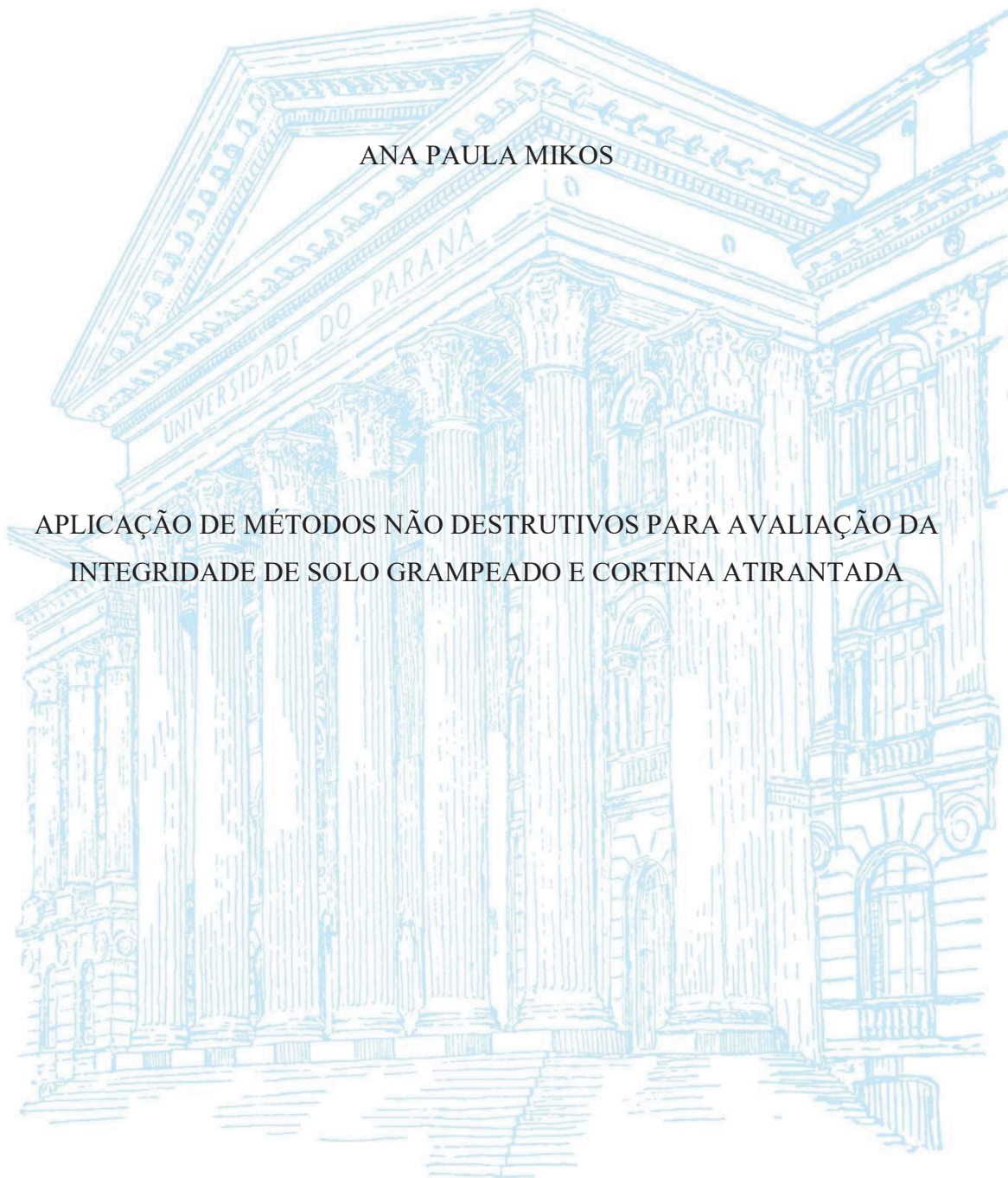


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANA PAULA MIKOS

APLICAÇÃO DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS PARA AVALIAÇÃO DA
INTEGRIDADE DE SOLO GRAMPEADO E CORTINA ATIRANTADA



CURITIBA

2022

ANA PAULA MIKOS

APLICAÇÃO DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS PARA AVALIAÇÃO DA
INTEGRIDADE DE SOLO GRAMPEADO E CORTINA ATIRANTADA

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de concentração em Geotecnia, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Vítor Pereira Faro

Coorientador: Prof. Dr. Marlio José do Couto Bonfim

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Mikos, Ana Paula

Aplicação de métodos não destrutivos para avaliação da integridade de solo grampeado e cortina atirantada. / Ana Paula Mikos. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Vítor Pereira Faro.

Coorientador: Prof. Dr. Marlio José do Couto Bonfim.

1. Sistemas de energia elétrica (Reflectometria). I. Faro, Vítor Pereira. II. Bonfim, Marlio José do Couto. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil. IV. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **ANA PAULA MIKOS** intitulada: **APLICACAO DE METODOS NAO DESTRUTIVOS PARA AVALIACAO DA INTEGRIDADE DE SOLO GRAMPEADO E CORTINA ATIRANTADA**, sob orientação do Prof. Dr. VITOR PEREIRA FARO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Outubro de 2022.

Assinatura Eletrônica
28/10/2022 19:04:28.0
VITOR PEREIRA FARO
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
31/10/2022 08:49:20.0
MARCELO HEIDEMANN
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica
31/10/2022 08:34:57.0
WERNER BILFINGER
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

Assinatura Eletrônica
31/10/2022 10:31:18.0
ALESSANDER CHRISTOPHER MORALES KORMANN
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pelo dom da vida.

À minha família, em especial minha querida mãe, meu irmão e minha vó Martha pelo suporte, apoio, paciência e amor incondicional.

Ao meu noivo Roberto de Resende Lisboa Piassetta, por sempre estar presente e disponível para me ajudar, pela paciência e amor ao longo dos anos de estudo.

Ao meu professor orientador, Prof. Vítor Pereira Faro, pela ajuda na realização deste trabalho e pela colaboração no desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu coorientador Marlio pela ajuda e esclarecimentos na área de elétrica. Agradeço também ao Lécio pela ajuda nos ensaios.

Ao Prof. Alessandro Kormann e Liamara pela oportunidade de participação no projeto de pesquisa e pelos conhecimentos compartilhados.

Ao Prof. Charles Ng, e à *Hong Kong University of Science e Technology* por proporcionar uma grande oportunidade de crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

Ao Thiago Ribeiro e André Aliot pela ajuda ao longo da pesquisa.

À concessionária Autopista Litoral Sul e ao Grupo Arteris pela oportunidade de desenvolvimento da pesquisa e pelo apoio financeiro.

À Dywidag pela ajuda com o fornecimento dos materiais utilizados na contenção experimental.

À SEEL Engenharia Ltda. que executou a obra do campo experimental, em especial ao Bira e sua equipe que tiveram paciência e contribuíram para o sucesso da instalação das barras.

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), pela estrutura e oportunidade de estudo.

À Fundação Araucária pelo auxílio financeiro.

À G5 Engenharia pelo conhecimento obtido e compartilhado por todos que contribuíram para a melhor qualidade deste trabalho. Um agradecimento especial para Claudia, Isabela, Milena, Paola e Sabrina.

Trabalho contínuo,
olho no futuro e
aperfeiçoamento contínuo.

É isso que faz o camarada.
(Nelson Luiz de Sousa Pinto).

RESUMO

Estruturas geotécnicas de contenção e estabilização são amplamente utilizadas ao longo de rodovias, a fim de garantir a estabilidade de taludes de corte e aterro. Dentre as estruturas mais utilizadas, destacam-se o solo grampeado e a cortina atirantada. Ambas as estruturas consistem na instalação de barras de aço em uma perfuração no solo e preenchimento com calda de cimento. Por se tratar de elementos enterrados, não é possível avaliar visualmente a condição interna das barras e do preenchimento. Por isso, boas práticas executivas e manutenção preventiva e periódica destas estruturas são essenciais para garantir seu bom desempenho. Os principais problemas encontrados em solo grampeado e cortina atirantada são falhas no preenchimento com calda de cimento e corrosão da barra de aço. Para avaliação de obras de contenção podem ser utilizados os métodos não destrutivos (MND), que permitem realizar ensaios simples e rápidos em todos os elementos. O objetivo do presente trabalho foi avaliar as metodologias não destrutivas utilizadas para a análise do comprimento e integridade em grampos e tirantes, e estabelecer diretrizes para a sua execução e manutenção. Para isso, foi realizado um estudo da aplicabilidade e limitações dos métodos não destrutivos mais utilizados internacionalmente. As análises foram divididas em 3 etapas principais: ensaios de laboratório, ensaios no campo experimental e ensaios em obras existentes. Os ensaios de laboratório foram realizados para calibrar e avaliar os MNDs. Os métodos avaliados foram o *Time Domain Reflectometry* (TDR), o *Surface Wave Time Domain Reflectometry* (SW-TDR), *Reflectometric Impulse Measurement Technique* (RIMT) e o Método da Resistência Elétrica. No campo experimental foram executados grampos e tirantes íntegros e com falhas. Para os grampos foi realizada a variação do comprimento e da metodologia executiva, falhas na calda de cimento, variação no posicionamento de emendas, barra cravada no solo e perfuração maior que a barra. Os tirantes foram executados com monobarras, cordoalhas e fios de mesmo comprimento, com simulação de corrosão e falhas com ar no início e meio do furo. Nas barras com variações conhecidas do campo experimental, foram testados os métodos TDR, RIMT e resistência elétrica. Para o método TDR foi necessária a instalação de um cabo coaxial ao longo de todas as barras na etapa construtiva. A partir dos ensaios no cabo coaxial foi possível confirmar se o comprimento do cabo era correspondente com o comprimento das barras. Os resultados dos ensaios TDR nos grampos permitiram detectar vazios maiores de 50 cm com ar na calda de cimento. Para os tirantes foi possível identificar o trecho livre e o trecho ancorado. O tempo de cura da calda de cimento, e a protensão dos tirantes não interferiram nos resultados. O método RIMT é realizado sem a necessidade de cabo coaxial, porém não detectou a falha e os erros de comprimento foram cerca de 30%. O método SW-TDR, com o cone goubau, apresentou resultados promissores e não necessita do cabo pré-instalado. O método da resistência elétrica foi comparativo e é indicado que seja utilizado em conjunto com outra metodologia, e a sua aplicação com o método TDR apresentou boa correlação.

Palavras-chave: contenções, reflectometria, métodos elétricos.

ABSTRACT

Retaining structures are widely used along highways to ensure the cut and fill slopes' stability. Soil nailing and tie-back wall are the most used structures. Both have buried steel bar surrounded by grout, that turns impossible to evaluate the bar integrity into the ground. Therefore, good executive practices and preventive and periodic maintenance of these structures are essential to ensure a great performance. The main pathological manifestations in soil nailing and tie-back wall are the incomplete grouting and corrosion. To evaluate new and old structures can be used the non-destructive methods (NDT), that can be applied to all bars and the techniques are simple and quick. The research aims to evaluate the non-destructive techniques for determine the bar length and integrity and define guidelines to its execution and maintenance. A study of merits and limitations of the most used non-destructive methods was conducted. The analysis was divided into three steps, laboratory tests, tests on the experimental field and tests on old structures. Tests were conducted in laboratory and field to calibrate and evaluate the methods. The NDTs tested were Time Domain Reflectometry (TDR), Surface Wave Time Domain Reflectometry (SW-TDR), Refectometric Impulse Measurement Technique (RIMT) and Resistance Method. Tests were performed on an experimental field constructed with soil nailing and tie-back wall, and it was designed with construction variables that simulate the usual anomalies in these structures. The soil nailing was constructed with different lengths and type of execution, it was simulated voids with air in the grouting, variation of coupler's position, void with soil at the nail's end and drill hole larger than the bar. The tie-back wall was constructed with steel bar, steel wire rope and steel wire and corrosion and voids with air were simulated. In the bars with anomalies in the experimental field was applied TDR, RIMT and electrical resistance method. It was necessary a coaxial wire pre-installed along the bars during the construction to test the TDR method. The bar length was detected using TDR method. Results detect voids with air larger than 50 cm in soil nailing. The TDR allowed the determination of unbounded and bounded anchor length. The curing time and the prestressing of the tie-back wall did not interfere with the results. The RIMT method is performed without the need for coaxial cable, but it did not detect the failure and the length errors were about 30%. The SW-TDR method with goubal cone doesn't need the pre-installed electric wire and presented promisor results. The electrical resistance method was comparative, and its use is indicated with an additional methodology. The analyses between TDR and electrical resistance method present good correlation.

Keywords: retaining structures, reflectometry, electrical method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Deslizamento de terra ocorrido na BR-376 em 2022.....	28
Figura 1.2 – Ações realizadas para evitar ou minimizar danos causados por deslizamento de terra no Brasil entre os anos de 2013 e 2016.....	28
Figura 2.1 – Solo grampeado na BR-376	31
Figura 2.2 – Distribuição de tensões em solo grampeado	34
Figura 2.3 – Processo executivo do solo grampeado.....	35
Figura 2.4 – Falhas construtivas em estruturas de solo grampeado	37
Figura 2.5 – Grampo executado somente com bainha.....	38
Figura 2.6 – Falha em solo grampeado na rodovia raposo Tavares-SP	39
Figura 2.7 – Colapso de solo grampeado em área urbana	40
Figura 2.8 – Falha em solo grampeado nos EUA.....	40
Figura 2.9 – Cortina atirantada em construção na BR-116	41
Figura 2.10 – Principais elementos dos tirantes	42
Figura 2.11 – Distribuição de tensões em cortinas atirantadas.....	43
Figura 2.12 – Saída de água pela cabeça do tirante.....	45
Figura 2.13 – Corrosão da cabeça do tirante	46
Figura 2.14 – Acidentes em cortinas atirantadas em estradas	48
Figura 2.15 – Ruptura de cortinas atirantadas em ferrovias	49
Figura 2.16 – Ruptura de cortina atirantada em Belo Horizonte – MG	50
Figura 2.17 – Método TDR com fio elétrico	53
Figura 2.18 – Modelo equivalente de linha de transmissão	53
Figura 2.19 – Fios de cobre inseridos em tubo de injeção	54
Figura 2.20 – Ensaio TDR com cabo coaxial.....	54
Figura 2.21 – Esquema explicativo dos métodos baseados em reflectometria	55

Figura 2.22 – Avaliação da velocidade de propagação em diferentes meios	57
Figura 2.23 – Análise da variação do comprimento com o método TDR.....	59
Figura 2.24 – Identificação de vazios com o método TDR.....	60
Figura 2.25 – Resultados do TDR obtido com variação do posicionamento das falhas	61
Figura 2.26 – Método TDR com cabo coaxial	62
Figura 2.27 – Incertezas relacionadas ao TDR.....	63
Figura 2.28 – Comparação entre resultados TDR sem e com fio elétrico.....	66
Figura 2.29 – Cone lançador SWTL.....	68
Figura 2.30 – Esquema do ensaio de resistência elétrica	70
Figura 2.31 – Resultado típico do método da resistência elétrica	71
Figura 2.32 – Medida estatística comparativa no ensaio de resistência elétrica	72
Figura 2.33 – Resultados de resistência elétrica em solo grampeado	72
Figura 2.34 – Resultados de resistência elétrica em barras de 15 m	73
Figura 2.35 – Resultado do método de resistência elétrica	74
Figura 3.1 – Localização da contenção experimental.....	75
Figura 3.2 – Vista frontal do campo experimental em 2016	76
Figura 3.3 – Vista frontal da contenção experimental (2020).....	76
Figura 3.4 – Mapa geológico da região de estudo.....	77
Figura 3.5 – Locação das sondagens e seções	78
Figura 3.6 – Seção A-A'	78
Figura 3.7 – Seção B-B'	79
Figura 3.8 – Seção C-C'	79
Figura 3.9 – Grampos íntegras de 12 m e 6 m.....	82
Figura 3.10 – Grampos de 6 m com variação do posicionamento das emendas.....	82
Figura 3.11 – Grampo de 6 m com falha com solo no final.....	82
Figura 3.12 – Grampos de 6 m com falha no preenchimento da calda de cimento.....	83

Figura 3.13 – Grampo de 6 m com furo de 7 m	83
Figura 3.14 – Vista frontal do solo grampeado	83
Figura 3.15 – Variação executiva nos tirantes: a) Tipo 1; b) Tipo 2.....	85
Figura 3.16 – Tirante com redução de seção	86
Figura 3.17 – Simulação de corrosão nos tirantes de cordoalha	86
Figura 3.18 – Tirante com falha no início do furo com ar.....	87
Figura 3.19 – Tirante com falha no trecho livre	87
Figura 3.20 – Vista frontal da cortina atirantada.....	88
Figura 3.21 – Organização do canteiro de obras	88
Figura 3.22 – Execução da perfuração dos grampos.....	90
Figura 3.23 – Colocação do grampo dentro da perfuração.....	90
Figura 3.24 – Grampos com tubo de reinjeção.....	91
Figura 3.25 – Luva de emenda rosqueada	92
Figura 3.26 – Caps utilizados para a simulação de falhas com ar.....	92
Figura 3.27 – Testes de vedação dos caps com diferentes materiais.....	93
Figura 3.28 – Montagem das falhas com ar nos grampos	94
Figura 3.29 – Vista frontal do solo grampeado	94
Figura 3.30 – Reinjeção dos tirantes	95
Figura 3.31 – Bainha individual das monobarras	96
Figura 3.32 – Execução da monobarra tipo 2.....	97
Figura 3.33 – Redução de seção das monobarras.....	97
Figura 3.34 – Detalhe do tirante de cordoalha.....	98
Figura 3.35 – Falha no início do furo com 50 cm de ar	99
Figura 3.36 – Falha com ar nas cordoalhas	99
Figura 3.37 – Cortes nas cordoalhas.....	100
Figura 3.38 – Tirante de fio.....	100

Figura 3.39 – Vista geral da cortina atirantada.....	101
Figura 3.40 – Projeto das placas de reação dos tirantes	101
Figura 3.41 – Preparação do talude para colocação das placas de concreto	102
Figura 3.42 - Sistema para protensão dos tirantes	103
Figura 3.43 - Equipamento utilizados na protensão	103
Figura 3.44 – Deformação do solo	104
Figura 3.45 – Chapas metálicas.....	104
Figura 3.46 – Clavetes para os tirantes de cordoalha e fio	105
Figura 3.47 – Vista da área ao final da protensão dos tirantes	105
Figura 3.48 – Elementos da contenção experimental.....	106
Figura 3.49 – Equipamento TDR 200	107
Figura 3.50 – Adaptação do ensaio TDR	108
Figura 3.51 – Exemplo do método da dupla tangente	110
Figura 3.52 – Ensaio <i>Reflectometric Impulse Measurement Technique</i>	112
Figura 3.53 – Configuração do ensaio não destrutivo da resistência elétrica.....	113
Figura 3.54 – Equipamento utilizado para medição de resistência elétrica das barras	114
Figura 3.55 – Hastes metálicas instaladas no solo para leitura da resistência elétrica .	115
Figura 3.56 – Abertura das garras utilizadas no ensaio de resistência elétrica	115
Figura 3.57 – Solo grampeado no km 658+400	117
Figura 3.58 – Planta dos grampos da estrutura do km 658+400	117
Figura 3.59 – Ensaio de resistência elétrica no solo grampeado existente.....	119
Figura 3.60 – Face da cortina atirantada avaliada	119
Figura 3.61 – Vista frontal da cortina atirantada e identificação dos tirantes avaliados	120
Figura 3.62 – Capacete de concreto dos tirantes	121
Figura 3.63 – Garra jacaré nos tirantes monobarra	121

Figura 3.64 – Locação da coleta de amostras indeformadas	123
Figura 3.65 – Coleta de amostra indeformada.....	124
Figura 3.66 – Armazenamento das amostras indeformadas	124
Figura 3.67 – Ensaio de resistividade elétrica em amostra indeformada	125
Figura 3.68 – Ensaio de resistividade elétrica em amostra indeformada	126
Figura 3.69 – Coleta de corpos de prova de calda de cimento	127
Figura 3.70 – Ensaio de resistividade elétrica	128
Figura 3.71 – Corpos de prova de calda de cimento para ensaio de permissividade elétrica	129
Figura 3.72 – Ensaio de permissividade elétrica na água e na calda de cimento	130
Figura 3.73 – Ensaio TDR realizado em grampo em contato com o ar	131
Figura 3.74 – Moldagem do modelo reduzido	132
Figura 3.75 – Modelos reduzidos	132
Figura 3.76 – Cone para realização do ensaio SW-TDR.....	133
Figura 3.77 – Teste com cone no modelo reduzido.....	134
Figura 3.78 – Curva granulométrica das areias utilizadas nos ensaios	136
Figura 3.79 – Ensaio de cisalhamento direto de interface.....	138
Figura 4.1 – Comparação entre a resistividade elétrica e a umidade	142
Figura 4.2 – Amostra indeformada coletada no campo experimental (Ponto 1).....	143
Figura 4.3 – Comparação da resistividade elétrica na câmara seca e câmara úmida ...	144
Figura 4.4 – Peso dos CPs ao longo do tempo	144
Figura 4.5 – Resistividade elétrica da calda de cimento dos grampos	148
Figura 4.6 – Ensaio TDR das barras de aço em laboratório	151
Figura 4.7 – Ensaio TDR no grampo de 2,0 m com 25 mm de diâmetro.....	152
Figura 4.8 – Ensaio TDR no grampo de 2,0 m com 32 mm de diâmetro.....	152
Figura 4.9 – Resultado do ensaio TRD utilizando o cone goubau na barra de aço.....	154

Figura 4.10 – Resultado do ensaio TRD utilizando o cone goubau na barra de aço com interferências	154
Figura 4.11 – Resultado do ensaio TRD utilizando o cone goubau nos modelos reduzidos	155
Figura 4.12 – Ensaio de cisalhamento direto no solo natural.....	156
Figura 4.13 – Ensaio de cisalhamento direto de interface com calda de cimento tradicional	157
Figura 4.14 – Ensaio de cisalhamento direto de interface com calda de cimento com areia natural.....	157
Figura 4.15 – Ensaio de cisalhamento direto de interface com calda de cimento com areia reciclada	158
Figura 4.16 – Envoltórias de resistência dos ensaios de cisalhamento	158
Figura 4.17 –Ensaio de cisalhamento de interface entre solo natural e calda de cimento	159
Figura 4.18 – Resistência à compressão das amostras de calda de cimento	160
Figura 4.19 – Análise dos pulsos iniciais do equipamento TDR	161
Figura 4.20 – Comprimento dos cabos coaxiais no campo experimental.....	162
Figura 4.21 – Resultados do método TDR nos grampos íntegros.....	163
Figura 4.22 – Ensaio TDR nos grampos de 12 m.....	164
Figura 4.23 – Ensaio TDR nos grampos íntegros de 6 m.....	165
Figura 4.24 – Comparação entre os ensaios TDR nos grampos de 6 m e 12 m íntegros	166
Figura 4.25 – Resultados do TDR nas barras com emenda (6 m).....	167
Figura 4.26 – Resultados TDR nas barras G6	168
Figura 4.27 – Resultados TDR nos grampos G7	169
Figura 4.28 – Resultados TDR nos grampos G8	170
Figura 4.29 – Resultados TDR nos grampos G9	171
Figura 4.30 – Resultados TDR nos grampos G10	172

Figura 4.31 – Resultado do método TDR em um tirante de monobarra	180
Figura 4.32 – Ensaio do TDR nos tirantes de monobarra tipo T1	182
Figura 4.33 – Ensaio do TDR nos tirantes de monobarra tipo T2	183
Figura 4.34 – Ensaio do TDR nos tirantes de monobarra tipo T3	184
Figura 4.35 – Ensaio do TDR nos tirantes de cordoalha tipo T4 e T5	187
Figura 4.36 – Ensaio do TDR nos tirantes de cordoalha tipo T6 e T7	188
Figura 4.37 – Ensaio do TDR nos tirantes de cordoalha tipo T4	189
Figura 4.38 – Ensaio do TDR nos tirantes de cordoalha tipo T5	190
Figura 4.39 – Ensaio do TDR nos tirantes de cordoalha tipo T6	191
Figura 4.40 – Ensaio do TDR nos tirantes de cordoalha tipo T7	192
Figura 4.41 – Ensaio do TDR nos tirantes de fio tipo T8 e T9	194
Figura 4.42 – Ensaio do TDR nos tirantes de fio tipo T8.....	195
Figura 4.43 – Ensaio do TDR nos tirantes de fio tipo T9.....	196
Figura 4.44 – Gráfico típico do método Reflectometric Impulse Measurement Technique	203
Figura 4.45 – Resultado gráfico do tirante de monobarra T1a.....	205
Figura 4.46 – Resultado gráfico do tirante de cordoalha T4a	205
Figura 4.47 – Resultado gráfico do tirante de fio T8a.....	206
Figura 4.48 – Resultados gráficos dos tirantes de monobarra T3 com redução de seção	207
Figura 4.49 – Resultados gráficos dos tirantes de cordoalha T7 com redução de seção	208
Figura 4.50 – Variação do posicionamento dos eletrodos no solo grampeado	210
Figura 4.51 – Variação da resistência elétrica dos tirantes.....	212
Figura 4.52 – Seções de medição da resistência elétrica no solo grampeado	213
Figura 4.53 – Seções variadas do ensaio de resistência elétrica nos grampos	216
Figura 4.54 – Seções de resistência elétrica dos tirantes.....	218

Figura 4.55 – Resistência elétrica dos tirantes inseridos na linha inferior	220
Figura 4.56 – Resistência elétrica dos tirantes inseridos na linha superior	221
Figura 4.57 – Ensaio de resistência elétrica nos tirantes de cordoalha.....	223
Figura 4.58 – Resultados dos ensaios de resistência elétrica nos grampos	225
Figura 4.59 – Análise da integridade dos grampos pelo desvio padrão	227
Figura 4.60 – Resultados dos ensaios de resistência elétrica nos tirantes	231
Figura 4.61 – Comparação de resistência elétrica entre grampos e tirantes.....	233
Figura 4.62 – Dispersão dos resultados dos ensaios de resistência elétrica do solo grampeado existente.....	241
Figura 4.63 – Resultados de resistência elétrica dos grampos de 4 m de comprimento	242
Figura 4.64 – Resultados de resistência elétrica dos grampos de 6 m de comprimento	243
Figura 4.65 – Resultados de resistência elétrica dos grampos de 8 m de comprimento	244
Figura 4.66 – Intervalo de referência dos grampos de 8 m do solo grampeado existente	245
Figura 4.67 – Resultados de resistência elétrica na cortina atirantada existente.....	246
Figura 4.68 – Intervalo de referência dos tirantes Tipo 1.....	248
Figura 4.69 – Intervalo de referência dos tirantes Tipo 1 sem considerar T1 a T4.....	249
Figura 4.70 – Intervalo de referência dos tirantes Tipo 3.....	251

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação entre normas internacionais relacionado aos parâmetros da calda de cimento.....	33
Tabela 2.2 – Resumo dos trabalhos estudados	51
Tabela 2.3 – Resumo da aplicabilidade e resultados do método TDR.....	65
Tabela 3.1 – Variações realizadas no solo grampeado.....	81
Tabela 3.2 – Variações realizadas na cortina atirantada.....	85
Tabela 3.3 – Quantitativo de aço da cortina atirantada	88
Tabela 3.4 – Especificações técnicas do equipamento TDR 200.....	107
Tabela 3.5 – Características dos tirantes avaliados	120
Tabela 3.6 – Características das areias utilizadas.....	135
Tabela 3.7 – Proporções utilizadas para cada variação	137
Tabela 4.1 – Resultados de resistividade elétrica e caracterização geotécnica obtidos com as amostras indeformadas.....	140
Tabela 4.2 – Resultados de resistividade elétrica dos corpos de prova de calda de cimento dos grampos.....	146
Tabela 4.3 – Resultados de permissividade elétrica da calda de cimento	149
Tabela 4.4 – Estimativa da velocidade de propagação do pulso na calda de cimento .	150
Tabela 4.5 – Velocidade de propagação da barra de aço em contato com o ar.....	150
Tabela 4.6 – Velocidade de propagação na calda de cimento	153
Tabela 4.7 – Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento	159
Tabela 4.8 – Estimativa da velocidade de propagação na calda de cimento dos grampos	173
Tabela 4.9 – Estimativa da velocidade de propagação na calda de cimento dos grampos com falhas	175
Tabela 4.10 – Estimativa da velocidade de propagação média na calda de cimento dos grampos	177

Tabela 4.11 – Estimativa do comprimento dos grampos íntegros.....	178
Tabela 4.12 – Estimativa da velocidade de propagação média na calda de cimento dos grampos.....	179
Tabela 4.13 – Estimativa da velocidade de propagação do trecho livre e ancorado nos tirantes monobarra.....	185
Tabela 4.14 – Estimativa da velocidade de propagação do trecho livre e ancorado nos tirantes cordoalha	193
Tabela 4.15 – Estimativa da velocidade de propagação do trecho livre e ancorado nos tirantes de fio.....	197
Tabela 4.16 – Resumo das velocidades médias obtidas nos tirantes.....	198
Tabela 4.17 – Resumo das velocidades médias para cada tipo de tirante	199
Tabela 4.18 – Estimativa do comprimento dos tirantes.....	200
Tabela 4.19 – Comparação da estimativa do comprimento dos tirantes	202
Tabela 4.20 – Resultados do ensaio RIMT nos grampos	203
Tabela 4.21 – Resultados do ensaio RIMT nos tirantes	204
Tabela 4.22 – Resistência elétrica dos grampos com a variação do posicionamento dos eletrodos	209
Tabela 4.23 – Resistência elétrica dos tirantes com variação do posicionamento dos eletrodos	211
Tabela 4.24 – Valores de resistência elétrica dos grampos com variação lateral dos eletrodos	214
Tabela 4.25 – Análise estatística dos dados de resistência elétrica nos grampos.....	215
Tabela 4.26 – Resistência elétrica em diferentes seções	217
Tabela 4.27 – Resultados de resistência elétrica dos tirantes para diferentes seções...	219
Tabela 4.28 – Análise estatística dos valores de resistência elétrica nos tirantes	222
Tabela 4.29 – Resistência elétrica dos fios da cordoalha do tirante T7c.....	224
Tabela 4.30 – Comparação entre a média dos fios e da cordoalha do elemento T7c...	224
Tabela 4.31 – Resultados de resistência elétrica nos grampos	225

Tabela 4.32 – Análise da variação dos resultados de resistência elétrica nos grampos	227
Tabela 4.33 – Comparação dos resultados de resistência elétrica com a injeção da calda de cimento	229
Tabela 4.34 – Comparativo entre resistividade elétrica dos CPS e resultados de resistência elétrica	230
Tabela 4.35 – Resultados de resistência elétrica nos tirantes	232
Tabela 4.36 – Comparativo entre o método TDR e o método da resistência elétrica nos grampos	235
Tabela 4.37 – Comparativo entre o método TDR e o método da resistência elétrica nos tirantes	238
Tabela 4.38 – Resultados do ensaio de resistência elétrica no solo grampeado existente	240
Tabela 4.39 – Resistência elétrica dos tirantes Tipo 1 (T1 a T15)	247
Tabela 4.40 – Resistência elétrica dos tirantes Tipo 3 (T17 a T31)	250

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres

ASTM - American Society for Testing and Materials

CPMR - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DER - Departamento de Estradas e Rodagem

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

IC - Índice de consistência

MND - Método não destrutivo

LL - Limite de liquidez

LP - Limite de plasticidade

SP - Sondagem à percussão

SPT - Standart Penetration Test

TDR - Time Domain Reflectometry

LISTA DE SÍMBOLOS

A - Ampère

cm - Centímetro

g - Grama

km - Quilômetro

m - Metro

mA - Miliampère

γ_s - Peso específico real dos grãos

% - Porcentagem

Ω - Ohm

V - Volts

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	24
1.1.	OBJETIVOS	26
1.2.	JUSTIFICATIVA	27
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1.	SOLO GRAMPEADO	31
2.1.1.	Descrição da técnica	32
2.1.2.	Manifestações patológicas	36
2.2.	CORTINA ATIRANTADA	41
2.2.1.	Descrição da técnica	41
2.2.2.	Manifestações patológicas	44
2.3.	MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS	50
2.3.1.	Time Domain Reflectometry (TDR)	52
2.3.2.	Surface Wave Time Domain Reflectometry (SW-TDR)	64
2.3.3.	Resistência Elétrica	68
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	75
3.1.	CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO EXPERIMENTAL	75
3.1.1.	Caracterização geológico-geotécnica	76
3.2.	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	80
3.2.1.	Solo grampeado	80
3.2.2.	Cortina atirantada	84
3.3.	EXECUÇÃO DO CAMPO EXPERIMENTAL	88
3.3.1.	Solo grampeado	89
3.3.2.	Cortina atirantada	94
3.4.	ENSAIOS NO CAMPO EXPERIMENTAL	106
3.4.1.	<i>Time Domain Reflectometry</i>	106

3.4.2. Resistência Elétrica.....	113
3.5. ENSAIOS EM OBRAS EXISTENTES	116
3.5.1. Solo grampeado	116
3.5.2. Cortina atirantada	119
3.6. ENSAIOS DE LABORATÓRIO	122
3.6.1. Amostras indeformadas de solo.....	122
3.6.2. Resistividade elétrica da calda de cimento	126
3.6.3. Permissividade elétrica da calda de cimento	128
3.6.4. Modelo reduzido para o TDR.....	130
3.6.5. Cone Goubau	133
3.6.6. Areia reciclada na calda de cimento	134
4. RESULTADOS	139
4.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO	139
4.1.1. Amostras indeformadas de solo.....	139
4.1.2. Resistividade elétrica da calda de cimento	143
4.1.3. Permissividade elétrica da calda de cimento	149
4.1.4. Modelo reduzido TDR.....	150
4.1.5. Cone Goubau	153
4.1.6. Areia reciclada na calda de cimento	156
4.2. RESULTADOS DO CAMPO EXPERIMENTAL.....	161
4.2.1. <i>Time Domain Reflectometry</i>	161
4.2.2. Método da resistência elétrica	208
4.2.3. Comparativo entre TDR e resistência elétrica.....	234
4.3. RESULTADOS NAS OBRAS EXISTENTES	239
4.3.1. Solo grampeado	239
4.3.2. Cortina atirantada	245

4.4.	DIRETRIZES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	252
4.4.1.	Ensaio TDR	252
4.4.2.	Resistência Elétrica.....	256
5.	CONCLUSÕES.....	258
5.1.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	259
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	260

1. INTRODUÇÃO

Estruturas de contenção com chumbadores de aço instalados no solo, como solo grampeado e cortina atirantada, visam melhorar a condição de estabilidade de um talude. Estas contenções são amplamente utilizadas em rodovias, principalmente em regiões de relevo acidentado. Segundo Peccin *et al.* (2014), estas estruturas tiveram seu início e uso intensificado no Brasil entre os anos de 1970 e 1980, o que indica a existência de obras com mais de 40 anos. As obras de contenção podem ser empregadas em encostas naturais instáveis, taludes existentes ou após o seu rompimento, e também apresentam grande utilização em centros urbanos.

Para estruturas de solo grampeado, a primeira norma nacional de projeto e execução foi publicada em 2021 pela Associação de Normas Técnicas (ABNT). Para tirantes, a primeira norma da ABNT entrou em vigor em 1975 e a última atualização ocorreu em 2018. No entanto, muitas obras antigas foram construídas seguindo os procedimentos e práticas internas da empresa executora, sem cuidados com a qualidade executiva e durabilidade, principalmente em obras de solo grampeado, uma vez que a norma é recente.

Cabe salientar que boas práticas na execução são importantes, mas a realização de vistorias periódicas para avaliação do estado de conservação das obras de contenção é imprescindível. Segundo Mikos *et al.* (2017), em estruturas de solo grampeado e cortina atirantada é necessário verificar as condições do paramento, como: manchas superficiais, eflorescências, musgos, líquens, vegetação e a própria surgência de água pela estrutura ou juntas. A presença de água no maciço pode contribuir para os processos corrosivos em barras de aço, principalmente próximo ao paramento, que pode ser identificada a partir de manchas avermelhadas de ferrugem.

De acordo com o Manual de Monitoração de Rodovias sob Concessão da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2008), a conservação e manutenção de estruturas de contenção devem ser realizadas em três etapas: inspeções de rotina, estudos de engenharia e análise de dados de monitoramento. No entanto, no país existem muitas obras sem manutenção, principalmente em rodovias sem concessão, e segundo Lima (2007), menos de 10% das obras de solo grampeado do Brasil apresentam algum tipo de instrumentação para monitoramento.

Procedimentos de inspeção visual e manutenção do sistema de drenagem, por exemplo, podem evitar grandes intervenções nas estruturas de contenção. Além disso, é possível identificar aspectos no paramento, como manchas e eflorescências, que podem indicar a presença de água e umidade no maciço (CAETANO *et al.*, 2016). Na maioria dos casos, os sinais de deterioração são de simples reconhecimento e podem evitar acidentes, que sempre implicam danos e custos elevados (PITTA *et al.*, 2006).

Mesmo com a detecção de sinais de deterioração no paramento, não é possível avaliar a condição real do elemento de aço, uma vez que este está enterrado no solo. De acordo com Jayawickrama *et al.* (2007) e Souza *et al.* (2005), a principal falha em solo grampeado são vazios no preenchimento com calda de cimento devido a problemas construtivos e falhas no controle da execução da obra. Esses vazios podem reduzir a capacidade de carga do grampo, o que gera maiores deformações da contenção e mantém a barra de aço exposta e susceptível à corrosão. Por outro lado, as cortinas atirantadas são as estruturas de contenção com maior chance de colapso por corrosão (IRVIN; MOTHERSILLE, 2007). Ortigão *et al.* (1995) afirma ainda que falhas na zona livre, próxima à cabeça do tirante, ocorrem devido a processos corrosivos, principalmente quando a proteção anticorrosiva é inadequada e existe presença de água no maciço.

Para avaliação da integridade de grampos e tirantes podem ser utilizados métodos destrutivos e não destrutivos. Métodos destrutivos consistem nos ensaios de arrancamento dos chumbadores, porém este ensaio é realizado normalmente em elementos executados especificamente para este fim, com o objetivo de obter parâmetros como a força de arrancamento. Os ensaios de qualificação e recebimento são realizados em apenas alguns elementos de maneira representativa, não sendo viável a sua realização em todos os chumbadores da contenção por ser um ensaio destrutivo. Além disso, os ensaios de arrancamento não permitem identificar o comprimento da barra e nem a posição de possíveis falhas no preenchimento e sim, uma redução da capacidade de arrancamento de determinado elemento, quando comparado com os demais.

Outra alternativa para avaliação das ancoragens são os métodos não destrutivos (MND), que permitem avaliar todas os chumbadores de uma contenção, com a aplicação de técnicas elétricas, acústicas, ultrassônicas, magnéticas, reflectométricas, entre outras. Tais metodologias não afetam a capacidade de carga dos elementos, como nos ensaios de arrancamento, além de possibilitarem a sua aplicação tanto após a execução, como ao longo da vida útil das obras. As técnicas também permitem a determinação do

comprimento das barras. Cheung e Lo (2011) salientam que os métodos não destrutivos não substituem uma boa supervisão no momento da execução, porém fornecem garantia adicional de qualidade e evita as más práticas na construção. Em países como Hong Kong, que apresenta relevo acidentado semelhante à Serra do Mar brasileira, as obras de solo grampeado já aplicam estas metodologias desde 2003, com o procedimento do método TDR apresentado nas normas do país (HKSARG 2006, GEO 2017).

Dentre as metodologias utilizadas internacionalmente, o método *Time Domain Reflectometry* (TDR), *Surface Wave Time Domain Reflectometry* (SW-TDR) e o método da resistência elétrica, foram os que apresentaram maior potencial de utilização em estruturas de contenção (LEE; OAP, 2007). Os métodos TDR e SW-TDR tem como princípio a medição do tempo de propagação de sinais elétricos de alta frequência, que indicam descontinuidades e o fim da barra pela reflexão do sinal, devido a mudança na impedância. O que diferencia as metodologias é a presença de um cabo elétrico pré-instalado paralelo a barra no método TDR. O método da resistência elétrica é comparativo e é realizado com a medição da resistência entre a barra e o solo, e todo espaço ao redor.

Os métodos sônicos, como por exemplo o *Sonic Echo*, também vem sendo estudados internacionalmente e nacionalmente para aplicação em solo grampeado (CHEUNG 2003, CHEUNG; LO 2005, JAYAWICKRAMA et al. 2007, ANTT 2020, SILVA 2020). Esta metodologia consiste na geração, propagação e recepção de uma onda sônica no elemento e as reflexões são analisadas através de um gráfico obtido ao longo do tempo. Apesar de serem métodos promissores, as pesquisas não apresentaram bons resultados, e por este motivo, estes métodos não foram objeto do presente estudo.

1.1.OBJETIVOS

O objetivo geral da presente pesquisa foi avaliar as metodologias de análise de integridade em grampos e tirantes, e estabelecer diretrizes para a sua execução e manutenção. Os objetivos específicos são apresentados a seguir:

- Realizar um levantamento bibliográfico das principais falhas em estruturas de contenção e quais métodos não destrutivos são utilizados em âmbito nacional e internacional para avaliar patologias, bem como suas vantagens, limitações e aplicabilidades;
- Realizar ensaios em laboratório para calibrar os ensaios de campo;

- Planejar e executar um campo experimental com a instalação de elementos íntegros e com falhas conhecidas em uma estrutura de estabilização;
- Realizar ensaios com os métodos não destrutivos conhecidos (TDR e resistência elétrica) nos elementos da contenção experimental;
- Analisar os resultados obtidos e calibrar os métodos para aplicação em outras estruturas;
- Realizar ensaios em contenções já existentes.
- Apresentar diretrizes e recomendações para os ensaios.

1.2.JUSTIFICATIVA

O Brasil apresenta um grande número de encostas naturais, principalmente devido à formação da Serra do Mar, do Rio de Janeiro ao norte de Santa Catarina, e a Serra da Mantiqueira, presente nos Estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. Esse tipo de formação geológica é caracterizado pelo terreno acidentado, com altitudes e declividades elevadas. Normalmente os solos encontrados na Serra do Mar são pouco desenvolvidos, de pequena espessura, argilosos e/ou siltosos, muito instáveis e suscetíveis à acelerados processos erosivos e movimentos de massa. Tais eventos são relacionados à alta pluviosidade média anual e episódios prolongados de chuva na região de serra. O quadro é agravado em áreas ocupadas inadequadamente pelo homem e pela perda de proteção do solo devido a degradação da vegetação (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998). Além disso, a costa leste do Brasil apresenta grande concentração populacional do país, com ocupação de encostas íngremes, topos de morros e margens de corpos d'água.

No Brasil, todos os anos ocorrem diversos deslizamentos e normalmente relacionados à chuva. Em novembro de 2022 ocorreu um grande deslizamento na rodovia BR-376, no estado do Paraná, associados ao alto volume de precipitação. Devido ao ocorrido, o deslizamento arrastou dez carros e cinco caminhões, além 2 mortes. A rodovia ficou interditada por 10 dias, causando inúmeros transtornos para os usuários. O deslizamento ocorrido é apresentado na Figura 1.1.

Em 2011 também ocorreu deslizamentos e enchentes na região serrana do Rio de Janeiro que deixaram 918 mortos e 100 desaparecidos. As principais cidades atingidas foram Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo, onde mais de 35 mil pessoas perderam suas casas ou tiveram que abandonar por risco de deslizamento (CNN, 2022).

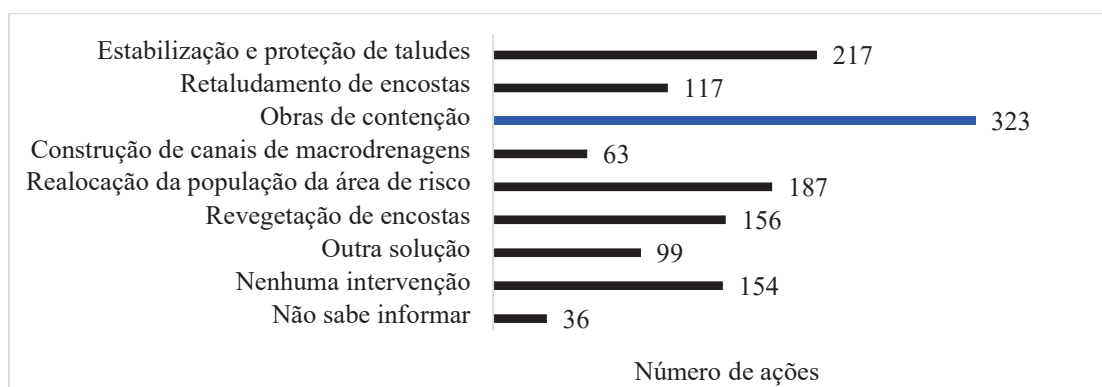
Figura 1.1 – Deslizamento de terra ocorrido na BR-376 em 2022



Fonte: GLOBO (2022)

Nos 5.570 municípios brasileiros, foram contabilizadas 833 ocorrências de escorregamento ou deslizamento de encostas entre os anos de 2013 e 2016. No ano de 2016, essas ocorrências atingiram 573 residências, com 446 pessoas desabrigadas e 65 óbitos. As regiões sudeste e sul apresentaram maior ocorrência, com grande frequência em cidades com mais de 100 mil habitantes, e relacionadas a áreas ou encostas com ocupações irregulares e sem infraestrutura de drenagem (IBGE, 2017). Ao longo dos 4 anos da pesquisa realizada pelo IBGE, dentre as ações realizadas para evitar ou minimizar os danos causados, se destaca em primeiro lugar a execução de obras de contenção, seguido da estabilização e proteção de taludes, como pode ser observado na Figura 1.2.

Figura 1.2 – Ações realizadas para evitar ou minimizar danos causados por deslizamento de terra no Brasil entre os anos de 2013 e 2016



FONTE: Adaptado de IBGE (2017)

O levantamento indica a importância das obras de contenção e estabilização de encostas para evitar ou reduzir os impactos causados por deslizamentos e escorregamentos de solo. A importância aumenta com os números da população exposta em áreas de risco no Brasil em 2010. Em 872 municípios analisados, a população em área de risco atingiu mais de 8,2 milhões de habitantes, distribuídos em aproximadamente 2,5 milhões de domicílios particulares permanentes (IBGE, 2018). Em frente a estes dados, apenas 11,4% dos municípios do Brasil apresentam um Plano Diretor ou Lei de Uso e Ocupação do Solo que contemple a prevenção de escorregamentos, sendo 1,7% dos municípios com Lei específica para a prevenção destes incidentes (IBGE, 2017).

Na construção de rodovias em regiões serranas e de relevo acidentado é necessária a execução de cortes e aterros para “vencer” a topografia, e com isso, é muito comum a execução de obras de contenção. Estruturas como solo grampeado e cortina atirantada, mesmo com suas diferenças construtivas, podem ser executadas de maneira descendente e isso faz com que a escavação seja limitada, exigindo volumes inferiores de escavação. Quando comparadas com métodos de contenção com construção ascendente, como muro de gabião e solo reforçado, o solo grampeado e a cortina atirantada ajudam na redução dos impactos ambientais ao longo do corredor viário devido à menor interferência ao meio ambiente e menor desmatamento da área (LAZARTE *et al.*, 2015).

Para garantir a segurança de uma obra é necessário que os projetistas respeitem as abordagens técnicas e evitem o empirismo subjetivo, de modo a garantir os níveis adequados de segurança. Qualquer obra, independente do seu porte, deve ser projetada observando as normas técnicas competentes para evitar consequências graves em termos econômicos, ambientais e perdas de vidas humanas (DELLAVANZI *et al.*, 2010).

Normalmente acidentes neste tipo de estrutura ocorrem pela soma de diversos fatores como: falhas na execução, ineficiência ou ausência de sistema de drenagem, e processos de corrosão (PITTA *et al.* 2006), além de erros de projeto. Mesmo com poucos registros, acidentes podem ser evitados a partir do correto dimensionamento e execução, e com inspeções e manutenções regulares nas contenções ao longo do tempo. Muitas vezes, uma simples vistoria pode evitar colapsos de estruturas, que geralmente apresentam elevado impacto social, ambiental e econômico. De modo a evitar mais acidentes, a utilização de métodos não destrutivos (MND) é uma alternativa para o monitoramento e avaliação da integridade dessas estruturas, tanto novas quanto existentes.

Os métodos não destrutivos são técnicas simples, normalmente os ensaios são rápidos e os equipamentos estão disponíveis no mercado nacional. Além disso, é possível avaliar todos os elementos da contenção, sem afetar a sua estabilidade, desde a etapa da construção e ao longo de sua vida útil. As metodologias vêm sendo estudadas em âmbito nacional e internacional com objetivo de determinar o comprimento de estruturas enterradas e identificar eventuais falhas (e.g. CHEUNG 2003, CHEUNG; LO 2005, CHEUNG 2006, LEE; OAP, 2007, JAYAWICKRAMA *et al.* 2007, CHEUNG; LO 2011, TANG; CHEUNG 2014, CHUNG *et al.* 2016, LEE; YU 2019; SILVA *et al.* 2021).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão de literatura tem como finalidade apresentar conhecimentos atuais relativos aos temas em questão, como forma de contribuição para o desenvolvimento da pesquisa e do conhecimento. O capítulo descreve os seguintes tópicos: solo grampeado, cortina atirantada e os métodos não destrutivos estudados.

2.1.SOLO GRAMPEADO

O solo grampeado é derivado do sistema de escavação em rocha na indústria de túneis, denominado *New Austrian Tunneling Method* (NATM). Existem registros da aplicação de solo grampeado para suporte de túneis e galerias utilizando o método NATM em 1964, como suporte flexível do entorno da escavação (Clouterre, 1991). No Brasil, a primeira aplicação de solo grampeado foi durante a construção do sistema de abastecimento de água Cantareira em São Paulo (ORTIGÃO *et al.*, 1995). Posteriormente, a aplicação da técnica se estendeu para estabilização de taludes e escavações em solo, apresentando um bom custo-benefício quando comparado com os métodos convencionais, como muros de gravidade (LAZARTE *et al.*, 2015). Além da grande aplicação em rodovias, para estabilização de taludes naturais ou escavações, esse tipo de obra é bastante aplicado como solução de contenção permanente em áreas urbanas (SOUZA *et al.*, 2005).

Um exemplo de obra com solo grampeado da rodovia BR-376 é apresentado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Solo grampeado na BR-376



2.1.1. Descrição da técnica

O solo grampeado é uma técnica de estabilização temporária ou permanente que pode ser empregada em estabilização de taludes naturais ou escavações, e normalmente são executados de maneira descendente e progressiva. A técnica consiste na aplicação de reforços metálicos em perfurações realizadas no solo, normalmente preenchidas com calda de cimento, e combinado com concreto projetado na face. O objetivo é reduzir e estabilizar as deformações de um plano de ruptura com o aumento da resistência ao cisalhamento do solo, para que esta seja maior que as tensões cisalhantes atuantes (GUIDICINI; NIEBLE, 1984).

Segundo Lazarte *et al.* (2015), o solo grampeado é dividido por dois elementos principais: chumbadores e preenchimento. Os chumbadores são elementos semirrígidos que tem a função de reforçar e estabilizar o maciço pela sua resistência à tração que é mobilizada pelo movimento lateral e deformação do solo. O grampo é inserido em uma perfuração que é normalmente preenchida com calda de cimento, que consiste na mistura de cimento *Portland* e água, também denominada de bainha. O grampo é ligado ao paramento por meio de uma placa de apoio e rosca, ou somente dobrado.

A norma de solo grampeado NBR 16.920-2 indica que para o preenchimento da bainha, a relação entre água e cimento deve ser de $a/c=0,5$ e com resistência à compressão mínima de 25 MPa aos 28 dias. Além da bainha, é recomendado a execução de uma reinjeção dos grampos, que consiste na injeção pressurizada após a cura da bainha. Este procedimento tem como objetivo de redução de eventuais vazios no preenchimento devido a exsudação da calda de cimento e aumento do confinamento do maciço ao entorno do grampo. Além disso, a reinjeção pode resultar em maior resistência da interface solo-grampo, com conseqüente maior resistência ao arrancamento dos chumbadores. Para a reinjeção, devem ser considerados tubos plásticos com válvulas setorizadas durante a execução do grampo. Para reinjeção, a calda de cimento deve apresentar relação a/c de 0,7, com resistência à compressão de 15 MPa aos 28 dias (ABNT, 2021).

Foi realizado um comparativo de normas internacionais referente aos parâmetros da calda de cimento, e que são apresentadas na Tabela 2.1. As normas avaliadas foram: a norma brasileira (NBR 16920-2), quatro normas internacionais: dos Estados Unidos (LAZARTE *et al.*, 2015), da União Europeia (EM, 2011), do Reino Unido (BS, 2017) e

de Hong Kong (HKSARG, 2006). Além disso, também foi realizada uma comparação com as recomendações do Projeto Clouterre de 1991, a primeira norma de solo grampeado (CLOUTERRE, 1991).

Tabela 2.1 – Comparação entre normas internacionais relacionado aos parâmetros da calda de cimento

Norma	Relação água/cimento (a/c)	Resistência à compressão	
		Específica	28 DIAS
Brasil: NBR 16920-2 (2021)	0,5 (bainha)	-	25 MPa
	0,7 (reinjeção)	-	15 MPa
EUA: FHWA-NHI-14-007 (2015)	0,40 a 0,50	10,4 MPa (3 dias)	20,7 a 27,6 MPa
União Europeia: EN 14490 (2010)	< 0,55	5 MPa (antes da carga)	25 MPa
Reino Unido: BS 8006-2 (2017)	0,40 a 0,45	5 MPa (antes da carga)	25 MPa
Hong Kong: Geoguide 7 (2017)	< 0,45	-	30 MPa
França: Clouterre (1991)	0,42 a 0,59	5 MPa (1 dia)	20 MPa (gráfico)

Fonte: Adaptado de Mikos *et al.*, 2022

A correta execução do preenchimento com calda de cimento é de extrema importância para garantir a estabilização do maciço. O processo de transferência de esforços ocorre pela interação entre o solo e os chumbadores. Os chumbadores são capazes de resistir aos esforços e deformações no interior do maciço, além de apresentar adequada resistência a degradação. Para proteção contra corrosão de grampos permanentes, com vida útil projetada para mais de dois anos, a norma indica que além do preenchimento da bainha, mais uma medida adicional de proteção deve ser considerada em ambientes agressivos (ABNT, 2021).

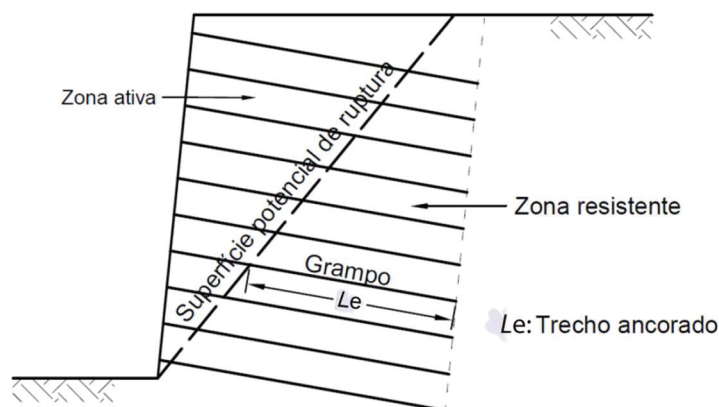
As barras de aço são denominadas inclusões passivas, pois as tensões são mobilizadas ao longo do seu comprimento quando solicitadas. Os grampos resistem à forças de tração, cisalhamento e momentos fletores. Normalmente as barras são instaladas inclinadas entre 5° e 30° com a horizontal, de modo a garantir a estabilidade do solo por associar a zona ativa com a passiva. Segundo ABNT (2021), para a estabilidade interna se considera:

- Arrancamento do grampo devido à um comprimento de ancoragem insuficiente;

- Ruptura estrutural por tração no ponto de atuação da força de tração máxima ($T_{\text{máx}}$);
- Ruptura da conexão grampo/paramento, quando o paramento tem função estrutural.

Um dos métodos de verificação da estabilidade interna divide o maciço em zona ativa e zona resistente, conforme apresentado na Figura 2.2. A estabilidade da zona ativa do solo é obtida pelos chumbadores, que transferem os esforços solicitantes para a zona resistente. O trecho dos grampos na zona resistente funciona como ancoragem do trecho da zona ativa. A máxima sollicitação ($T_{\text{máx}}$) está localizada na superfície potencial de ruptura e esta deve ser inferior a resistência a tração do chumbador e a resistência de arrancamento mobilizada no trecho ancorado.

Figura 2.2 – Distribuição de tensões em solo grampeado



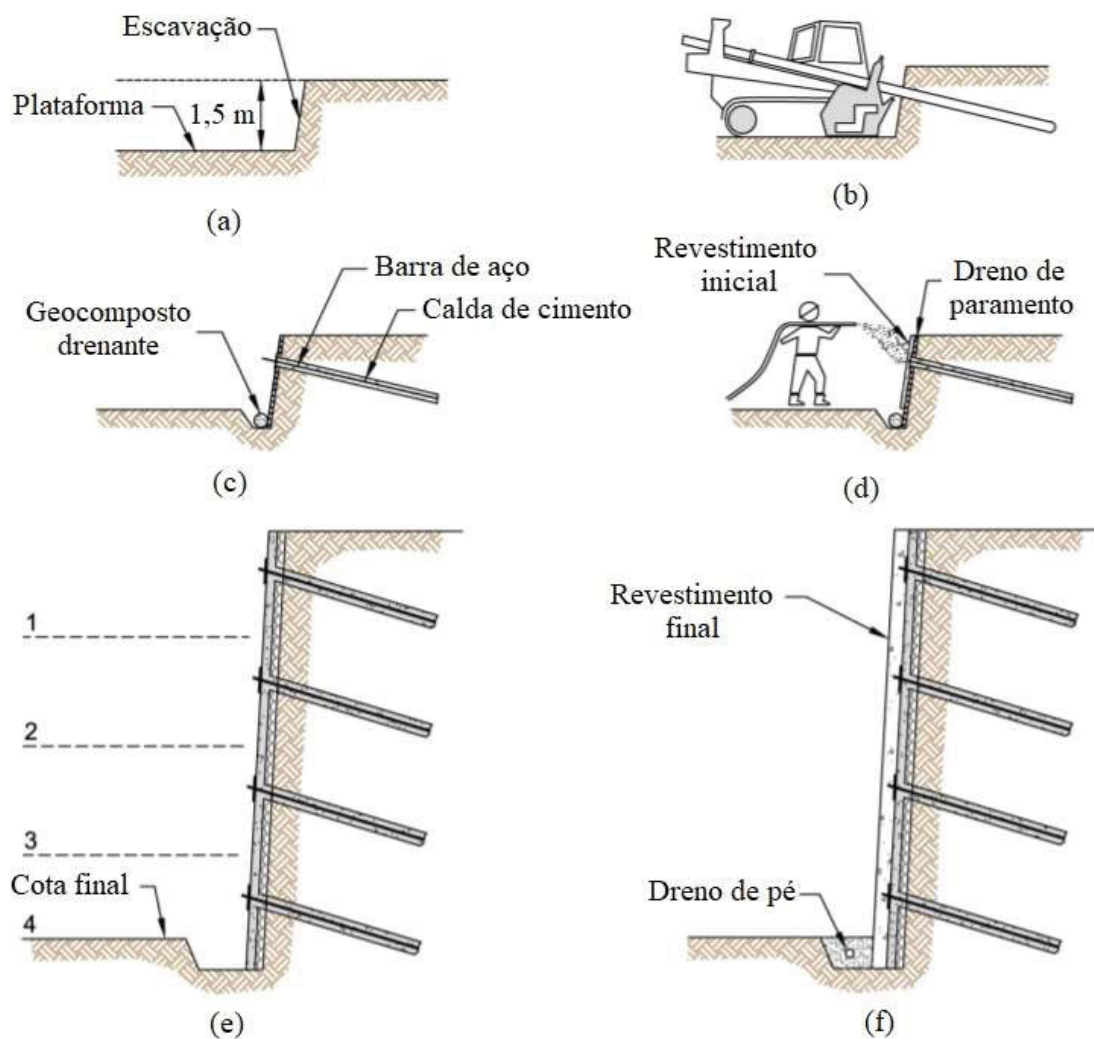
FONTE:ABNT (2021)

A sequência construtiva tradicional do solo grampeado consiste na escavação do terreno, com altura entre 1,0 m e 1,5 m (Figura 2.3a), perfuração do terreno com comprimento indicado em projeto (Figura 2.3b). A máxima profundidade de escavação vai depender do tipo de solo e da inclinação do talude. Ortigão *et al.* (1995) afirma que esse tipo de estrutura é adequado tanto em solos residuais como em solos sedimentares, porém com algumas exceções como: areia fofa não cimentada e argilas moles, que não permitem um talude de escavação e uma perfuração estável. Desse modo, a barra de aço é inserida na perfuração e a calda de cimento é injetada ao redor da barra por todo o comprimento do furo (Figura 2.3c), podendo ser realizada mais de uma fase de injeção. O grampo não é necessariamente protendido e o revestimento da face e a drenagem são instalados após a injeção dos elementos (Figura 2.3d).

O mesmo processo executivo é repetido para todas as linhas de grampos da obra (Figura 2.3e) e finalizados com a drenagem de pé e o revestimento final (Figura 2.3f). O

paramento é executado normalmente com concreto projetado, telas metálicas flexíveis ou em talude natural com hidrossemeadura (ORTIGÃO *et al.*, 1995). Para solo grampeado mais íngreme pode ser necessário o dimensionamento do paramento, de modo a verificar as cargas que chegam no paramento.

Figura 2.3 – Processo executivo do solo grampeado



FONTE: Adaptado de Lazarte *et al.* (2015)

Também é necessário a previsão de um sistema de drenagem eficiente em obras de contenção, pois o custo é muito inferior quando comparado com o aumento da segurança na obra (GUIMARÃES NETO, 2008; BASTOS, 2014; SOLOTRAT, 2015). Para garantir a segurança da obra, a drenagem deve coletar a água superficial, do paramento e em profundidade. A presença de água no maciço e a elevação do nível d'água podem reduzir a resistência de cisalhamento do solo pelo aumento da poropressão e redução da tensão efetiva, além do acréscimo de empuxo gerado no paramento.

A drenagem superficial coleta a água presente na crista e no pé do talude, bem como a água proveniente dos drenos de paramento e profundos. Normalmente são utilizadas escadas hidráulicas e canaletas até o ponto de captação e descarga. A drenagem do paramento capta o fluxo de água que chega na face da contenção pelo maciço, e podem ser utilizados drenos de areia ou geossintéticos na face interna e drenos curtos do tipo barbacã. A drenagem profunda pode ser realizada por drenos sub-horizontais profundos (DHP), que captam fluxos de água distantes, realizam o rebaixamento do lençol freático e evita a surgência de água pela face.

De acordo com Ortigão *et al.* (1995), o solo grampeado apresenta vantagens como: economia, construção rápida, inclinação da face e flexibilidade do projeto. Além disso, requer equipamentos menores quando comparados à execução de cortina atirantada, a estrutura suporta pequenas deformações e a instalação é relativamente rápida (LAZARTE *et al.*, 2015).

Por outro lado, a estrutura com solo grampeado normalmente não pode ser construída na vertical, pois o projeto se torna mais difícil e dispendioso. Além disso, o maciço com a presença de determinados tipos de solo pode tornar a estrutura inviável, como solos expansivos, orgânicos, não coesivos e mal graduados, com grande quantidade de pedras e pedregulhos ou granulares com alto nível do lençol freático. Além disso, solo reforçado com grampos mobilizam forças do solo, o que pode gerar deformações, e que em alguns casos pode ser inaceitável.

2.1.2. Manifestações patológicas

Em estruturas de solo grampeado, Jayawickrama *et al.* (2007) afirma que os principais problemas são decorrentes de falhas executivas com o preenchimento incompleto do furo com a calda de cimento. As principais falhas são: vazios no final da barra, redução da seção transversal do preenchimento e falhas próximas à cabeça da barra.

As principais falhas que ocorrem em solo grampeado podem ser observadas na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Falhas construtivas em estruturas de solo grampeado



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

LEGENDA: (a) Problemas executivos em elementos de drenagem; (b) Arrancamento devido a preenchimento incompleto do furo; (c) Falta de centralização do chumbador; (d) Calda de cimento com consistência muito rígida; (e) Calda de cimento com consistência muito fluida; (f) Comprimento da perfuração inferior ao comprimento do chumbador (JAYAWICKRAMA *et al.*, 2007)

Falhas na injeção da calda de cimento podem causar maiores deformações da contenção, reduzir a capacidade de carga do chumbador e deixar a barra exposta e suscetível à corrosão. Os principais agentes condicionantes de falhas em estruturas de contenção estão normalmente associados a problemas construtivos decorrentes da instalação das ancoragens ou execução de testes de qualidade, como: preenchimento ineficiente dos furos com calda de cimento e execução de perfurações menores que o comprimento das ancoragens. As falhas no preenchimento são causadas normalmente pela falta de centralizadores, ausência de tubo guia e/ou consistência da calda muito rígida ou muito fluída (JAYAWICKRAMA *et al.*, 2007).

Além disso, quando é realizada somente a bainha, ou seja, preenchimento do furo com calda de cimento, o grampo pode ter sua função prejudicada. A exsudação da calda de cimento provoca vazios ao longo de todo o furo, e não reconstitui por completo o desconfinamento gerado pelo furo. Falhas encontradas em grampos executados somente com bainha podem ser observadas na Figura 2.5. A reinjeção, com uma ou duas fases, pode aumentar em mais de 50% a resistência ao arrancamento do grampo. A injeção de primeira e segunda fase preenchem eventuais vazios que ocorrem pela exsudação da calda de cimento, contribuindo para o tratamento ao redor do grampo e melhorando as características do maciço (SOUZA *et al.*, 2005). Atualmente, a norma ABNT de solo grampeado também recomenda a execução de reinjeção após a cura da bainha, de modo a reduzir os vazios formados ao longo dos chumbadores (ABNT, 2021).

Figura 2.5 – Grampo executado somente com bainha



FONTE: Souza *et al.* (2005)

Em obras antigas não eram aplicados procedimentos com padrões de qualidade atuais, e muitas vezes não era utilizada nenhuma proteção anticorrosiva (WITHIAM *et al.*, 2001). Falhas no preenchimento ao longo do furo podem deixar a barra suscetível à

corrosão. Assim, a proteção anticorrosiva é importante para que as barras de aço sejam capazes de resistir a corrosão e apresentem um bom desempenho ao longo da vida útil da estrutura (SHIU; CHEUNG, 2003).

Além disso, Souza *et al.* (2005) afirmam que em inspeções e manutenções, além de avaliar detalhes executivos do chumbador, também deve-se avaliar o estado de conservação do revestimento do paramento e o sistema de drenagem, que pode contribuir para redução da estabilidade da contenção.

2.1.2.1. Acidentes em solo grampeado

Souza *et al.* (2005) apresentam um acidente ocorrido na Rodovia Raposo Tavares em Cotia (SP), no ano de 2005, em um trecho de trânsito elevado. A causa não foi divulgada. Nessa ocasião não houve vítimas e nenhum veículo foi prejudicado, mas o trânsito foi bloqueado por algumas horas. No entanto, observa-se a passagem de veículos bem próxima ao local do acidente, e uma rua na parte superior da contenção, como apresentado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Falha em solo grampeado na rodovia raposo Tavares-SP



FONTE: Souza *et al.* (2005)

Contenções de solo grampeado também vem sendo amplamente utilizadas em centros urbanos (SOUZA *et al.*, 2005). Em 2011 ocorreu o colapso de um solo grampeado em São Paulo ao lado de um Pronto Socorro. A obra foi projetada em um solo mole com grampos de comprimentos insuficientes (SOLONET, 2011). O solo grampeado que entrou em colapso é apresentado na Figura 2.7

Figura 2.7 – Colapso de solo grampeado em área urbana



FONTE: Solonet (2011)

Jayawickrama *et al.* (2007) também apresentam uma ruptura de solo grampeado que ocorreu nos EUA devido a falhas de drenagem e preenchimento incompleto do furo com a calda de cimento. A ruptura é apresentada na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Falha em solo grampeado nos EUA



FONTE: Jayawickrama *et al.* (2007)

2.2.CORTINA ATIRANTADA

Cortinas atirantadas são estruturas utilizadas no Brasil desde 1957, com grande influência do engenheiro Antônio da Costa Nunes, que pesquisou e desenvolveu a técnica de ancoragem no solo, no Estado do Rio de Janeiro (YASSUDA; DIAS, 1998). A maior disseminação da técnica ocorreu no início da década de 1970, muitas vezes substituindo os tradicionais muros de arrimos de gravidade e flexão (ORTIGÃO *et al.*, 1995). A primeira norma brasileira foi a NB-565/75 – Estruturas Ancoradas no Terreno – Ancoragens Injetadas no Terreno – Procedimento, publicada em 1975, e a norma recentemente atualizada e em vigor é a NBR 5629 – Tirantes ancorados no terreno — Projeto e execução (ABNT, 2018). Uma cortina atirantada utilizada para contenção de um talude rodoviário é apresentado na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Cortina atirantada em construção na BR-116



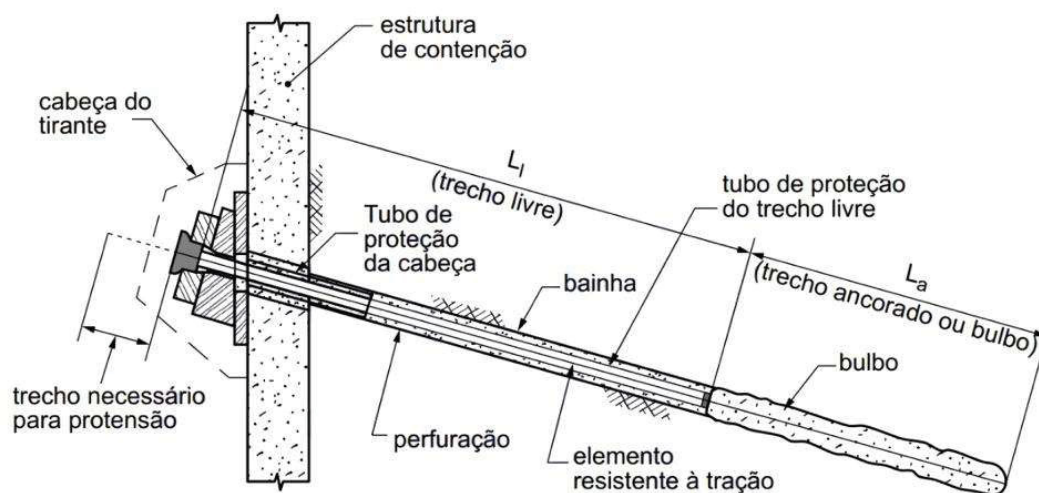
2.2.1. Descrição da técnica

Os tirantes consistem em elementos resistentes à tração, introduzidos no terreno em uma perfuração e preenchidos com material aglutinante, a fim de formar um bulbo de ancoragem. O trecho ancorado é ligado à estrutura através da barra e da cabeça do tirante e deve transmitir as forças para o terreno (ABNT, 2018). A estrutura da parede é composta por concreto armado, projetada para suportar as cargas dos tirantes e por isso apresenta espessura entre 20 e 30 cm (ORTIGÃO *et al.*, 1995). O tirante pode ser provisório, com utilização inferior a dois anos, ou permanente, com tempo superior.

O tirante pode ser dividido em três partes principais: cabeça, trecho ancorado e trecho livre. A cabeça do tirante está localizada na parte externa da cortina, sem contato com o solo, e transfere a carga do tirante para a estrutura e é constituído da placa de apoio, cunha de grau e porca ou clavete (ABNT, 2018). A placa de apoio é responsável por distribuir a carga do tirante e é constituído por chapas metálicas. A cunha de grau é formada por cilindro ou chapas paralelas de aço com função de manter o tirante alinhado. Os blocos de ancoragem são os elementos que mantem o tirante preso e tracionado por meio de porca ou clavetes para tirantes de monobarra e de cordoalha, respectivamente.

As principais partes do tirante podem ser observadas na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Principais elementos dos tirantes

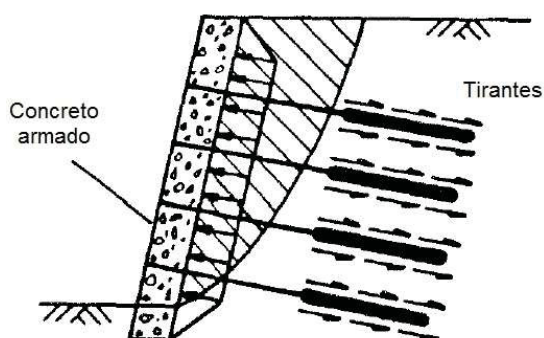


FONTE: ABNT (2018)

Os tirantes têm como objetivo aumentar a resistência ao cisalhamento do solo com o aumento da tensão normal atuante ao longo da linha de ruptura e introdução de força ativa, e podem ser executados com monobarra, cordoalhas ou fios. Os tirantes monobarra consistem em somente uma barra de maior diâmetro compostos por uma ou mais barras unidas por emendas metálicas. Os tirantes de cordoalha normalmente são compostos de várias cordoalhas de menor diâmetro, e são contínuas, ou seja, sem necessidade de emenda. Cabe salientar que os tirantes de fio estão em desuso. O comprimento dos elementos deve ser suficiente para que o trecho ancorado esteja além da superfície de deslizamento, a fim de fornecer um fator de segurança superior à 1,5, sem considerar as forças de protensão introduzidas no maciço.

O trecho ancorado é encarregado de transmitir os esforços de tração do tirante para o solo, envolvendo-o com material aglutinante composto de calda de cimento ou argamassa. Entre esse trecho e a cabeça está situado o trecho livre, sem contato com a calda de injeção. A transmissão de esforços ocorre entre bulbo para o solo, e a distribuição de cargas consiste na reação que os tirantes exercem no paramento de concreto armado, que têm uma importante função estrutural. A distribuição de tensões em cortinas atirantadas é apresentada na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Distribuição de tensões em cortinas atirantadas



FONTE: Adaptado de Ortigão *et al.* (1995)

O dimensionamento da cortina atirantada considera a deformação admissível da estrutura, quantidade de níveis de tirantes e sequência executiva. A construção de cortinas atirantadas pode ser realizada de maneira progressiva e descendente ou ascendente, conforme o avanço das escavações ou execução de aterro (MASSAD, 2010). Após a execução do paramento, ou vigas guias, é realizada a perfuração do solo, instalação do tirante com preenchimento com calda de cimento, e então a protensão do tirante.

O sistema de drenagem das obras de contenção é de grande importância pois, quando mal executado ou ausente, pode gerar um aumento de carga suportada pela contenção, que normalmente não é considerada no seu dimensionamento, e que pode provocar instabilidade do maciço. Em cortinas atirantadas, é executada drenagem superficial com canaletas, dreno de paramento com barbacãs, dreno de areia na face, e dreno sub-horizontal profundo (DHP), se houver interceptação do nível do lençol freático. Como a presença de água no maciço é a principal condicionante de corrosão, é essencial a utilização e conservação desses sistemas, e deve ser avaliado caso a caso.

Segundo Jayawickrama *et al.* (2007), maciços com estratigrafia composta por solos naturalmente coesivos e/ou cimentados, formados por areias densas e pedregulhos

com certa coesão ou ainda por rochas alteradas são favoráveis a instalação de cortinas atirantadas. Em contrapartida, a presença de nível d'água, solos expansivos, ou a concentração de obras e estruturas atrás do muro representam limitações ao uso dessa técnica. Os solos orgânicos moles e aterros com N_{SPT} inferior à 4 no trecho de ancoragem também podem ser um limitante para a execução dos tirantes (ABNT, 2018). Massad (2010) atenta que os custos deste tipo de contenção são elevados e a execução demanda tempo e mão-de-obra e equipamentos especializados.

2.2.2. Manifestações patológicas

As falhas e manifestações patológicas que ocorrem em estruturas com tirantes são diretamente relacionadas ao método construtivo adotado. Santos (2014) afirma que normalmente ocorrem devido à interação do aço e do concreto com agentes externos. De acordo com Ortigão *et al.* (1995), a experiência nacional indica que a corrosão é a responsável por diversas falhas em cortina atirantadas devido a inadequada proteção anticorrosiva das barras, principalmente próximo à cabeça. Shiu e Cheung (2003) explicam que a água presente nos poros do solo é a solução condutora (eletrólito) que pode atuar como meio de transporte de agentes químicos agressivos, tais como sulfatos e cloretos e, com isso, iniciar o processo de corrosão nas barras de aço.

Withiam *et al.* (2001) também afirmam que outros fatores além da corrosão podem afetar a vida útil dos elementos tensionados, como: perda de tensão devido à fluência ou perda de aderência no trecho ancorado, cargas não consideradas no projeto como flexão, cargas cíclicas, cargas de gelo ou pressões hidrostáticas, além de falhas na ancoragem. O tipo de aço e a carga de protensão são relevantes para o tipo de corrosão que pode ocorrer e para previsão da vida útil dos elementos.

A maioria dos problemas de corrosão tendem a ocorrer em locais com solos agressivos e com a presença de água, e normalmente ocorrem perto da cabeça do elemento ou no comprimento livre do tirante, devido a maior presença de ar. Desse modo, a performance dos tirantes depende também do projeto e da aplicação de proteção anticorrosiva. A Figura 2.12 apresenta saída de água com ferrugem pelo elemento, indicando processos corrosivos nos tirantes de cordoalha.

Figura 2.12 – Saída de água pela cabeça do tirante



FONTE: Neves (2018)

Segundo Irvin e Mothersille (2007), cortinas atirantadas são as estruturas de contenção com maior chance de colapso por corrosão. Os autores ainda afirmam que as consequências da corrosão em tirantes são preocupantes, já que a falha de um elemento pode causar sobrecarga nos tirantes adjacentes, podendo resultar no colapso da estrutura. Além da redução do fator de segurança dos taludes que podem gerar danos estruturais, a ruptura de cortinas atirantadas também pode ocasionar danos às estruturas adjacentes, como rodovias, comprometendo a segurança dos usuários. Como não existe acesso às partes enterradas da contenção, é de extrema importância atentar-se aos indícios externos de manifestações patológicas, como corrosão na cabeça do tirante (Figura 2.13), capacete de concreto trincado, e manchas de umidade na parede (SOLOTRAT, 2015).

Figura 2.13 – Corrosão da cabeça do tirante



FONTE: Solotrat (2015)

A corrosão ocorre na superfície do aço em regiões com diferença de potencial, normalmente na zona livre e próximo à cabeça, onde há maior presença de oxigênio, com a formação de um composto pouco resistente e muito expansivo. A dissolução ou deterioração dos metais ocorre pela reação química ou eletroquímica com o solo ao redor (WITHIM *et al.* 2001). As cortinas atirantadas são executadas com aço protendido e isso pode aumentar a ocorrência de corrosão. Correia *et al.* (2014) explica que a corrosão sob tensão é resultado da utilização de um material suscetível a corrosão, submetido à esforços de tração em um ambiente agressivo. Além disso, nos tirantes de cordoalhas ou fios a corrosão é mais acentuada devido ao pequeno diâmetro do aço quando comparado com tirantes de monobarra. (VERÍSSIMO; CÉSAR JÚNIOR, 1998).

Pitta *et al.* (2006) e Peccin (2014) realizaram vistorias em obras com mais de 30 anos de execução em São Paulo e no Rio Grande do Sul, respectivamente, e verificaram que grande parte dos tirantes estavam soltos ou rompidos devido à processos avançados de corrosão. Os autores concluíram ainda que este tipo de patologia ocorre por deficiência na proteção anticorrosiva durante o processo executivo e falta de proteção na cabeça dos tirantes.

A primeira norma brasileira desenvolvida para este tipo de estruturas de contenção foi a NBR-5629 (ABNT/NB 565), publicada inicialmente em 1975 e atualizada em 2018. Apesar disso, Pitta *et al.* (2006) afirmam que grande parte das estruturas existentes foram construídas apenas com base em procedimentos internos de empresas, os quais nem

sempre refletiam indicações da norma e padrões de qualidade aptos a evitar problemas ao longo da vida útil das obras.

A norma brasileira de tirantes, mais rigorosa na sua última revisão, normatiza a aplicação de proteção anticorrosivas de acordo com a vida útil de projeto e com a agressividade do maciço. São considerados tirantes provisórios e permanentes aqueles que apresentam uma vida útil menor ou maior que dois anos, respectivamente. A norma considera como meio agressivo os solos com pH menor que 6. Em tirantes permanentes, em meios não agressivos, deve-se utilizar calda de cimento como sistema de proteção em todos os elementos somado de mais uma barreira no trecho ancorado, mais duas barreiras no trecho livre e tubo protetor na cabeça. Em meio agressivos, deve-se adicionar, além das mencionadas anteriormente, mais uma proteção anticorrosiva no trecho livre e na cabeça (ABNT, 2018).

As barreiras anticorrosivas podem ser aplicadas com calda de cimento, tubo de polietileno, tubo metálico ou corrugado, galvanização à fogo, pintura específica ou graxa grafitada (ABNT, 2018). Essa proteção tem como objetivo proteger o tirante contra a corrosão e garantir que a segurança da obra não seja comprometida durante a vida útil para qual o elemento foi projetado. Roedel *et al.* (2016) afirma que em obras existentes, não é possível a aplicação de proteção anticorrosiva. No entanto, por meio de inspeções, deve se garantir que o tirante não esteja com a cabeça exposta e que não exista acúmulo de água no maciço. Todas as medidas contra a corrosão devem ser tomadas a fim de evitar acidentes que podem gerar impactos ambientais, sociais e econômicos.

Machado e Mendes (2014) e Peccin (2014) também identificaram manifestações patológicas diversas em obras antigas, principalmente na parede de concreto, onde é possível observar fissuras e trincas, lascas, eflorescências, líquens, exposição das cabeças e das placas dos tirantes e surgência de água em diversas regiões. Esse cenário salienta a importância da manutenção e conservação da integridade do paramento devido à sua função estrutural, além de um sistema de drenagem eficiente.

2.2.2.1. *Acidentes em cortinas atirantadas*

Em 2013, ocorreu no Rio Grande do Sul a ruptura de uma cortina atirantada na rodovia ERS-115 que causou danos à rodovia, com presença de rachaduras e afundamento no pavimento (Figura 2.14a). O acidente acarretou na interdição da estrada por aproximadamente um mês para sua recuperação, o que gerou elevados danos sociais,

ambientais e econômicos (MPRS, 2013). Outra estrutura semelhante de cortina atirantada nesta mesma rodovia foi analisada por Peccin (2014), construída no final da década de 1980 com 13 m de altura. Após inspeções técnicas em 2013, foi constatado que 25% dos tirantes se encontravam soltos ou rompidos devido a processos avançados de corrosão. Havia ameaça de colapso iminente, com possíveis danos à rodovia acima da contenção, por isso foi necessário a construção de uma estrutura de reforço para suportar os esforços e garantir a segurança dos usuários da rodovia.

