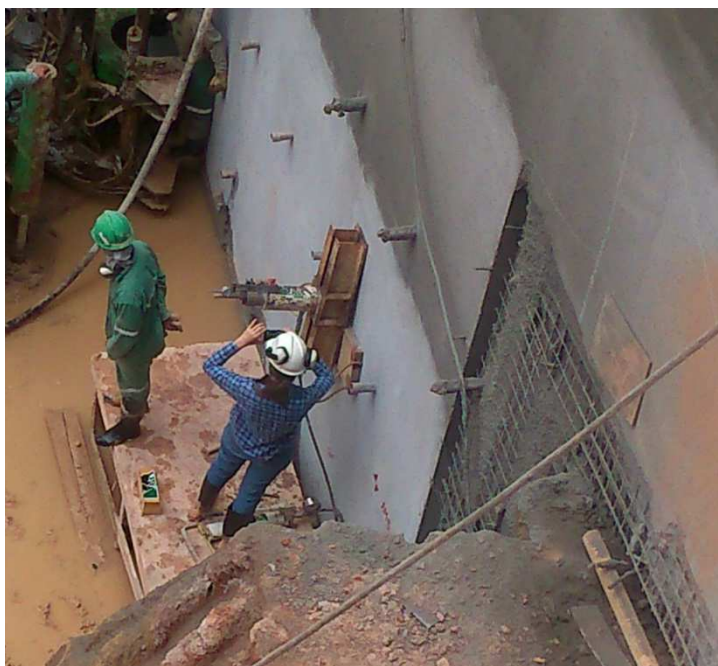


Figura 17.39 - Execução do ensaio de G.8. (18/09/14)



Tabela 17.2 – Quadro resumo dos ensaios

| grampo | camada                               | Qs de projeto (tf/m) | Carga de ruptura esperada (tf) | Carga de ruptura do ensaio (tf) | Qs do ensaio (tf/m) | qs (kPa) |
|--------|--------------------------------------|----------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------|
| G.1    | 3AgP1<br>(N <sub>SPT</sub> < 5)      | 1,1                  | 9,0-11,0                       | 17,5                            | 4,4                 | ≥ 139    |
| G.2    |                                      |                      |                                | 10,5                            | 2,6                 | 84       |
| G.3    |                                      |                      |                                | 11,0                            | 2,8                 | 88       |
| G.4    | 3AgP1<br>(5 ≤ N <sub>SPT</sub> ≤ 10) | 2,3                  | 15,0                           | 17,5                            | 4,4                 | ≥ 139    |
| G.5    |                                      |                      |                                |                                 |                     |          |
| G.6    |                                      |                      |                                |                                 |                     |          |
| G.7    | 3Ag1<br>(5 ≤ N <sub>SPT</sub> ≤ 10)  | 2,8                  | 17,5                           |                                 |                     |          |
| G.8    |                                      |                      |                                |                                 |                     |          |

Os ensaios, conforme a tabela acima, evidenciam que os valores admitidos para  $q_s$  a partir das correlações de Ortigão e Springer foram bastante conservadores. Deve-se levar em conta também que na análise de equilíbrio limite do projeto não foi utilizado coeficiente de segurança parcial em  $q_s$ , sendo esperada essa distância entre o valor real e o de projeto.

Há outras correlações empíricas, como a de Bustamante e Doix (1985), a partir de ensaios em solos temperados que relaciona  $q_s$  com a pressão limite do pressômetro Ménard  $p_1$  (que pode ser associada ao  $N_{SPT}$ ), cuja aplicabilidade para o caso não é adequada, mas resulta em  $q_s$  de 42kPa, 89 kPa e 116kPa respectivamente para as camadas da tabela 17.2, que também são inferiores aos verificados nos ensaios.

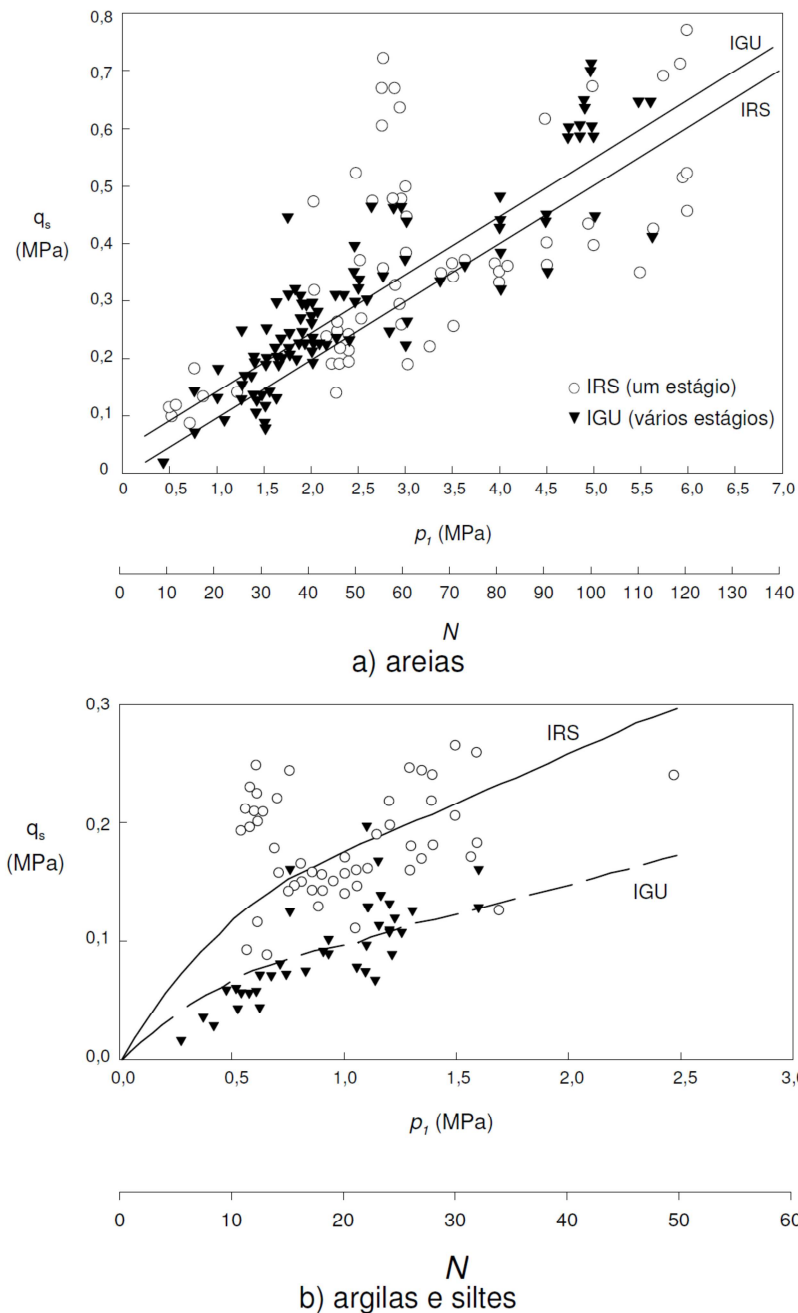


Figura 17.40 - Correlação de  $q_s$  com NSPT e  $p_1$  (Bustamente, Doix apud Springer, 2006)

Alguns valores para  $q_s$  em obras executadas pela Solotrat podem ser inferidos a partir dos valores de ensaios de arrancamento apresentados em Pitta, Souza e Zirlis (2003), conforme a tabela 17.3, para solos de São Paulo:

Tabela 17.3 –  $q_s$  a partir de ensaios de arrancamento em solos de São Paulo

| $q_s$ (kPa)     | Argila vermelha I (Av. Paulista) | Argila vermelha II (Av. Paulista) | Silte argiloso (Cumbica) | Argila arenosa (Cumbica) | Saprolito de Gnaiss (Morumbi) |
|-----------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| só bainha       | 106                              | 38                                | 85                       | 72                       | 81                            |
| bainha + 1 fase | 140                              | 93                                | 123                      | 106                      | 140                           |
| bainha + 2 fase | 153                              | 127                               | -                        | -                        | 149                           |

Um procedimento prático que poderia ser estudado é a adaptação de correlações empíricas usadas para determinar a resistência de atrito lateral em estacas. Nesse sentido, a estimativa de Décourt-Quaresma (1996) poderia ser escrita como:

$$q_s = \frac{\sum 10\beta \left( \frac{N_{SPT}}{3} + 1 \right) \Delta \ell}{L} \text{ [kPa]}$$

$\beta$ : coeficiente que depende do tipo de solo e de estaca [-]

$N_{SPT}$ : para  $N < 3$ , adotar  $N=3$ ; para  $N > 50$ , adotar  $N=50$

$\Delta \ell$ : comprimento do grampo no trecho de 1m do  $N_{SPT}$  [m]

$L$ : comprimento total do grampo [m].

Para microestacas injetadas, independentemente do tipo de solo, Décourt-Quaresma fornece  $\beta=3,0$ . Esse valor é superior ao recomendado para outros tipos de estaca, em função da melhoria da aderência em função da pressão de injeção.

Os grampos apresentam diferenças significativas em relação à maioria das estacas quanto a método executivo, dimensões e esforços aos quais estão submetidos. No entanto, tanto os grampos como as microestacas possuem faixa de pressão de injeção semelhante (aproximadamente 10kgf/cm<sup>2</sup>), diâmetros reduzidos (inferiores a 20cm) e alta capacidade de resistência à tração.

