
PLANO DE TRABALHO

**Recursos para Desenvolvimento Tecnológico - RDT,
Capítulo XX do Edital 03, Lote 07, item 10 do PER
Rodovias BR 116/376 PR e BR 101
Trecho Curitiba – Florianópolis**

**PROJETO 05
SGP/ALS_07 REV.00**

**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**

Autopista Litoral Sul
arteris

**RELATÓRIO FINAL
SETEMBRO/2020**

SUMÁRIO

1	DESCRIÇÃO DO PROJETO.....	6
1.1	TÍTULO	6
1.2	RESUMO	6
1.3	PALAVRAS CHAVE	6
1.4	JUSTIFICATIVA.....	6
1.5	OBJETIVOS.....	9
1.5.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>9</i>
1.5.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>9</i>
1.6	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	10
1.7	PERÍODO DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	10
1.8	CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO.....	11
1.9	LOCAL DE EXECUÇÃO	12
1.10	EQUIPE EXECUTORA	12
2	MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS.....	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DOS MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS PARA AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE DE SISTEMAS DE ANCORAGEM	20
3.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	20
3.1.1	<i>Sistemas de estabilização.....</i>	<i>20</i>
3.1.2	<i>Patologias nos sistemas de contenção.....</i>	<i>22</i>
3.1.3	<i>Métodos não destrutivos</i>	<i>26</i>
3.2	RESULTADOS	28
3.2.1	<i>Sonic Echo.....</i>	<i>28</i>
3.2.2	<i>Time Domain Reflectometry e Reflectometric Impulse Measurement Technique</i>	<i>32</i>

3.2.3	<i>Método da Resistência Elétrica</i>	38
3.3	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	41
3.3.1	<i>Sonic Echo</i>	41
3.3.2	<i>Time Domain Reflectometry e Reflectometric Impulse Measurement Technique</i>	43
3.3.3	<i>Método da Resistência Elétrica</i>	43
4	ANÁLISE DOS DADOS DISPONÍVEIS NA REGIÃO EM ESTUDO E MAPEAMENTO DAS ÁREAS COM ENCOSTAS JÁ ESTABILIZADAS AO LONGO DA RODOVIA	45
4.1	INTRODUÇÃO	45
4.2	RESULTADOS	45
4.3	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	51
5	VISITAS AO SÍTIO DE ESTUDO	56
5.1	INTRODUÇÃO	56
5.2	RESULTADOS	56
5.3	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	61
6	INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA PARA CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS EXPERIMENTAIS	62
6.1	INTRODUÇÃO	62
6.2	RESULTADOS	62
6.2.1	<i>Ensaio a percussão SPT</i>	62
6.2.2	<i>Resistividade elétrica do solo</i>	76
6.2.3	<i>Coleta de amostras indeformadas</i>	80
6.2.4	<i>Resistividade elétrica da calda de cimento</i>	87
6.3	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	90
6.3.1	<i>Ensaio a percussão SPT</i>	90

6.3.2	<i>Resistividade elétrica do solo.....</i>	94
6.3.3	<i>Coleta de amostras indeformadas.....</i>	96
6.3.4	<i>Resistividade elétrica da calda de cimento.....</i>	98
7	CONCEPÇÃO E IMPLANTAÇÃO DE UMA ESTRUTURA DE ESTABILIZAÇÃO EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE ANÁLISE NÃO DESTRUTIVAS	101
7.1	INTRODUÇÃO	101
7.2	RESULTADOS	101
7.2.1	<i>Planejamento dos experimentos.....</i>	101
7.2.2	<i>Implantação da estrutura de estabilização experimental.....</i>	108
7.3	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	141
7.3.1	<i>Planejamento dos experimentos.....</i>	141
7.3.2	<i>Implantação da estrutura de estabilização experimental.....</i>	143
8	EXECUÇÃO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS NA ESTRUTURA EXPERIMENTAL	146
8.1	TÉCNICAS APLICADAS.....	146
8.1.1	<i>Time Domain Reflectometry e Reflectometric Impulse Measurement Technique</i>	146
8.1.2	<i>Resistência elétrica.....</i>	152
8.1.3	<i>Sonic Echo.....</i>	156
8.2	RESULTADOS	159
8.2.1	<i>Time Domain Reflectometry e Reflectometric Impulse Measurement Technique</i>	159
8.2.2	<i>Resistência elétrica.....</i>	177
8.2.3	<i>Sonic Echo.....</i>	183
8.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	195