No município de Cambuí (MG), ocorreu um acidente em uma cortina atirantada de 15 m de altura, sem vítimas, porém com danos materiais, uma vez que a rua e parte de uma praça foram destruídos (Figura 2.14b). Além disso, três edificações vizinhas foram interditadas devido à presença de rachaduras. Segundo laudos, o colapso foi ocasionado pela falha na execução dos tirantes, que apresentavam trechos ancorados muito curtos. Também houve um vazamento da rede de abastecimento de água próximo a parede, o que pode ter gerado uma sobrecarga no muro e contribuído para a ruptura (COSTA, 2019).

Figura 2.14 – Acidentes em cortinas atirantadas em estradas



LEGENDA: a) ERS-115 (MPRS, 2013); b) Cambuí – MG (Costa, 2019)

Outra falha em tirantes foi avaliada por Pitta *et al.* (2006) em uma cortina atirantada ao lado da estrada de ferro Santos-Jundiaí, no município de Santo André (SP). Após um dos painéis se movimentar, foi possível observar falhas e ruptura de tirantes devido à corrosão do aço junto à cabeça e insuficiência de drenagem interna. O tráfego ferroviário foi paralisado para realização de uma obra de reforço (Figura 2.15a).

Em Quatis (RJ), ocorreu no início do ano de 2017, a ruptura de uma cortina atirantada de 40 anos construída ao lado de uma ferrovia (Figura 2.15b). Os tirantes rompidos apresentaram redução de seção das barras de aço devido ao elevado grau de

corrosão e além disso, os drenos da contenção estavam entupidos por falta de manutenção, a soma de todos esses fatores facilitou a ruptura (NOSSA ENGENHARIA, 2017).

Figura 2.15 – Ruptura de cortinas atirantadas em ferrovias



LEGENDA: a) Santos-Jundiaí (Pitta *et al.*, 2006); b) Quatis – RJ (Nossa Engenharia, 2017)

Colapsos de cortina atirantada também ocorrem em centros urbanos, pois a necessidade de escavações cada vez mais profundas se faz presente, onde muitas vezes não são executadas de forma segura e nem projetadas adequadamente, resultando em acidentes. Essas obras apresentam grandes desafios de segurança e execução, uma vez que é necessário a previsão e remediação de possíveis efeitos sobre as construções vizinhas (MILITITSKY, 2016). Em 2013, ocorreu o colapso de uma cortina atirantada de 20 m em Belo Horizonte (MG), entre dois prédios residenciais (Figura 2.16). A defesa civil interditou os dois edifícios, pois a parede estava em iminência de ruptura. Não houve vítimas e as causas não foram divulgadas (ABMS, 2013).

Figura 2.16 – Ruptura de cortina atirantada em Belo Horizonte – MG



LEGENDA: a) Vista lateral da cortina rompida; b) Vista superior do acidente (ABMS, 2013)

2.3.MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS

Hola e Schabowicz (2010) classificam métodos não destrutivos (MND) como técnicas que não “destroem” a estrutura. Tais métodos podem ser aplicados em diversos elementos, durante a execução da obra, ou ao longo de sua vida útil, como procedimento de controle de qualidade e manutenção. As técnicas não invasivas assumem papel importante em estruturas de contenção, pois podem fundamentar decisões referentes a manutenção e intervenção de obras. A avaliação de estruturas de solo grampeado e cortina atirantada é limitada ao campo visual, o que não permite identificar falhas internas, tanto nas barras como no preenchimento com a calda de cimento.

Algumas técnicas não destrutivas são empregadas para monitorar a condição de outros elementos metálicos como tubos enterrados, reforços de concreto e aços protendidos. Estes métodos permitem prover informações sobre as condições de uma barra de aço ao longo de seu comprimento, e essa experiência permitiu o estudo em estruturas enterradas como grampos e tirantes (WITHIAM *et al.*, 2001).

De acordo com Cheung e Lo (2011), em Hong Kong no ano de 2001, se deu início ao estudo para identificação e desenvolvimento de métodos não destrutivos para avaliação da qualidade de estruturas com solo grampeado. Uma vez que no país são instalados em média 50.000 grampos por ano, os MNDs são uma medida preventiva para garantir a estabilidade das contenções. Diversos métodos foram estudados, principalmente em Hong Kong, incluindo *Sonic Echo*, *Mise-A-La-Masse*, *Eletromagnetic*

Induction, Electrical Resistance Methods, Magnetometry, Surface Wave Time Domain Reflectometry (SW-TDR) e Time Domain Reflectometry (TDR). Os principais trabalhos estudados por diferentes autores estão apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Resumo dos trabalhos estudados

MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS	Cheung (2003)	Cheung e Lo (2005)	Lee e OAP (2007)	Jayawickrama <i>et al.</i> (2007)
Cross-hole seismic				X
Cross-hole sonic logging		X		X
Electrical resistance method		X	X	
Electromagnetic induction method	X		X	
Granit method		X		
Impact echo				X
Impedance logging				X
Impulse response				X
Magnetometry	X			
Mise-a-la-masse method	X		X	
Parallel seismic				X
Sonic echo	X	X		X
Sonic impulse method			X	
Spectral analysis of surface waves				X
Surface wave time domain reflectometry		X	X	
Time domain reflectometry	X		X	X
Ultraseismic				X
Ultrasonics				X
Vector magnetic method			X	

FONTE: Mikos (2017)

A utilização dessas técnicas é uma prática que vem sendo estudada principalmente em âmbito internacional (e.g. CHEUNG 2003, CHEUNG; LO 2005, CHEUNG 2006, LEE; OAP, 2007, JAYAWICKRAMA *ET AL.* 2007, CHEUNG; LO 2011, TANG; CHEUNG 2014), devido à sua simplicidade e facilidade de execução, além de não comprometer as funções estruturais das contenções. No entanto, poucos registros de aplicação dos MNDs são encontrados com essa finalidade no cenário nacional.

Dentre todos os métodos estudados foram selecionados três que apresentaram maior potencial de aplicação em estruturas de solo grampeado e cortina atirantada. São eles: *Time Domain Reflectometry (TDR)*, *Surface Wave Time Domain Reflectometry (SW-TDR)* e o Método da Resistência Elétrica.

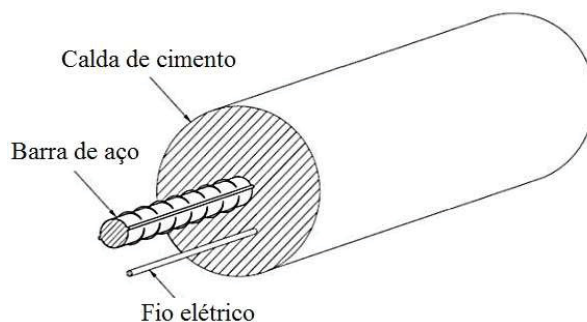
2.3.1. Time Domain Reflectometry (TDR)

De acordo com O'connor e Dowding (1988), a tecnologia *Time Domain Reflectometry* (TDR) foi desenvolvida durante a década de 1950 na indústria de energia e telecomunicações, para localização e detecção de falhas em cabos enterrados e linhas de transmissão. Na época, o TDR era considerado um equipamento padrão pelos engenheiros e técnicos na maioria das empresas do ramo. TDR é uma forma inicial de radar, que consiste em um rádio transmissor que emite um pulso curto de energia eletromagnética, e um receptor que capta os ecos que retornam por um objeto distante, como um avião ou um navio. Com a medição do pulso transmitido e com a velocidade no meio propagante, a distância até o objeto identificado pode ser calculada. Uma análise detalhada do eco também permite revelar detalhes adicionais do objeto refletido. O mesmo princípio para radares é aplicado no TDR.

Na década de 1970, existem registros da aplicação do TDR em geomateriais, sendo constantemente aprimorados por engenheiros agrônomos, geotécnicos, elétricos, geólogos, contribuindo para grande desenvolvimento da técnica em diversas áreas (O'CONNOR; DOWDING, 1988). Withiam *et al.* (2001) também apresenta o estudo do TDR com aplicação em cortina atirantada e solo grampeado, uma vez que as técnicas também são utilizadas em outros elementos enterrados e estruturas protendidas. Segundo Tang e Cheng (2014), o TDR é aplicado para determinação do comprimento de grampos, e os estudos de diferentes metodologias tiveram início em 2001, em Hong Kong.

De acordo com Cheung (2003), para aplicação do TDR, a configuração do grampo deve ser análoga à um cabo de transmissão elétrica (dois condutores) e para isso é necessário que a barra tenha um fio elétrico pré-instalado (Figura 2.17). A utilização do fio elétrico tem objetivo de criar um retorno de corrente por um caminho conhecido, melhorando a precisão da técnica. O fio elétrico deve ser instalado paralelamente à barra junto com o preenchimento da calda de cimento. Além disso, o autor sugere que em uma mesma contenção sejam instalados fios com a mesma impedância e diâmetro nos elementos para melhor comparação dos resultados.

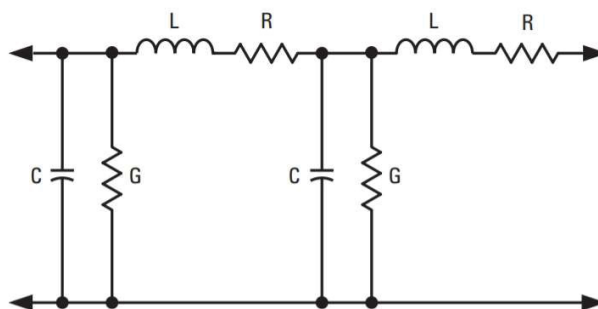
Figura 2.17 – Método TDR com fio elétrico



FONTE: Adaptado de Cheung e Lo (2011)

Na realização do ensaio, através de um equipamento TDR, é enviado um impulso elétrico entre o grampo e um fio elétrico. Descontinuidades, variação no material ou o final da barra acarretam em uma reflexão do sinal elétrico. Com as características das reflexões, tempo de percurso e velocidade de propagação, a localização da anomalia e o comprimento da barra podem ser identificados. Para melhor entendimento do princípio, a Figura 2.18 apresenta o modelo equivalente da linha de transmissão.

Figura 2.18 – Modelo equivalente de linha de transmissão

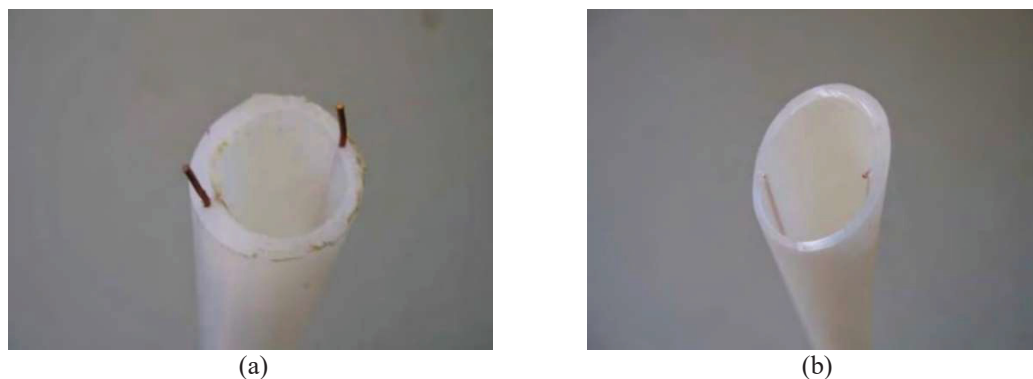


A resistência (R) representa a dissipação de energia que ocorre nos metais condutores. A indutância (L) é a variação da corrente elétrica que flui ao longo dos condutores induzindo um campo magnético. A condutância (G) representa a dissipação de energia no dielétrico que separa os dois condutores. A capacitância (C) representa a capacidade de armazenamento de cargas elétricas no material dielétrico, submetido a um campo elétrico gerado pela diferença de potencial entre os dois condutores, que refletem a capacidade do cabo em armazenar energia elétrica (O'CONNOR & DOWDING, 1988).

Lee e OAP (2007) e Cheung *et al.* (2008) testaram substituir o fio elétrico por um tubo de injeção com fios de cobre metálicos embutidos, para simplificação do procedimento de instalação. Os resultados indicaram uma velocidade de propagação maior quando comparada com os fios elétricos usuais, o que pode reduzir a faixa de erro

na obtenção do comprimento. Os autores testaram dois tipos de tubo, o tipo A com fios de cobre de 1 mm de diâmetro (Figura 2.19a), e o tipo B com fios de cobre com 0,5 mm de diâmetro (Figura 2.19b).

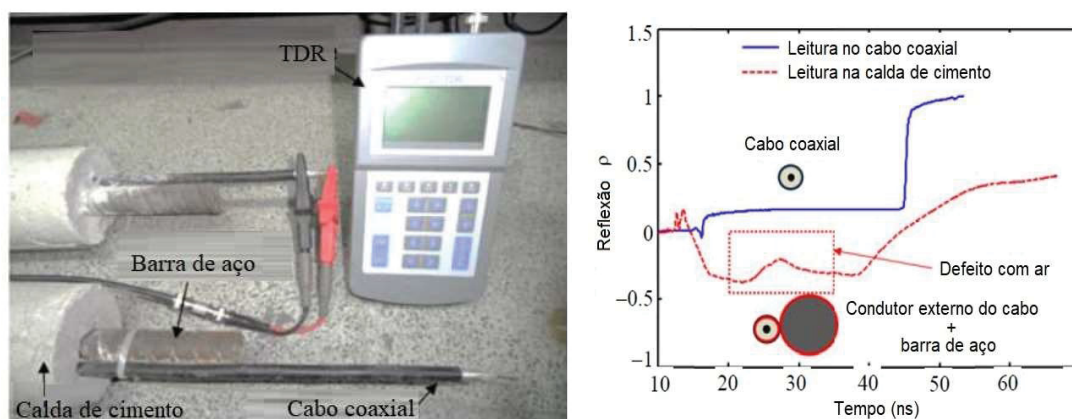
Figura 2.19 – Fios de cobre inseridos em tubo de injeção



LEGENDA: a) Tipo A (1 mm); b) Tipo B (0,5 mm); (Lee e OAP, 2007)

Em estudos mais recentes, Chung *et al.* (2015; 2016) e Ng *et al.* (2019) utilizaram um cabo coaxial no lugar do fio elétrico, paralelo a barra, com o propósito de também determinar o tamanho da barra, além da condição da calda de cimento. É possível realizar o ensaio somente no cabo coaxial, e como a velocidade é fornecida pelo fabricante, a definição do comprimento do cabo (que é igual ao comprimento da barra) é facilitado. Na Figura 2.20 é possível visualizar o ensaio realizado com o cabo coaxial.

Figura 2.20 – Ensaio TDR com cabo coaxial

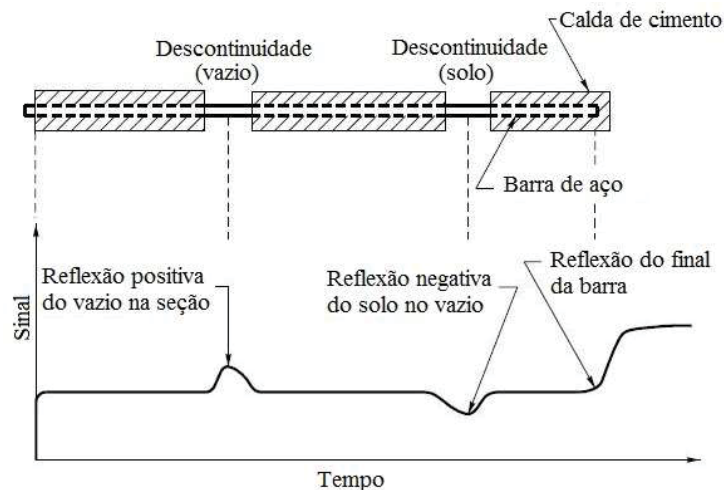


FONTE: Adaptado de Chung *et al.* (2015)

Yu *et al.* (2018) e Lee e Yu. (2019) realizaram ensaios sem o uso de fio elétrico ou cabo coaxial. Os autores testaram em laboratório e em campo a utilização de barras paralelas como meio condutor, de modo que em uma das barras seja o caminho ida, e na outra barra o caminho de retorno de corrente do pulso aplicado.

Em relação aos resultados obtidos com ensaios TDR, um exemplo é apresentado na Figura 2.21, onde é gerado um gráfico ao longo do tempo, em que as reflexões podem indicar eventuais falhas no preenchimento da calda de cimento e o final da barra.

Figura 2.21 – Esquema explicativo dos métodos baseados em reflectometria



FONTE: Adaptado de Cheung e Lo (2005)

Tang e Yeung (2006) explicam que a impedância característica da calda de cimento é menor que a do ar, por isso a reflexão do sinal é positiva devido à maior facilidade da passagem de corrente elétrica neste trecho da barra. No entanto, se o vazio for preenchido com solo, cuja impedância é menor que a do cimento, a reflexão será negativa pela maior dificuldade da passagem da corrente.

De acordo com Cheung (2003), a velocidade de propagação do sinal elétrico não é sensível às características da calda de cimento, mas sim a vazios e anomalias mais significativas que causam variações no sinal de resposta. Por isso, o método pode ser aplicado na determinação do comprimento das barras de aço, onde a mudança de material caracterizada na sua extremidade altera a velocidade do pulso, que pode ser facilmente identificada. Assim, a velocidade de propagação pode ser determinada pela Equação (1).

$$V_p = \frac{V_c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

Onde:

V_p = Velocidade de propagação do pulso elétrico (m/s)

V_c = Velocidade da luz no vácuo (m/s)

ϵ = Constante dielétrica relativa do material (adimensional)

A velocidade da luz no vácuo é em torno de 3×10^8 m/s (299.792.458 m/s) e a constante dielétrica indica a redução de velocidade da onda eletromagnética quando se propaga pelo material. O valor dessa constante é aproximadamente 1 para o ar, de 3 a 5 para o solo, 10 para a calda de cimento e 80 para a água (CHEUNG, 2003). Cabe salientar que esta constante é adimensional, e na natureza não existe materiais com a constante dielétrica inferior a 1. Pela Equação (1), ainda é possível perceber que a velocidade de propagação em materiais com a constante dielétrica menor, aumenta no inverso da raiz quadrada da constante dielétrica.

A velocidade de propagação pode ser calculada quando as constantes dielétricas dos materiais são conhecidas, ou então por meio de uma técnica de calibração. Nesse procedimento, o instrumento TDR deve ser ligado à cabeça da barra e gerar pulsos elétricos para obtenção dos tempos de reflexão registrados, possibilitando o cálculo da média da velocidade de propagação do impulso. A calibração é tradicionalmente utilizada em elementos pré-dispostos na obra para este determinado fim, com comprimento conhecido e de preferência maior que os demais, pois a resolução sobre o tempo de propagação da onda é maior do que para um grampo menor (LEE; OAP, 2007). Cheung e Lo (2011) afirmam que a variação da velocidade para barras de diferentes tamanhos, com as mesmas características, é desprezível, porém para maior precisão o ideal é calibrar em barras maiores.

Com a obtenção da velocidade de propagação é possível determinar a distância da cabeça do grampo até a anomalia, ou o fim da barra, e pode ser definida pela Equação (2). As principais variáveis que influenciam na estimativa do comprimento são o tempo que o pulso leva da cabeça à extremidade e a velocidade de propagação do pulso. Incertezas associadas a qualquer um desses fatores que podem levar a resultados menos precisos (CHEUNG, 2006).

$$L = \frac{V_p \times t}{2} \quad (2)$$

Onde:

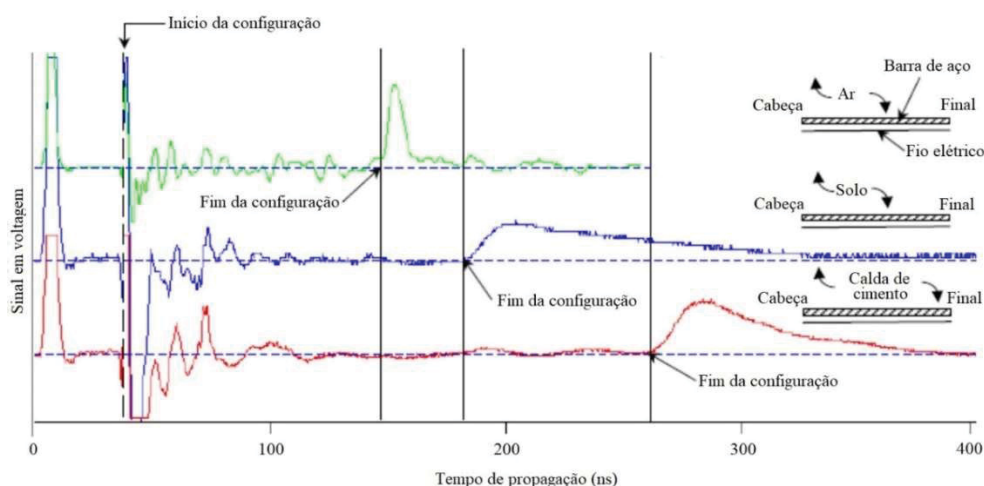
L = Distância da cabeça do ponto até a anomalia ou fim da barra (m)

V_p = Velocidade de propagação do pulso elétrico (m/s)

t = Tempo de propagação do pulso (s)

Tang e Cheng (2014) realizaram testes em grampos de mesmo comprimento envolvidos por ar, solo e calda de cimento, e confirmaram que a velocidade de propagação no ar é maior do que no solo, que é maior que na calda de cimento, e estas diferenças de velocidade que permitem a identificação de anomalias em contenções. O gráfico obtido pelos autores é apresentado na Figura 2.22.

Figura 2.22 – Avaliação da velocidade de propagação em diferentes meios



FONTE: Adaptado e traduzido de Tang e Cheng (2014)

De acordo com Tang e Cheng (2014), além da diferença na velocidade de propagação em diferentes meios, o formato da curva também pode indicar a presença de defeitos significativos na calda de cimento, pois esta está associada a uma mudança de impedância elétrica. Quando existe uma mudança na impedância elétrica do material, é gerada uma reflexão do pulso. A polaridade do pulso refletido, ou seja, positivo (para cima) ou negativo (para baixo) está relacionado com o coeficiente de reflexão. O coeficiente de reflexão é calculado pela Equação (3).

$$\rho = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (3)$$

Onde:

ρ = Coeficiente de reflexão

V_r = Tensão de pico do pulso refletido

V_i = Pico de tensão do pulso incidente

Z = Impedância elétrica no ponto de reflexão

Z_0 = Impedância elétrica característica do par fio-barra de aço

A impedância elétrica característica Z_0 depende do material existente e da geometria do par fio-barra de aço. O coeficiente de reflexão da onda, representado pela letra grega ρ é definido pela relação entre tensão refletida e tensão aplicada, e por isso é adimensional. Quando a linha está com seu final aberto, ou seja, sem contato entre o fio elétrico e a barra, o valor do coeficiente de reflexão ρ é igual à 1. Se no final da barra o fio estiver em contato com a barra ocorre curto-circuito e o valor de ρ é igual à -1, pois a tensão é nula e isso gera outro pulso de amplitude igual e de polaridade invertida. E, se terminar com uma carga igual à sua impedância característica, o ρ é zero.

Chung *et al.* (2016) também propõe uma equação para determinar a quantidade de vazios e falhas com ar presentes em um grampo, como indica a Equação (4). Para aplicação da equação é necessário realizar ensaios de calibração.

$$\frac{T}{2} = \frac{L_C}{V_C} + \frac{L_S - L_C}{V_{AR}} \quad (4)$$

Onde:

T = Tempo total propagação do pulso medido (ns)

L_C = Comprimento efetivo da calda de cimento (m)

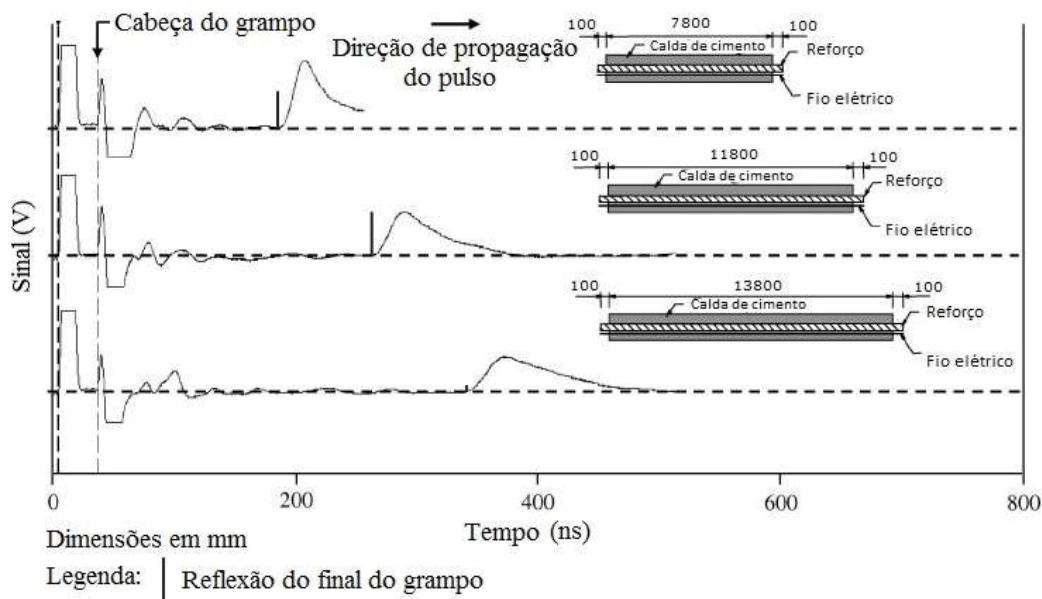
L_S = Comprimento da barra de aço (m)

V_C = Velocidade de propagação na calda de cimento (m/ns)

V_{AR} = Velocidade de propagação no ar (m/ns)

A fim de avaliar se o método é capaz de distinguir barras de comprimentos diferentes, Cheung e Lo (2011), realizaram testes com o método TDR para comparação entre grampos de 8, 12 e 14 metros, totalmente preenchidos com calda de cimento e com um fio pré-instalado. As reflexões positivas retornam da extremidade da barra, indicando o circuito aberto, sem ligação entre a barra e o fio, e o tempo de propagação do pulso é proporcional ao comprimento. Assim, o tamanho do grampo pode ser estimado, com conhecimento da velocidade de propagação do pulso, obtido na calibração, e com o tempo de propagação do ensaio. As ondas de TDR obtidas são apresentadas na Figura 2.23.

Figura 2.23 – Análise da variação do comprimento com o método TDR



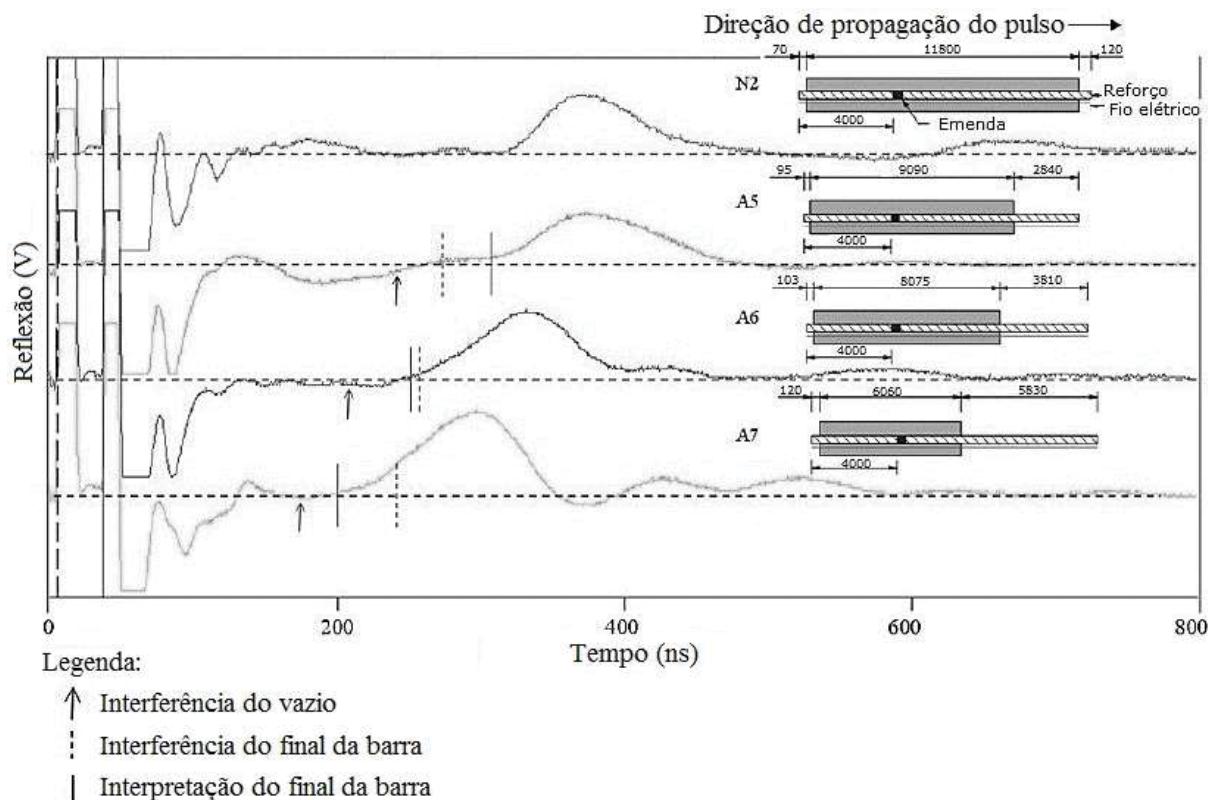
FONTE: Adaptado e traduzido de Cheung e Lo (2011)

Cheung e Lo (2011) analisaram os principais fatores que podem alterar os resultados. Entre eles estão: leitura das reflexões por vários operadores, variação do tipo de fio e incertezas quanto à integridade da calda. No entanto, variáveis como: idade da calda de cimento, presença de emendas e diâmetro dos grampos e do furo, não afetaram significativamente os resultados. De modo geral, os autores alcançaram erros de $\pm 6,6\%$, porém devido aos fatores apresentados anteriormente que podem causar erros adicionais, a margem de erro foi definida como $\pm 9\%$.

Ainda avaliando o comprimento obtido pelo TDR com fio elétrico, Lee e OAP (2007) também obtiveram resultados com uma variação de $\pm 8\%$, na determinação do comprimento, com 95% de confiança.

Na avaliação da integridade dos elementos, diversos autores simularam falhas na calda de cimento, a fim de determinar se o TDR com fio elétrico é capaz de identificá-las. Tang e Cheng (2014) simularam vazios no final de barras com 12 metros de comprimento, correspondentes à 25%, 33% e 50% do comprimento da barra, e comparados com barras intactas, totalmente preenchidas. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 2.24.

Figura 2.24 – Identificação de vazios com o método TDR

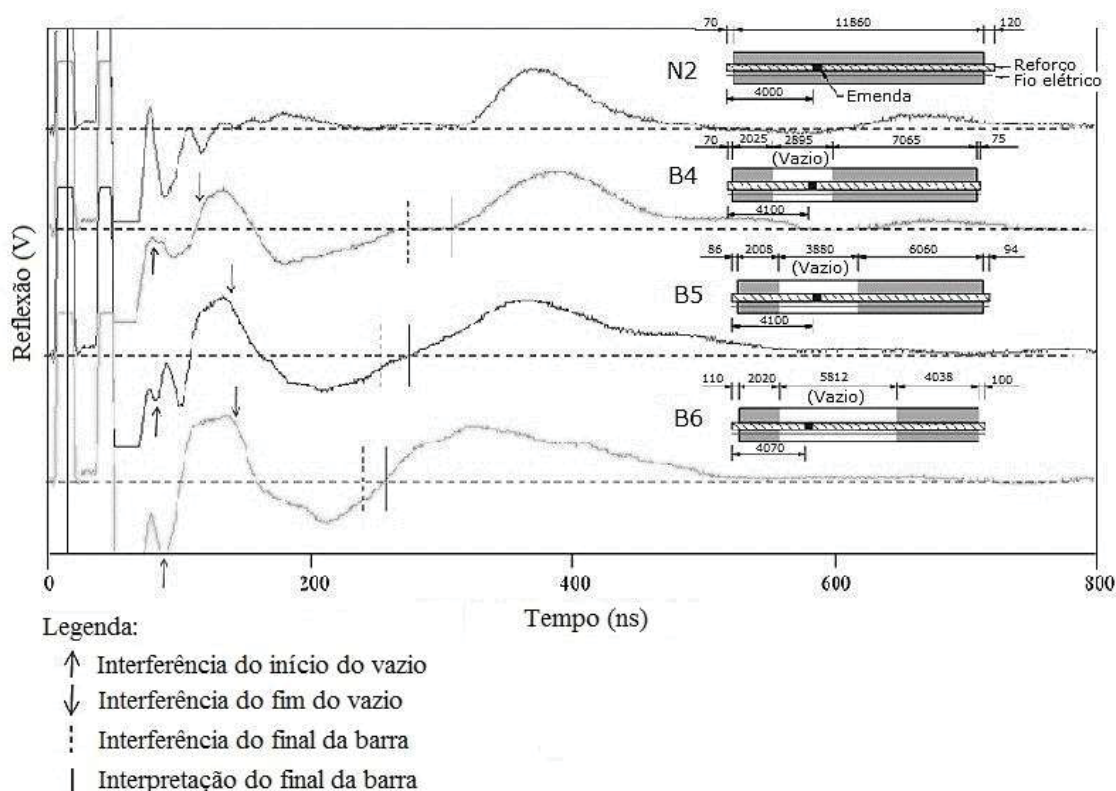


FONTE: Adaptado e traduzido de Tang e Cheng (2014)

Com a presença dos vazios, a onda sofre reflexos devido à diferença de propriedade entre a calda e o ar, e um reflexo que indica o final da barra de aço. O tempo de percurso do pulso elétrico até o final da barra reduz conforme aumenta o tamanho do vazio, isso ocorre devido à velocidade do pulso no ar ser maior que na calda de cimento, gerando uma reflexão mais rápida, em um tempo menor. Também foi possível perceber que a presença de emendas não interferiu nas reflexões.

Os autores também alteraram a posição dos vazios, com a mesma proporção anterior, porém mais próximo da cabeça do grampo e com preenchimento com calda de cimento na extremidade final como é apresentado na Figura 2.25.

Figura 2.25 – Resultados do TDR obtido com variação do posicionamento das falhas



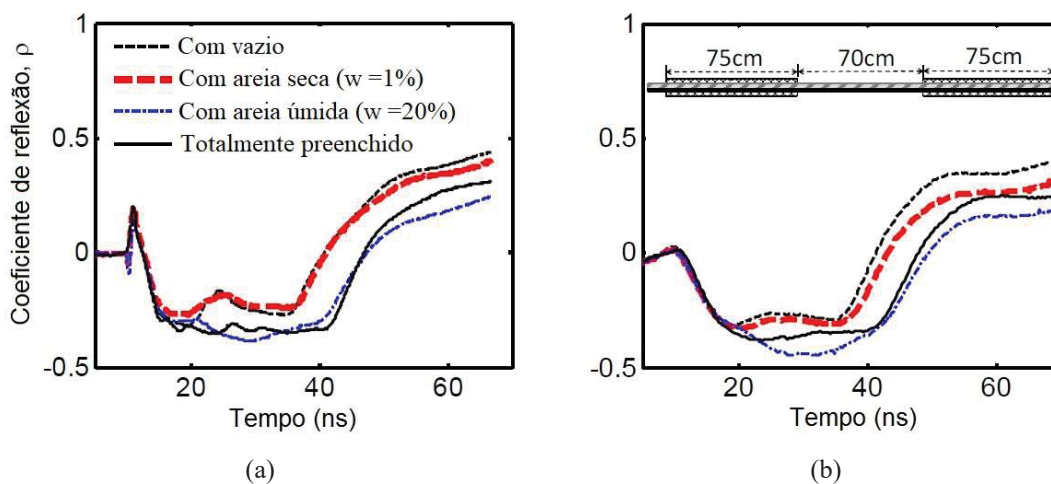
FONTE: Adaptado e traduzido de Tang e Cheng (2014)

É possível perceber que com a presença de vazios, o final do grampo é interpretado antes da barra íntegra e a redução do tempo é proporcional ao tamanho da falha. No entanto, quando o vazio está no meio do furo a reflexão é mais expressiva devido à variação de material em dois momentos: calda de cimento-vazio e vazio-calda de cimento. Essa reflexão da anomalia permite a diferenciação de barras com defeitos em relação às mais curtas. Tang e Cheng (2014) afirmam que o método deve ser aprimorado para que a determinação do comprimento da barra não seja afetada por falhas na calda de cimento. Os autores ainda ressaltam que a utilização do fio elétrico permite identificar mais facilmente defeitos significativos, superiores à 30% do comprimento da barra.

Chung *et al.* (2015) testou o método TDR com a utilização de um cabo coaxial ao invés do fio elétrico para verificação da integridade da calda de cimento. O cabo é utilizado como guia de ondas e deve ser fixado ao longo da barra. A vantagem da sua utilização é que é possível identificar o comprimento do grampo independente da condição do preenchimento. Os autores utilizaram dois equipamentos diferentes, o TDR 100, da Campbell Scientific e o TDR 20/20 da AEA Technology. As barras testadas foram moldadas em laboratório, íntegras e com falhas centrais, com 1,2 m e 2,2 m de

comprimento, e com falhas de 55 cm e 70 cm, respectivamente. Foram ensaiadas com as falhas preenchidas com ar, e areia seca e úmida. Os resultados obtidos com as barras de 2,2 m de comprimento, íntegras, com falhas preenchidas com diferentes materiais e com os dois equipamentos são apresentados na Figura 2.26.

Figura 2.26 – Método TDR com cabo coaxial



LEGENDA: a) TDR 100; b) TDR 20/20
 FONTE: Adaptado e traduzido de Chung *et al.* (2015)

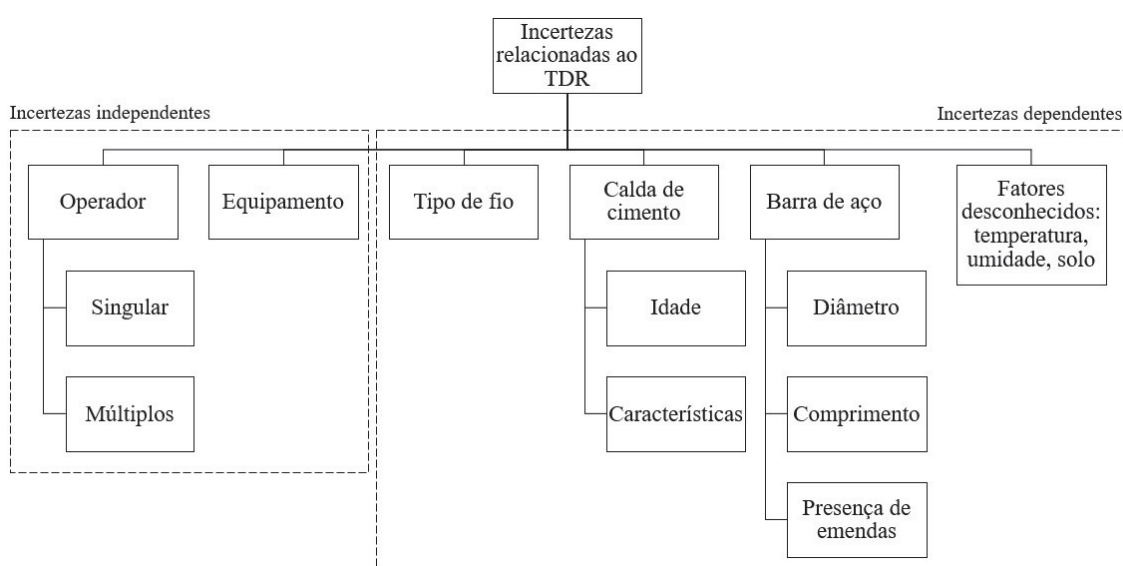
Chung *et al.* (2015) explica que a constante dielétrica da areia seca é pouco maior que o vazio com ar, o que faz com que os dois resultados sejam bem parecidos. Por outro lado, a areia úmida tem a constante dielétrica maior, resultando em uma menor impedância e conseqüente menor velocidade de propagação. De acordo com o gráfico apresentado na Figura 2.26, a constante dielétrica do solo úmido parece pouco maior que a da calda de cimento, uma vez que gera uma reflexão negativa. Além disso, ambos equipamentos permitiram a estimativa do comprimento efetivo da calda de cimento, no entanto, o TDR 20/20 produziu ondas mais dispersas que não revelaram claramente os sinais de reflexão causados pelas falhas, devido a sua menor resolução. Os autores ainda afirmam que a determinação do comprimento do grampo pode não ser confiável se o preenchimento com calda de cimento tiver irregular ou defeituoso.

Ng *et al.* (2019) realizaram testes em grampos com TDR e cabo coaxial e concluíram que a metodologia permite a detecção de pequenos vazios, e que a metodologia pode ser aplicada para o monitoramento de estruturas de solo grampeado. Em laboratório, foram avaliadas barras com 2 m de comprimento íntegras e com vazios de 30 cm a 120 cm. Os testes indicaram que foi possível identificar os vazios com 30 cm,

porém a identificação dos vazios não foi consistente com a barra íntegra, que pode ser sido influenciado por pequenos furos nos cabos utilizados.

Cheung e Lo (2011) realizaram uma revisão sobre a aplicação do método TDR em solo grampeado e diferentes fatores que podem influenciar no resultado dos ensaios. As incertezas são divididas entre independentes, que não dependem da estrutura em si, como o operador e o equipamento, e as incertezas dependentes, em que os resultados podem ser influenciados, como o tipo de fio, características da calda de cimento e barra de aço, além de fatores desconhecidos. Um resumo é apresentado na Figura 2.27.

Figura 2.27 – Incertezas relacionadas ao TDR



FONTE: Adaptado e traduzido de Cheung e Lo (2011)

Cheung (2005) e Cheung e Lo (2011) alertam que alguns fatores podem influenciar os resultados do TDR, tais como erros humanos na realização dos ensaios e sua interpretação, bem como leitura por diversos operadores. Erros do instrumento de teste também podem trazer incertezas, a magnitude do erro é especificada pelo fabricante e depende do grau de sofisticação do equipamento TDR. O tipo de fio ou cabo utilizado e características da calda de cimento e da barra, podem gerar incertezas quanto à integridade do preenchimento. Por isso, os autores sugerem sempre a utilização de fios elétricos com as mesmas características em uma mesma contenção, e ensaios de calibração para reduzir as incertezas.

2.3.2. Surface Wave Time Domain Reflectometry (SW-TDR)

De acordo com Tang e Yeung (2006), a aplicabilidade da técnica TDR em estruturas geotécnicas é limitada devido à necessidade da utilização de um fio pré-instalado. A impedância elétrica do sistema depende da distância entre as condições de superfície do condutor original e do segundo condutor, além das propriedades da calda de cimento entre eles. É praticamente impossível monitorar o desempenho com um cabo guia que não esteja próximo do condutor, além de não ser possível a instalação posterior de um fio ou cabo em estruturas já existentes.

Cheung (2003) afirma que sem o cabo elétrico paralelo a barra, o conceito do TDR se torna inaplicável. Na literatura, a aplicação do método TDR sem o fio elétrico paralelo (retorno da corrente) é denominada *Surface Wave Time Domain Reflectometry* (SW-TDR), e permite a avaliação de estruturas de contenção já existentes, utilizando apenas um condutor: a barra. A metodologia SW-TDR não requer a instalação de um segundo condutor ao longo da barra, pois utiliza ondas eletromagnéticas de superfície. As ondas têm natureza unipolar e seu comportamento é semelhante ao da linha de transmissão e corrente de deslocamento em circuitos capacitivos estendidos (referência). Durante os testes, as ondas são excitadas e propagadas ao longo do condutor de metal e na sua vizinhança imediata (TANG & YEUNG, 2006).

Para isso, pode-se realizar uma adaptação do equipamento para que ocorra a excitação da onda eletromagnética na superfície do aço. A técnica é similar, com a aplicação dos pulsos gerada apenas na cabeça da barra, que tende a se propagar perto da superfície e é submetida às propriedades indutivas e capacitivas da calda de cimento adjacente (ou sua ausência). A barra pode ser modelada como uma linha Goubau (material dielétrico revestido de uma única linha condutora). Isso permite que o sinal refletido seja medido com apenas um condutor. O sinal é mais fraco quando comparado com a presença do fio elétrico, o que pode gerar erros de comprimento (CHEUNG, 2003).

Nos testes realizados por Tang e Yeung (2006) em estacas escavadas, um instrumento foi desenvolvido com circuito especial para excitação e detecção das ondas eletromagnéticas de superfície com frequência de centenas de Mhertz. A resolução do tempo de gravação utilizado foi de 500 ps, que corresponde à uma resolução espacial de aproximadamente 2 cm.

Lee e OAP (2007) ainda explicam que sinais alternados tendem a se propagar próximo a superfície e é função da condutividade, permeabilidade indutiva e frequência. O sistema operacional não é explicado pelos autores, mas tem princípio operacional semelhante ao TDR. Neste caso, é provável que algum retorno de corrente elétrica seja necessário para completar o caminho pelos elementos capacitivo-indutivo da linha de transmissão equivalente sendo, portanto, esperado uma linha de terra. O equipamento foi projetado para medir o potencial e a corrente transitória do sinal de retorno.

Mikos *et al.* (2016) elaboraram uma tabela com resumo dos resultados obtidos com o método TDR em solo grampeado, com e sem fio elétrico, na avaliação do comprimento e integridade da calda de cimento.

Tabela 2.3 – Resumo da aplicabilidade e resultados do método TDR

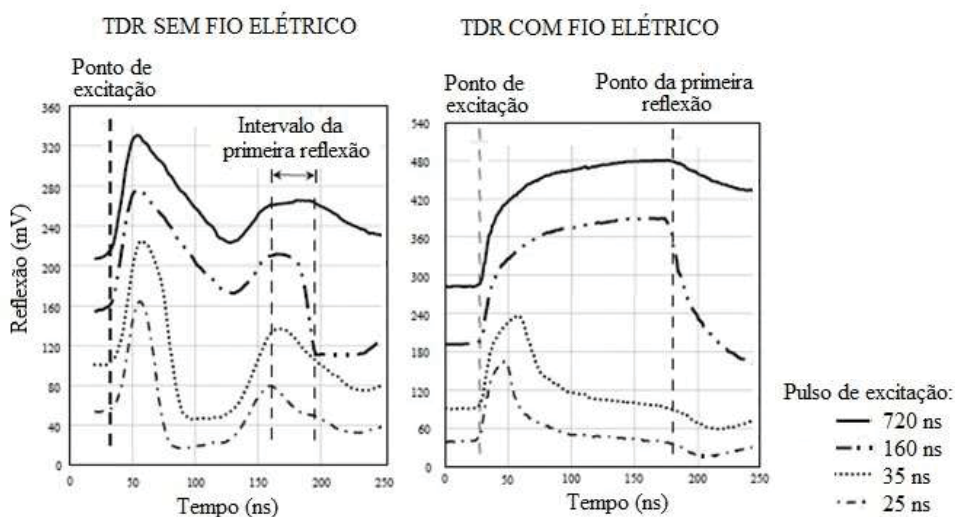
AUTOR	FIO ELÉTRICO	APLICAÇÃO	RESULTADOS
Cheung, 2003	X	Comprimento da barra	Erro de $\pm 0,2$ m em barras de 6 metros
Lee e OAP, 2007	X	Comprimento da barra	Erro de $\pm 8\%$, com 95% de confiança
Cheung e Lo, 2011	X	Comprimento da barra	Erro de $\pm 9\%$, com 95% de confiança
Tang e Cheng, 2014	X	Comprimento da barra	Vazios podem interferir na determinação do comprimento
Lee e OAP, 2007	X	Integridade da calda de cimento	Interpretação dos defeitos qualitativa
Tang e Cheng, 2014	X	Integridade da calda de cimento	Identificação de defeitos significativos, em torno de 30% do comprimento do grampo
Cheung, 2006	X	Discussão sobre	incertezas do método
Cheung, 2003		Comprimento da barra	Erro de $\pm 0,7$ m em barras de 6 metros
Jayawickrama <i>et al.</i> , 2007		Comprimento da barra	Bom para barras com mais de 7,5 metros
Lee e OAP, 2007		Comprimento da barra	Aplicação máxima em barras de 12 metros
Cheung e Lo, 2005		Integridade da calda de cimento	Depende muito da interpretação

FONTE: Adaptado de Mikos *et al.* (2016)

Cheung (2003) avaliou barras com 6 metros de comprimento com o método TDR com e sem o fio elétrico pré-instalado, e obteve erros de aproximadamente 3 e 12%, respectivamente. A comparação entre os resultados é demonstrada na Figura 2.28. A maior dificuldade encontrada pelo autor foi na determinação do reflexo gerado pelo final

da barra, uma vez que houve perdas de sinal ao longo da medição, gerando um possível intervalo da primeira reflexão. Desse modo, o autor sugere a instalação de um fio elétrico junto com o preenchimento da calda de cimento, a fim de melhorar a precisão da técnica.

Figura 2.28 – Comparação entre resultados TDR sem e com fio elétrico



FONTE: Adaptado e traduzido de Cheung (2003)

Jayawickrama *et al.* (2007) e Lee e OAP (2007) também avaliaram o método SW-TDR na determinação do comprimento das barras. O primeiro concluiu que a metodologia é mais eficaz em barras maiores de 7,5 metros, enquanto o segundo encontrou uma aplicabilidade máxima em barras de 12 metros. Lee e OAP (2007) ainda afirmam que a técnica pode gerar reflexos causados por diversos motivos, até fatores externos, devido à menor intensidade do sinal sem o fio elétrico. O método ainda foi testado em barras com falhas, porém Cheung e Lo (2005) alcançaram resultados duvidosos, com muita dependência da interpretação e análise de diferentes profissionais.

Quando não existe a instalação prévia do fio no elemento de ancoragem, como em obras já existentes, o SW-TDR pode ser utilizado como um método complementar de avaliação. Tanto o método TDR, quanto o SW-TDR apresentam execução rápida (cerca de meia hora por ensaio). Em contrapartida, requer o acesso à cabeça da barra e o uso de mão-de-obra especializada para realizar e interpretar os resultados, sendo necessário calibrar o equipamento com barras de comprimento conhecido (CHEUNG, 2003).

Também existe uma variante do método SW-TDR registrada como *Reflectometric Impulse Measurement Technique* (RIMT®) – “Técnica da Medição da Reflectometria de Impulso”, desenvolvido através de parcerias entre o Instituto Politécnico de Zurique e

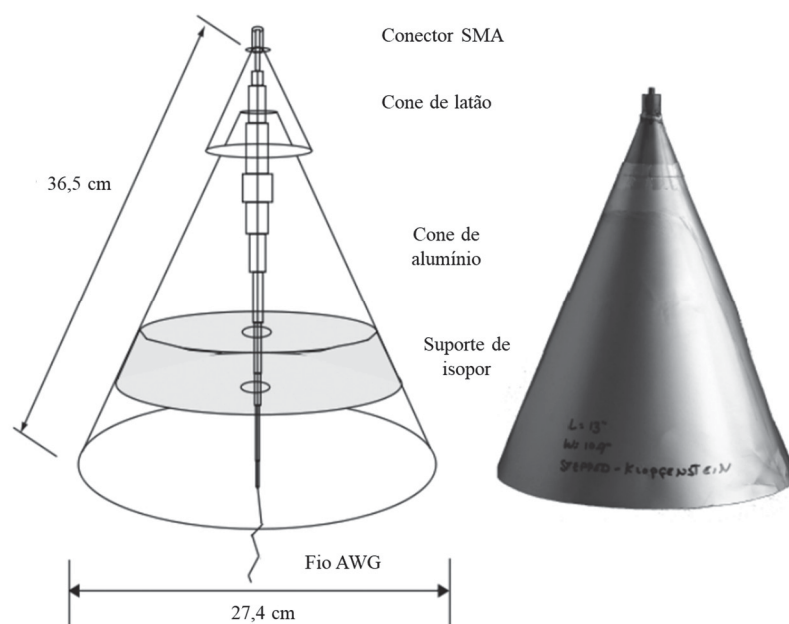
empresas privadas suíças e italianas, com marca registrada e equipamentos e análises próprias (CORDEC, 2015). Segundo Ciolko & Tatabai (1999), a técnica não necessita de fio pré-instalado e utiliza apenas uma antena externa e um fio-terra para medição dos ecos gerados pelo impulso elétrico de alta frequência. Esse método foi estudado inicialmente em concreto protendido e recentemente é utilizado na avaliação de contenções.

2.3.2.1. *Surface wave transmission line (SWTL)*

O artigo de Elmore e Watrous (2012) apresenta a teoria da linha de transmissão de ondas de superfície. É apresentada uma metodologia adaptada do trabalho de Goubau com a linha G (G-line), em que não é necessário isolamento ao redor do condutor, desde que a superfície esteja "brilhante". Desse modo, o método "Linha de Transmissão de Ondas de Superfície" (*Surface Wave Transmission Line – SWTL*) permite que um condutor sem isolamento possa propagar com velocidade 50% mais rápida que os sinais em coaxial comum, com velocidades bem próxima a velocidade da luz no vácuo.

Os lançadores utilizam transformadores de linha de transmissão coaxial de banda larga (conector SMA) e um cone de impedância Chebyshev. O transformador coaxial, também denominado lançador, é composto por um condutor externo, que é um cone de papel alumínio, e o condutor interno é de latão e apresenta diâmetros variados (ELMORE, WATROUS, 2012). O cone lançador pode ser observado na Figura 2.29.

Figura 2.29 – Cone lançador SWTL



FONTE: Adaptado de Elmore, Watrous (2012)

Com o cone lançador, o cone interno pode ser conectado à barra de aço, de modo que o pulso eletromagnético fosse gerado na barra através do cone maior. Para os ensaios pode ser utilizado o equipamento TDR.

2.3.3. Resistência Elétrica

O método da resistência elétrica é utilizado para medir a resistência elétrica entre a barra e o solo. De acordo com Lee e OAP (2007), a resistência total é composta principalmente pela resistência elétrica da barra, da calda de cimento e do solo ao redor. Como a barra é metálica, sua resistência e a resistência de contato com a calda de cimento é praticamente desprezível. A resistência da calda de cimento é radial e depende do diâmetro e das características do material. O solo apresenta resistência elétrica bem variável e depende de suas propriedades como porosidade, permeabilidade, grau de saturação, umidade, composição mineralógica, grau de compactação, tamanho e forma das partículas, entre outros. A heterogeneidade do solo influencia pouco nos ensaios em elementos próximos, pois a corrente elétrica é radial e atua em todas as direções. No entanto, resultados obtidos em contenções distantes não devem ser comparados.

A calda de cimento que envolve a barra proporciona maior área de contato entre a barra de aço e o solo. O valor de resistência elétrica reduz com o aumento do

comprimento da barra e aumenta com um maior diâmetro da calda (SOUZA *et al.*, 2007). De acordo com Mamede Filho (2007), a calda de cimento se comporta como uma barra de grande seção transversal, que é inversamente proporcional à resistência elétrica.

O procedimento de ensaio consiste na instalação de dois eletrodos de aço (corrente e potencial) na parte superior do talude, conectados à barra que é testada. O eletrodo de corrente elétrica deve ser o mais distante, e entre este e a barra deve ser instalado o eletrodo de potencial (CHEUNG; LO, 2005).

Para realização do ensaio é necessária a aplicação de uma corrente elétrica na barra de aço, que retorna no eletrodo de corrente, e no eletrodo de potencial é medida a diferença de potencial elétrico. Para as leituras, podem ser utilizados um amperímetro e um voltímetro, ou equipamentos de aterramento elétrico, que fazem a medição direta. Lee e OAP (2007) sugerem a utilização de corrente alternada para manter o sistema em equilíbrio e evitar a polarização dos eletrodos. A resistência total é dada pela relação entre a tensão medida entre o eletrodo de potencial, a cabeça da barra e a intensidade da corrente, como indica a Equação (5).

$$R = \frac{V}{i} \quad (5)$$

Onde:

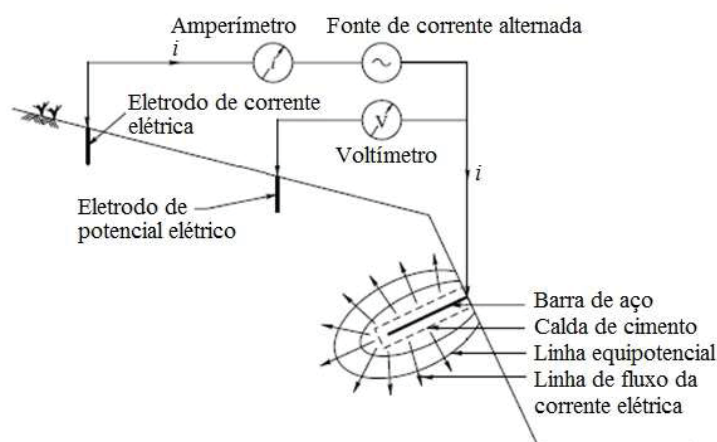
R = Resistência elétrica (ohm)

V = Diferença de potencial elétrico (volts)

i = Corrente elétrica (ampères)

Cheung e Lo (2005) sugerem a instalação dos eletrodos em profundidade de 0,5 m a 1,0 m de profundidade, com distância linear mínima de 20 m e 50 m entre eles e a barra de teste. Lee e OAP (2007) também indicam que o eletrodo de corrente permaneça no mesmo local para medição de uma linha de barras a ser medida. As distâncias entre os eletrodos não são críticas e não influenciam na comparação das resistências. O princípio do ensaio é apresentado na Figura 2.30.

Figura 2.30 – Esquema do ensaio de resistência elétrica



FONTE: Adaptado de Cheung e Lo (2005)

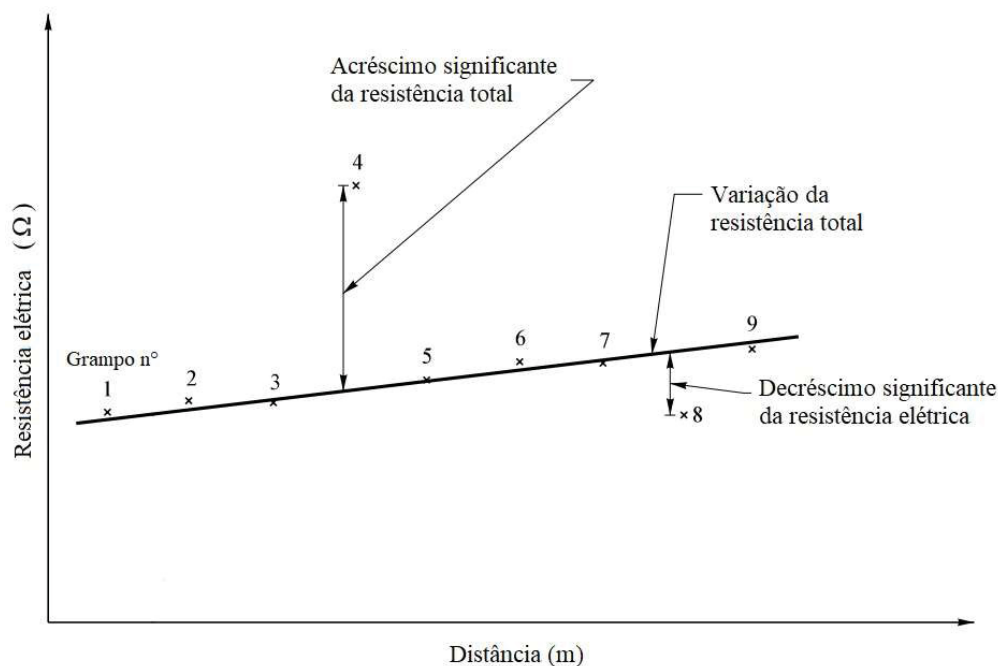
Segundo Lee e OAP (2007), a teoria é compreendida na medida em que as variáveis do solo e do cimento são facilmente previsíveis. Falhas no preenchimento do furo reduzem a passagem de corrente elétrica, o que gera um aumento da resistência. As variações dos resultados ocorrem devido a variações na calda de cimento, e não da barra de aço, uma vez que a resistência dela é praticamente desprezível. Por isso, se a resistência elétrica de uma barra é diferente da média, existe chances da presença de anomalias.

Valores altos de resistência podem ocorrer em barras com vazios no preenchimento com calda de cimento ou em barras de comprimento menor. A resistência entre o ar e a calda de cimento é maior que entre o solo e a calda, o que torna mais fácil identificar falhas com ar. Valores de resistência baixos podem ser atribuídos a barras com excesso de argamassa no furo ou barras de maior comprimento.

As medições são realizadas normalmente ao longo de linhas horizontais de barras, e os resultados podem ser agrupados para estabelecer um mapeamento de resistência elétrica de toda contenção. O método consiste na comparação da resistência elétrica de barras próximas em relação à média. Os resultados de um mesmo elemento devem apresentar variação máxima de 0,2% e variações maiores podem indicar deficiência na ligação do eletrodo com a cabeça da barra (LEE; OAP, 2007).

Lee e OAP (2007) indicam na Figura 2.31 uma representação esquemática de resultados esperados utilizando o método da resistência elétrica.

Figura 2.31 – Resultado típico do método da resistência elétrica



FONTE: Adaptado de Lee e OAP (2007)

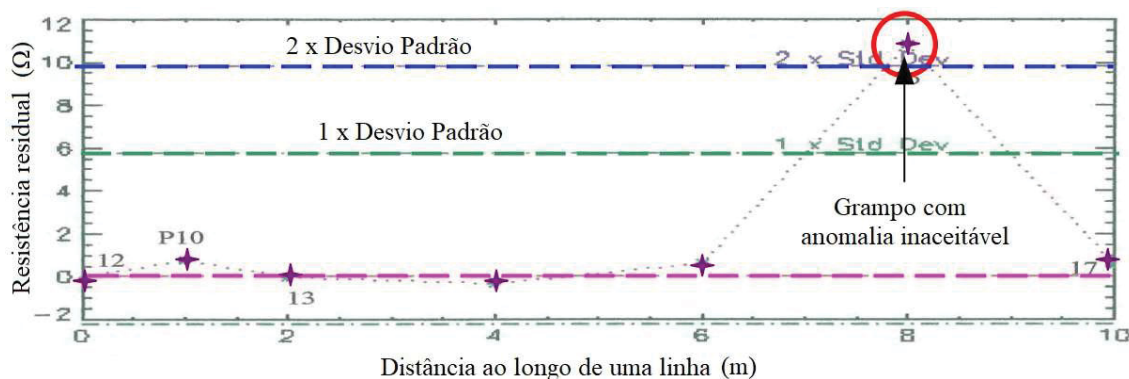
Com os dados obtidos em campo, os autores sugerem elaborar um gráfico de distância *versus* resistência elétrica. Grupos próximos e de mesmo comprimento normalmente apresentam valores de resistência elétrica semelhantes. No entanto, algumas vezes pode ocorrer uma variação da resistência total devido a heterogeneidade do solo, mas é uma variação constante, sendo possível criar uma linha com a média espacial estimada.

Resultados com aumentos significativos da resistência elétrica, como o que ocorre no grupo nº 4, podem indicar a possibilidade de defeitos no grupo, como presença de falhas na calda de cimento ou um grupo mais curto. Por outro lado, reduções da resistência, como no grupo nº 8 podem indicar a formação de um bulbo de calda de cimento (LEE; OAP, 2007). Cabe salientar, que variações nos resultados de resistência elétrica também podem indicar problemas na medição ou falhas do contato elétrico.

Para avaliação dos resultados, Cheung e Lo (2005) calculam como três vezes o valor do desvio padrão obtido pelos resultados, para mais ou para menos, como valor de referência. Resultados fora dessa faixa de valores podem ser atribuídos em barras com falhas. Lee e OAP (2007) utilizam como parâmetro duas vezes o desvio padrão, para mais ou para menos, como valores de referência, denominado resistência residual.

Para obtenção da análise gráfica é necessário calcular o valor obtido no ensaio e diminuir a média, pela aplicação de uma medida estatística comparativa simples. Como indicado na Figura 2.32, em que o círculo indica um grampo com anomalia, por seu valor estar compreendido acima de duas vezes o desvio padrão.

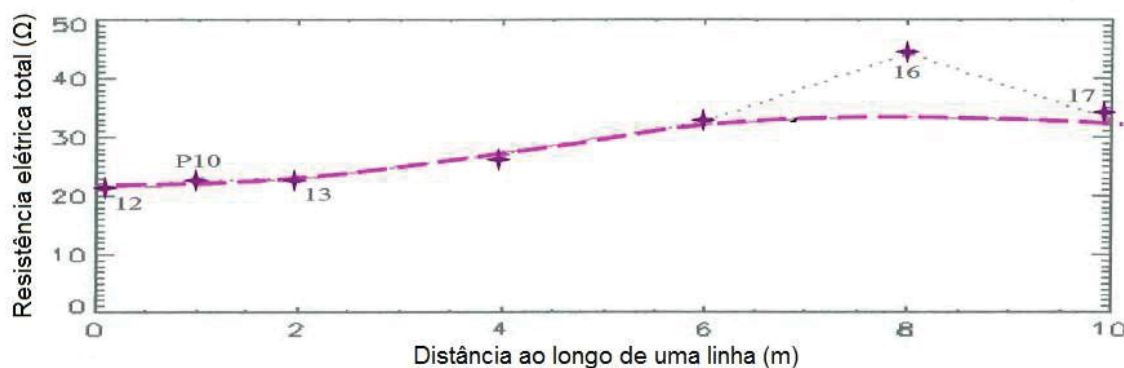
Figura 2.32 – Medida estatística comparativa no ensaio de resistência elétrica



FONTE: Adaptado e traduzido de Lee e OAP (2007)

Em testes realizados por Lee e OAP (2007) em grampos de 15,0 m, a resistência elétrica média variou entre 22,0 Ω e 33,0 Ω , indicado pela linha pontilhada rosa na Figura 2.33. É possível perceber um acréscimo da média ao longo da distância entre os grampos, justificado pela heterogeneidade do solo local. O grampo 16, com valor bem acima da média, apresenta uma falha de 2,0 m na calda de cimento. De acordo com o autor, nas barras de 15 m, somente vazios de 2 m foram identificados pela metodologia, enquanto em grampos de 9 m foi possível identificar falhas de 1 m com ar.

Figura 2.33 – Resultados de resistência elétrica em solo grampeado



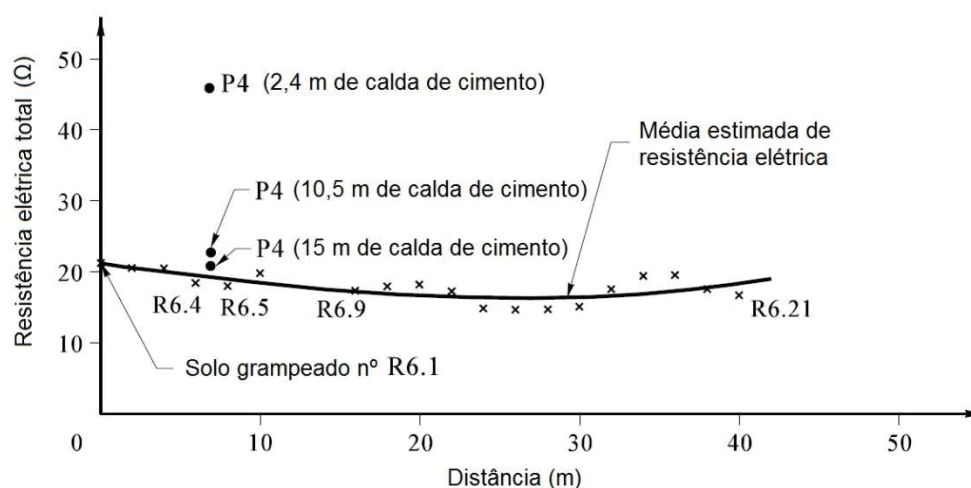
FONTE: Adaptado e traduzido de Lee e OAP (2007)

Cheung e Lo (2005) realizaram testes em mais de 70 grampos com diferentes comprimentos e falhas. Os autores concluíram que os resultados de resistência de elementos de uma mesma linha variam gradualmente devido à heterogeneidade do solo.

Em barras de mesmo comprimento foram avaliados vazios com solo e ar, e a identificação das falhas é facilitada quando são preenchidos com ar.

Resultados obtidos com barras de 15 m de comprimento são apresentados na Figura 2.34. A barra P4 tem 15 m de comprimento e foi preenchida gradualmente com calda de cimento, com 2,4 m, 10,5 m e 15 m com calda de cimento. Cabe salientar que as barras foram enterradas no solo, e não executadas com injeção na perfuração. Os grampos R6 são de referência e tem 15 m de comprimento totalmente preenchidos com calda de cimento. Os autores também concluíram que a sensibilidade do teste diminui à medida que o comprimento do preenchimento da calda de cimento aumenta, uma vez que quanto menor a falha com ar, menor é a variação de resistência elétrica.

Figura 2.34 – Resultados de resistência elétrica em barras de 15 m



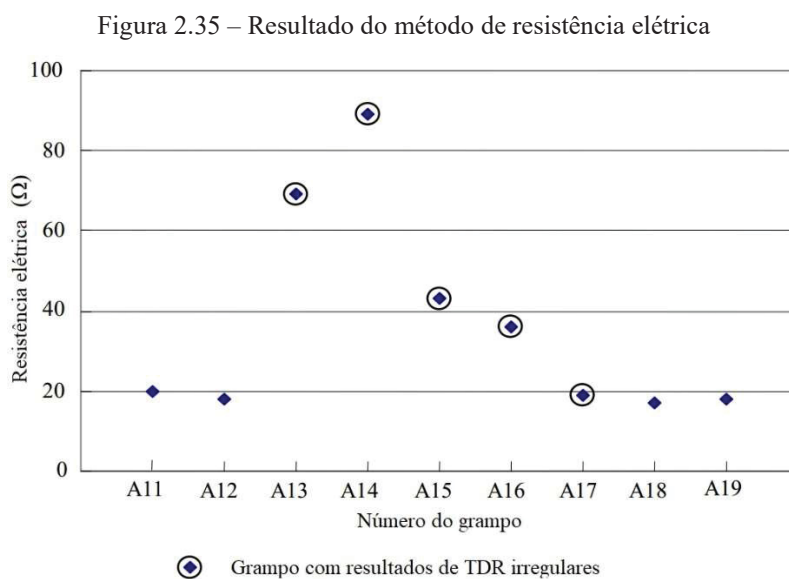
FONTE: Adaptado e traduzido de Cheung e Lo (2005)

Cheung e Lo (2005) realizaram ensaios em dias de chuva e sol e concluíram que os grampos íntegros tiveram poucas alterações em dias de chuva. No entanto, com a presença de falhas na calda de cimento a redução é significativa pois o vazio pode estar preenchido com a água da chuva.

O método da resistência elétrica também foi utilizado por Tang e Cheng (2014) para avaliar grampos de 7 m de comprimento que apresentaram curvas do ensaio TDR com irregularidades. As curvas indicavam a presença de vazios na calda de cimento de até 2 m de comprimento. Grampos próximos foram analisados, e os resultados são apresentados na Figura 2.35.

Os resultados de resistência elétrica foram altos e bem acima da média para os grampos que apresentaram curvas irregulares do TDR, o que indicou que as anomalias

presentes nas barras eram consideráveis. Os resultados das duas técnicas se apresentaram em concordância, com exceção do grupo A17, que o método de resistência não identificou anomalias. As falhas foram confirmadas, e os grampos foram substituídos.



FONTE: Adaptado e traduzido de Tang e Cheng (2014)

Segundo Lee e OAP (2007), a execução do ensaio é simples e rápida após a configuração e instalação dos equipamentos. O ensaio pode ser realizado por um técnico e a análise dos resultados não requer metodologias avançadas. A cabeça da barra deve estar limpa para melhor contato elétrico, e sugere-se utilizar cliques (garra jacaré) que apresentam resultados mais precisos. Os fios utilizados para ligar os eletrodos devem estar intactos, a fim de evitar pequenos erros na medição da resistência elétrica. Os autores ainda afirmam que barras próximas não influenciam nos resultados, porém a proteção anticorrosiva nas barras pode alterar a resistência elétrica.

De modo geral, o método da resistência elétrica é comparativo e não permite obter o comprimento da barra nem distinguir os defeitos, por isso, é sugerido associar com outra metodologia. Com o conhecimento do comprimento da barra a interpretação é mais precisa (CHEUNG; LO, 2005). A metodologia apresenta potencial como técnica auxiliar a outras técnicas, como por exemplo o TDR, de forma a confirmar os resultados.

Figura 3.2 – Vista frontal do campo experimental em 2016



A Figura 3.3 indica uma vista de 2020 com a contenção experimental já executada e a localização dos grampos e tirantes.

Figura 3.3 – Vista frontal da contenção experimental (2020)



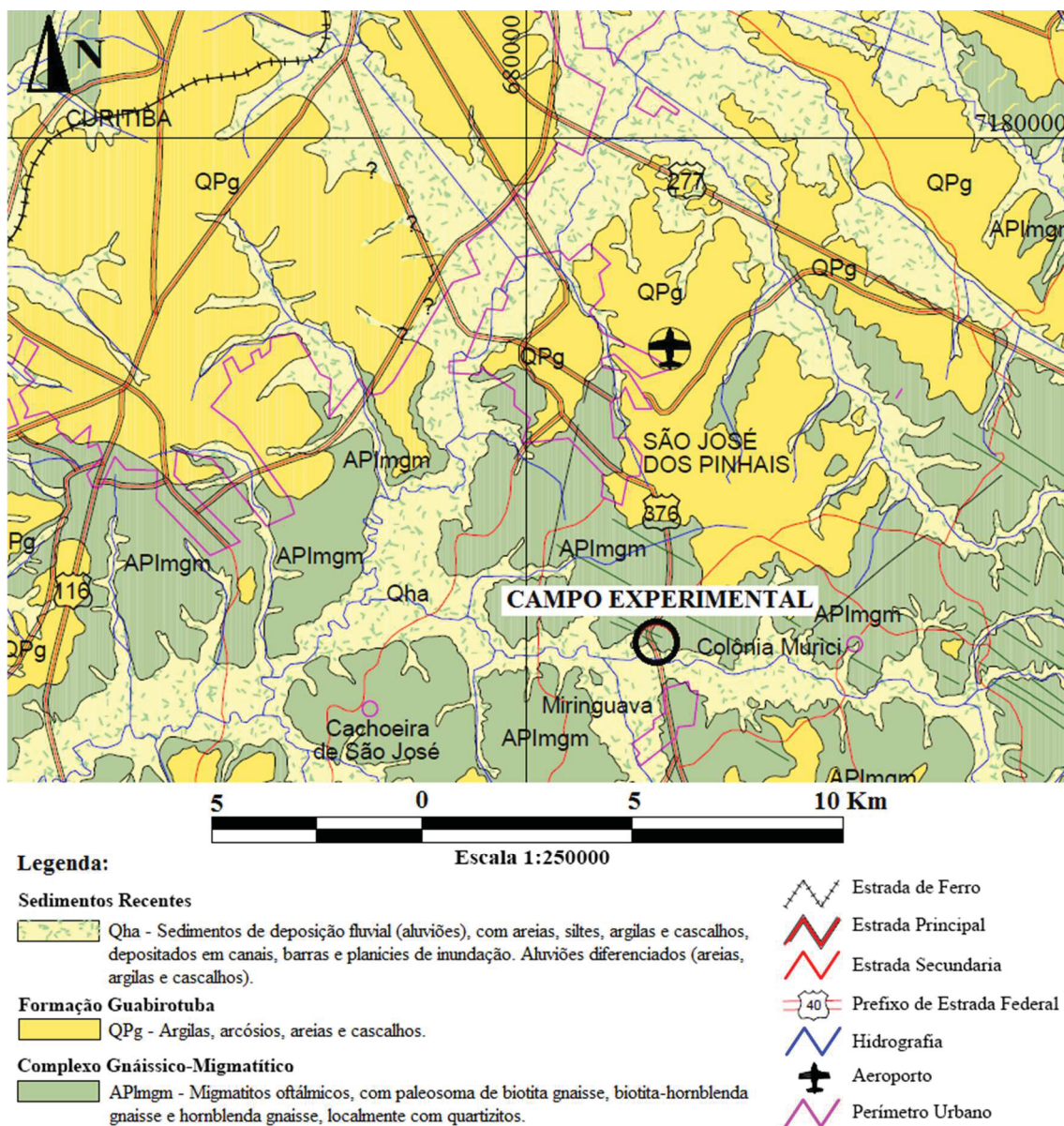
3.1.1. Caracterização geológico-geotécnica

A caracterização geológico-geotécnica foi realizada com sondagens SPT, ensaios de caracterização geotécnica e ensaios de resistividade elétrica. Mikos (2017) identificou um solo no local bastante heterogêneo, característico do complexo Gnaisse-Migmatítico, com nível d'água inexistente no local da contenção.

O complexo Gnáissico-Migmatítico (APIimgm) é do período Arqueano – Proterozóico inferior (Figura 3.4). Os migmatitos predominantes no complexo foram formados no Paleoproterozóico (2.000 ± 200 Ma), remigmatizados no Neoproterozóico

(600 ± 20 Ma), período esse em que as isothermas atingiram temperaturas superiores a 500 °C (SIGA Jr. *et al.*, 1995).

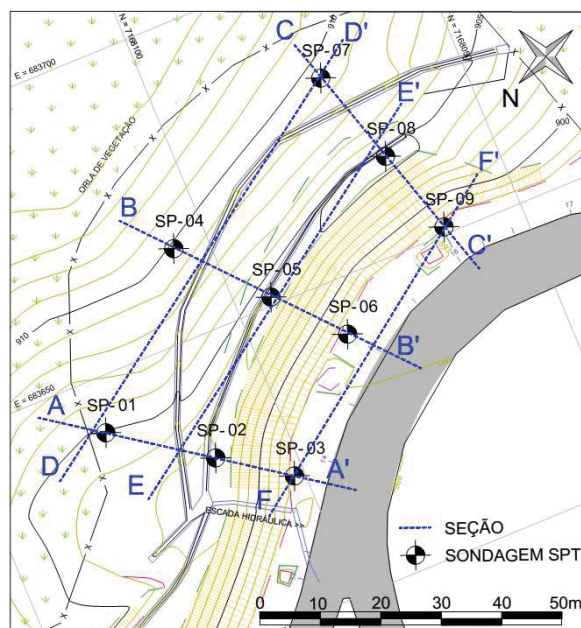
Figura 3.4 – Mapa geológico da região de estudo



FONTE: Adaptado de Mineropar (2005)

Mikos (2017) elaborou perfis geológicos-geotécnicos com a caracterização realizada a partir de nove sondagens SPT, e ensaios de caracterização realizados em laboratório. As seções dos perfis são indicadas na Figura 3.5.

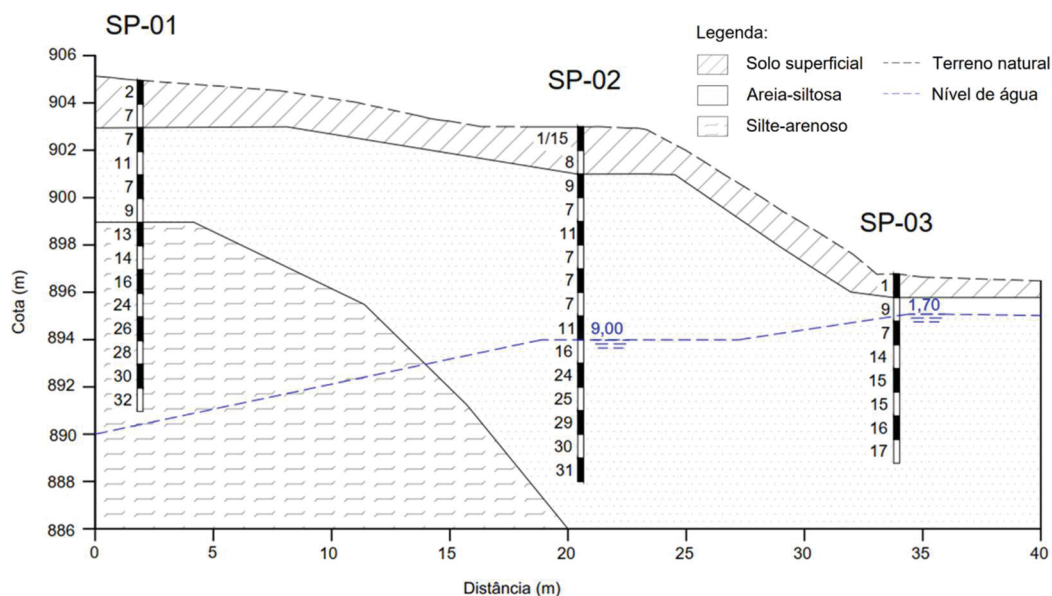
Figura 3.5 – Locação das sondagens e seções



FONTE: Mikos (2017)

Para melhor conhecimento do local são apresentadas as seções A-A' (Figura 3.6), a seção B-B' (Figura 3.7) e a seção C-C' (), que estão inseridas na região da contenção experimental e são longitudinais a direção de execução das barras.

Figura 3.6 – Seção A-A'



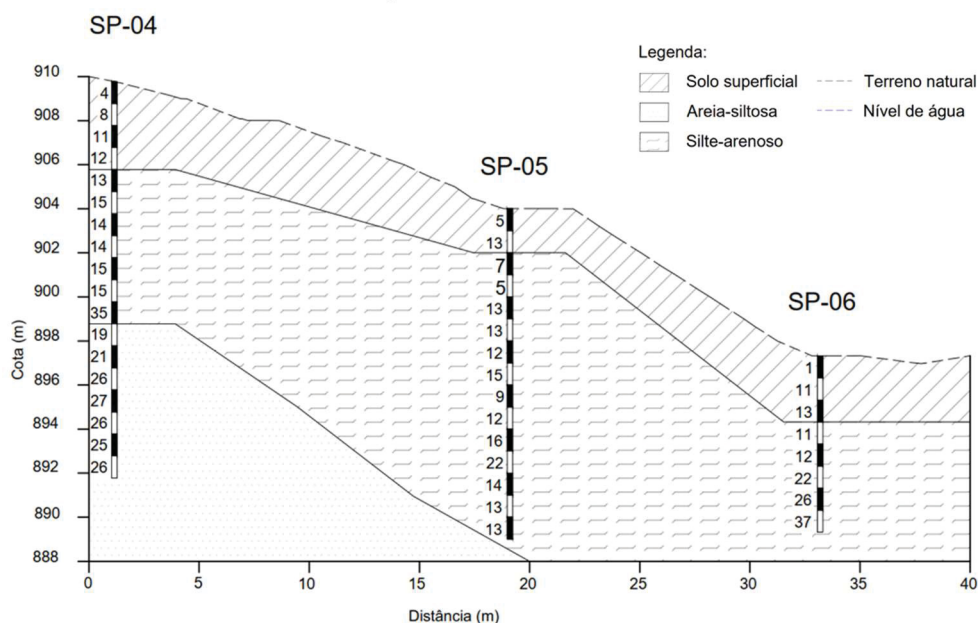
FONTE: Mikos (2017)

As seções B e C que estão mais próximas das barras instaladas. A seção B apresentou solo predominantemente silte-arenoso, com teores de argila semelhantes. Por

outro lado, a seção C apresentou solo arenoso em profundidade. O solo superficial das duas seções são siltosos e com limites de consistência mais altos. Ambas as seções não apresentaram nível de água.