Para a elevação 8 do projeto, foram obtidos valores de  $q_s$  semelhantes aos dos ensaios para  $\beta=5,0$  (independentemente do tipo de solo), como está mostrado na figura 17.41. A partir dessa calibração, inferiu-se o  $q_s$  de cada linha de grampo. A sondagem usada foi a SP.03. O comprimento  $L=4,00$ m para os grampos de teste é corresponde ao trecho ancorado.



| Cota   | NSPT | linhas de grampos |        |       |                      |
|--------|------|-------------------|--------|-------|----------------------|
| 102,84 | 3    | n°                | Cota   | L (m) | q <sub>s</sub> (kPa) |
| 101,84 | 3    | 1                 | 102,54 | 12,00 | 92                   |
| 100,84 | 3    | 2                 | 101,54 | 12,00 | 92                   |
| 99,84  | 3    | G.3               | 101,00 | 4,00  | 92                   |
| 98,84  | 3    | 3                 | 100,54 | 12,00 | 97                   |
| 97,84  | 3    | 4                 | 99,54  | 12,00 | 119                  |
| 96,84  | 5    | 5                 | 98,54  | 12,00 | 145                  |
| 95,84  | 9    | 6                 | 97,54  | 12,00 | 157                  |
| 94,84  | 5    | 7                 | 96,54  | 10,00 | 157                  |
| 93,84  | 6    | 8                 | 95,54  | 10,00 | 157                  |
| 92,84  | 8    | G.4               | 95,00  | 4,00  | 147                  |
| 91,84  | 9    | 9                 | 94,54  | 10,00 | 180                  |
| 90,84  | 6    | 10                | 93,54  | 10,00 | 178                  |
| 89,84  | 3    | G.7               | 93,00  | 4,00  | 178                  |
| 88,84  | 11   | 11                | 92,54  | 10,00 | 123                  |
| 87,84  | 16   | 12                | 91,54  | 10,00 | 134                  |
| 86,84  | 10   |                   |        |       |                      |
| 85,84  | 25   |                   |        |       |                      |
| 84,84  | 17   |                   |        |       |                      |

Figura 17.41 - Valores de q<sub>s</sub> a partir da adaptação de Décourt-Quaresma (1996).

## 18. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

### 18.1. Amostras e procedimentos

Para caracterização do solo presente a obra, foram retiradas as amostras 01 e 02 para ensaios de granulometria e limites de Atterberg no Laboratório de Mecânica dos Solos – LMS da Escola Politécnica. Os ensaios foram realizados pelos alunos com a supervisão dos técnicos do laboratório.

A Rua Turiassu, local do edifício, está 2km ao sul do rio Tietê, portanto próximo ao seu vale. Essa região é classificada como de terraços fluviais do nível intermediário, de elevações entre 730 e 750m, de acordo com o mapa geomorfológico de São Paulo, por Ab'Saber.

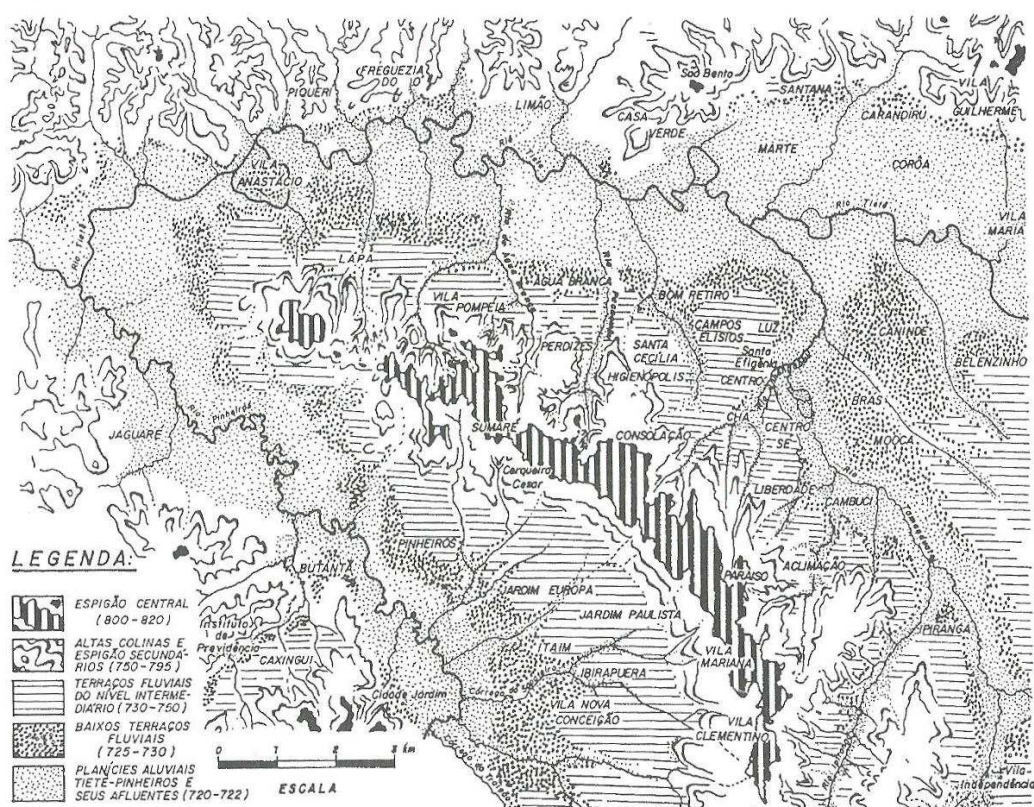


Figura 18.1.1 - Mapa geomorfológico de São Paulo (Ab'Saber, 1957)

Pela dificuldade e custo de se retirarem amostras indeformadas, não foram realizados ensaios de resistência.

A amostra 01 foi retirada 0,5m abaixo do nível da rua e a amostra 02 foi retirada 8,5m abaixo do mesmo nível.

Os ensaios de granulometria, incluindo peneiramento do material grosso, sedimentação e peneiramento do material fino, seguiram os procedimentos das normas:

- NBR NM ISO 2395:1997 – Peneira de ensaio e ensaio de peneiramento – Vocabulário;
- NBR 6508:1984 – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm - determinação da massa específica;
- NBR 6457:1986 – Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização;
- NBR 7181:1984 – Solo - Análise granulométrica.

Os ensaios de limites de Atterberg seguiram os procedimentos das normas:

- NBR 6457:1986 – Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização;

- NBR 6459:1984 – Solo - Determinação do limite de liquidez
- NBR 7180:1984 – Solo - Determinação do limite de plasticidade.

Abaixo estão algumas fotos das amostras ao durante os ensaios.



(a)

(b)

Figura 18.1.2 - Amostras (a) 01; (b) 02



(a)

(b)

Figura 18.1.3 - Sedimentação das amostras: (a) 01; (b) 02

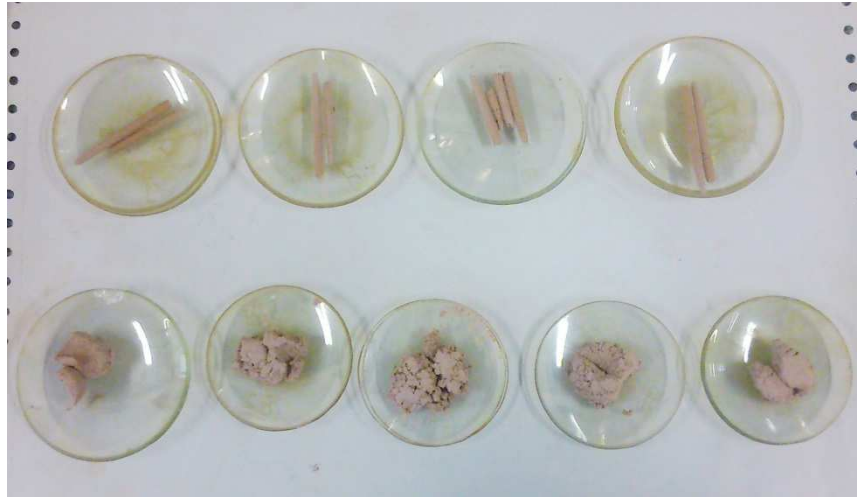




Figura 18.1.4 - Amostra em agitador antes do peneiramento fino



(a)



(b)

Figura 18.1.5 - Amostras secas para determinação dos limites de Atterberg: (a) 01; (b) 02

## 18.2. Resultados

A amostra 01 apresentou a curva granulométrica da figura 18.2.1 e a reta de escoamento da figura 18.2.2.