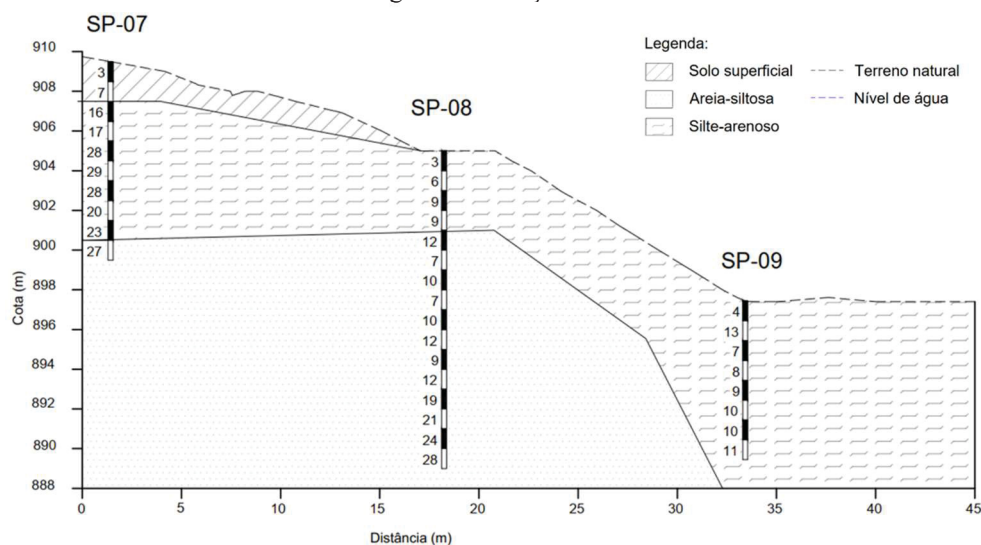
De modo geral, o solo do campo experimental é heterogêneo, com camadas mal definidas, composto principalmente por solo siltoso e arenoso e com comportamento plástico fraco a médio. A heterogeneidade é uma característica de solos residuais, derivada da rocha mãe (MIKOS, 2017).

Figura 3.7 – Seção B-B'



FONTE: Mikos (2017)

Figura 3.8 – Seção C-C'



FONTE: Mikos (2017)

3.2.PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

O campo experimental tem como principal objetivo avaliar os métodos não destrutivos selecionados, e para isso foi executada uma contenção de solo grampeado e cortina atirantada com elementos íntegros e outros com anomalias conhecidas. Com base na revisão de literatura e nos levantamentos efetuados na rodovia foi realizado um planejamento das variações a serem realizadas na contenção experimental. Os principais aspectos avaliados foram: comprimento, integridade da calda de cimento e presença de corrosão.

A obtenção do comprimento dos grampos e tirantes com os métodos não destrutivos é uma ferramenta que pode auxiliar em obras já existentes. A avaliação da integridade da calda de cimento também é importante, pois representa uma falha recorrente em estruturas de contenção, principalmente em solo grampeado (JAYAWICKRAMA *et al.*, 2007). E por fim, a presença de corrosão é uma das manifestações patológicas mais recorrentes em cortina atirantada, e sua detecção poderia evitar acidentes nesse tipo de estrutura.

No planejamento também foi definido uma execução mínima de três elementos para cada variação, visando obter maior repetibilidade e melhor confiabilidade dos resultados. Além disso, foram executados grampos e tirantes íntegros como elementos de referência. Em todas as barras foi instalado um cabo coaxial paralelo a barra para avaliação do método TDR, recomendado por Chung *et al.* (2015). Tal cabo permite a medição do comprimento da barra de aço, que é correspondente ao tamanho do cabo, e a integridade da calda de cimento.

3.2.1. Solo grampeado

As variações executadas no solo grampeado foram: comprimentos de 6 m e 12 m, processo executivo, utilização de emendas, presença de vazio com ar, furo maior que a barra e barra cravada no solo. Assim, foram definidas 10 variações, com 3 repetições cada, totalizando 30 grampos. As variações são apresentadas na Tabela 3.1. Para todas as variações foram utilizadas barras Gewy da Dywidag® com 25 mm de diâmetro. No total, foram utilizados 216 m de barra.

Tabela 3.1 – Variações realizadas no solo grampeado

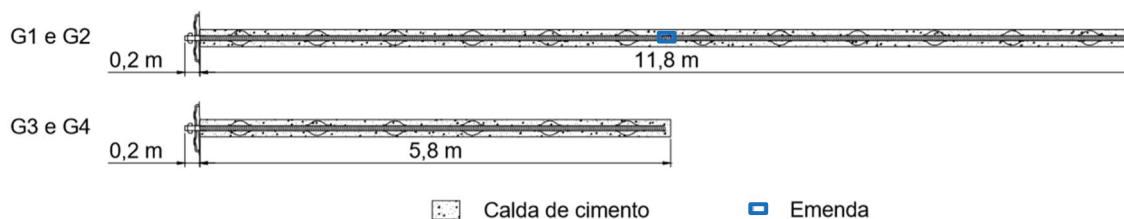
Varição	Quantidade	Comprimento	Descrição
G1	3	12,0 m	Grampos íntegros Tipo 1
G2	3	12,0 m	Grampos íntegros Tipo 2
G3	3	6,0 m	Grampos íntegros Tipo 1
G4	3	6,0 m	Grampos íntegros Tipo 2
G5a	1	6,0 m	Emenda no início da barra
G5b	1	6,0 m	Emenda no meio da barra
G5c	1	6,0 m	Emenda no fim barra
G6	3	6,0 m	Falha no final da barra com solo (100 cm)
G7	3	6,0 m	Falha no meio da barra (10 cm)
G8	3	6,0 m	Falha no meio da barra (50 cm)
G9	3	6,0 m	Falha no meio da barra (100 cm)
G10	3	6,0 m	Furo maior que a barra (furo com 7 m)

Os comprimentos avaliados foram de 6 m e 12 m, que são mais frequentes na rodovia em estudo. Além disso, 6 m é o comprimento comercial das barras e buscou-se o melhor aproveitamento do material. Foram executadas somente grampos de 12 m como elemento íntegro com e sem reinjeção, e as demais variações foram realizadas somente nas barras de 6 m. Em relação ao processo executivo, foram definidos tipo 1 e tipo 2, e se diferem pela reinjeção. O tipo 1 é a injeção somente da bainha e o tipo 2 é injeção da bainha com mais uma fase de reinjeção. Todas as demais variações (G5 a G10) foram do tipo 2, executadas com reinjeção.

De acordo com Souza *et al.* (2005), muitas obras antigas eram realizadas somente com bainha e com isso as barras apresentavam vazios devido a retração da calda de cimento. Atualmente, obras com solo grampeado são executadas com pelo menos uma fase de injeção, o que aumenta a resistência ao arrancamento e reduz a presença de falhas na calda de cimento ao longo da barra. Além disso, a nova norma de solo grampeado também indica que seja realizada mais uma etapa de injeção de calda de cimento (ABNT, 2021). Então, optou-se em realizar uma avaliação de ambos os processos executivos.

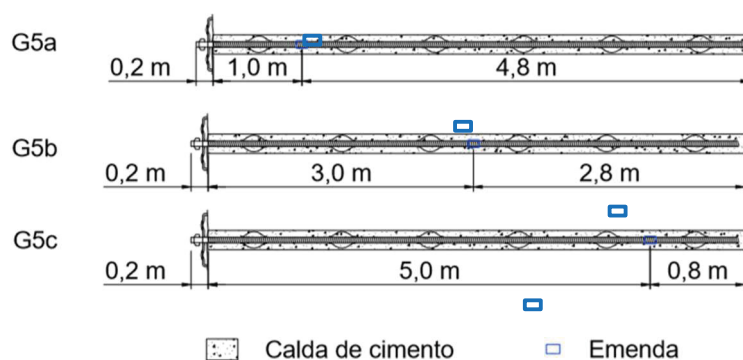
Nos grampos íntegros de 12 m (G1 e G2) foi necessário utilizar emendas para unir duas barras de 6 m e nas barras íntegras de 6 m (G3 e G4) não foram utilizadas emendas (Figura 3.9). Foi mantido 20 cm das barras para fora do terreno.

Figura 3.9 – Grampos íntegras de 12 m e 6 m



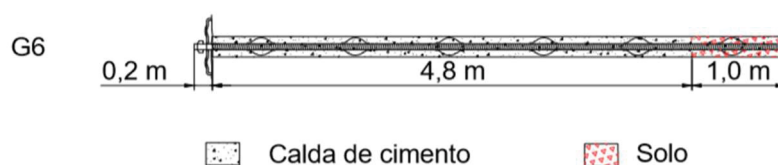
Lee e OAP (2007) afirmam que alguns tipos de emendas podem gerar uma reflexão parcial dos sinais, dificultando a interpretação do comprimento real do grampo. Por isso, também foi previsto uma variação com emendas nas barras de 6 m (G5), e somente nesse caso as três repetições foram diferentes, com instalação das emendas em diferentes posições: inicial, final e no meio, como apresentado na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Grampos de 6 m com variação do posicionamento das emendas



As demais variações indicam falhas construtivas. A variação G6 consistiu na cravação de uma barra de aço por um metro no solo do final do furo, o que pode ocorrer em obras quando o furo é realizado em um tamanho inferior ao da barra (JAYAWICKRAMA *et al.*, 2007). Desse modo, foi simulado uma falha com solo no final da barra, como indica a Figura 3.11.

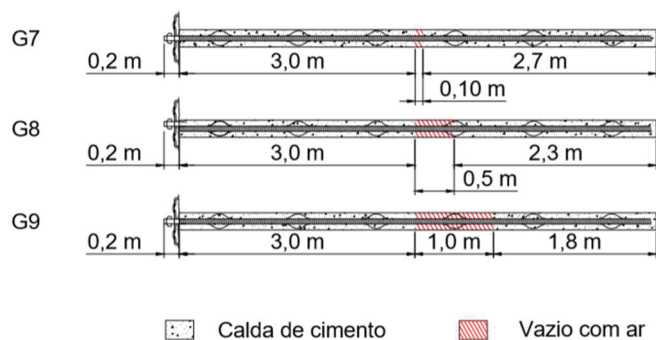
Figura 3.11 – Grampo de 6 m com falha com solo no final



Dentre os autores estudados, Souza *et al.* (2005) e Jayawickrama *et al.* (2007) salientam que é comum a ocorrência de vazios com ar na calda de cimento em solo grampeado devido a falhas executivas, o que pode afetar a estabilidade da obra. Assim, foram simulados vazios com ar de modo a avaliar se os métodos não destrutivos estudados

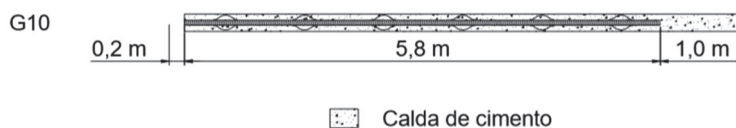
são capazes de identificá-los. Na Figura 3.12 são apresentadas as 3 variações realizadas, com falhas de ar de 0,1 m (G7), 0,5 m (G8) e 1,0 m (G9) no centro da barra. O objetivo foi avaliar se as metodologias são capazes de identificar não só a presença de uma falha, mas também a sua localização e dimensão ao longo do comprimento do grampo.

Figura 3.12 – Grampos de 6 m com falha no preenchimento da calda de cimento



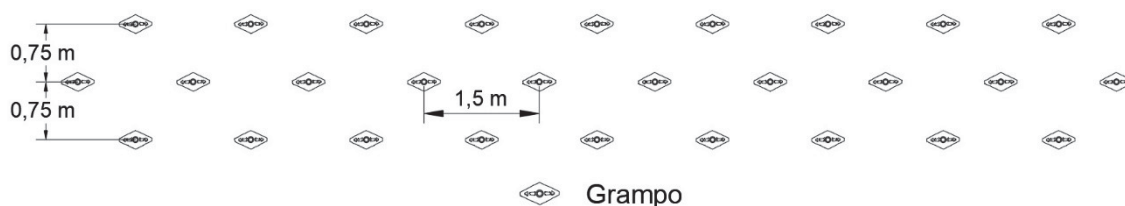
A última variação (G10) consistiu em realizar um furo maior que a barra, com 7 m de comprimento e preencher totalmente com calda de cimento (Figura 3.13). De acordo com Jayawickrama *et al.* (2007) esta falha também é comum em obras.

Figura 3.13 – Grampo de 6 m com furo de 7 m



Cabe salientar que foi posicionado um cabo coaxial ao longo de todos os grampos. Em relação ao processo executivo da obra, optou-se em não realizar o concreto projetado da face para facilitar a execução dos ensaios, uma vez que não é necessário. O espaçamento entre os grampos foi definido como 0,75 m na vertical e 1,5 m na horizontal, valores usualmente empregados nas obras existentes na rodovia, com malha triangular, como apresentado na Figura 3.14. Cabe salientar que os grampos foram executados em três linhas para maior facilidade na etapa construtiva e para a realização dos ensaios, sem a necessidade de andaime.

Figura 3.14 – Vista frontal do solo grampeado



3.2.2. Cortina atirantada

Os resultados obtidos com as variações que envolvem a identificação de variação de seção e/ou falhas propostas para a estrutura de solo grampeado também pode ajudar como referência para avaliações de anomalias semelhantes em estruturas de cortina atirantada. Por isso, outras configurações podem ser avaliadas nessa estrutura, tais como: tipos de tirantes (fios, cordoalhas e monobarras), diferentes processos executivos, vazios próximos a cabeça e simulações de corrosão.

Com relação ao elemento de ancoragem, os tirantes podem ser compostos por um único elemento (monobarras) ou pela armação múltipla com fios ou cordoalhas. As monobarras são elementos semelhantes aos grampos, e para o campo experimental foi definido com barras de 32 mm de diâmetro. Os tirantes de cordoalha foram compostos por 6 cordoalhas, número comum nas obras da rodovia. Cada cordoalha é composta por 7 fios, com diâmetro total de 12,7 mm. Por fim, para a execução de tirantes com fios, foi adotado 6 fios por tirante, com 7 mm cada.

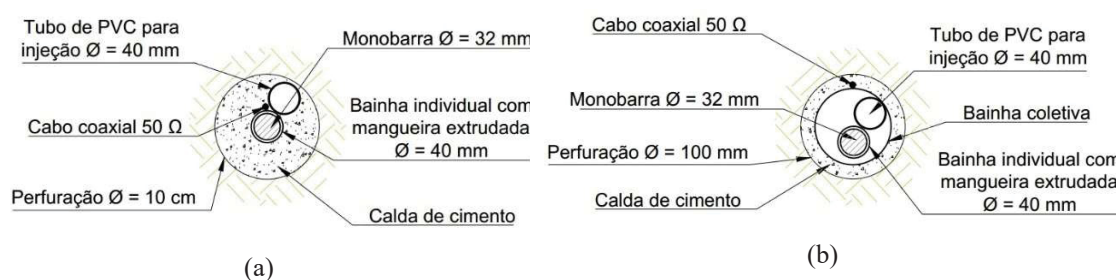
Para os tirantes foi utilizado um comprimento único de 18 m, sendo 6 m de trecho ancorado, 11 m de trecho livre, e 1 m do tirante para fora do terreno. Os comprimentos foram definidos de acordo com a frequência dos valores ao longo da rodovia em estudo, e para evitar desperdício, uma vez que as monobarras são fabricadas com 6 m cada barra. No total foram realizadas 9 variações com 3 repetições cada, totalizando 27 tirantes. As variações realizadas são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Variações realizadas na cortina atirantada

Variação	Quantidade	Comprimento	Descrição
T1	3	18,0 m	Tirante monobarra íntegro Tipo 1
T2	3	18,0 m	Tirante monobarra íntegro Tipo 2
T3	3	18,0 m	Tirante monobarra com redução de seção próximo à cabeça
T4	3	18,0 m	Tirante cordoalha íntegro Tipo 1
T5	3	18,0 m	Tirante cordoalha com falha no início do furo (50 cm com ar)
T6	3	18,0 m	Tirante cordoalha com falha no meio do furo (50 cm com ar)
T7	3	18,0 m	Tirante cordoalha com cortes próximos à cabeça
T8	3	18,0 m	Tirante fio íntegro Tipo 1
T9	3	18,0 m	Tirante fio com falha no início do furo (50 cm com ar)

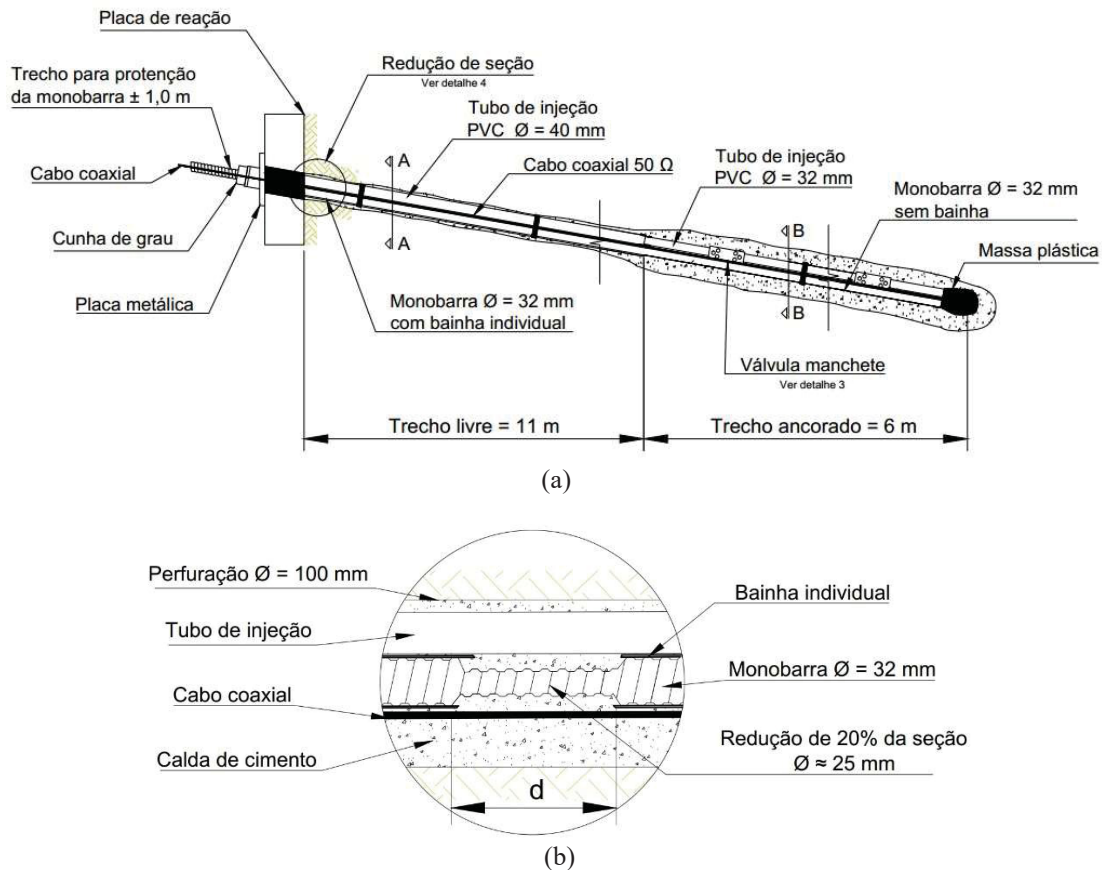
Do mesmo modo como realizado no solo grampeado, os tirantes também foram executados de duas maneiras, o tipo 1, somente com bainha individual e o tipo 2 com bainha individual e coletiva. A bainha individual consiste na proteção do tirante monobarra com um tubo de PVC, e a bainha coletiva é a adição de mais um tubo de PVC para proteção da barra e do tubo de injeção, como indicado na Figura 3.15. Ambas as proteções são executadas somente no trecho livre. As demais variações foram executadas somente com o tipo 1. Todos os tirantes foram executados com um cabo coaxial paralelo às barras.

Figura 3.15 – Variação executiva nos tirantes: a) Tipo 1; b) Tipo 2



As cortinas atirantadas apresentam suscetibilidade à ocorrência de falhas devido a corrosão, normalmente próximo a cabeça da barra ou ao longo do comprimento livre (ORTIGÃO *et al.* 1995, PITTA *et al.* 2006). Para isso, na variação T3 foi realizada a redução de seção da monobarra em 25% ao longo de 10 cm (d) próximo à cabeça da barra, com o diâmetro de 32 mm para 25 mm. Os detalhes do tirante e da redução de seção são apresentados na Figura 3.16.

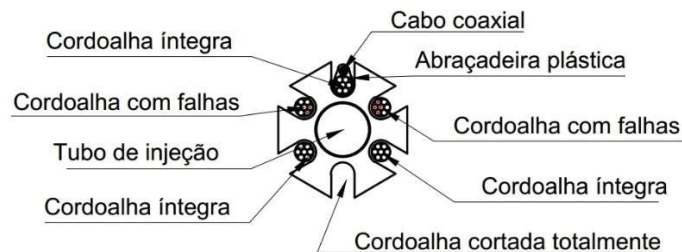
Figura 3.16 – Tirante com redução de seção



LEGENDA: a) Detalhes do tirante; b) Redução de seção

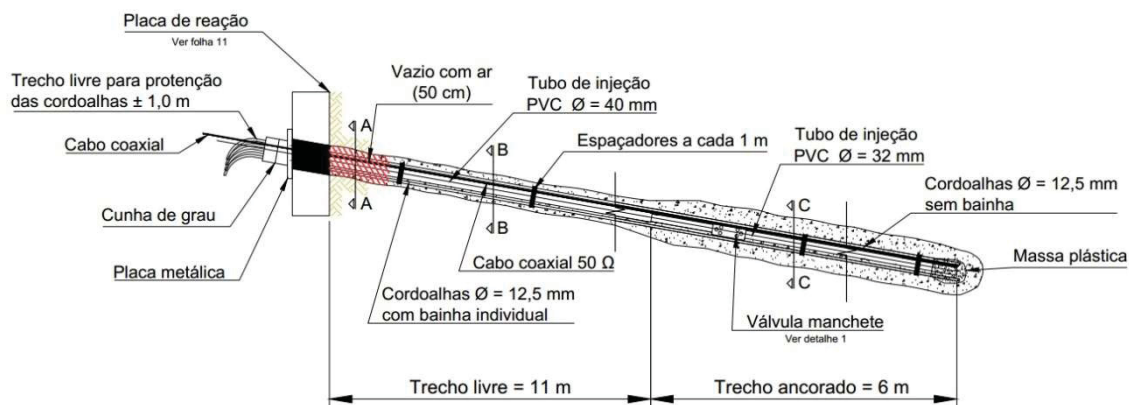
Nas cordoalhas, também foi realizada a redução de seção das cordoalhas e realizado corte total para simulação de corrosão (T7). Em um mesmo tirante foram mantidos 3 tirantes íntegros, intercalados por cordoalhas com cortes de 2 fios, 4 fios e total, como apresentado na Figura 3.17. Nos tirantes de fio optou-se em não realizar cortes devido à semelhança com as cordoalhas.

Figura 3.17 – Simulação de corrosão nos tirantes de cordoalha



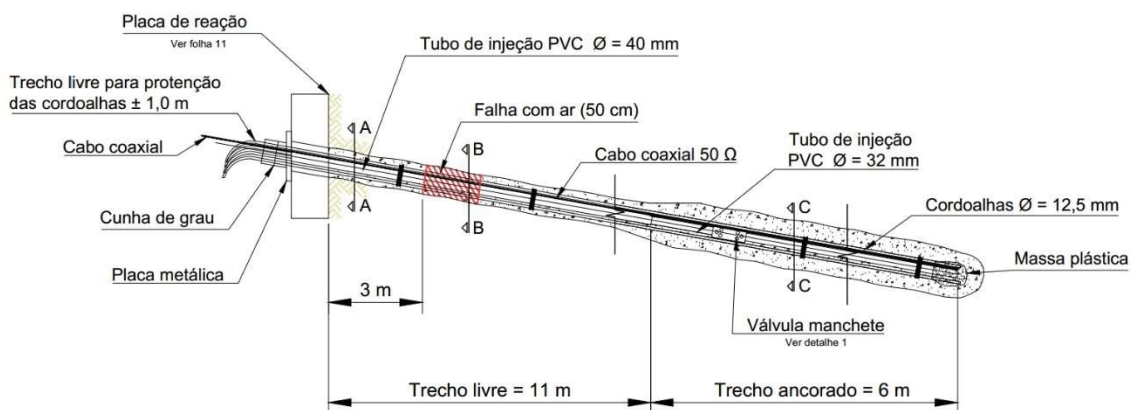
Como as falhas de concretagem em tirantes ocorrem normalmente próximo à cabeça, foram simuladas tais falhas de ar com 50 cm nos tirantes de cordoalha (T5) e fio (T9).

Figura 3.18 – Tirante com falha no início do furo com ar



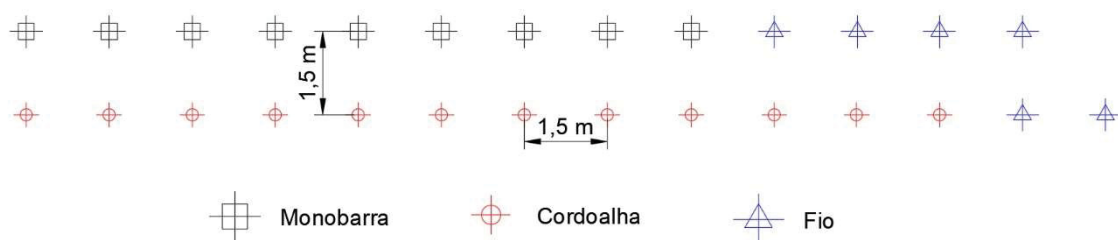
Nos tirantes de cordoalha ainda foi simulada uma falha no trecho livre com 50 cm, na mesma posição em que os vazios foram executados nos grampos à 3 m da cabeça, como indica a Figura 3.19.

Figura 3.19 – Tirante com falha no trecho livre



O espaçamento projetado para a distribuição dos tirantes na contenção foi de 1,5 m na horizontal e 1,5 m na vertical. Os tirantes de cordoalha foram dispostos na linha inferior devido a maior facilidade construtiva. A vista frontal pode ser observada na Figura 3.20. Os tirantes também foram executados em duas linhas para evitar o uso de andaimes na construção e na realização de ensaios.

Figura 3.20 – Vista frontal da cortina atirantada



O quantitativo da cortina atirantada do campo experimental é apresentado na Tabela 3.3. Nos tirantes de monobarra é utilizada somente uma barra por tirante, semelhante aos grampos, e nos tirantes de cordoalha e fio foram utilizadas 6 barras por tirante. No total foi executado aproximadamente 460 m de perfuração.

Tabela 3.3 – Quantitativo de aço da cortina atirantada

Tirante	Armação	Quantidade de tirantes	Quantidade de barras	Comprimento total
Monobarra	1 ϕ 32 mm	9	9	162 m
Cordoalha	6 ϕ 12,5 mm	12	72	1.296 m
Fio	6 ϕ 8 mm	6	36	648 m

3.3.EXECUÇÃO DO CAMPO EXPERIMENTAL

A execução do campo experimental foi realizada com o apoio da empresa Serviços Especiais de Engenharia Ltda – SEEL. A cortina atirantada foi realizada de acordo com a norma NBR 5629 – Execução de Tirantes Ancorados no Terreno, de abril de 2006 (ABNT, 2006), uma vez que a obra ocorreu anterior à norma atualizada de 2018 entrar em vigor. Uma vista geral do canteiro de obras é apresentada na Figura 3.21.

Figura 3.21 – Organização do canteiro de obras

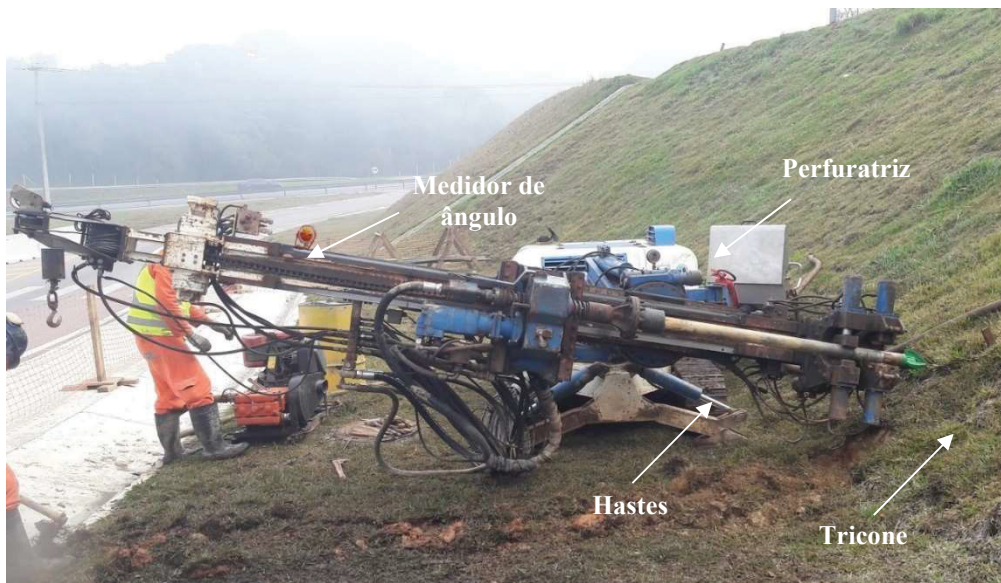


3.3.1. Solo grampeado

Para o solo grampeado foram executados 30 elementos, sendo 24 grampos com 6 m de comprimento e 6 grampos com 12 m. A perfuração foi realizada com 10 cm de diâmetro e a inclinação de 10° com a horizontal. Foram utilizados espaçadores plásticos a cada metro para evitar o contato da barra com as paredes da perfuração. Em todos os grampos, com exceção dos grampos da variação G1 e G3, foi realizada a reinjeção com um tubo de PVC pré-instalado. Além disso, em todos os elementos foi colocado um cabo coaxial lateralmente a barra para avaliação do método TDR. O cabo foi fixado com braçadeiras plásticas e com fita isolante no final da barra para não soltar quando o grampo foi inserido na perfuração. O cabo coaxial utilizado foi o RG-58 da marca RFS KMP, com impedância elétrica de 50 Ω , a mesma do equipamento TDR, evitando assim o uso de adaptadores.

O equipamento utilizado para perfuração foi do modelo SM-5C, fabricado pela empresa italiana SoilMec. Para realizar os furos foram instaladas as hastes rosqueadas até atingir a profundidade desejada por meio da rotação de um tricône, que foi posicionado na extremidade para realizar a perfuração com injeção de água, como indicado na Figura 3.22. O tricône era de 10 cm de diâmetro, e a inclinação de 10° com a horizontal foi verificada com um medidor de ângulo. A velocidade média de perfuração foi de um metro por minuto.

Figura 3.22 – Execução da perfuração dos grampos



Após a perfuração, as barras foram inseridas manualmente dentro do furo (Figura 3.23), já com o tubo de reinjeção (grampos tipo 2) e o cabo coaxial preso ao grampo. Em todos os casos a barra foi mantida 20 cm para fora do terreno, de modo que a extremidade não ficasse enterrada.

Figura 3.23 – Colocação do grampo dentro da perfuração



A injeção da bainha consiste na colocação de um tubo provisório junto com o grampo e injeção no furo com a calda de cimento de maneira ascendente, do fundo da perfuração para a superfície. O tubo de injeção foi retirado lentamente do furo a partir do

momento que calda com água extravasava pela perfuração, de modo a retirar toda a água presente no furo devido à etapa de perfuração.

Para os grampos tipo 2, com reinjeção, foi realizada a injeção no tubo de injeção inserido junto com a barra, após no mínimo 6 horas da execução da bainha. Esse tubo apresentava cortes de metro a metro, protegidos com uma fita crepe, para não entrar calda de cimento da injeção da bainha ou solo da perfuração. A injeção foi realizada pela extremidade do tubo com pressão. Cabe salientar que não é possível saber em qual ou em quantos “cortes” houve a reinjeção. No entanto, tal procedimento contribuiu para o preenchimento de eventuais vazios que podem ter se formado na calda de cimento ao redor das barras. As barras com tubos de reinjeção são apresentadas na Figura 3.24.

Figura 3.24 – Grampos com tubo de reinjeção



Para preparação da calda de cimento foi utilizado um misturador manual em campo, e a relação água/cimento foi de 0,5. Ou seja, para cada saco de cimento de 50 kg, foi adicionado 25 litros de água.

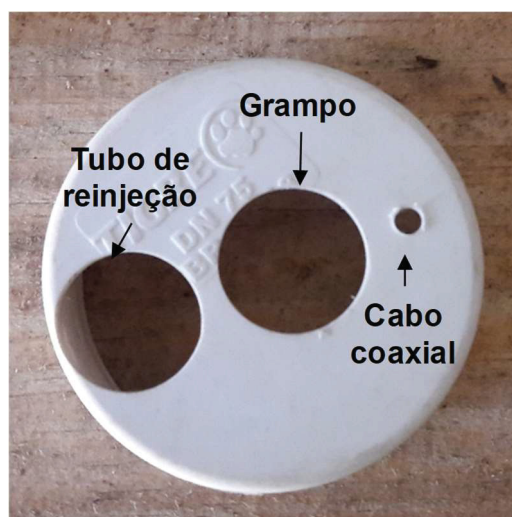
Tanto para as barras de 12 m, quanto para a variação G5, com o posicionamento das emendas no início, meio e fim, foi necessário utilizar as luvas de emendas com dimensão 115x40 mm, feitas para a rosca da barra Gewy (Figura 3.25).

Figura 3.25 – Luva de emenda rosqueada



Para as falhas na calda de cimento da variação G7, G8 e G9 foi necessário testar diferentes métodos e materiais, para que houvesse a garantia que a barra estivesse envolta somente com ar, sem entrada de calda de cimento. Optou-se em utilizar tubo de PVC de 75 mm de diâmetro com dois *caps* (tampas), uma em cada extremidade do tubo, para realizar o vazio com ar. Porém, foi necessário realizar furos nos *caps* para a passagem da barra, do tubo de reinjeção e do cabo coaxial, e cortar a aba para melhor adequação ao furo de 10 cm, como pode ser observado na Figura 3.26.

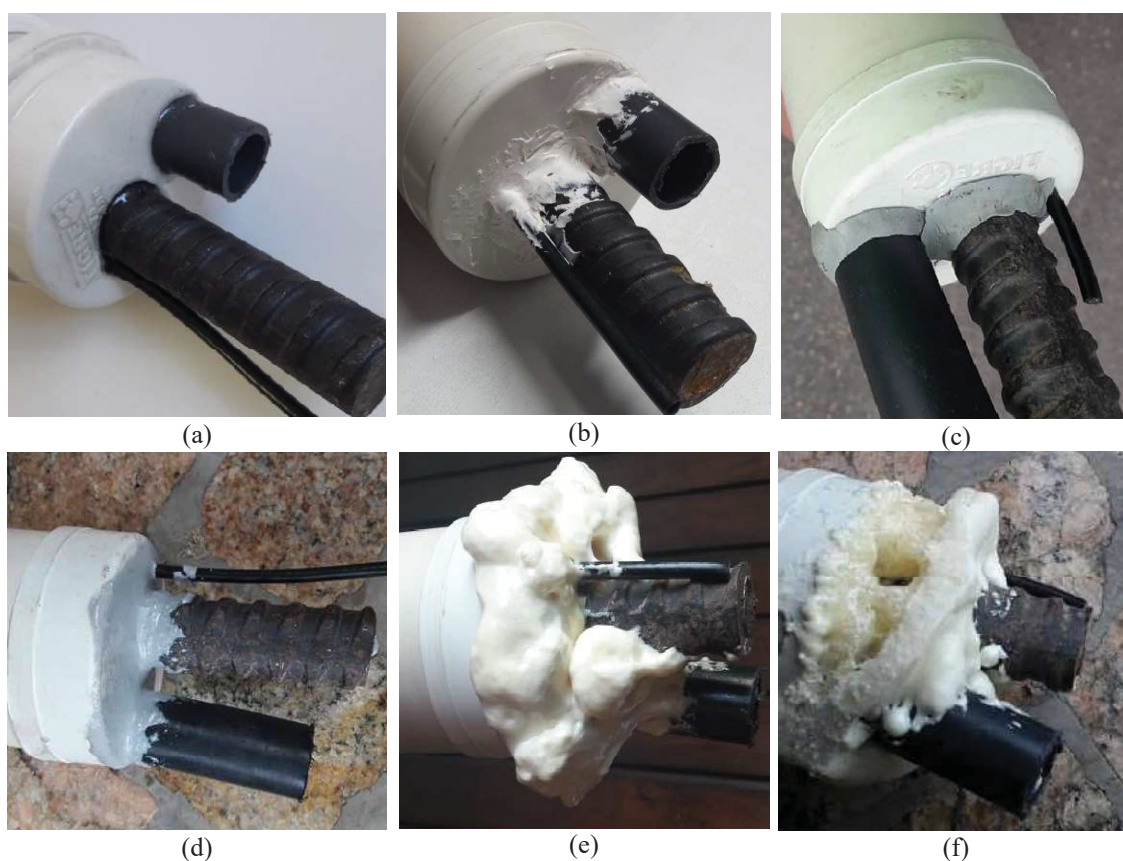
Figura 3.26 – Caps utilizados para a simulação de falhas com ar



Para que a calda não passasse entre o furo e a barra, foram testados diferentes materiais para vedação, como silicone, “cascola”, epóxi, cola a base de epóxi e espuma de poliuretano, como indica a Figura 3.27. Após a secagem destes materiais foram realizados testes para averiguar a estanqueidade com água e a resistência de ligação entre os diferentes materiais: cola, plástico e aço.

Com base nesses procedimentos foi possível concluir que depois de seco, o silicone (Figura 3.27a) apresentou boa flexibilidade, porém não proporcionava boa aderência à barra de aço e estanqueidade. O epóxi (Figura 3.27c) inicialmente apresentou boa aderência, mas ao forçar o *cap*, o material trincou por falta de aderência ao PVC. O adesivo estrutural a base de epóxi (*compound* adesivo – Figura 3.27d), apresentou ótima aderência, mas devido a sua fluidez (média-alta), sua aplicação em campo se tornou inviável. Com relação à espuma de poliuretano (Figura 3.27e/f), sua aplicação foi desconsiderada para esse fim por caracterizar um material com grande variação volumétrica. A “Cascola Monta & Fixa PL 500” (Figura 3.27b) foi o produto que apresentou melhor aderência e consistência em comparação aos demais para a finalidade proposta, além de não fissurar depois de seca, e por isso foi selecionada para aplicação em campo.

Figura 3.27 – Testes de vedação dos caps com diferentes materiais



LEGENDA: a) Silicone; b) Cascola; c) Epóxi; d) Adesivo estrutural a base de epóxi; e) Espuma de poliuretano; f) Acabamento da espuma

A montagem das barras com os tubos de PVC furados e aplicação de cascola para vedação é apresentada na Figura 3.28, com as falhas de 10 cm, 50 cm e 100 cm. Os cortes dos tubos de reinjeção foram realizados com pelo menos um metro da falha com o PVC.

Figura 3.28 – Montagem das falhas com ar nos grampos



A vista frontal do solo grampeado é apresentada na Figura 3.29, em que foram colocados protetor nas cabeças das barras a fim de evitar acidentes.

Figura 3.29 – Vista frontal do solo grampeado



3.3.2. Cortina atirantada

Na cortina atirantada foram executados 27 tirantes com 18 m de comprimento, sendo 6 m de trecho ancorado, 11 m de trecho livre e 1 m para fora do terreno. A inclinação adotada foi de 15° , com um furo de 12,7 cm de diâmetro e 17,5 m de comprimento. Também foi colocado um cabo coaxial preso paralelo à todas as barras.

O processo executivo foi semelhante aos grampos, após realizar a perfuração, o tirante foi inserido no furo, foi realizada a injeção da bainha ao longo de todo o elemento com um tubo de injeção provisório e a reinjeção foi executada após 6 horas da injeção da

bainha. A reinjeção é o procedimento que se diferencia dos grampos, pois para os tirantes é utilizado um tubo de PVC como tubo de injeção, com 40 mm de diâmetro no trecho livre e 32 mm de diâmetro no trecho ancorado. O tubo no trecho ancorado possui furos setorizados a cada metro, onde é realizada a reinjeção. Os furos são denominados válvula manchete, e são revestidos com uma borracha, para evitar que entre solo ou calda de cimento da bainha.

Para realizar a reinjeção é inserido um outro tubo de diâmetro inferior, denominado obturador, dentro do tubo de PVC, que possui borrachas em suas extremidades (obturador duplo), de modo que a injeção ocorra somente na válvula manchete escolhida. Essa metodologia permite que ocorram mais fases de reinjeção, pois o obturador utilizado entra justo no tubo de PVC do trecho ancorado, não deixando muita calda de cimento no tubo. Além disso, a borracha que está sobre os furos expande, e após a injeção ela volta ao normal, o que permite limpar o tubo de injeção com água, sem que a água vaze pelos furos. O detalhamento da válvula manchete e do obturador duplo é apresentado na Figura 3.30.

Figura 3.30 – Reinjeção dos tirantes



3.3.2.1. Monobarras

As monobarras utilizadas foram fornecidas pela empresa Dywidag, com barras Gewy de 32 mm de diâmetro e 6 m de comprimento, por isso foi necessário luvas de emendas para unir 3 barras e obter o comprimento de 18 m. Também foram fornecidas as

placas e roscas necessárias para a protensão dos tirantes. No trecho livre dos tirantes monobarra foi utilizado um tubo de polietileno de 40 mm de diâmetro para proteção anticorrosiva e para manter o trecho “livre” para protensão. O tubo foi preso com arame e massa plástica na extremidade para evitar corrosão e entrada de calda dentro do tubo, como mostra a Figura 3.31.

Figura 3.31 – BAINHA INDIVIDUAL DAS MONOBARRAS



Nas monobarras foram realizados dois processos executivos, conforme o tipo de proteção: o tipo 1, com bainha individual, e o tipo 2, composto por bainha individual e coletiva. As demais variações das cordoalhas e fios foram executadas com o tipo 1. Para a execução dos elementos tipo 2 foram utilizados tubos de PVC com 10 cm de diâmetro que foram inseridas a barra e o tubo de reinjeção. O trecho ancorado permaneceu igual ao das demais barras. A bainha com a calda de cimento foi realizada somente ao redor do tubo e o cabo coaxial instalado do lado externo, como pode ser observado na Figura 3.32.

Figura 3.32 – Execução da monobarra tipo 2



A variação T3 das monobarras consistiu em reduzir 20% a seção do aço para simular corrosão com extensão de 10 cm. A falha foi realizada com uma esmerilhadeira posicionada à 1,5 m da extremidade da barra, e à 50 cm do paramento depois de instalada. A redução de seção pode ser observada na Figura 3.33. O trecho com redução de seção foi mantido sem a bainha individual, de modo a simular uma falha na proteção anticorrosiva.

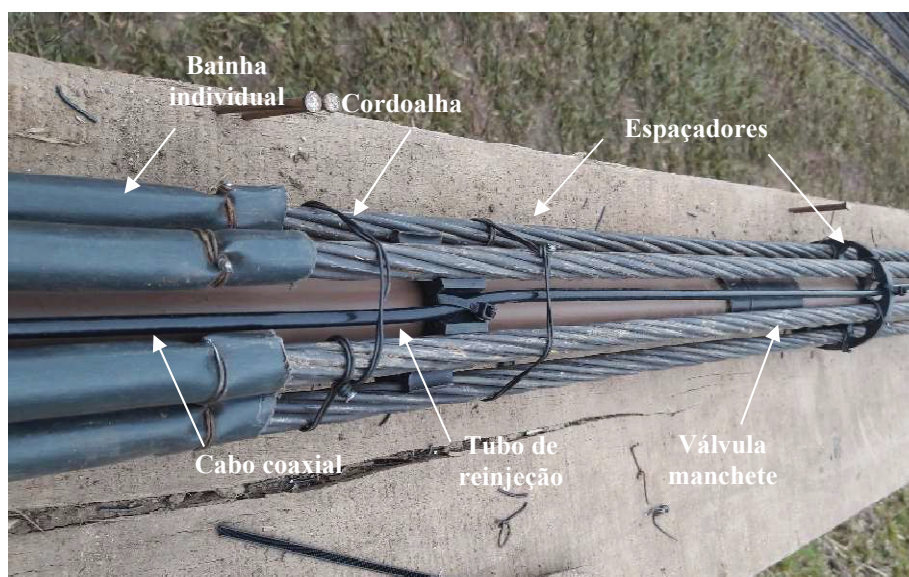
Figura 3.33 – Redução de seção das monobarras



3.3.2.2. Cordoalhas

Os tirantes de cordoalha são compostos de 6 cordoalhas com 12,7 mm de diâmetro cada e não apresentam emendas. Por ser um elemento grande, com 18 metros de comprimento, foi necessário utilizar uma bancada para o preparo dos tirantes, com a colocação de espaçadores a cada metro, e o tubo de reinjeção foi instalado no centro. A bainha individual foi composta de um tubo propileno de 16 mm de diâmetro e foi colocada em todas as cordoalhas do tirante, no trecho livre. O cabo coaxial foi preso nos espaçadores com braçadeiras plásticas, entre cordoalhas. Na Figura 3.34 pode-se observar o final do trecho livre e o início do trecho ancorado do tirante.

Figura 3.34 – Detalhe do tirante de cordoalha



A variação T5, com falha no início da barra com comprimento de 50 cm, foi executada sem considerar o preenchimento posterior da boca do furo (Figura 3.35). Tal variação teve o objetivo de simular vazios que ocorrem normalmente devido à retração e acomodação da calda de cimento ao longo do furo.

Figura 3.35 – Falha no início do furo com 50 cm de ar



Nos tirantes também foi executada uma falha com ar no trecho livre da cordoalha, e com a mesma distância do paramento que os grampos com a mesma anomalia. A falha, com comprimento de 50 cm, foi simulada com um cano de PVC de 10 cm de diâmetro cortado lateralmente e encaixado entre dois espaçadores. O preenchimento dos espaços vazios foi realizado com espuma de poliuretano, que apresenta grande aderência entre materiais plásticos, e finalizado com fita *silver tape*.

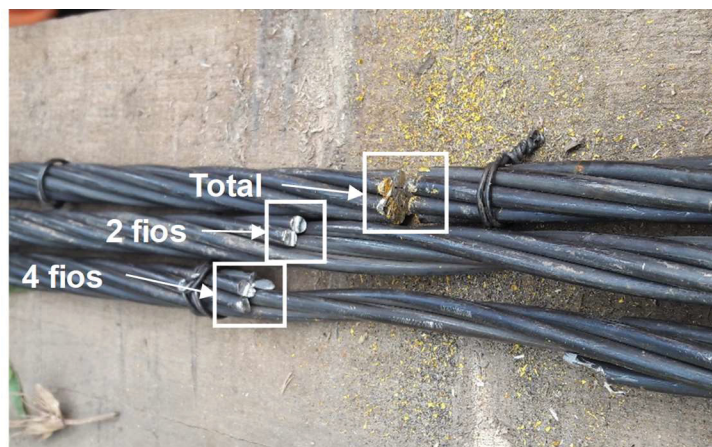
Figura 3.36 – Falha com ar nas cordoalhas



A última variação nos tirantes de cordoalha consistiu na simulação de corrosão das cordoalhas. Das 6 cordoalhas do tirante, uma delas teve corte total, outra um corte de 4

fios, e uma terceira um corte de 2 fios (Figura 3.37). As cordoalhas com anomalias foram identificadas e intercaladas com cordoalhas íntegras.

Figura 3.37 – Cortes nas cordoalhas



3.3.2.3. Tirantes de fios

Os tirantes de fios foram compostos por 6 fios de 8 mm de diâmetro e 18 m de comprimento. A montagem desses elementos foi realizada de maneira semelhante aos de cordoalha, com uma mangueira para a bainha individual, porém de diâmetro menor (10 cm). Para esse tipo de tirante foram realizadas somente duas variações: elemento íntegro (T8) e com uma falha com ar no início do furo (T9). O detalhe do trecho livre e ancorado de um tirante de fio pode ser observado na Figura 3.38.

Figura 3.38 – Tirante de fio



A vista geral da contenção experimental com cortina atirantada após a execução e antes da colocação das placas de protensão é apresentada na Figura 3.39.

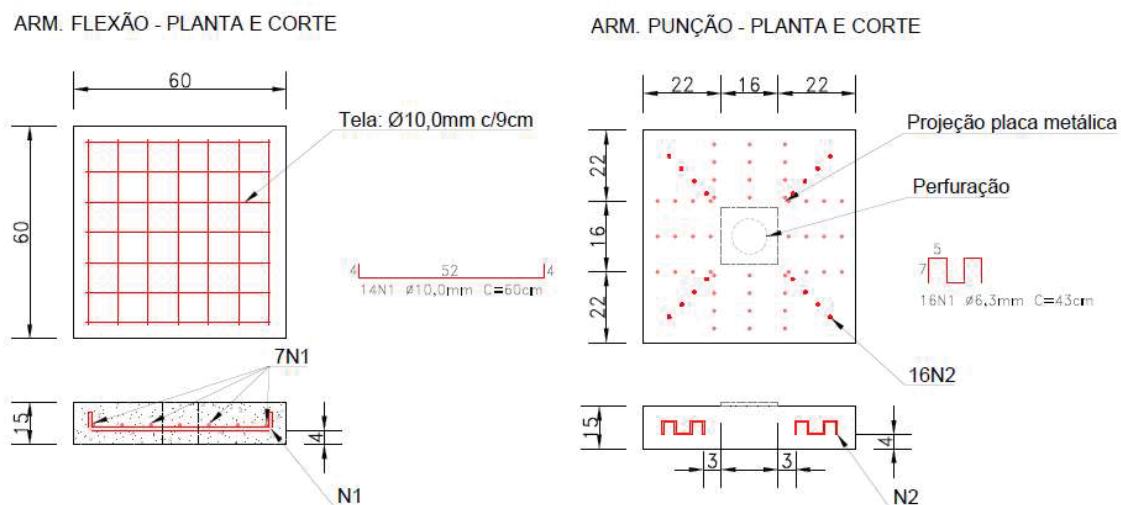
Figura 3.39 – Vista geral da cortina atirantada



3.3.2.4. Protensão dos tirantes

A protensão dos tirantes seguiu os procedimentos descritos na norma NBR 5629 (ABNT, 2006). Para a reação das barras durante a protensão, foram confeccionadas placas de concreto armado de 60x60 cm e 15 cm de altura, dimensionadas para uma carga de projeto de 15 tf. O projeto desses elementos pode ser visualizado na Figura 3.40, no qual é possível observar as armaduras de flexão e punção, além do efeito das placas de aço dos elementos. Para o dimensionamento, considerou-se a menor placa utilizada (das monobarras) com dimensões de 16x16 cm.

Figura 3.40 – Projeto das placas de reação dos tirantes



A utilização das placas de reação de concreto armado foi uma alternativa de substituição da usual parede da cortina atirantada. Tais elementos foram construídos durante a fase da instalação dos tirantes, de modo a promover o tempo de cura necessário para o concreto. As placas foram projetadas para resistir à punção e às forças de flexão causadas pela protensão dos tirantes. O talude foi preparado para a inserção das placas com ângulo de 15° em relação à vertical e de modo que ficassem posicionadas na direção perpendicular aos tirantes, sem a necessidade da utilização da cunha de grau, como apresenta a Figura 3.41a.

Posteriormente ao corte realizado no terreno, as placas foram posicionadas para a protensão dos tirantes. Os elementos foram mantidos centralizados no furo da placa de concreto e sua inclinação foi verificada (Figura 3.41b).

Figura 3.41 – Preparação do talude para colocação das placas de concreto



(a)

(b)

LEGENDA: a) Corte; b) Disposição das placas

Uma chapa metálica também foi colocada sobre a placa de concreto, que tem a função de apoiar a rosca dos tirantes de monobarra. A placa foi fornecida pela *Dywidag* com 16×16 cm, e cabe salientar que foi necessário furar a chapa para a passagem do cabo coaxial (Figura 3.45a).

As placas utilizadas para os tirantes de cordoalha e fio eram de 30×30 cm e sobre elas foi colocado o bloco de ancoragem, com 6 furos para a passagem das cordoalhas e fios e um furo central que foi utilizado para passagem do cabo coaxial, assim, não foi necessário furar as placas (Figura 3.45b).

Na etapa de protensão dos tirantes foi utilizado um macaco pneumático com função de tensionar os tirantes com o pistão interno. O pistão foi acionado por uma bomba

equipada com um medidor de pressão (manômetro) por onde era controlada a força aplicada à barra. No tensionamento dos tirantes tipo monobarra foi utilizada uma célula de carga para averiguação da força aplicada. O sistema utilizado para protensão dos tirantes é apresentado na Figura 3.42. Nos tirantes de cordoalha fez-se necessário um macaco pneumático maior, devido ao tamanho do pistão, impossibilitando a utilização da célula de carga. Uma visão geral dos equipamentos utilizados para a protensão ser observada na Figura 3.43.

Figura 3.42 - Sistema para protensão dos tirantes

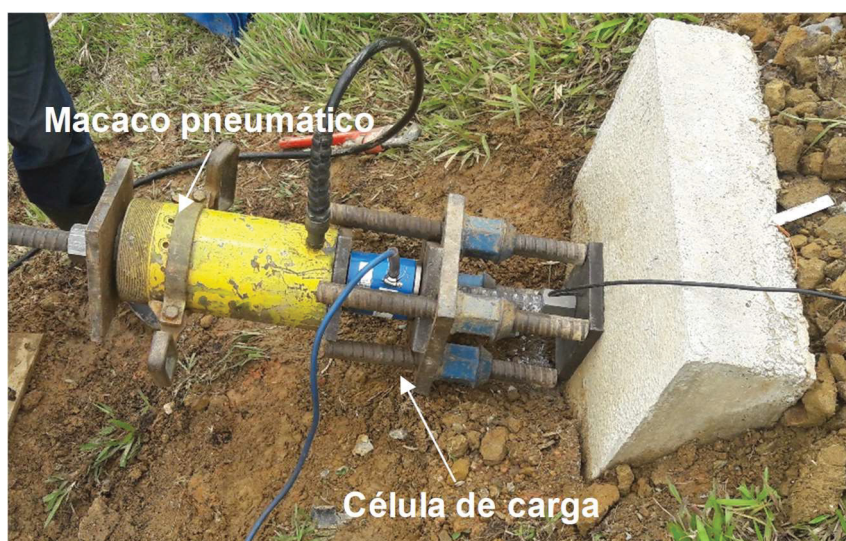
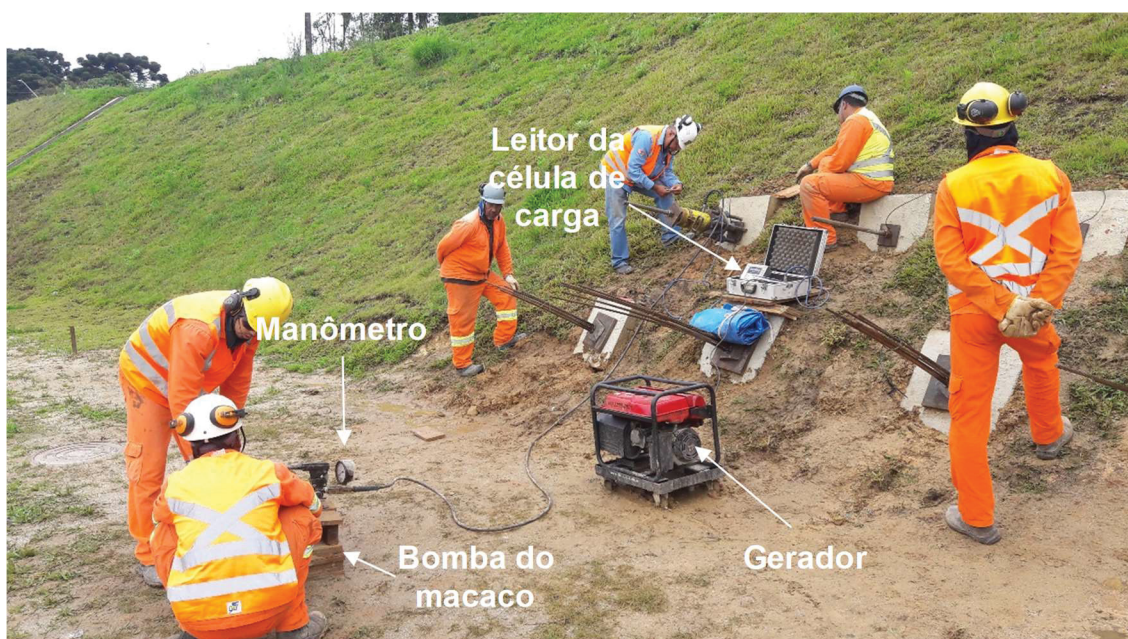


Figura 3.43 - Equipamento utilizados na protensão



Em dois tirantes de monobarra o solo rompeu, e não foi possível atingir a carga prevista de 15 tf, e foram protendidos com 7 tf, que foi a carga suportada. A deformação

do solo é apresentada na Figura 3.44. Além disso, um tirante de cordoalha foi protendido com 12 tf pois a placa de concreto girou no terreno e com o aumento da carga não seria possível a inserção dos clavetes no bloco.

Figura 3.44 – Deformação do solo



Na etapa final da protensão, após a aplicação das cargas nos tirantes e do ensaio de recebimento, as barras e as cordoalhas foram travadas na placa de concreto com a carga final de protensão, de modo que não permitisse a perda da carga. Os demais tirantes de monobarra e cordoalha foram protendidos com a carga de projeto. Cabe salientar que para as monobarras foi utilizada uma porca para manter o tirante protendido e nos tirantes e fios foram utilizadas peças que encaixam nos furos do bloco de ancoragem, denominadas clavetes. Os diferentes tipos de travamento podem ser observados na Figura 3.45.

Figura 3.45 – Chapas metálicas



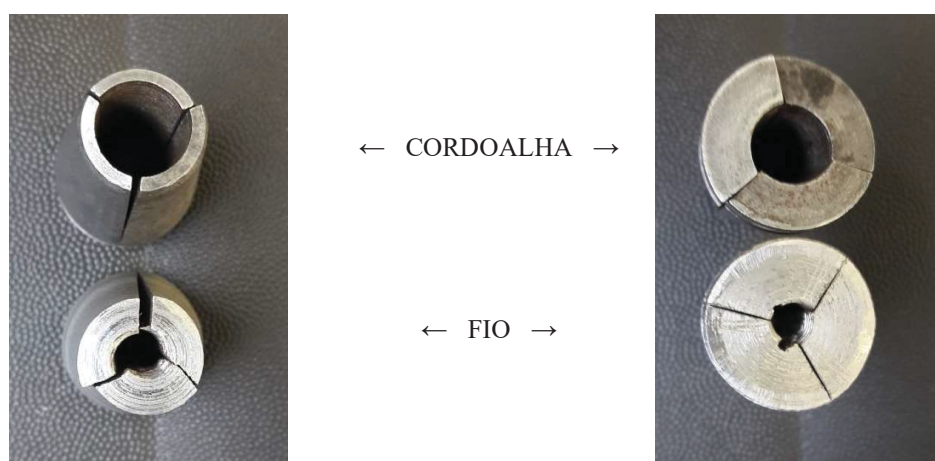
(a)

(b)

LEGENDA: a) Monobarras; b) Cordoalhas

Para a protensão dos tirantes de fio foi utilizado o mesmo bloco de ancoragem das cordoalhas e um clavete especial para o travamento. Cabe salientar que não são mais executadas obras com tirantes de fio, e não foi possível encontrar peças compatíveis com o fio e o bloco de ancoragem. Por esse motivo, foi fabricado um clavete especial para utilização nos fios e utilizados no bloco de ancoragem das cordoalhas. Na Figura 3.46 é possível observar os elementos. A imagem da esquerda indica a parte da peça que entra no bloco e a da esquerda a parte externa do clavete.

Figura 3.46 – Clavetes para os tirantes de cordoalha e fio



Durante a protensão dos tirantes de fio foram constatadas dificuldades na fixação dos clavetes nos blocos de protensão, pois esses deslizavam com a aplicação da carga. Como consequência disso, não foi possível realizar a protensão destes elementos. A placa metálica, os blocos e os clavetes foram mantidos instalados nos tirantes, de modo a apresentar maior similaridade com casos reais. Uma visão geral dos tirantes após a protensão pode ser observada na Figura 3.47.

Figura 3.47 – Vista da área ao final da protensão dos tirantes



3.4. ENSAIOS NO CAMPO EXPERIMENTAL

No campo experimental foram realizados ensaios para testar quatro métodos não destrutivos: *Time Domain Reflectometry*, *Surface Wave Time Domain Reflectometry*, *Reflectometric Impulse Measurement Technique* e Resistência Elétrica. Essa etapa teve como objetivo conhecer as metodologias, realizar ensaios de calibração nos elementos com comprimento e variações conhecidas, e identificar a aplicabilidade e limitações das técnicas. Na Figura 3.48 são apresentados os diferentes tipos de barras encontrados na contenção experimental.

Figura 3.48 – Elementos da contenção experimental



LEGENDA: (a) Grampo; (b) Tirante de monobarra; (c) Tirante de cordoalha; (d) Tirante de fio

3.4.1. *Time Domain Reflectometry*

Os procedimentos de ensaio com TDR foram baseados nos estudos de Chung *et al.* (2016) que utilizaram o cabo coaxial paralelo a barra. Para realização dos ensaios foi

utilizado o equipamento TDR 200 da marca *Campbell Scientific* (Figura 3.49). As especificações técnicas são apresentadas na Tabela 3.4. O equipamento precisa ser conectado à um notebook através de um cabo USB (para alimentação e transferência de dados) e com o software PC-TDR os pulsos são gerados e obtidos os gráficos.

Tabela 3.4 – Especificações técnicas do equipamento TDR 200

Características técnicas	
Impedância de saída	50 Ω
Amplitude do pulso de saída	250 mV
Tempo de subida do pulso	300 ps
Dimensões	210 x 110 x 55 mm
Peso	700 g
Alcance	2100 m
Precisão	1,8 mm
Software	PCTDR
Fonte de energia	Bateria 12 V

FONTE: Campbell (2017)

Figura 3.49 – Equipamento TDR 200



O procedimento de ensaio adotado consistiu no uso do equipamento TDR 200 em conjunto com um cabo coaxial auxiliar, cuja conexão foi realizada através de um conector BNC na extremidade do equipamento e na outra adaptadores como garras jacarés ou terminal de engate rápido para a conexão com os elementos de ancoragem.

Para realização dos ensaios na contenção experimental, foi necessário desencapar todos os cabos coaxiais na extremidade externa, que posteriormente foram protegidos

com um elemento plástico ou fita isolante, evitando a corrosão deles. Também foi necessário lixar as pontas das barras para retirar sujeira, calda de cimento e ferrugem de modo a melhorar o contato elétrico.

Para a realização dos ensaios TDR com medições no cabo coaxial e nas barras, foi necessário realizar adaptações. Foi utilizado um cabo coaxial com o fio interno soldado em um terminal de engate rápido para conexão com o cabo coaxial pré-instalado na barra. Para o fio externo do cabo coaxial que fica em contato com a barra, foram utilizados alguns prendedores, como indica a Figura 3.50.

Figura 3.50 – Adaptação do ensaio TDR



LEGENDA: (a) Grampo; (b) Monobarra; (c) Cordoalha e (d) Fio

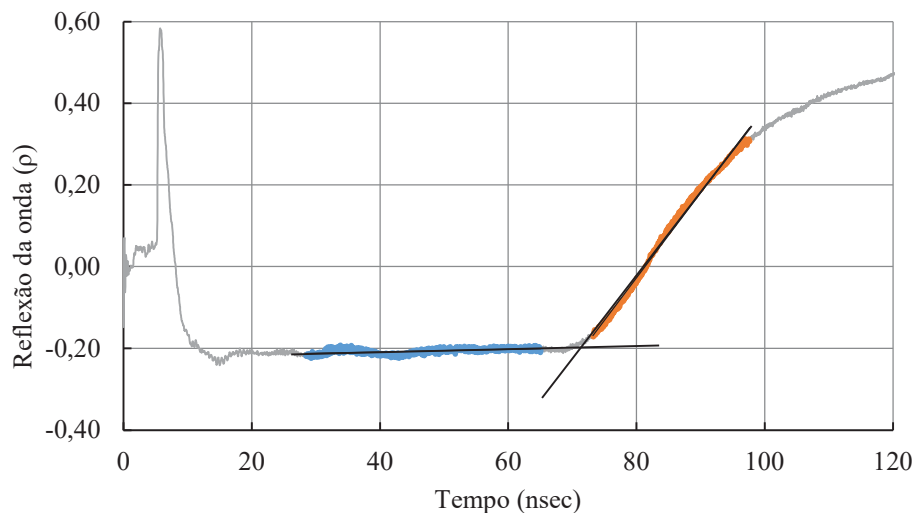
A primeira etapa do estudo consistiu na realização de medições nos cabos coaxiais pré-instalados, a fim de verificar sua integridade e comprimento. Esta medição é possível tendo em vista que a velocidade de propagação da onda no interior do cabo é conhecida e que os cabos possuem o mesmo comprimento das barras.

Posteriormente, foram realizados ensaios nos grampos e tirantes para calibrar a técnica na determinação da velocidade de propagação do pulso elétrico nas barras íntegras. Também foram ensaiadas as barras com falhas conhecidas para avaliar se a técnica é capaz de identificá-las. Com o tempo de propagação do pulso nas barras, foram realizadas três principais avaliações, que são apresentadas na sequência.

Nos gráficos, o eixo das abscissas indica o tempo de propagação da onda elétrica em nano segundos (ns) e o eixo das ordenadas é o coeficiente de reflexão da onda (ρ). A partir dos gráficos, é obtido o tempo de propagação do pulso elétrico de alta frequência no meio medido. As reflexões ocorrem devido ao final do cabo ou mudança de meio em que a onda se propaga. Com o conhecimento do comprimento do cabo ou das barras foi possível determinar a velocidade de propagação do pulso. Cabe salientar que os resultados obtidos a partir da calibração do TDR são usualmente comparados com a velocidade de propagação da luz no vácuo ($\sim 3,0 \times 10^8$ m/s).

Para obtenção do tempo correto de propagação do pulso, deve-se descontar o tempo inicial, que ocorre devido às configurações do ensaio, do comprimento do cabo auxiliar e do equipamento. Para determinação do tempo final utilizou-se o método da dupla tangente, que consiste na no ponto de intersecção das duas tangentes formadas com a curva (CHUNG; LIN, 2009). Para isso, a curva foi dividida em duas partes, horizontal e inclinada. Para cada uma delas foi gerada uma linha de tendência e a equação das duas retas foi igualada, para a obtenção do ponto x (tempo) em que elas se tocam, como indicado na Figura 3.51

Figura 3.51 – Exemplo do método da dupla tangente



3.4.1.1. Estimativa da velocidade de propagação na calda de cimento

Para a estimativa da velocidade de propagação do pulso na calda de cimento foi utilizada a Equação (6), que leva em consideração os comprimentos da barra em contato com o ar e com a calda, e a velocidade de propagação da barra a ar.

$$V_{calda} = \frac{L_{calda}}{\left(t_{total} - \frac{L_{ar}}{V_{ar}}\right)} \quad (6)$$

Onde:

V_{calda} = Velocidade de propagação do pulso na calda de cimento (m/s)

V_{ar} = Velocidade de propagação do pulso no ar (m/s)

L_{calda} = Comprimento da barra em contato com a calda de cimento (m)

L_{ar} = Comprimento da barra em contato com o ar (m)

t_{total} = Tempo total de reflexão do pulso, obtido no ensaio (s)

Para os grampos, o comprimento da barra em contato com o ar foi obtido a partir da medição da extremidade da barra para fora do terreno somado ao comprimento das falhas, se houver. Para os tirantes foi adotado o valor do trecho livre de 12,0 m. Os valores do comprimento da barra em contato com a calda de cimento foram calculados com o comprimento total da barra subtraído do comprimento em contato com o ar. A velocidade de propagação no ar foi obtida nos ensaios de laboratório.

3.4.1.2. Estimativa da velocidade de propagação média

A análise da velocidade de propagação média na barra foi realizada uma vez que em uma contenção já executada não é possível identificar qual o comprimento do trecho livre e ancorado. Desse modo, foi obtida a velocidade a partir do comprimento conhecido de cada barra, de 6, 12 ou 18 m. Para o cálculo foi utilizada a Equação (7), derivada da Equação (2). Para o TDR utilizado não é necessário multiplicar o comprimento da barra por dois (ida e volta do pulso), pois já é considerado no *software*.

$$V_{\text{média}} = \frac{L_{\text{total}}}{t} \quad (7)$$

Onde:

$V_{\text{média}}$ = Velocidade de propagação média do pulso elétrico (m/s)

L_{total} = Comprimento total da barra (m)

t = Tempo de propagação do pulso obtido no ensaio (ns)

3.4.1.3. Estimativa do comprimento da barra

A última análise realizada foi a estimativa do comprimento da barra, considerando os valores de velocidade de propagação média obtida nos ensaios anteriores. A Equação (8) foi utilizada para obter o comprimento estimado das barras.

$$L_{\text{estimado}} = V_{\text{média}} \times t \quad (8)$$

Onde:

$V_{\text{média}}$ = Velocidade de propagação média do pulso elétrico (m/s)

L_{estimado} = Comprimento estimado da barra (m)

t = Tempo de propagação do pulso obtido no ensaio (ns)

Esta estimativa visa simular como seria a análise dos dados sem o conhecimento do comprimento da barra. O erro entre o comprimento real e o comprimento obtido também foi calculado.

3.4.1.4. Surface Wave Time Domain Reflectometry

O método *Surface Wave Time Domain Reflectometry* (SW-TDR) permite que uma pré-avaliação de barras que não possuem fio elétrico ou cabo coaxial pré-instalado. Em campo foram realizados testes semelhantes aos apresentados por Yu *et al.* (2018) e Lee

& Yu. (2019), em que o ensaio é realizado em barras paralelas. No entanto, estes ensaios não apresentaram resultados significativos, provavelmente devido a influência do solo entre as barras.

Os ensaios realizados em laboratório em barras de aço com o cone goubau para avaliar o método SW-TDR são apresentados no item 4.1.5.

3.4.1.5. *Reflectometric Impulse Measurement Technique*

Também foi avaliada a metodologia denominada *Reflectometric Impulse Measurement Technique*. O procedimento de ensaio baseia-se em um conceito semelhante ao do TDR, porém sem a necessidade do cabo coaxial pré-instalado paralelo às barras. O ensaio propõe-se a detectar falhas na calda de cimento e no aço.

No método, o equipamento utilizado era composto por um cabo que se divide em dois, uma extremidade com a “garra jacaré” e outro com um cabo que representa a “antena”. O cabo utilizado como antena foi um fio de cobre simples. A disposição da antena, na maioria das vezes, estava esticada lateralmente no talude, como indicado na Figura 3.52.

Figura 3.52 – Ensaio *Reflectometric Impulse Measurement Technique*



Para realização do ensaio as barras foram lixadas em uma parte do perímetro para melhorar o contato elétrico obtido através da garra. No total foram avaliados 3 grampos das variações G1, G4 e G5, e os 27 tirantes. Para os tirantes de monobarra foi necessária a utilização de uma garra maior, quando comparado com os tirantes de cordoalha e fio.

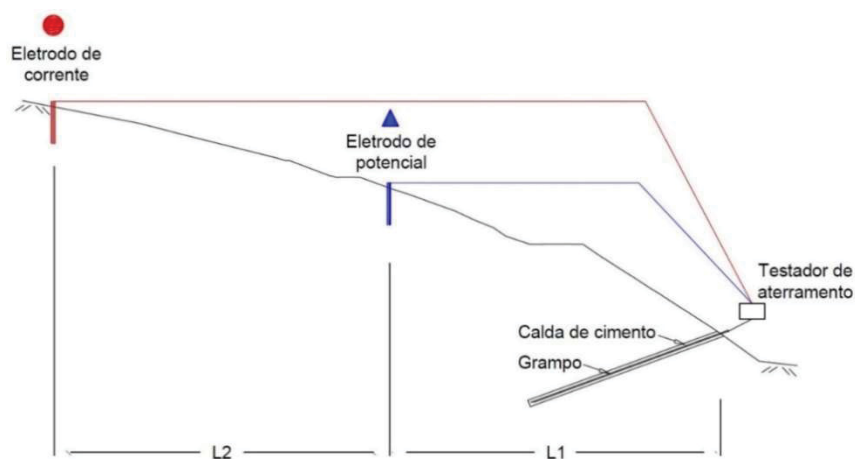
Nesses, o procedimento foi realizado em uma das cordoalhas ou um dos fios para representar o elemento em análise de forma integral.

As conclusões do método RIMT baseiam-se em ensaios laboratoriais com barras de ferro que possuíam anomalias previamente conhecidas. Sendo assim, cada anomalia presente nas barras tem relação com as variações nos critérios de impedância. Portanto, ao analisar a variação existente na leitura do sinal, seria possível identificar em que pontos existem anomalias a partir dos resultados obtidos. Em relação à leitura do comprimento das barras de ferro, esta depende do tempo em que o sinal leva para atingir o final do elemento e retornar até o equipamento e da velocidade de propagação do pulso elétrico no conjunto aço que, para este ensaio, foi adotada igual a $1,432 \times 10^8$ m/s.

3.4.2. Resistência Elétrica

Os ensaios de resistência elétrica foram realizados nas barras do solo grampeado e da cortina atirantada, de modo a entender a aplicabilidade e limitações da técnica. O procedimento consiste em gerar uma corrente elétrica entre a barra de aço e uma haste metálica inserida no solo do patamar superior do talude, que calcula a diferença de potencial do sistema através de uma terceira haste posicionada entre as duas. A resistência elétrica é obtida diretamente pelo equipamento em ohms (Ω). Para maior confiabilidade dos resultados, foram realizadas 5 medições e calculada a média, para cada elemento. Os procedimentos de ensaio seguiram os descritos em Cheung e Lo (2005) e Lee e OAP (2007). Na Figura 3.53 é apresentado um croqui esquemático com a configuração do ensaio.

Figura 3.53 – Configuração do ensaio não destrutivo da resistência elétrica



Cheung e Lo (2005) indicam que a distância linear entre o elemento e o eletrodo de potencial (L1) e entre o eletrodo de potencial e eletrodo de corrente (L2) seja de, no mínimo, 20 m e no máximo 50 m. Tal distância foi testada na etapa de calibração do método.

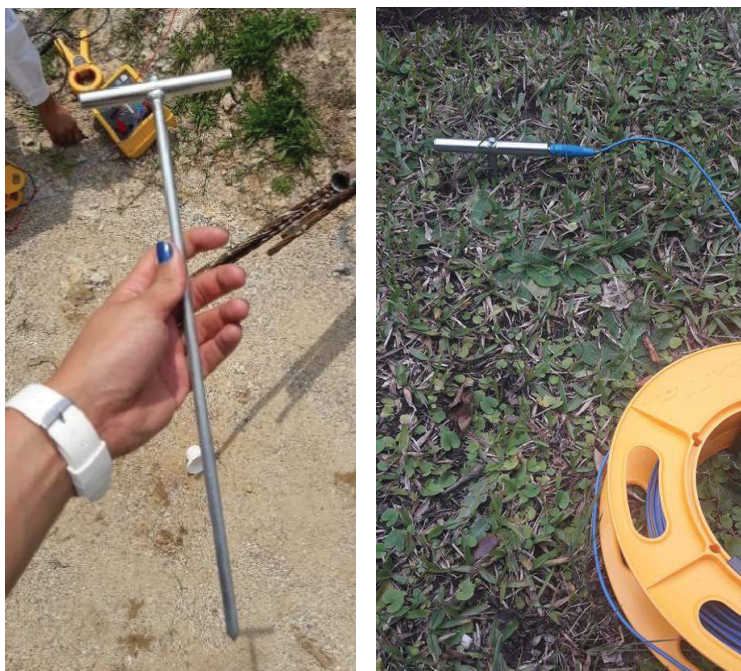
Na realização dos ensaios foi utilizado o medidor de aterramento FLUKE 1625-2 Geo, com faixa de leitura de $0,02 \Omega$ até $300 \text{ k}\Omega$. O equipamento é normalmente utilizado para medição da resistência de aterramento, e pode ser aplicado para medição de resistência elétrica de barras enterradas no solo, como em estruturas de solo grampeado (CHEUNG; LO, 2005). O medidor de aterramento é apresentado na Figura 3.54, juntamente com as bobinas de fio e a garra jacaré conectada a um grampo. Cabe salientar que, previamente à realização do ensaio foi necessário lixar as pontas das barras de modo a melhorar o contato elétrico entre a garra jacaré e as barras metálicas.

Figura 3.54 – Equipamento utilizado para medição de resistência elétrica das barras



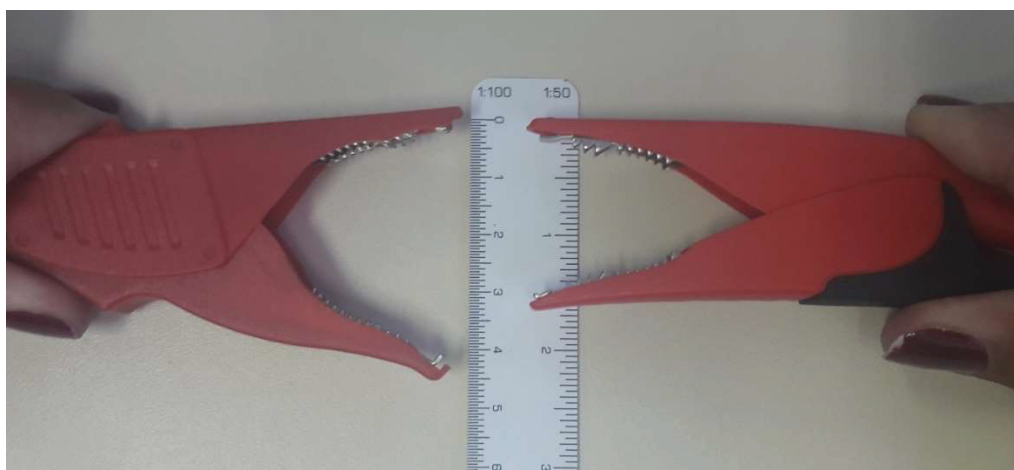
Para a realização do ensaio foram utilizadas duas hastes metálicas, também denominadas eletrodos, que devem ser instaladas no solo para medição da resistência elétrica. Os eletrodos de corrente e de potencial possuíam 35 cm de comprimento e foram completamente enterrados no solo, sendo o contato elétrico com o equipamento realizado através de um *plug* na haste que realiza a conexão com o fio. As hastes podem ser observadas na Figura 3.55.

Figura 3.55 – Hastes metálicas instaladas no solo para leitura da resistência elétrica



Para realização do ensaio nos tirantes de monobarra foi necessário utilizar uma garra com maior abertura, para representatividade dos resultados de resistência elétrica obtidos em campo. Na Figura 3.56 é possível perceber a diferença entre a abertura das garras.

Figura 3.56 – Abertura das garras utilizadas no ensaio de resistência elétrica



Os testes realizados consistiram em:

- Verificação das distâncias L1 e L2 necessárias para o ensaio;
- Variação das seções lateralmente;
- Variação das seções de leitura em diferentes sentidos;
- Testar em todos os grampos em diferentes seções;
- Testar em todos os tirantes em diferentes seções;

- Avaliar o ensaio nos tirantes de cordoalha (6 cordoalhas no mesmo tirante).

Para todos os ensaios foram calculados a média, desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) com no mínimo 5 leituras para cada elemento. O coeficiente de variação é uma medida padronizada de dispersão de distribuição de frequências, definida como a razão do desvio padrão pela média e é utilizado para avaliações de repetitividade e reprodutibilidade. De acordo com Pimentel Gomes (2000), nos experimentos de campo, quanto menor o CV, maior é a precisão do experimento. Ainda segundo o autor, para valores abaixo de 10%, o experimento tem alta precisão, de 10 a 20% são considerados de boa precisão, de 20 a 30% com baixa precisão e acima de 30% apresentam dispersão muito alta.

Os resultados obtidos foram comparados entre si com a avaliação do desvio padrão em um intervalo de duas vezes e três vezes para mais ou para menos, de modo a identificar se as barras com anomalias apresentam valores de resistência elétrica fora deste intervalo.

3.5. ENSAIOS EM OBRAS EXISTENTES

Ensaio com os métodos TDR e Resistência Elétrica também foram realizados em uma contenção de solo grampeado e de cortina atirantada existentes na rodovia BR-376/PR. Dentre 16 contenções pré-selecionadas, duas foram escolhidas pela facilidade de acesso e segurança para realização de ensaios

As estruturas atenderam as premissas avaliadas e contemplaram boa quantidade e variedade de grampos e tirantes necessários para avaliar os resultados dos diferentes ensaios em condições reais. Os projetos das contenções foram avaliados, de modo a definir os elementos a serem avaliados.

3.5.1. Solo grampeado

O solo grampeado avaliado não apresenta paramento em concreto projetado, o que facilitou o acesso a cabeça dos chumbadores. A contenção está distribuída em três taludes entre bermas, com grampos de 25 mm de diâmetro e com 4 m, 6 m e 8 m de comprimento. Cada berma da contenção apresenta um comprimento diferente de grampos, conforme indicado na Figura 3.57.

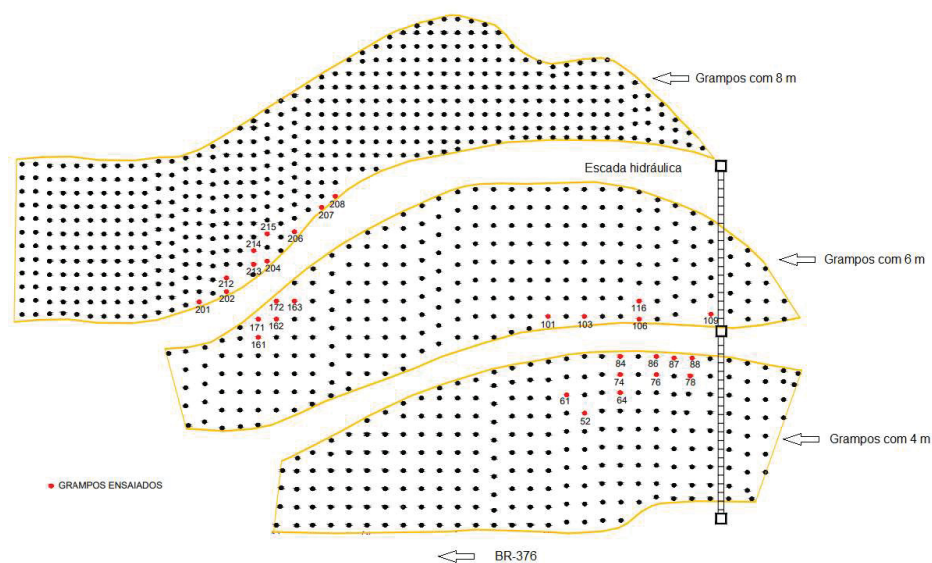
Figura 3.57 – Solo grampeado no km 658+400



A disposição dos grampos em planta é apresentada na Figura 3.58, bem como os grampos selecionados para realização dos ensaios. Foram escolhidos 10 grampos em cada patamar, totalizando 30 grampos, com 3 comprimentos diferentes. A definição foi baseada na distância da rodovia, inclinação e acessibilidade dos taludes, proximidade da vegetação, possibilidade de extensão do equipamento (para o método da resistência elétrica) e condição da cabeça do grampo.

Foram realizados ensaios com os métodos TDR e de resistência elétrica. No entanto, como os grampos não apresentam o fio pré-instalado, o ensaio TDR não apresentou nenhum resultado conclusivo. Desse modo, na sequência são apresentados os procedimentos adotados para os ensaios de resistência elétrica no solo grampeado existente.

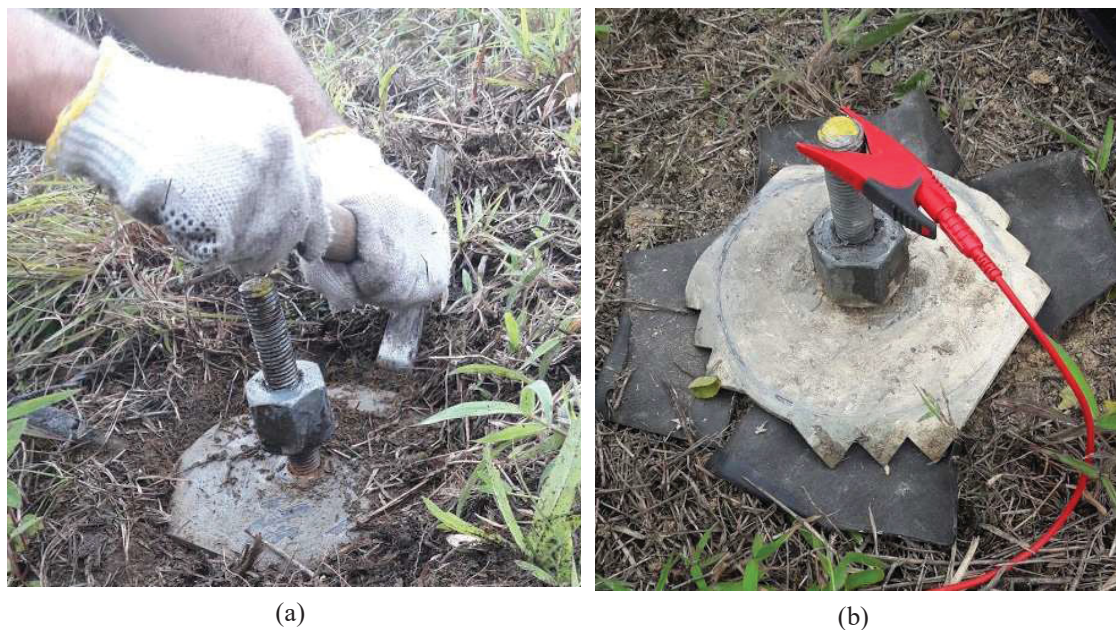
Figura 3.58 – Planta dos grampos da estrutura do km 658+400



Inicialmente foram realizados ensaios preliminares de resistência elétrica nos grampos selecionados. Todos os grampos ensaiados foram lixados para melhor contato elétrico e em cada elemento de ancoragem foram realizadas 10 leituras, buscando reduzir a dispersão dos resultados. Verificou-se que os resultados estavam muito baixos (inferiores à $1 \Omega.m$), quando comparados com resultados do campo experimental e da literatura, e com muita dispersão. Como o grampo estava ligado à tela metálica através de uma porca rosqueada sobre uma chapa metálica, foi possível identificar que a tela estava influenciando nos resultados. Por isso, foi realizada a remoção da porca e isolamento chapa metálica, para que não houvesse nenhuma influência externa nos resultados.

Os grampos foram desrosqueados com auxílio de chave grifo. Nas barras em que não foi possível remover totalmente a porca, foram colocados pedaços de borracha embaixo da chapa para isolar da tela. Cabe salientar que devido à proteção anticorrosiva nas barras, encontrou-se um alto nível de dificuldade para desrosquear as porcas e, por isso, em algumas barras, foi desrosqueado somente o necessário para inserção da borracha. O procedimento utilizado para o ensaio de resistência elétrica nos grampos da contenção existente é apresentado na Figura 3.59. Em outros casos, a própria barra estava em contato com a tela metálica, que também foi isolada. Também foram realizados ensaios com o grampo sem a chapa e sem a porca, e com a chapa e a porca, e os resultados foram iguais, indicando que esses itens não interferem no ensaio.

Figura 3.59 – Ensaio de resistência elétrica no solo grampeado existente



Legenda: a) Desrosquear a porca e erguer a placa; b) Isolamento dos grampos com pedaços de borracha

3.5.2. Cortina atirantada

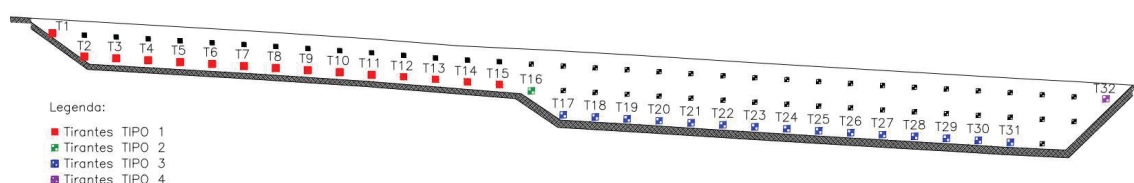
A cortina atirantada avaliada é uma contenção em aterro, em que a face da estrutura é voltada para uma via marginal que serve de acesso apenas aos moradores. A cortina foi dividida em plataforma de trabalho 1 e 2, que estão em elevações diferentes, conforme apresentado na Figura 3.60. A cortina foi selecionada por atender todos os aspectos de segurança, visto que há estacionamento próximo e encontra-se afastada do fluxo de veículos, possibilitando o acesso à diversas configurações de tirantes.

Figura 3.60 – Face da cortina atirantada avaliada



A contenção é composta por 82 tirantes, com quatro configurações diferentes. Para realização dos testes foram selecionados 32 tirantes, sendo que os tirantes do tipo 1 encontravam-se na linha inferior e superior da plataforma de trabalho 1, enquanto os do tipo 2, 3 e 4 situaram-se na plataforma de trabalho 2, na linha inferior, intermediária e superior, respectivamente. Os tirantes avaliados são indicados na Figura 3.61.

Figura 3.61 – Vista frontal da cortina atirantada e identificação dos tirantes avaliados



As características de cada tipo de tirante são apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Características dos tirantes avaliados

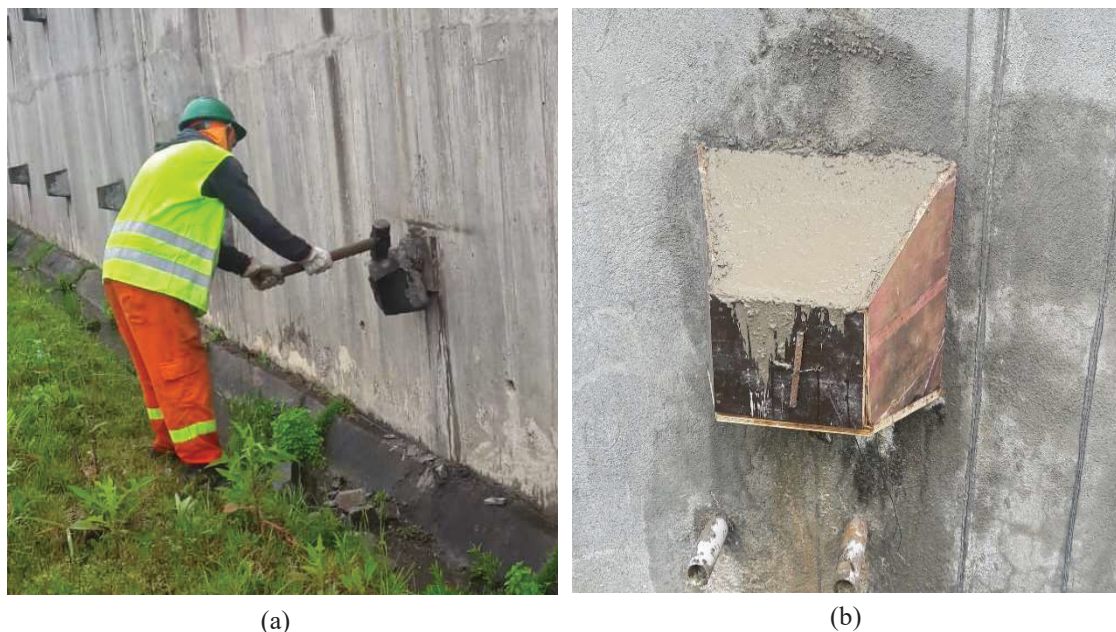
Nomenclatura	Quantidade	Comprimento total (m)	Trecho livre (m)	Trecho ancorado (m)	Diâmetro (mm)
Tipo 1	15	24	15	8	32,0
Tipo 2	15	25	12	12	50,17
Tipo 3	1	28	15	12	50,17
Tipo 4	1	31	18	12	50,17

Todos os tirantes são do tipo monobarra, com comprimento de 24 a 31 m e com comprimentos dos trechos livres e ancorados variados. O diâmetro das barras também variou de 32 mm e 50,17 mm.

De modo a permitir o acesso à cabeça das barras dos tirantes, que são protegidas por um “capacete” de concreto, foi necessário remover a estrutura (Figura 3.62a). Cabe salientar que após a realização dos ensaios, os capacetes foram reconstruídos (Figura 3.62b), de modo a evitar a corrosão da cabeça dos tirantes.

Do mesmo modo como no solo grampeado existente, foram realizados ensaios com os métodos TDR e de resistência elétrica. No entanto, como os tirantes não apresentam o fio pré-instalado, o ensaio TDR entre barras próximas não apresentou nenhum resultado conclusivo. Desse modo, na sequência são apresentados os procedimentos adotados para os ensaios de resistência elétrica na cortina atirantada existente.

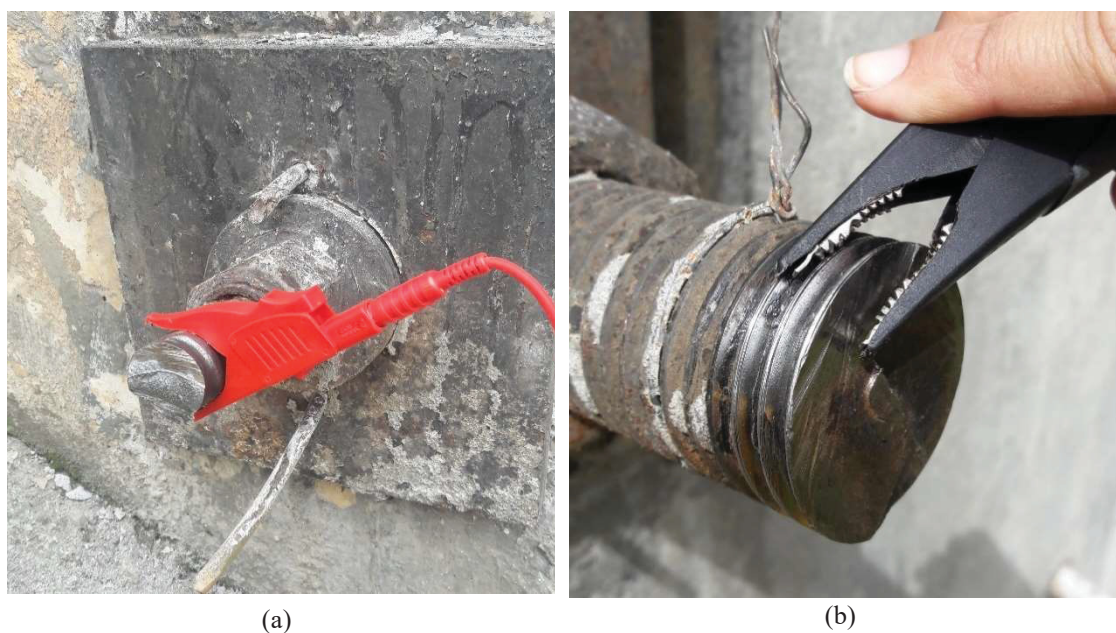
Figura 3.62 – Capacete de concreto dos tirantes



Legenda: (a) Retirada dos capacetes; (b) Reconstrução dos capacetes com concreto

Para realização do ensaio de resistência elétrica nas barras com 50 mm de diâmetro, foi necessário utilizar a garra na lateral da barra, uma vez que não existe garra jacaré com esta abertura. Após alguns testes nas barras de 32 mm, percebeu-se que os resultados eram iguais com as duas configurações. A configuração da garra nas barras de 32 mm e 50 mm são apresentadas na Figura 3.63a e Figura 3.63b, respectivamente.

Figura 3.63 – Garra jacaré nos tirantes monobarra



Legenda: (a) Tirante 32 mm; (b) Tirante 50 mm

O caminhamento do ensaio foi realizado próximo a face da cortina atirantada, uma vez que o campo experimental indicou que essa geometria apresenta os mesmos resultados de uma seção transversal a contenção. Neste caso específico, não foi possível a utilização de uma seção de leitura transversal, pois na região acima da contenção existe uma rodovia com alto fluxo de veículos. Para os ensaios foi adotado uma distância de 28 m entre eletrodos.

3.6. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Neste item são apresentados os ensaios realizados no laboratório do CESEC – Centro de Estudos em Engenharia Civil e no LAMMI – Laboratório de Magnetismo, Medidas e Instrumentação, localizados na Universidade Federal do Paraná.

Como base para o ensaio da Resistência Elétrica, inicialmente foi realizada a caracterização geotécnica e ensaios de resistividade elétrica em amostras indeformadas coletadas no campo experimental. Também foram realizados ensaios de resistividade elétrica em corpos de prova cilíndricos de calda de cimento da obra.

Para a análise da metodologia TDR, foi realizada a moldagem de modelos reduzidos com barras envoltas com calda de cimento para calibração do ensaio. Em paralelo foram realizados ensaios para determinação da permissividade elétrica de corpos de prova de calda de cimento para estimar a velocidade de propagação da onda.

Para a avaliação do método SW-TDR, foi elaborado um cone goubau para realização de testes em laboratório em barras de aço e nos modelos reduzidos.

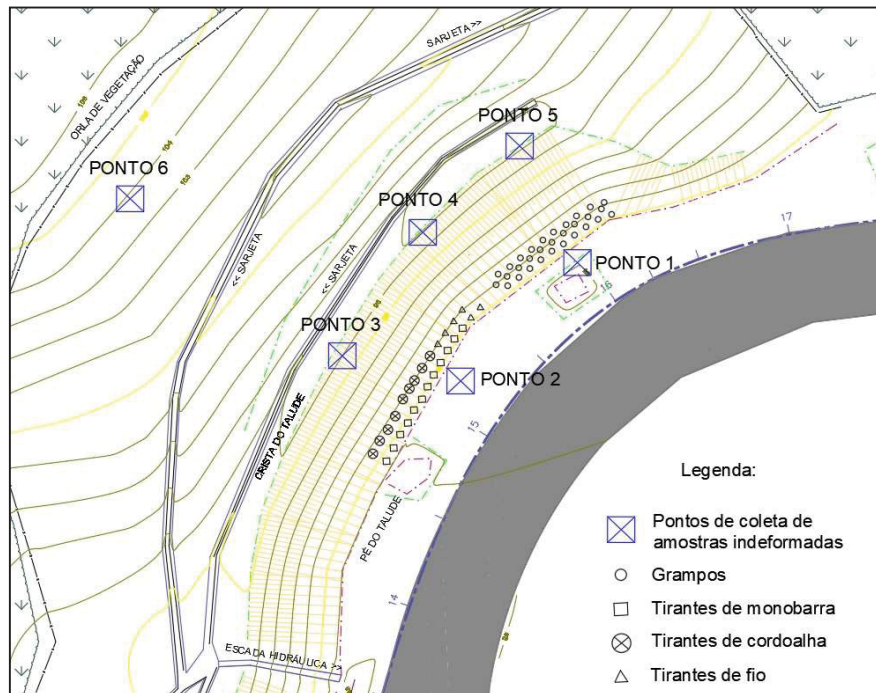
Em complemento, foi realizada uma pesquisa sobre a aplicação de areia reciclada em calda de cimento para injeção em solo grampeado.

3.6.1. Amostras indeformadas de solo

No campo experimental foram coletadas amostras indeformadas para realização de ensaios complementares aos realizados por Mikos (2017) com amostras deformadas de solo obtidas dos ensaios de SPT do campo experimental. Foram selecionados 6 pontos de coleta, e em cada ponto foram coletadas 5 amostras com tubo de PVC com 10 cm de diâmetro e 6 cm de altura. Os locais selecionados, apresentados na Figura 3.64 foram

escolhidos próximos à contenção experimental e aos pontos em que são realizados os ensaios de resistência elétrica.

Figura 3.64 – Localização da coleta de amostras indeformadas



Com as amostras foi possível obter o peso específico e umidade natural, peso específico real dos grãos, análise granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade e resistividade elétrica. O procedimento de coleta é apresentado na Figura 3.65.

Figura 3.65 – Coleta de amostra indeformada



As amostras foram coletadas com excesso de solo nas duas extremidades e, de modo a manter a umidade natural, estas foram envoltas com plástico filme e armazenadas em caixa de isopor isolada (Figura 3.66). Optou-se por não utilizar parafina visto que ela poderia influenciar na umidade da amostra.

Figura 3.66 – Armazenamento das amostras indeformadas



Em laboratório, as amostras foram desembulhadas e suas duas faces foram arrasadas para a inserção de duas chapas de cobre de 10 cm de diâmetro que fazem parte

do procedimento de ensaio, uma de cada lado da amostra (Figura 3.67). Para fixar as chapas no PVC foi utilizado um grampo sargento.

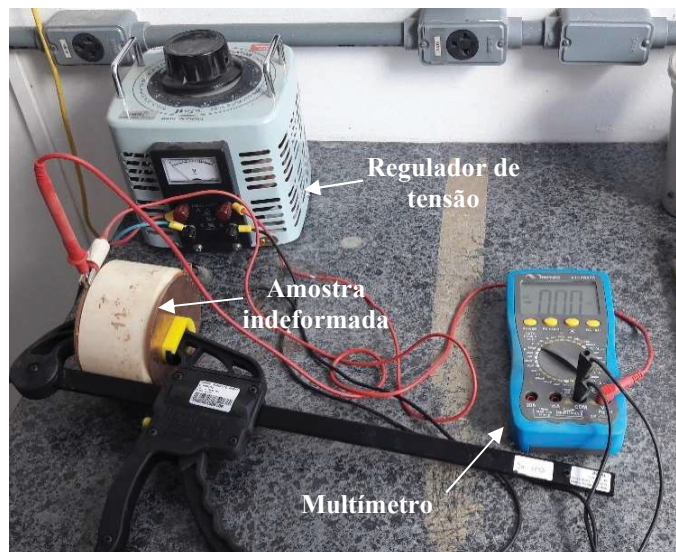
Figura 3.67 – Ensaio de resistividade elétrica em amostra indeformada



Legenda: (a) Regularização das faces; (b) Chapas de cobre

Durante a realização do ensaio, foram fixadas as garras jacaré nas “abas” das chapas de cobre, com procedimento e equipamentos iguais ao apresentado por Mikos (2018). Para medição da resistência foram utilizados um regulador de tensão Variac Jng, que gera uma diferença de potencial alternado (60 Hz) no solo, em Volts; e um multímetro Minipa empregado para medir a corrente elétrica alternada, em miliampères, para verificação do valor de tensão aplicada na amostra. A resistência pode ser calculada pela relação entre tensão e corrente elétrica, e para maior representatividade dos resultados foram utilizados 7 incrementos de tensão. As tensões avaliadas foram 10 V, 20 V, 30 V, 40 V, 60 V, 80 V e 100 V. Com a medição das tensões e correntes foi possível calcular a resistência elétrica das amostras indeformadas. A configuração geral adotada nesse ensaio é apresentada na Figura 3.68.

Figura 3.68 – Ensaio de resistividade elétrica em amostra indeformada



3.6.2. Resistividade elétrica da calda de cimento

A resistividade elétrica da calda de cimento representa um fator de influência na aplicação do ensaio não destrutivo de resistência elétrica, onde as propriedades da calda de cimento refletem diretamente nos resultados obtidos (CHEUNG; LO 2005).

Por esse motivo, na etapa de execução da obra, foram coletados corpos de prova (CPs) cilíndricos de dimensão 10 x 20 cm da calda de cimento das injeções realizadas nos grampos para avaliação da resistividade elétrica ao longo do tempo (Figura 3.69). No total foram coletados 228 CPs. Cabe salientar que em alguns casos, para a mesma mistura de calda de cimento, foram injetados mais de um grampo. Para cada injeção, foram coletados 3 corpos de prova, moldados em formas metálicas, e posteriormente cobertos com papel filme. Também foram coletados alguns corpos de prova das injeções dos tirantes, porém como o processo executivo é diferente, e somente o bulbo está em contato com a calda, optou-se em realizar um estudo mais aprofundado somente nos CPs dos grampos.

Figura 3.69 – Coleta de corpos de prova de calda de cimento



Os CPs foram desmoldados com 24 horas e levados ao laboratório LAME da UFPR, para serem armazenados tanto em câmara seca como em câmara úmida. Para uma mistura de calda de cimento (G3b), foram moldados 6 corpos de prova, para avaliar estas duas condições diferentes. Três foram mantidos na câmara seca com umidade em torno de 50% e temperatura constante de 23°C, e os outros três na câmara úmida com umidade aproximada de 95% e temperatura de 23°C.

O cimento utilizado na obra foi CP II F-32, e a relação entre água e cimento foi de 0,5. De acordo com Medeiros Junior e Lima (2016), o tipo de cimento pode interferir na resistividade elétrica, que tende a aumentar com o tempo devido à hidratação do cimento, que reduz a conectividade dos poros e consequentemente a condutividade da pasta de cimento. Os autores realizaram ensaios em corpos de prova de concreto mantidos em câmara úmida, e concluíram que o cimento CPII e CPV apresentaram valores próximos e menores quando comparados com o cimento CPIII e CPIV. O cimento CPIII, com adição de 60% de escória de alto forno, apresentou os maiores valores. Em relação ao cimento CPII, que é o cimento mais utilizado para solo grampeado, a variação da relação água/cimento pouco influenciou nos resultados de resistividade elétrica.

Segundo Gowers e Millard (1999), o Método Wenner ou método de quatro pontos é a técnica mais utilizada para medição de resistividade elétrica. A medição é realizada com quatro eletrodos dispostos sobre o corpo de prova com distância de 50 mm entre eles, em que os eletrodos externos aplicam a corrente elétrica e os internos medem a diferença de potencial (MEDEIROS JUNIOR; GANS, 2017). Os compostos de cimento, como concreto e calda de cimento, são alcalinos e higroscópicos, e quando são enterrados no solo tendem a absorver umidade e por isso apresentam resistividade elétrica baixa, em torno de 30 Ω .m a 100 Ω .m (LEITE, 1996).

O equipamento utilizado para medição da resistividade elétrica superficial (RES) foi o de quatro pontas, como pode ser observado na Figura 3.70.

Figura 3.70 – Ensaio de resistividade elétrica



FONTE: Mikos (2018)

Os ensaios foram baseados nos procedimentos da Norma Espanhola PrUNE 83988 – 2: *Determinación de la Resistividad Eléctrica Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner* (AENOR, 2012). Optou-se em utilizar essa norma pois fornece um fator de forma para as dimensões do corpo de prova e do espaçamento entre eletrodos. Para a correção do valor de resistividade, o valor medido pelo equipamento foi multiplicado pelo fator de forma de 0,377, aplicado em CPs de 10x20 cm e espaçamento dos eletrodos de 50 mm.

As medições foram realizadas em 7, 14, 28, 56, 84, 112, 140, 224, 364 e 588 dias. Juntamente com as leituras de resistividade elétrica, para os corpos de prova também foram obtidos o peso e suas dimensões.

3.6.3. Permissividade elétrica da calda de cimento

Para estimativa da velocidade de propagação do pulso na calda de cimento do método TDR, foram realizados ensaios de permissividade elétrica de corpos de prova de calda de cimento, também denominada constante dielétrica. Conforme já apresentado no item 2.3.1 e na Equação (1), a velocidade de propagação do pulso é uma relação entre a velocidade de propagação no vácuo e a raiz da constante dielétrica relativa do material. Cheung (2003) indica que para a calda de cimento a constante dielétrica é aproximadamente 10 (adimensional).

Foram moldados 9 corpos de prova cilíndricos de 4 cm de altura e 2 cm de diâmetro (Figura 3.71), com auxílio de um tubo de PVC. A calda de cimento utilizada foi com a relação água/cimento de 0,5. Após um dia de moldagem, o corpo de prova foi desmoldado e foram avaliadas 3 condições de armazenamento das amostras para realização dos ensaios: câmara úmida (CP1, CP2 e CP3), câmara seca (CP4, CP5 e CP6) e estufa (CP7, CP8 e CP9). As leituras obtidas foram aos 7, 14 e 28 dias.

Figura 3.71 – Corpos de prova de calda de cimento para ensaio de permissividade elétrica

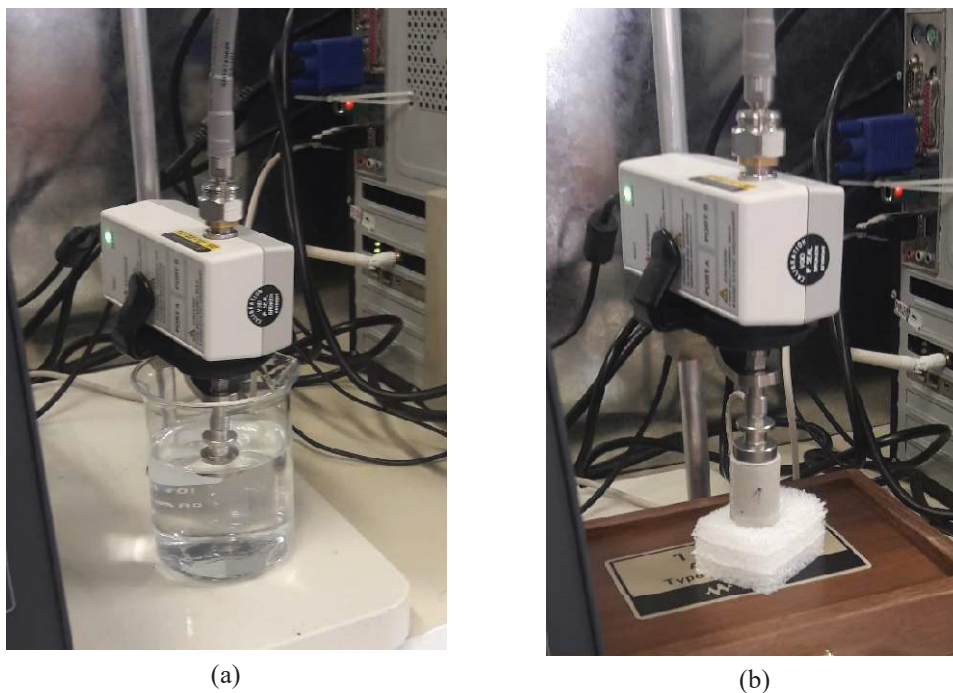


FONTE: A autora.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Magnetismo, Medidas e Instrumentação (LAMMI), da Universidade Federal do Paraná. O aparelho utilizado nas medições foi o ENA Network Analyzer 100 kHz-18 GHz da Keysight, com o uso de um cabo coaxial e acessório de contato. Anteriormente aos ensaios nos corpos de prova foi realizada a calibração do instrumento com o ensaio em água destilada, que deveria resultar em um valor de 80. Para o ensaio nos corpos de prova foi utilizada uma pasta isolante elétrica, de modo a minimizar os vazios e melhorar o contato do instrumento com a superfície do corpo de prova. O ensaio de calibração e o ensaio na amostra é apresentada na Figura 3.72.

Os resultados foram obtidos através de gráficos exportados do instrumento, em que no “eixo x” são os valores de frequência, e o “eixo y” com a parte real da permissividade elétrica (ϵ_r'). A parte imaginária da permissividade (ϵ_r'') apresentou valores próximos de zero e não foram considerados neste estudo. O valor médio em que a curva se manteve constante para diferentes frequências foi o valor considerado como permissividade elétrica das amostras.

Figura 3.72 – Ensaio de permissividade elétrica na água e na calda de cimento



LEGENDA: (a) Ensaio na água; (b) Ensaio na calda de cimento

Após a obtenção da permissividade elétrica da calda de cimento nas três condições, a velocidade de propagação foi estimada de acordo com a Equação (1).

3.6.4. Modelo reduzido para o TDR

Para calibração do método TDR e obtenção da velocidade de propagação do pulso foram realizados ensaios em barras em contato com o ar e em contato com calda de cimento. Para os ensaios no ar foram ensaiadas barras de 25 mm de diâmetro e com 2,0 m e 3,7 m de comprimento. As barras foram ensaiadas com o cabo coaxial RG-58 paralelo a barra, presos com fita crepe, para definição da velocidade de propagação no ar. A barra com o cabo coaxial é apresentada na Figura 3.73. Para o cálculo da velocidade de propagação do pulso no ar foi utilizada a Equação (2).

Figura 3.73 – Ensaio TDR realizado em grampo em contato com o ar



Em complemento, foram executados dois modelos reduzidos de grampos para avaliação da velocidade de propagação do pulso na calda de cimento. Para isso, foram executadas barras de aço envoltas por calda de cimento, simulando um grampo. Duas barras foram moldadas, com 2,0 m de comprimento e com diâmetros de 25 mm e 32 mm.

Todas as barras foram lixadas antes da execução e foi instalado um cabo coaxial paralelo a cada barra. A calda de cimento foi produzida em laboratório com auxílio de um misturador de argamassa adaptado para furadeira, com cimento CP II F-32, da mesma marca utilizada na obra. Também foi adotada a relação entre água e cimento de campo de 0,5. Foi utilizado um cano de PVC de 10 cm de diâmetro, com uma tampa vedada em uma das extremidades como molde. O tubo foi mantido na vertical com a barra centralizada em seu interior e preenchido com a calda de cimento, de modo a manter apenas 20 cm da extremidade da barra sem calda de cimento.

Figura 3.74 – Moldagem do modelo reduzido



LEGENDA: (a) Produção da calda de cimento; (b) Cano de PVC com o grampo

Cabe salientar que após o preenchimento com a calda de cimento, foi colocado outra tampa na extremidade superior com um furo no meio, de modo a manter a barra centralizada. Após 48 horas foi realizado o desmolde, sendo necessário cortar o cano de PVC lateralmente para retirada da barra com a calda já endurecida (Figura 3.75). Nas barras com 2,0 m também foram realizados ensaios com 7, 14, 21 e 28 dias com o método TDR, para avaliar o tempo e a velocidade de propagação da onda ao longo do tempo.

Figura 3.75 – Modelos reduzidos



O cálculo da velocidade de propagação do pulso na calda de cimento se baseou na Equação (6), que leva em consideração os comprimentos da barra em contato com o ar e com a calda, e a velocidade de propagação da barra a ar.

3.6.5. Cone Goubau

O cone goubau para realização do ensaio com o equipamento TDR sem a utilização de um cabo pré-instalado foi elaborado com base no artigo “*A Surface Wave Transmission Line*” (ELMORE, WATROUS, 2012). Os testes foram realizados no Laboratório de Magnetismo, Medidas e Instrumentação (LAMMI), da Universidade Federal do Paraná.

A princípio, o cone lançador externo foi produzido com alumínio e o interno com latão, nas mesmas dimensões apresentadas no artigo (Figura 2.29). Percebeu-se que não eram necessárias as pequenas reduções no cone interno, então este foi mantido com um único ângulo de abertura. Na sequência, foi testado um cone externo de latão, e cone interno com alumínio. O cone que apresentou o melhor resultado foi com alumínio no cone interno e externo.

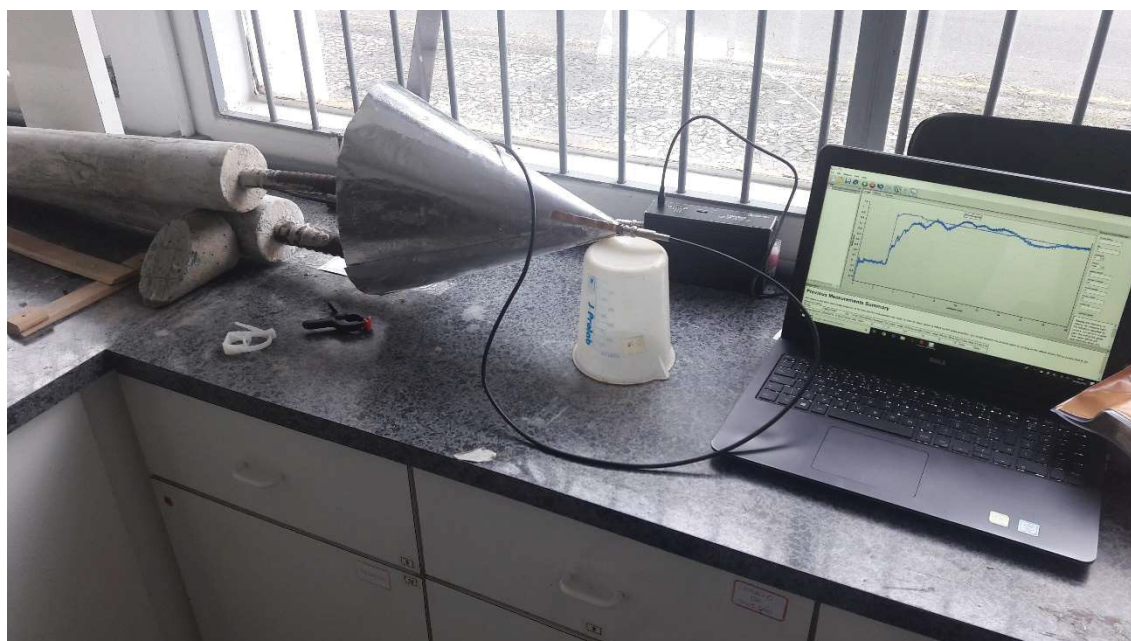
O cone foi executado com um conector BNC ligado ao cone interno e externo. Para centralização do cone interno foi utilizado um molde de acrílico. Para a realização do ensaio um cabo coaxial era ligado no equipamento TDR e no conector BNC do cone. O contato do cone interno foi realizado com a barra com o uso de prendedor. A Figura 3.76 apresenta a vista lateral do cone com o conector BNC na extremidade, e a vista interna com o cone interno e o molde acrílico.

Figura 3.76 – Cone para realização do ensaio SW-TDR



Os ensaios foram realizados em uma barra de aço com 1,0 m de comprimento e 25 mm de diâmetro e também nos modelos reduzidos apresentados no Item 3.6.4, com as barras de 25 mm e 32 mm de diâmetro envoltas com calda de cimento. O ensaio no modelo reduzido com o cone pode ser observado na Figura 3.77.

Figura 3.77 – Teste com cone no modelo reduzido



3.6.6. Areia reciclada na calda de cimento

A metodologia apresentada neste item foi desenvolvida em Hong Kong, durante o doutorado sanduíche da autora. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Pesquisa de Engenharia Geotécnica (*Geotechnical Engineering Research Laboratory*) da Universidade de Ciência e Tecnologia de Hong Kong (*Hong Kong University of Science and Technology* – HKUST). A descrição mais detalhada da metodologia e resultados também pode ser consultada em MIKOS *et al.* (2021).

O uso de areia reciclada de construção e demolição como adição na calda de cimento para injeção de calda de cimento pode ser uma solução para os problemas associados à disposição dos resíduos de construção e demolição em aterros sanitários. O objetivo da pesquisa foi avaliar o efeito do uso da areia reciclada na calda de cimento em diferentes porcentagens na calda de cimento. Foram avaliadas a resistência ao cisalhamento de interface entre a calda e um solo natural, e a resistência à compressão da calda de cimento. Os resultados obtidos foram comparados com a norma brasileira e as normas internacionais. O estudo também pode ser um caminho para a utilização de areia

reciclada em solo grampeado, cortina atirantada, sistemas com barras protendidas, *jet grouting*, estacas raiz, tratamentos de rochas fraturadas, entre outros.

As análises realizadas consistiram em ensaios de caracterização geotécnica de um solo natural e da areia reciclada, ensaios de cisalhamento direta de interface e ensaios de resistência à compressão do concreto.

O solo natural utilizado nos ensaios foi um solo residual de granito, comumente encontrado nas encostas de Hong Kong. Dentre as propriedades deste solo, tem-se: peso específico real dos grãos de 26,4 kN/m³, o peso específico seco máximo de 17,1 kN/m³ e a umidade ótima de 14%. O solo foi classificado como uma areia bem graduada (SW).

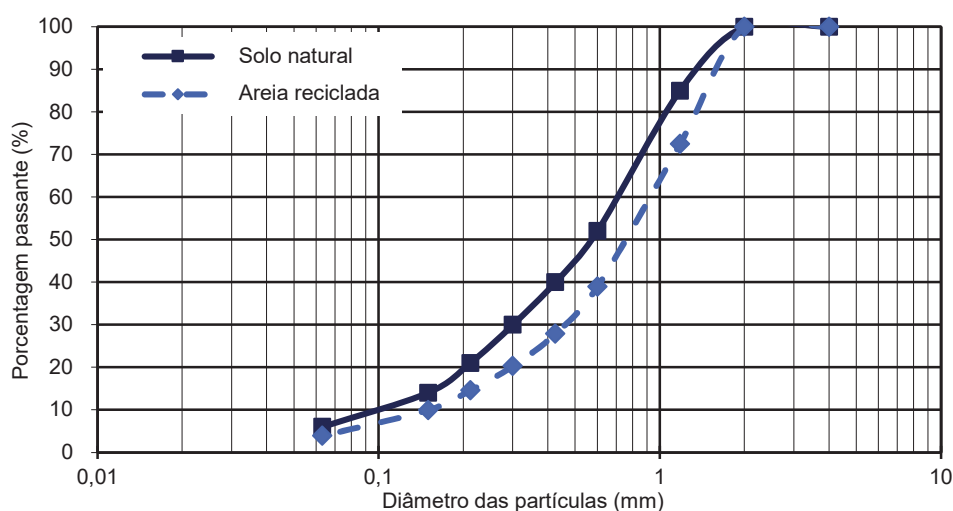
A areia reciclada de construção e demolição foi obtida de uma fábrica de reciclagem de Hong Kong. A areia reciclada apresentou um peso específico real dos grãos de 26,6 kN/m³, o peso específico seco máximo de 17,3 kN/m³ e a umidade ótima de 19%. A porcentagem da absorção de água da areia reciclada obtida foi de 9,7%. A areia reciclada normalmente apresenta maior absorção de água quando comparado com solos naturais, o que resulta em maior demanda de água e menor trabalhabilidade em argamassas (EVANGELISTA *et al.* 2015, ZHAO *et al.* 2015, LEITE; SANTANA 2019). A Tabela 3.6 apresenta um resumo das características das areias utilizadas.

Tabela 3.6 – Características das areias utilizadas

Propriedade	Areia natural	Areia reciclada
Peso específico real dos grãos (kN/m ³)	26,4	26,6
Peso específico seco máximo(kN/m ³)	17,1	17,3
Umidade ótima	14%	19%
Absorção	-	9,7%

A Figura 3.78 apresenta a curva granulométrica da areia natural e da areia reciclada avaliadas neste estudo. A norma de Hong Kong indica que a areia que pode ser utilizada na calda de cimento em solo grampeado deve ser limpa e seca, com 100% das partículas passando pela peneira de abertura 2 mm, e não mais de 30% passando na peneira de 0,2 mm (HKSARG, 2006). Ambas as areias avaliadas atingem os requerimentos desta norma.

Figura 3.78 – Curva granulométrica das areias utilizadas nos ensaios



A Tabela 2.1 apresenta as principais normas internacionais e a norma brasileira, com os respectivos valores indicados para a relação água/cimento da calda de cimento em solo grampeado. O valor adotado nos ensaios foi $a/c=0,45$, de modo a abordar o maior número de normas possível. Para a preparação da calda foi utilizado o cimento Portland CEM I 52,5N, disponível no laboratório da universidade e comumente utilizado em Hong Kong. Dentre as variações realizadas, foram testadas a calda de cimento com cimento e água, e a calda de cimento com adição de areia natural e areia reciclada, juntamente com superplastificante. As relações entre areia e cimento avaliadas em peso foram de 0,5, 1,0 e 1,5.

Para avaliação da calda de cimento, os ensaios foram divididos em duas etapas. A primeira e a segunda etapa foram com a aplicação de agregado na calda de cimento com areia natural e areia reciclada, respectivamente. A água de absorção foi considerada somente para a areia reciclada. De acordo com Zhao *et al* (2015), o uso de areia reciclada seca com água de absorção em argamassas apresentou maiores valores de resistência à compressão quando comparado com argamassas com areia saturada.

Como a adição de areia na calda de cimento reduz a sua fluidez, foi utilizado o superplastificante ADVA 189. Este aditivo não contém cloretos e apresenta um peso específico de $1,065 \text{ g/cm}^3$. Moayed *et al.* (2019) indica que a utilização de superplastificante é um método eficaz para garantir fluidez na injeção de calda de cimento. Foram realizadas análises iniciais de modo que o ensaio do cone de fluxo de modo a definir um tempo que não fosse inferior a 15 segundos, conforme indicado na

norma de Hong Kong (HKSARG, 2006). A Tabela 3.7 apresenta as proporções utilizadas para cada variação.

Tabela 3.7 – Proporções utilizadas para cada variação

Variação	Cimento (kg/m ³)	Areia natural (kg/m ³)	Areia reciclada (kg/m ³)	Água (l/m ³)	Absorção de água (l/m ³)	Superplastificante (l/m ³)
G-0	1300	-	-	585	-	-
NS-0.5	1044	522	-	470	-	1,5
NS-1.0	872	872	-	392	-	5,8
NS-1.5	748	1122	-	337	-	16,5
FRCA-0.5	1045	-	523	470	49	1,5
FRCA-1.0	874	-	874	393	82	5,8
FRCA-1.5	751	-	1126	338	106	16,5

Legenda: G: calda de cimento; NS: areia natural, FRCA: areia reciclada.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a norma ASTM C349 (ASTM, 2018). Os corpos de prova foram moldados em fôrmas cúbicas de 5 cm de lado. Os CPs foram rompidos com idade de 1, 3, 7 e 28 dias. Os resultados foram comparados com os valores mínimos requeridos de resistência à compressão para as diferentes idades (Tabela 2.1).

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com a areia natural, e na interface da areia natural e a calda de cimento feita com e sem areia reciclada. Os ensaios de cisalhamento são uma maneira de obter a resistência de interface entre o solo e a calda de cimento e pode ser utilizada para o dimensionamento de solo grampeado (CHU, YIN, 2009). Diferentes estudos foram realizados com a avaliação da resistência de interface entre a calda de cimento e solo, com diferentes condições, utilizando cisalhamento direto (CHU; YIN, 2009; HOSSAIN; YIN, 2012; MOAYED *et al*, 2019).

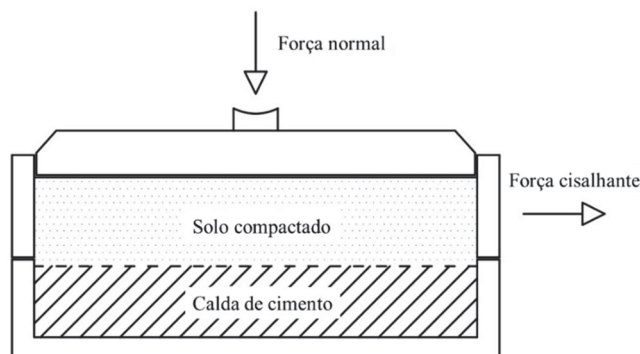
Os testes de cisalhamento direto de interface foram realizados com três proporções: a calda de cimento tradicional, calda de cimento com adição de areia natural na proporção de cimento e areia de 1,5 (NS-1,5) e calda de cimento com adição de areia reciclada proporção de cimento e areia de 1,5 (FRCA-1,5). Para todas as variações a relação entre água e cimento foi de 0,45.

Para realização do ensaio de interface, o solo natural foi compactado na caixa inferior do cisalhamento direto em duas camadas com a umidade ótima. Após a compactação do solo, a calda de cimento foi preparada e colocada por gravidade sobre o solo compactado, de modo a preencher a caixa superior do cisalhamento. Após 3 dias de

cura da calda de cimento, as amostras foram cisalhadas. De acordo com Moayed *et al* (2019), tempo de cura da calda de cimento acima de 3 dias não afeta os resultados.

A caixa superior e inferior do cisalhamento era de aço, com seção quadrada de 100 mm x 100 mm, e 18 mm de altura cada parte. A interface do solo e da calda de cimento estava localizado entre a parte superior e inferior da caixa de cisalhamento, conforme a Figura 3.79.

Figura 3.79 – Ensaio de cisalhamento direto de interface



Durante o ensaio, o solo foi mantido na parte superior da caixa e a calda na parte inferior. O ensaio foi realizado inundado e drenado, com taxa constante de cisalhamento de 0,3 mm/min. As tensões de cisalhamento foram obtidas por uma célula de pressão. As amostras foram avaliadas para as tensões normais de 50, 100, 200 e 300 kPa. A tensão de cisalhamento horizontal e os deslocamentos verticais e horizontais foram obtidos a cada 20 segundos, e o deslocamento horizontal máximo foi de 15 mm.

4. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos ao longo da pesquisa, desde os ensaios de laboratório, ensaios no campo experimental e ensaios com métodos não destrutivos em obras existentes.

4.1.RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir de ensaios de laboratório, com as amostras indeformadas de solo, com os corpos de prova de calda de cimento, os modelos reduzidos para o TDR, ensaios de permissividade da calda de cimento e aplicação de areia reciclada em calda de cimento.

4.1.1. Amostras indeformadas de solo

Os ensaios indicaram que as amostras ensaiadas apresentaram valores altos de resistividade elétrica quando comparados com os ensaios realizados com amostras deformadas. Boszczowski (2008) e Fukue *et al.* (1999) afirmam que valores superiores de resistividade com ensaios em amostras indeformadas podem indicar a cimentação na estrutura do solo, característica essa que não é possível reproduzir com amostras deformadas, pois as ligações naturais encontradas em campo entre as partículas são desfeitas.

De modo geral, o ponto 1 indicou um solo mais resistivo quando comparado com os demais. Em contrapartida, o local com menores valores de resistividade elétrica foi o ponto 2, com mesma classificação geotécnica do ponto 1 (silte areno-argiloso).

Um resumo com os resultados obtidos nos ensaios de laboratório pode ser visualizado na Tabela 4.1.

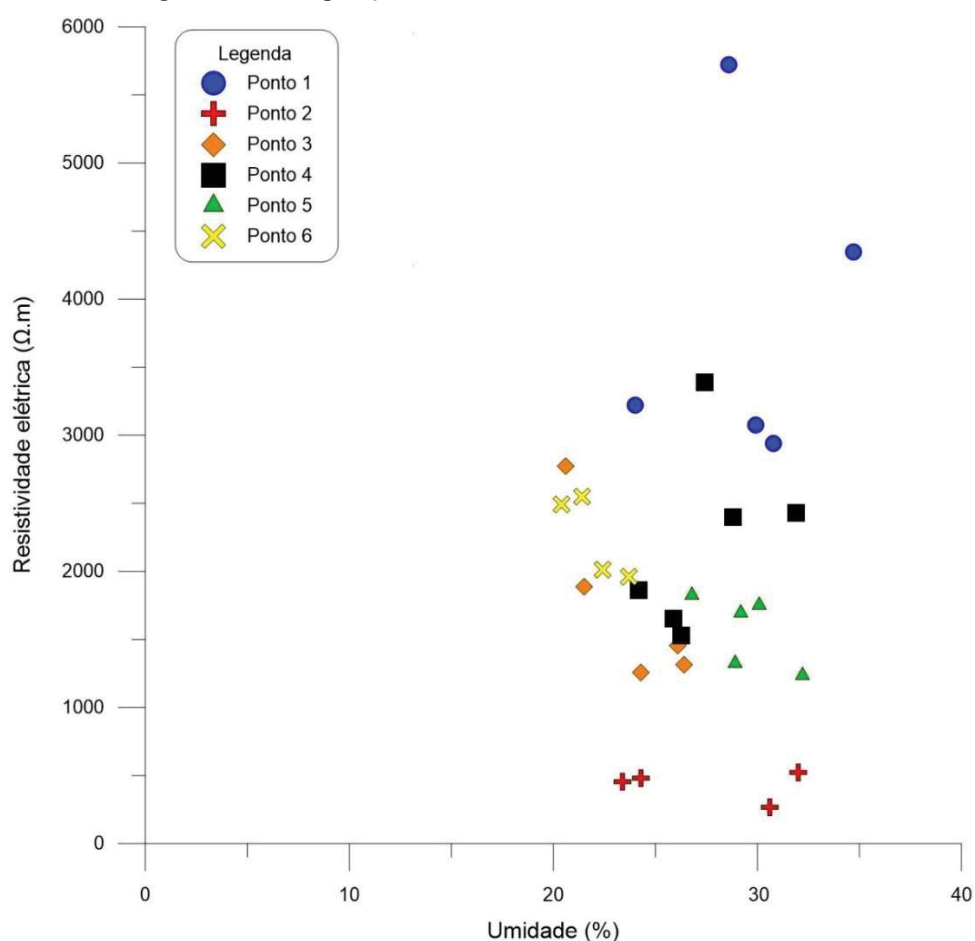
Tabela 4.1 – Resultados de resistividade elétrica e caracterização geotécnica obtidos com as amostras indeformadas

Ponto	Resistividade elétrica ($\Omega.m$)	Umidade (%)	Peso específico (g/cm^3)	Peso específico seco (g/cm^3)	Peso específico real* (g/cm^3)	Índice de vazios (e)	Saturação (%)	Material*	LL*	LP*	IP*
1	3073,6	30	1,58	1,22		1,08	70				
1	3222,6	24	1,68	1,35		0,88	69				
1	5723,0	29	1,61	1,25	2,538	1,02	71	Silte argilo arenoso	45	33	12
1	4344,9	35	1,64	1,22		1,08	81				
1	2942,3	31	1,68	1,28		0,98	80				
2	481,2	24	1,84	1,48		0,71	86				
2	456,0	23	1,89	1,53		0,66	90				
2	268,6	31	1,79	1,37	2,542	0,85	91	Silte areno argiloso	45	31	14
2	520,2	32	1,76	1,34		0,90	90				
3	2773,8	21	1,93	1,60		0,55	93				
3	1890,1	22	1,87	1,54		0,61	88				
3	1454,8	26	1,79	1,42	2,484	0,75	86	Argila areno siltosa	47	31	16
3	1312,4	26	1,80	1,42		0,75	88				
3	1259,5	24	1,73	1,39		0,79	77				
4	1864,3	24	1,78	1,44		0,76	80				
4	2398,4	29	1,85	1,44		0,76	96				
4	3385,8	27	1,78	1,40		0,81	86	Argila areno siltosa	53	31	22
4	2430,3	32	1,73	1,31	2,535	0,93	87				
4	1652,1	26	1,83	1,45		0,74	88				
4	1527,7	26	1,81	1,44		0,77	87				

Ponto	Resistividade elétrica ($\Omega.m$)	Umidade (%)	Peso específico (g/cm^3)	Peso específico seco (g/cm^3)	Peso específico real * (g/cm^3)	Índice de vazios (e)	Saturação (%)	Material	LL	LP	IP
5	1697,4	29	1,94	1,50		0,67	100				
5	1327,5	29	1,63	1,26		0,99	73				
5	1754,5	30	1,70	1,31	2,514	0,92	82	Argila areno siltosa	52	35	17
5	1236,2	32	1,74	1,31		0,91	89				
5	1823,3	27	1,73	1,36		0,84	80				
6	1962,5	24	1,88	1,52		0,68	89				
6	2550,1	21	1,91	1,57		0,62	88				
6	2014,1	22	1,83	1,50	2,555	0,70	81	Argila silto arenosa	56	36	20
6	2493,6	20	1,97	1,63		0,56	93				

Com o intuito de aprofundar o entendimento dos resultados foi elaborado um gráfico comparando a resistividade elétrica dos pontos com a umidade (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Comparação entre a resistividade elétrica e a umidade



De modo geral, os resultados não apresentaram uma correlação direta entre resistividade e umidade. Para os pontos 3, 5 e 6 foi possível perceber que o aumento da umidade natural das amostras gerou a redução da resistividade elétrica, o que já era esperado. No entanto, os demais pontos (1, 2 e 4) não seguiram o mesmo comportamento. A umidade das amostras se manteve entre 20% e 30%, e a resistividade elétrica variou entre 268,6 $\Omega.m$, no ponto 2, e 5.723,0 $\Omega.m$, no ponto 1.

Os pontos 3, 4, 5 e 6, compostos por material argiloso, apresentaram valores de resistividade elétrica dentro de uma mesma faixa de valores, o que pode ser associado pela menor interferência dos cortes de terra e trabalhos realizados na alça do retorno em que o campo experimental está inserido. Por outro lado, os pontos 1 e 2, classificados como solos siltosos, apresentaram-se acima e abaixo, respectivamente, dos resultados dos demais pontos, provavelmente por um deles de tratar de argila siltosa, e o outro de argila arenosa.

Não foi possível obter homogeneidade nos resultados, provavelmente devido à fatores como heterogeneidade do solo, presença de pedregulhos e raízes na amostra (Figura 4.2). Isto ocorre uma vez que a passagem da corrente elétrica se altera com a presença de outros materiais no solo, ou ainda devido a vazios formados próximo ao PVC utilizado na amostragem.

Figura 4.2 – Amostra indeformada coletada no campo experimental (Ponto 1)



4.1.2. Resistividade elétrica da calda de cimento

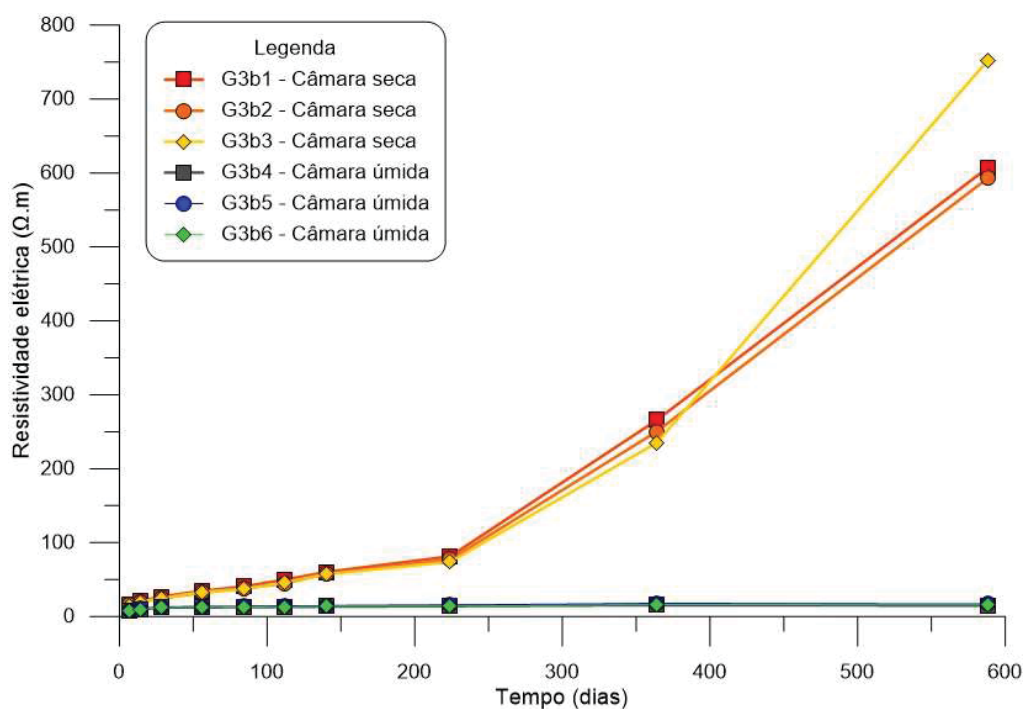
Os resultados obtidos pelos ensaios de resistividade elétrica nos corpos de prova de calda de cimento do elemento G3b podem ser visualizados na Figura 4.3. Vale salientar que para a mesma mistura de calda de cimento foram moldados 6 CPs, sendo que três foram mantidos na câmara seca e os outros três na câmara úmida.

Para os corpos de prova mantidos na câmara seca, percebeu-se um aumento da resistividade elétrica ao longo do tempo, sem estabilização. O endurecimento da calda de cimento é o resultado de um processo de hidratação que consiste em uma reação química entre o cimento e a água. Segundo Medeiros Junior e Lima (2016), o aumento da resistividade ocorre devido à hidratação do cimento, que reduz a conectividade dos poros e consequentemente a condutividade da pasta de cimento.

Para os corpos de prova mantidos na câmara úmida, houve um aumento da resistividade até a idade de 28 dias, o que pode ser associado ao fato do corpo de prova ainda estar em processo de ajuste à umidade da câmara, que é menor do que a umidade inicial da calda de cimento. A partir dos 28 dias da moldagem, os valores de resistividade permaneceram praticamente constantes, o que pode indicar que não há mais perda nem ganho de água nos poros do corpo de prova. De modo geral, pode-se concluir que, assim

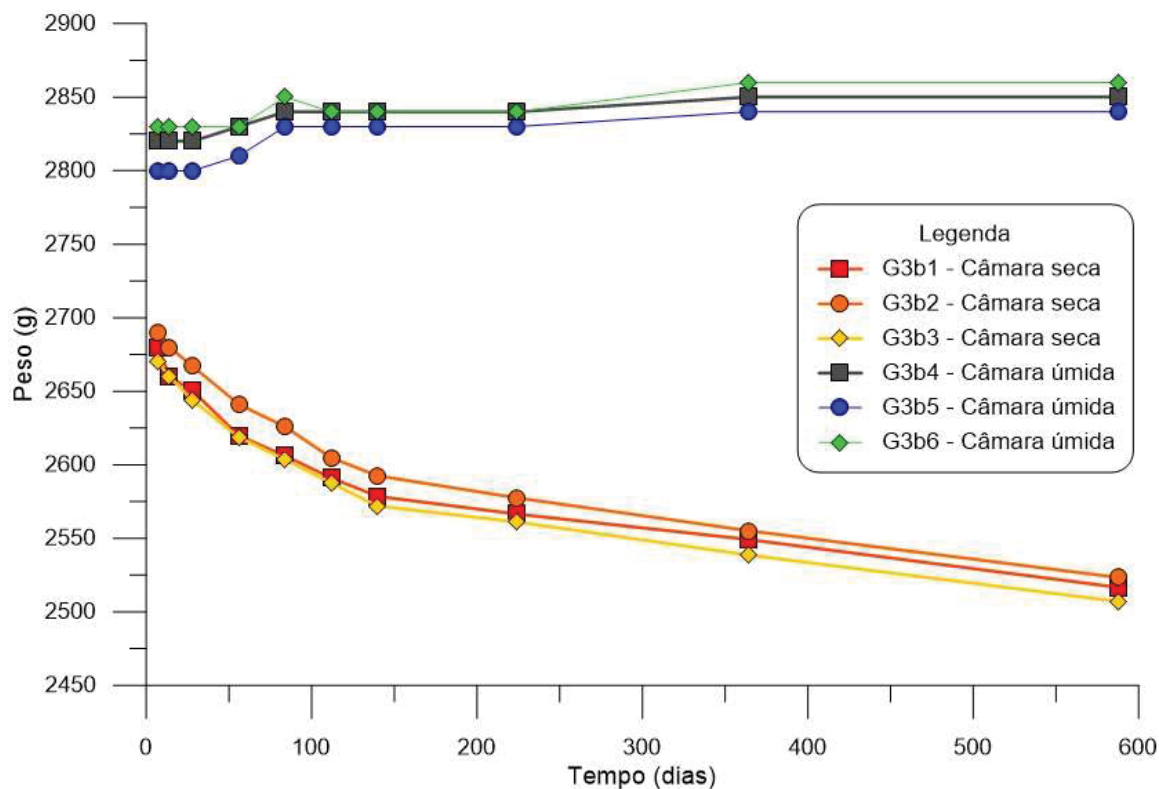
como no solo, a água atua como o principal regulador da resistividade elétrica para esses corpos de prova (MIKOS, 2018).

Figura 4.3 – Comparação da resistividade elétrica na câmara seca e câmara úmida



Os corpos de prova também foram pesados, de modo a entender o comportamento da resistividade elétrica medida. Os resultados são apresentados na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Peso dos CPs ao longo do tempo



É possível perceber que os corpos de prova que foram mantidos na câmara seca apresentaram uma redução de peso, o que indica a redução de umidade e hidratação do cimento. Os CPs da câmara úmida permaneceram com o mesmo peso, o que indica que não houve perda de água da amostra, o que justifica os valores constantes de resistividade elétrica. Desse modo, é possível concluir que o grande responsável pela variação dos parâmetros elétricos é a quantidade de água disponível no corpo de prova, que é inversamente proporcional à resistividade elétrica.

Durante a execução do campo experimental também foram moldados corpos de prova com a calda de cimento utilizada para a injeção e rejeição de alguns grampos mantidos na câmara seca. Foram moldados 3 CPs para cada variação e a medição da resistividade elétrica foi realizada em diferentes idades, de modo a avaliar a variação dos valores ao longo do tempo.

Os resultados obtidos para os CPs da calda de cimento dos grampos avaliados, bem como a média para cada variação, são apresentados na Tabela 4.2. Para os valores da última leitura com idade de 588 dias, as variações que apresentaram médias de resistividades elétricas com coeficientes de variação acima de 10% foram eliminadas para o cálculo da média. Para a variação G10b, todos os valores foram mantidos devido a alta variabilidade entre eles.

Os resultados obtidos indicaram que a resistividade elétrica aumentou proporcionalmente à sua idade e apresentaram redução do peso. Esse aumento da resistividade pode ser atribuído à perda de água (umidade) e hidratação do cimento, que reduz a conectividade dos poros e conseqüentemente a condutividade elétrica do material (MEDEIROS JUNIOR E LIMA, 2016).

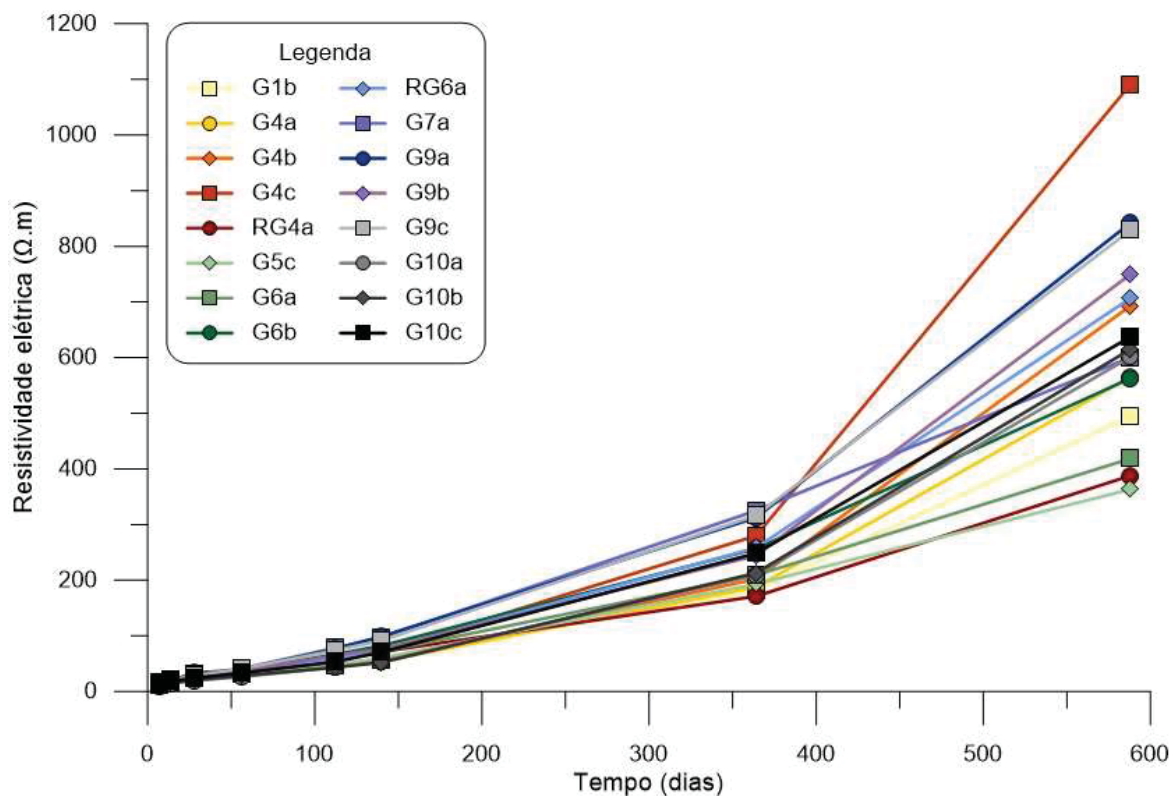
Foi possível perceber que os resultados apresentaram pequenas dispersões entre si, mesmo para os corpos de prova que foram moldados com a mesma calda de cimento (mesma variação). Esta variabilidade pode ser justificada por fatores externos relacionados à moldagem do CP (pequenas variações na altura do CP, presença de ar e/ou grampos de cimento). Outro fator é o condicionamento na câmara seca, que pode apresentar condições diferentes para os CPs devido à disposição dos CPs dentro da câmara, calibração do instrumento de medição e até mesmo variações devido ao operador. No entanto, os valores obtidos nos CPs moldados em laboratório também apresentaram valores próximos da média para as idades avaliadas.

Tabela 4.2 – Resultados de resistividade elétrica dos corpos de prova de calda de cimento dos grampos

CP	Resistividade elétrica ($\Omega \cdot m$)																		
	7 dias		14 dias		28 dias		56 dias		112 dias		140 dias		364 dias		588 dias				
	Dado	Média	Dado	Média	Dado	Média	Dado	Média	Dado	Média	Dado	Média	Dado	Média	Dado	Média			
G1b1	14,04	13,83	20,17	18,79	25,82	24,21	32,42	30,10	31,02	47,00	46,98	61,39	56,49	57,22	196,94	181,88	499,10	530,60	494,33
G1b2	14,20	13,26	18,66	17,53	23,44	23,37	30,54	30,54	42,35	42,35	53,79	53,79	170,60	170,60	453,30	453,30	563,00	563,00	628,43
G1b3	13,95	13,74	16,53	15,77	30,91	24,38	33,24	28,34	48,63	40,21	44,30	48,63	59,50	53,58	174,93	187,66	754,00	754,00	838,67
G4a1	13,76	13,51	15,46	15,46	29,53	29,53	31,48	31,48	44,05	44,05	52,59	52,59	185,99	185,99	568,30	568,30	622,10	622,10	763,80
G4a2	13,95	13,49	16,36	15,46	28,02	24,63	33,93	28,90	50,14	42,66	46,56	60,70	50,52	55,54	196,79	202,19	1130,10	1130,10	1033,83
G4a3	13,26	14,33	15,52	17,43	27,77	26,33	30,79	31,48	46,87	56,09	65,22	75,71	75,71	223,37	223,37	763,80	763,80	838,67	838,67
G4c1	14,89	14,33	19,16	17,43	30,54	26,33	34,37	31,48	58,25	52,15	56,09	74,77	65,22	71,90	297,83	279,92	1131,00	1050,60	1033,83
G4c2	14,33	13,76	16,78	16,34	27,71	27,71	31,67	31,67	57,87	57,87	75,71	75,71	263,90	263,90	919,90	919,90	414,70	414,70	420,43
G4c3	13,63	14,22	18,85	19,10	25,57	23,63	31,98	29,72	50,90	53,41	55,38	62,08	69,49	71,48	169,50	171,13	485,60	485,60	485,60
RG4a	14,33	14,70	19,23	19,23	26,58	26,58	32,23	32,23	61,83	61,83	82,88	82,88	189,30	189,30	485,60	485,60	480,30	480,30	402,37
G5c1	11,37	10,54	16,78	15,23	21,49	19,23	33,49	27,52	54,04	40,34	47,29	70,25	55,17	60,40	212,60	193,27	480,30	388,30	402,37
G5c2	10,18	10,05	14,58	14,33	19,23	19,86	28,78	28,78	47,50	47,50	55,80	55,80	198,10	198,10	338,50	338,50	462,20	462,20	549,77
G5c3	15,58	15,65	17,78	18,22	31,17	26,52	35,38	31,86	56,86	50,08	56,55	71,69	63,08	71,55	220,55	209,12	812,40	812,40	812,40
G6a1	14,39	16,97	17,03	19,86	26,52	34,56	39,21	39,21	62,71	62,71	79,86	79,86	227,70	227,70	609,20	609,20	609,20	609,20	609,20
G6a2	16,09	16,09	18,85	18,10	31,35	32,61	35,75	37,76	70,75	58,37	66,48	91,05	68,05	82,25	284,60	256,57	609,20	609,20	609,20
G6a3	14,89	17,28	18,10	19,42	32,61	38,96	39,97	39,97	70,31	70,31	87,65	87,65	281,50	281,50	639,13	639,13	639,13	639,13	639,13

Os resultados da resistividade elétrica média obtida para os corpos de prova dos grampos são apresentados na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Resistividade elétrica da calda de cimento dos grampos



Os resultados apresentaram uma tendência de comportamento, com aumento da resistividade elétrica com a idade. Além disso, a dispersão dos resultados também aumenta com a idade.

Em campo, não se sabe ao certo qual a condição real da calda de cimento em contato com o solo e em relação à sua umidade ao longo do tempo. Mikos (2017) indica que no campo experimental, a umidade média do solo local é 23%, que é inferior à umidade da câmara seca. No entanto, na câmara seca, o CP está em contato com o ar, o que permite a saída de água. Tal comportamento não pode ser estendido à calda em contato com o solo.

4.1.3. Permissividade elétrica da calda de cimento

Os resultados da permissividade elétrica dos corpos de prova da calda de cimento são apresentados na Tabela 4.3, para as três variações de armazenamento: câmara seca, câmara úmida e estufa.

Tabela 4.3 – Resultados de permissividade elétrica da calda de cimento

Corpo de Prova	Armazenamento	Permissividade elétrica			Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
		7 dias	14 dias	28 dias			
CP1	Câmara úmida	14,92	13,68	14,35	14,08	0,94	6,7%
CP2		15,52	13,23	14,71			
CP3		13,35	12,55	14,41			
CP4	Câmara seca	5,94	5,87	5,61	5,77	0,30	5,2%
CP5		6,25	5,77	5,49			
CP6		6,11	5,54	5,34			
CP7		5,32	5,59	5,18			
CP8		5,53	5,56	5,31			
CP9	Estufa	6,09	5,65	5,43	5,52	0,26	4,8%

O tempo de cura da calda de cimento não apresentou nenhuma tendência significativa nos valores de permissividade elétrica. Os corpos de prova que foram armazenados nas mesmas condições, apresentaram resultados semelhantes, com baixo coeficiente de variação. Quanto menor o CV, maior é a precisão do experimento e para valores abaixo de 10%, o experimento tem alta precisão (PIMENTEL GOMES, 2000).

É possível perceber que os corpos de prova que estavam na câmara úmida apresentaram maiores valores de permissividade elétrica, provavelmente devido à presença de água nas amostras. Os resultados obtidos para o armazenamento na câmara seca e na estufa foram próximos, indicando que a condição é semelhante, devido à ausência/baixa quantidade de água na amostra, em ambos os casos. A permissividade elétrica da água é aproximadamente 80, enquanto a do ar é 1 (CHEUNG, 2003). Desse modo, se os vazios da calda de cimento estão preenchidos com água, a permissividade é maior, e se for somente ar (amostra seca) a tendência é apresentar menor permissividade.

Para uma análise de campo, não é possível determinar qual a condição da calda de cimento, que também pode variar ao longo do furo e ao longo do tempo, por exemplo em períodos chuvosos. Desse modo, é possível dizer que a permissividade elétrica deve estar entre os valores de 5,5 e 14,1, considerando as condições extremas. Segundo Cheung

(2003), o valor da constante é aproximadamente 10 para a calda de cimento, o que corresponde a um valor médio do obtido nos ensaios.

A velocidade de propagação do pulso elétrico na calda de cimento foi calculada de acordo com a Equação (1). Além dos valores obtidos nos ensaios de permissividade elétrica, também foi avaliado o valor citado por Cheung (2003). A velocidade de propagação e a relação com a velocidade da luz no vácuo são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Estimativa da velocidade de propagação do pulso na calda de cimento

Armazenamento	Permissividade elétrica	Velocidade de propagação (m/s)	$V_{calda}/V_{vácuo}$
Câmara úmida	14,08	79.894.958,50	0,267
Câmara seca	5,77	124.805.233,27	0,416
Estufa	5,52	127.600.143,87	0,426
Cheung (2003)	10,0	94.802.699,26	0,316

A velocidade de propagação na calda de cimento é maior para um material seco ou com baixo teor de umidade. Com a presença de água na amostra a velocidade obtida foi inferior. O valor da velocidade de propagação obtido com o valor de permissividade elétrica da calda de cimento proposto por Cheung (2003) indica uma média entre os valores obtidos no ensaio.

4.1.4. Modelo reduzido TDR

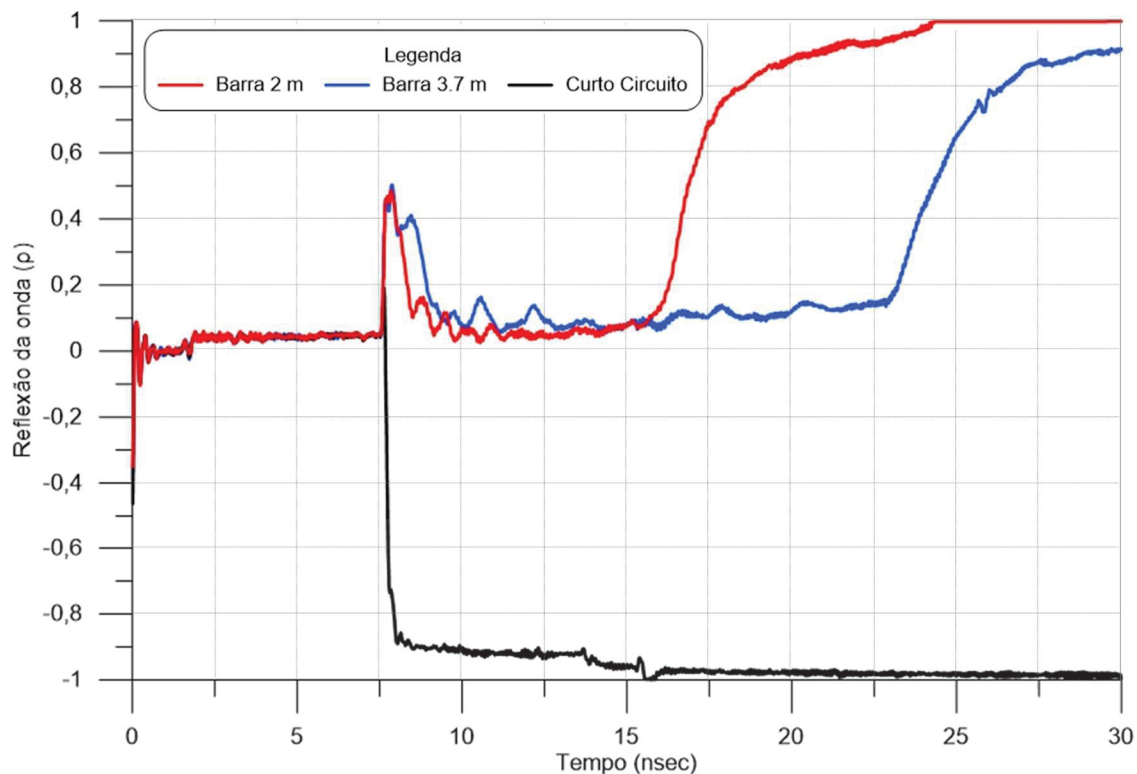
Os ensaios em laboratório foram realizados para calibrar a velocidade de propagação do pulso elétrico na superfície das barras de aço em contato com o ar. Para tal, foram utilizadas duas barras *Gewy* 25 mm, iguais às utilizadas no campo experimental, com 2,0 m e 3,7 m de comprimento. Os resultados gráficos encontrados são apresentados na Figura 4.6, incluindo a curva de referência de curto-circuito, que indica o início da leitura (7,4 ns).

Tabela 4.5 – Velocidade de propagação da barra de aço em contato com o ar

Medição	Tempo		Comprimento (m)	Velocidade (m/s)	V/Vvácuo
	Inicial (ns)	Final (ns)			
Barra 2 m	7,4	15,9	2,0	$2,42 \times 10^8$	0,805
Barra 3,7 m	7,4	23,1	3,7	$2,39 \times 10^8$	0,796

Os resultados obtidos a partir do gráfico são apresentados na Tabela 4.5, onde é possível observar-se que a velocidade de propagação destas barras em contato com o ar é de 0,8 vezes a velocidade de propagação da luz no vácuo ($V/V_{\text{vácuo}}$).

Figura 4.6 – Ensaio TDR das barras de aço em laboratório



A velocidade de propagação da barra em contato com o ar foi utilizada para calcular o tempo em que a onda se propaga no trecho em que a barra estava para fora do terreno, sem contato com a calda de cimento. A velocidade de propagação do pulso no ar foi praticamente a mesma para os diferentes comprimentos de barras avaliados. Desse modo, a velocidade considerada nas análises do TDR nos grampos foi de 2,4 m/ns.

Na etapa de moldagem dos grampos foi estabelecido manter 20 cm da barra em contato com o ar, porém devido à retração da calda de cimento, o valor obtido foi um pouco maior. A barra de 2,0 m com 25 mm de diâmetro apresentou 24 cm em contato com o ar e a barra de 32 mm, com 22,5 cm com ar. Os resultados obtidos na barra de 25 mm e na de 32 mm de diâmetro são apresentadas na Figura 4.7 e Figura 4.8, respectivamente.

Figura 4.7 – Ensaio TDR no grampo de 2,0 m com 25 mm de diâmetro

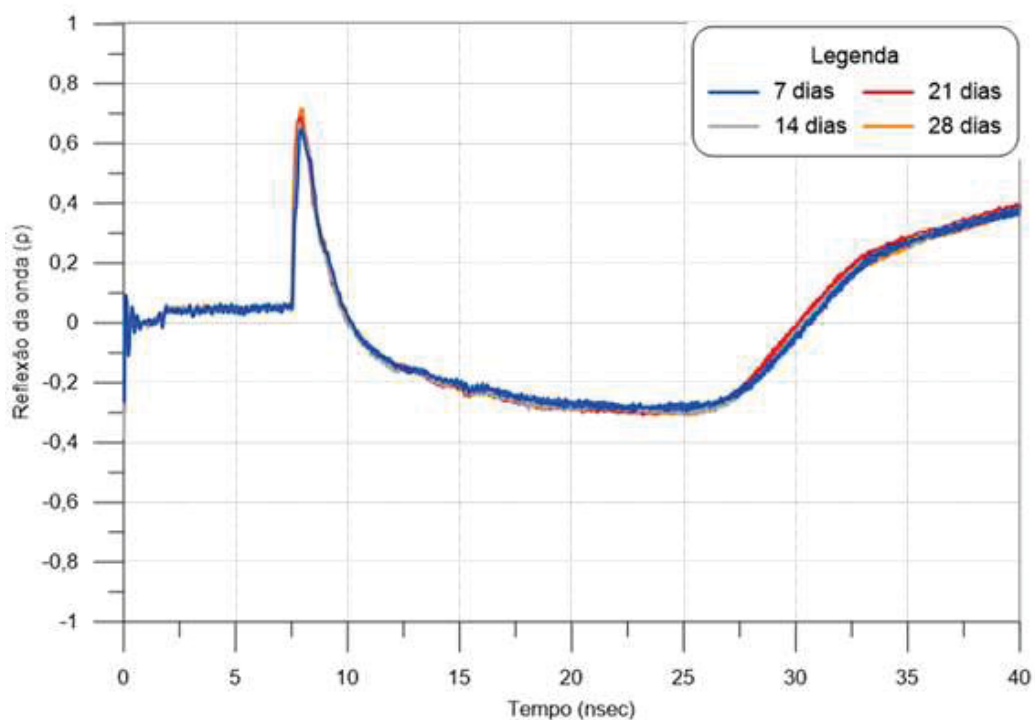
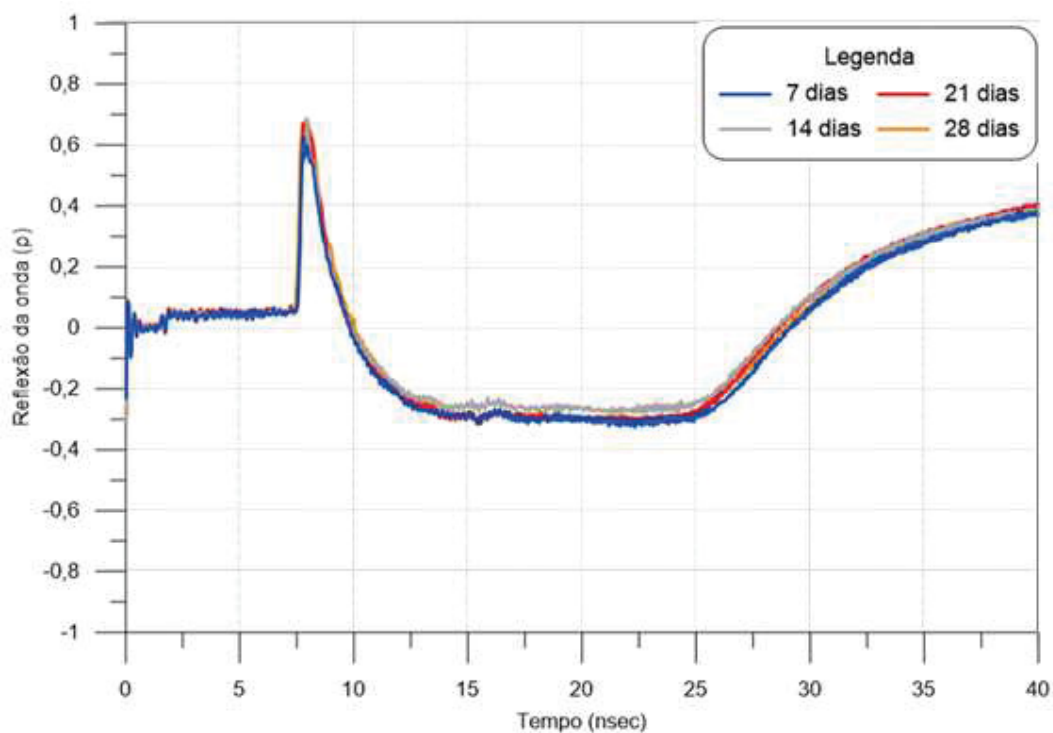


Figura 4.8 – Ensaio TDR no grampo de 2,0 m com 32 mm de diâmetro



Foi possível perceber que os resultados não foram alterados com o tempo, uma vez que as curvas ficaram praticamente sobrepostas. Com os valores dos tempos obtidos graficamente, e com a velocidade de propagação no ar, foi estimada a velocidade de propagação na calda de cimento. Os resultados são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Velocidade de propagação na calda de cimento

Grupo	L ar (m)	L calda (m)	Tempo total (ns)	V calda (m/s)	Vcalda/Vv�cuo
25 mm	0,24	1,76	19,4	$9,57 \times 10^7$	0,319
32 mm	0,22	1,78	18,2	$1,03 \times 10^8$	0,343

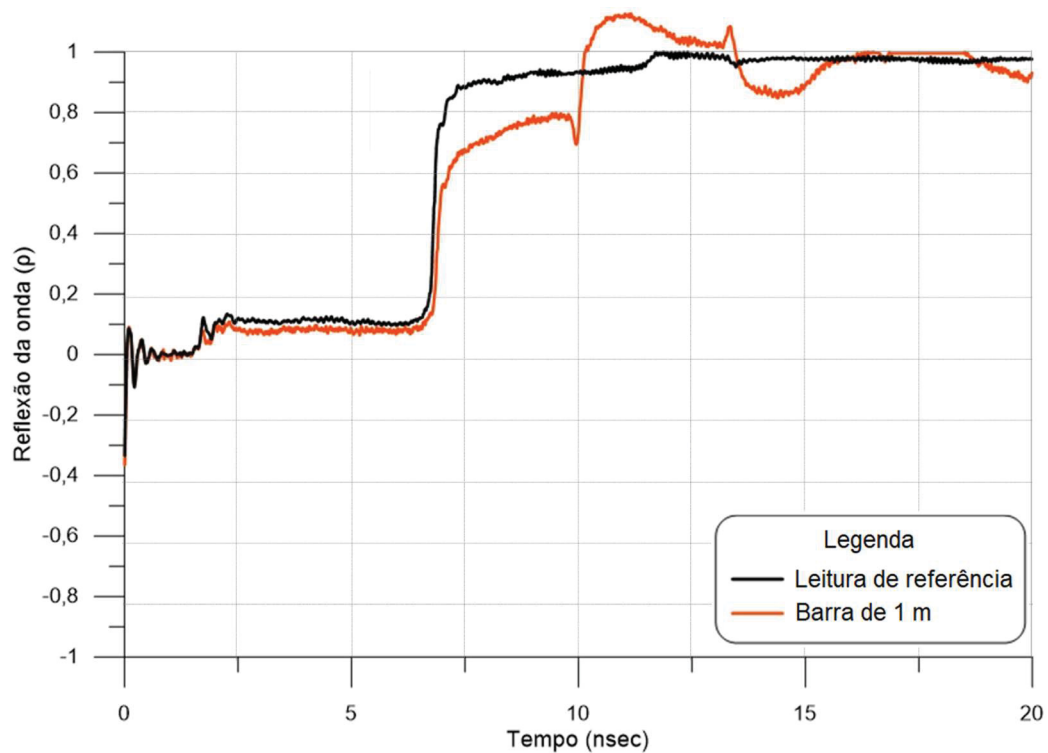
Os resultados obtidos nas barras de 2,0 m e de 32 mm indicaram uma velocidade média de 0,331 e 0,343 vezes a velocidade da luz no vácuo, respectivamente. Também foi calculada a permissividade elétrica da calda de cimento de acordo com o valor obtido da velocidade de propaga o na calda de cimento, como apresentado no item 3.6.3. Os valores de permissividade elétrica obtidos foram de 9,83 e 8,50 para as barras de 25 mm e 32 mm, respectivamente.