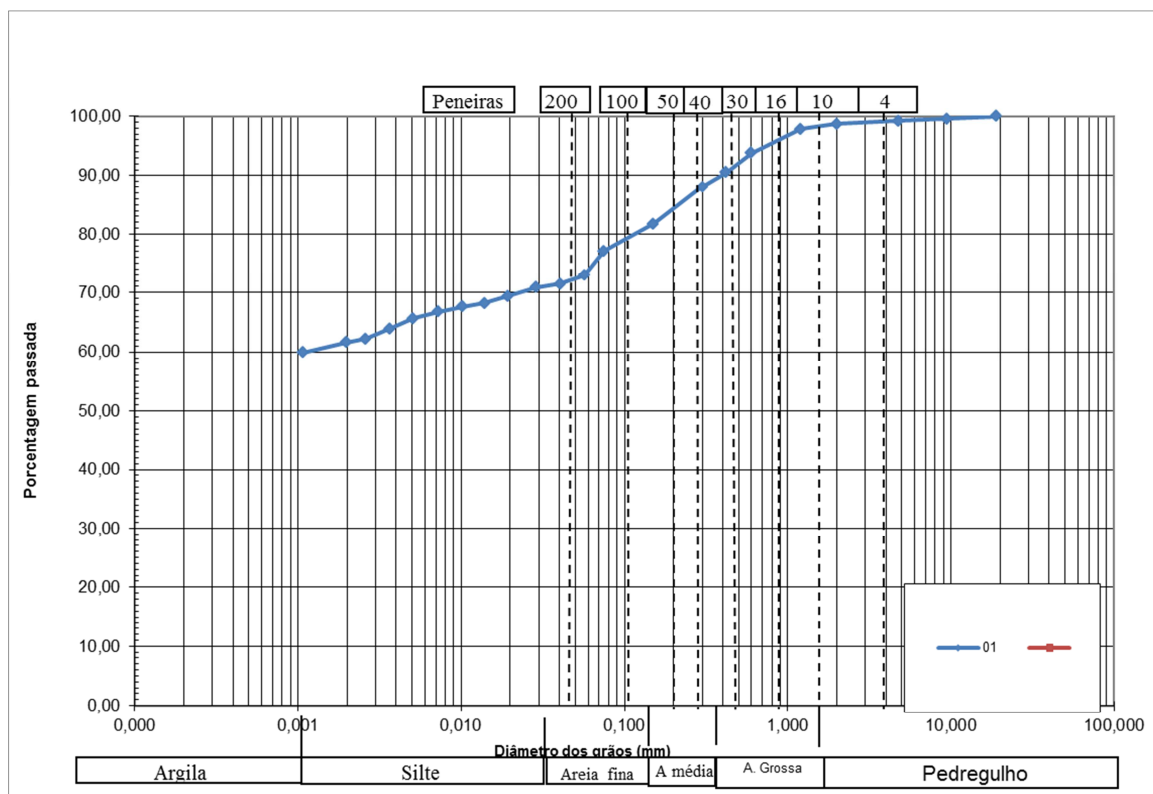


Figura 18.2.1 - Curva granulométrica da amostra 01

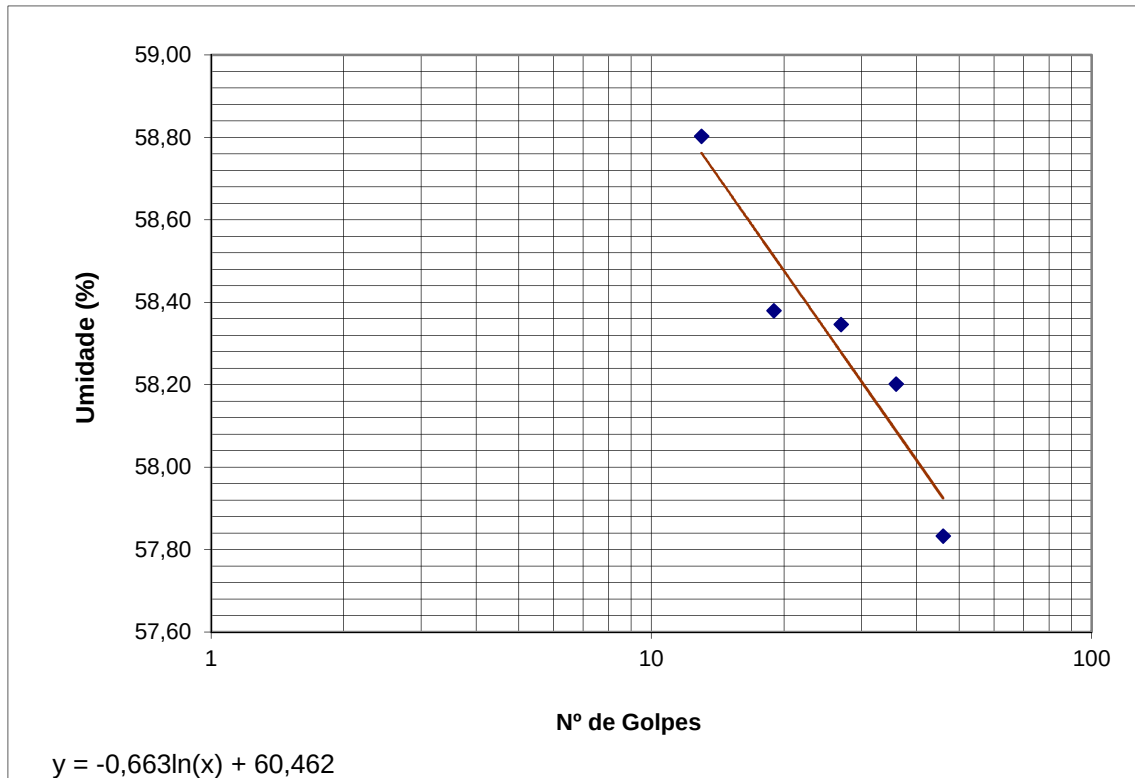


Figura 18.2.2 - Curva do ensaio de limite de liquidez da amostra 01

A amostra 02, por sua vez, apresentou a curva granulométrica da figura 18.2.3 e a reta de escoamento da figura 18.2.4. Alguns dos principais resultados podem ser resumidos na tabela 18.2.1, em que se usaram diâmetros dos grãos de acordo com a ABNT, enquanto que nas curvas, há pequenas divergências de valores.



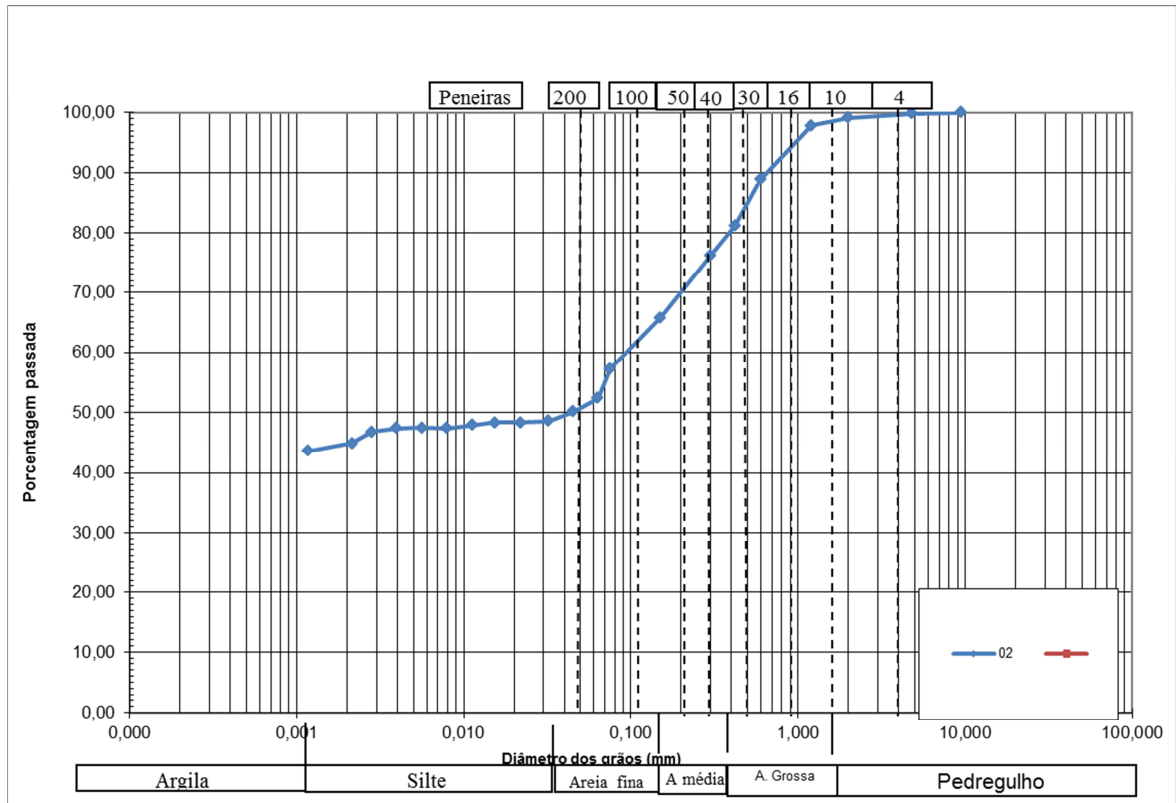


Figura 18.2.3 - Curva granulométrica da amostra 02

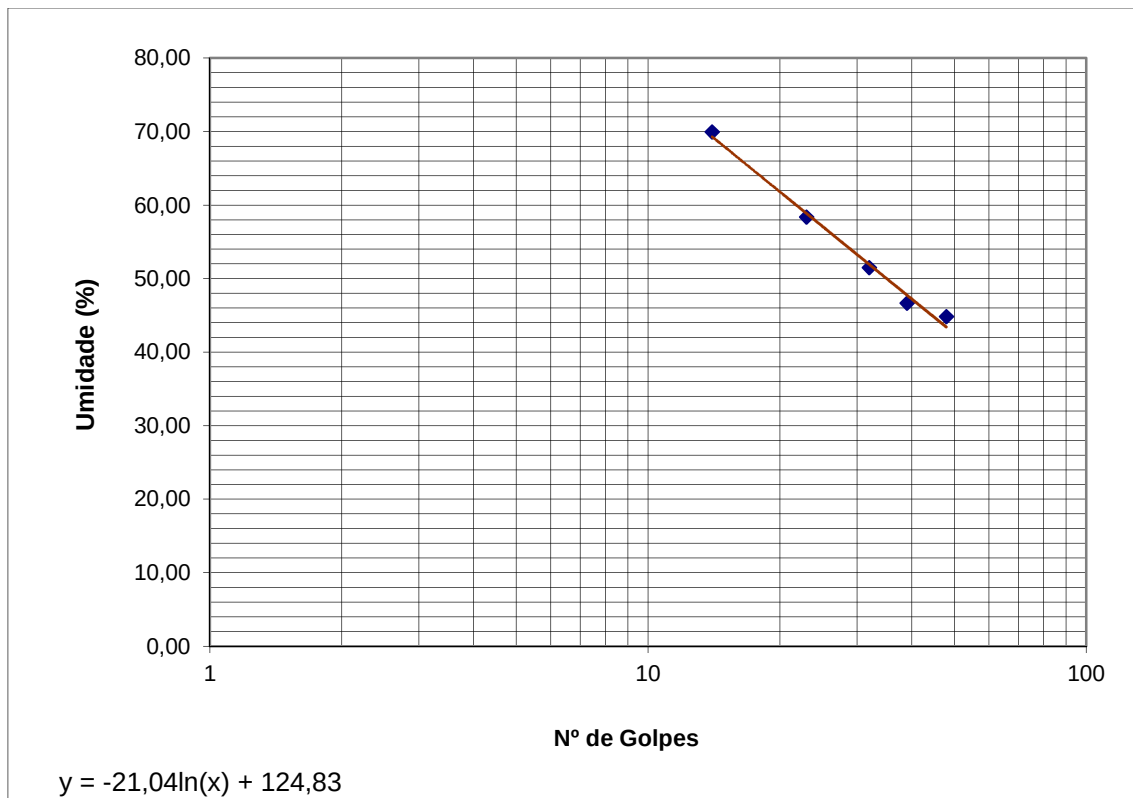


Figura 18.2.4 - Curva do ensaio de limite de liquidez da amostra 02

Tabela 18.2.1 - Resultados dos ensaios de granulometria e limites

| Amostras             |                                                     | 01    | 02    |
|----------------------|-----------------------------------------------------|-------|-------|
| Granulometria        | argila ( $\phi < 0,002\text{mm}$ )                  | 61,6% | 44,9% |
|                      | silte ( $0,002\text{mm} < \phi < 0,06\text{mm}$ )   | 12,0% | 7,0%  |
|                      | areia ( $0,06\text{mm} < \phi < 2,0\text{mm}$ )     | 25,0% | 47,3% |
|                      | pedregulho ( $2,8\text{mm} < \phi < 6,0\text{cm}$ ) | 1,4%  | 0,9%  |
| limites de Atterberg | limite de liquidez (%)                              | 58    | 57    |
|                      | limite de plasticidade (%)                          | 33    | 32    |
|                      | índice de plasticidade (%)                          | 26    | 25    |
|                      | índice de atividade                                 | 0,42  | 0,56  |
| Classificação        | USCS                                                | MH    | MH    |
|                      | HRB                                                 | A-7-5 | A-7-5 |

### 18.3. Interpretação dos resultados

A partir das curvas granulométricas, da identificação visual e da comparação dos índices de consistência obtidos com a bibliografia, podem-se dizer que as amostras 01 e 02 se encaixam nas descrições de argila porosa silto-arenosa vermelha e argila arenosa com pouco silte variegada, respectivamente.