4.1.5. Cone Goubau

A Figura 4.9 apresenta os resultados da leitura de referência e o ensaio com o cone na barra de 25 mm de diâmetro e 1,0 m de comprimento. Ambas as leituras foram realizadas com o equipamento TDR com o cabo auxiliar plugado no conector BNC do cone de alumínio. A leitura de referência foi realizada somente no cone, sem o contato com a barra. Esta medi o teve o objetivo de identificar quais reflexões eram geradas devido ao cabo auxiliar e o cone. A leitura na barra de aço foi realizada com a conexão do cone interno com a barra. Comparando as duas curvas   possível identificar o ponto em que a curva inicia a leitura na barra.

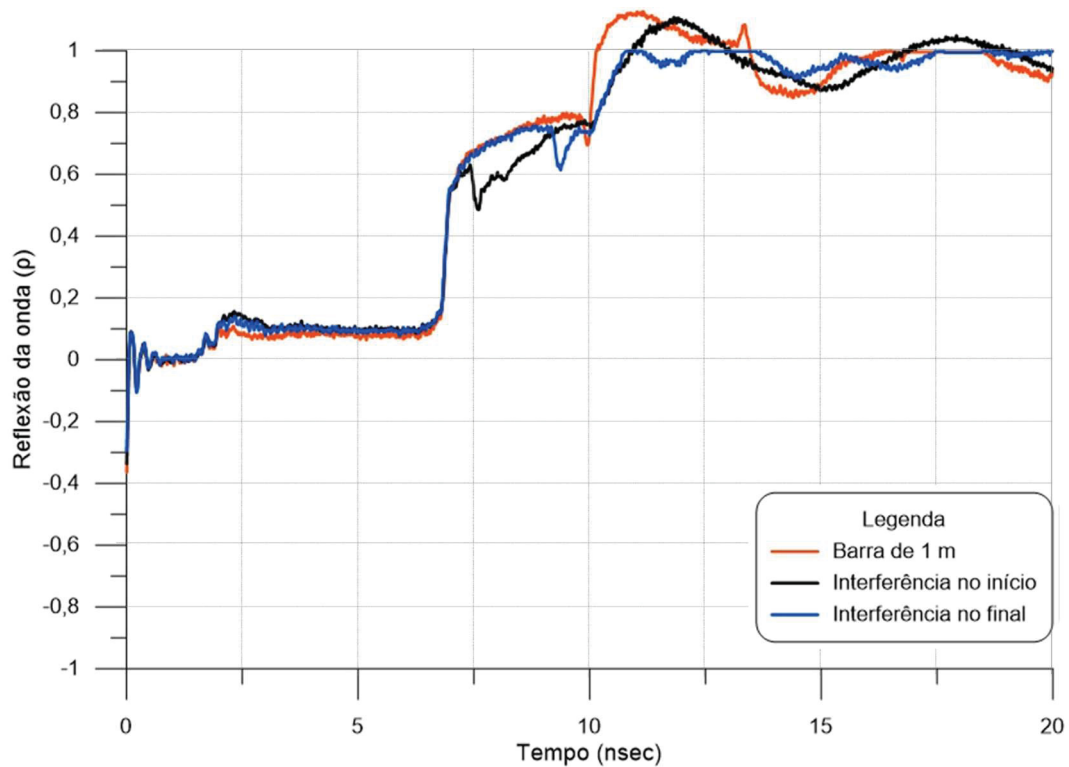
O ensaio com o cone na barra de 1,0 m apresentou uma curva com alto valor de reflexão, próximo de 0,8, quando comparado com os ensaios TDR nas barras em laboratório com o cabo coaxial. O valor do tempo total de propaga o na barra foi de 3,46 ns, o que representa uma velocidade de 0,96 vezes a velocidade da luz no vácuo. Desse modo, foi possível perceber que o ensaio com o cone apresentou uma velocidade superior   velocidade obtida nos ensaios com o cabo coaxial.

Figura 4.9 – Resultado do ensaio TRD utilizando o cone goubau na barra de aço



Também foram avaliadas as barras de aço com interferência no início e final da barra e comparadas com o ensaio realizado na barra em contato com o ar, conforme apresentado na Figura 4.10.

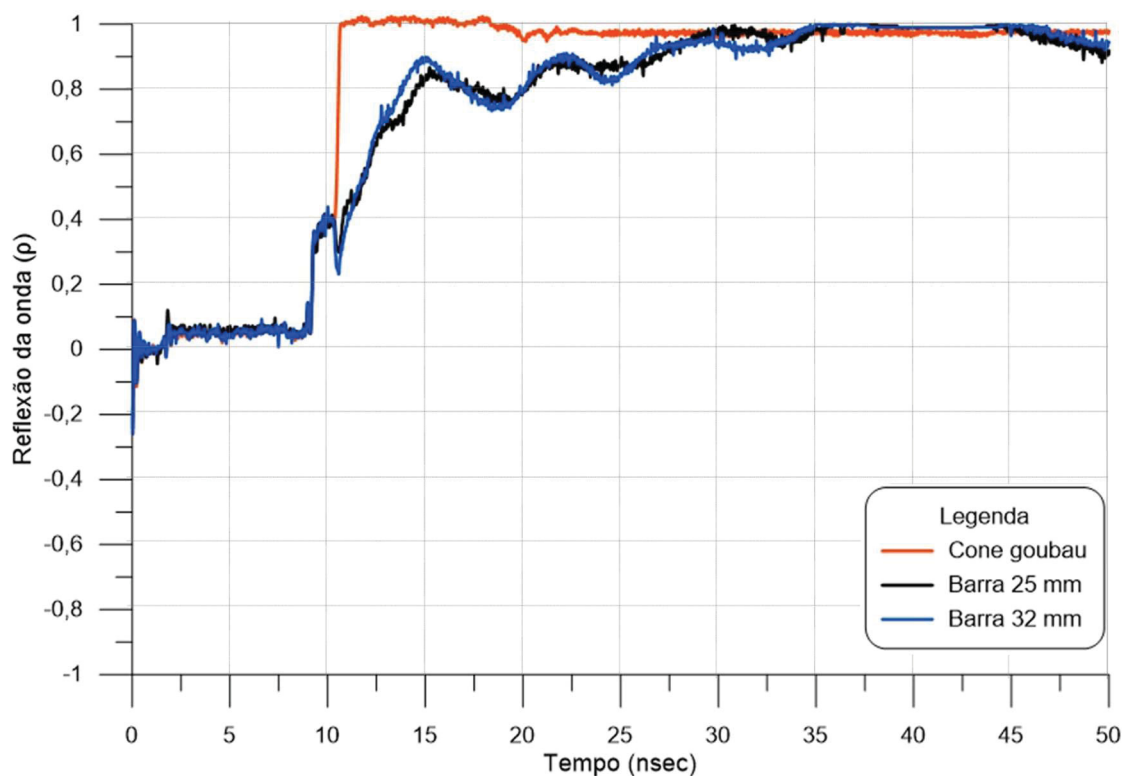
Figura 4.10 – Resultado do ensaio TRD utilizando o cone goubau na barra de aço com interferências



As interferências foram simuladas com panos úmidos com largura de aproximadamente 5 cm. O principal objetivo deste ensaio foi verificar se a mudança de material ao redor da barra afetaria o ensaio. Foi possível identificar uma reflexão negativa em ambos os testes, com a interferência no início e no final da barra, o que indica que o método permite avaliar alterações no meio em contato com a barra. Ainda, o reflexo final retornou 0,5 ns depois quando comparado com o ensaio realizado na barra sem interferência, indicando redução inferior a 1,5% de velocidade.

Também foram realizados ensaios nos modelos reduzidos de grampos com barras de 2 m de comprimento e diâmetros de 25 mm e 32 mm, e comparados com a leitura de referência obtida somente com o cone sem contato com a barra. Os resultados são apresentados na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Resultado do ensaio TRD utilizando o cone goubau nos modelos reduzidos



Os ensaios realizados foram de caráter preliminar e apresentaram resultados promissores para o uso do cone na determinação do comprimento e integridade das barras. O cone elaborado no laboratório era frágil, e por isso é necessário a elaboração de um cone mais robusto para permitir a realização de ensaios em campo. Além disso, é necessário verificar se o solo ao redor da barra não gera influência na reflexão do pulso.

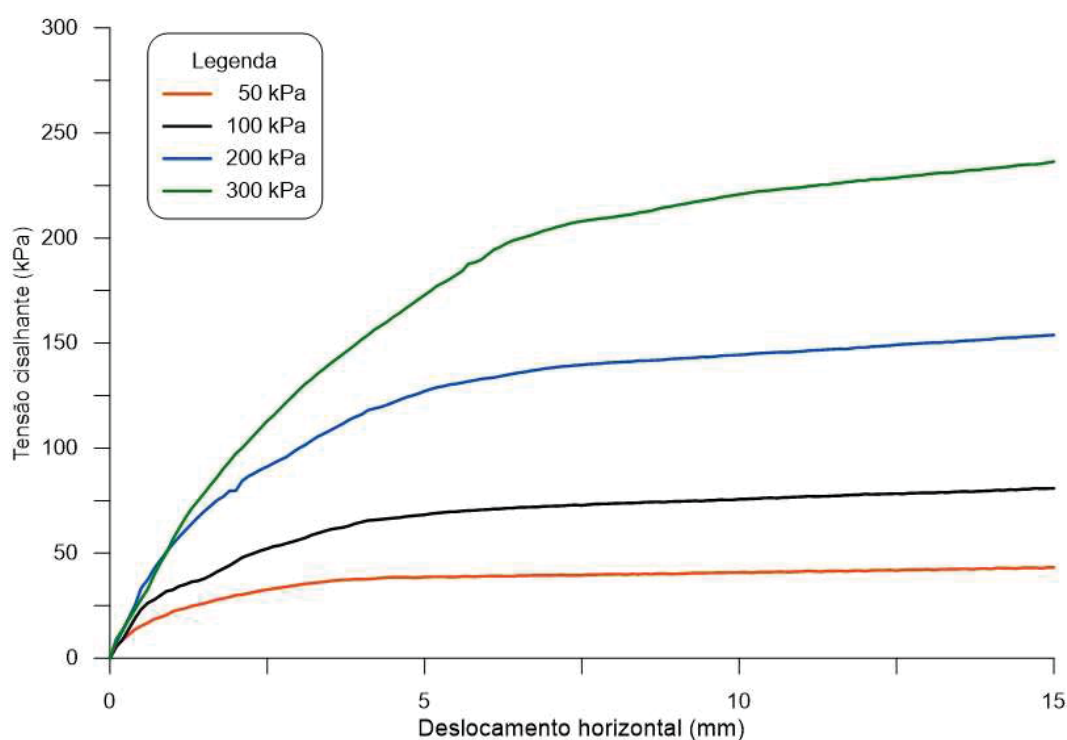
4.1.6. Areia reciclada na calda de cimento

Os resultados obtidos com os ensaios realizados com a areia reciclada como adição na calda de cimento para aplicação em solo grampeado são apresentados na sequência.

4.1.6.1. Ensaios de cisalhamento direto

O resultado dos ensaios de cisalhamento realizados no solo natural compactado é apresentado na Figura 4.12.

Figura 4.12 – Ensaio de cisalhamento direto no solo natural



Também foram realizados ensaios de cisalhamento de interface entre o solo natural compactado e a calda de cimento. Os resultados dos ensaios com a calda de cimento tradicional, a calda de cimento com adição de areia natural e a calda de cimento com adição de areia reciclada são apresentados na Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15, respectivamente.

Figura 4.13 – Ensaio de cisalhamento direto de interface com calda de cimento tradicional

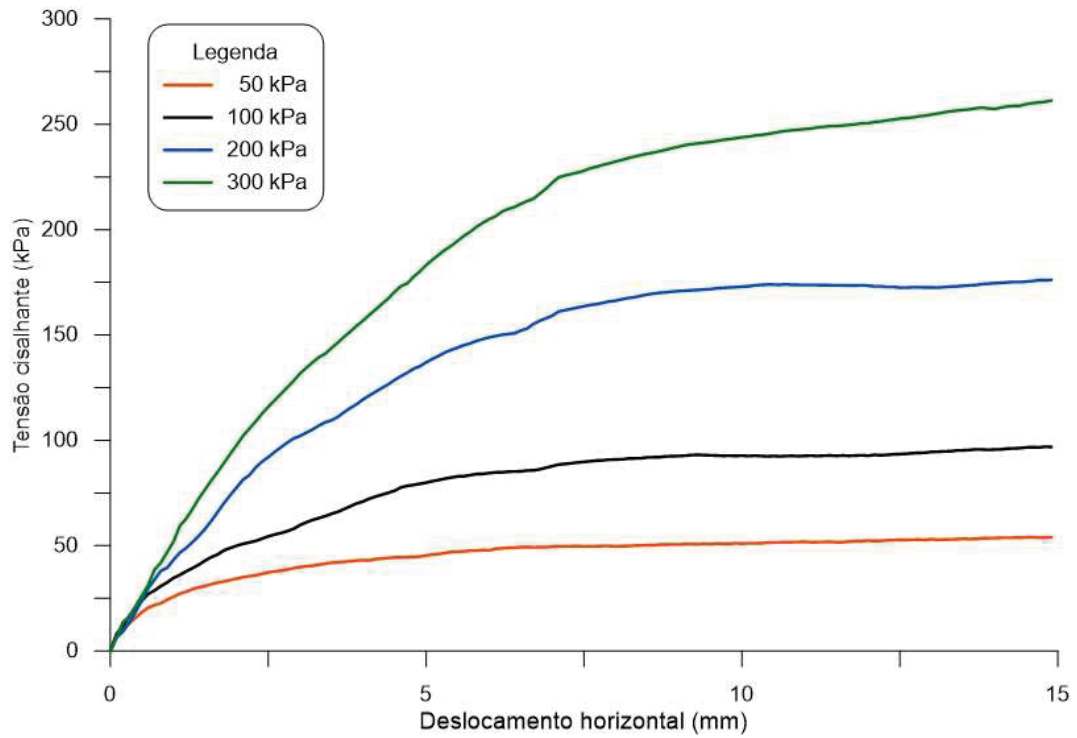


Figura 4.14 – Ensaio de cisalhamento direto de interface com calda de cimento com areia natural

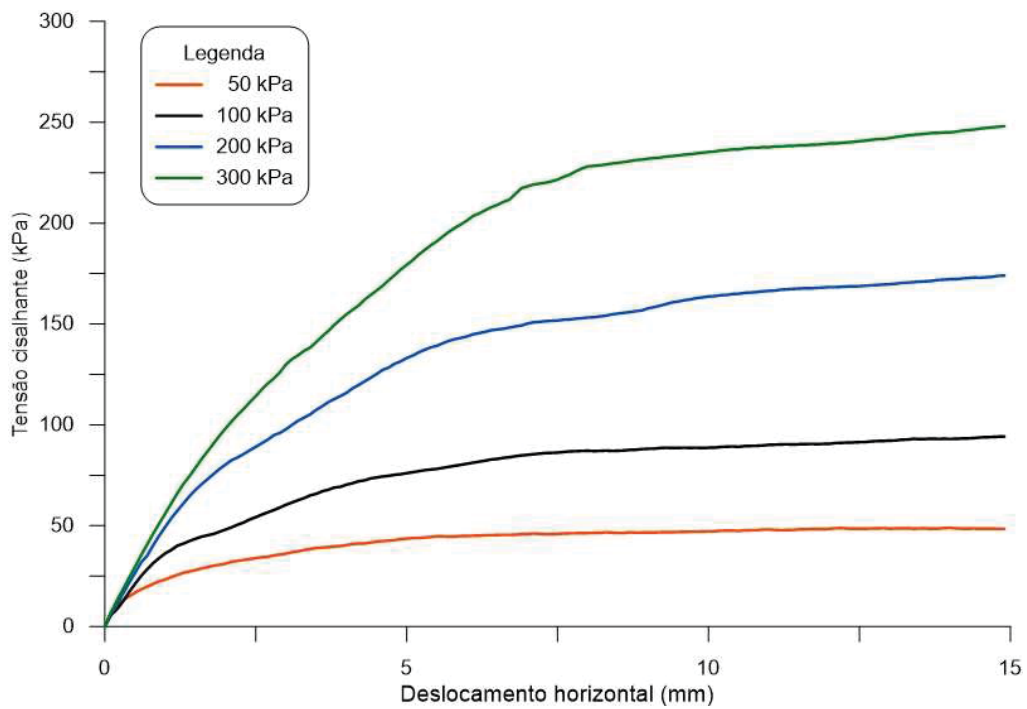
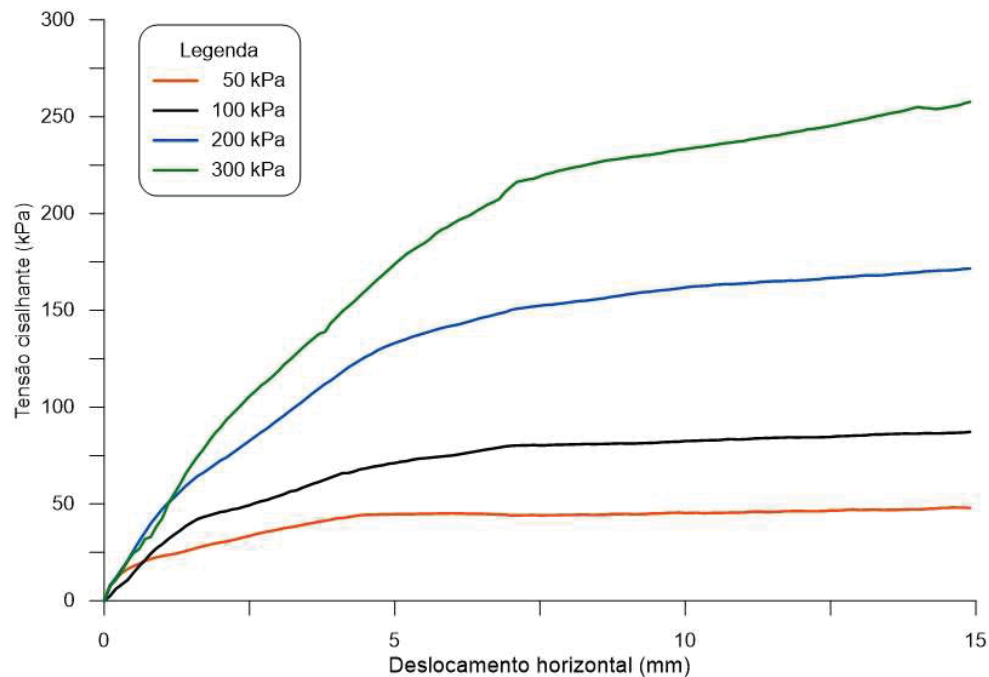
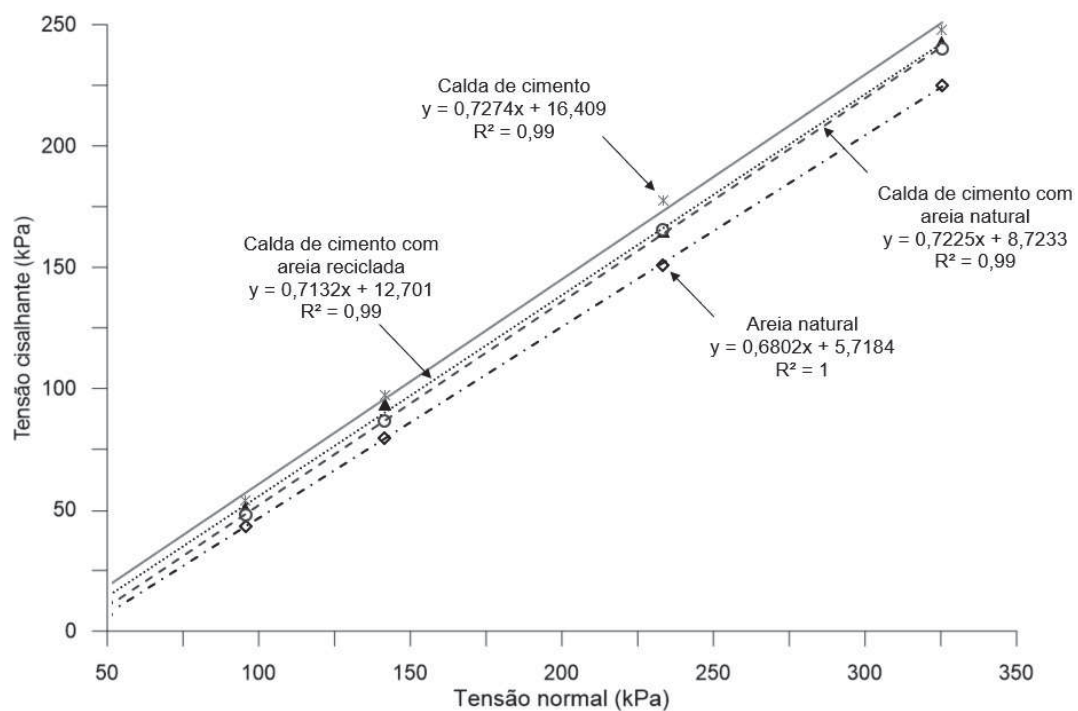


Figura 4.15 – Ensaio de cisalhamento direto de interface com calda de cimento com areia reciclada



As envoltórias de resistência obtidas pelos gráficos dos ensaios de cisalhamento direto são apresentadas na Figura 4.16.

Figura 4.16 – Envoltórias de resistência dos ensaios de cisalhamento



A partir das envoltórias de resistência é possível perceber que o ensaio de cisalhamento direto realizado no solo ficou abaixo das envoltórias obtidas nos ensaios de cisalhamento de interface.

Os parâmetros de resistência obtidos pelo ensaio são apresentados na Tabela 4.7. Cabe salientar que para o ensaio de cisalhamento direto com a areia natural compactada, os parâmetros de resistência obtidos são do solo, e para os ensaios de cisalhamento direto de interface, os parâmetros de resistência são da interface dos materiais avaliados.

Tabela 4.7 – Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento

Varição	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Cisalhamento direto: areia natural	5,7	34,26
Cisalhamento de interface: calda de cimento	16,4	36,05
Cisalhamento de interface: calda de cimento + areia natural	8,7	35,78
Cisalhamento de interface: calda de cimento + areia reciclada	12,7	35,81

Os parâmetros de resistência de interface foram superiores para a amostra que utilizou a calda de cimento sem nenhuma adição, provavelmente pela maior penetração da calda no solo natural. Em relação às amostras que utilizaram calda de cimento com areia, a adição de areia reciclada que apresentou maior coesão e maior ângulo de atrito quando comparado com a amostra de calda de cimento com adição de areia natural. Os parâmetros de resistência de interface para todas as variações realizadas com a calda de cimento foram superiores aos parâmetros de resistência do solo natural compactado.

A Figura 4.17a apresenta a amostra antes da realização do ensaio de cisalhamento de interface, e a Figura 4.17b indica a condição final da calda de cimento após o ensaio. É possível perceber que a superfície da amostra de calda de cimento apresentou uma textura rugosa devido a conformação da calda no solo compactado.

Figura 4.17 –Ensaio de cisalhamento de interface entre solo natural e calda de cimento

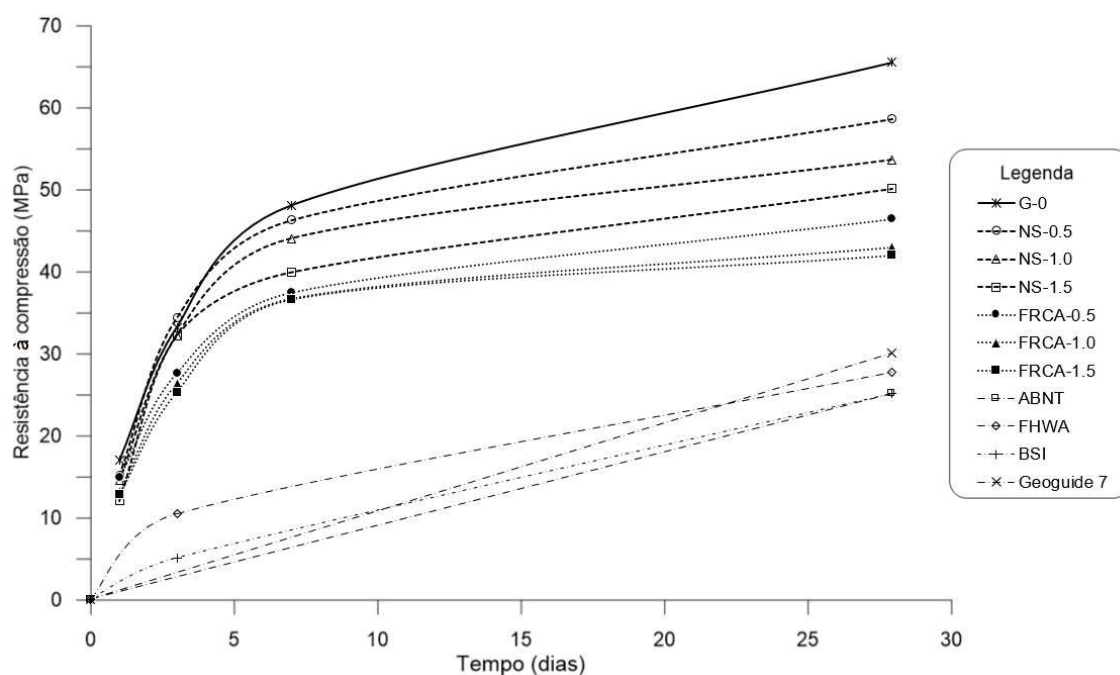


Legenda: (a) Amostra antes do ensaio; (b) Calda de cimento após o ensaio

4.1.6.2. Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados para todas as amostras de calda de cimento e com as proporções estabelecidas. A Figura 4.18 apresenta os resultados para cada variação com e sem adição de areia com idades de 1, 3, 7 e 28 dias. Também são apresentados os valores mínimos requeridos por norma.

Figura 4.18 – Resistência à compressão das amostras de calda de cimento



O resultado dos ensaios indicou que todas as variações avaliadas (calda de cimento tradicional, com adição de areia natural e com adição de areia reciclada) apresentaram valores de resistência a compressão acima dos requeridos por norma. Dentre todas as variações, a calda de cimento tradicional que atingiu maior resistência, seguido da calda de cimento com areia natural, e calda de cimento com areia reciclada. Para ambas as variações com adição de areia, quanto maior a quantidade de areia adicionada na calda de cimento, menor a resistência à compressão. A adição de areia reciclada na calda de cimento, apesar de apresentar menor resistência comparada com as demais variações, ainda está acima dos valores requeridos por norma.

A proporção FRCA-1,5 testada apresentou resistência à compressão correspondente aos valores de norma, e que pode contribuir para uma maior resistência ao arrancamento dos grampos. Esta proporção considera a adição de uma relação de 1,5 entre areia e cimento avaliadas em peso, o que corresponde à 1.126 kg de areia reciclada por cada metro cúbico de calda de cimento. Em comparação com a calda de cimento

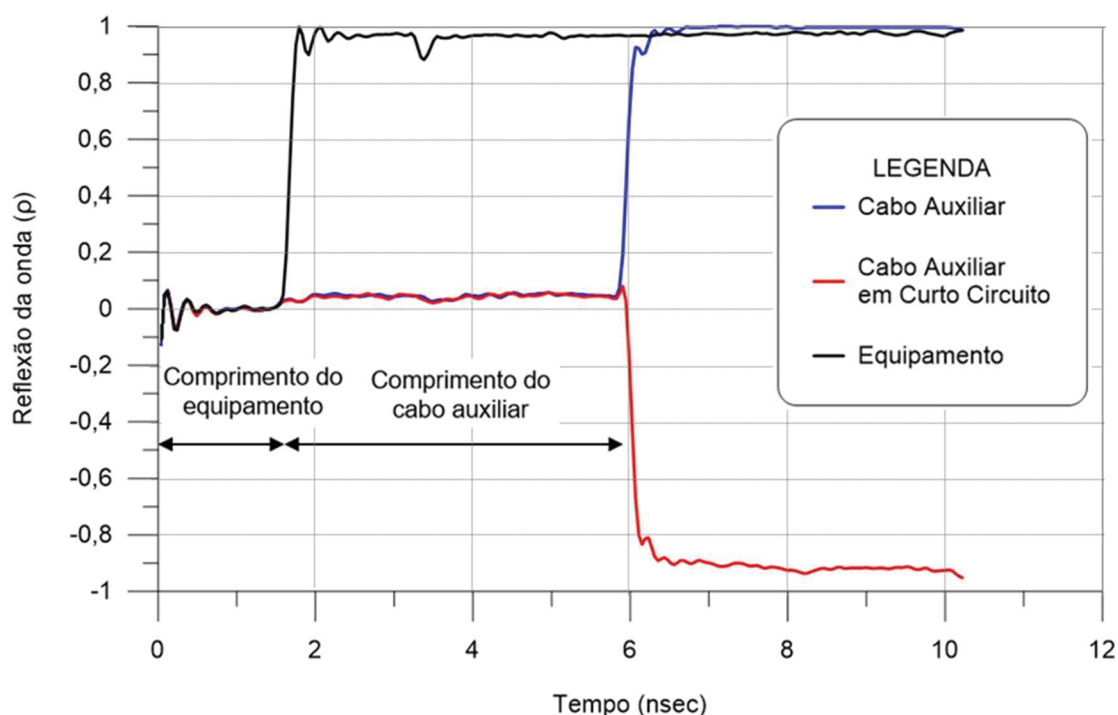
tradicional, é possível obter uma redução de 42% de uso de cimento, e 24% menos de água. A redução do uso de cimento representa aproximadamente menos 380 kg de CO₂ na atmosfera a cada m³. O uso de areia reciclada na calda de cimento pode ser uma alternativa sustentável para redução dos impactos ambientais, consumo de cimento e emissão de gases do efeito estufa.

4.2.RESULTADOS DO CAMPO EXPERIMENTAL

4.2.1. Time Domain Reflectometry

As reflexões ocorrerem devido ao final do cabo ou mudança de meio em que a onda se propaga. Nas medições iniciais foi possível perceber que o equipamento apresenta um “comprimento interno” em que o pulso é aplicado. O cabo auxiliar que faz a ligação com a barra também apresenta um comprimento. Para determinar o ponto em que ocorre o pulso na barra de aço, é possível realizar um “curto-circuito” no cabo auxiliar para obter uma curva de referência. De modo a entender a origem dos diferentes picos foram sobrepostos os resultados obtidos com a aplicação do pulso somente com o equipamento sem nenhum cabo conectado, com o cabo composto pelas garras jacaré e com as garras jacaré em curto-circuito (Figura 4.19).

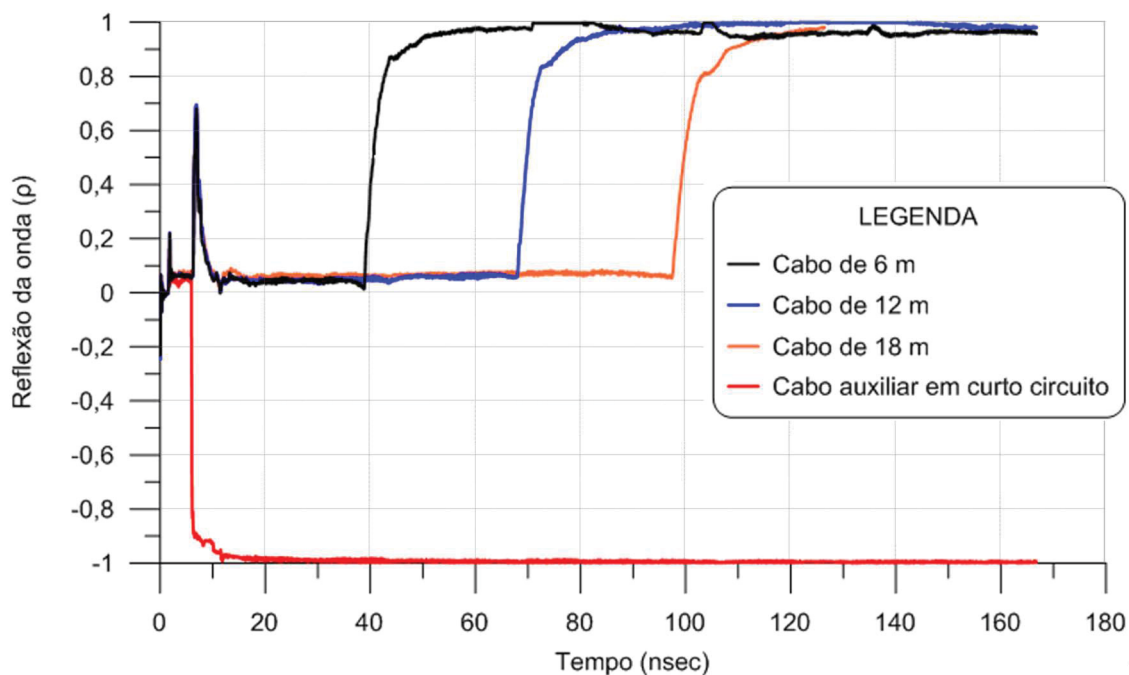
Figura 4.19 – Análise dos pulsos iniciais do equipamento TDR



4.2.1.1. Ensaios nos cabos coaxiais

Os gráficos obtidos para os cabos coaxiais instalados nos grampos de 6 m, 12 m e nos tirantes de 18 m são apresentados na Figura 4.20. Foram escolhidos três elementos de cada comprimento para apresentação dos resultados, uma vez que os gráficos dos cabos de mesmo comprimento foram bastante similares. Assim, foi possível determinar a velocidade de propagação no cabo coaxial.

Figura 4.20 – Comprimento dos cabos coaxiais no campo experimental



A velocidade de propagação do pulso foi calculada com base no comprimento conhecido do cabo e no tempo de reflexão de início e fim. O início foi coincidente com o reflexo negativo do curto-circuito do cabo auxiliar e o fim foi indicado com a mudança de direção da reta. A velocidade de propagação do cabo determinada foi de 0,66 vezes a velocidade da luz no vácuo ($\approx 2,0 \times 10^8$ m/s). O valor foi correspondente com a velocidade fornecida pelo fabricante do cabo coaxial RG-58 (RFS). Além disso, observa-se um pico na reflexão inicial, que indica a mudança de cabos na passagem do pulso elétrico, entre o cabo do equipamento e o cabo pré-instalado na barra. Percebe-se que o tempo de propagação do pulso elétrico é proporcional ao comprimento do cabo.

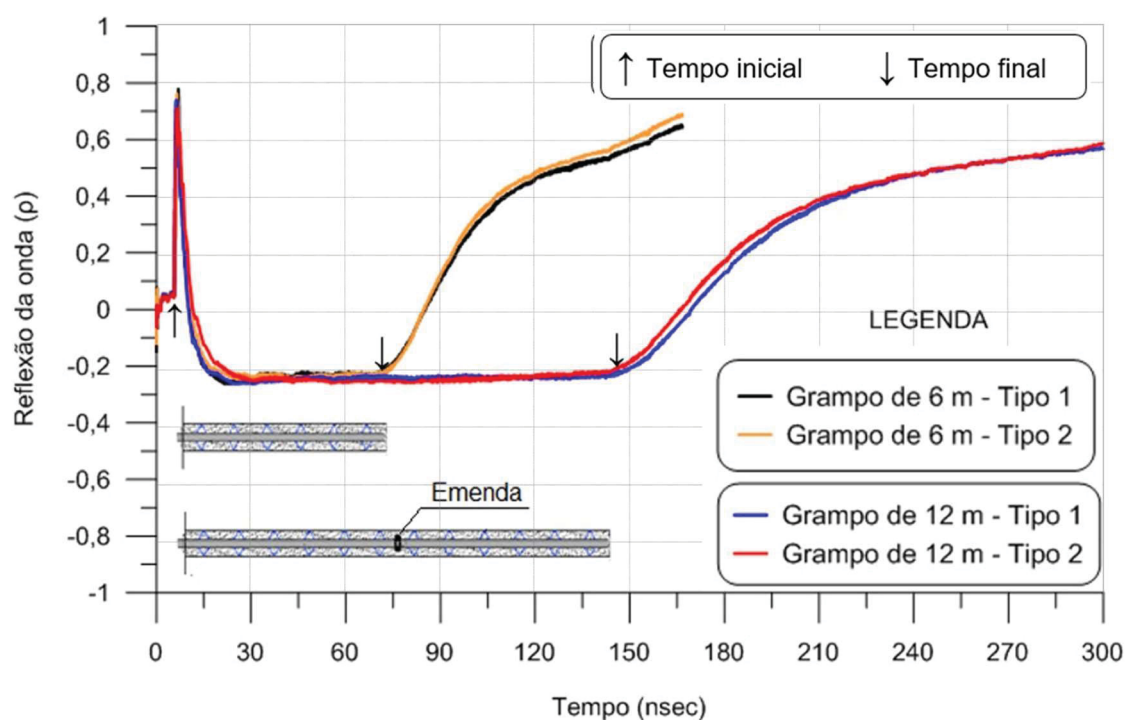
Com base nos resultados obtidos foi possível concluir que todos os cabos instalados em campo estavam íntegros e corresponderam ao comprimento das barras instaladas. Quanto mais curto o cabo coaxial, menor o tempo de propagação do pulso elétrico de alta frequência para uma mesma velocidade, como já era esperado. A pré-

instalação do cabo coaxial na estrutura permite estimar o comprimento das barras enterradas no solo de forma confiável, procedimento que é recomendado para novas estruturas de estabilização.

4.2.1.2. Grampos

Os ensaios com TDR foram realizados com a geração do contato entre o fio externo do cabo coaxial e a barra avaliada. Os primeiros elementos a serem ensaiados foram os grampos íntegros de 6 m e 12 m. Os grampos G1, G2, G3 e G4 foram executados como elementos de referência para calibração da velocidade de propagação do pulso elétrico na barra em contato com a calda de cimento. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.21, onde o símbolo “↑” indica o tempo inicial e o símbolo “↓” representa o tempo final de propagação do pulso na barra.

Figura 4.21 – Resultados do método TDR nos grampos íntegros

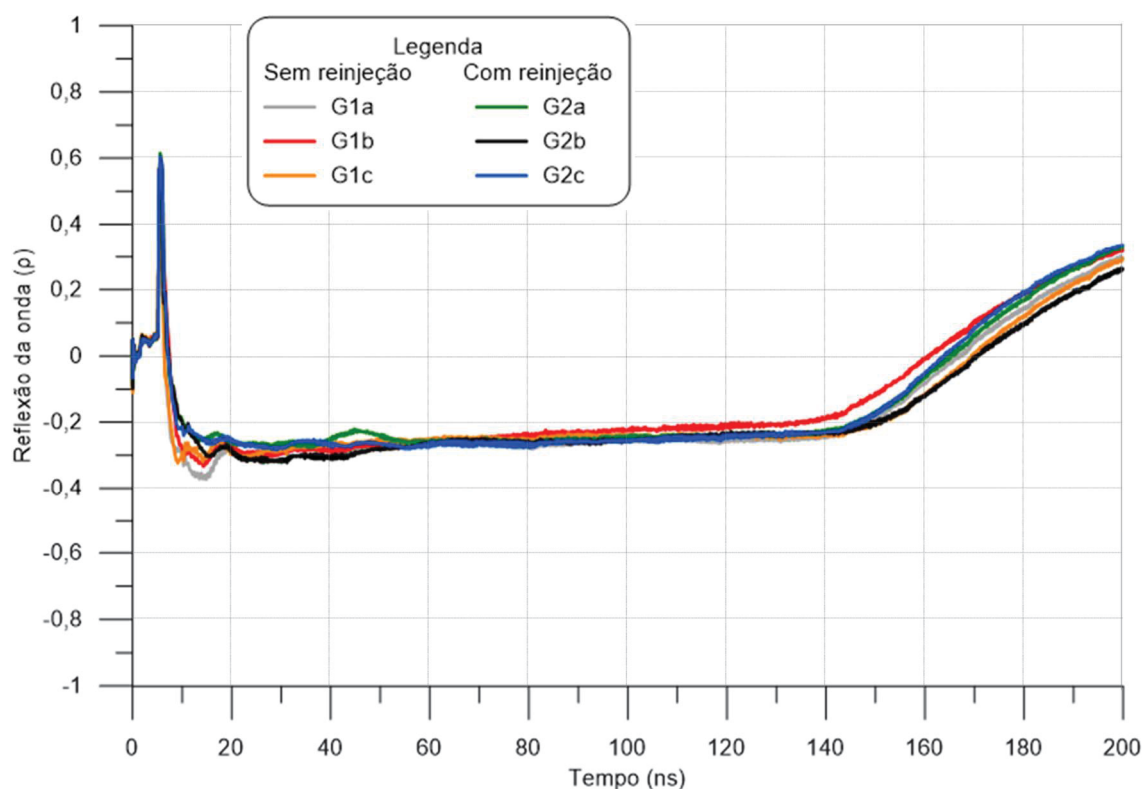


Com base nos resultados foi possível observar que os gráficos dos grampos de mesmo comprimento apresentaram comportamento gráfico similar, o que indica que a velocidade de propagação foi semelhante. A reflexão da onda nas barras com comprimento de 6 m ocorre em um tempo menor do que na de 12 m, o que caracteriza os diferentes comprimentos instalados. Cabe salientar que as reflexões do final da barra não foram tão acentuadas como a do cabo coaxial, pois o sinal não se propagou por um meio ideal e isolado como o cabo, e sim na barra de aço envolta por calda de cimento. Também

não foram observados picos de reflexão ao longo do trecho horizontal do gráfico, indicando um preenchimento adequado.

As curvas obtidas nos grampos G1 e G2, ambos de 12 m, são apresentadas na Figura 4.22. Destaca-se que ambos são grampos íntegros, mas os elementos da variação G1 foram executados somente com bainha e os grampos G2 tiveram reinjeção.

Figura 4.22 – Ensaio TDR nos grampos de 12 m



A reflexão ρ de todas as barras, que é a relação entre tensão refletida e tensão aplicada, adimensional, encontra-se entre -0,3 e -0,2 (próximo ao final das barras), o que indica a capacidade de reflexão da onda na calda de cimento.

As barras de 12 m apresentam uma emenda no meio da barra (elementos G1 e G2), e não foi possível identificar alterações gráficas nos resultados, indicando que a emenda não influencia os resultados.

Observou-se que todas as barras apresentaram reflexões irregulares logo após o pico inicial, provavelmente pela passagem da corrente elétrica entre diferentes meios, do ar para a calda de cimento.

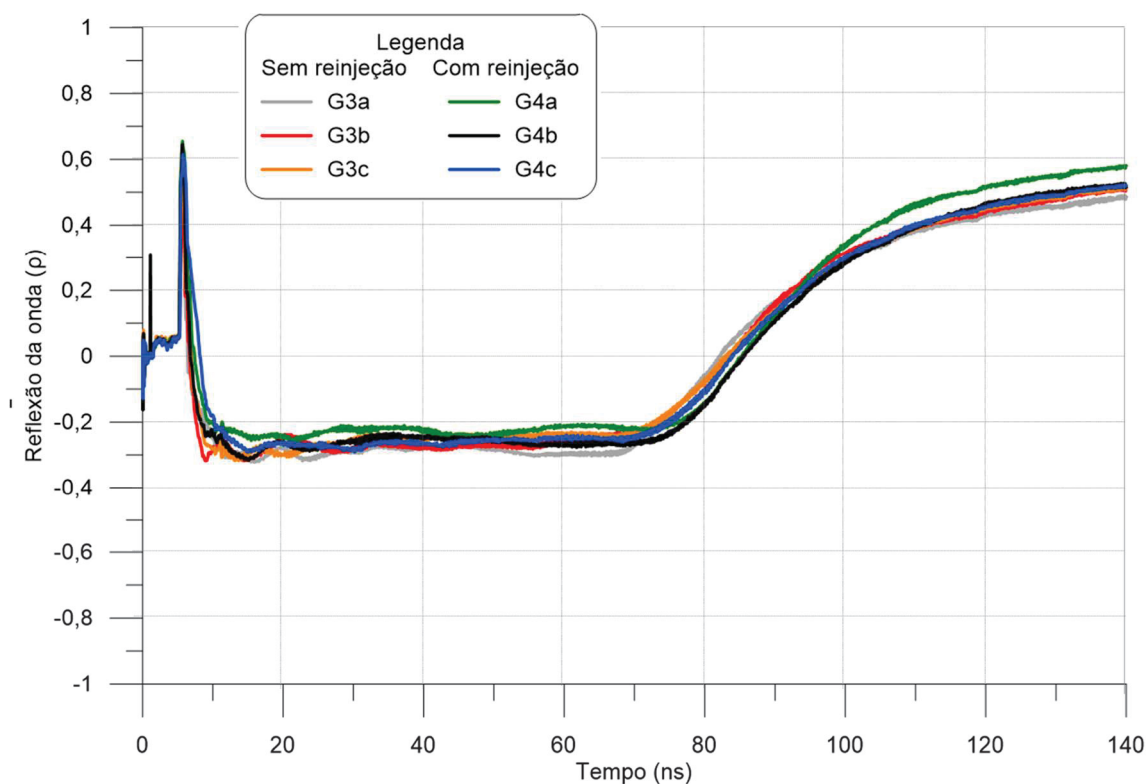
A barra G1a apresentou uma reflexão negativa inicial maior que as demais barras, o que pode indicar uma falha no início do furo não premeditada, mas que pode estar associada aos processos executivos dos grampos.

É possível perceber que o grampo G1b teve um tempo de propagação inferior quando comparado aos demais, o que resultou em uma velocidade maior que a média dos grampos G1a e G1c. Da mesma maneira, o grampo G1c apresentou o maior tempo entre as três variações.

A barra G2a apresentou uma reflexão positiva próxima aos 2 m iniciais (início aos 40 ns), que pode estar associada a uma falha com ar na calda de cimento, devido ao formato gráfico.

Os resultados dos grampos de 6 m com o método TDR podem ser observados na Figura 4.23.

Figura 4.23 – Ensaio TDR nos grampos íntegros de 6 m



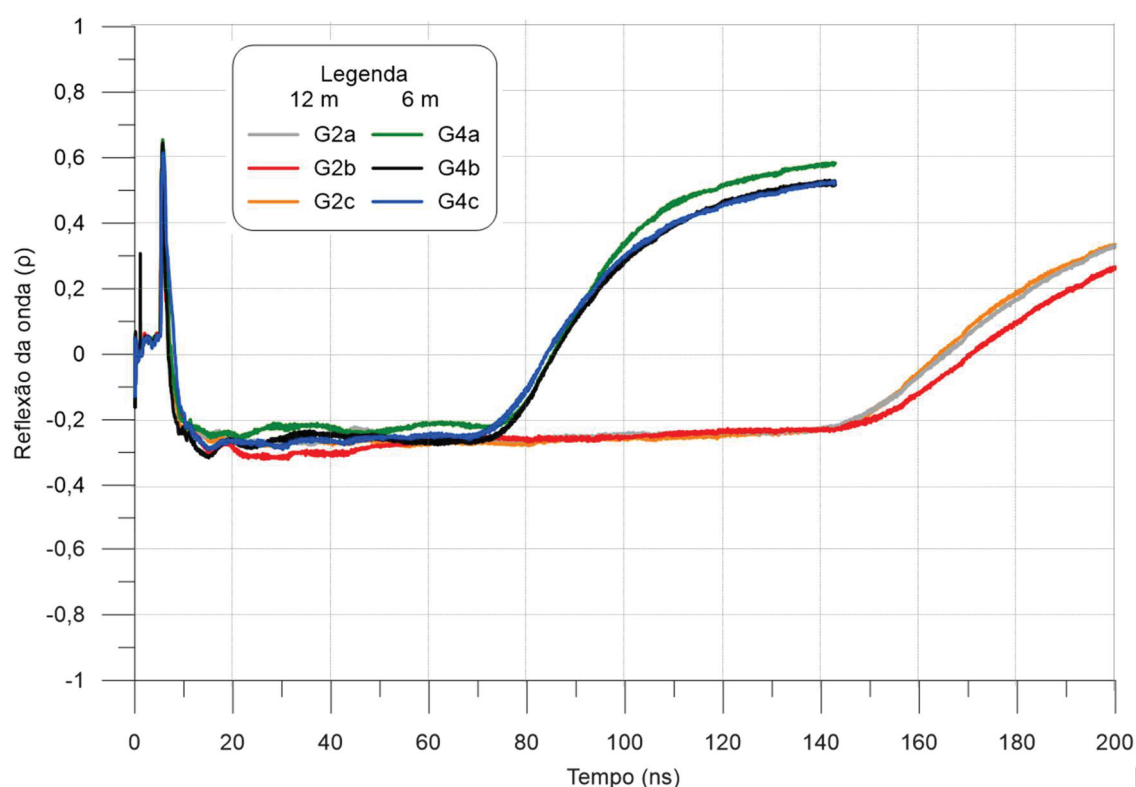
É possível observar que todas as curvas seguiram a mesma tendência, com reflexão entre -0,3 e -0,2. De modo geral, os grampos sem reinjeção (G3) apresentaram um tempo de propagação um pouco inferior aos grampos com a fase de reinjeção (G4), o que pode indicar presença de ar ao longo do preenchimento devido à maior velocidade obtida. Como a velocidade de propagação no ar é maior que na calda de cimento, se a velocidade média de uma barra é superior à velocidade das demais, isto pode indicar a presença de ar ao longo da barra.

Os grampos G3b e G4b apresentaram uma reflexões positivas nos primeiros metros, o que pode indicar vazios com ar, de acordo com a interpretação gráfica.

O grampo G4c apresentou velocidade próxima à obtida com as barras sem reinjeção, com retorno anterior às demais barras de 6 m com reinjeção (G4a e G4b), o que pode indicar uma condição inferior de preenchimento.

Também foram comparadas as curvas obtidas nos grampos íntegros com reinjeção de 12 m (G2) e de 6 m (G4), como pode ser observado na Figura 4.24.

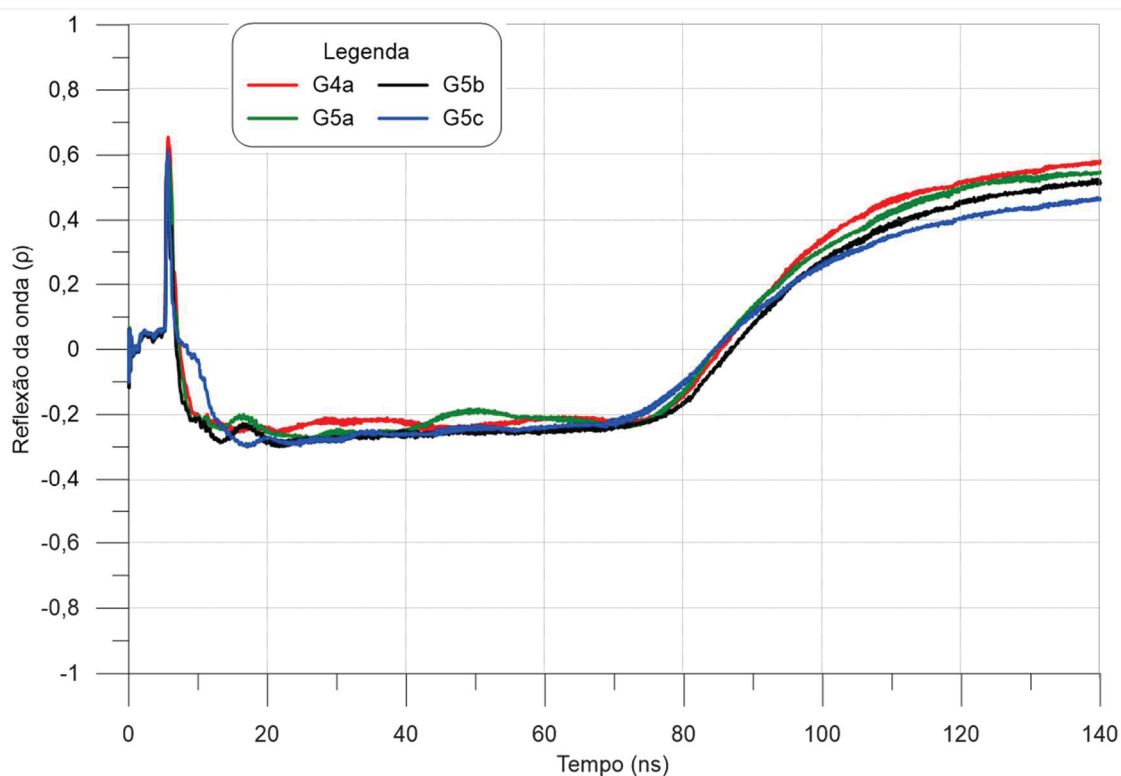
Figura 4.24 – Comparação entre os ensaios TDR nos grampos de 6 m e 12 m íntegros



Percebe-se que as curvas dos mesmos elementos apresentaram reflexões semelhantes, o que possibilitou calcular o comprimento das barras a partir da calibração realizada para obtenção da velocidade de propagação no ar e na calda de cimento. Como nos cabos coaxiais, o tempo de propagação nas barras de aço também é diretamente proporcional ao comprimento.

Com relação às barras de 6 m com emendas no início (G5a), meio (G5b) e fim (G5c), os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.25, em conjunto com a curva obtida para a barra íntegra com reinjeção G4a.

Figura 4.25 – Resultados do TDR nas barras com emenda (6 m)



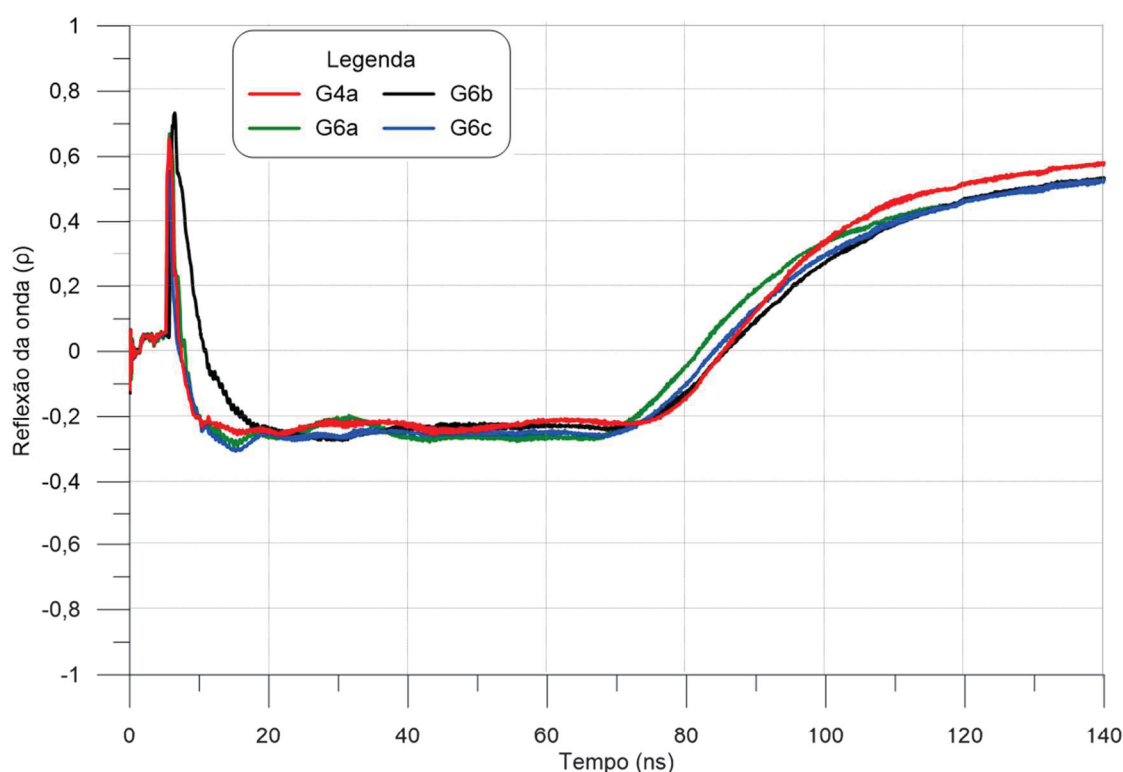
Não foi possível identificar reflexões correspondentes às emendas, semelhante ao observado nos grampos de 12 m, em que as curvas não se alteraram no posicionamento das emendas nas barras. As emendas não influenciam nos resultados, independente da sua posição ao longo do comprimento da barra.

Tanto o grampo G5a como o G5b apresentaram uma reflexão positiva inicial que pode indicar falhas no preenchimento próximo a boca do furo. O grampo G5a também apresentou uma reflexão positiva na porção central da barra, o que também pode representar uma falha com ar.

O grampo G5c apresentou uma variação do gráfico no início, com um tempo total inferior e uma velocidade maior que as demais barras, o que pode apontar a presença de ar no preenchimento com a calda de cimento. A reflexão diferente no início da barra também pode indicar falhas de preenchimento próxima a cabeça da barra.

Os resultados obtidos para os grampos de 6 m da variação G6, executados com um metro final cravado no solo, são apresentados na Figura 4.26.

Figura 4.26 – Resultados TDR nas barras G6

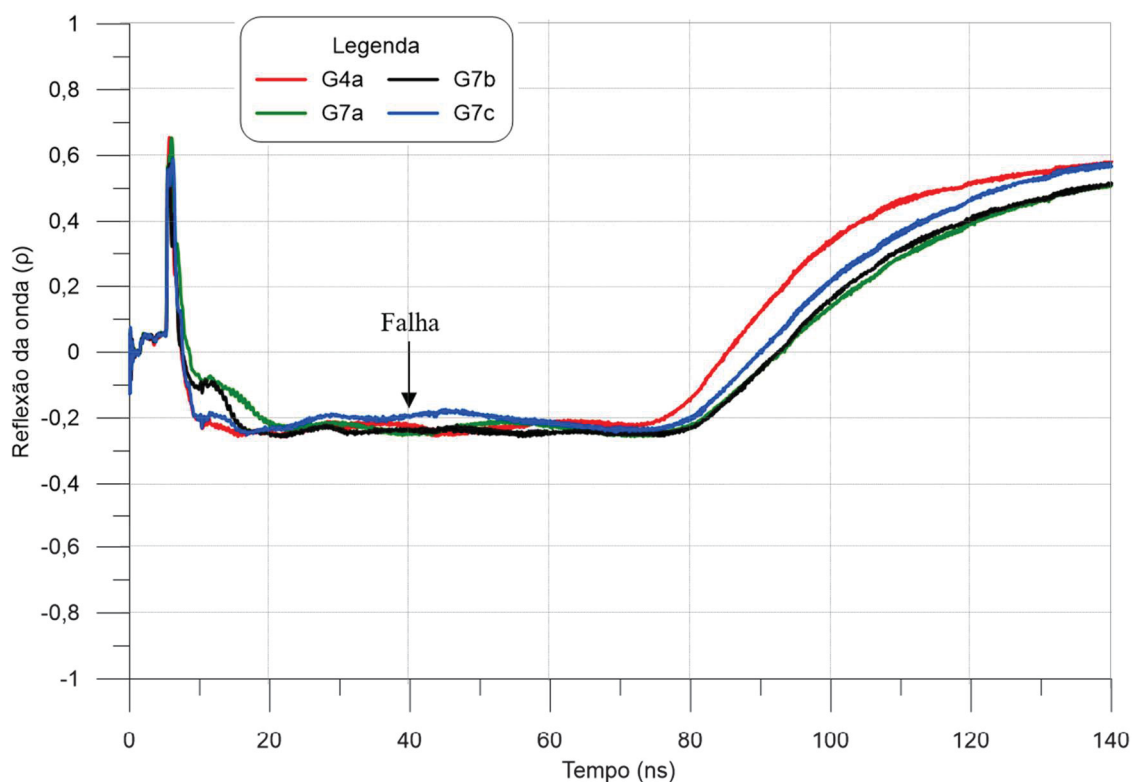


É possível perceber que todas as curvas dos grampos tipo G6 apresentaram um tempo de propagação menor, o que indica maior velocidade quando comparada com as barras íntegras (G4). A velocidade de propagação é mais rápida na sequência dos diferentes meios: ar, solo, calda de cimento e água (TANG; CHENG, 2014). Tal fato explica a maior velocidade de propagação dos grampos G6, que tem 1 m de barra enterrada no solo, e esse contato faz com que o pulso percorra mais rapidamente e retorne antes. No entanto, nenhum resultado gráfico apresentou alguma mudança significativa na reflexão do sinal, seja ela positiva ou negativa, que indique a variação de material ao redor da barra.

Os grampos G6a e G6c apresentaram uma pequena reflexão negativa próxima aos 2 m de barra, o que pode indicar uma falha. O grampo G6a também apresentou uma reflexão no meio da barra. O grampo G6b apresentou uma reflexão diferente das demais (mais suavizada) no início da barra, que pode indicar falhas com ar.

Na Figura 4.27 são demonstradas as curvas obtidas para a variação de falha com ar de 10 cm no meio dos grampos. A seta indica o local em que a falha de ar de 10 cm está simulada na barra, bem no meio do grampo.

Figura 4.27 – Resultados TDR nos grampos G7

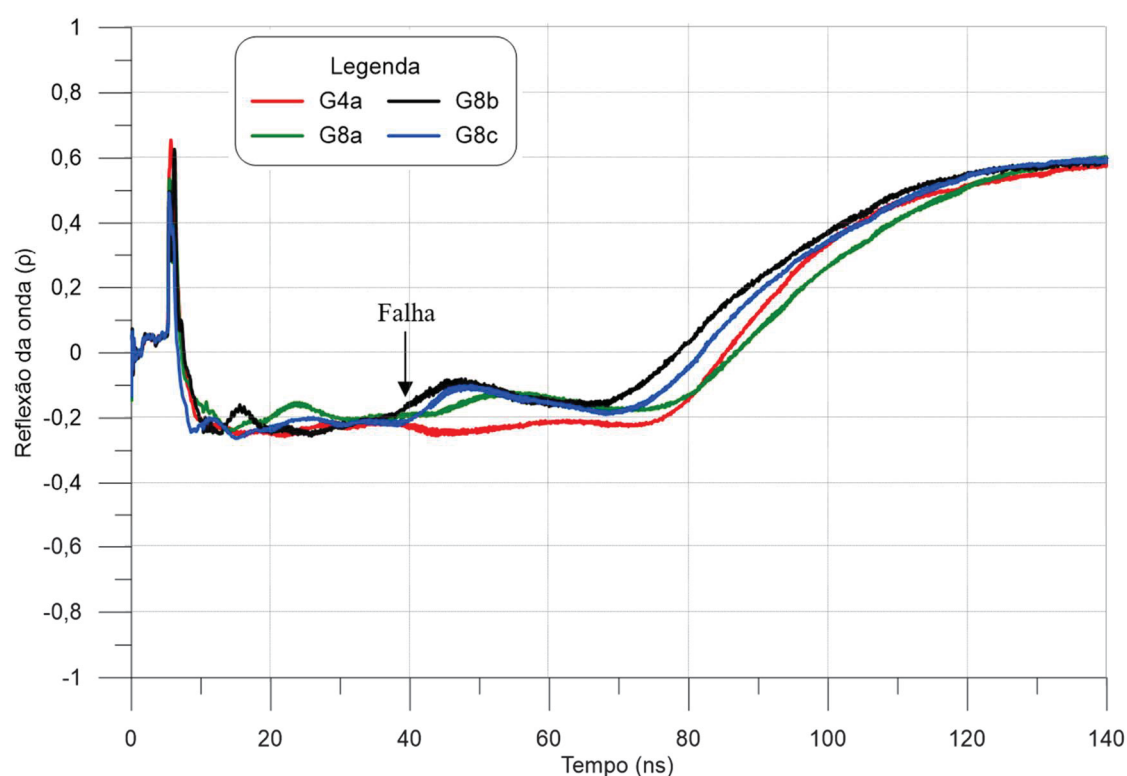


Os resultados obtidos na variação G7 não permitiram identificar graficamente a falha de ar de 10 cm. A barra G7c apresentou uma suave variação da reflexão da onda, mas não pode ser afirmado que foi pela presença da anomalia, uma vez que nas demais barras não foi encontrada nenhuma variação nas curvas.

A velocidade de propagação encontrada foi inferior, quando comparada com grampos íntegros de 6 m. Acredita-se que essa redução se deve ao fato de que após o pulso passar pela falha e retornar à calda de cimento, ele perde velocidade por atenuação e apresenta uma velocidade final inferior. Além disso, pode haver influência da cola utilizada para simular o vazio.

Os resultados obtidos nos grampos com falha com ar de 50 cm são apresentados na Figura 4.28.

Figura 4.28 – Resultados TDR nos grampos G8



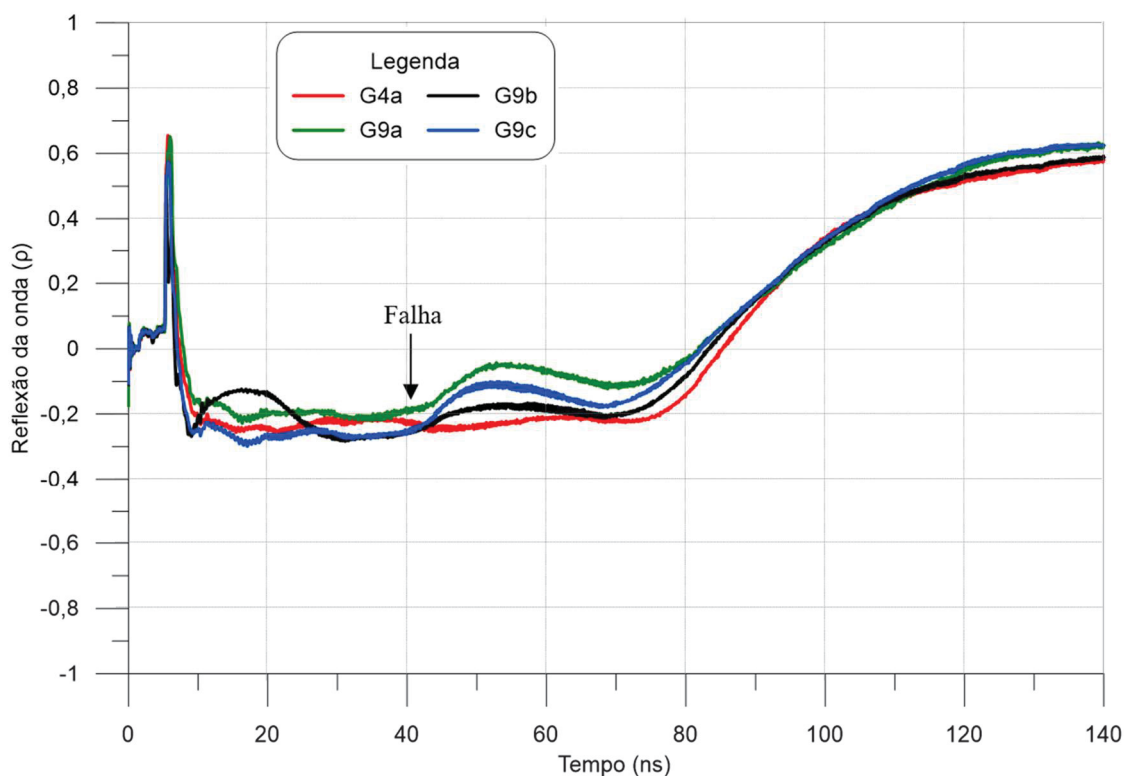
A variação G8, com falha de 50 cm de ar, apresentou gráficos com dispersão da reflexão da onda no meio das barras, que permitiu identificar as falhas simuladas com reflexões positivas de amplitude $\Delta\rho = 0,1$. A reflexão ocorre aproximadamente no tempo calculado até o meio da barra, onde a falha foi simulada. Este resultados indica que vazios maiores que 50 cm podem ser identificados pela metodologia.

A velocidade de propagação também foi menor quando comparada com as barras íntegras. Embora a velocidade de propagação no ar seja maior que na calda de cimento, tal redução deve-se ao fato da perda de velocidade por atenuação após a passagem do pulso pela falha e retornar à calda de cimento, o que resulta em um decréscimo da velocidade.

Tanto o grampo G8a, como o G8b, apresentaram reflexos positivos no início da curva, o que pode indicar presença de falhas. O tempo final do gráfico variou entre as barras, mas todas foram inferiores ao da barra G4a. Tais resultados podem indicar que a precisão do método se apresenta entre 10 cm, e 50 cm, pois nos grampos com falhas de 10 cm com ar, as anomalias não foram identificadas graficamente pela reflexão.

Na Figura 4.29 são apresentados os resultados obtidos com o TDR na variação G9, com falha com ar de 1,0 m.

Figura 4.29 – Resultados TDR nos grampos G9

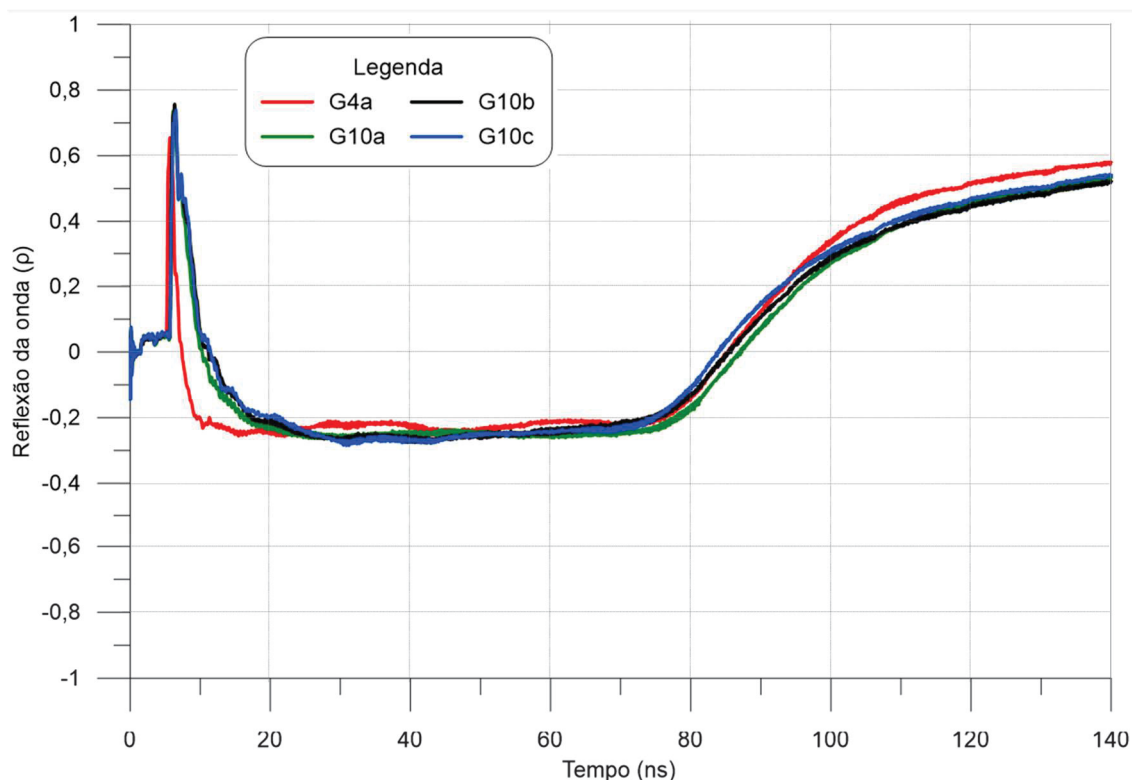


Observa-se que o vazio de 1,0 m no meio da barra também foi detectado pela metodologia a partir de um reflexo positivo visivelmente identificado pelo gráfico. A variação positiva da reflexão da onda devido ao vazio foi mais acentuada no grampo G9a e menor na barra G9b. Mesmo ao considerar o trecho inicial da barra para fora do terreno e o vazio no meio da barra, a velocidade na calda de cimento foi reduzida.

O grampo G9b apresentou uma curva com características iniciais diferente das demais com uma reflexão significativa, o que pode indicar uma falha com ar no início, porém a velocidade e o reflexo final foram semelhantes às demais barras.

Na Figura 4.30 são indicados os resultados obtidos para a variação G10.

Figura 4.30 – Resultados TDR nos grampos G10



Nos grampos G10, que apresentam um comprimento de furo 1 m maior que os demais, preenchido com calda de cimento, obtiveram-se curvas bem semelhantes com o obtido com a barra íntegra, com exceção do trecho inicial. Tal comportamento foi condizente com o esperado, uma vez que a metodologia TDR é influenciada somente pelo meio que envolve a barra de aço, ou seja, a calda de cimento, e esta possui 6 m (mesmo comprimento das demais).

A. Estimativa da velocidade de propagação na calda de cimento

Com base no tempo de propagação do pulso obtido através dos gráficos apresentados e com os trechos da barra em contato com o ar (vazios simulados e extremidade da barra para fora do terreno), foi obtida a velocidade de propagação do pulso elétrico na superfície da barra de aço em contato com a calda de cimento. O tempo inicial foi obtido a partir da curva de referência (sem contato com a barra), e o tempo final pelo método da tangente. O tempo total é a diferença entre o tempo final e inicial.

A velocidade foi obtida com base na velocidade de propagação do pulso no ar obtida em laboratório de $2,4 \times 10^8$ m/s para o comprimento do trecho com ar (L_{ar}). Os resultados são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Estimativa da velocidade de propagação na calda de cimento dos grampos

Grampo	L_{ar} (m)	L_{calda} (m)	Tempo total (ns)	V_{calda} (m/s)	$V_{calda}/V_{v\u00e1cuo}$	M\u00e9dia	Desvio Padr\u00e3o	Coefficiente de varia\u00e7\u00e3o
G1a	0,18	11,82	140,25	$8,47 \times 10^7$	0,283			
G1b	0,21	11,79	137,67	$8,62 \times 10^7$	0,287	0,281	0,007	2,49%
G1c	0,19	11,81	144,73	$8,20 \times 10^7$	0,274			
G2a	0,24	11,76	141,22	$8,39 \times 10^7$	0,280			
G2b	0,27	11,73	145,95	$8,10 \times 10^7$	0,270	0,276	0,005	1,89%
G2c	0,24	11,77	141,83	$8,35 \times 10^7$	0,279			
G3a	0,24	5,76	64,97	$9,00 \times 10^7$	0,300			
G3b	0,27	5,73	68,90	$8,45 \times 10^7$	0,282	0,290	0,009	3,22%
G3c	0,29	5,72	67,35	$8,63 \times 10^7$	0,288			
G4a	0,25	5,75	71,55	$8,16 \times 10^7$	0,272			
G4b	0,27	5,73	69,73	$8,35 \times 10^7$	0,279	0,281	0,011	3,85%
G4c	0,22	5,78	66,68	$8,79 \times 10^7$	0,293			
G5a	0,27	5,74	69,83	$8,34 \times 10^7$	0,278			
G5b	0,32	5,68	72,06	$8,03 \times 10^7$	0,268	0,278	0,010	3,69%
G5c	0,25	5,75	67,53	$8,65 \times 10^7$	0,288			
G6a	0,21	5,79	64,90	$9,04 \times 10^7$	0,302			
G6b	0,26	5,75	67,10	$8,70 \times 10^7$	0,290	0,293	0,007	2,55%
G6c	0,22	5,78	67,93	$8,62 \times 10^7$	0,288			
G7a	0,32	5,68	73,46	$7,87 \times 10^7$	0,263			
G7b	0,35	5,65	74,79	$7,70 \times 10^7$	0,257	0,261	0,004	1,42%
G7c	0,34	5,66	72,93	$7,91 \times 10^7$	0,264			
G8a	0,74	5,26	71,97	$7,64 \times 10^7$	0,255			
G8b	0,81	5,20	65,12	$8,41 \times 10^7$	0,280	0,268	0,013	4,80%
G8c	0,82	5,18	67,65	$8,06 \times 10^7$	0,269			
G9a	1,36	4,64	69,63	$7,25 \times 10^7$	0,242			
G9b	1,27	4,73	68,68	$7,46 \times 10^7$	0,249	0,249	0,007	2,93%
G9c	1,24	4,77	67,05	$7,69 \times 10^7$	0,257			
G10a	0,20	5,80	69,76	$8,41 \times 10^7$	0,281			
G10b	0,26	5,74	68,39	$8,53 \times 10^7$	0,284	0,283	0,002	0,68%
G10c	0,26	5,74	68,72	$8,49 \times 10^7$	0,283			

O desvio padr\u00e3o entre as velocidades foi baixo, com coeficiente de varia\u00e7\u00e3o m\u00e1ximo de 4,80% para os grampos do tipo G8. Al\u00e9m disso, pequenas varia\u00e7\u00f5es eram esperadas, uma vez que as an\u00e1lises de campo contam com vari\u00e1veis externas, como por

exemplo: a umidade do solo e da calda de cimento, a qualidade do preenchimento dos grampos que podem apresentar falhas não programadas nas variações e a presença de ferrugem/corrosão nas barras.

Observa-se que a média da velocidade na calda de cimento obtida para as barras de 12 m (G1 e G2) apresentou valores inferiores quando comparada com as barras de 6 m (G3 e G4), o que indica que o aumento do comprimento das barras faz com que o pulso se propague mais devagar provavelmente devido a perdas ao longo da extensão da barra. Este fato também se confirma quando comparado com o valor da velocidade obtido em laboratório para a barra de 2 m, que foi de aproximadamente 0,32 vezes a velocidade da luz no vácuo, superior ao encontrado no campo experimental. Também foi observada a redução da velocidade de propagação no ar entre as barras de 2 m e 3,7 m avaliadas em laboratório. Além disso, mesmo com os resultados gráficos não apresentando reflexões devido as emendas, é possível que possa haver pequenas perdas devido à rosca no meio das barras de 12 m.

Entre as barras com e sem reinjeção de 12 m e 6 m, a velocidade encontrada nos grampos sem reinjeção (G1 e G3) foi maior quando comparada com os grampos com reinjeção (G2 e G4). Uma vez que a velocidade de propagação no ar é maior que na calda de cimento, uma velocidade maior pode indicar maior presença de ar ao longo do preenchimento. Para as barras de 12 m, o acréscimo na velocidade das barras sem reinjeção foi de 1,9%, e nas barras de 6 m, foi de 3,1%, quando comparadas com as barras com reinjeção. Tal fato provavelmente ocorre devido a pequenas falhas com ar na calda de cimento nos grampos em que não houve reinjeção.

Para as barras com emendas (G5) percebe-se uma pequena redução da velocidade de propagação de cerca de 1,1%, quando comparada com a velocidade média das barras de 6 m íntegras com reinjeção (G4). Esta redução também pode estar associada à pequenas perdas devido à presença das emendas, porém graficamente não foi possível identificar reflexos que possam afirmar esta hipótese.

As barras G6 apresentaram uma velocidade 4,2% maior quando comparada com a velocidade média das barras G4. De acordo com Cheung (2003), o valor da constante dielétrica do ar é aproximadamente 1, do solo é de 3 a 5 e a calda de cimento é de 10. Desse modo, como a barra foi cravada no solo natural por aproximadamente um metro, a velocidade neste trecho tende a ser maior do que na calda de cimento.

Para as barras G7, G8 e G9, que apresentam vazios com ar no meio da barra com 0,1 m, 0,5 m e 1,0 m, respectivamente, a velocidade de propagação na calda de cimento foi menor do que os valores obtidos pelas barras íntegras (G4). Esperava-se que a velocidade de propagação na calda fosse semelhante ao valor obtido pelo G4. No entanto, o tempo de propagação da onda foi superior, ou seja, a velocidade na calda de cimento foi inferior que dos demais grampos. A perda de velocidade também pode ser justificada pela atenuação da passagem do pulso pela falha com ar e pela calda de cimento, resultando em um decréscimo da velocidade na calda de cimento.