Tabela 18.3.1 - Limites de Atterberg de alguns solos brasileiros (Pinto, 2006)

| Solos                                     | LL %    | IP %    |
|-------------------------------------------|---------|---------|
| Residuais de arenito (arenosos finos)     | 29-44   | 11-20   |
| Residual de gnaiss                        | 45-55   | 20-25   |
| Residual de basalto                       | 45-70   | 20-30   |
| Residual de granito                       | 45-55   | 14-18   |
| Argilas orgânicas de várzeas quaternárias | 70      | 30      |
| Argilas orgânicas de baixadas litorâneas  | 120     | 80      |
| Argila porosa vermelha de São Paulo       | 65 a 85 | 25 a 40 |
| Argilas variegadas de São Paulo           | 40 a 80 | 15 a 45 |
| Areias argilosas variegadas de São Paulo  | 20 a 40 | 5 a 15  |
| Argilas duras, cinzas, de São Paulo       | 64      | 42      |

De acordo com as sondagens SP.06 e SP.07 realizadas para a construção do Edifício Corporativo – Turiassu as amostras pertenceriam provavelmente às camadas de argila porosa silto-arenosa vermelha e argila siltosa arenosa vermelha e cinza, respectivamente.

Ambas as amostras são classificadas como silte elástico (MH) pela USCS – Unified Soil Classification System e como A-7-5 (solo argiloso) pela HRB – Highway Research

Board. Essas classificações tradicionais para solos temperados não são adequadas para os solos em questão. (Santos, 2006)

A amostra 01 apresentou limite de liquidez (LL) ligeiramente inferior a faixas de variação típica apresentada na tabela 18.3.1. Considerando que os ensaios que determinaram a descrição da camada na sondagem foram realizados em condições mais rigorosas e, portanto correspondem a uma caracterização mais precisa, pode-se atribuir essa divergência de LL a um erro de falta de experiência do operador (um aluno).

Já a amostra 02 revelou importante fração areia. Isso pode ser explicado pela existência de lentes de areia no próprio terreno do edifício, detectadas na sondagem SP.02 ou fração de areia mais importante que a de silte nas camadas argilosas, detectada na sondagem SP.06.

Quanto aos limites de Atterberg, as amostras 01 e 02 apresentaram resultados muito semelhantes. Colocadas nas cartas de plasticidade de solos de São Paulo elaboradas por Casagrande, as amostras se localizam logo abaixo da linha A e abaixo da linha de índice de atividade  $I_a < 0,75$  nas cartas das figuras 18.3.1 e 18.3.2, assim como grande parte das argilas vermelhas e amarelas duras e rijas e as argilas superficiais vermelhas porosas e endurecidas do Espigão Central, típicas do Terciário da Bacia de São Paulo. Os solos representados pelas amostras 01 e 02 estão representados na carta de argilas superficiais vermelhas.

Essa característica é típica das argilas porosas “endurecidas” por concreções lateríticas, que podem indicar porcentagem da fração argila menor que a real no ensaio de granulometria (Vargas, 2002). Essas argilas porosas “endurecidas” são encontradas sob as argilas porosas superficiais do espigão central; portanto sua cota é compatível com a em que foi coletada a amostra 01.

Pode-se dizer que esses ensaios, portanto corroboram o uso de correlações existentes para solos de São Paulo com as características físicas do solo e o  $N_{SPT}$ , obtidos in situ na obra em questão. Esse procedimento fora usado na fase de projeto da contenção para obter o  $q_s$ , principal parâmetro de resistência do solo grampeado e é mais fácil e barato que a obtenção de parâmetros de resistência por outros ensaios de resistência. Além disso, na fase de projeto não é muito viável fazer ensaios de arrancamento nas camadas de solo a serem reforçadas.

Outro uso para a caracterização do solo pelos ensaios é a identificação da presença de algumas particularidades de alguns solos de São Paulo, como a colapsividade das argilas porosas insaturadas.



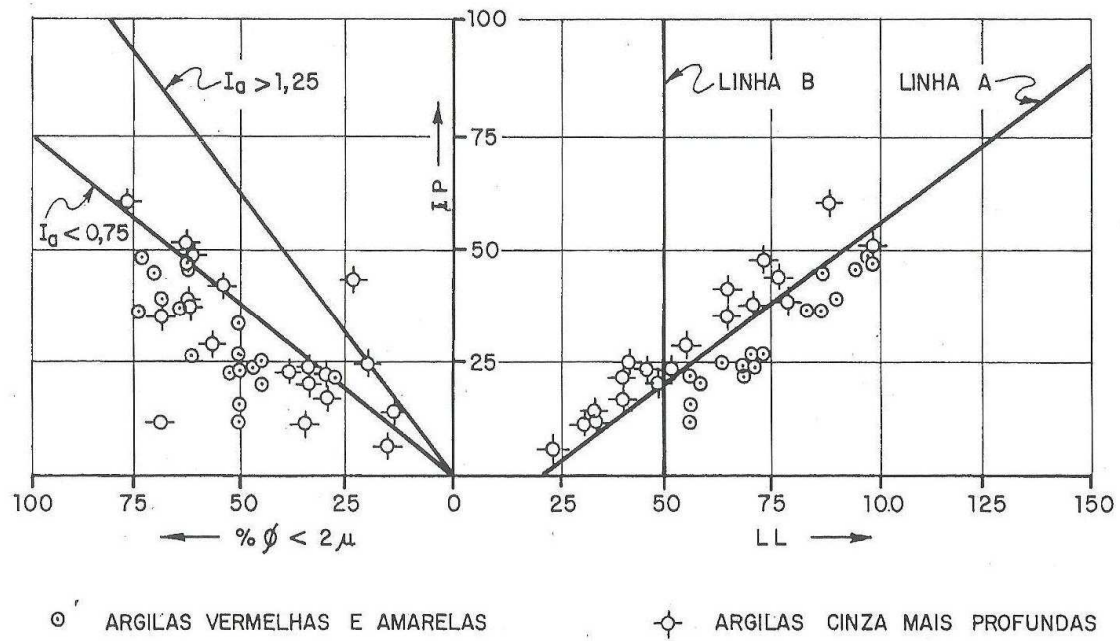


Figura 18.3.1 - Carta de plasticidade: argilas duras e rijas do Espigão Central (Vargas, 2002)

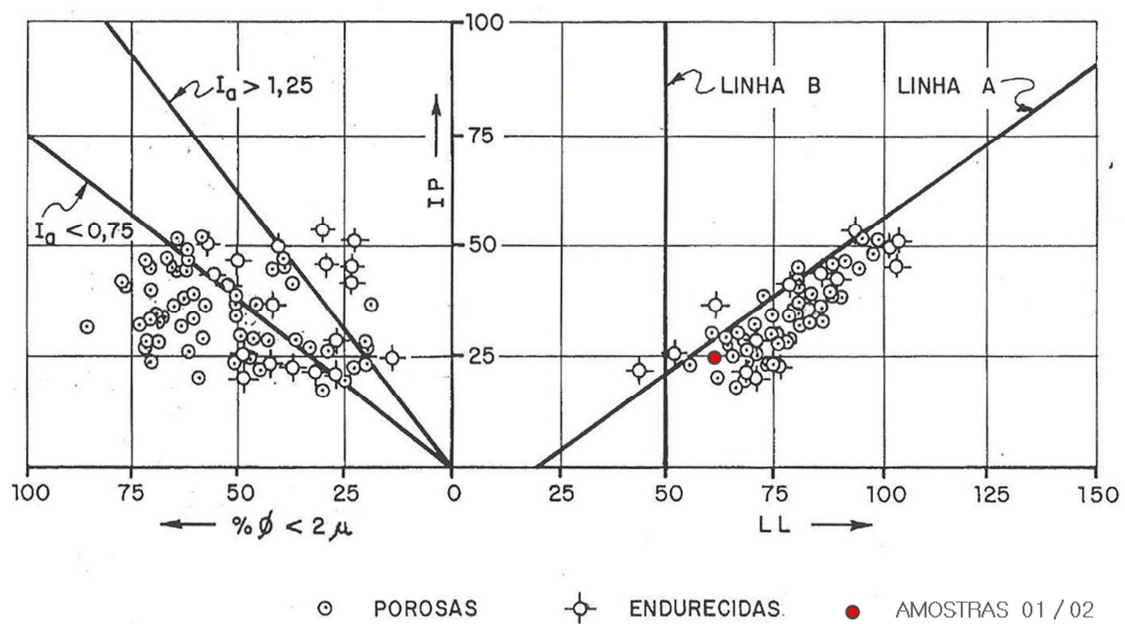


Figura 18.3.2 - Carta de plasticidade: argilas superficiais vermelhas do Espigão Central (Vargas, 2002)

## 19. ENSAIO DO MÉTODO DAS PASTILHAS

A fim de se investigar se a colapsividade do solo da camada de argila porosa, que predomina na metade superior da contenção e para obter uma classificação mais adequada a solos tropicais, buscou-se fazer um ensaio usado em pavimentação, o “Método das pastilhas para investigação expedita de solos tropicais”.

O ensaio foi criado por Nogami e Villibor em 1994 e modificado por Bernucci e Godoy em 2002, permitindo identificar se o solo tropical é laterítico ou saprolítico e prever seu comportamento como material de base ou subleito após compactação, influenciados pela contração e expansão.

Argilas lateríticas pertencem aos horizontes pedológicos mais superficiais e possuem composição e macroestrutura homogênea. Apresentam estágio avançado de laterização, resultado da decomposição de feldspatos e minerais ferromagnesianos, lixiviação da sílica e bases, concentrando óxidos de ferros e alumínio e caulinita. Esses formam agregados estáveis, portanto porosos e permeáveis. (Bernucci, 1987)

Já os solos siltosos saprolíticos estão abaixo do horizonte superficial e são de origem residual, de macroestrutura dependente da rocha matriz e do grau de intemperização. São compostos de minerais micáceos e macrocristais de caulinita.

Além deles há as argilas e solos argilosos transportados não lateríticos ou residuais saprolíticos, em geral não tropicais, com comportamento definido pelos minerais da fração argila.

Como o solo a ser contido pelos grampos é reforçado por injeções de nata de cimento, as propriedades após a compactação provavelmente não correspondem ao comportamento desse material no maciço. Porém pode ser possível a analogia com as propriedades desses tipos de solo quanto à contração e expansão sem serem compactados.

Em geral, nessa condição, as argilas lateríticas são contrácteis, porém pouco ou nada expansivas. Já os solos siltosos saprolíticos são expansivos e pouco ou nada contrácteis. É possível que ambos os solos apresentem curvas granulométricas, LL e LP semelhantes ou que não sejam suficientes para distinguir entre as duas categorias. Os solos argilosos não lateríticos ou saprolíticos, quando expansivos são contrácteis e vice-versa. (Bernucci, 1987)

O método das pastilhas classifica os solos de maneira preliminar de acordo com a carta da tabela 19.1. Os procedimentos do ensaio estão em Godoy e Bernucci, 2002. Além do coeficiente  $c'$  e da penetração média utilizados na carta, são feitas outras avaliações,

resumidas na tabela 19.1, em que estão os resultados do ensaio das amostras 01 e 02 apresentadas no item 18.

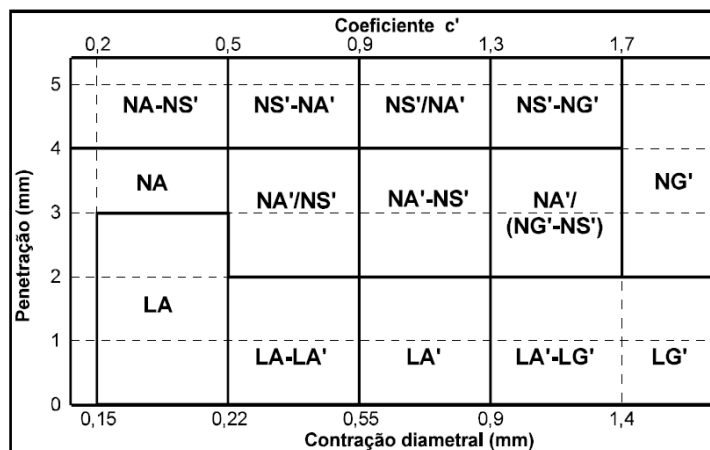


Figura 19.1 - Carta de classificação

Tabela 19.1 - Resultados do método das pastilhas

| Amostra                        | 01             | 02  |
|--------------------------------|----------------|-----|
| Consistência (amostra úmida)   | pouco plástica |     |
| Contração média - ct (mm)      | 1,9            | 2,7 |
| Coeficiente c'                 | 2,0            | 2,3 |
| Formas de expansão e trincas   | não ocorreram  |     |
| Penetração média (mm)          | 0              | 0   |
| Classificação MCT (preliminar) | LG'            | LG' |

Os solos foram portanto classificados como argilosos lateríticos (LG'), uma evidência que reforça seu caráter colapsível.

## 20. LEITURAS DA INSTRUMENTAÇÃO

Abaixo estão o croqui da localização dos instrumentos pela Moretti – pinos de recalque e inclinômetros – e as respectivas leituras. Os inclinômetros foram locado sno projeto e os pinos de recalque foram locados na obra; PR-05, PR-06 e PR-07 foram instalados ao término da execução do solo grampeado e, portanto não foram abordados anteriormente.



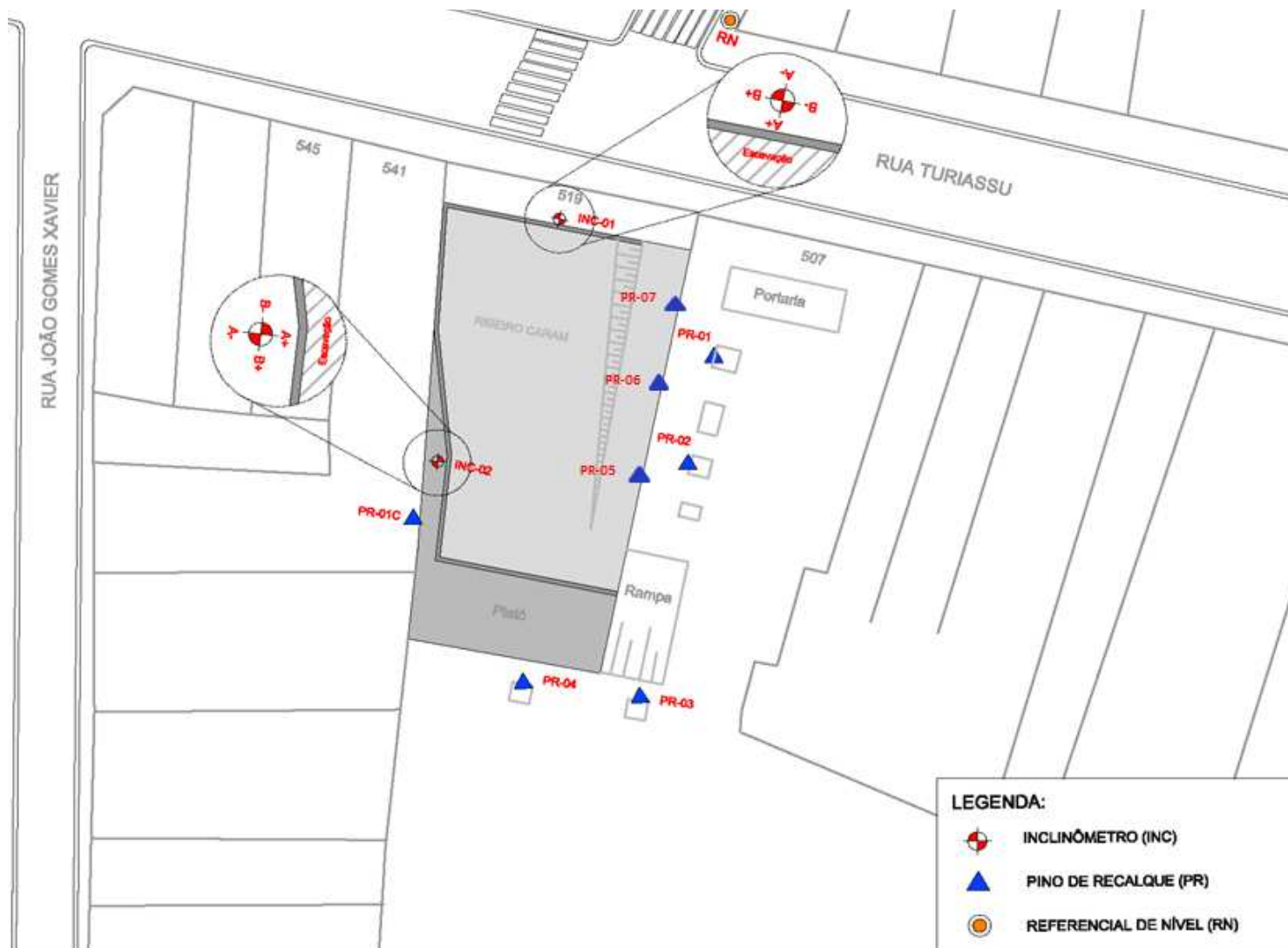


Figura 20.1 - Localização dos inclinômetros e pinos de recalque. (Moretti, 2014)

Tabela 20.1 - Medições dos pinos de recalque a partir do relatório da Moretti.