Além disso, para garantir a vedação do tubo de PVC utilizado na simulação dos vazios, foi utilizada uma cola entre a barra e a tampa de PVC, o que também pode ter afetado a velocidade de propagação do pulso. Além disso, não houve um padrão de redução da velocidade conforme o aumento do vazio, por isso, entende-se que pode ter havido uma interferência no tempo obtido devido à simulação do vazio. Os resultados dos grampos G8 foram os que apresentaram maior desvio padrão entre todas as barras simuladas. Este resultado indica a importância da análise gráfica dos resultados.

De modo a avaliar a velocidade de propagação sem considerar os comprimentos dos vazios simulados no meio das barras, foi realizada a análise apresentada na Tabela 4.9, somente considerando o comprimento com ar no início das barras.

Tabela 4.9 – Estimativa da velocidade de propagação na calda de cimento dos grampos com falhas

Grampo	L_{ar} (m)	L_{calda} (m)	Tempo total (ns)	V_{calda} (m/s)	$V_{calda}/V_{vácuo}$	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação
G7a	0,22	5,78	73,46	$7,97 \times 10^{-7}$	0,266			
G7b	0,25	5,75	74,79	$7,80 \times 10^{-7}$	0,260	0,264	0,004	1,41%
G7c	0,24	5,76	72,93	$8,01 \times 10^{-7}$	0,267			
G8a	0,24	5,76	71,97	$8,12 \times 10^{-7}$	0,271			
G8b	0,31	5,69	65,12	$8,91 \times 10^{-7}$	0,297	0,285	0,013	4,69%
G8c	0,32	5,68	67,65	$8,56 \times 10^{-7}$	0,286			
G9a	0,36	5,64	69,63	$8,28 \times 10^{-7}$	0,276			
G9b	0,27	5,73	68,68	$8,48 \times 10^{-7}$	0,283	0,283	0,007	2,61%
G9c	0,24	5,76	67,05	$8,72 \times 10^{-7}$	0,291			

Esperava-se que a média da velocidade fosse superior devido à presença de ar nas barras ao longo do comprimento com calda, porém, este não foi o resultado obtido. O grampo G7 continuou apresentando uma velocidade abaixo da média dos grampos íntegros. Os grampos G8 e G9 apresentaram uma velocidade média bem próxima aos

grampos com reinjeção G4, não refletindo a presença de falhas na velocidade final. Salienta-se a importância da análise gráfica em conjunto com a análise das velocidades.

Por fim, para os grampos G10, que apresentam o comprimento de furo 1 m maior que os demais, a velocidade de propagação do pulso na calda de cimento foi semelhante à média dos grampos G4. Como a velocidade de propagação é afetada pelo material ao redor da barra de aço, um preenchimento maior da perfuração não é possível de ser detectado nos ensaios.

B. Estimativa da velocidade de propagação média na calda de cimento

A estimativa da velocidade de propagação média das barras pode ser utilizada quando não se sabe quais são os valores dos trechos em contato com o ar na extremidade externa, e se existem vazios ao longo do furo. Assim, foi obtida uma velocidade média para cada barra a partir do valor do tempo total de reflexão do pulso obtido graficamente. Os resultados obtidos de velocidade média são apresentados na Tabela 4.10.

É possível perceber que na média, os valores da velocidade de propagação na calda de cimento foram bem semelhantes entre si. Para as barras de 12 m a velocidade foi um pouco inferior às barras de 6 m, como já observado anteriormente. Da mesma maneira como a velocidade das barras íntegras sem reinjeção são maiores que as barras íntegras com reinjeção.

As barras de 6 m com emendas (G5) apresentaram médias bem próximas às barras íntegras de mesmo comprimento. A variação com 1 m da barra enterrada no solo (G6) apresentou velocidade superior às barras íntegras, indicando que pode haver alguma variação no material ao longo da barra. No entanto, a variação não foi significativa. A barra com 1 m de perfuração a mais (G10) apresentou velocidade bem próxima das barras íntegras.

Dentre os grampos com variações com falhas com ar, somente a G7 apresentou velocidade inferior às barras íntegras. Já as variações G8 e G9 indicaram velocidades pouco superiores às barras com reinjeção (G4), e abaixo das barras sem reinjeção (G3).

Estes resultados indicam a necessidade da análise gráfica dos resultados para melhor compreensão das reflexões que podem ser causadas devido a falhas com ar no preenchimento.

Tabela 4.10 – Estimativa da velocidade de propagação média na calda de cimento dos grampos

Grupo	L_{total} (m)	Tempo total (ns)	$V_{média}$ (m/s)	$V_{média}/V_{vácuo}$	Média
G1a	12,0	140,25	$8,56 \times 10^7$	0,285	
G1b	12,0	137,67	$8,72 \times 10^7$	0,291	0,284
G1c	12,0	144,73	$8,29 \times 10^7$	0,277	
G2a	12,0	141,22	$8,50 \times 10^7$	0,283	
G2b	12,0	145,95	$8,22 \times 10^7$	0,274	0,280
G2c	12,0	141,83	$8,46 \times 10^7$	0,282	
G3a	6,0	64,97	$9,24 \times 10^7$	0,308	
G3b	6,0	68,90	$8,71 \times 10^7$	0,290	0,299
G3c	6,0	67,35	$8,91 \times 10^7$	0,297	
G4a	6,0	71,55	$8,39 \times 10^7$	0,280	
G4b	6,0	69,73	$8,61 \times 10^7$	0,287	0,289
G4c	6,0	66,68	$9,00 \times 10^7$	0,300	
G5a	6,0	69,83	$8,59 \times 10^7$	0,287	
G5b	6,0	72,06	$8,33 \times 10^7$	0,278	0,287
G5c	6,0	67,53	$8,88 \times 10^7$	0,296	
G6a	6,0	64,90	$9,25 \times 10^7$	0,308	
G6b	6,0	67,10	$8,94 \times 10^7$	0,298	0,300
G6c	6,0	67,93	$8,83 \times 10^7$	0,295	
G7a	6,0	73,46	$8,17 \times 10^7$	0,272	
G7b	6,0	74,79	$8,02 \times 10^7$	0,268	0,271
G7c	6,0	72,93	$8,23 \times 10^7$	0,274	
G8a	6,0	71,97	$8,34 \times 10^7$	0,278	
G8b	6,0	65,12	$9,21 \times 10^7$	0,307	0,294
G8c	6,0	67,65	$8,87 \times 10^7$	0,296	
G9a	6,0	69,63	$8,62 \times 10^7$	0,287	
G9b	6,0	68,68	$8,74 \times 10^7$	0,291	0,292
G9c	6,0	67,05	$8,95 \times 10^7$	0,298	
G10a	6,0	69,76	$8,60 \times 10^7$	0,287	
G10b	6,0	68,39	$8,77 \times 10^7$	0,293	0,290
G10c	6,0	68,72	$8,73 \times 10^7$	0,291	

C. Estimativa do comprimento

Este item visa estimar os valores do comprimento das barras simulando uma situação real, em que não se tem nenhuma informação sobre as barras. Assim, é

considerada uma velocidade fixa para todos os casos e estimado o valor do comprimento a partir do valor do tempo total de reflexão do pulso obtido graficamente. As velocidades avaliadas foram de 0,28, 0,29, 0,30 e 0,31 vezes a velocidade da luz no vácuo, conforme obtido nas análises apresentadas anteriormente. Os resultados também foram comparados com o valor real do comprimento das barras, de modo a identificar o erro na estimativa do comprimento.

Tabela 4.11 – Estimativa do comprimento dos grampos íntegros

Grampo	$V_{\text{média}} = 0,28 \times V_{\text{vácuo}}$		$V_{\text{média}} = 0,29 \times V_{\text{vácuo}}$		$V_{\text{média}} = 0,30 \times V_{\text{vácuo}}$		$V_{\text{média}} = 0,31 \times V_{\text{vácuo}}$	
	L _{estimado}	Erro	L _{estimado}	Erro	L _{estimado}	Erro	L _{estimado}	Erro
G1a	11,77	-1,90%	12,19	1,61%	12,61	5,11%	13,03	8,62%
G1b	11,56	-3,70%	11,97	-0,26%	12,38	3,18%	12,79	6,62%
G1c	12,15	1,24%	12,58	4,86%	13,02	8,48%	13,45	12,09%
G2a	11,85	-1,22%	12,28	2,31%	12,70	5,84%	13,12	9,37%
G2b	12,25	2,09%	12,69	5,74%	13,13	9,39%	13,56	13,03%
G2c	11,91	-0,79%	12,33	2,76%	12,76	6,30%	13,18	9,84%
G3a	5,45	-9,11%	5,65	-5,86%	5,84	-2,62%	6,04	0,63%
G3b	5,78	-3,61%	5,99	-0,17%	6,20	3,27%	6,40	6,72%
G3c	5,65	-5,78%	5,86	-2,42%	6,06	0,95%	6,26	4,31%
G4a	6,01	0,10%	6,22	3,67%	6,43	7,25%	6,65	10,82%
G4b	5,85	-2,45%	6,06	1,03%	6,27	4,52%	6,48	8,00%
G4c	5,60	-6,72%	5,80	-3,39%	6,00	-0,06%	6,20	3,28%
G5a	5,86	-2,30%	6,07	1,19%	6,28	4,68%	6,49	8,17%
G5b	6,05	0,81%	6,26	4,41%	6,48	8,01%	6,70	11,61%
G5c	5,67	-5,52%	5,87	-2,14%	6,07	1,23%	6,28	4,61%
G10a	5,86	-2,41%	6,06	1,08%	6,27	4,56%	6,48	8,05%
G10b	5,74	-4,33%	5,95	-0,91%	6,15	2,51%	6,36	5,93%
G10c	5,77	-3,85%	5,97	-0,42%	6,18	3,01%	6,39	6,45%

É possível perceber que não existe uma velocidade padrão que represente o comprimento das barras, ou seja, para uma contenção que não se tenha o conhecimento do comprimento dos grampos, erros poderão ocorrer.

Para as barras sem reinjeção (G1), a velocidade ideal seria 0,29, o que pode indicar a presença de mais vazios ao longo da barra. Para as barras de 12 m íntegras com reinjeção (G2), a velocidade mais adequada para a estimativa do comprimento seria 0,28 vezes a velocidade da luz no vácuo. Para os grampos de 6 m não houve nenhum padrão, e as

velocidades variaram de 0,28 a 0,30, com exceção da variação G10 que apresentou menor erro com velocidade de 0,28 vezes a velocidade da luz no vácuo.

Desse modo, sugere-se a utilização de uma velocidade de 0,29 vezes a velocidade da luz no vácuo para estimativa do comprimento das barras, para uma condição semelhante a utilizada neste estudo. Para as barras de 12 m, o maior erro seria de 5,74% para a barra G2b, com um comprimento estimado de 12,69 m. Para os grampos de 6 m, o maior erro seria de -5,86% para a barra G3a com comprimento estimado de 5,65 m. Por isso, reitera-se a importância da avaliação gráfica para identificação de possíveis problemas nas barras.

As variações na velocidade podem estar associadas tanto a problemas nas barras como problemas externos. Os problemas nas barras podem ser: falhas na calda de cimento ao longo do comprimento não simuladas e vazios próximos a cabeça não identificados. Como fatores externos poderiam ser a umidade da calda de cimento e do solo, erros durante o ensaio e interpretação gráfica da reflexão do pulso. A análise da estimativa da velocidade do pulso nas barras com falhas é apresentada na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Estimativa da velocidade de propagação média na calda de cimento dos grampos

Grampo	$V_{\text{média}} = 0,28 \times V_{\text{vácuo}}$		$V_{\text{média}} = 0,29 \times V_{\text{vácuo}}$		$V_{\text{média}} = 0,30 \times V_{\text{vácuo}}$		$V_{\text{média}} = 0,31 \times V_{\text{vácuo}}$	
	L_{estimado}	Erro	L_{estimado}	Erro	L_{estimado}	Erro	L_{estimado}	Erro
G6a	5,45	-9,21%	5,64	-5,96%	5,84	-2,72%	6,03	0,52%
G6b	5,63	-6,13%	5,83	-2,78%	6,03	0,57%	6,24	3,93%
G6c	5,70	-4,96%	5,91	-1,56%	6,11	1,83%	6,31	5,23%
G7a	6,17	2,78%	6,39	6,45%	6,61	10,12%	6,83	13,79%
G7b	6,28	4,63%	6,50	8,37%	6,73	12,11%	6,95	15,85%
G7c	6,12	2,04%	6,34	5,68%	6,56	9,32%	6,78	12,97%
G8a	6,04	0,69%	6,26	4,28%	6,47	7,88%	6,69	11,48%
G8b	5,47	-8,89%	5,66	-5,64%	5,86	-2,38%	6,05	0,87%
G8c	5,68	-5,35%	5,88	-1,97%	6,08	1,41%	6,29	4,79%
G9a	5,85	-2,58%	6,05	0,90%	6,26	4,38%	6,47	7,86%
G9b	5,77	-3,91%	5,97	-0,48%	6,18	2,95%	6,38	6,39%
G9c	5,63	-6,19%	5,83	-2,84%	6,03	0,51%	6,23	3,86%

Da mesma maneira como observado nas barras íntegras, para as barras com falhas também não foi possível estabelecer uma velocidade padrão. Com exceção da variação G7, com falha de 10 cm, para as barras com falhas de 50 cm e 100 cm (G8 e G9), as velocidades foram maiores quando comparadas com as barras íntegras, o que pode indicar

a presença de ar ao longo da barra. Considerando a mesma velocidade de 0,29 vezes a velocidade da luz no vácuo, o maior erro seria da barra G7b com 8,37% de erro, e um comprimento estimado de 6,50 m. Salienta-se novamente a importância da análise gráfica dos ensaios em conjunto com a estimativa da velocidade.

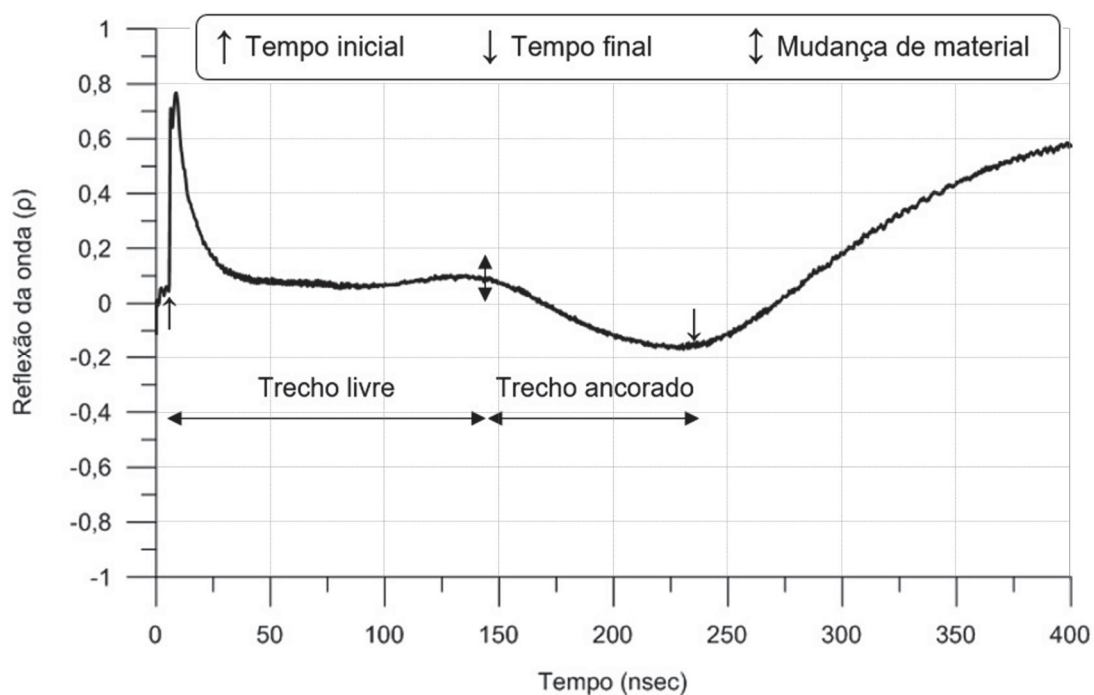
4.2.1.3. Tirantes

Ensaio com os tirantes também foram realizados por meio da aplicação da técnica com o TDR. Na Figura 4.31 apresenta-se um gráfico representativo do comportamento observado mais claramente para os ensaios nos tirantes de monobarra.

Diferentemente dos gráficos dos grampos que apresenta somente uma parte “reta”, que representa o comprimento da barra, nos gráficos dos tirantes foi possível identificar o trecho livre e o trecho ancorado. Com o tempo inicial, inflexão negativa e inflexão positiva foi possível estimar a velocidade do trecho livre e do trecho ancorado.

Observa-se inicialmente que foi possível identificar o trecho livre e o trecho ancorado dos tirantes. Tais reflexões ocorreram porque no trecho livre das barras (12 m) foi instalada uma bainha de proteção anticorrosiva com tubo de PVC e a barra não está em contato com a calda de cimento e sim, com o tubo e ar. Por outro lado, no trecho ancorado (6 m) a barra está envolta por calda de cimento (sem a proteção com PVC), e por isso ocorre reflexão pela mudança de material em contato com o tirante.

Figura 4.31 – Resultado do método TDR em um tirante de monobarra



Ressalta-se que, de modo geral, o intervalo de tempo entre o início do pulso e a mudança de trecho livre/ancorado até o final do pulso não foram proporcionais, pois os materiais e suas velocidades de propagação são diferentes. Além disso, percebe-se que a reflexão que ocorreu no trecho ancorado, onde a barra está em contato com a calda de cimento, se aproximou de $\rho = -0,2$, semelhante às que ocorreram nos grampos.

Ensaio com diferentes tipos de tirantes (monobarra, cordoalha e fio) também foram realizados. Os 3 tipos de tirantes apresentavam o mesmo comprimento total com 18 m, sendo 11 m de trecho livre e 6 m de trecho ancorado, com 1 m para fora do paramento (em contato com o ar).

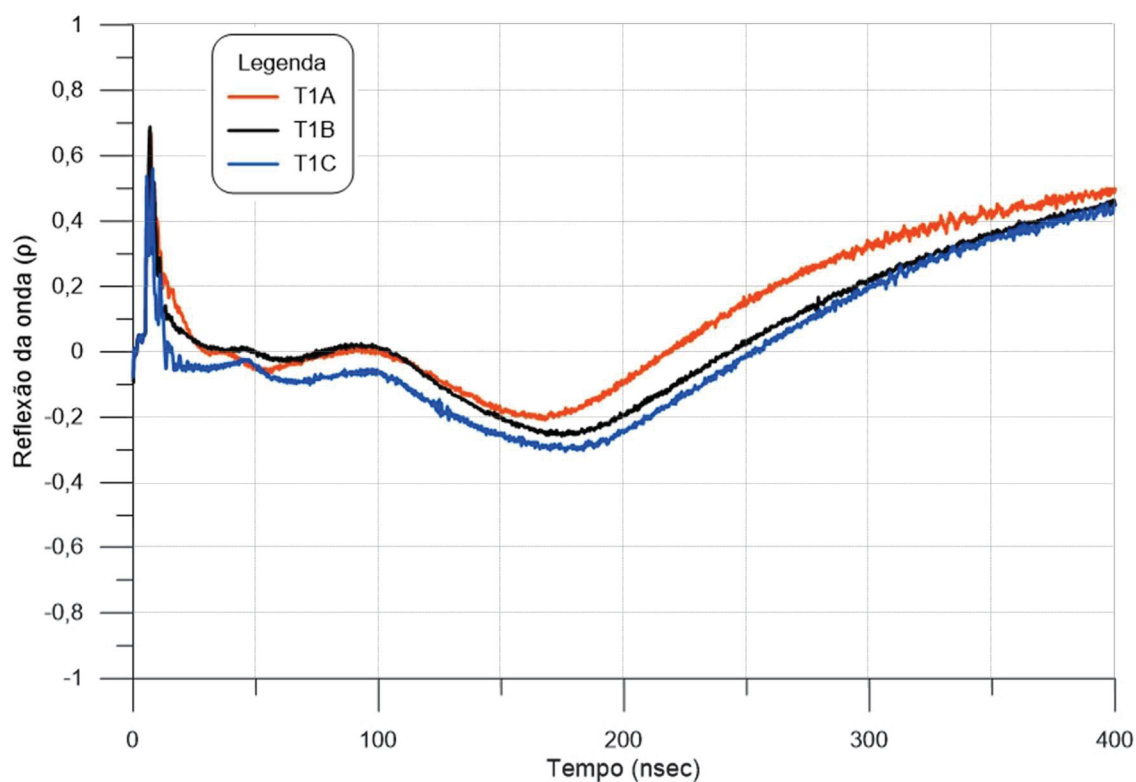
Para a determinação da velocidade de propagação do pulso elétrico no trecho livre e no trecho ancorado foi utilizado o método da tangente, tanto entre a reflexão negativa que ocorre entre o trecho livre e o trecho ancorado, e na reflexão positiva que acontece no final da barra.

Os ensaios foram realizados antes e depois da protensão dos tirantes e os resultados foram iguais, o que indica que a aplicação de carga nas barras não altera o resultado do ensaio TDR.

A. Tirantes de monobarra

Os gráficos dos tirantes de monobarra foram os que apresentaram menor variação em relação ao formato. A variação T1 consistiu em tirantes de monobarra executados com bainha individual, ou seja, um tubo de PVC ao redor da barra no trecho livre. Cabe salientar que o cabo coaxial foi posicionado por fora do tubo de PVC. Os gráficos obtidos nos ensaios TDR nas monobarras T1 são apresentados na Figura 4.32.

Figura 4.32 – Ensaio do TDR nos tirantes de monobarra tipo T1

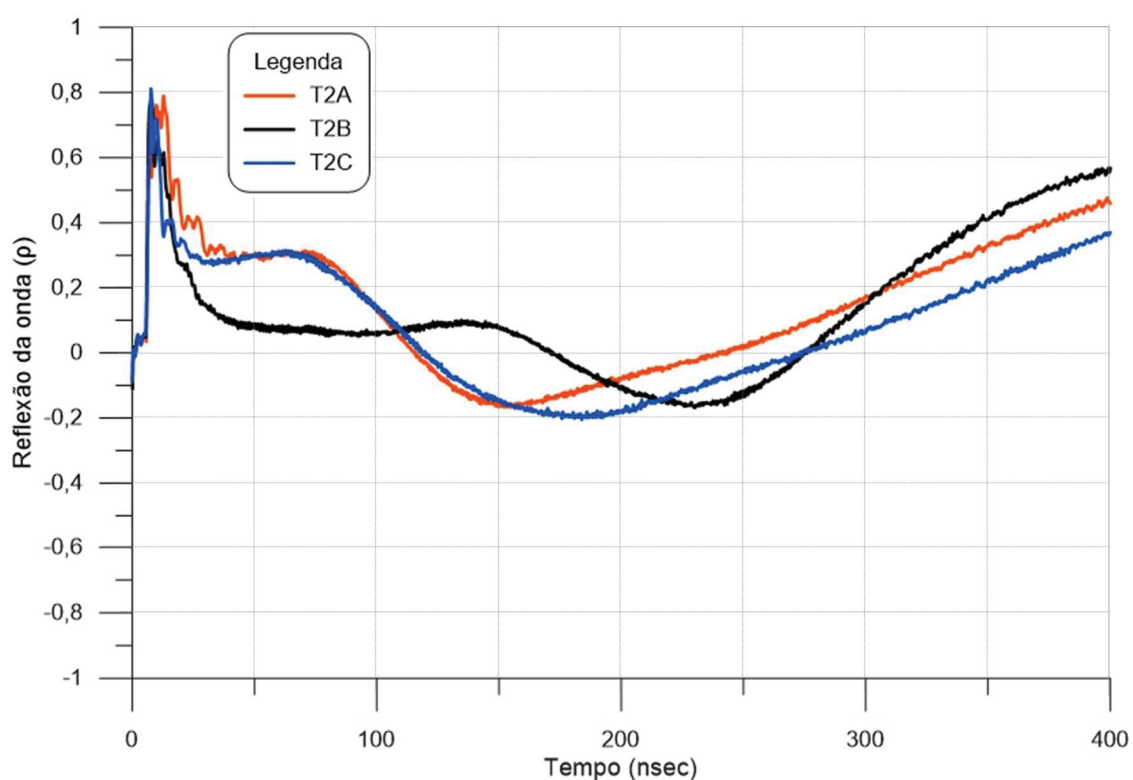


Os tempos, e consequentemente as velocidades, apresentaram variações quando comparados entre os elementos da mesma variação. A reflexão “ ρ ” que é a relação entre tensão refletida e tensão aplicada também variou entre as barras. Observou-se uma tendência de um valor próximo de 0 para o trecho livre em contato com o ar e próximo de -0,2 para o trecho ancorado em contato com a calda de cimento.

É possível perceber que o formato das curvas apresentou comportamento semelhante, com reflexão correspondente ao trecho ancorado e livre, em que há mudança de material ao redor da barra. As reflexões iniciais podem indicar falhas no início da barra devido à retração da calda de cimento. Também foi possível perceber reflexos no trecho inicial, próximo a 50 ns, o que pode indicar a influência da calda de cimento ao redor da emenda, que não é envolta pela bainha individual (tubo de PVC).

Os tirantes T2 foram executados com bainha individual e coletiva, o que consistiu na utilização de dois tubos de PVC, um ao redor da barra e outro externo, de modo a obter proteção dupla contra corrosão no trecho livre. Para esta variação, o cabo coaxial foi instalado fora do tubo de PVC mais externo da barra. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.33.

Figura 4.33 – Ensaio do TDR nos tirantes de monobarra tipo T2



Os tirantes T2a e T2c apresentam uma curva com tempo menor e valor de reflexão da onda superior para o trecho inicial (trecho livre). O tempo menor no trecho livre indica uma velocidade mais rápida quando comparada com as demais, que provavelmente pode ser atribuída ao tubo de PVC externo, que garante a presença de ar ao redor da barra com bainha coletiva.

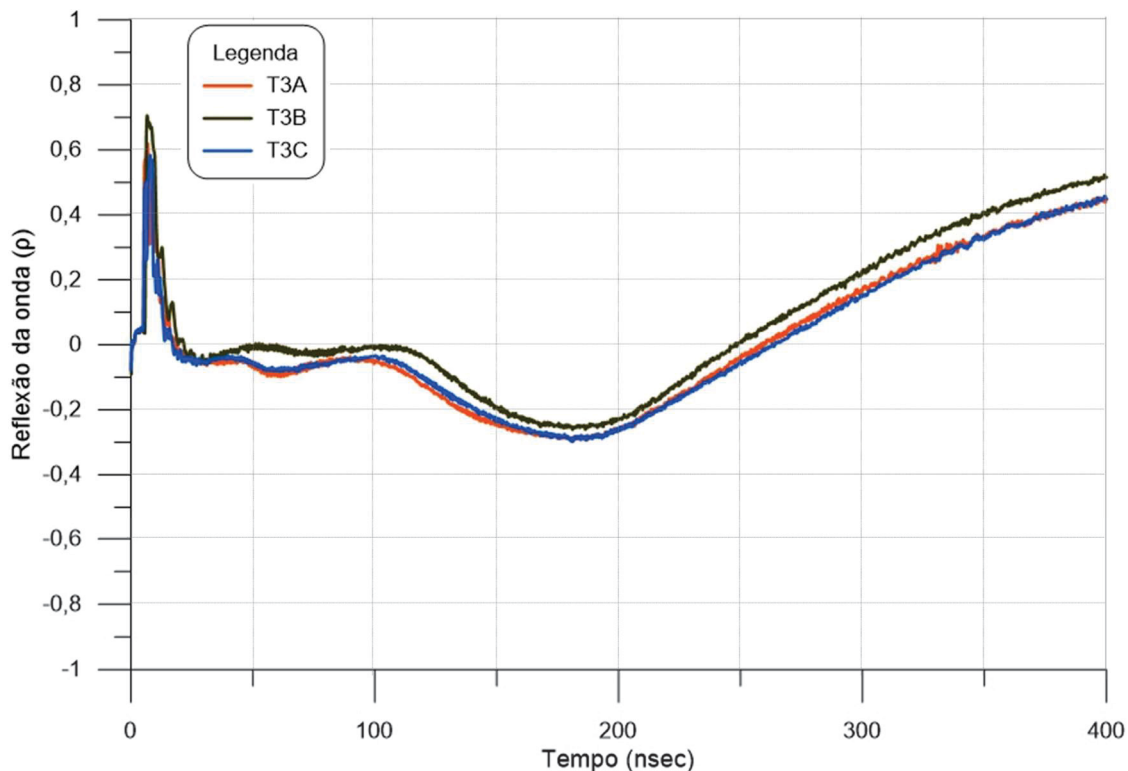
O tirante T2b apresentou uma curva com formato semelhante a variação T1, porém com tempo de reflexo entre os trechos livre e ancorados bem superiores.

Durante a execução da contenção experimental, os tirantes tipo T2, com bainha individual e coletiva, percebeu-se que durante a injeção da calda de cimento, houve a saída de calda pelo tubo externo do tirante T2b. De modo a não manter o tubo com calda de cimento, foi realizada a limpeza do tubo com circulação de água. No entanto, o tubo ficou preenchido com água, não sendo possível a sua retirada. Desse modo, a presença de água pode justificar a velocidade do pulso mais baixa no trecho livre do tirante T2b.

Por outro lado, as barras T2a e T2c apresentaram velocidades mais rápidas, quando comparadas com as barras T1, sem a bainha coletiva. Entende-se que a principal diferença que ocorre entre estas duas variações é a presença de ar (Figura 3.14) no tubo externo.

Os resultados do método TDR nos tirantes T3 são apresentados na Figura 4.34. Esta variação consistiu na redução da seção do aço no trecho em 20% em 10 cm para simular corrosão posicionada à 50 cm do paramento depois de instalada.

Figura 4.34 – Ensaio do TDR nos tirantes de monobarra tipo T3



O formato da curva dos tirantes T3 foi semelhante a variação T1, do tirante íntegro de monobarra, e também apresentaram uma reflexão no meio do trecho livre, que indica o contato das emendas com a calda de cimento. Como a falha da variação T3 foi simulada próxima ao paramento, não é possível indicar se reflexões do gráfico são devido à falha, uma vez que todos os gráficos apresentam picos no início. No entanto, a velocidade foi um pouco menor quando comparada com a variação T1, o que pode indicar a influência da falha e/ou o trecho com redução de seção exposto a calda de cimento.

Os resultados das velocidades no trecho livre e no trecho ancorado obtidos graficamente são apresentados na Tabela 4.13. Também são avaliadas as médias e o coeficiente de variação entre os valores obtidos para cada variação.

Tabela 4.13 – Estimativa da velocidade de propagação do trecho livre e ancorado nos tirantes monobarra

Tirante	Trecho livre					Trecho ancorado				
	V_{ar} (m/s)	$V_{ar}/V_{v\u00e1cuo}$	M\u00e9dia	Desvio Padr\u00e3o	Coef. de varia\u00e7\u00e3o	V_{calda} (m/s)	$V_{calda}/V_{v\u00e1cuo}$	M\u00e9dia	Desvio Padr\u00e3o	Coef. de varia\u00e7\u00e3o
T1a	$1,29 \times 10^{-8}$	0,4308				$8,59 \times 10^{-7}$	0,287			
T1b	$1,32 \times 10^{-8}$	0,4414	0,434	0,006	1,44%	$7,99 \times 10^{-7}$	0,266	0,278	0,010	3,69%
T1c	$1,29 \times 10^{-8}$	0,4303				$8,39 \times 10^{-7}$	0,280			
T2a	$1,64 \times 10^{-8}$	0,5455				$9,75 \times 10^{-7}$	0,325			
T2b	$8,41 \times 10^{-8}$	0,2804	0,473	0,168	35,62%	$6,97 \times 10^{-7}$	0,232	0,260	0,056	21,66%
T2c	$1,78 \times 10^{-8}$	0,5930				$6,70 \times 10^{-7}$	0,223			
T3a	$1,27 \times 10^{-8}$	0,4223				$8,34 \times 10^{-7}$	0,278			
T3b	$1,15 \times 10^{-8}$	0,3830	0,404	0,020	4,91%	$8,56 \times 10^{-7}$	0,285	0,279	0,006	2,28%
T3c	$1,22 \times 10^{-8}$	0,4072				$8,18 \times 10^{-7}$	0,273			

As velocidades obtidas no trecho livre das monobarras foram inferiores \u00e0s velocidades obtida em laborat\u00f3rio. Esta redu\u00e7\u00e3o provavelmente ocorre devido a instala\u00e7\u00e3o do cabo coaxial do lado externo do tubo de PVC, e n\u00e3o paralelo a barra como simulada em laborat\u00f3rio. Al\u00e9m disso, ao redor das emendas n\u00e3o \u00e9 considerado o tubo de PVC, o que faz com que a velocidade n\u00e3o seja constante ao longo de todo o trecho livre, gerando uma reflex\u00e3o em todos os ensaios. Al\u00e9m disso, \u00e9 utilizado ep\u00f3xi para fixar o tubo da bainha individual pr\u00f3ximo as emendas, o que tamb\u00e9m pode afetar no tempo de propaga\u00e7\u00e3o na onda.

Para a varia\u00e7\u00e3o T3, a velocidade no ar m\u00e9dia obtida foi um pouco inferior \u00e0 da varia\u00e7\u00e3o T1, provavelmente devido ao contato da falha (redu\u00e7\u00e3o de se\u00e7\u00e3o) simulada com a calda de cimento. A varia\u00e7\u00e3o T2 apresentou velocidades no ar com maior desvio padr\u00e3o. As varia\u00e7\u00f5es T2a e T2c, que representam a varia\u00e7\u00e3o, apresentaram velocidades mais altas provavelmente devido \u00e0 presen\u00e7a de ar ao redor da barra com a bainha individual, diferente do que ocorre para as varia\u00e7\u00f5es T1 e T3. Para a varia\u00e7\u00e3o T2b, como j\u00e1 abordado anteriormente, a velocidade do trecho livre foi afetada pela presen\u00e7a de \u00e1gua dentro do tubo. A constante diel\u00e9trica \u00e9 aproximadamente 1 para o ar, de 3 a 5 para o solo, 10 para a calda de cimento e 80 para a \u00e1gua (CHEUNG, 2003). Desse modo, a barra em contato com a \u00e1gua apresentou velocidade do trecho livre superior quando comparada com as demais barras da mesma varia\u00e7\u00e3o.

Em rela\u00e7\u00e3o \u00e0s velocidades obtidas para a calda de cimento, os coeficientes de varia\u00e7\u00e3o foram baixos para as varia\u00e7\u00f5es T1 e T3, e para ambas a m\u00e9dia foi bem semelhante. Para estas varia\u00e7\u00f5es, a velocidade obtida foi de 0,278 vezes a velocidade da

luz no vácuo. Este valor foi pouco abaixo da velocidade obtida para os grampos íntegros de 12 m (variação G2) e para os grampos íntegros de 6 m (variação G4), que foi de 0,280 e 0,289, respectivamente. Para a variação T2, o coeficiente de variação foi alto (35,6%), principalmente devido a variação T2a, que apresentou uma velocidade superior à média obtida pelas monobarra do tipo T1 e T3. Além disso, as variações T2b e T2c apresentaram velocidade abaixo das demais, com média de 0,227 vezes a velocidade da luz no vácuo.

B. Tirantes de cordoalha

Os gráficos obtidos do ensaio TDR em todas as cordoalhas para os tirantes das variações T4 e T5, e T6 e T7, são apresentados na Figura 4.35 e Figura 4.36, respectivamente. Para cada tirante de cordoalha executado, foram realizados ensaios preliminares em cada um dos 7 fios de cada cordoalha. Verificou-se que os resultados foram muito semelhantes, e por isso foi definido um dos fios da cordoalha e realizado o ensaio em cada uma das 6 cordoalhas do tirante. Desse modo, para cada tirante foram obtidas 6 curvas, que de modo geral foram bem semelhantes. Em alguns casos, houve uma curva que apresentou a reflexão da onda um pouco superior as demais, e na maioria dos casos foi a cordoalha que estava mais afastada do cabo coaxial.

Em relação ao formato das curvas, todas as variações dos tirantes de cordoalha apresentaram um formato semelhante. A reflexão da onda foi mais suavizada e sem a identificação clara da inflexão da curva entre os trechos livre e ancorado, quando comparada aos tirantes de monobarra. Para ambos os trechos, a reflexão da onda ocorreu próxima do valor de reflexão de -0,2, sendo que este valor foi semelhante ao trecho ancorado dos tirantes monobarra e dos grampos. Para os tirantes monobarra, a reflexão do trecho livre ocorreu sempre próximo ao valor zero, com exceção do tirante T2, que apresentava a bainha coletiva, e o valor da reflexão foi superior.

Figura 4.35 – Ensaio do TDR nos tirantes de cordoalha tipo T4 e T5

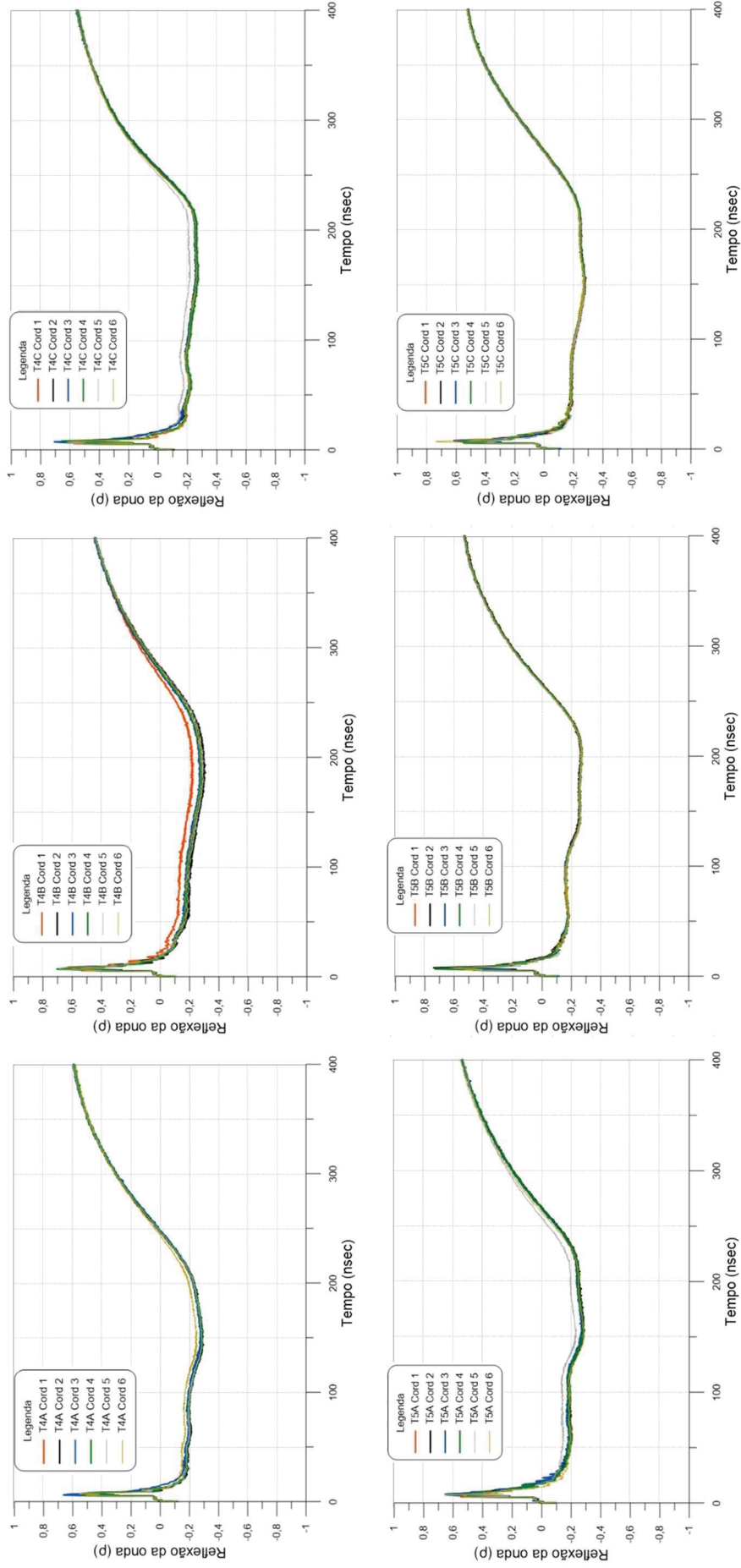
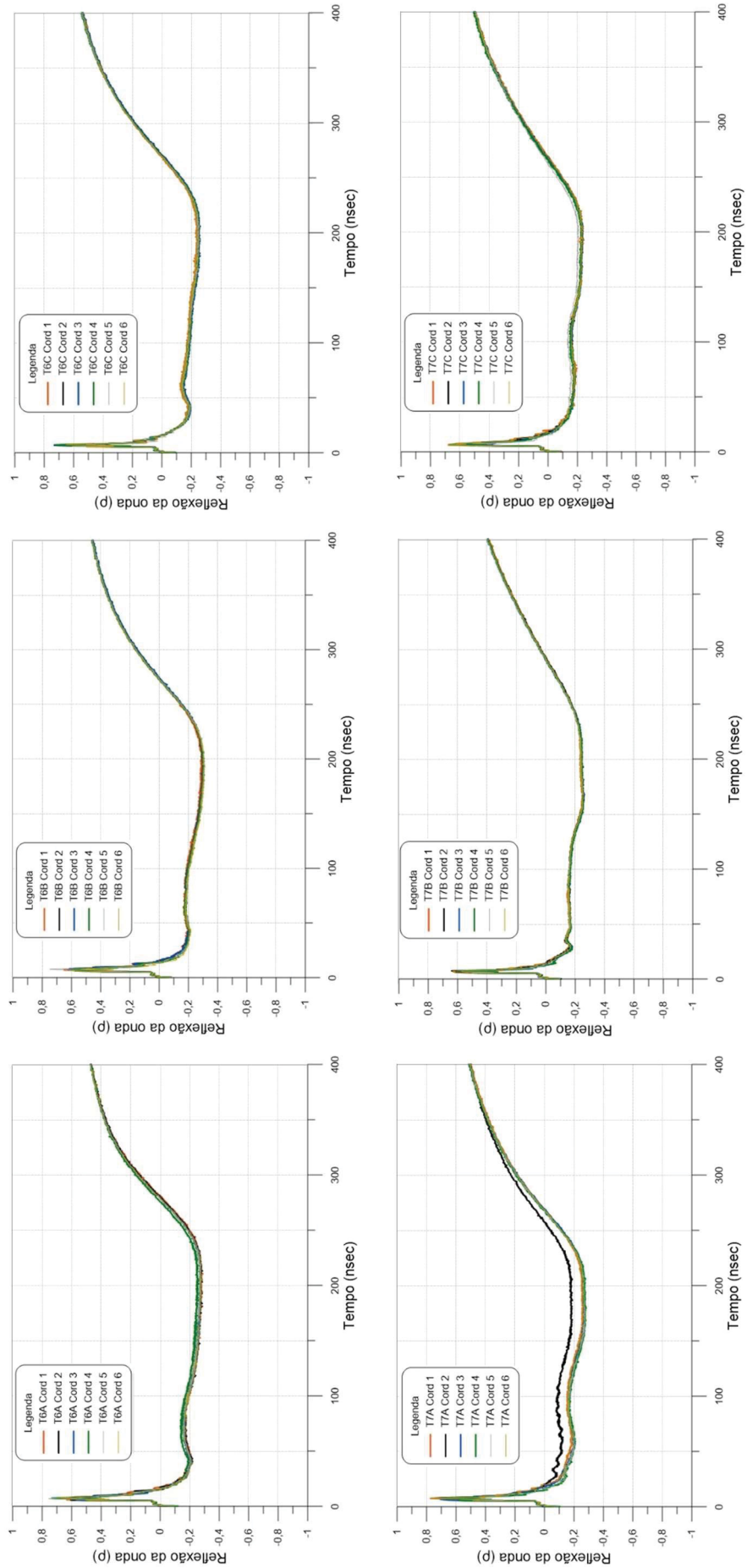


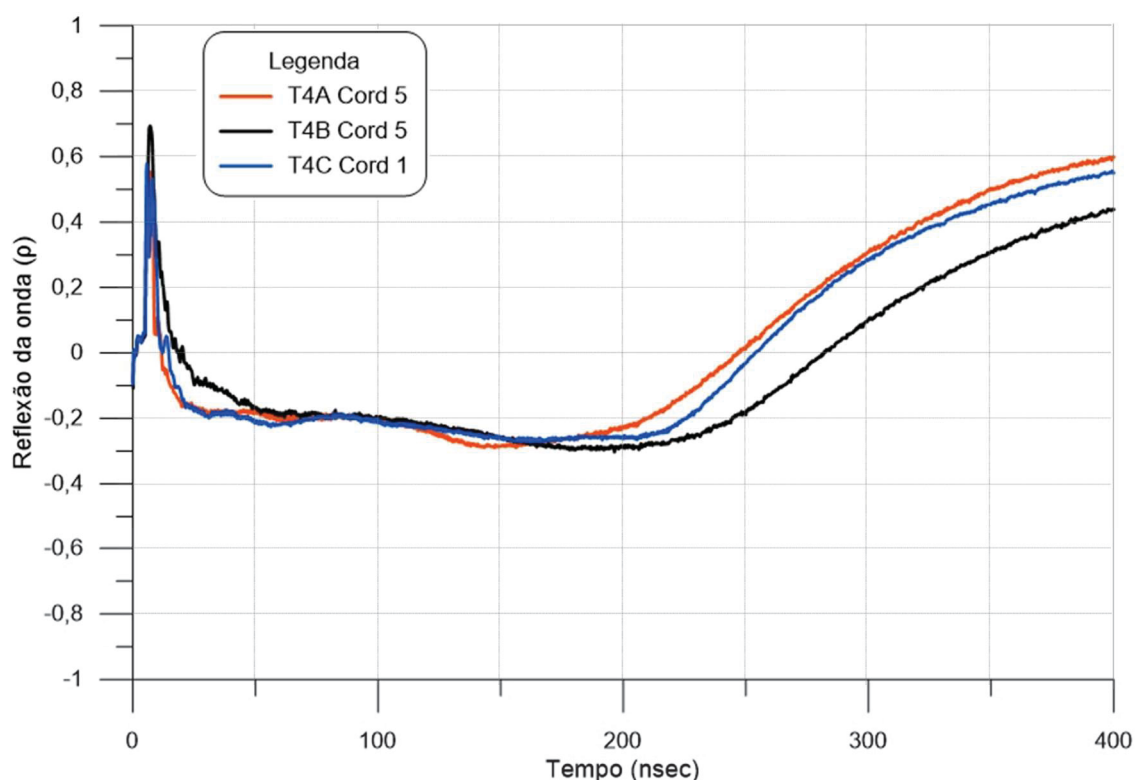
Figura 4.36 – Ensaio do TDR nos tirantes de cordoalha tipo T6 e T7



Os gráficos das cordoalhas de um mesmo tirante apresentaram resultados gráficos bem semelhantes, o que indica que a distância do cabo coaxial até a cordoalha não influenciou na reflexão da onda gerada. Dentre as 6 cordoalhas de cada tirante, foi selecionada a curva com menos ruídos para comparação entre cada variação realizada e o cálculo das velocidades estimadas.

Os resultados dos ensaios TDR nos tirantes de cordoalha T4, que são tirantes íntegros, são apresentados na Figura 4.37.

Figura 4.37 – Ensaio do TDR nos tirantes de cordoalha tipo T4

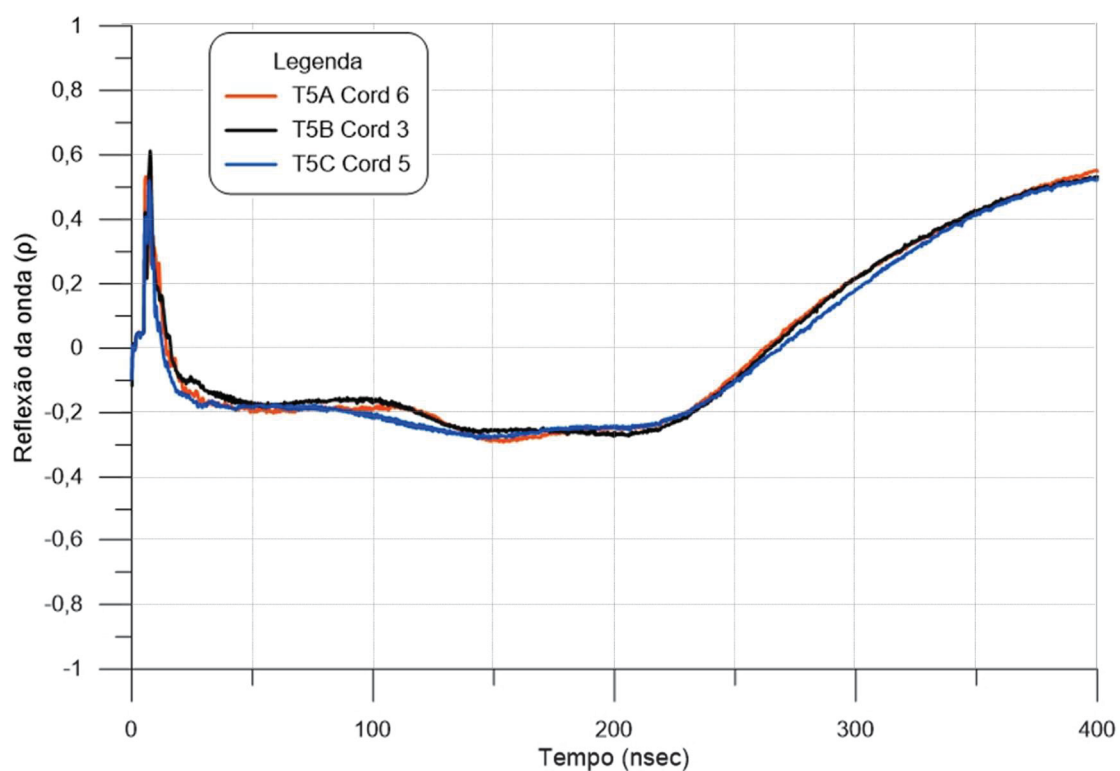


O tirante T4a apresentou um tempo menor de reflexão do pulso, e a reflexão entre o trecho livre e ancorado ficou mais clara quando comparado com os demais elementos da mesma variação.

Foi possível perceber que o tirante T4b apresentou uma reflexão inicial diferente das demais, podendo indicar alguma alteração ou vazio no trecho inicial. Esta variação também foi a que apresentou um maior tempo de retorno do pulso, o que indica menor velocidade de propagação. As demais variações, apesar de apresentarem um reflexo inicial semelhante, o tempo final foi diferente.

Os gráficos obtidos para os tirantes de cordoalha T5, que apresentam falha no início do furo, podem ser observados na Figura 4.38.

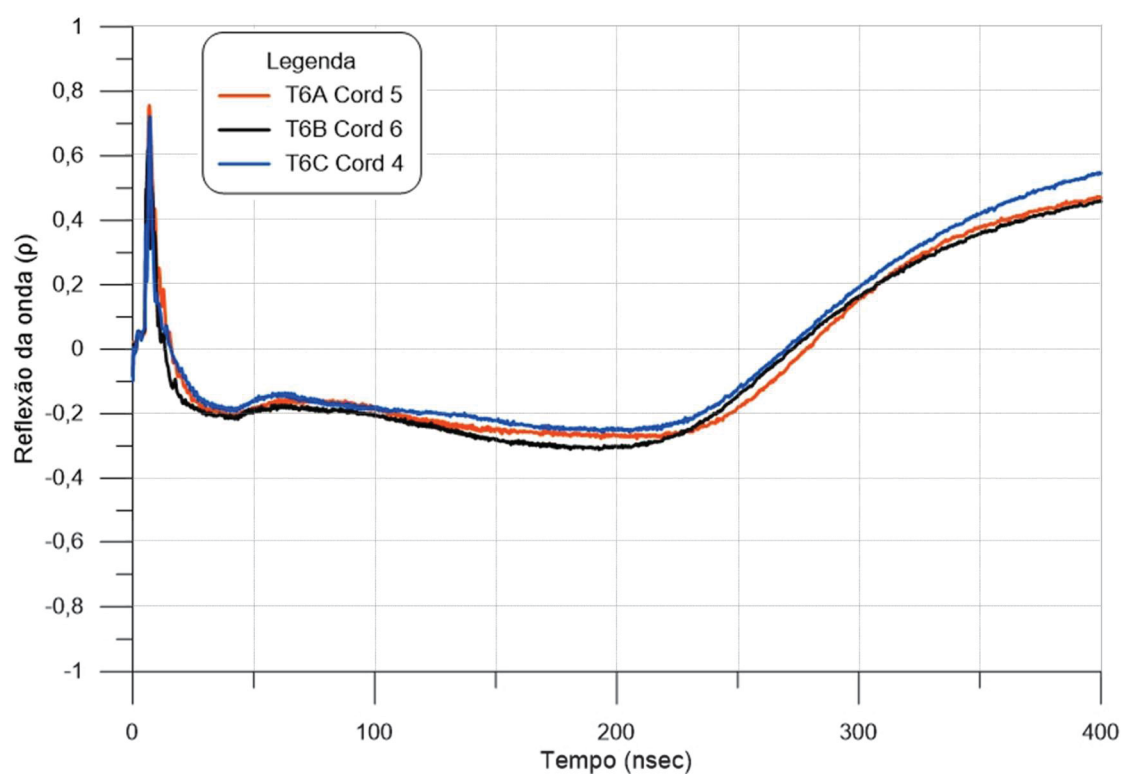
Figura 4.38 – Ensaio do TDR nos tirantes de cordoalha tipo T5



Para os três tirantes da variação T5, os gráficos foram bem semelhantes. Para o tirante T5c, a reflexão entre o trecho livre e ancorado foi mais suavizada quando comparada com as demais variações T5a e T5b. Como, de modo geral, todas as barras apresentam falhas no início, entende-se que não é possível identificar graficamente esta falha. Isso porque ocorrem reflexões devido a mudança do material ao redor da barra que pode ser confundido com falhas.

Os gráficos dos tirantes T6, que apresentam uma falha de 50 cm no trecho livre, são apresentados na Figura 4.39.

Figura 4.39 – Ensaio do TDR nos tirantes de cordoalha tipo T6

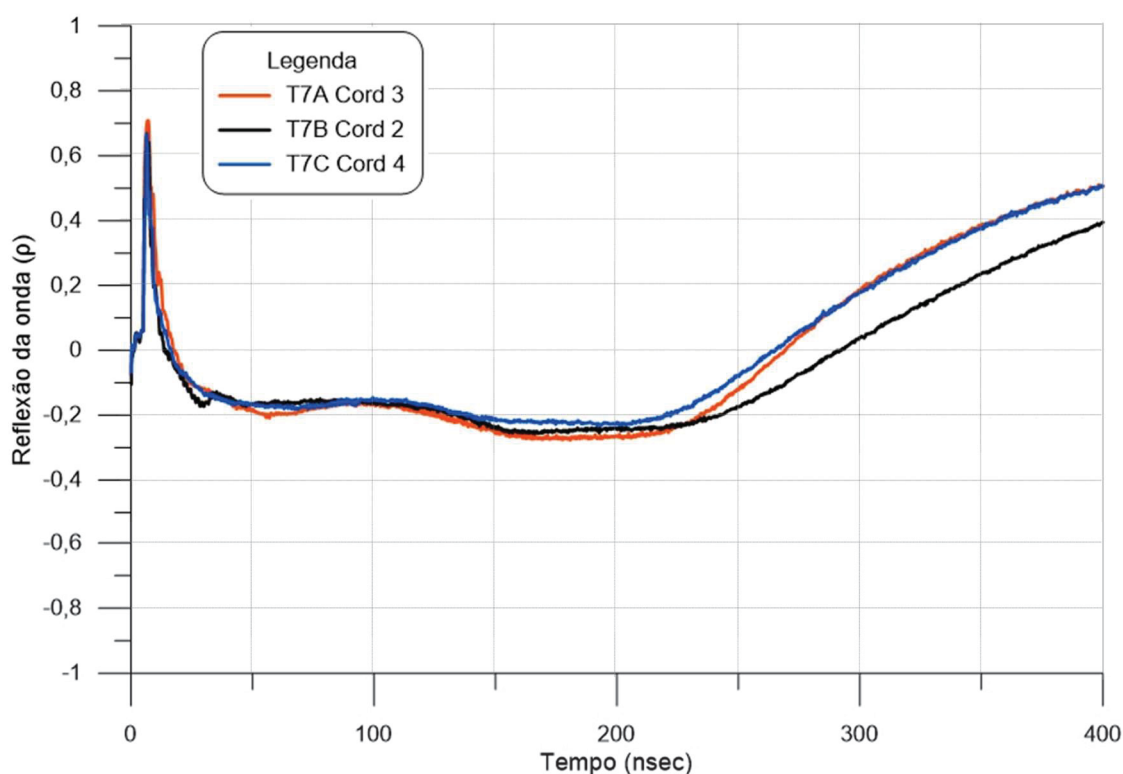


Todos os tirantes T6 apresentaram uma reflexão no trecho livre, que indica a posição da falha com ar de 50 cm no meio do furo. A reflexão ocorre, pois, ao longo da simulação da falha não foi considerada a presença do tubo de PVC considerado no trecho livre, além da presença da espuma utilizada para simular o vazio.

Com a reflexão inicial devido à falha simulada, não foi possível identificar claramente a variação entre o trecho livre e o trecho ancorado, resultando em uma velocidade inferior do trecho ancorado.

Os resultados dos ensaios TDR nos tirantes de cordoalha T7, que apresentam cortes nos fios das cordoalhas próximos à cabeça, são apresentados na Figura 4.40.

Figura 4.40 – Ensaio do TDR nos tirantes de cordoalha tipo T7



A variação T7 apresenta cortes próximos a cabeça, porém somente a barra T7b que apresentou uma reflexão que poderia estar associada a esta falha. Durante alguns ensaios na cordoalha com corte total, o gráfico apresentava uma reflexão positiva acentuada no início, indicando a falha na cordoalha, mas em outros ensaios a curva era semelhante às demais cordoalhas. Provavelmente devido à proximidade entre os fios de uma mesma cordoalha, é possível que o pulso se propague mesmo sem o contato direto entre as barras.

A estimativa da velocidade de propagação da onda no trecho livre e no trecho ancorado para os tirantes de cordoalha é apresentada na Tabela 4.14.

Todas as variações dos tirantes de cordoalha apresentaram variações nas velocidades, e a variação com menor coeficiente de variação foi o T7. A velocidade média no trecho livre dos tirantes de cordoalha íntegros (T4) foi de 0,45 vezes a velocidade da luz no vácuo. Para os tirantes de monobarra íntegros (T1) esta relação foi 0,43. A variação T6 que apresentou a maior velocidade no trecho livre, pois não foi possível identificar exatamente o ponto de inflexão entre os trechos. As demais variações apresentaram relação da velocidade entre 0,39 e 0,45.

Tabela 4.14 – Estimativa da velocidade de propagação do trecho livre e ancorado nos tirantes cordoalha

Tirante	Trecho livre					Trecho ancorado				
	V_{ar} (m/s)	$V_{ar}/V_{v\u00e1cuo}$	M\u00e9dia	Desvio Padr\u00e3o	Coef. de varia\u00e7\u00e3o	V_{calda} (m/s)	$V_{calda}/V_{v\u00e1cuo}$	M\u00e9dia	Desvio Padr\u00e3o	Coef. de varia\u00e7\u00e3o
T4a-5	$1,27 \times 10^8$	0,423				$5,29 \times 10^7$	0,176			
T4b-5	$1,23 \times 10^8$	0,410	0,450	0,059	13,11%	$5,00 \times 10^7$	0,167	0,162	0,016	10,00%
T4c-1	$1,55 \times 10^8$	0,518				$4,34 \times 10^7$	0,145			
T5a-6	$1,11 \times 10^8$	0,372				$5,29 \times 10^7$	0,177			
T5b-3	$1,20 \times 10^8$	0,401	0,426	0,070	16,45%	$4,99 \times 10^7$	0,167	0,161	0,018	11,23%
T5c-5	$1,51 \times 10^8$	0,505				$4,24 \times 10^7$	0,141			
T6a-5	$1,78 \times 10^8$	0,594				$3,76 \times 10^7$	0,125			
T6b-6	$1,64 \times 10^8$	0,547	0,634	0,114	17,91%	$4,11 \times 10^7$	0,137	0,126	0,010	8,15%
T6c-4	$2,29 \times 10^8$	0,763				$3,49 \times 10^7$	0,117			
T7a-3	$1,26 \times 10^8$	0,420				$4,77 \times 10^7$	0,159			
T7b-2	$1,10 \times 10^8$	0,367	0,393	0,027	6,80%	$5,25 \times 10^7$	0,175	0,170	0,009	5,45%
T7c-4	$1,18 \times 10^8$	0,393				$5,25 \times 10^7$	0,175			

Por outro lado, a velocidade no trecho ancorado, que est\u00e1 em contato com a calda de cimento, foi de 0,16 e 0,28 vezes a velocidade da luz no v\u00e1cuo para os tirantes de cordoalha e monobarra \u00edntegros, respectivamente. Este comportamento foi semelhante para as demais varia\u00e7\u00f5es dos tirantes de cordoalha.

O tirante T6, que simulou uma falha no meio do trecho livre apresentou uma velocidade mais alta que a m\u00e9dia dos demais no trecho livre, e velocidade menor para o trecho ancorado. Isso se deu provavelmente pela falha ter gerado uma reflex\u00e3o na curva, que ficou suavizada entre os trechos livre e ancorado, n\u00e3o sendo poss\u00edvel obter corretamente esta varia\u00e7\u00e3o de material de preenchimento.

Os tirantes de cordoalha apresentaram bastante varia\u00e7\u00e3o na velocidade de propaga\u00e7\u00e3o do pulso, tanto no trecho livre como no ancorado, como pode ser observado a partir dos coeficientes de varia\u00e7\u00e3o acima de 10%. Os resultados com menor varia\u00e7\u00e3o foram dos tirantes T7.

O tirante com menor tempo de reflex\u00e3o do pulso, o que corresponde a uma velocidade maior, foi a varia\u00e7\u00e3o do tirante \u00edntegro T4.

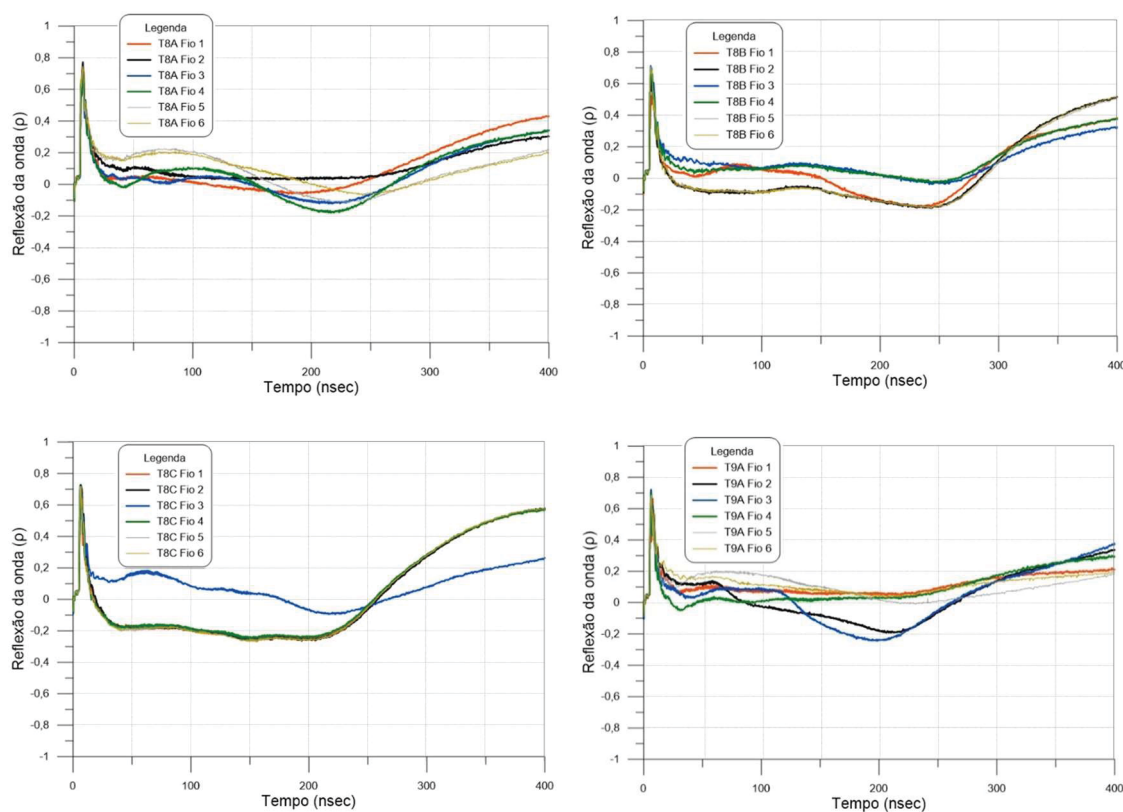
A velocidade de propaga\u00e7\u00e3o no trecho livre apresentou bastante varia\u00e7\u00e3o entre os tirantes de cordoalha, mesmo nos tirantes com a mesma varia\u00e7\u00e3o. Ainda existem incertezas em rela\u00e7\u00e3o ao material da cordoalha, os fios entrela\u00e7ados que comp\u00f5e a cordoalha, a inje\u00e7\u00e3o do trecho ancorado, entre outros.

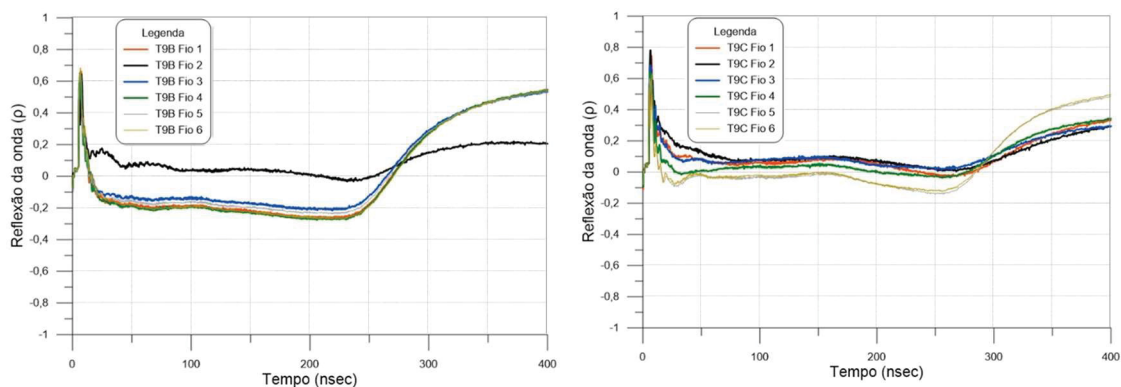
Para a velocidade na calda de cimento do trecho ancorado, os valores da velocidade foram semelhantes em relação à média, com exceção da variação T6. Os valores obtidos, de aproximadamente 0,17 vezes a velocidade da luz no vácuo, foram inferiores aos obtidos pelos grampos e pelas monobarras, o que pode indicar que o tipo de barra pode influenciar no tempo de propagação no pulso. Como as cordoalhas consistem em 7 fios entrelaçados entre si, é possível também que o comprimento total dos fios seja maior que o comprimento nominal do tirante, o que resultaria em uma velocidade maior do que a obtida. Além disso, pode ocorrer a atenuação do sinal ao longo da cordoalha devido a sua geometria.

C. Tirantes de fio

Os tirantes de fio apresentaram gráficos com bastante variação para cada fio de um mesmo tirante. Os gráficos obtidos para a variação T8 e T9 são apresentados na Figura 4.41.

Figura 4.41 – Ensaio do TDR nos tirantes de fio tipo T8 e T9

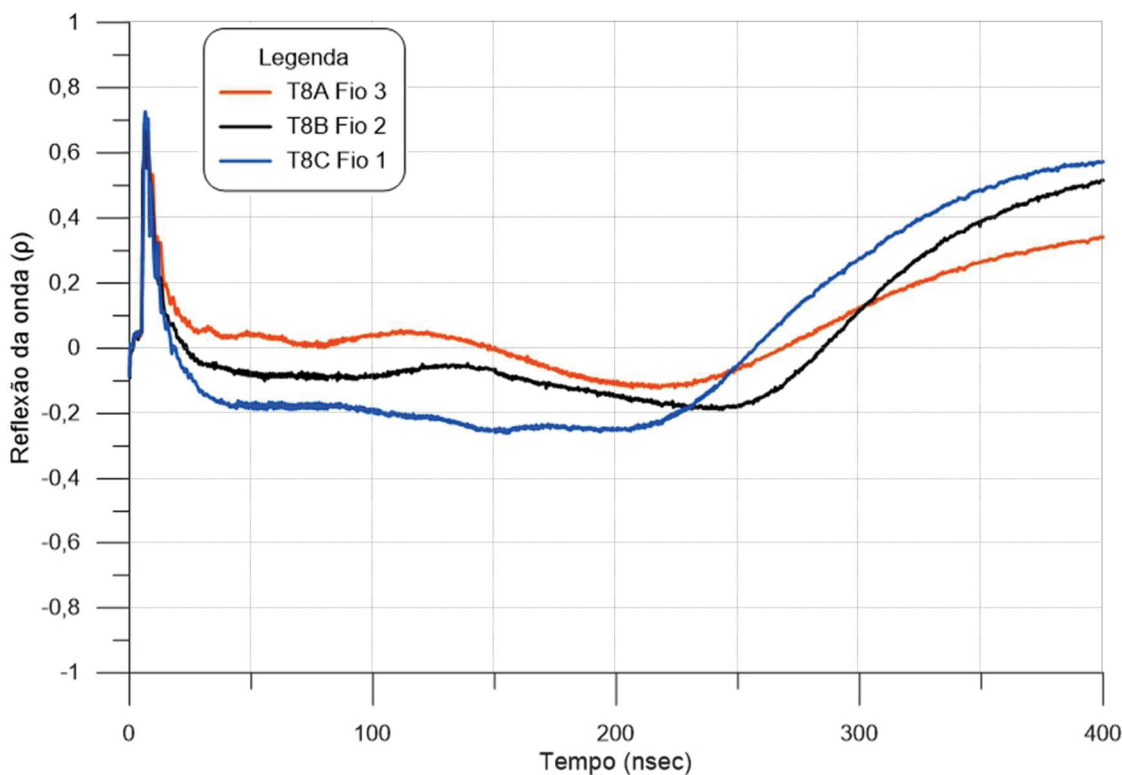




Para a avaliação dos tirantes de fio foram selecionadas as curvas dos fios que se mostraram mais coerentes, ou em alguns casos, curvas sobrepostas. Diferente do comportamento observado nos tirantes de cordoalha, que todas as cordoalhas de um mesmo tirante apresentavam uma curva semelhante, para os tirantes de fio, este comportamento não ocorreu. Na maioria dos casos, os gráficos foram bem diferentes entre si.

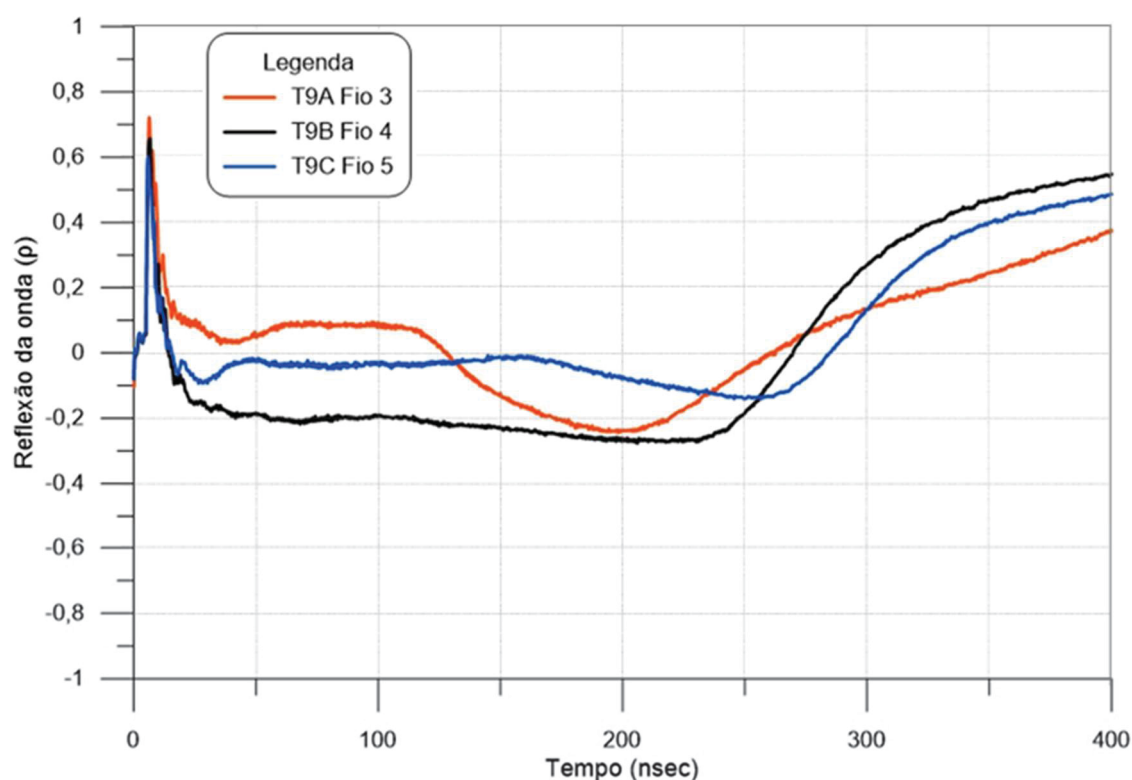
Na Figura 4.42 são apresentados os gráficos do tirante de fio tipo T8. Esta variação é de tirante de fio íntegro.

Figura 4.42 – Ensaio do TDR nos tirantes de fio tipo T8



Os ensaios realizados nos tirantes de fio íntegro apresentaram curvas com diferentes geometrias. Os tirantes T8a e T8b apresentaram curvas com geometria semelhante aos tirantes monobarras, com uma reflexão clara entre o trecho livre e o trecho ancorado. Já o tirante T8c apresentou um comportamento semelhante aos tirantes de cordoalha, com uma curva mais suave, próxima de um mesmo valor de reflexão e com maior dificuldade de identificar a mudança do trecho livre para ancorado. O tirante T8b que apresentou maior tempo de reflexão, o que indica uma velocidade de propagação menor consiste em tirantes de fio com falha com ar no início do furo.

Figura 4.43 – Ensaio do TDR nos tirantes de fio tipo T9



Da mesma maneira que para a variação T8, os gráficos variaram bastante entre si. Os três tirantes apresentaram curvas com valores diferentes de reflexão. Os tirantes T9a e T9c apresentaram reflexões no início da barra que podem estar associadas a falha simulada. O tirante com o menor tempo de reflexão foi o T9a, enquanto o T9c que apresentou o maior tempo.

De modo geral, não foi possível estabelecer um comportamento padrão para os tirantes de fio, uma vez que os gráficos dos fios de um mesmo tirante não foram sobrepostos.

A Tabela 4.15 apresenta um resumo da velocidade de propagação obtida para as duas variações para os tirantes de fio. Os resultados indicaram que houve grande variação nos resultados dos tirantes de fio, tanto no formato das curvas, como nas velocidades de propagação.

Tabela 4.15 – Estimativa da velocidade de propagação do trecho livre e ancorado nos tirantes de fio

Tirante	Trecho livre					Trecho ancorado				
	V_{ar} (m/s)	$V_{ar}/V_{v\u00e1cuo}$	M\u00e9dia	Desvio Padr\u00e3o	Coef. de varia\u00e7\u00e3o	V_{calda} (m/s)	$V_{calda}/V_{v\u00e1cuo}$	M\u00e9dia	Desvio Padr\u00e3o	Coef. de varia\u00e7\u00e3o
T8a-3	$1,03 \times 10^8$	0,342				$60,6 \times 10^7$	0,202			
T8b-2	$9,52 \times 10^7$	0,317	0,320	0,021	6,49%	$4,79 \times 10^7$	0,160	0,199	0,038	19,17%
T8c-1	$9,02 \times 10^7$	0,301				$7,08 \times 10^7$	0,236			
T9a-3	$1,08 \times 10^8$	0,359				$6,82 \times 10^7$	0,227			
T9b-4	$1,12 \times 10^8$	0,372	0,331	0,059	18,0%	$4,74 \times 10^7$	0,158	0,190	0,035	18,34%
T9c-5	$7,88 \times 10^7$	0,263				$5,57 \times 10^7$	0,186			

A velocidade m\u00e9dia de propaga\u00e7\u00e3o do pulso no trecho livre apresentou uma m\u00e9dia entre 0,32 e 0,33 vezes a velocidade da luz no v\u00e1cuo. Estes valores foram abaixo da m\u00e9dia obtida para os tirantes de monobarra e cordoalha.

A velocidade obtida no trecho ancorado apresentou uma m\u00e9dia de 0,19 vezes a velocidade da luz no v\u00e1cuo, por\u00e9m o coeficiente de varia\u00e7\u00e3o entre os valores foi alto.

D. Resumo

Na Tabela 4.16 s\u00e3o apresentadas as velocidades obtidas para todos os tirantes a partir da obten\u00e7\u00e3o gr\u00e1fica dos tempos correspondentes \u00e0s reflex\u00f5es. Cabe salientar que diferentemente dos grampos, os gr\u00e1ficos obtidos para os tirantes apresentam uma reflex\u00e3o que indica a passagem do trecho livre para o trecho ancorado. No trecho livre, os tirantes foram envoltos por um tubo de PVC, que n\u00e3o permite o contato com a calda de cimento, e no trecho ancorado, a barra est\u00e1 em contato direto com a calda de cimento. Desse modo, foram estimadas duas velocidades, uma para cada trecho.

Nos tirantes de cordoalha, os gr\u00e1ficos obtidos em todas as seis cordoalhas do mesmo tirante apresentaram o mesmo comportamento, por outro lado nos tirantes de fio os resultados apresentaram bastante varia\u00e7\u00e3o para os fios de um mesmo tirante.

Tabela 4.16 – Resumo das velocidades médias obtidas nos tirantes

Variação	Trecho livre = 12 m		Trecho ancorado = 6 m		Comprimento total = 18 m	
	$V_{ar}/V_{v\u00e1cuo}$	M\u00e9dia	$V_{calda}/V_{v\u00e1cuo}$	M\u00e9dia	$V_{ar}/V_{v\u00e1cuo}$	M\u00e9dia
T1a	0,431		0,287		0,369	
T1b	0,441	0,434	0,266	0,278	0,362	0,365
T1c	0,430		0,280		0,365	
T2a	0,545		0,325		0,445	
T2b	0,280	0,473	0,232	0,260	0,262	0,363
T2c	0,593		0,223		0,382	
T3a	0,422		0,278		0,360	
T3b	0,383	0,404	0,285	0,279	0,344	0,351
T3c	0,407		0,273		0,350	
T4a-5	0,423		0,176		0,289	
T4b-5	0,410	0,450	0,167	0,162	0,276	0,281
T4c-1	0,518		0,145		0,278	
T5a-6	0,372		0,177		0,272	
T5b-3	0,401	0,426	0,167	0,161	0,273	0,272
T5c-5	0,505		0,141		0,272	
T6a-5	0,594		0,125		0,265	
T6b-6	0,547	0,634	0,137	0,126	0,274	0,269
T6c-4	0,763		0,117		0,268	
T7a-3	0,420		0,159		0,272	
T7b-2	0,367	0,393	0,175	0,170	0,269	0,273
T7c-4	0,393		0,175		0,278	
T8a-3	0,342		0,202		0,278	
T8b-2	0,317	0,320	0,160	0,199	0,239	0,264
T8c-1	0,301		0,236		0,276	
T9a-3	0,359		0,227		0,301	
T9b-4	0,372	0,331	0,158	0,190	0,256	0,263
T9c-5	0,263		0,186		0,231	

Para o tirante T6 \u00e9 poss\u00edvel perceber que a velocidade m\u00e9dia para todo o comprimento (18 m) foi bem semelhante aos demais tirantes de cordoalha, o que indica que o ponto de inflex\u00e3o entre o trecho livre e ancorado n\u00e3o foi obtido corretamente. Isso se deu pela reflex\u00e3o da falha simulada no trecho livre, que n\u00e3o permitiu definir o valor correto da inflex\u00e3o devido a suaviza\u00e7\u00e3o da reta ap\u00f3s a falha.

É possível perceber que a velocidade no trecho livre, a velocidade de propagação do pulso é superior ao trecho ancorado, o que já era esperado, pois a velocidade é maior no ar do que na calda de cimento.

No trecho livre a velocidade entre os tirantes monobarra e cordoalha foram semelhantes, com uma média de aproximadamente 0,43 vezes a velocidade da luz no vácuo. Os tirantes de fio que apresentaram velocidades inferiores, com uma relação média de 0,33.

Em relação ao trecho ancorado, em que a barra está em uma condição semelhante aos grampos, a relação entre as velocidades para os tirantes de monobarra se apresentou pouco abaixo do encontrado nos grampos. Para os tirantes de cordoalha e fio, a velocidade no trecho ancorado foi inferior aos tirantes monobarra.

Ambas as velocidades obtidas foram abaixo do valor obtido em laboratório. Isso indica que a condição em que as barras se encontram em campo podem influenciar nos resultados, reduzindo a velocidade devido a influências externas. Por exemplo, o bloco de concreto para protensão, a placa metálica de reação, a porca ou os clavetes que são utilizados para a protensão dos tirantes, o tubo de PVC ao redor da barra e sua fixação no trecho livre, as emendas nos tirantes de monobarra, o tubo de injeção paralelo a barra, entre outros. Além disso, também pode haver pequenas variações nos resultados devido ao operador durante o ensaio e o profissional que processa os dados.

A Tabela 4.17 apresenta as velocidades médias obtidas para cada tipo de tirante avaliado. A estimativa do comprimento pode ser realizada através das velocidades do trecho livre e trecho ancorado, ou pelo comprimento total.

Tabela 4.17 – Resumo das velocidades médias para cada tipo de tirante

Tirante	$V_{\text{média}} / V_{\text{vácuo}}$		
	Trecho livre	Trecho ancorado	Comprimento total
Monobarra	0,43	0,28	0,36
Cordoalha	0,42	0,16	0,28
Fio	0,32	0,19	0,26

E. Estimativa do comprimento

Este item visa avaliar o erro nas leituras considerando as velocidades médias obtidas em cada tipo de tirante avaliado, conforme apresentado na Tabela 4.17. Para esta análise não foram considerados os tirantes T2 e T6 que apresentaram variações devido as

simulações. A Tabela 4.18 apresenta a estimativa do comprimento dos tirantes a partir dos tempos obtidos graficamente, e das velocidades médias para cada trecho apresentadas na Tabela 4.17.