| Data     | PR-01             |                 |                 | PR-02             |                 |                 | PR-03             |                 |                 | PR-04             |                 |                 | PR-01C            |                 |                 |
|----------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|
|          | parcial<br>( mm ) | (mm/<br>semana) | total<br>( mm ) | parcial<br>( mm ) | (mm/<br>semana) | total<br>( mm ) | parcial<br>( mm ) | (mm/<br>semana) | total<br>( mm ) | parcial<br>( mm ) | (mm/<br>semana) | total<br>( mm ) | parcial<br>( mm ) | (mm/<br>semana) | total<br>( mm ) |
| 14/05/14 | 0,3               | 0,26            | 0,3             | 0,3               | 0,26            | 0,3             | 0,1               | 0,09            | 0,1             | 0,0               | 0,00            | 0,0             | 2,8               | 2,45            | 2,8             |
| 09/06/14 | 0,1               | 0,03            | 0,4             | -0,9              | -0,24           | -0,6            | -0,4              | -0,11           | -0,3            | -0,4              | -0,11           | -0,4            | -2,5              | -0,67           | 0,3             |
| 13/06/14 | 0,1               | 0,17            | 0,5             | 0,2               | 0,35            | -0,4            | -0,1              | -0,17           | -0,4            | -0,2              | -0,35           | -0,6            | 0,6               | 1,05            | 0,9             |
| 25/06/14 | 0,3               | 0,18            | 0,8             | 1,3               | 0,76            | 0,9             | 0,1               | 0,06            | -0,3            | 0,2               | 0,12            | -0,4            | -0,3              | -0,18           | 0,6             |
| 01/07/14 | 0,2               | 0,23            | 1,0             | 0,0               | 0,00            | 0,9             | -0,6              | -0,70           | -0,9            | -0,6              | -0,70           | -1,0            | 0,3               | 0,35            | 0,9             |
| 11/07/14 | 0,1               | 0,07            | 1,1             | 0,3               | 0,21            | 1,2             | 1,0               | 0,70            | 0,1             | 0,8               | 0,56            | -0,2            | 0,0               | 0,00            | 0,9             |
| 18/07/14 | 0,2               | 0,20            | 1,3             | -1,9              | -1,90           | -0,7            | -0,7              | -0,70           | -0,6            | -0,5              | -0,50           | -0,7            | 0,9               | 0,90            | 1,8             |
| 25/07/14 | -0,3              | -0,30           | 1,0             | 0,0               | 0,00            | -0,7            | 0,0               | 0,00            | -0,6            | 0,0               | 0,00            | -0,7            | 0,5               | 0,50            | 2,3             |
| 29/07/14 | 0,0               | 0,00            | 1,0             | 0,3               | 0,52            | -0,4            | 0,0               | 0,00            | -0,6            | 0,0               | 0,00            | -0,7            | 0,0               | 0,00            | 2,3             |
| 07/08/14 | 0,3               | 0,23            | 1,3             | 0,3               | 0,23            | -0,1            | 0,2               | 0,16            | -0,4            | 0,2               | 0,16            | -0,5            | 0,6               | 0,47            | 2,9             |
| 15/08/14 | 0,3               | 0,26            | 1,6             | 0,3               | 0,26            | 0,2             | 0,4               | 0,35            | 0,0             | 0,4               | 0,35            | -0,1            | 0,0               | 0,00            | 2,9             |
| 21/08/14 | 0,2               | 0,23            | 1,8             | 0,3               | 0,35            | 0,5             | 0,3               | 0,35            | 0,3             | 0,1               | 0,12            | 0,0             | 0,0               | 0,00            | 2,9             |
| 29/08/14 | 0,0               | 0,00            | 1,8             | 0,4               | 0,35            | 0,9             | 0,6               | 0,52            | 0,9             | 0,6               | 0,53            | 0,6             | 0,6               | 0,53            | 3,5             |
| 04/09/14 | 0,0               | 0,00            | 1,8             | 0,0               | 0,00            | 0,9             | 0,7               | 0,82            | 1,6             | 0,7               | 0,82            | 1,3             | 0,4               | 0,47            | 3,9             |
| 11/09/14 | 0,0               | 0,00            | 1,8             | 0,3               | 0,30            | 1,2             | 0,5               | 0,50            | 2,1             | 0,4               | 0,40            | 1,7             | 0,5               | 0,50            | 4,4             |
| 18/09/14 | 0,3               | 0,30            | 2,1             | 0,2               | 0,20            | 1,4             | -0,3              | -0,30           | 1,8             | -0,2              | -0,20           | 1,5             | -0,2              | -0,20           | 4,2             |
| 25/09/14 | 0,2               | 0,20            | 2,3             | -0,5              | -0,50           | 0,9             | 0,6               | 0,60            | 2,4             | 0,0               | 0,00            | 1,5             | 0,0               | 0,00            | 4,2             |
| 02/10/14 | 0,2               | 0,20            | 2,5             | 0,2               | 0,20            | 1,1             | 0,6               | 0,60            | 3,0             | 1,1               | 1,10            | 2,6             | 0,2               | 0,20            | 4,4             |
| 09/10/14 | 0,2               | 0,20            | 2,7             | 0,3               | 0,30            | 1,4             | 0,1               | 0,10            | 3,1             | 0,6               | 0,60            | 3,2             | 0,0               | 0,00            | 4,4             |
| 16/10/14 | 0,3               | 0,30            | 3,0             | 0,3               | 0,30            | 1,7             | 0,5               | 0,50            | 3,6             | -0,1              | -0,10           | 3,1             | 0,2               | 0,20            | 4,6             |
| 22/10/14 | 0,3               | 0,35            | 3,3             | 0,2               | 0,23            | 1,9             | 0,2               | 0,23            | 3,8             | 0,1               | 0,12            | 3,2             | 0,3               | 0,35            | 4,9             |
| 30/10/14 | 0,0               | 0,00            | 3,3             | 0,0               | 0,00            | 1,9             | 0,5               | 0,44            | 4,3             | 0,6               | 0,53            | 3,8             | 0,0               | 0,00            | 4,9             |
| 06/11/14 | 0,2               | 0,20            | 3,5             | 0,0               | 0,00            | 1,9             | 0,0               | 0,00            | 4,3             | 0,0               | 0,00            | 3,8             | 0,3               | 0,30            | 5,2             |
| 13/11/14 | 0,3               | 0,30            | 3,8             | 0,3               | 0,30            | 2,2             | 1,0               | 1,00            | 5,3             | 0,9               | 0,90            | 4,7             | 1,3               | 1,30            | 6,5             |

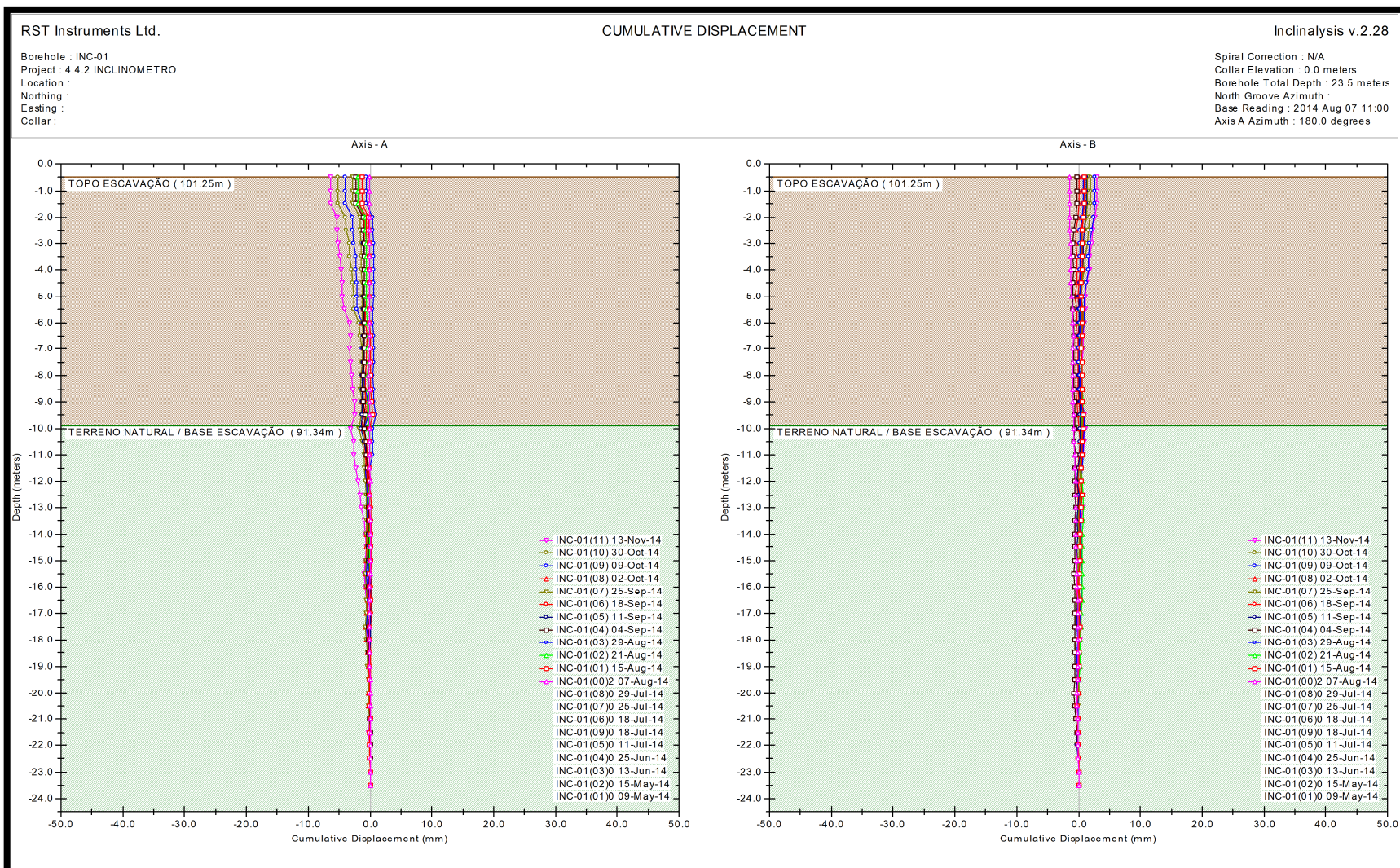


Figura 20.2 - Deslocamentos cumulativos do inclinômetro 1 – INC-01. (Moretti, 2014)



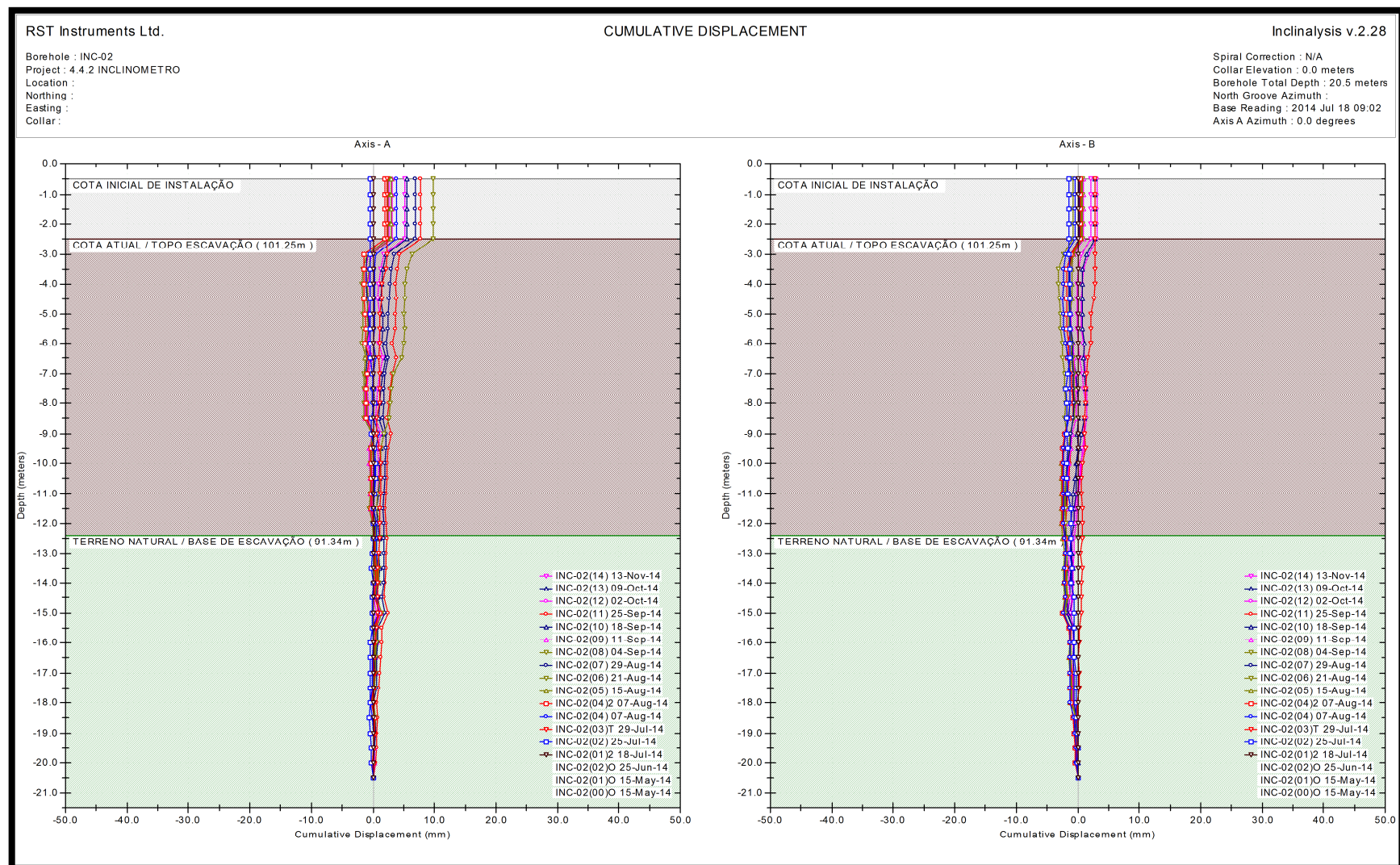


Figura 20.3 - Deslocamentos cumulativos do inclinômetro 2 – INC-02. (Moretti, 2014)