Tabela 4.18 – Estimativa do comprimento dos tirantes

Variação	Trecho livre		Trecho ancorado		Soma dos trechos	
	Comprimento (m)	Erro	Comprimento (m)	Erro	Comprimento (m)	Erro
T1a	11,98	-0,20%	5,86	-2,28%	17,84	-0,89%
T1b	11,69	-2,58%	6,31	5,10%	18,00	-0,02%
T1c	11,99	-0,08%	6,01	0,11%	18,00	-0,01%
T3a	12,22	1,82%	6,04	0,60%	18,25	1,41%
T3b	13,47	12,28%	5,88	-1,92%	19,36	7,54%
T3c	12,67	5,60%	6,16	2,64%	18,83	4,61%
T4a-5	11,91	-0,75%	5,44	-9,25%	17,35	-3,59%
T4b-5	12,30	2,49%	5,76	-3,98%	18,06	0,33%
T4c-1	9,73	-18,93%	6,64	10,65%	16,37	-9,07%
T5a-6	13,55	12,93%	5,44	-9,37%	18,99	5,50%
T5b-3	12,56	4,70%	5,76	-3,94%	18,33	1,82%
T5c-5	9,97	-16,88%	6,79	13,19%	16,77	-6,86%
T7a-3	12,00	-0,02%	6,03	0,58%	18,03	0,18%
T7b-2	13,75	14,57%	5,48	-8,59%	19,23	6,85%
T7c-4	12,82	6,82%	5,48	-8,66%	18,30	1,66%
T8a-3	11,22	-6,50%	5,64	-5,94%	16,86	-6,32%
T8b-2	12,09	0,76%	7,13	18,80%	19,22	6,77%
T8c-1	12,76	6,33%	4,83	-19,57%	17,58	-2,31%
T9a-3	10,68	-10,98%	5,01	-16,44%	15,70	-12,80%
T9b-4	10,32	-13,97%	7,22	20,28%	17,54	-2,55%
T9c-5	14,60	21,69%	6,13	2,19%	20,73	15,19%

Para os tirantes de monobarra íntegros do tipo 1 (T1) os erros foram baixos, principalmente para a soma dos trechos, com erros inferiores à 1%. Para o tirante T1b foi possível perceber que os erros foram maiores para a avaliação individual de cada trecho, porém em relação a velocidade média da soma dos trechos o erro reduziu para praticamente zero. Este resultado pode indicar que pode ter entrado calda de cimento na bainha individual próxima do trecho ancorado, ou que o ponto de inflexão obtido graficamente não está correto.

A variação T3 apresentou erros maiores quando comparado com os tirantes T1, resultando em um erro máximo do comprimento total de 7,54%, para o elemento T3b. A variação simulada provavelmente afetou os resultados, uma vez que o trecho com redução de seção das barras estava em contato com calda de cimento e sem o tubo de PVC, alterando a velocidade no trecho livre.

Os tirantes de cordoalha apresentaram maiores erros que os tirantes de monobarra, do mesmo modo que apresentou maiores variações nas velocidades obtidas. Os maiores erros ocorreram no trecho livre, com erro máximo de 9,07% para o tirante T4c.

Os tirantes de fio foram os que apresentaram maiores erros em relação com comprimento livre, ancorado e total, com erros de mais de 15%. Estes erros já eram esperados, uma vez que os gráficos não apresentaram curvas semelhantes nos fios de um mesmo tirante, além da variação entre todos os tirantes avaliados.

A Tabela 4.19 apresenta a comparação do erro obtido pela soma dos comprimentos apresentados na Tabela 4.18 e a utilização da velocidade média do comprimento total dos tirantes, sem a distinção dos trechos livres e ancorados.

Foi possível perceber que, para alguns casos, o erro foi inferior quando considerada uma velocidade média para o tirante, sem distinguir o trecho livre do ancorado. No entanto, essa avaliação só é possível quando se sabe qual o comprimento dos trechos, pois em alguns casos a proporção pode ser diferente, gerando resultados incoerentes.

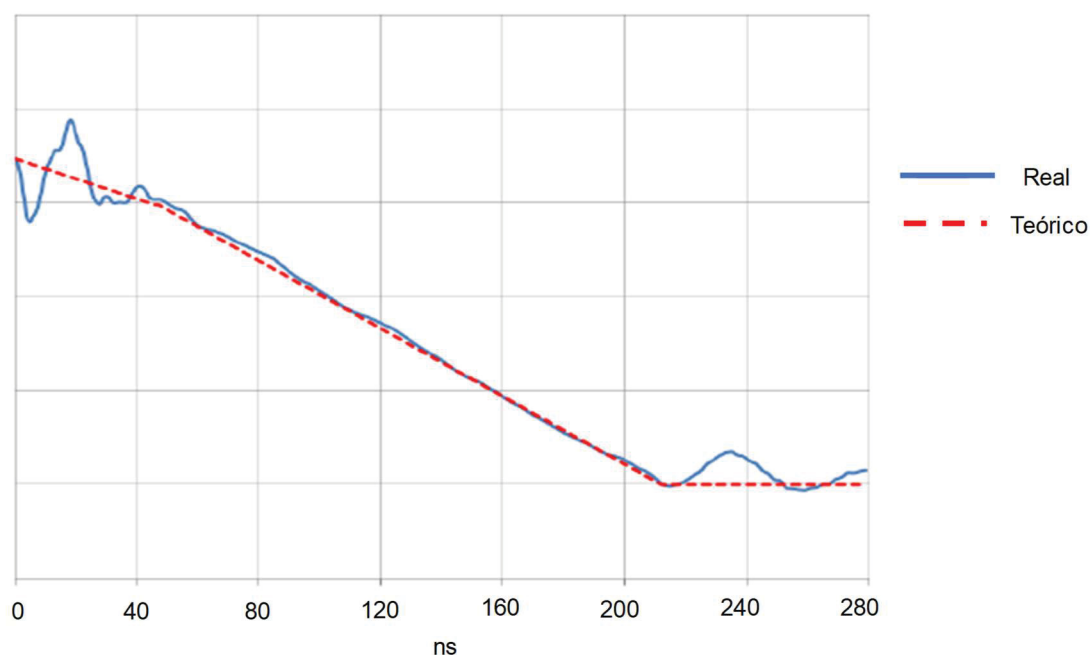
Tabela 4.19 – Comparação da estimativa do comprimento dos tirantes

Variação	Soma dos trechos		Velocidade média	
	Comprimento (m)	Erro	Comprimento (m)	Erro
T1a	17,84	-0,89%	17,57	-2,41%
T1b	18,00	-0,02%	17,90	-0,58%
T1c	18,00	-0,01%	17,76	-1,33%
T3a	18,25	1,41%	17,99	-0,06%
T3b	19,36	7,54%	18,85	4,70%
T3c	18,83	4,61%	18,53	2,93%
T4a-5	17,35	-3,59%	17,47	-2,95%
T4b-5	18,06	0,33%	18,28	1,56%
T4c-1	16,37	-9,07%	18,10	0,57%
T5a-6	18,99	5,50%	18,55	3,06%
T5b-3	18,33	1,82%	18,46	2,57%
T5c-5	16,77	-6,86%	18,53	2,97%
T7a-3	18,03	0,18%	18,56	3,11%
T7b-2	19,23	6,85%	18,76	4,24%
T7c-4	18,30	1,66%	18,14	0,76%
T8a-3	16,86	-6,32%	16,84	-6,45%
T8b-2	19,22	6,77%	19,58	8,77%
T8c-1	17,58	-2,31%	16,97	-5,72%
T9a-3	15,70	-12,80%	15,54	-13,66%
T9b-4	17,54	-2,55%	18,26	1,46%
T9c-5	20,73	15,19%	20,25	12,53%

4.2.1.4. *Reflectometric Impulse Measurement Technique*

A metodologia *Reflectometric Impulse Measurement Technique* foi avaliada em todos os tirantes e em 3 grampos. A técnica não apresenta a necessidade de um cabo coaxial pré-instalado. A Figura 4.44 apresenta um resultado típico dessa técnica. Há duas linhas presentes no gráfico: uma vermelha tracejada, que se refere ao comportamento teórico do tirante (em situação ideal e sem presença de corrosão), e uma linha azul, atribuída ao comportamento real lido pelo equipamento.

Figura 4.44 – Gráfico típico do método Reflectometric Impulse Measurement Technique



Os ensaios RIMT realizados no campo experimental foram executados sem informar previamente ao executor o comprimento dos elementos, conforme apresentado no relatório da ANTT (2020). O processamento dos dados de ensaio foi obtido a partir de uma única velocidade de propagação do pulso elétrico de $1,432 \times 10^8$ m/s, tanto para os grampos, quanto para os tirantes. Esta velocidade corresponde a 0,48 vezes a velocidade da luz no vácuo e não se diferencia quanto ao trecho livre e ancorado. O valor é superior ao obtido nos ensaios TDR.

No solo grampeado foram avaliados 3 grampos, correspondente aos elementos G1c, G4b e G5a. Não foram apresentados os gráficos, somente os comprimentos estimados, que são apresentados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Resultados do ensaio RIMT nos grampos

Grampo	Variação	Comprimento estimado (m)	Erro
G1c	Grampo 12 m sem reinjeção	12,21	1,8%
G4b	Grampo 6 m com reinjeção	12,52	108,7%
G5a	Grampo 6 m com emenda no início	11,87	97,8%

Para o grampo G1c, o erro foi muito baixo, indicando um bom resultado. No entanto, para os grampos de 6 m, o erro foi de mais de 108,7% e 97,8% para as variações G4b e G5a, respectivamente. Estes resultados indicam que a metodologia apresenta grande variação dos resultados.

Os valores do comprimento estimado dos tirantes pelo método RIMT são apresentados na Tabela 4.21. Para o tirante T9c foi encontrado um grau de interferência elevado e, mesmo com a aplicação de diversos filtros, não foi possível realizar uma leitura adequada.

Tabela 4.21 – Resultados do ensaio RIMT nos tirantes

Tirante	Varição	Comprimento estimado (m)	Erro
T1a		12,26	31,9%
T1b	Monobarra íntegro Tipo 1	11,78	34,6%
T1c		12,02	33,2%
T2a		12,13	32,6%
T2b	Monobarra íntegro Tipo 2	11,67	35,2%
T2c		12,36	31,3%
T3a		12,15	32,5%
T3b	Monobarra com redução de seção	12,21	32,2%
T3c		12,5	30,6%
T4a		12,95	28,1%
T4b	Cordoalha íntegro Tipo 1	12,19	32,3%
T4c		12,36	31,3%
T5a		12,45	30,8%
T5b	Cordoalha com falha no início do furo	12,49	30,6%
T5c		13,05	27,5%
T6a		12,45	30,8%
T6b	Cordoalha com falha no meio do furo	13,29	26,2%
T6c		13,87	22,9%
T7a		13,01	27,7%
T7b	Cordoalha com cortes próximos à cabeça	13,52	24,9%
T7c		13,64	24,2%
T8a		13,17	26,8%
T8b	Fio íntegro Tipo 1	12,67	29,6%
T8c		12,71	29,4%
T9a		12,82	28,8%
T9b	Fio com falha no início do furo	13,24	26,4%
T9c		-	-

Para os tirantes, os resultados apresentaram-se aproximadamente 30% abaixo dos comprimentos reais das barras. O menor erro foi no tirante de monobarra T6c com 22,9% de erro, e o maior erro de 35,2% para o tirante monobarra T2b. No ensaio com o TRD, o elemento T2b também apresentou uma reflexão diferente dos demais. De modo geral, foi possível observar que os tirantes de monobarra que apresentaram maiores erros, quando

comparados com os tirantes de cordoalha e fio. Provavelmente isto ocorre devido às variações na velocidade de propagação, conforme observado nos ensaios com o TDR.

Os resultados gráficos obtidos nos tirantes íntegros monobarra T1a, cordoalha T4a e fio T8a são apresentados na Figura 4.45, Figura 4.46 e Figura 4.47, respectivamente.

Figura 4.45 – Resultado gráfico do tirante de monobarra T1a

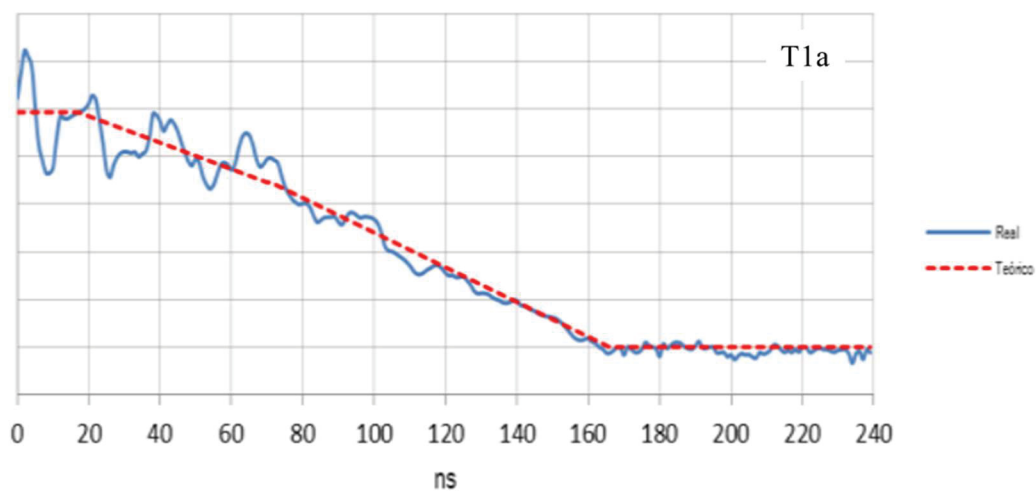


Figura 4.46 – Resultado gráfico do tirante de cordoalha T4a

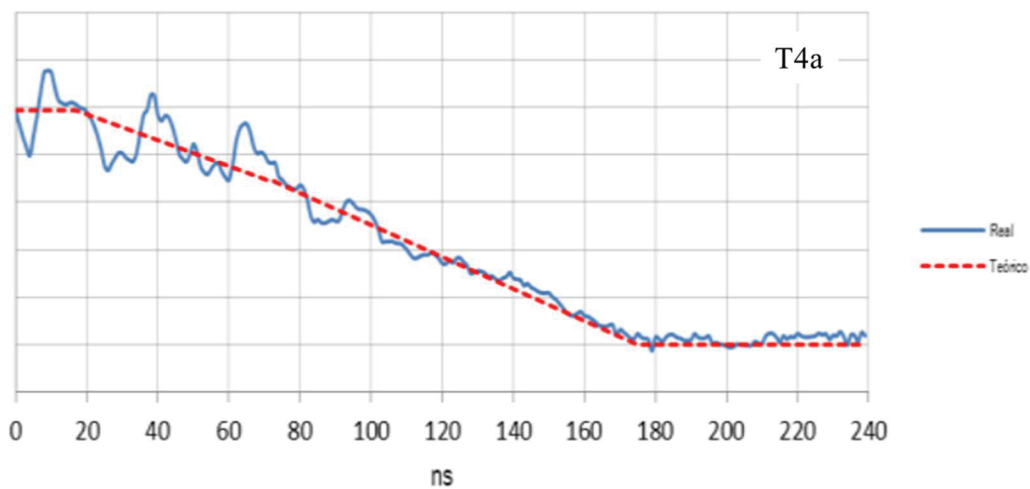
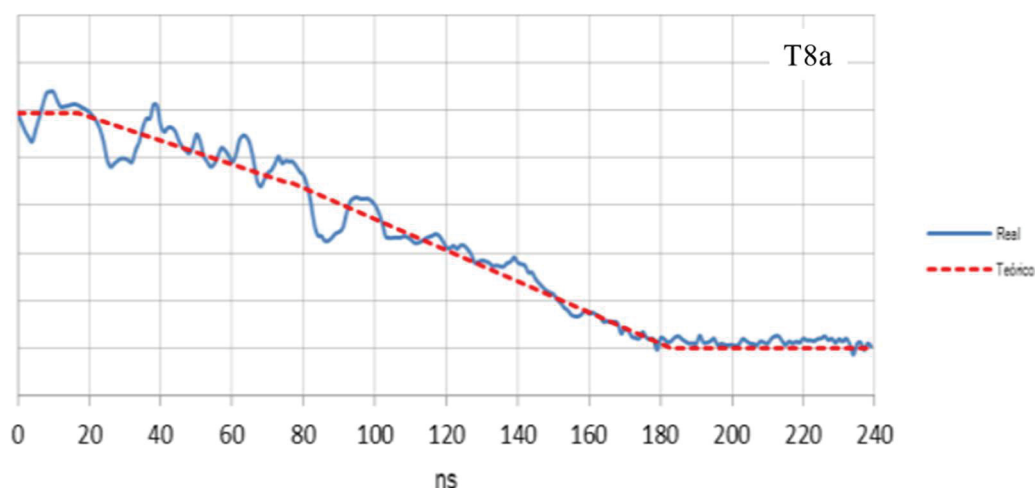


Figura 4.47 – Resultado gráfico do tirante de fio T8a

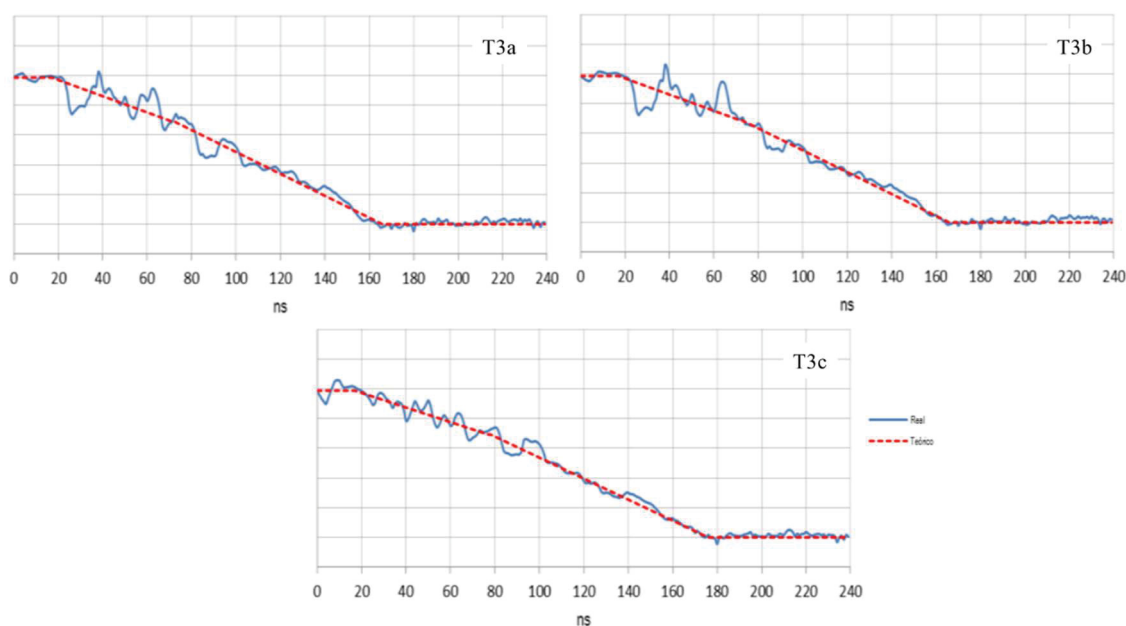


É possível observar que os gráficos apresentam comportamento semelhantes, sendo que as reflexões reduzem provavelmente no trecho ancorado. As curvas apresentam um padrão, com os finais da reflexão (trecho horizontal final) sempre variando próximo dos mesmos valores, ou seja, indicam elementos de mesmo comprimento. No entanto, com a velocidade indicada os resultados não representam o comprimento total real dos tirantes.

Adicionalmente, não foram reportadas anomalias relevantes nas barras, mesmo para as que apresentavam redução de seção. Em todas as barras foram identificadas anomalias de grau 1 e 2, que são definidas, respectivamente, como “anomalia irrelevante, sem alguma redução de seção útil” e “anomalia leve, com formação de camada de óxido superficial”. Estas anomalias são entendidas como uma leve ferrugem encontrada comumente nos elementos que ficaram expostos aos fatores externos durante certo tempo, como ocorrido no campo experimental.

Foi indicada a presença de corrosão de grau 3 (“anomalia com redução de até 15% da seção do aço na região indicada, sem comprometimento do sistema”) no início de alguns dos elementos de fio (T8b, T8c e T9b) e em uma cordoalha (T7b), sendo que em todos os tirantes com a anomalia grau 3, está é indicada nos primeiros metros da barra. O ensaio não conseguiu identificar a redução de 25% da seção transversal do aço dos tirantes de monobarra da variação T3, a qual poderia ser acusada com uma corrosão de grau 4 ou 5. Os resultados obtidos com nos tirantes da variação T3 são apresentados na Figura 4.48.

Figura 4.48 – Resultados gráficos dos tirantes de monobarra T3 com redução de seção

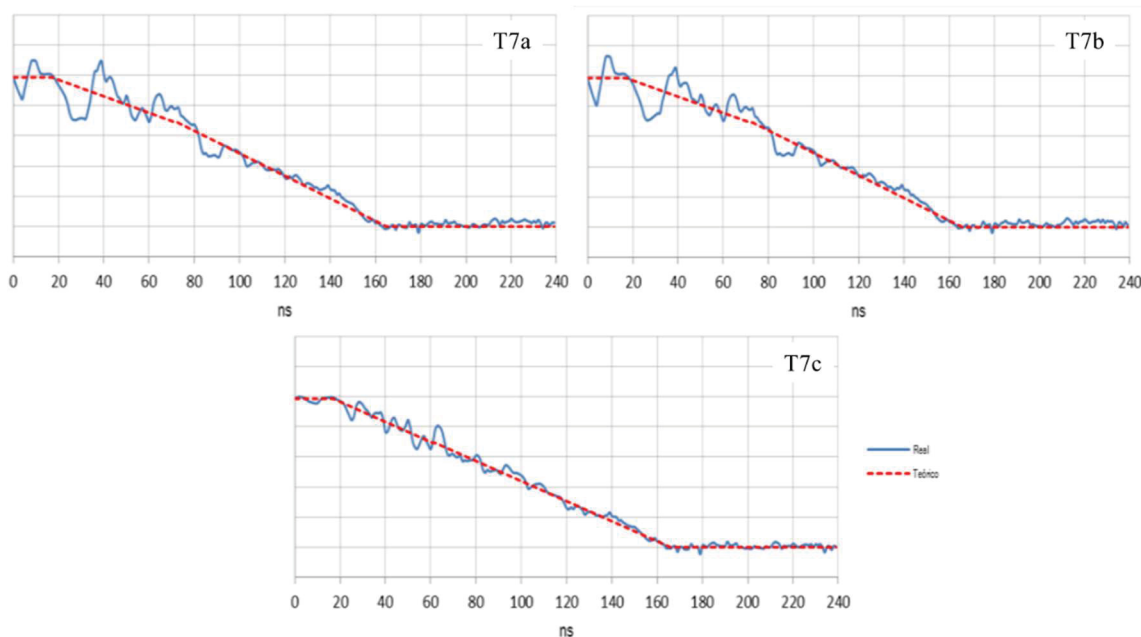


É possível perceber que os resultados dos tirantes T3a e T3b são semelhantes, com maiores reflexões no início, e redução no final. Ambos são diferentes do obtido para o tirante T3c, que está com menos reflexões, além de apresentar um tempo final superior que os demais. Os resultados gráficos, bem como o comprimento estimado, também se apresentaram semelhantes aos gráficos dos tirantes de monobarra íntegros.

Para as cordoalhas com cortes próximos à cabeça (variação T7), somente o T7b indicou anomalia grau 3, porém 1,18 m no início da barra, sendo que a falha está localizada à 1,5 m da cabeça da barra. Os resultados obtidos com nos tirantes da variação T7 são apresentados na Figura 4.49.

Os gráficos dos tirantes T7a e T7b apresentaram maiores reflexões iniciais quando comparado com o T7c. O tempo final das 3 variações foi bem semelhante. O comprimento estimado para os tirantes T7 foi um pouco superior quando comparado com os tirantes de cordoalha íntegros. Cabe salientar que o ensaio foi realizado em somente uma cordoalha, o que não permitiu avaliar uma a uma de cada tirante. Além disso, o ensaio pode ter sido realizado em uma cordoalha íntegra.

Figura 4.49 – Resultados gráficos dos tirantes de cordoalha T7 com redução de seção



Inicialmente foi realizada a análise dos resultados sem o conhecimento do comprimento das barras, semelhante a realidade de muitas obras. Posteriormente, os resultados foram interpretados com a inclusão do comprimento das barras e consideração das anomalias. A velocidade da onda considerada foi de $1,432 \times 10^8$ m/s, e foi reinterpretada para valores próximos a $2,5 \times 10^8$ m/s e $2,6 \times 10^8$ m/s, sendo que os defeitos presentes nos elementos continuaram não sendo identificados a partir das reflexões. A velocidade mudou consideravelmente, de 0,48 para 0,83 vezes a velocidade da luz no vácuo, após o conhecimento do comprimento das barras. Foi possível identificar que a metodologia necessita de maiores estudos de modo a calibrar a velocidade.

4.2.2. Método da resistência elétrica

Os ensaios realizados no campo experimental com o método da resistência elétrica consistiram nos ensaios de calibração, de modo a entender a metodologia, e posteriormente nos grampos e tirantes.

4.2.2.1. Ensaios de calibração

A etapa de calibração consistiu em ensaios para conhecimento da técnica e identificação de fatores que podem interferir nos resultados. Entre eles se destacam a distância entre eletrodos, que foi variada de modo a entender o comportamento

A. Distância entre eletrodos

Cheung e Lo (2005) sugere que distância linear entre o elemento e o eletrodo de potencial (L1) e entre o eletrodo de potencial e eletrodo de corrente (L2) seja de no mínimo 20 m e no máximo 50 m. De modo a validar tais distâncias, foram realizados ensaios com variação das distâncias L1 e L2 nos grampos. Foram avaliados 4 grampos próximos e o posicionamento linear dos eletrodos foi alterado de 2 em 2 m, na mesma direção dos grampos (considera-se que a cabeça do grampo está no ponto 0 m).

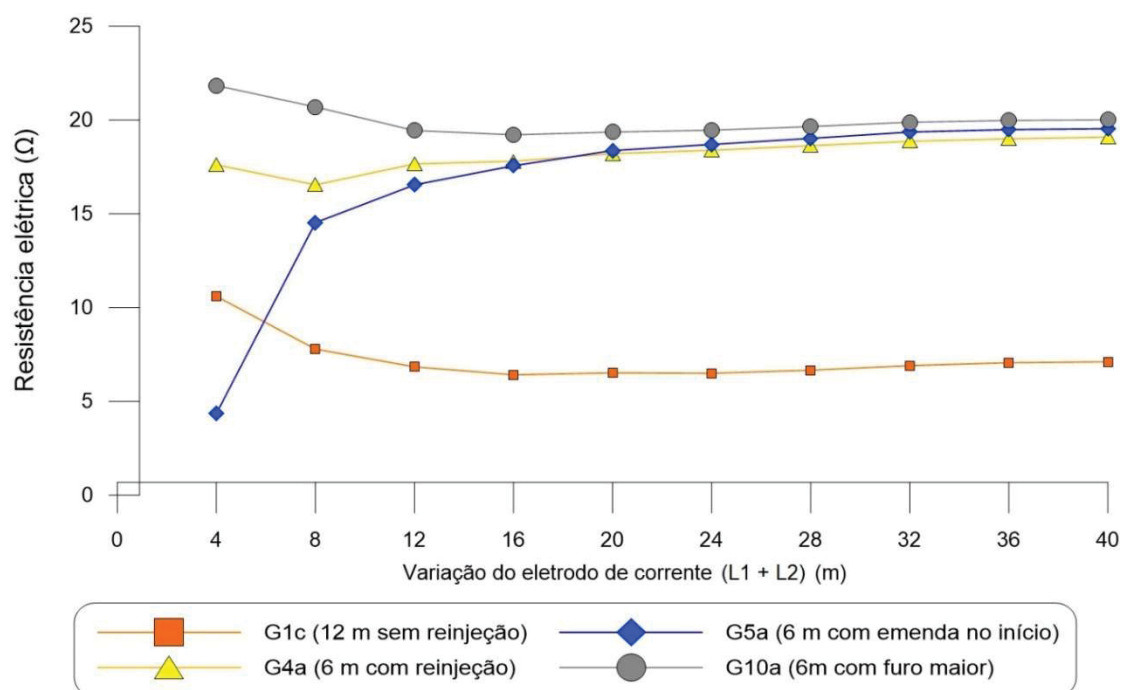
O elemento G1 é um grampo íntegro de 12 m de comprimento sem reinjeção, o G4a é um grampo íntegro de 6 m com reinjeção, o G5a consiste em um grampo de 6 m com emenda no início e o G10a é um grampo de 6 m, com furo de 7 m (preenchido com calda de cimento). Os dados de resistência elétrica obtidos são apresentados na Tabela 4.22.

Tabela 4.22 – Resistência elétrica dos grampos com a variação do posicionamento dos eletrodos

L1 (m)	L1 + L2 (m)	G1c (12 m) (Ω)	G4a (6 m) (Ω)	G5a (6 m) (Ω)	G10a (6 m) (Ω)
2	4	10,6	17,61	4,35	21,84
4	8	7,79	16,54	14,53	20,7
6	12	6,84	17,66	16,54	19,44
8	16	6,42	17,8	17,56	19,21
10	20	6,52	18,21	18,37	19,36
12	24	6,50	18,39	18,7	19,46
14	28	6,66	18,63	19,02	19,65
16	32	6,91	18,87	19,36	19,88
18	36	7,06	19,00	19,49	19,98
20	40	7,11	19,09	19,54	20,01

Os resultados também podem ser observados graficamente na Figura 3.36.

Figura 4.50 – Variação do posicionamento dos eletrodos no solo grampeado



Verifica-se que o elemento G1c, que corresponde ao grampo com 12 m, apresentou valor inferior quando comparado aos grampos de 6 m (G4a, G5a e G10a). Além disso, observa-se que as medidas de resistência elétrica tenderam a estabilizar com o aumento da distância entre eletrodos. Isso indica que a resistência elétrica dos elementos foi pouco influenciada após 20 m de distância linear entre a cabeça do grampo e o eletrodo de corrente (L1+L2). O elemento G5a apresentou uma curva diferente das demais que pode ocorrer devido à proximidade do eletrodo com o grampo, no entanto o patamar de resistência elétrica ocorreu de maneira semelhante com as demais.

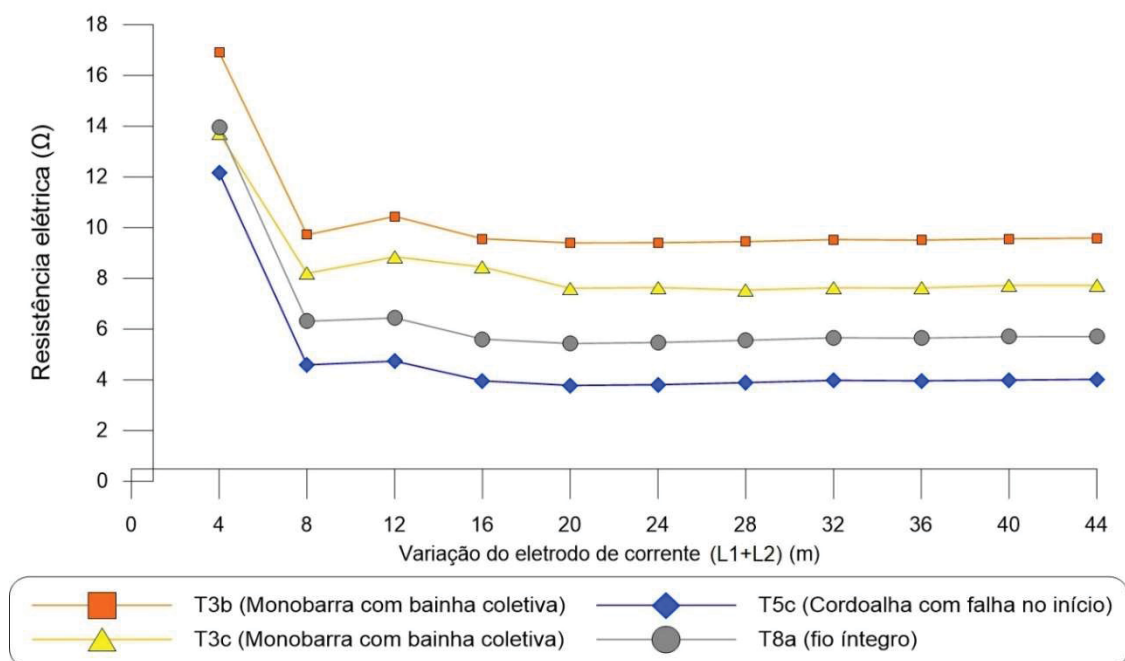
Assim como para o solo grampeado, os tirantes também foram avaliados quanto à variação do posicionamento dos eletrodos de 2 m em 2 m (Tabela 4.23). Foram obtidos os valores de resistência elétrica de tirantes de monobarra (T3b e T3c), cordoalha (T5c) e fio (T8a), com os eletrodos de potencial e corrente na mesma direção dos elementos.

Tabela 4.23 – Resistência elétrica dos tirantes com variação do posicionamento dos eletrodos

L1 (m)	L1+L2 (m)	T3b (Ω)	T3c (Ω)	T5c (Ω)	T8a (Ω)
2	4	16,91	13,72	12,16	13,96
4	8	9,72	8,20	4,59	6,31
6	12	10,44	8,85	4,74	6,44
8	16	9,56	8,45	3,96	5,61
10	20	9,40	7,61	3,78	5,43
12	24	9,41	7,64	3,81	5,47
14	28	9,45	7,54	3,89	5,56
16	32	9,53	7,63	3,98	5,66
18	36	9,51	7,62	3,96	5,65
20	40	9,56	7,73	3,99	5,70
22	44	9,59	7,73	4,02	5,71

Os resultados podem ainda ser visualizados de forma gráfica na Figura 4.51 onde verifica-se que assim como observado para os grampos, a resistência elétrica aproximou-se a um valor constante após os 20 m de distância linear do tirante até o eletrodo de corrente. Ainda, os valores de resistência elétrica se apresentaram maiores nas monobarras quando comparados com os valores obtidos nas cordoalhas e fios.

Figura 4.51 – Variação da resistência elétrica dos tirantes

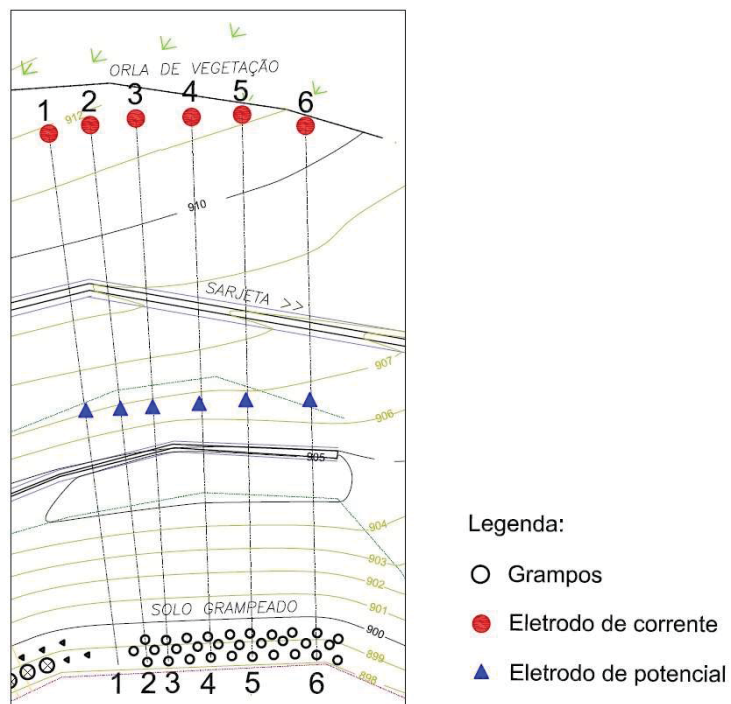


Desse modo, foi definido como 20 m a distância mínima entre a barra de aço e o eletrodo de corrente para execução dos ensaios no campo experimental. Cabe salientar que em outras estruturas é necessário refazer os ensaios para definir a distância mínima.

B. Variação dos eletrodos no solo grampeado

Foram realizados ensaios em todos os grampos com a variação lateral dos eletrodos de corrente e potencial nos grampos de modo a avaliar a precisão e variabilidade da técnica. Para tal, foram adotadas 6 seções, com variação no afastamento de 1,5 m a 4,5 m (Figura 4.52).

Figura 4.52 – Seções de medição da resistência elétrica no solo grampeado



Os dados de resistência elétrica obtidos nos grampos para cada seção são apresentados na Tabela 4.24. Com base nesses resultados foi possível concluir que a variação lateral dos eletrodos resultou em valores próximos, indicando pouca interferência nos resultados com o posicionamento dos mesmos.

Tabela 4.24 – Valores de resistência elétrica dos grampos com variação lateral dos eletrodos

Elemento	Seção 1 (Ω)	Seção 2 (Ω)	Seção 3 (Ω)	Seção 4 (Ω)	Seção 5 (Ω)	Seção 6 (Ω)
G1a	11,37	11,36	11,20	11,29	11,18	11,03
G1b	12,79	12,75	12,71	12,85	12,64	12,68
G1c	7,20	7,28	7,11	7,15	7,15	7,18
G2a	11,34	11,39	11,22	11,29	11,10	10,95
G2b	9,42	9,41	9,32	9,36	9,26	9,19
G2c	8,48	8,46	8,41	8,44	8,41	8,40
G3a	37,80	37,80	37,50	38,10	37,60	37,50
G3b	31,30	31,10	31,10	31,40	31,00	30,90
G3c	30,80	30,60	30,50	30,90	30,40	30,40
G4a	19,05	18,96	18,90	19,09	18,96	19,05
G4b	17,49	17,42	17,47	17,56	17,41	17,41
G4c	19,01	18,94	18,88	19,01	18,88	18,88
G5a	19,53	19,51	19,46	19,60	19,53	19,51
G5b	19,03	19,01	18,89	19,08	18,88	18,86
G5c	30,10	30,20	30,00	30,20	30,00	29,91
G6a	19,73	19,68	19,58	19,73	19,58	19,61
G6b	19,48	19,48	19,03	19,19	18,94	18,97
G6c	25,64	25,61	25,38	25,72	25,32	25,41
G7a	23,49	23,47	23,28	23,54	22,23	23,23
G7b	24,70	24,99	24,55	24,79	24,45	24,29
G7c	25,27	25,15	25,04	25,29	24,92	24,77
G8a	25,43	25,52	25,18	25,33	25,06	25,15
G8b	27,99	28,12	27,78	28,01	27,68	27,46
G8c	27,43	27,37	27,22	27,53	27,10	27,11
G9a	29,88	29,94	29,66	29,97	29,59	29,37
G9b	33,60	33,40	33,30	33,70	33,20	33,10
G9c	36,30	36,20	36,00	36,40	35,90	35,80
G10a	19,94	19,93	19,91	20,03	19,85	20,00
G10b	22,11	22,12	22,04	22,36	22,35	22,18
G10c	19,58	19,53	19,47	19,66	19,51	19,63

Na Tabela 4.25 são apresentados os valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação para cada elemento, de modo a permitir uma análise mais detalhada desses resultados.

Tabela 4.25 – Análise estatística dos dados de resistência elétrica nos grampos

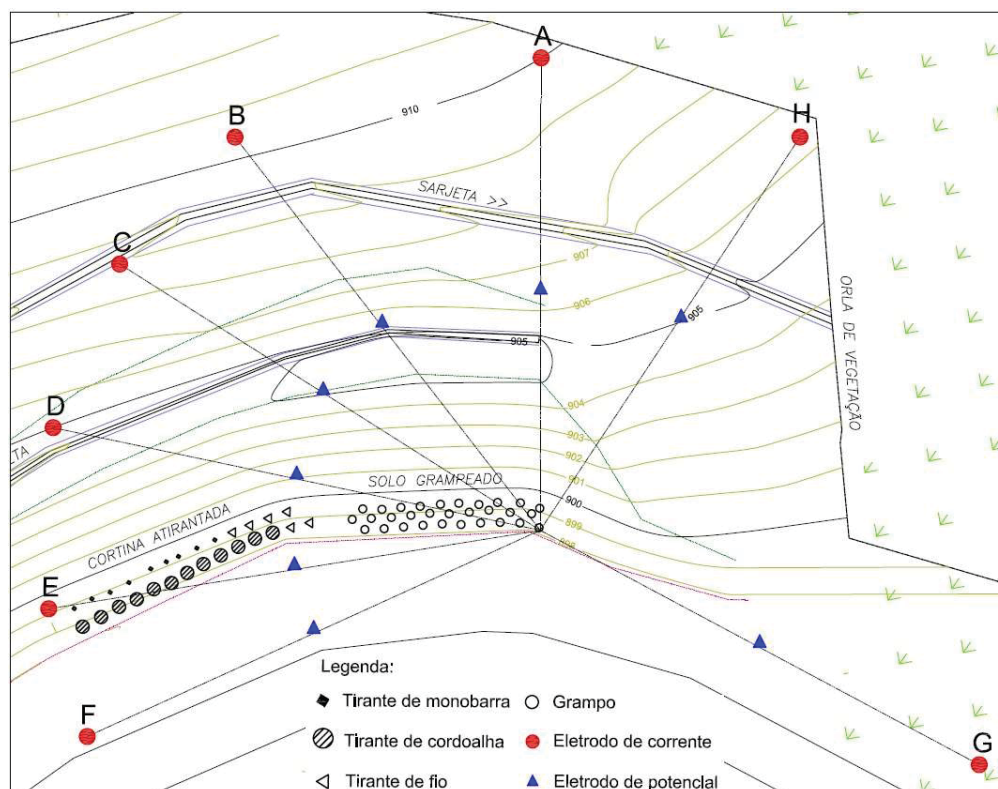
Elemento	Variação	Média (Ω)	Variação máxima (Ω)	Desvio Padrão (Ω)	Coefficiente de Variação
G1a		11,24	0,34	0,13	1,15%
G1b	Grampo 12 m sem reinjeção	12,74	0,21	0,08	0,60%
G1c		7,18	0,17	0,06	0,81%
G2a		11,22	0,44	0,16	1,47%
G2b	Grampo 12 m com reinjeção	9,33	0,23	0,09	0,96%
G2c		8,43	0,08	0,03	0,38%
G3a		37,72	0,60	0,23	0,61%
G3b	Grampo 6 m sem reinjeção	31,13	0,50	0,19	0,60%
G3c		30,60	0,50	0,21	0,69%
G4a		19,00	0,19	0,07	0,38%
G4b	Grampo 6 m com reinjeção	17,46	0,15	0,06	0,34%
G4c		18,93	0,13	0,06	0,34%
G5a		19,52	0,14	0,05	0,23%
G5b	Grampo 6 m com emenda	18,96	0,22	0,09	0,49%
G5c		30,07	0,29	0,12	0,39%
G6a		19,65	0,15	0,07	0,36%
G6b	Grampo 6 m enterrado no final (1 m)	19,18	0,54	0,25	1,29%
G6c		25,51	0,40	0,16	0,64%
G7a		23,21	1,31	0,49	2,13%
G7b	Grampo 6 m com falha no meio (10 cm)	24,63	0,70	0,25	1,02%
G7c		25,07	0,52	0,20	0,81%
G8a		25,28	0,46	0,18	0,70%
G8b	Grampo 6 m com falha no meio (50 cm)	27,84	0,66	0,25	0,88%
G8c		27,29	0,43	0,18	0,65%
G9a		29,74	0,60	0,24	0,79%
G9b	Grampo 6 m com falha no meio (100 cm)	33,38	0,60	0,23	0,69%
G9c		36,10	0,60	0,24	0,66%
G10a		19,94	0,18	0,06	0,32%
G10b	Grampo 6 m com furo maior que a barra (1 m)	22,19	0,32	0,13	0,60%
G10c		19,56	0,19	0,07	0,37%

Com base nos dados apresentados na Tabela 4.25, observa-se que o coeficiente de variação obtido foi muito baixo, e valores abaixo de 10% indicam valores homogêneos e de alta precisão, segundo a classificação de Pimentel Gomes (2000).

Conclui-se que a variação lateral das seções com o posicionamento dos eletrodos na parte superior do talude, em até 15 m de distância, não afetou significativamente os resultados de resistência elétrica dos elementos. Mesmo pequena, a variação medida pode ser atribuída a heterogeneidade do solo no local. Cabe salientar que os resultados foram obtidos para o campo experimental em estudo, e, para obras de contenção executadas em outros locais, novas medições em diferentes seções para confirmar tal acurácia da metodologia são necessárias.

Para melhor entendimento desta técnica, também foram realizadas medições em seções com diferentes direções, não somente na direção alinhada com os elementos. Esta avaliação foi realizada pois em algumas estruturas já existentes pode não haver espaço suficiente na parte superior do talude ou na contenção para executar o ensaio. As seções avaliadas são apresentadas na Figura 4.53. As medições foram realizadas nos elementos G3a (grupo de 6 m, íntegro e sem reinjeção) e nos elementos G9b e G9c (grampos de 6 m com falha de 1 m no meio da barra). Foi adotada uma distância $L1 + L2$ de 36 m, uma vez que após 20 m os resultados foram praticamente constantes para o campo experimental em estudo.

Figura 4.53 – Seções variadas do ensaio de resistência elétrica nos grampos



Os resultados obtidos para diferentes seções são apresentados na Tabela 4.26, de acordo com as direções indicadas pela Figura 4.53.

Tabela 4.26 – Resistência elétrica em diferentes seções

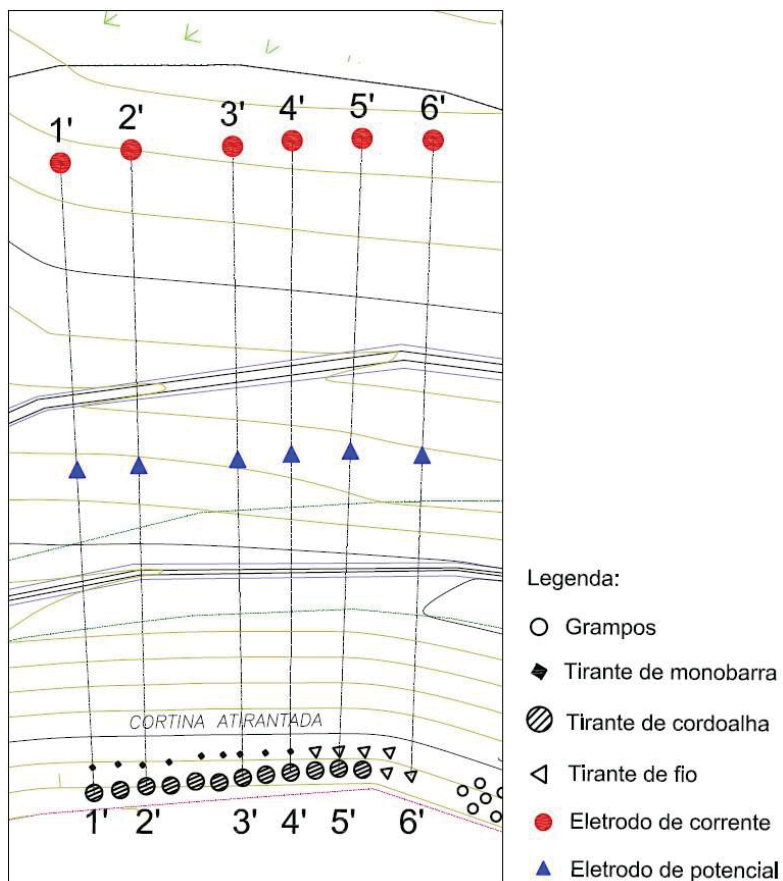
Seção	G3a (Ω)	G9b (Ω)	G9c (Ω)
A	37,1	33,0	35,3
B	37,1	32,9	35,5
C	37,1	32,9	35,6
D	37,4	33,1	35,8
E	37,2	32,9	35,6
F	37,2	33,0	35,7
G	37,8	33,6	36,3
H	37,0	33,0	35,3
Média (Ω)	37,2	33,1	35,6
Desvio padrão (Ω)	0,26	0,23	0,32
Coefficiente de Variação	0,69%	0,70%	0,90%

O coeficiente de variação foi menor de 1% para todos os grampos. A seção G mostrou maior variação quando comparada às demais, porém com aumento proporcional de todos os elementos. Com base nesses resultados, observa-se que ensaios em seções com diferentes sentidos também podem fornecer resultados confiáveis.

C. Variação dos eletrodos na cortina atirantada

Para avaliação dos resultados de resistência elétrica com a variação lateral das configurações de leitura foram adotadas 6 seções paralelas e na direção dos elementos (Figura 4.54), entre 3 e 6 m. Em algumas seções não foi possível medir todos os elementos por limitações do comprimento dos cabos que compõem o equipamento de resistência elétrica.

Figura 4.54 – Seções de resistência elétrica dos tirantes



Os resultados obtidos para as diferentes seções paralelas são apresentados na Tabela 4.27. Cabe salientar que nos tirantes de cordoalha e fio foi obtida a média entre os 6 elementos do mesmo tirante. Os valores foram muito semelhantes, com coeficiente de variação inferior à 5%.

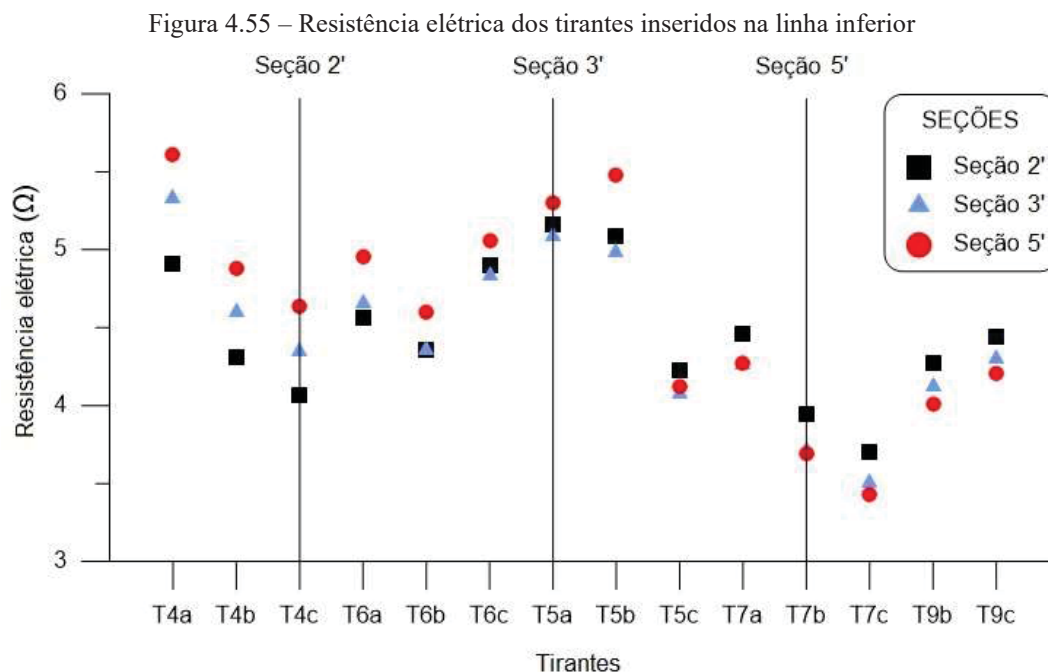
Tabela 4.27 – Resultados de resistência elétrica dos tirantes para diferentes seções

Elemento	Tirante	Seção 1'	Seção 2'	Seção 3'	Seção 4'	Seção 5'	Seção 6'
T1a		10,54	10,66	10,98	-	11,37	-
T1b		7,43	7,47	7,77	-	8,07	8,02
T1c		6,86	6,86	7,34	-	7,79	7,81
T2a		7,77	7,94	8,09	-	8,43	8,31
T2b	Monobarra	6,65	5,90	5,89	6,00	6,22	6,25
T2c		6,83	6,97	6,80	7,04	7,13	7,23
T3a		5,91	6,01	5,87	6,01	6,21	6,43
T3b		8,42	8,53	8,18	8,27	8,39	8,73
T3c		7,87	7,91	7,68	7,83	7,83	7,93
T4a		4,96	4,91	5,33	-	5,62	-
T4b		4,36	4,31	4,60	-	4,88	-
T4c		4,36	4,07	4,35	-	4,64	4,70
T5a		5,25	5,16	5,09	5,15	5,30	5,29
T5b		5,32	5,08	4,98	5,13	5,48	5,33
T5c	Cordoalha	4,18	4,23	4,07	4,04	4,12	4,04
T6a		4,71	4,56	4,66	-	4,95	5,02
T6b		4,32	4,35	4,36	4,50	4,60	4,82
T6c		4,93	4,90	4,84	4,96	5,06	5,14
T7a		4,45	4,46	4,26	4,29	4,27	4,26
T7b		3,95	3,94	3,71	3,77	3,70	3,51
T7c		3,71	3,70	3,51	3,47	3,43	3,26
T8a		5,97	6,01	5,80	5,74	5,80	5,62
T8b		5,32	5,43	5,19	5,04	5,07	4,81
T8c		4,07	4,10	3,87	3,82	3,68	3,47
T9a	Fio	5,31	5,24	5,03	4,87	4,90	4,44
T9b		4,26	4,28	4,12	4,08	4,01	3,75
T9c		4,41	4,45	4,30	4,14	4,20	3,77

Observa-se que assim como nos resultados obtidos com os grampos, os ensaios com os tirantes também apresentaram pequenas variações em função da alteração da seção de leitura, mas por se tratar de valores menores de resistência elétrica, tais diferenças foram mais significativas.

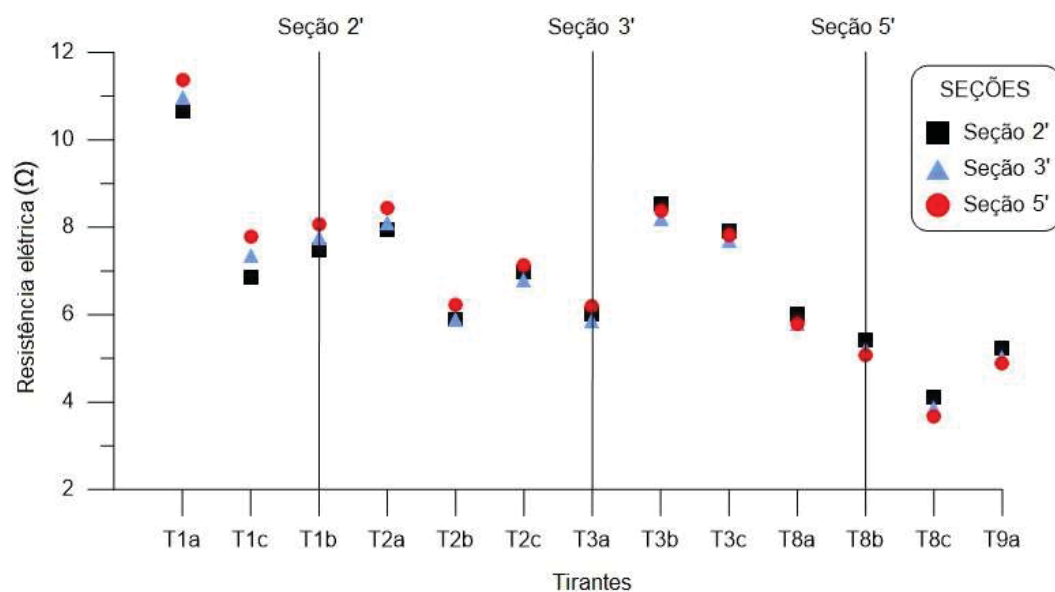
Ao analisar os dados, percebe-se que os valores de resistência elétrica tenderam a ser menores quando realizados em seções próximas dos elementos. Para tentar demonstrar esse fato, foram adotadas 3 seções principais: 2', 3' e 5', e apresentadas graficamente.

Inicialmente, na Figura 4.55, são apresentados os tirantes da linha inferior, e indicadas as direções de cada seção medida.



Verifica-se que quando os elementos estavam próximos da seção de leitura, estes tenderam a apresentar valores inferiores de resistência elétrica, quando comparado com seções mais distantes. Na Figura 4.56 são apresentados os valores dos tirantes inseridos na linha superior. Assim como ocorreu nos tirantes da linha inferior, os superiores também tiveram valores menores de resistência elétrica quando medidos mais próximos da seção.

Figura 4.56 – Resistência elétrica dos tirantes inseridos na linha superior



De modo geral, verifica-se que as monobarras tenderam a apresentar valores mais altos de resistência quando comparados com os tirantes de cordoalhas e de fio. Observa-se ainda que os valores de resistência elétrica dos tirantes de cordoalha e fio foram bem próximos. Uma análise estatística desses resultados é apresentada na Tabela 4.28.

Tabela 4.28 – Análise estatística dos valores de resistência elétrica nos tirantes

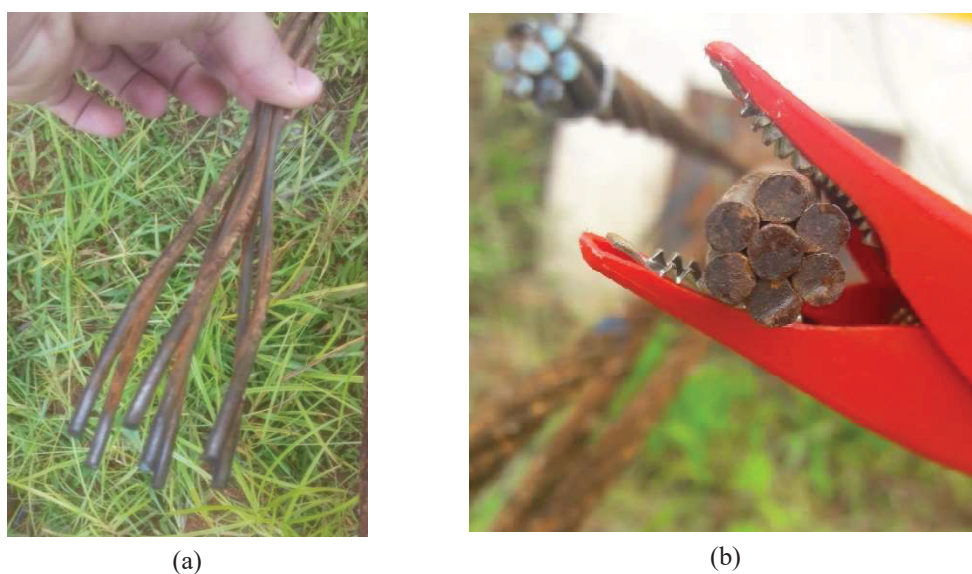
Elemento	Variação	Média (Ω)	Variação máxima (Ω)	Desvio padrão (Ω)	Coefficiente de variação
T1a		10,89	0,83	0,37	3,41%
T1b	Tirante monobarra com bainha individual	7,75	0,64	0,30	3,85%
T1c		7,33	0,95	0,47	6,41%
T2a		8,11	0,66	0,27	3,31%
T2b	Tirante monobarra com bainha coletiva	6,15	0,76	0,29	4,70%
T2c		7,00	0,43	0,17	2,40%
T3a		6,07	0,56	0,21	3,47%
T3b	Tirante monobarra com redução de seção	8,42	0,55	0,19	2,31%
T3c		7,84	0,25	0,09	1,14%
T4a		5,20	0,71	0,33	6,41%
T4b	Tirante cordoalha com bainha individual	4,54	0,57	0,26	5,73%
T4c		4,42	0,63	0,25	5,71%
T5a		5,21	0,22	0,09	1,67%
T5b	Tirante cordoalha com falha no início	5,22	0,49	0,18	3,52%
T5c		4,11	0,19	0,08	1,90%
T6a		4,78	0,46	0,20	4,14%
T6b	Tirante cordoalha com falha no meio	4,49	0,50	0,19	4,33%
T6c		4,97	0,30	0,11	2,20%
T7a		4,33	0,20	0,10	2,21%
T7b	Tirante cordoalha com cortes	3,76	0,44	0,17	4,39%
T7c		3,52	0,45	0,16	4,43%
T8a		5,82	0,39	0,15	2,49%
T8b	Tirante de fio com bainha individual	5,14	0,62	0,22	4,27%
T8c		3,84	0,63	0,22	5,68%
T9a		4,96	0,87	0,29	5,78%
T9b	Tirante de fio com falha no início	4,07	0,53	0,18	4,39%
T9c		4,19	0,68	0,23	5,50%

A variação entre os valores mínimos e máximos obtidos nos tirantes foi próxima aos valores encontrados nas variações com os grampos, que pode ser atribuída à heterogeneidade do solo. No entanto, devido à média dos valores de resistência elétrica ser menor que dos grampos, o coeficiente de variação se tornou maior. Apesar disso, os valores de coeficiente de variação abaixo de 10% são considerados bastante homogêneos e de alta precisão (Pimentel Gomes, 2000).

D. Verificação dos resultados nas cordoalhas

Nos tirantes de cordoalha e fio os resultados das barras de um mesmo tirante foram bem coerentes e muito próximos da média. Nas cordoalhas, foi realizado um teste em cada um dos fios entrelaçados de modo a entender se os fios influenciam nos resultados de forma individual (Figura 4.57a). Para tal, foi testado o tirante de cordoalha T7c, que apresenta cortes nas cordoalhas, assim foi possível realizar uma análise comparativa com a leitura na cordoalha inteira (Figura 4.57b).

Figura 4.57 – Ensaio de resistência elétrica nos tirantes de cordoalha



Legenda: (a) Fios da cordoalha individual e (b) Fios da cordoalha inteira

Para realizar esse teste, optou-se em escolher o tirante T7c, por ser composto de cordoalhas com cortes. Foram selecionadas 4 cordoalhas do tirante, onde a cordoalha 1 é íntegra, a cordoalha 2 tem corte de 2 fios, a cordoalha 3 apresenta corte total e a cordoalha 4 com corte de 4 fios. Os dados de resistência elétrica obtidos em cada um dos 7 fios que compõem 4 cordoalhas do tirante T7c podem ser analisados na Tabela 4.29.

Tabela 4.29 – Resistência elétrica dos fios da cordoalha do tirante T7c

Fio	Cordoalha 1 (Ω)	Cordoalha 2 (Ω)	Cordoalha 3 (Ω)	Cordoalha 4 (Ω)
1	3,23	3,22	3,50	3,23
2	3,30	3,27	3,29	3,24
3	3,31	3,25	3,26	3,23
4	3,38	3,32	3,71	3,21
5	3,49	3,33	3,34	3,22
6	3,23	3,27	3,26	3,22
7	3,37	3,27	3,34	3,24
Média	3,33	3,28	3,39	3,23

É possível perceber que os resultados individuais dos fios foram muito próximos da média. Apenas a cordoalha 4 apresentou um resultado 8% maior em relação à média (3,71 Ω). Por se tratar de uma cordoalha com corte total, o resultado não permitiu afirmar que isso se deva à anomalia. Para melhor comparação dos dados, os valores da média da resistência elétrica individuais dos fios da cordoalha foram comparados com a leitura da cordoalha inteira (Tabela 4.30).

Tabela 4.30 – Comparação entre a média dos fios e da cordoalha do elemento T7c

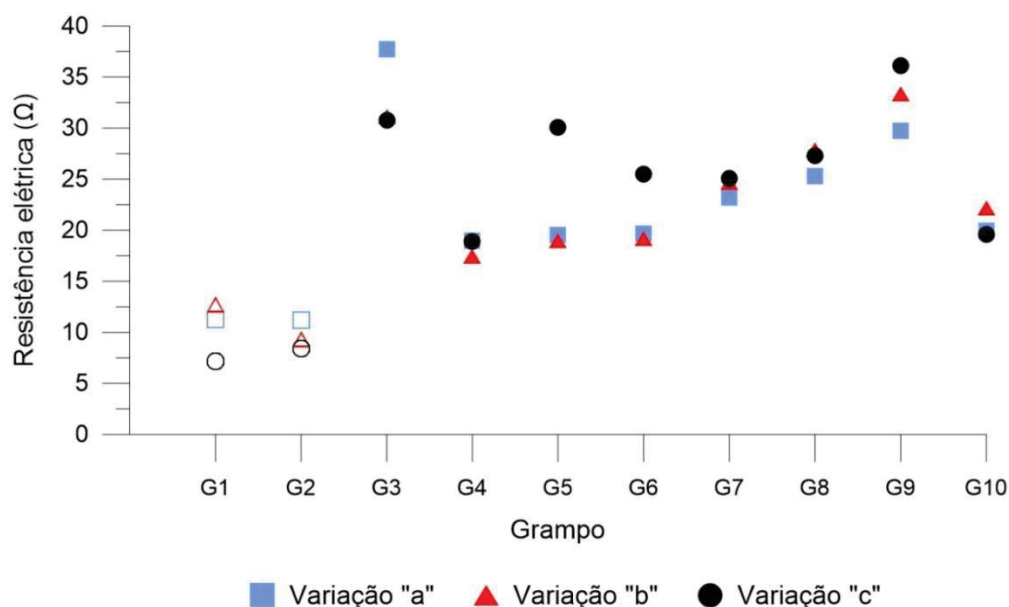
Cordoalha do T7c	Resistência elétrica (Ω)	Média dos fios (Ω)	Relação entre resultados
1	3,29	3,33	1,22%
2	3,26	3,28	0,61%
3	3,26	-	-
4	3,35	3,39	1,19%
5	3,22	-	-
6	3,25	3,22	-0,92%
Média	3,26	3,30	1,23%

O resultado obtido com o ensaio na cordoalha inteira foi muito próximo à média obtida de todos os fios da mesma cordoalha, com variação abaixo de 2%, o que indica não ser necessário realizar o ensaio de forma tão minuciosa.

4.2.2.2. Grampos

Os valores de resistência elétrica obtidos nos ensaios realizados nos grampos são apresentados Figura 4.58.

Figura 4.58 – Resultados dos ensaios de resistência elétrica nos grampos



A análise estatística dos valores de resistência elétrica obtido nos grampos é apresentada na Tabela 4.31.

Tabela 4.31 – Resultados de resistência elétrica nos grampos

Grupo	Descrição	Resistência elétrica (Ω)			Média	Desvio Padrão	Coef. Var.
		a	b	c			
G1	12 m sem reinjeção	11,24	12,74	7,18	10,38	2,35	22,63%
G2	12 m com reinjeção	11,22	9,33	8,43	9,66	1,16	12,05%
G3	6 m sem reinjeção	37,72	31,13	30,6	33,15	3,24	9,78%
G4	6 m com reinjeção	19,00	17,46	18,93	18,47	0,71	3,87%
G5	6 m com emenda	19,52	18,96	30,07	22,85	5,11	22,36%
G6	6 m enterrado no final (1 m)	19,65	19,18	25,51	21,45	2,88	13,45%
G7	6 m com falha no meio (10 cm)	23,21	24,63	25,07	24,30	0,85	3,52%
G8	6 m com falha no meio (50 cm)	25,28	27,84	27,29	26,80	1,12	4,17%
G9	6 m com falha no meio (100 cm)	29,74	33,38	36,10	33,07	2,62	7,91%
G10	6 m com furo maior que a barra (1 m)	19,94	22,19	19,56	20,57	1,16	5,66%

Os elementos que apresentaram maior variação foram o G1 e o G5, com valores acima de 20% que, segundo Pimentel Gomes (2000), indicam baixa precisão. As demais variações, com exceção do G2 e G6, apresentaram valores abaixo de 10%, que indica boa precisão dos dados.

Observa-se que os grampos de 12 m (G1 e G2) resultaram em menor valor de resistência elétrica quando comparados com os de 6 m (G3 a G10), isto porque a resistência elétrica é inversamente proporcional ao comprimento. Elementos íntegros com reinjeção (G2 e G4) tiveram menor coeficiente de variação quando comparados com os sem reinjeção (G1 e G3).

Os elementos com falhas no meio das barras (G7, G8 e G9) apresentaram resultados de resistência elétrica crescentes, o que era esperado, por terem um comprimento de calda de cimento menor. A diferença foi mais significativa nos grampos com falha de 1,0 m de ar, que apresentaram valores semelhantes aos grampos G3, executados sem reinjeção. Tal fato indica que grampos sem reinjeção podem estar associados a valores maiores de resistência quando comparados com barras com reinjeção.

As variações dos grampos de 6 m G5 (posicionamento das emendas), G6 (1 m cravado no solo) e G10 (1 m a mais de calda de cimento) apresentaram valores bem próximos da barra íntegra (G4), o que indica que o método não detectou tais variações. A exceção é o grampo G5c, que apresentou um valor de resistência bem acima da média.

Também foram realizados ensaios após períodos chuvosos, porém não foi identificada nenhuma diferença nos resultados quando comparado com períodos secos.

Além disso, por este ensaio ser comparativo, não é possível apontar qual o comprimento do elemento e o posicionamento de anomalias, mas indica qual tem a maior possibilidade apresentar anomalias quando comparado com os demais.

Cheung e Lo (2005) utilizaram três vezes o valor do desvio padrão para mais ou para menor, como valor de referência, e Lee e OAP (2007) utilizaram duas vezes o desvio padrão. Para os grampos de 12 m, não foi possível avaliar através da média e do desvio padrão devido à baixa amostra de dados, sendo apenas 3 valores referentes às barras íntegras (G2).

Para os grampos de 6 m, foram realizadas 3 análises. As análises 1 e 2 consideraram somente a média das barras íntegras (G4, G5 e G10). Os valores de referência para os valores de resistência elétrica foram a média com 2 ou 3 vezes o desvio padrão, para mais ou para menos. Como o grampo G5c apresentou um valor muito acima da média, foi realizada uma análise considerando o valor do grampo G5c (análise 1) e outra sem o valor do G5c (análise 2) para o cálculo do desvio padrão. A análise 3

considerou todos os elementos de 6 m (G3 a G10), com ou sem falha. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.32.

Tabela 4.32 – Análise da variação dos resultados de resistência elétrica nos grampos

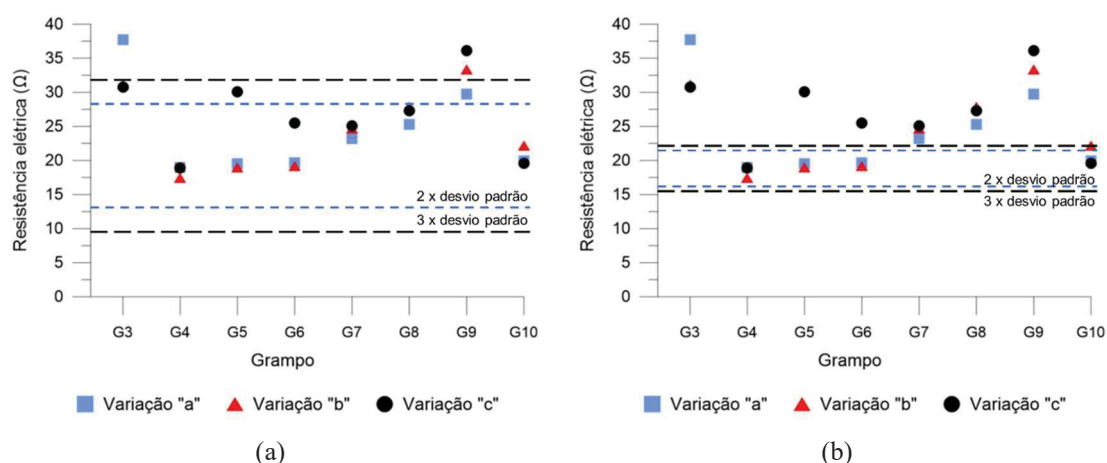
Análise	Média (Ω)	Desvio padrão (Ω)	Intervalo de referência (Ω)			
			2 x desvio padrão		3 x desvio padrão	
Com G5c	20,63	3,75	13,12	28,13	9,36	31,89
Sem G5c	19,45	1,33	16,78	22,11	15,44	23,45
Todos 6 m	25,09	5,94	13,20	36,98	7,25	42,92

Na análise 1, em que foi considerado o valor obtido pelo grampo G5c, o desvio padrão foi maior que na análise 2, uma vez que a quantidade de elementos avaliadas é pequena e um valor alto interfere no desvio padrão. Do mesmo modo, a variação entre 2 e 3 vezes o desvio padrão também é mais alta, e pode influenciar mais nos resultados. Por outro lado, a análise 2, realizada não considerando o valor de G5c, apresentou um intervalo bem inferior de referência. Cabe salientar que a quantidade da amostra é pequena, e esta análise visa somente identificar limitações do uso dos valores do desvio padrão.

A análise 3, que considerou todos os elementos de 6 m íntegros, apresentou um intervalo de referência muito maior quando comparado com as demais análises, justamente devido à grande dispersão dos dados, resultando em um alto valor de desvio padrão. Esta análise não é representativa, uma vez que se sabe da existência de falhas.

A representação gráfica das análises 1 e 2 são apresentadas na Figura 4.59.

Figura 4.59 – Análise da integridade dos grampos pelo desvio padrão



LEGENDA: (a) Análise 1: com valor de G5c, e (b) Análise 2: sem valor de G5c.

É possível observar grande diferença entre as análises realizadas, o que indica a necessidade da maior quantidade possível de dados para uma análise mais realista.

Conhecendo as características das barras e as falhas simuladas, entende-se que a melhor análise foi sem considerar o valor do G5c (análise 2), apresentada na Figura 4.59b. Esta análise indicou que todos os grampos da variação G3, G7, G8 e G9, além do G5c, e G6c, apresentam alguma falha ou anomalia, o que na maioria do caso realmente ocorre. A utilização de 2 ou 3 vezes o desvio padrão não ocasionou muita variação nos resultados devido ao baixo valor do desvio padrão.

A análise 1, realizada considerando o G5c, apresentou grandes intervalos e não permitiu que as barras com falhas fossem identificadas através do intervalo de referência. Somente os grampos da variação G3, G9 e o G5c que estariam fora dos valores de referência, considerando a média mais 2 vezes o desvio padrão.

Esta análise indica a necessidade de uma análise crítica dos dados para cada caso. Quanto maior a quantidade de barras ensaiadas, menor a chance de erros.

A. Análise do volume de injeção e reinjeção

De acordo com Cheung e Lo (2005) e Lee e OAP (2007), a resistência elétrica da calda de cimento é o material que gera maior influência nos resultados. Por isso, foi realizada uma análise comparativa entre os resultados de resistência elétrica com a quantidade de cimento injetada nos grampos durante a construção, que é apresentada na Tabela 4.33. A observação “não rompeu” indica que nenhuma bainha do tubo de reinjeção estourou, e por isso não houve reinjeção.

Tabela 4.33 – Comparação dos resultados de resistência elétrica com a injeção da calda de cimento

Elemento	Sacos de cimento			Observação	Resistência elétrica (Ω)
	Injeção	Reinjeção	Total		
G1a	4	0	4	Sem reinjeção	11,24
G1b	3	0	3		12,74
G1c	3	0	3		7,18
G2a	4	1	5	Não rompeu	11,22
G2b	3	1	4		9,33
G2c	4	0	4		8,43
G3a	2	0	2	Sem reinjeção	37,72
G3b	2	0	2		31,13
G3c	2	0	2		30,77
G4a	2	1	3		19,00
G4b	1,5	1,5	3		17,46
G4c	3	0,5	3,5		18,93
G5a	2	4	6	Não rompeu	19,52
G5b	2	0	2		18,96
G5c	2	1	3		Estourou na boca 30,07
G6a	1,5	0,5	2		19,65
G6b	2	0,5	2,5		19,18
G6c	2	0,5	2,5		25,51
G7a	2	1	3		23,21
G7b	2	1,5	3,5		24,63
G7c	2	2	4		25,07
G8a	2	2,5	4,5		25,28
G8b	2	0,5	2,5		27,84
G8c	2	1	3		27,29
G9a	2	3	5		29,74
G9b	2	1,5	3,5		33,38
G9c	2	1	3		36,10
G10a	2	1	3	Não rompeu	19,94
G10b	2	1,5	3,5		22,19
G10c	2	0	2		19,56

Os valores de resistência elétrica foram comparados com a quantidade de sacos de cimento utilizados para cada grampo durante a etapa de injeção e reinjeção, porém não foi obtida nenhuma correlação direta entre eles. No entanto, alguns pontos podem ser observados. De modo geral, os grampos com reinjeção (G2 e G4), apresentaram valores inferiores aos grampos sem reinjeção (G1 e G3).

Nos grampos G2c, G5b, e G10c não houve reinjeção, pois os cortes na mangueira de injeção não “estouraram” com a pressão da injeção, o que indica que o furo estava bem preenchido com a calda de cimento da bainha. Também apresentaram menores valores de resistência elétrica quando comparados com os resultados da mesma variação, indicando menor probabilidade de falhas.

B. Análise comparativa com a resistividade elétrica dos CPs

Durante a execução do campo experimental foram moldados corpos de prova com a calda de cimento utilizada na execução dos grampos. Estes foram mantidos em câmara seca e analisados ao longo do tempo. De modo a obter alguma correlação com os ensaios de campo, os resultados foram compilados na Tabela 4.34.

Cabe salientar que não foram moldados corpos de prova de todas as variações devido a dificuldade de moldagem, armazenamento e transporte dos CPs, além do ritmo da obra. Desse modo, foram mantidos somente os resultados dos CPs que tinham dados de resistividade para a mesma variação do grampo. Para os corpos de prova que foram moldados com a calda de cimento de reinjeção, estes valores de resistividade também foram comparados.

Tabela 4.34 – Comparativo entre resistividade elétrica dos CPS e resultados de resistência elétrica

CPs	Resistividade média ($\Omega \cdot m$)								Resistência elétrica (Ω)
	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	112 dias	140 dias	364 dias	588 dias	
G4a	13,74	15,92	28,28	31,02	44,30	53,58	187,66	628,43	19,00
RG4a	14,22	19,06	25,26	31,31	55,38	71,48	171,13	420,43	
G4b	13,49	15,78	26,81	31,21	46,56	55,54	202,19	838,67	17,46
G4c	14,33	17,43	28,19	32,51	56,09	71,90	279,92	1033,83	18,93
G6a	15,65	18,22	30,75	35,48	56,55	71,55	209,12	549,77	19,65
RG6a	14,39	19,35	27,84	34,31	60,09	74,12	258,20	827,10	
G6b	16,09	18,79	34,31	37,83	66,48	82,25	256,57	639,13	19,18
G9a	11,83	21,91	29,47	38,85	76,36	99,11	312,30	1060,00	29,74
G9b	13,99	20,34	26,98	35,84	64,95	76,51	244,17	901,13	33,38
G9c	14,33	20,82	28,11	40,44	73,81	91,51	316,07	942,73	36,10
G10a	8,84	14,16	19,77	26,54	43,52	54,29	209,47	525,53	19,94
G10b	10,83	16,06	20,82	28,25	43,21	52,32	213,03	615,13	22,19
G10c	12,38	18,22	24,25	33,18	53,12	70,69	248,38	728,87	19,56

Para todas as variações avaliadas não foi possível obter alguma relação entre os valores obtidos em laboratório e os valores obtidos em campo. Como a resistência elétrica dos grampos leva em consideração não somente a calda de cimento, mas também a resistividade elétrica da barra e do solo ao redor, os resultados de campo são influenciados por diversas variáveis. Para a variação G9, por exemplo, que consiste em uma falha de 1 m, os resultados de laboratório não são representativos, uma vez que a presença de ar também afeta os resultados.

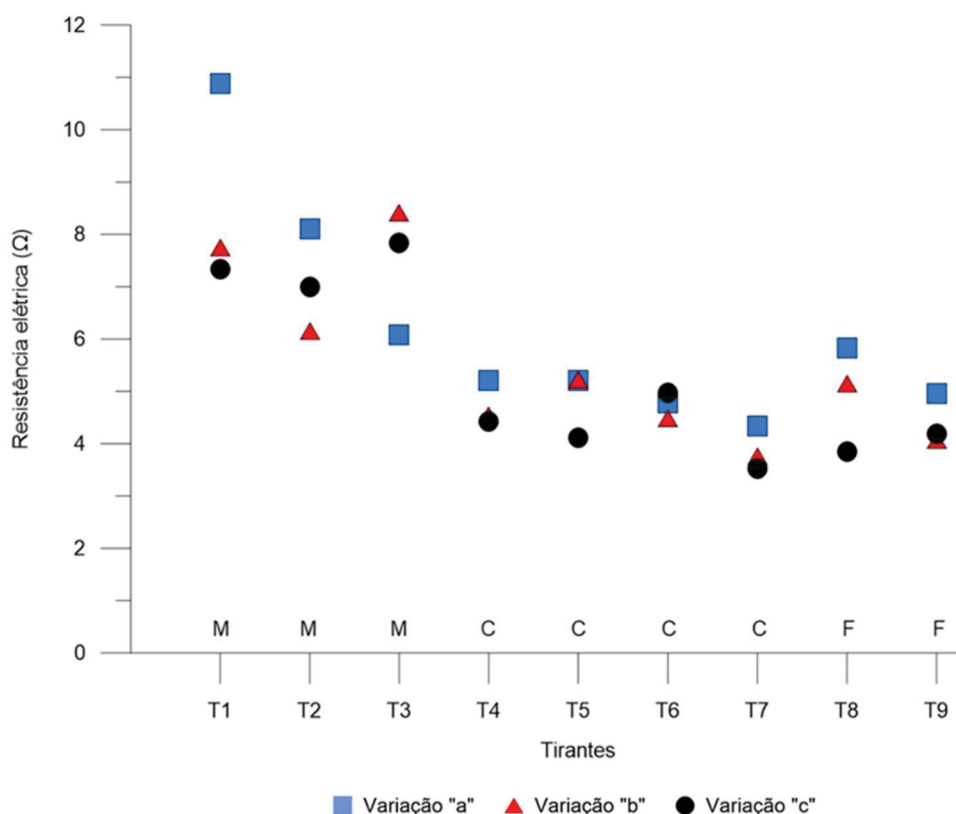
Os ensaios de laboratório permitiram observar que a calda de cimento em uma condição com umidade e temperatura constante, tende a aumentar o seu valor de

resistividade elétrica devido a perda de água e hidratação do cimento. Em campo, foram realizados ensaios em épocas diferentes (seca e chuva), com grande intervalo de tempo, e não foi observada nenhuma alteração significativa dos resultados. Isso indica que a resistividade elétrica da calda de cimento gera pouca influencia nos resultados do método da resistência elétrica e/ou a resistividade elétrica da calda tende a não variar muito com o tempo devido a umidade do solo ao seu redor.

4.2.2.3. Tirantes

A variação das médias dos tirantes é apresentada na Figura 4.60, onde a letra M representa tirantes de monobarra, a letra C representa os tirantes de cordoalha e a letra F os tirantes de fio. Cabe salientar que para os tirantes de cordoalha e fio foram realizados ensaios em todas as cordoalhas e fios de cada tirante. A variação da resistência elétrica entre cordoalhas e fios de um mesmo tirante foram inferiores a 1%, e por isso, os valores demonstrados consistem na média das 6 cordoalhas ou fios do tirante.

Figura 4.60 – Resultados dos ensaios de resistência elétrica nos tirantes



Os dados de resistência elétrica para cada tirante são apresentados na Tabela 4.35.