Ao se avaliar os deslocamentos dos pinos, é importante não apenas conhecer seu valor absoluto, mas sua velocidade (a unidade adotada foi mm/semana), pois deformações plásticas aceleradas podem indicar proximidade da ruptura.

Os pinos PR-01 e PR-02, nos pilares edificação ao lado, apresentaram deformações a uma taxa de 0,3mm/semana, aproximadamente constante, com interrupções em algumas semanas, em que ela caiu para 0,0mm/semana. Os últimos deslocamentos medidos apontavam recalque de 3,8mm em PR-01 e 2,2mm em PR-02, e sem evidência de que haviam estabilizado. Esses valores correspondem a 0,03%H e 0,02%H, respectivamente.

O RN usado é um marco na rua, que não é muito confiável como referencial fixo, ao contrário dos pilares, já que o prédio possui estacas de comprimento longo. As leituras dos pinos PR-01 e PR-02 estariam mais adequadas para seu propósito se os pinos fossem locados na parede da contenção e o RN fosse o pilar.

Os pinos PR-03 e PR-04, mais próximos à torre ao fundo indicaram velocidades bastante variáveis, de até 1,1mm/semana. Os últimos deslocamentos medidos apontavam recalque de 5,3mm em PR-03 e 4,7mm em PR-04, e haviam crescido consideravelmente em relação à medição anterior. Esses valores correspondem a 0,04%H, portanto dentro do aceitável de acordo com a tabela 9.2.1 (0,4%H para solo argiloso).

A presença de um único pino na residência (PR-01C) é insuficiente para mensurar recalques diferenciais, que causam as trincas de acomodação da fundação, essa informação pode ser tão esclarecedora quanto à ordem de grandeza do recalque.

O inclinômetro INC-01, na parede próxima à R. Turiassu indicou deslocamentos na direção do eixo principal A no sentido para a rua (-A) em todas as leituras, pois o sentido está trocado. Desde o início de outubro, portanto, eles indicam que o topo se inclina para o interior do terreno a uma velocidade média de 0,7mm/semana. Esse valor foi maior no início do mês, em que a parte superior da rampa estava sendo escavada na frente do terreno. Anteriormente, entre os meses de setembro e outubro, em que não houve escavação próxima a essa face, as leituras do topo oscilaram, não indicando a tendência mencionada. Na última medição, o deslocamento do topo foi de 6,5mm (0,07%H, aceitável).

O inclinômetro INC-02, por sua vez, indicou deslocamentos na direção do eixo principal no sentido previsível (+A). No dia 18/07 foi adotada uma nova referência para esse inclinômetro, pois na medição anterior, descobriu-se que ele estava entupido. Na ocasião, tentou-se puxar o torpedo 9 vezes sem sucesso, o que impossibilitava a medição. Os deslocamentos do topo nas datas anteriores chegaram a 2,5cm.

Após a nova referência, os deslocamentos do topo em INC-02, oscilaram entre 2 e 4mm, com picos de: 9mm no dia 21/10 (que pode estar associado à retomada da escavação na lateral, após a execução das estacas hélice contínua); 7mm no dia 25/10 (o único evento relevante no período que antecedeu essa medição foi a passagem do equipamento das estacas raiz, não tendo ocorrido escavação na lateral, mas aparentemente diminui-se o ritmo do bombeamento de água).

As últimas duas medições indicavam que o deslocamento do topo poderia ter se estabilizado em 5,5mm (0,06%H). Mas em solo grampeado, pode ocorrer a deformação por fluência (creep) (figura 9.1.1), principalmente quando envolve maciços argilosos saturados (como é o caso). Essa deformação normalmente é menor que a deformação inicial (Clouterre, 1991).

Além desses instrumentos convencionais, especificados no projeto, a Solotrat instalou os extensômetros (figura 10.3.1) usados como controle diário na execução. A precisão desses instrumentos pode ser questionada, principalmente por usar um referencial relativo. Variações de temperatura, inclusive, podem ocasionar diferenças de até 1mm. Mas essa medição expedita indica se houve movimentação e se ela cessou ou não. (Zirlis, Pitta, Souza, 2009)

Foram dispostos três nichos com extensômetros, conforme a figura 20.4. Em cada um deles há três hastes, que são fios metálicos de 8mm com comprimentos de 4m, 8m e 14m, ancorados a 2m do fundo de sua respectiva abertura.

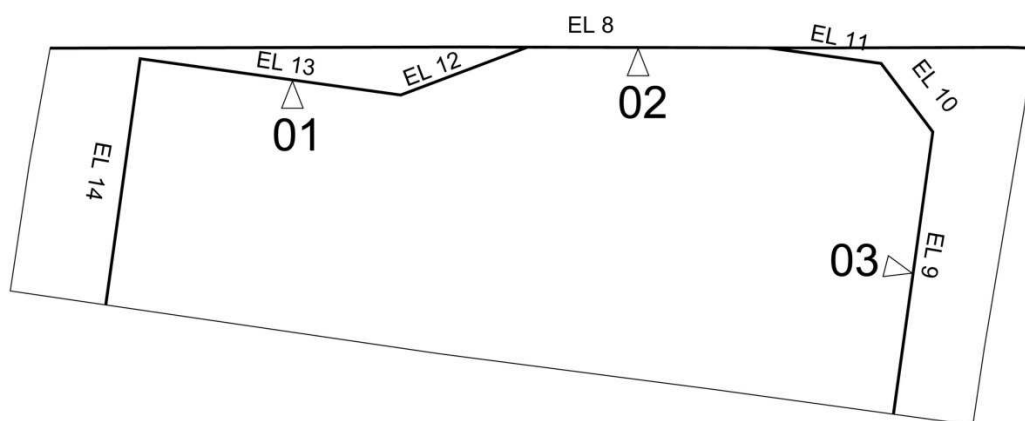


Figura 20.4 - Localização dos nichos (Solotrat, 2014)



### Evolução das deformações



Figura 20.5 - Deformações dos extensômetros do nicho 01. (Solotrat, 2014)

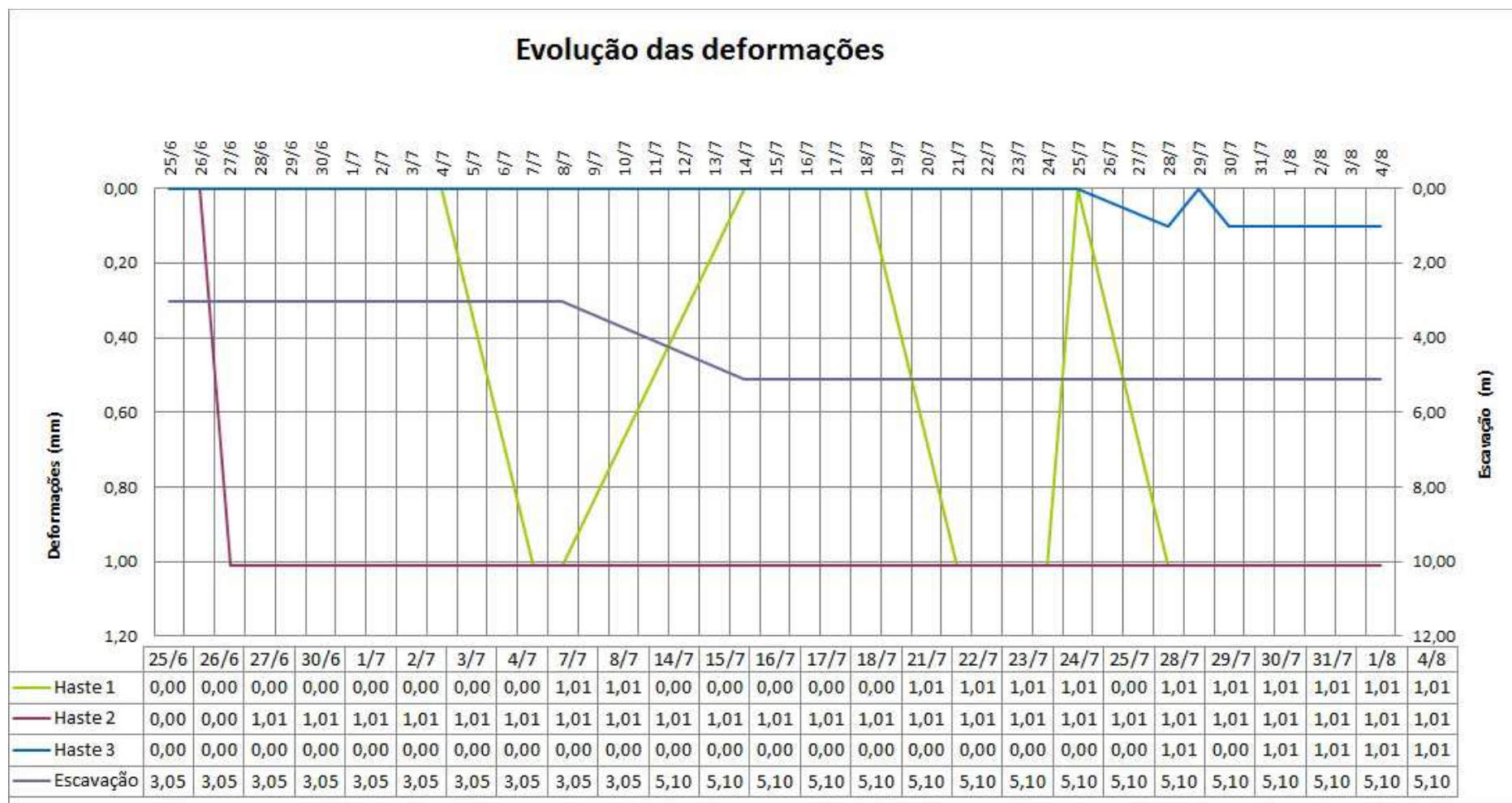


Figura 20.6 - Deformações dos extensômetros do nicho 02. (Solotrat, 2014)

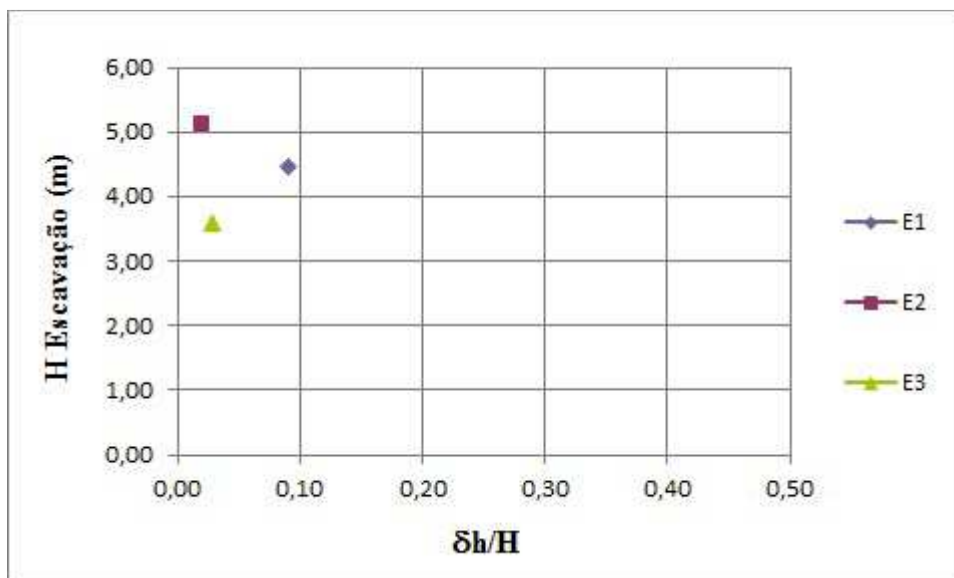


Figura 20.7 - Parâmetro de deformação  $\delta h/H$  de acordo com o nicho. (Solotrat, 2014)

Os extensômetros dos nichos 02 e 03 indicaram os menores deslocamentos (figura 20.6). Ao contrário das leituras do Moretti, pouco transparentes, essas medições apresentam a altura de escavação até o momento, facilitando na identificação de eventos que possam estar associados a uma mudança no padrão de deslocamentos.

Os deslocamentos no nicho 01 estão explicitados na figura 20.5. A haste 1, de 14m, indicou deslocamento de 4mm a partir do dia 26/06, mas isso ocorreu pela acomodação desse instrumento, pois fora instalado no dia anterior. Portanto, por essas medições, não houve deslocamento do maciço nessa região.

Os deslocamentos no nicho 02 foram pouco significativos e podem ser explicados pela precisão do método, que usa paquímetro. Algo semelhante ocorre nas deformações no nicho 03.

## 21. CONCLUSÕES

A partir do acompanhamento da obra e análise do projeto, tecemos as conclusões apresentadas a seguir.

A solução de contenção em solo grampeado se mostrou muito eficaz quanto à limitação de deslocamentos e à estabilidade estrutural. Além disso, impressiona pela qualidade estética do acabamento.



A longa duração dessa fase de contenção (7 meses) pode ser explicada: pelas interrupções e diminuição de ritmo impostas pela execução das estacas hélice, em um primeiro momento e as estacas raiz, na reta final; pela dificuldade do método executivo (em várias etapas), incluindo a armação por dupla tela, necessária pois não se poderia correr o risco de deslocamentos (o paramento era a parede acabada); o nível d'água elevado, que impôs estaqueamento em duas fases e cuidados adicionais na abertura de cachimbos; entre outros já citados.

Os fatores de segurança quanto à estabilidade global aqui calculados se revelaram inferiores aos do projeto, adotando-se hipóteses semelhantes que permitissem uma comparação.

Apesar disso, o projeto contempla reforço do solo por cavaletes de grampos e grampos verticais para aumentar a estabilidade do solo durante o corte vertical da escavação, que não são modelados nos cálculos, mas sabe-se que aumentam a segurança e diminuem a influência das incertezas nos modelos de cálculo adotados.

Não menos importante é o questionamento do que a “estabilidade global” se refere. Como modo de ruptura externo, caso se considere estabilidade da contenção de grampos, os círculos de ruptura do projeto, apesar de não serem os de menor fator de segurança, são condizentes com essa definição e com a prática no cálculo do solo grampeado.

Para o trabalho, no entanto, pela própria finalidade de se estudar o método proposto, considerou-se a estabilidade global do maciço de solo e grampos, o que é condizente com a ideia de estrutura de reforço (tal como é o solo grampeado) e com o conceito por trás do método da homogeneização.

Quanto ao confronto dos resultados dos ensaios de arrancamento com os valores de projeto para  $q_s$ , as correlações de estimativa com base no  $N_{SPT}$  se mostraram muito conservadoras. Isso pode ser explicado por terem sido desenvolvidos para diversos tipos de solo ou mesmo para solos diferentes dos encontrados na Bacia de São Paulo e por não serem muito realistas para grampos com três fases de injeção.

Correlações desenvolvidas para solos temperados podem não ser adequadas também, pois a energia e as ligações químicas decorrentes das injeções tem distintos efeitos sobre solos lateríticos. O desenvolvimento de um método para estimar  $q_s$  com maior acurácia, aplicado a essas condições, levaria a projetos mais econômicos. Existem bancos de dados que poderiam ser aproveitados para esse propósito.

Um entrave à interpretação do  $q_s$  obtido nos ensaios foi a persistência no uso de uma barra com seção menor que a necessária para que ocorresse ruptura na interface solo-grampo, não sendo possível portanto estimar um valor médio, apenas um limite inferior.

A influência da colapsividade na perda da aderência do solo aos grampos, e consequentemente na eficiência dos mesmos carece de publicações a respeito. No entanto, é algo que deve ser investigado mais a fundo, pois a disseminação do uso de solo grampeado em contenções de edifícios em São Paulo, bem como outras regiões com presença de solos colapsíveis, pode acarretar na ocorrência de problemas estruturais em um futuro próximo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LIMA, A. P. **Deformabilidade e estabilidade de taludes em solo grampeado**. 2002. 169 p. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- SPRINGER, F. O. **Ensaio de arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss**. 2006. 310 p. Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- CLOUTERRE. **Recommandations clouterre, projet national clouterre**. Paris: Presses de l'ENPC, 1991. 269 p.
- FHWA. **Geotechnical engineering circular n°7 – soil nail walls**. Relatório n°FHWA0-IF-03-017, Washington, D. C.: Federal Highway Administration, 2003. 183 p.
- VAL, E. C. do; NEME, P.A., ZIRLIS, A. C. **Solo grampeado: projeto, execução e instrumentação**. São Paulo: ABMS, 1999. 69 p.
- ZIRLIS, A. C.; ABRAMENTO, M.; KOSHIMA, A. Reforço do terreno. In: HACHICH, W. C. et al. **Fundações Teoria e Prática**. São Paulo: PINI, v. 2, 1998. p. 641-692.
- ZIRLIS, A. C. et al. Soil nailing: chumbamento de solos – experiência de uma equipe na aplicação do método. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ENCOSTAS, 1., 1992, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS, 1992. p. 81-99.
- NUNES, A. L. L. S. et al. Instrumentação e monitoramento de taludes em solo grampeado. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA DE PORTUGAL, 10., 2006, Lisboa. **Proceedings...** Lisboa: Sociedade Portuguesa de Geotecnia – SPG, 2006. p. 175-186.
- ORTIGÃO, J. A. R. Ensaio de arrancamento para projetos de solo grampeado, nota técnica. **Solos e Rochas**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 39-43, abr. 1997.
- 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, 1., São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABMS; SINDUSCONSP, 2003. p. 01-20.
- SÃO PAULO. COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO. **NC 03 – normas técnicas complementares – cálculo das obras do método em trincheira**, v. 1. São Paulo, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 1996. 33 p.
- AB'SABER, A. N. **Geomorfologia do sítio urbano de São Paulo**. Boletim da Faculdade de Filosofia e Ciências e Letras, Universidade de São Paulo, n. 219. São Paulo: 1957. 349 p.



VARGAS, M. **Os solos da cidade de São Paulo: histórico de pesquisas**. Artigo técnico, ABGE, n. 17, São Paulo: 2002. 103 p.

ROCSCIENCE Slide 2D limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes: user's guide part 1. Toronto: Rocscience, 2003. 199 p.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**, 2. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. viii, 355 p.

SANTOS, E. F. **Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais**. 2006. 144 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BERNUCCI, L. L. B. **Expansão e contração de solos tropicais compactados e suas aplicações às obras viárias: classificação de solos tropicais com base na expansão e contração**. 1987. 171 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

MORETTI ENGENHARIA CONSULTIVA. **Relatório de leitura de instrumentação geotécnica**. São Paulo, 2014. 10 p. (Relatório Técnico, MEC-8311-2783-REL).

ZIRLIS, A. C.; PITTA, C. A.; SOUZA, J. T. Um caso especial: contenção pelo método de solo grampeado, subjacente a um solo grampeado pré-existente. **Engenharia**, São Paulo, n. 591, p. 120-125, nov./dez. 2009.

SOLOTRAT ENGENHARIA GEOTÉCNICA. **Relatório de execução dos chumbadores**. São Paulo, 2014. 14 p. (Relatório Técnico, 1510).