Tabela 4.35 – Resultados de resistência elétrica nos tirantes

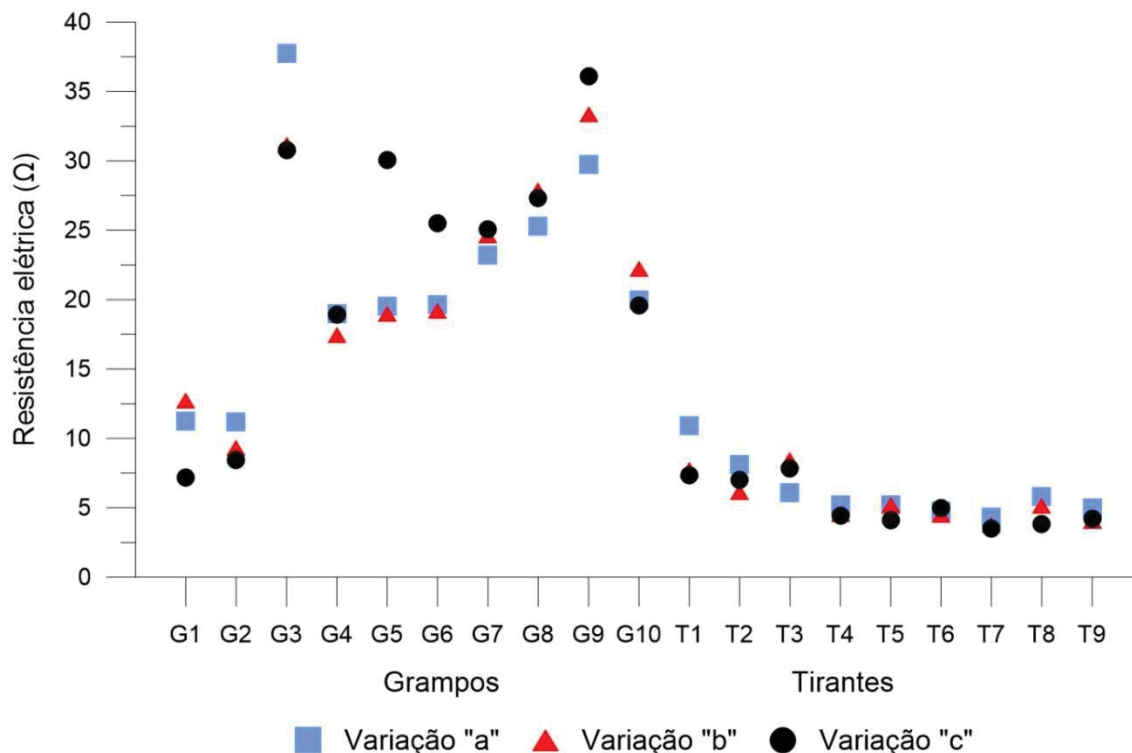
Tirante	Descrição	Resistência elétrica (Ω)			Média	Desvio Padrão	Coef. Var.
		Variação					
		a	b	c			
T1	Monobarra íntegro Tipo 1	10,89	7,75	7,33	8,66	1,94	22,44%
T2	Monobarra íntegro Tipo 2	8,11	6,15	7,00	7,09	0,98	13,84%
T3	Monobarra com redução de seção	6,07	8,42	7,84	7,45	1,22	16,42%
T4	Cordoalha íntegro Tipo 1	5,20	4,54	4,42	4,72	0,42	8,93%
T5	Cordoalha com falha no início do furo	5,21	5,22	4,11	4,85	0,64	13,11%
T6	Cordoalha com falha no meio do furo	4,78	4,49	4,97	4,75	0,24	5,07%
T7	Cordoalha com cortes próximos à cabeça	4,33	3,76	3,52	3,87	0,42	10,78%
T8	Fio íntegro Tipo 1	5,82	5,14	3,84	4,94	1,01	20,40%
T9	Fio com falha no início do furo	4,96	4,07	4,19	4,41	0,48	10,87%

A quantidade de calda de cimento injetada nos tirantes não apresentou nenhuma correlação com os resultados de resistência elétrica, provavelmente por se tratar de elementos longos, e com trecho livre e ancorado.

4.2.2.4. *Resumo dos resultados dos grampos e tirantes*

Para avaliar a faixa de valores de resistência que seria esperada para cada elemento, independentemente de sua patologia, a Figura 4.61 mostra todos os resultados obtidos. É possível perceber grande dispersão entre barras de tamanhos diferentes: os grampos de 6 m apresentaram valores de resistência elétrica entre 18 Ω e 35 Ω , as barras de 12 m entre 8 Ω e 12 Ω ; os tirantes de monobarra entre 6 Ω e 12 Ω e os tirantes de cordoalha e de fio entre 3 Ω e 6 Ω .

Figura 4.61 – Comparação de resistência elétrica entre grampos e tirantes



A maior dispersão dos valores ocorreu com os grampos de 6 m, o que pode ser associado às variações realizadas em campo. Os tirantes de 18 m e os grampos de 12 m apresentaram valores próximos, resultado esse que pode ser associado à presença de trecho livre nos tirantes, onde 12 m da barra não está envolta com calda de cimento, e sim com ar. Isso faz com que o aumento do comprimento da barra não seja proporcional à redução dos valores de resistência elétrica, uma vez que somente 6 m dos tirantes estão preenchidos com calda de cimento (trecho ancorado).

Desse modo, recomenda-se que seja realizada a comparação somente entre resultados de elementos de uma mesma contenção e com a mesma configuração, ou seja, entre grampos ou entre tirantes. Da mesma maneira que ocorre entre tirantes compostos por barras diferentes (monobarra, cordoalha e fio), percebeu-se que nas monobarras os valores de resistência elétrica foram superiores se comparados com os demais tirantes, mesmo com o comprimento de trecho livre e trecho ancorado igual. Porém, quando comparados entre si apresentaram valores próximos e coerentes.

Com base nos resultados obtidos foi possível concluir que essa técnica de ensaio representa potencial para obtenção de resultados qualitativos no que diz respeito à comparação de elementos de mesma configuração. Além disso, seu procedimento

executivo é simples e a variação do posicionamento dos eletrodos não influenciou nos resultados finais de resistência elétrica.

Sugere-se realizar leituras em seções paralelas e na direção das barras, além de intercalar entre elementos. As variações de posicionamento também devem ser avaliadas. Para barras de mesmo comprimento, a ocorrência de falhas na calda de cimento ao longo do furo, faz com que os valores de resistência elétrica aumentem. Cabe salientar que a comparação dos resultados deve ocorrer sempre em um mesmo lugar, pois as condições da calda de cimento e do solo variam em obras distintas.

4.2.3. Comparativo entre TDR e resistência elétrica

Este item visa comparar os resultados obtidos com o método TDR e os dados de resistência elétrica obtidos nos grampos e tirantes do campo experimental.

4.2.3.1. Grampos

Para análise comparativa entre os métodos, os dados do TDR e do ensaio de resistência elétrica foram compilados na Tabela 4.36.

Em relação às variações G1 e G3, quando comparado com os grampos com reinjeção (G2 e G4), os grampos apresentaram resistência elétrica maior, o que pode indicar a presença de vazios. No ensaio TDR, as variações sem reinjeção também apresentaram menor tempo de retorno e maior velocidade de propagação, que também pode representar a presença de ar. O grampo G1c, que foi o que teve o menor valor de resistência elétrica, também teve uma velocidade de propagação menor no TDR quando comparado com os demais da mesma variação, e semelhante aos grampos G2. Provavelmente este elemento apresenta melhor preenchimento do furo comparado com os demais grampos G1. Do mesmo modo, o grampo G2a que apresentou a maior resistência elétrica entre os grampos da variação, também foi o que teve a maior velocidade no ensaio TDR. Além disso, o gráfico do G2a apresenta uma pequena reflexão no meio da curva, o que pode indicar a localização de uma falha (Figura 4.22). Apesar de apresentar uma variação entre os grampos com e sem reinjeção de 12 m, esta foi pequena quando comparado com as barras de 6 m. Provavelmente também, que pelo tamanho da barra, as variações da resistência elétrica devido a falhas sejam menores.

Tabela 4.36 – Comparativo entre o método TDR e o método da resistência elétrica nos grampos

Grupo	TDR		Resistência elétrica		
	Tempo total (ns)	$V_{calda}/V_{vácuo}$	Média	Leitura (Ω)	Média (Ω)
G1a	140,25	0,283		11,24	
G1b	137,67	0,287	0,281	12,74	10,38
G1c	144,73	0,274		7,18	
G2a	141,22	0,280		11,22	
G2b	145,95	0,270	0,276	9,33	9,66
G2c	141,83	0,279		8,43	
G3a	64,97	0,300		37,72	
G3b	68,90	0,282	0,290	31,13	33,15
G3c	67,35	0,288		30,77	
G4a	71,55	0,272		19,00	
G4b	69,73	0,279	0,281	17,46	18,47
G4c	66,68	0,293		18,93	
G5a	69,83	0,278		19,52	
G5b	72,06	0,268	0,780	18,96	22,85
G5c	67,53	0,288		30,07	
G6a	64,90	0,302		19,65	
G6b	67,10	0,290	0,293	19,18	21,45
G6c	67,93	0,288		25,51	
G7a	73,46	0,263		23,21	
G7b	74,79	0,257	0,261	24,63	24,30
G7c	72,93	0,264		25,07	
G8a	71,97	0,255		25,28	
G8b	65,12	0,280	0,268	27,84	26,80
G8c	67,65	0,269		27,29	
G9a	69,63	0,242		29,74	
G9b	68,68	0,249	0,249	33,38	33,07
G9c	67,05	0,257		36,10	
G10a	69,76	0,281		19,94	
G10b	68,39	0,284	0,283	22,19	20,57
G10c	68,72	0,283		19,56	

As barras G3 sem reinjeção, apresentaram uma variação média de 15 Ω a mais de resistência elétrica das barras G4 com reinjeção. As velocidades mais altas obtidas pelo método TDR também indicam que a variação G3 provavelmente apresenta falhas devido a não reinjeção. O grupo G3a, que apresentou a maior resistência elétrica dos ensaios,

também apresentou uma velocidade mais elevada que a média da variação, o que comprova a presença de falhas. Comparando os valores das barras G3 com as barras G9, que apresentam 1 m de falha com ar, a resistência elétrica é semelhante. Estima-se que ao longo da barra possa haver vazios com dimensões de até 1 m, porém espaçados ao longo da barra com menos de 50 cm, uma vez que há reflexões nas curvas, porém nenhuma reflexão significativa. A variação G4 apresentou valores de resistência elétrica com pequena variação entre si, da mesma maneira como a velocidade nos ensaios TDR. O elemento G4c que apresentou uma velocidade um pouco maior que os demais, não apresentou variação no valor de resistência.

Em relação ao elemento G5, que possui variação da posição da emenda, somente o G5c que apresentou um valor mais alto que os demais grampos, com resistência elétrica de 30 Ω , próxima à obtida pelos grampos G3 sem reinjeção. A velocidade de propagação para esse grampo também foi mais alta, bem próxima a média dos grampos G3. Estes resultados indicam que este grampo pode apresentar falhas inferiores a 50 cm, apesar de não haver nenhuma reflexão significativa nos gráficos deste elemento. Além disso, o elemento G5c teve a reinjeção “estourada” no primeiro corte mais próximo da extremidade do furo e extravasou calda de cimento pela boca. Tal fato indica que possa haver uma falha com ar no início do furo.

Dos grampos da variação G6, que tem o 1 m final da barra cravados no solo, somente o G6c que apresentou uma resistência superior ao demais, o que não é refletido com a velocidade obtida no TDR. Pelo contrário, o grampo G6a que apresentou maior valor de velocidade, e que também apresenta uma pequena reflexão nos gráficos, teve um resultado de resistência elétrica semelhante aos grampos íntegros (G4). Como esta variação tem a interferência do solo no final da barra, e não é possível determinar exatamente qual tipo de solo cada barra está em contato e a sua resistividade elétrica, os resultados para variação G6 foram inconclusivos.

Em relação aos grampos com falhas com ar (G7, G8 e G9), os valores de resistência elétrica apresentam um aumento relacionado ao aumento do vazio. Para a variação G7, com falha de 10 cm de ar, as falhas não foram observadas graficamente, porém os resultados de resistência elétrica indicam um aumento de aproximadamente 5,8 Ω quando comparadas com a média dos resultados dos grampos íntegros (G4). Para as barras G8 e G9, com 50 cm e 100 cm de ar, o acréscimo foi de 8,3 Ω e de 14,6 Ω , respectivamente. Este resultado indica como as falhas podem ser identificadas pelo

método da resistência elétrica, e que quanto mais o tamanho do vazio, maior é a diferença da resistência quando comparada com uma barra íntegra.

Os grampos da variação G10, que apresentam o furo maior que a barra apresentou valores bem próximos. O grampo G10b, que apresentou uma resistência elétrica um pouco maior que a média, não apresentou diferença em relação à velocidade de propagação obtida pelo método TDR.

A comparação entre as diferentes metodologias é uma maneira de verificar e/ou confirmar possíveis anomalias que podem ocorrer em obras reais. Foi possível perceber que, de modo geral, os dois métodos apresentaram conclusões semelhantes quando comparados, e podem ser utilizados complementarmente. Cabe salientar que a maioria dos autores testaram seus métodos em barras pré-moldadas, que não refletem a realidade de campo. Na execução da obra foi possível perceber que não existe uma quantidade fixa de calda de cimento utilizada na injeção e reinjeção em furos de mesmo diâmetro e comprimento, pois cada um apresentam solos e condições diferentes. E estas condições de campo que acabam gerando as variações observadas nos resultados.

4.2.3.2. *Tirantes*

Os resultados obtidos nos tirantes nos ensaios TDR e método da resistência elétrica também foram comparados, e a apresenta o resumo de ambos os ensaios.

O trecho livre dos tirantes não está em contato com a calda de cimento, pois tem um tubo de PVC que separa da calda de cimento. Desse modo, os resultados de resistência elétrica foram comparados com os valores obtidos para o trecho ancorado dos tirantes, ou seja, o trecho que está em contato com a calda de cimento.

Tabela 4.37 – Comparativo entre o método TDR e o método da resistência elétrica nos tirantes

Variação	TDR		Resistência elétrica	
	$V_{\text{calda}}/V_{\text{v\u00e1cuo}}$	M\u00e9dia	Leitura (Ω)	M\u00e9dia (Ω)
T1a	0,287		10,89	
T1b	0,266	0,278	7,75	8,66
T1c	0,280		7,33	
T2a	0,325		8,11	
T2b	0,232	0,260	6,15	7,09
T2c	0,223		7,00	
T3a	0,278		6,07	
T3b	0,285	0,279	8,42	7,45
T3c	0,273		7,84	
T4a-5	0,176		5,20	
T4b-5	0,167	0,162	4,54	4,72
T4c-1	0,145		4,42	
T5a-6	0,177		5,21	
T5b-3	0,167	0,161	5,22	4,85
T5c-5	0,141		4,11	
T6a-5	0,125		4,78	
T6b-6	0,137	0,126	4,49	4,75
T6c-4	0,117		4,97	
T7a-3	0,159		4,33	
T7b-2	0,175	0,170	3,76	3,87
T7c-4	0,175		3,52	
T8a-3	0,202		5,82	
T8b-2	0,160	0,199	5,14	4,94
T8c-1	0,236		3,84	
T9a-3	0,227		4,96	
T9b-4	0,158	0,190	4,07	4,41
T9c-5	0,186		4,19	

Para a varia\u00e7\u00e3o T1, que consiste nos tirantes monobarras \u00edntegros Tipo 1, o tirante T1a que apresentou uma resist\u00eancia el\u00e9trica bem acima dos demais, bem como a maior velocidade no trecho ancorado da barra. Desse modo, o resultado da resist\u00eancia el\u00e9trica pode indicar a presen\u00e7a de vazios ao longo do trecho ancorado.

O tirante T2a, da varia\u00e7\u00e3o com tirante monobarra Tipo 2, que apresentou maior valor de resist\u00eancia el\u00e9trica, e tamb\u00e9m maior velocidade de propaga\u00e7\u00e3o. No entanto, o valor variou pouco da m\u00e9dia, o que n\u00e3o permite indicar que existe uma falha.

A variação T3, que tem redução de seção em tirante monobarra, apresentou uma média semelhante ao T2. A variação T3b, que apresenta maior resistência elétrica, também tem a maior velocidade de propagação no trecho ancorado. Esta correlação acontece para todas as variações avaliadas de monobarra.

Para os tirantes T4, que são cordoalha do Tipo 1, o elemento T4a que apresentou maior resistência elétrica, e que também corresponde ao tirante da variação com maior velocidade de propagação na calda de cimento.

A variação T5, que são tirantes de cordoalha com falha no início, apresentam o tirante T5a e T5b com praticamente a mesma resistência elétrica, porém as velocidades no ensaio TDR são diferentes. Isto indica que a velocidade pode apresentar uma tendência, porém não uma regra.

Os tirantes T6, que apresentam falha com ar no início apresentam velocidades do TDR e resistências elétricas bem próximas, com pouca variação. Estes tirantes apresentaram a reflexão entre o trecho livre e ancorado bem atenuada devido a simulação da falha, o que pode ter contribuído para a velocidade inferior dos demais no trecho ancorado.

Para a variação T7, que consiste em cortes dos tirantes de cordoalha, foi a variação com a menor média de resistência elétrica, e a velocidade no trecho ancorado foi superior às demais variações. Não é possível afirmar que a simulação dos cortes nas cordoalhas pode ter afetado os resultados. Neste caso, o tirante T7a, que apresentou a maior resistência elétrica, foi o elemento com a menor velocidade no trecho ancorado, diferentemente do que aconteceu com os demais tirantes.

Em relação aos tirantes de fio nas variações T8 e T9, não foi possível estabelecer nenhuma correlação, uma vez que os gráficos apresentaram muita variação entre os fios de um mesmo tirante. No entanto, os valores obtidos de resistência apresentaram menores variações quando comparada com as velocidades obtidas no trecho ancorado.

4.3.RESULTADOS NAS OBRAS EXISTENTES

4.3.1. Solo grampeado

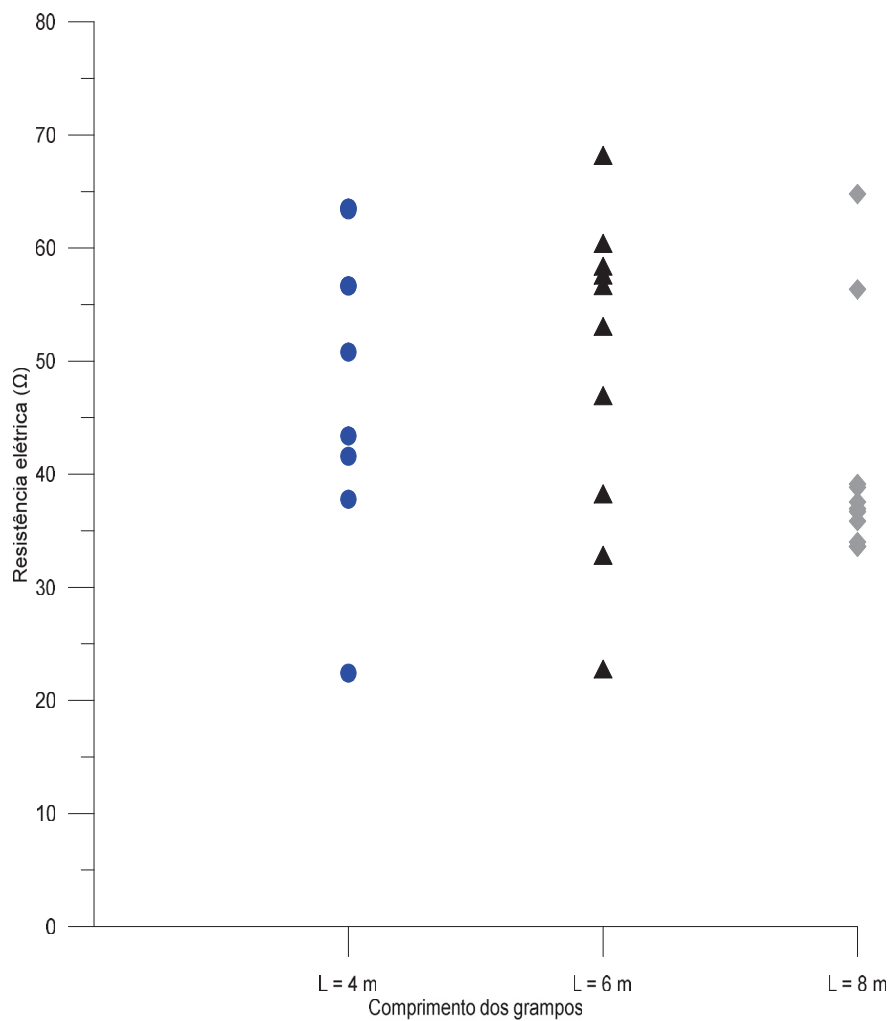
Os resultados obtidos nos ensaios de resistência elétrica no solo grampeado existente são apresentados na Tabela 4.38.

Tabela 4.38 – Resultados do ensaio de resistência elétrica no solo grampeado existente

Grampos L = 4 m		Grampos L = 6 m		Grampos L = 8 m	
Elemento	Resistência elétrica (Ω)	Elemento	Resistência elétrica (Ω)	Elemento	Resistência elétrica (Ω)
G52	22,4	G101	60,4	G201	56,3
G61	37,8	G104	47,0	G202	37,5
G64	43,4	G107	22,8	G204	39,1
G74	50,8	G114	32,8	G206	33,6
G76	56,7	G124	38,3	G207	35,9
G78	63,5	G164	58,4	G208	34,0
G84	41,6	G165	57,6	G211	64,8
G86	63,4	G166	56,7	G212	36,7
G87	56,6	G174	68,2	G213	37,0
G88	63,5	G175	53,1	G214	38,8
				G215	33,6
Média	49,97		49,52		40,67
Desvio Padrão	13,58		14,16		10,20
Coef. Variação	27,2%		28,6%		25,1%

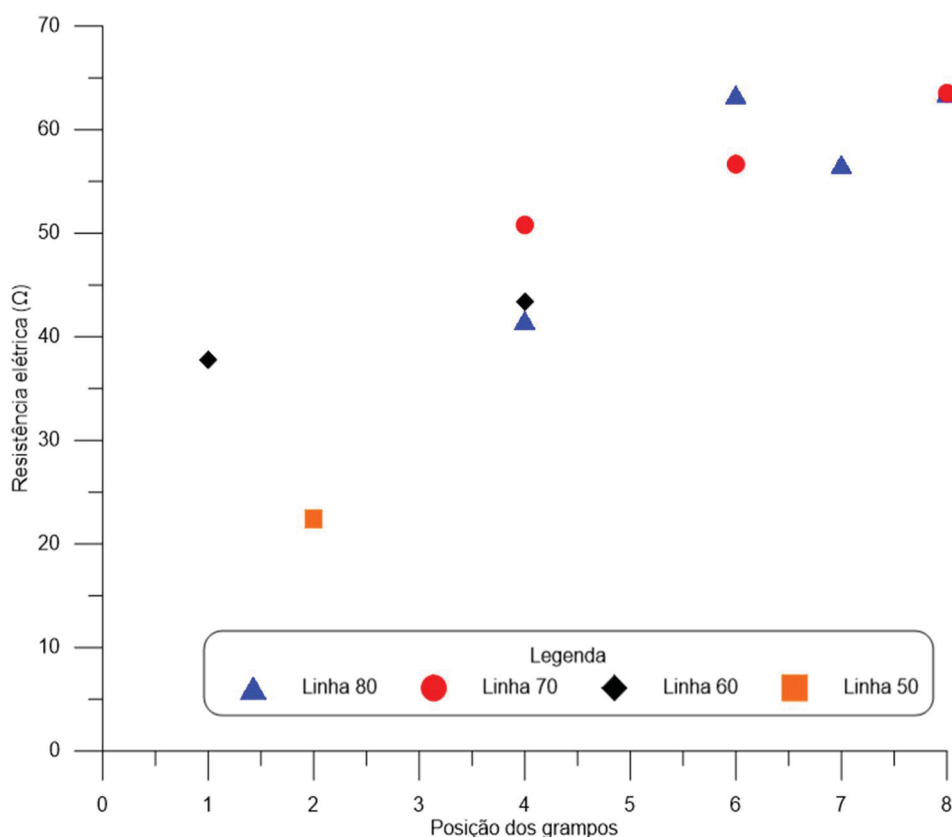
Os resultados de resistência elétrica apresentaram grande dispersão, com alto coeficiente de variação. Os resultados para os três diferentes comprimentos avaliados apresentaram uma mesma faixa de variação (entre 20 e 70 Ω), não sendo observada uma tendência dos valores. A representação gráfica para avaliação da dispersão dos resultados obtidos é apresentada na Figura 4.62.

Figura 4.62 – Dispersão dos resultados dos ensaios de resistência elétrica do solo grampeado existente



Para melhor análise dos resultados, os resultados foram avaliados separadamente em cada patamar. Os grampos do primeiro patamar, com comprimento de 4 m, são mostrados na Figura 4.63, representados graficamente conforme seu posicionamento na contenção.

Figura 4.63 – Resultados de resistência elétrica dos grampos de 4 m de comprimento

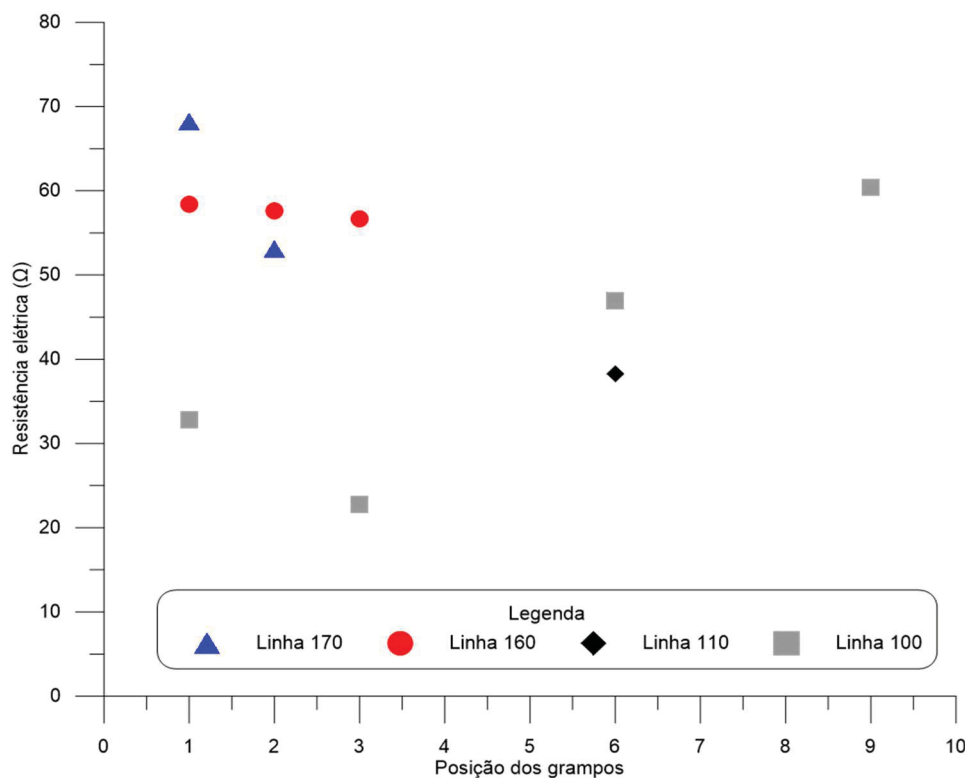


É possível perceber acréscimos nos valores de resistência elétrica em grampos mais próximos a escada hidráulica e uma tendência de crescimento da resistência elétrica em linhas de cotas maiores. Esta variação pode ser associada à heterogeneidade do solo local e umidade. Informações sobre sondagens realizadas na região na época da construção da obra foram avaliadas, porém o projeto apresenta apenas um perfil longitudinal ao talude, não permitindo identificar variações laterais.

Valores maiores de resistência elétrica podem indicar falhas na calda de cimento. Desse modo, mesmo com resultados bastante divergentes, os grampos com valores mais altos que a média deveriam ser melhor avaliados. Para esse patamar de grampos de 4 m, os grampos G61, G74 e G86 que apresentaram valores altos quando comparados com grampos próximos.

Os resultados obtidos no segundo patamar, com grampos de 6 m de comprimento, são apresentados na

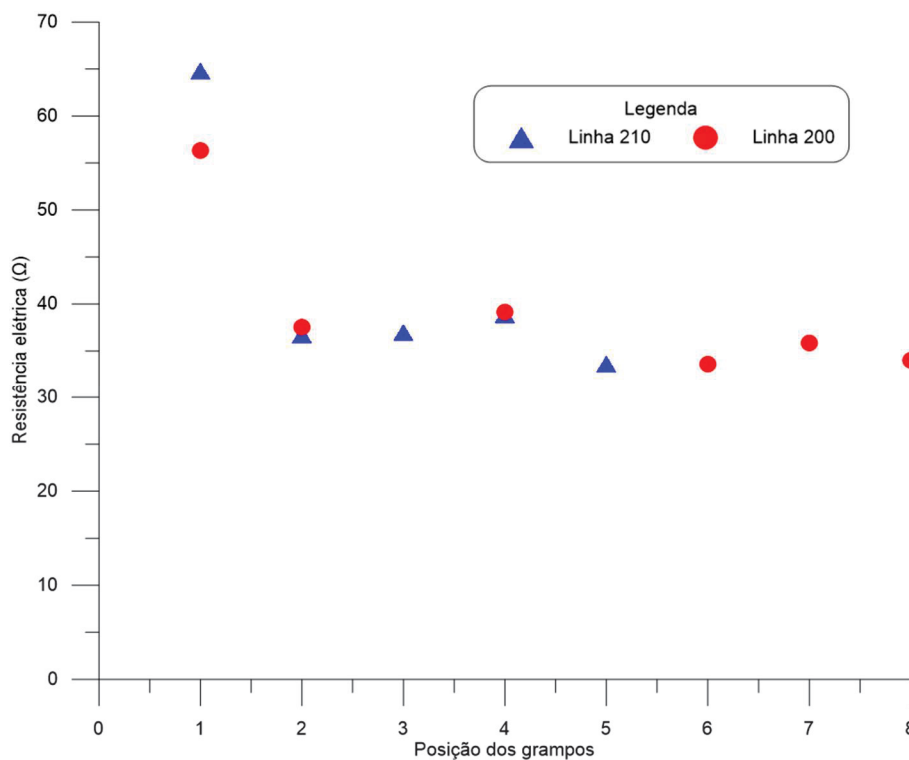
Figura 4.64 – Resultados de resistência elétrica dos grampos de 6 m de comprimento



Os grampos de 6 m que foram ensaiados próximos do terceiro patamar (linha 160 e 170) apresentaram resultados muito próximos, com exceção do elemento 171, cuja resistência elétrica medida ficou acima da média. Os grampos ensaiados próximos ao primeiro patamar, de 4 m, apresentaram uma maior variação de resistência elétrica e um comportamento crescente no sentido horizontal (lateral), muito semelhante com os resultados do primeiro patamar. Tal fato também pode ser associado à heterogeneidade lateral do solo. Para esse patamar com grampos de 6 m, novas análises poderiam ser realizadas no elemento G106, cuja resistência medida foi superior à de elementos próximos como por exemplo o G16. Os resultados dos demais elementos foi inconclusivo devido à fatores como: pequena amostragem e dificuldade em desrosquear as porcas de grampos mais próximos.

Por fim, os resultados do terceiro patamar, com grampos de 8 m, são apresentados na Figura 4.65.

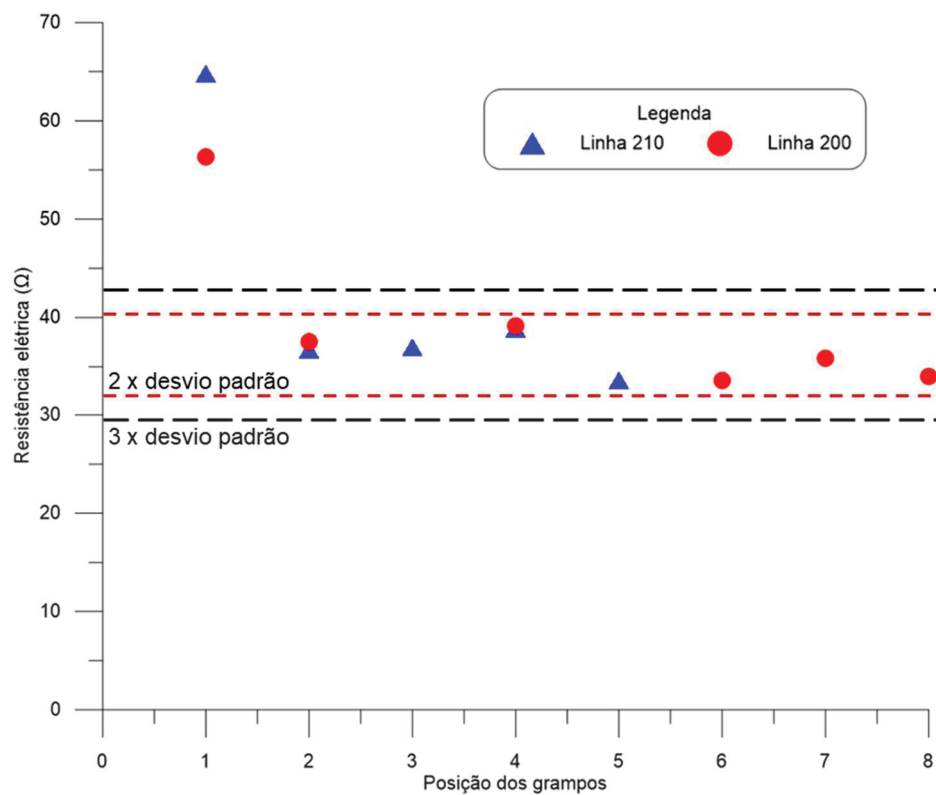
Figura 4.65 – Resultados de resistência elétrica dos grampos de 8 m de comprimento



Diferentemente dos demais patamares, os grampos de 8 m apresentaram resultados bem próximos, com exceção do G201 e G211, que apresentaram valores maiores que a média e, por esse motivo, poderiam ser analisados com outras técnicas. Os demais grampos apresentaram um valor médio de resistência elétrica de 36 Ω . Os resultados foram condizentes com Cheung e Lo (2005), que obteve 30 Ω para barras de 9,0 m, e 40 Ω para barras com 7,0 m de comprimento.

Para análise do intervalo de referência os valores mais divergentes não foram considerados (G201 e G211). Desse modo, a Figura 4.66 apresenta os intervalos de referência para ± 2 e 3 vezes o desvio padrão a partir da média.

Figura 4.66 – Intervalo de referência dos grampos de 8 m do solo grampeado existente

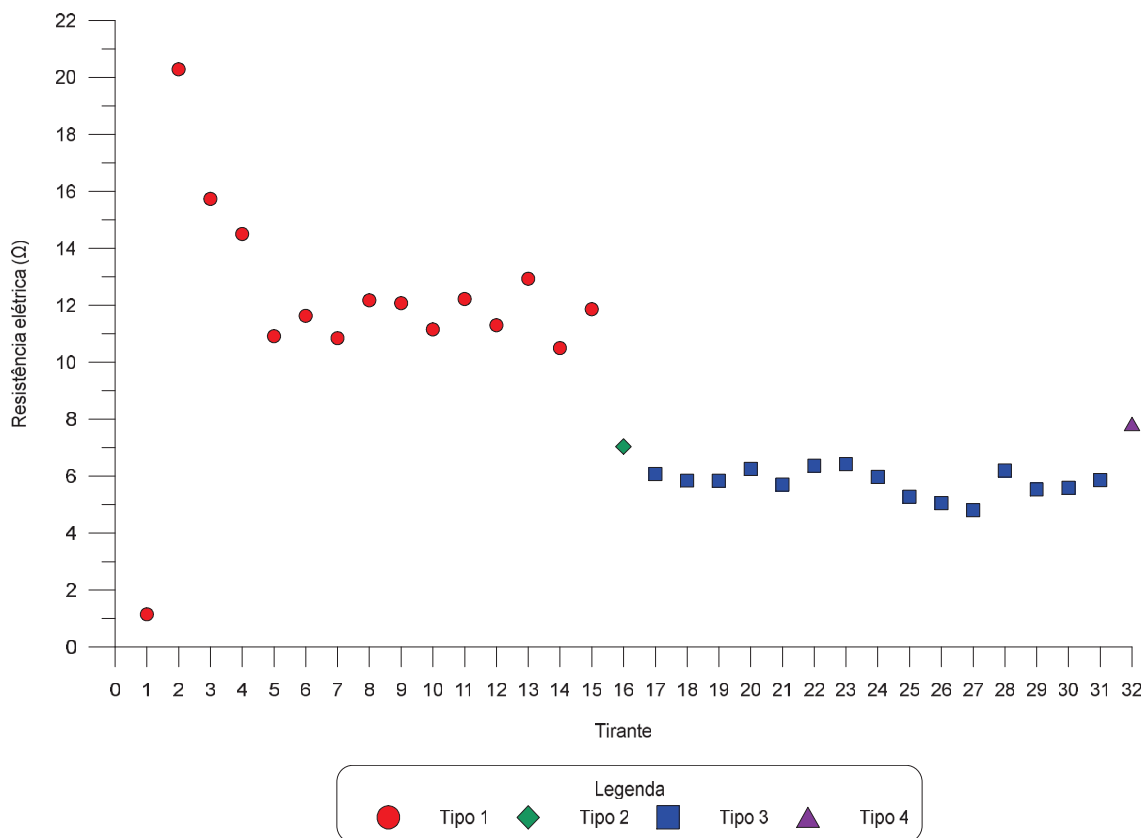


Foi possível perceber que todos os valores, com exceção dos grampos G201 e G211, se apresentaram dentro do limite de referência para este patamar.

4.3.2. Cortina atirantada

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência elétrica nos tirantes da cortina atirantada existente são apresentados na Figura 4.67.

Figura 4.67 – Resultados de resistência elétrica na cortina atirantada existente



Foi possível perceber que mesmo não sendo possível realizar o ensaio com uma seção transversal à cortina atirantada, os ensaios com seções longitudinais se apresentaram coerentes. Graficamente os tirantes do Tipo 1 apresentaram valores de resistência elétrica superior aos demais, provavelmente por ser o tirante de menor comprimento (24 m) e menor trecho ancorado (8 m). Além disso, o diâmetro das barras também é inferior (32 mm). Os tirantes tipo 3, por exemplo, apresentam comprimento de 28 m, com comprimento ancorado de 12 m e diâmetro de 50,17 mm.

Os tirantes Tipo 1 e Tipo 3 apresentaram um comportamento constante, com exceção de poucos valores abaixo ou acima da média, que poderiam ser escolhidos caso ensaios adicionais fossem programados para avaliação dessa estrutura. A análise dos intervalos de referência dos tirantes Tipo 1 e Tipo 3 são apresentadas na sequência.

Com relação aos tirantes Tipo 2 (T16) e Tipo 4 (T32) não foi possível estabelecer nenhum padrão de comportamento devido à falta de repetibilidade para essa configuração. Desse modo, estes tirantes não foram considerados nas análises dos tirantes Tipo 1 e 3, pois não estão localizados na mesma linha.

Os tirantes do Tipo 1 consistem em barras de 32 mm de diâmetro com 24 m de comprimento, sendo 15 m de trecho livre e 8 m de trecho ancorado. No total foram avaliados 15 tirantes com as mesmas características de projeto. Os resultados são apresentados na Tabela 4.39. Os resultados dos tirantes T1 e T2 apresentaram valores com grande variação, e não foram considerados na conta do intervalo de referência, ou seja, não foram utilizados para obtenção da média e desvio padrão. Por isso, estes constam riscado na tabela.

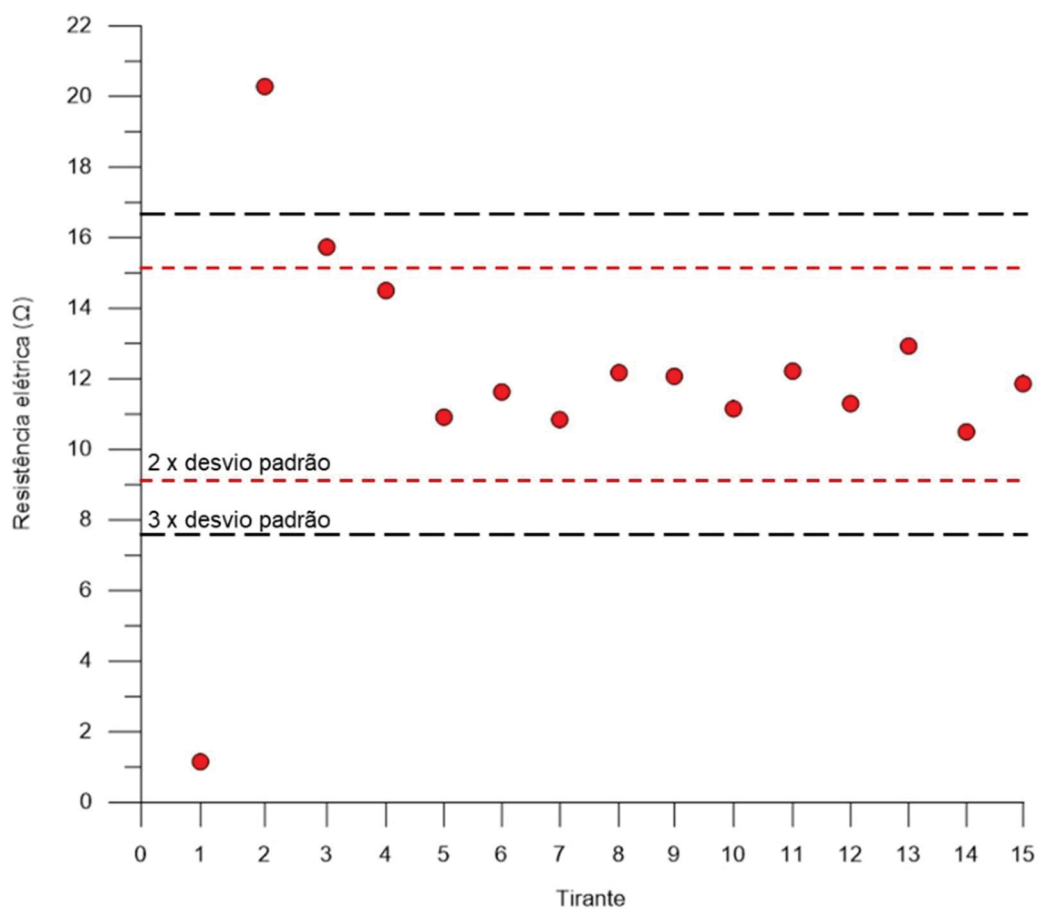
Tabela 4.39 – Resistência elétrica dos tirantes Tipo 1 (T1 a T15)

Tirante	Resistência elétrica (Ω)
T1	1,15
T2	20,28
T3	15,73
T4	14,50
T5	10,91
T6	11,63
T7	10,84
T8	12,17
T9	12,07
T10	11,15
T11	12,22
T12	11,30
T13	13,02
T14	10,49
T15	11,79
Média (Ω)	12,14
Desvio Padrão (Ω)	1,51
Média \pm 2 x Desvio Padrão (Ω)	9,13 – 15,15
Média \pm 3 x Desvio Padrão (Ω)	7,62 – 16,66

Foi possível perceber que a eliminação dos valores que foram muito divergentes (T1 e T2) foi importante, uma vez que se estes tivessem sido mantidos nos cálculos os intervalos de referência seriam: 7,81 a 19,77 Ω , e 0,23 a 23,68 Ω , para \pm 2 e 3 vezes o desvio padrão a partir da média, respectivamente. Dessa forma, o intervalo seria muito grande e a avaliação seria incorreta.

A representação gráfica dos intervalos de referência sem T1 e T2 pode ser observada na Figura 4.68.

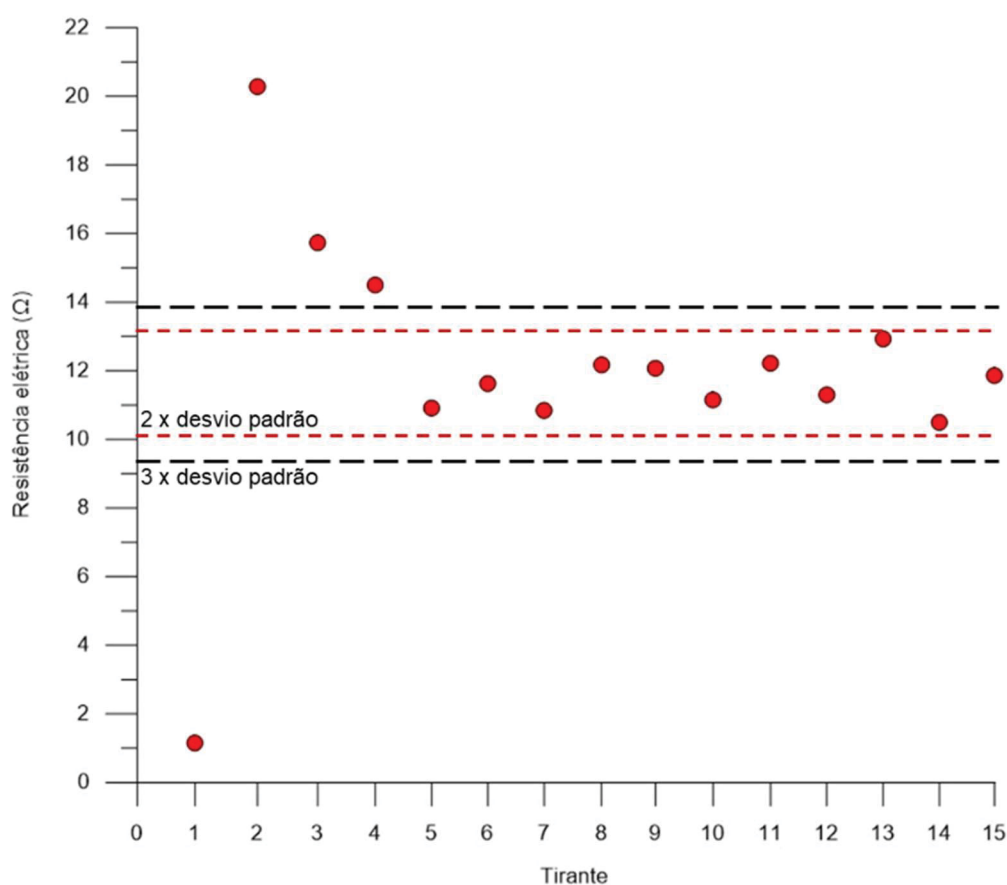
Figura 4.68 – Intervalo de referência dos tirantes Tipo 1



O gráfico indica que os dois valores divergentes (T1 e T2) estão fora do intervalo de referência, o que já era esperado. Além disso, o tirante T3 ficou acima da referência superior para ± 2 vezes o desvio padrão. É possível perceber que o T4 também está próximo deste limite superior, e que a diferença dele para os demais é visível. Neste caso, pode ser avaliada a eliminação dos valores mais altos para reduzir o intervalo de referência, de modo a ser mais conservador.

Como exemplo, se fossem desconsiderados os valores de T1 a T4, que foram os mais divergentes, e a média e o desvio padrão fossem calculados considerando somente os tirantes T5 a T15, tanto o desvio padrão como o intervalo de referência resultam em valores bem menores. O resultado obtido para essa variação é apresentado na Figura 4.69.

Figura 4.69 – Intervalo de referência dos tirantes Tipo 1 sem considerar T1 a T4



Foi possível perceber que com a eliminação dos valores de T1 a T4 na análise o intervalo de referência foi bem menor. Mesmo assim, todos os tirantes T5 à T15 ficaram dentro do limite de referência. Cabe salientar que estas avaliações do intervalo de referência e eliminação de valores discrepantes devem ser definidas caso a caso. Além disso, quanto maior a quantidade da amostra e ensaios em uma mesma contenção, maior confiabilidade os resultados apresentam.

O tirante T1 é localizado bem próximo da rodovia, e o baixo valor obtido foi semelhante ao valor de resistência dos grampos do solo grampeado existente que estavam em contato com a malha metálica. Além disso, barras de comprimento menor e falhas com ar estão associadas à valores maiores de resistência.

Por outro lado, o tirante T2 apresentou um valor mais alto, acima da média dos demais, o que pode indicar falhas ou comprimento de barra menor. Da mesma maneira como o tirante T3 e T4, que apresentaram valor maiores que a média. Como do T2 ao T5 existe um comportamento decrescente, e após o T5 o valor permanece praticamente constante, com pouca variação, também deve ser avaliada a execução dos tirantes da

extremidade, uma vez que pode haver influência do solo ao redor das barras, presença de água, entre outros.

Para os tirantes Tipo 3 também foi realizada a análise do desvio padrão, e o resumo dos dados é apresentado na Tabela 4.40. Os tirantes Tipo 3 têm comprimento de 28 m, sendo o comprimento ancorado de 12 m e diâmetro de 50,17 mm.

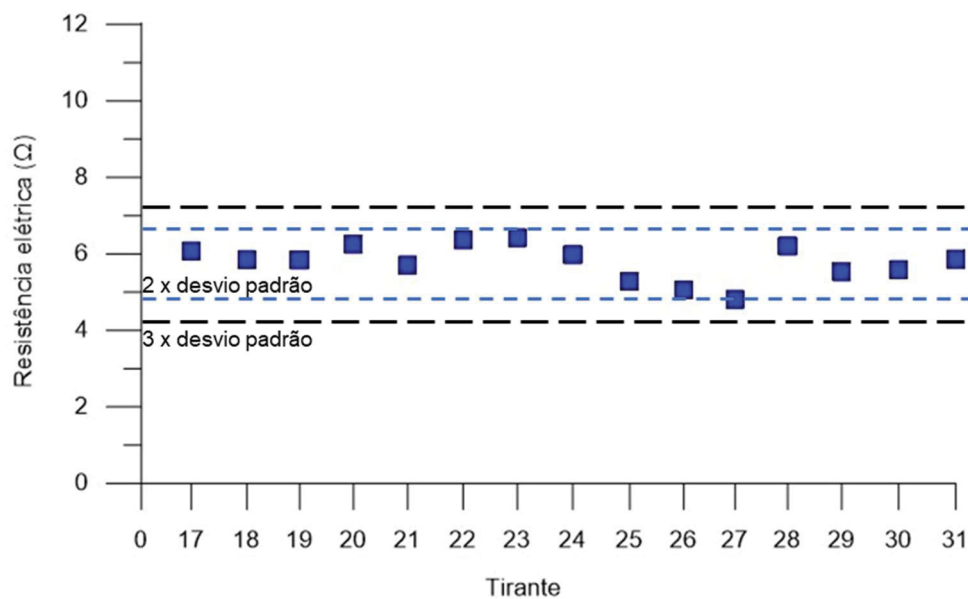
Tabela 4.40 – Resistência elétrica dos tirantes Tipo 3 (T17 a T31)

Tirante	Resistência elétrica (Ω)
T17	5,77
T18	5,83
T19	5,92
T20	6,10
T21	5,71
T22	6,36
T23	6,42
T24	5,98
T25	5,28
T26	5,06
T27	4,81
T28	6,20
T29	5,54
T30	5,59
T31	5,86
Média (Ω)	5,76
Desvio Padrão (Ω)	0,46
Média \pm 2 x Desvio Padrão (Ω)	4,85 – 6,67
Média \pm 3 x Desvio Padrão (Ω)	4,39 – 7,13

A análise gráfica da resistência elétrica obtida nos tirantes do Tipo 3 é apresentada na Figura 4.70.

Para os tirantes do Tipo 3, somente o valor da resistência elétrica do tirante T27 ficou abaixo do intervalo de referência quando considerado 2 vezes o desvio padrão. Os demais valores ficaram dentro do intervalo, com pouca variação entre eles. No entanto, normalmente a maior preocupação são com valores mais altos de resistência que podem indicar falhas com ar ou barra de menor comprimento. De qualquer maneira, mesmo este tirante apresentando resistência inferior, o elemento também deve ser avaliado.

Figura 4.70 – Intervalo de referência dos tirantes Tipo 3



De modo geral, os ensaios realizados na cortina atirantada apresentaram resultados satisfatórios, foi possível avaliar 32 elementos e verificar quais as limitações que o método apresenta. Apesar de não ser possível obter o comprimento da barra, os ensaios indicam tirantes que podem apresentar anomalias. Desse modo, outros ensaios devem ser realizados para a avaliação adequada dos elementos que apresentaram valores fora dos intervalos de referência.

4.4.DIRETRIZES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos não destrutivos para avaliação de grampos já são utilizados em outros países, como Hong Kong, desde o ano de 2003. A principal metodologia é o TDR, e para sua aplicação, todas as contenções executadas com grampos contam com um fio elétrico paralelo as barras para realização de ensaios. A norma de Hong Kong indica a utilização de métodos não destrutivos, uma vez que estas técnicas podem aumentar o padrão de qualidade das obras e promover melhorias nas técnicas de instalação e controle de qualidade (GEOGUIDE 7). No Brasil, existem algumas empresas que utilizam métodos não destrutivos, porém ainda são pouco difundidos e conhecidos pela indústria e sociedade.

No presente trabalho, buscou-se conhecer e aplicar os métodos existentes, além de avaliar a utilização dos métodos que possam se adequar a atual realidade encontrada no país. Desse modo, foi executado um campo experimental com variações de grampos e tirantes para avaliação dos MND, e realizados diversos ensaios em laboratório. As metodologias também foram aplicadas em contenções existentes.

Os ensaios realizados em laboratório foram importantes para obter maior sensibilidade dos resultados obtidos em campo, além de balizar resultados obtidos em campo. Cabe salientar que em laboratório existe menor variabilidade executiva, maior controle de qualidade dos materiais utilizados, além de permitir o armazenamento de amostras e elementos em condições de temperatura e umidade constante.

A contenção experimental foi executada em um talude que já era estável, com elementos que apresentavam variações como falhas e redução de seção. No total, foram executados 30 grampos e 27 tirantes. A realização dos ensaios no campo experimental permitiu realizar diferentes variações nas análises, metodologias de medição, além de testar o método em diferentes tipos de barras.

4.4.1. Ensaio TDR

Em todos os elementos foram dispostos cabos coaxiais paralelos às barras e apresentavam simulação de vazios ou redução de seção. Por isso, a produtividade executiva foi menor, pois era necessário maior cuidado durante a preparação das barras e sua instalação, principalmente ao inserir às barras nas perfurações. Para os tirantes, um

ponto de atenção é o posicionamento do cabo coaxial na região do paramento, uma vez que é utilizada uma placa de aço com uma porca ou clavetes, para a protensão. Não somente para os tirantes, mas para todas as barras o cuidado com o cabo é essencial, que é o que garante um bom resultado do ensaio TDR.

Para o método TDR é imprescindível o uso do cabo coaxial, que permite definir o comprimento através do cabo, estimar o comprimento da calda de cimento e identificar falhas. Nos grampos, falhas com mais de 10 cm foram identificadas através de reflexões nos gráficos obtidos.

O método TDR se mostrou eficiente nos tirantes para a detecção do trecho livre e do trecho ancorado, e conseqüentemente o comprimento total. Entende-se que a ocorrência de falhas no trecho ancorado em tirantes é mais difícil de ocorrer, uma vez que existe um controle tecnológico superior aos grampos. Nos tirantes é realizado um controle do volume de calda de cimento injetado em cada válvula manchete, e a realização de várias etapas de reinjeção é bem comum de modo a garantir que o trecho ancorado esteja completamente preenchido por calda de cimento. As falhas no início da barra, próximo a cabeça, não foram identificadas pelo ensaio, devido as reflexões que ocorrem no início das barras oriundas do próprio ensaio. A falha no meio do trecho livre foi identificada devido a alteração de material para a simulação da falha.

Tanto para os grampos como para os tirantes, a identificação dos vazios simulados através do TDR pode ter interferência do material que foi utilizado para simular estas falhas. Nos grampos, foi utilizada uma cola, e nos tirantes espuma de poliuretano, e como é um material diferente, este também pode contribuir com a reflexão das falhas. Assim, sugere-se que os ensaios sejam realizados nas barras com a falha simulada antes da inserção no furo, ou que estas falhas sejam testadas em laboratório, de modo que não haja interferência do material de vedação. Diferentemente dos ensaios em laboratório, ensaios de campo contam com interferências externas que muitas podem não serem identificadas e mensuradas, que podem ser reduzidos com ensaios preliminares.

A calibração das velocidades de propagação em barras conhecidas é uma etapa importante, e deve ser realizada, se possível, de modo a reduzir os erros na obtenção dos comprimentos.

Para realização do ensaio é necessário o acesso elétrico à cabeça das barras dos tirantes e ao cabo coaxial pré-instalado. Deve-se tomar cuidado com o cabo coaxial na colocação das barras na perfuração e, principalmente, durante a etapa de protensão.

O ensaio com o cone goubau, que é uma derivação do TDR sem a necessidade de um cabo pré instalado, se mostrou promissor, e que deve ser melhor explorado no futuro.

4.4.1.1. *Diretrizes para instalação do cabo coaxial*

A seguir são apresentadas as diretrizes para instalação do cabo coaxial nas barras:

- Garantir que não haja excesso de ferrugem e corrosão ao longo da barra de aço;
- Fixar o cabo coaxial esticado paralelo a barra com braçadeira plástica ou fita pelo menos a cada 1 m. Não estrangular o cabo e não utilizar nenhum tipo de arame;
- Certificar-se que o fim do cabo coaxial coincida com o final da barra. O cabo coaxial deve estar encapado, sem que esteja em contato elétrico com a barra;
- Na extremidade final, fixar bem o cabo com fita para que este não se desloque ao inserir a barra na perfuração;
- No início da barra deixar uma sobra de cabo de no mínimo 10 cm;
- Os espaçadores devem ser colocados sobre o cabo coaxial, de modo que o cabo sempre permaneça paralelo e em contato com a barra;
- Em barras com emendas, esticar o cabo sobre as emendas e fixar antes e após a rosca;
- Se for utilizada uma placa de aço com porca, realizar um furo na placa de aço para permitir a passagem do cabo para a extremidade inicial do furo;
- Proteger o cabo antes de realizar o ensaio.

4.4.1.2. *Materiais necessários para o ensaio TDR*

A seguir são apresentados os materiais necessários para a realização do ensaio TDR:

- Equipamento TDR com cabo auxiliar e cabo de conexão ao notebook;
- Notebook com software do TDR;
- Lixa ou escova abrasiva de aço;
- Alicates para cortar o cabo;
- Desencapador de cabo coaxial;
- Fita isolantes, adaptadores, garras jacaré;

- Caderneta para anotações.

4.4.1.3. *Diretrizes de realização do ensaio TDR*

A seguir são apresentadas as diretrizes para realização do ensaio TDR nas barras:

- Para o primeiro ensaio, esticar a sobra do cabo coaxial e cortar com um comprimento um pouco maior (~2 cm) maior que a extremidade da barra;
- Utilizar um desencapador de cabo coaxial, de modo a ter acesso à malha interna e externa do cabo, de modo que o revestimento externo do cabo coaxial fique na direção próxima a extremidade da barra;
- Conectar o TDR ao notebook e abrir o software. Ajustar as configurações necessárias para realização do ensaio;
- ETAPA 1. Realizar o ensaio no cabo coaxial para obter o comprimento do cabo:
 - Gerar uma leitura inicial somente com o cabo auxiliar (leitura de referência);
 - Conectar o cabo auxiliar do TDR com o cabo coaxial paralelo à barra. Unir às malhas internas e externas, de ambos os cabos, com adaptador ou com o uso de fita isolante, de modo que as malhas não se toquem;
 - Gerar o impulso e avaliar o gráfico e refazer a leitura de modo a verificar se as leituras estão semelhantes. Caso haja muita variação verificar a conexão entre os cabos e refazer a leitura;
 - Salvar os dados. Como a velocidade de propagação do pulso no cabo coaxial é conhecida (confirmar com o fabricante), é possível estimar o comprimento do cabo que deve ser o mesmo que da barra;
- ETAPA 2. Realizar o ensaio na barra:
 - Lixar a barra na extremidade para remoção de ferrugem, corrosão, sujeira ou calda de cimento que possa estar na região de contato com o cabo auxiliar do TDR;
 - Conectar o cabo auxiliar do TDR com a barra de aço e o cabo pré-instalado e garantir o contato com adaptador ou fita isolante. A configuração com menor interferência é a malha externa do cabo auxiliar com a barra de aço e a malha interna com o cabo coaxial pré-instalado;

- Gerar o impulso e avaliar o gráfico e refazer a leitura de modo a verificar se as leituras estão semelhantes. Caso haja muita variação verificar a conexão entre os cabos e refazer a leitura;
- Salvar os dados. Com o comprimento obtido com o ensaio da ETAPA 1 é possível estimar a velocidade de propagação do pulso na barra e verificar a existência de reflexões que podem indicar falhas;
- Após a finalização dos ensaios, proteger a ponta do cabo coaxial para que não oxide com o tempo;
- Em escritório, avaliar os gráficos obtidos, identificar o tempo inicial e final dos pulsos com o método das tangentes, estimar a velocidade de propagação do pulso e o comprimento da barra. Verificar possíveis reflexões que possam indicar falhas, ou no caso de tirantes, a passagem do trecho livre para o trecho ancorado.

4.4.2. Resistência Elétrica

O ensaio da resistência elétrica é comparativo entre barras, mas permitiu identificar barras com as falhas simuladas, principalmente nos grampos. Nos tirantes, esta metodologia pode não ter muito sentido pois normalmente são realizadas reinjeções do trecho ancorado e o controle executivo é mais rigoroso. É possível realizar o ensaio em diferentes direções, e não sendo necessário uma seção perpendicular às barras.

O comparativo entre técnicas mostrou que as barras com falhas simuladas também apresentaram variações da resistência elétrica medida, e por isso devem ser utilizados em conjunto quando possível.

4.4.2.1. *Materiais necessários para o ensaio de resistência elétrica*

A seguir são apresentados os materiais necessários para a realização do ensaio de resistência elétrica:

- Terrômetro ou amperímetro + voltímetro;
- Eletrodos (hastes metálicas);
- Cabos elétricos;
- Garra jacaré;
- Lixa ou escova abrasiva de aço;
- Caderneta para anotações.

4.4.2.2. *Diretrizes de realização do ensaio de resistência elétrica*

A seguir são apresentadas as diretrizes para realização do ensaio de resistência elétrica:

- Avaliar o espaço disponível para o ensaio, uma vez que direção do alinhamento dos eletrodos afeta pouco os resultados;
- Posicionar o eletrodo de potencial e de corrente distante pelo menos 10 m e 20 m, respectivamente, da barra avaliada;
- Os eletrodos devem ser cravados no solo e ligados ao terrômetro com um cabo elétrico. Se não houver plug, verificar a conexão elétrica entre o eletrodo e o cabo;
- Lixar a barra na extremidade para remoção de ferrugem, corrosão, sujeira ou calda de cimento que possa estar na região de contato com a garra jacaré;
- Conectar a garra jacaré na barra de aço de modo a abranger todo seu diâmetro;
- Realizar o ensaio pelo menos 5 repetições para verificar a variação dos valores;
 - Inicialmente recomenda-se a realização de ensaios preliminares com alteração da distância entre os eletrodos e a barra, e variação das seções de leitura para verificar se os resultados são afetados. Variações abaixo de 1% para as variações ainda garantem um bom resultado;
- Com os dados obtidos, comparar os valores de resistência elétrica entre barras próximas, e verificar quais valores estão fora do intervalo de mais ou menos duas vezes o desvio padrão em relação à média. Se a quantidade de dados for baixa este intervalo deverá ser reavaliado.

5. CONCLUSÕES

O método não destrutivo *Time Domain Reflectometry* (TDR) apresentou grande potencial de aplicação com a utilização do cabo coaxial pré-instalado. O cabo também permite a leitura inicial correspondente ao comprimento da barra, que não é influenciado pelo material ao redor.

O modelo reduzido utilizado para calibração da velocidade de propagação do pulso elétrico serviu como ferramenta de análise e comparação com os dados do campo experimental.

No solo grampeado, o TDR identificou barras de diferentes tamanhos e velocidades de propagação maiores nas barras sem reinjeção, que podem indicar a presença de falhas com ar ao longo do preenchimento da calda de cimento. A presença de emendas não gerou influência nos resultados. Nas variações simuladas com falhas, a metodologia permitiu identificar graficamente os vazios maiores de 50 cm com ar. Nos tirantes, a metodologia se mostrou promissora na identificação do trecho livre e do trecho ancorado.

O método da resistência elétrica não permite identificar o comprimento e nem graduar e localizar eventuais falhas, porém se mostrou com potencial como um método comparativo entre barras próximas. Os grampos sem reinjeção apresentaram valores maiores que os grampos com uma segunda fase de injeção, o que indica possíveis vazios. Do mesmo modo como as barras com falhas apresentaram resistência superior às íntegras e proporcionais ao tamanho do grampo. Nos tirantes, as monobarras apresentaram valores superiores aos das cordoalhas e fios, e pode ser uma análise complementar para verificação do preenchimento com calda de cimento do trecho ancorado.

Para uma obra que não apresente o cabo coaxial pré-instalado é possível aplicar o método da resistência elétrica juntamente com outro método, como sônico ou magnético. Para aplicação do TDR é necessário maiores estudos, como por exemplo, no cone goubau. Quando o cabo estiver presente, o método TDR é o mais indicado, e permite avaliar todos os elementos. A comparação entre o método TDR e resistência elétrica apresentou resultados promissores, uma vez que ambos identificaram problemas nas barras com falhas.

Ambos os métodos são de fácil e rápida aplicação, e permitem avaliar todas as barras de uma contenção. No entanto, para o método TDR é necessário o uso do cabo coaxial. A técnica com o uso do cone goubau se mostrou promissora, mas é necessário maiores estudos e desenvolvimento.

5.1.RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Executar as barras em locais que seja possível exumar posteriormente, de modo a confirmar os resultados.

Em laboratório, realizar simulações de falhas sem utilização de colas, espumas e PVC. Avaliar barras de diferentes comprimentos com e sem calda de cimento.

Em um novo campo experimental, para os grampos: executar barras com diferentes comprimentos, avaliar a execução sem espaçadores (barra encostada no furo), que é uma falha recorrente em campo. Para os tirantes, avaliar diferentes comprimentos, variando também o trecho livre e ancorado. Não avaliar falhas no trecho livre.

Na contenção experimental existente em São José dos Pinhais (PR), realizar ensaios adicionais para verificar se há alterações com o tempo, exumar as barras existentes para verificar o preenchimento da calda de cimento ao redor da barra.

Em relação ao método com o cone Goubau, realizar a deconvolução temporal do sinal TDR para obter um resultado com maior precisão e a adaptação de impedância na saída do TDR.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. Manual de monitoração de rodovias sob concessão. Volume 5. Manual de monitoração dos terraplenos e estruturas de contenção. Rio de Janeiro: 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. Taludes rodoviários da BR-376/PR e BR-101/SC: Gerenciamento da segurança e da manutenção de estruturas de contenção através de ensaios não destrutivos. Recursos para Desenvolvimento Tecnológico – RDT. PROJETO 05 SGP/ALS_07 REV.00. Rio de Janeiro, 2020.

ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D.R. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 2, p.135-150, 1998.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN – AENOR. **PRUNE 83988 – 2:** Determinación de la Resistividad Eléctrica Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner. Espanha, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – ABMS. Defesa civil aciona ABMS para vistoria em desabamento em belo horizonte. Disponível em: <<https://www.abms.com.br/defesa-civil-aciona-abms-para-vistoria-em-desabamento-em-belo-horizonte/>> Acesso em: 10 fev 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5629:** Execução de tirantes ancorados no terreno. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5629:** Tirantes ancorados no terreno – Projeto e execução. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16920-2:** Muros e taludes em solos reforçados. Parte 2: Solos grampeados. Rio de Janeiro, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using portions of prisms broken in flexure). **ASTM C349-18.** West Conshohocken, PA: ASTM. 2018.

BASTOS, I.G., WOLLE, C.M. E FUTAI, M.M. Estabilização de Encostas Através de Drenagem Profunda. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia, GO, Brasil: 2014.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION – BS. **BS 8006-2**. Code of practice for strengthened/reinforced soils. Soil nail design. London, 2017.

CAETANO, C. C., ROEDEL, L., MIKOS, A. P., FARO, V. P., SESTREM, L. P. Drenagem em Obras de Contenções Viárias. XVIII COBRAMSEG. Salvador, 2016.

CHEUNG, W. M. **Non-destructive tests for determining the lengths of installed steel soil nails**. Geo Report 133. Geotechnical engineering office. Civil engineering department. Hong Kong: 2003.

CHEUNG, W. M. **Use of Time Domain Reflectometry to determine the length of steel soil nails with pre-installed wires**. GEO Report 198. Geotechnical engineering office. Civil engineering and development department. Hong Kong: 2006.

CHEUNG, W. M.; LO, D. O. K. **Interim report on non-destructive tests for checking the integrity of cement grout sleeve of installed soil nails**. Geo Report 176. Geotechnical engineering office. Civil engineering and development department. Hong Kong: 2005.

CHEUNG, W. M. LO, D. O. K. Use of time-domain reflectometry for quality control of soil-nailing works. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. Hong Kong: 2011.

CHEUNG, W. M.; SHUM, K. W.; CHENG, F. K. **Use of Time Domain Reflectometry to determine the length of steel soil nails with grout pipe with embedded copper wires**. GEO Report 228. Geotechnical engineering office. Civil engineering and development department. Hong Kong: 2008.

CHUNG, C. C.; LIN, C. P. Apparent dielectric constant and effective frequency of TDR measurements: Influencing factors and comparison. **Vadose Zone Journal**, v. 8, n. 3, p. 548-556, 2009.

CHUNG, C. C., LIN, C. P., WANG, K., LIN, C. S., NGUI, Y. J. Improved TDR Method for Quality Control of Soil-Nailing Works. Technical Note. **Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. 2015.

CHUNG, C. C., LIN, C. P., NGUI, Y. J., WANG, K., LIN, C. H. Laboratory Evaluation of Soil-Nailing Quality Inspection by an Improved TDR Method. **Journal of GeoEngineering**. 2016.

CIOLKO, A. T.; TABATABAI, H. **Nondestructive methods for condition evaluation of prestressing steel strands in concrete bridges**. Final Report, NCHRP Project, p. 10-53, 1999.

CLOUTERRE. Recommendations Clouterre – Soil Nailing Recommendations for Designing, Calculating, Constructing and Inspecting Earth Support Systems Using Soil Nailing (English Translation), Scientific Committee of the French National Project Clouterre, ENPC, Paris, France. In: Report FHWA-SA-93-026, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, July, 1991.

CNN. Em 2011, chuvas que atingiram região serrana do RJ deixaram quase mil mortos. Disponível em: < <https://www.cnnbrasil.com.br/noticias/em-2011-chuvas-que-atingiram-regiao-serrana-do-rj-deixaram-quase-mil-mortos/>>. Acesso em: 11 ago 2022.

CORREIA, M.J., SALTA, M.M., BAPTISTA, A.M. **Corrosão Sob Tensão em Ancoragens**. Lisboa, Portugal: 2014.

CORDEC. Método RIMT®. Disponível em: <<http://www.cordecdobrasil.com.br/servicos/metodo-himt.php>>. Acesso em: 25/11/2015.

COSTA, M. T. Muro cedeu por falha em ancoragem, aponta laudo. Correio Popular. Disponível em: <http://correio.rac.com.br/_conteudo/2014/01/capa/campinas_e_rmc/143188-muro-cede-por-falha-em-ancoragem-aponta-laudo.html>. Acesso em: 12 fev 2019.

DELLAVANZI, E., QUEVEDO, J. R. S., GUIZELINI, A. P. Discussão dos aspectos técnicos contribuintes à ruptura de uma escavação a céu aberto. In: Concreto & Construções. Lições aprendidas com acidentes. Diagnóstico e prognóstico de obras que falharam. Ibracon, Edição 57, 2010.

ELMORE, Glenn; WATROUS, J. A Surface Wave Transmission Line. **QEX articles**. 2012.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – EN. **EN 14490**. Execution of special geotechnical works – Soil nailing. 2010.

EVANGELISTA, L., GUEDES, M., DE BRITO, J., FERRO, A. C., PEREIRA, M. F. Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. **Construction and building materials**, 86, 178-188. 2015.

GEO. Guide to Soil Nail Design and Construction (**Geoguide 7**) (Continuously Updated E-Version released on 18 September 2017). Geotechnical Engineering Office. Civil Engineering and Development Department. HKSAR Government. 90 p. Hong Kong, 2017.

GLOBO. Deslizamento na BR-376 arrasta 15 carros e 6 caminhões no Paraná. G1 PR. 29/11/2022. Disponível em: < <https://g1.globo.com/pr/parana/noticia/2022/11/29/deslizamento-arrasta-10-carros-e-5-caminhoes-no-parana-veja-imagens.ghtml>>. Acesso em: 30 nov. 2022.

GOWERS, K.; MILLARD, S. Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 5, p. 536-541, 1999.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 1984.

GUIMARÃES NETO, J. M. **Estudo de Metodologias Adotadas no Cálculo de Estruturas de Contenção com Solos Grampeados (Soil Nailing) Com a Apresentação de um Estudo de Caso**. Trabalho Final de Curso, Feira de Santana. Bahia: 2008.

HOLA, J., SCHABOWICZ, K. State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**. Vol. X. No. 3. 2010.

HOSSAIN, M. A., AND J.-H. YIN. 2012. Influence of grouting pressure on the behavior of an unsaturated soil-cement interface. **J. Geotech. Geoenviron. Eng.** 138 (2): 193–202. 2012.

IBGE – **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Perfil dos municípios brasileiros: 2017. Pesquisa de Informações Básicas Municipais. Coordenação de População e Indicadores Sociais. Rio de Janeiro: 2017.

IBGE – **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Centro nacional de monitoramento e alertas de desastres naturais – CEMADEN. População em áreas de risco no Brasil. Rio de Janeiro, 2018.

IRVIN, C. MOTHERSILLE, D.K.V. Corrosion protection options for permanent ground anchorages, Proceeding of the International Conference on Ground Anchorages and Anchored Structures in Service, Londres, Reino Unido. 2007.

JAYAWICKRAMA, P. W.; TINKEY, Y.; GONG, J.; TURNER, J. **Non-Destructive Evaluation of Installed Soil Nails**. Report No. FHWA/TX 07-258 p. Texas: 2007.

HKSARG. **General Specification for Civil Engineering Works** (2006 Edition) (Incorporating all Amendments). The Government of Hong Kong Special Administrative Region. Volumes 1 and 2. Hong Kong, 2006.

LAZARTE, C. A., ROBINSON, H., GÓMEZ, J. E., BAXTER, A., CADDEN, A., & BERG, R. (2015). **Soil Nail Walls Reference Manual** (No. FHWA-NHI-14-007).

LEE, C. F. OAP O. **Review of Use of Non-Destructive Testing in Quality Control in Soil Nailing Works**. GEO Report 219 Geotechnical engineering office. Civil engineering and development department. Hong Kong: 2007.

LEITE, C. M. Técnicas de Aterramentos Elétricos. **2ª Edição. Oficina de Mydia**. São Paulo, 1996.

LEITE. M. B., SANTANA. V. M. Evaluation of an experimental mix proportion study and production of concrete using fine recycled aggregate. **Journal of Building Engineering**. 21. 243-253. 2019.

LEE, J. S., & YU, J. D. Non-destructive method for evaluating grouted ratio of soil nail using electromagnetic wave. **Journal of Nondestructive Evaluation**, 38(2), 1-15. 2019.

LIMA, A. P. **Comportamento de uma escavação grampeada em solo residual de gnaïsse**. 428 p. Tese. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

MACHADO, A. X., MENDES, L. C. Durabilidade e vida útil de estruturas de contenção de encosta situadas na cidade do Rio de Janeiro. In VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas (Vol. 7, pp. 1-10). 2014.

MAMEDE FILHO, J. Instalações Elétricas Industriais. Editora **LTC**. **7ª Edição**, 2007.

MASSAD, F. Obras de terra: curso básico de geotecnia. São Paulo: **Editora Ofinina de Textos**, **2ª edição**, 2010.

MEDEIROS JR., R. A., GANS, P. S. Efeito da adição de pozolana na resistividade elétrica superficial do concreto. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, Vol. 2, No. 3. 2017.

MEDEIROS JR., R. A., LIMA, M. G. Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement. **Construction and Building Materials**. Novembro, 2016.

MIKOS, A. P., CAETANO, C. C., ROEDEL, L., FARO, V. P., SESTREM, L. P., KORMANN, A. C. M., TEIXEIRA, S. H. C. Aplicabilidade de métodos não destrutivos em estruturas de contenção: cortinas atirantadas e solo grampeado. 15 CNG / 8 CLBG. Porto: 2016.

MIKOS, A. P., ROEDEL, L., CAETANO, C. C., KORMANN, A. C. M., FARO, V. P., SESTREM, L. P., TEIXEIRA, S. H. C. Aplicabilidade de métodos não destrutivos em estruturas de contenção: cortinas atirantadas e solo grampeado. XVIII COBRAMSEG. Belo Horizonte, 2016.

MIKOS, A. P. **Caracterização geotécnica de campo experimental para avaliação do método não destrutivo da resistência elétrica em solo grampeado**. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Curitiba, 2017.

MIKOS, A. P.; RIBEIRO, T.; FARO, V. P. Avaliação da resistividade elétrica da calda de cimento na aplicação do método não destrutivo da resistência elétrica em solo grampeado. XXIX COBRAMSEG. Belo Horizonte, 2018.

MIKOS, A. P. NG, C. W. W., FARO, V. P. Sustainable Application of Fine Recycled-Concrete Aggregate in Soil-Nailing Grout. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 33(8), 04021196. 2021.

MIKOS, A. P.; SILVA, I. G.; FARO, V. P. Análise comparativa entre normas internacionais de solo grampeado em relação aos parâmetros da calda de cimento. ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/papers/analise-comparativa-entre-normas-internacionais-de-solo-grampeado-em-relacao-aos-parametros-da-calda-de-cimento>>. Acesso em: 28 set. 2022.

MILITITSKY, J. Grandes escavações em perímetro urbano. **Oficina de Textos**, 2016.

Ministério Público do Rio Grande do Sul - MPRS. MP ajuíza ação para evitar deslizamentos no Polo Rodoviário de Gramado. 28 de maio de 2013. Disponível em: <<http://www.mprs.mp.br/civel/noticias/id32034.html>>. Acesso em: 24/09/2015.

MINEROPAR. Mapa geológico do Paraná. Folha de Curitiba. Paraná, 2005. Escala: 1:250.000.

MOAYED, R. Z., M. HOSSEINALI, S. M. SHIRKHORSHIDI, AND J. SHEIBANI. Experimental investigation and constitutive modeling of grout–sand interface. **Internacional Journal Geomechanics**. 19 (5): 04019024. 2019.

NEVES, L. F. S. Dicionário geotécnico. Álbum de fotos. Contensões. <<http://www.dicionariogeotecnico.com.br/album/geotecnia/diafragma/pages/image/imaimage13.html>> Acesso em: 15 jul 2018.

NG, W. K.; ASHAARI, Y.; NORSHAZRUL, M. Y. High resolution time domain reflectometry and coaxial cable for soil nail monitoring. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2019.

NOSSA ENGENHARIA. Vídeo impressionante mostra Ruptura de Cortina Atirantada. Disponível em: <<https://nossaengenharia.com.br/2017/02/08/video-impressionante-mostra-ruptura-de-cortina-atirantada/>> Acesso em: 18 fev de 2019.

O'CONNOR, K. M., DOWDING, C. H. Geomeasurements by pulsing TDR cables and probes, **CRC Press**, Boca Raton, Florida: 1988.

ORTIGÃO, J. A. R., PALMEIRA, E. M., ZIRLIS, A. Experience with soil nailing in Brazil: 1970-1994. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, Geotechnical Engineering. London:1995.

PECCIN, A. S. **Cortinas atirantadas: verificação da segurança estrutural após o rompimento de tirantes**. Trabalho de Graduação. Bacharel em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

PITTA, C. A., SOUZA, G. J. T., ZIRLIS, A. C., FERREIRA, J. F. C. Quanto tempo durarão as cortinas atirantadas executadas a partir da década de 70? 30 anos?. XIII COBRAMSEG. 2006.

ROEDEL, L., CAETANO, C. C., MIKOS, A. P., FARO, V. P., SESTREM, L. P. Potencial de Corrosão dos Solos em Cortinas Atirantadas. XVIII COBRAMSEG. Belo Horizonte, 2016.

SANTOS, G. A. F. **Soluções de Pregagem para a Estabilização de Taludes: uma Contribuição para o seu Dimensionamento**, Dissertação de Mestrado, Programa de

Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa. 2014.

SHIU, Y. K.; CHEUNG, W. M. **Long-term durability of steel soil nails**. Geo Report 135. Geotechnical engineering office. Civil engineering and development department. Hong Kong: 2003.

SIGA Jr, O; BASEI, M. A. S.; REIS NETO, J. M.; MARCHIAVELLI, A.; HARARA, O. M. **O Complexo Atuba: um cinturão Paleoproterozóico intensamente retrabalhado no Neoproterozóico**. Boletim do Instituto de Geociências, Série Científica, USP, v. 26, p. 69-98, 1995.

SILVA, I. G., BONFIM, M. J. C., FARO, V. P. Sistema de lançamento eletromagnético como alternativa à geração de ondas sonoras não destrutivas para determinação do comprimento da barra de aço. *IEEE Latin America Transactions*, v. 19, p. 306-313, 2021.

SILVA, I. G. D. **Desenvolvimento e caracterização de um sistema automatizado para realização de ensaio sônico**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

SOLOTRAT. *Manual de Serviços Geotécnicos Solotrat*. 5ª ed. São Paulo: 2015. 108 p.

SOUZA, G. J. T.; PITTA, C. A.; ZIRLIS, A. C. Solo grampeado – aspectos executivos do chumbador. IV COBRAE – Conferência Brasileira sobre estabilidade de encostas. Salvador: 2005.

SOUZA, K. T.; MOURA, R. F.; CINTRA, G. Estudo de alternativas para a construção de malhas de aterramento num solo com alta resistividade elétrica. In: II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, 2007.

TANG, C.S.C., CHENG, P.F.K. **Use of Time Domain Reflectometry (TDR) with pre-installed wires to check the grout integrity of soil nail**. GEO Report 304. Geotechnical engineering office. Civil engineering and development department. Hong Kong: 2014.

TANG, T., YEUNG, A.T. **Full-Scale Field Testing of Surface Waves – TDR Technique in Integrity Evaluation of Large-Diameter Bored Piles**, Proc. TDR 2006, Purdue University, West Lafayette, USA: 2006.

VERÍSSIMO, G. S.; CÉSAR JUNIOR, K. M. L. **Concreto Protendido: Fundamentos Básicos**. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. 78 p. 1998.

WITHIAM, J. L.; FISHMAN, K. L.; GAUS, M. P. **Evaluation of metal-tensioned systems in geotechnical applications**, Phase I. National Cooperative Highway Research Program. Illinois, 2001.

YASSUDA, C. T.; DIAS, P. H. V. **Fundações Teoria e Prática**. Editora Pini, 2ª edição, pp. 603 a 640. 1998.

YU, J.-D.; KIM, K.-H.; LEE, J.-S. Nondestructive health monitoring of soil nails using electromagnetic waves. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 55, n. 1, p. 79-89, 2018.

ZHAO, Z., S. REMOND, D. DAMIDOT, AND W. XU. Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. **Construction Building Materials**. 81 (Apr): 179–186. 2015.