9	CALIBRAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM BASE NOS ESTUDOS EXPERIMENTAIS	198
9.1	INTRODUÇÃO	198
9.2	RESULTADOS	198
9.2.1	<i>Time Domain Reflectometry.....</i>	<i>198</i>
9.2.2	<i>Resistência elétrica.....</i>	<i>203</i>
9.3	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	222
10	ANÁLISE DE OUTRAS ÁREAS COM ESTRUTURAS DE ESTABILIZAÇÃO IMPLANTADAS	223
10.1	INTRODUÇÃO	223
10.2	RESULTADOS	226
10.2.1	<i>Contenção km 658+400 m, pista Sul.....</i>	<i>226</i>
10.2.2	<i>Contenção km 650+940 m, pista Norte.....</i>	<i>232</i>
10.3	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	239
10.3.1	<i>Contenção km 658+400 m, pista Sul.....</i>	<i>239</i>
10.3.2	<i>Contenção km 650+940 m, pista Norte.....</i>	<i>243</i>
11	CONSOLIDAÇÃO DE DIRETRIZES E METODOLOGIAS PARA A AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO	244
11.1	INTRODUÇÃO	244
11.2	RESULTADOS	244
11.3	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	245
12	CAPACITAÇÃO DE PESSOAS.....	247
13	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	249
13.1	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	249
13.2	OBJETIVOS DO PROJETO.....	249

13.3 AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS	250
13.4 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS E UTILIDADE PRÁTICA.....	251
13.5 PRODUTOS GERADOS.....	252
14 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	253

1 DESCRIÇÃO DO PROJETO

1.1 Título

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.

1.2 Resumo

O presente projeto focou na aplicação de ensaios não destrutivos para o gerenciamento da segurança e manutenção de estruturas de contenção. Para tal, inicialmente foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica em âmbito nacional e internacional, para identificar os principais mecanismos causadores de danos assim como as técnicas de ensaios não destrutivos (NDT) mais relevantes. O estudo envolveu um mapeamento preliminar do trecho rodoviário em estudo, no qual foi avaliado as informações disponíveis para a caracterização das estruturas de contenção existentes. Após a definição dos métodos de avaliação NDT utilizados, propôs-se a concepção e execução de um campo experimental composto por um sistema de estabilização com elementos íntegros e outros com anomalias conhecidas, de modo a avaliar as técnicas selecionadas. Os resultados obtidos foram analisados criticamente, identificando-se potenciais de uso e limitações das técnicas estudadas, as quais foram aplicadas também em alguns sistemas de contenção reais, com vistas à consolidação de diretrizes práticas.

1.3 Palavras chave

Encostas estabilizadas; Ensaios não destrutivos; Solo grampeado; Cortina atirantada

1.4 Justificativa

Ao longo do traçado de uma rodovia, é comum o uso de estruturas de contenção com a finalidade de se conferir estabilidade a regiões de corte e aterro. Nas estradas brasileiras, milhares de obras desse tipo se fazem presentes, nas mais variadas condições de complexidade e idade. Um acompanhamento periódico do estado de conservação dos sistemas de contenção é fundamental para se garantir condições de tráfego adequadas e a segurança dos usuários.

As estruturas de contenção rodoviárias envolvem diferentes concepções e funcionalidades, sendo frequente o emprego de concreto e aço em sistemas que utilizam ancoragens ativas e passivas. Pitta *et al.* (2006) destacam a importância de se avaliar o estado de conservação de estruturas de contenção, com o objetivo de se evitar a ocorrência de acidentes e os custos elevados de ações de remediação. Segundo os autores, as principais cortinas atirantadas no Brasil foram executadas a partir da década de 70 e os primeiros registros de acidentes começaram já na década de 80.

A ANTT (2008) apresenta especificações sobre o tema no “Manual de Monitoração dos Terraplenos e Estruturas de Contenção”. Em linhas gerais, pode-se caracterizar a boa prática de manutenção de contenções através de: a) inspeções de rotina, com o cadastramento das estruturas e verificação regular de suas condições; b) inspeções e estudos de engenharia, caso anomalias sejam identificadas, e c) execução de ensaios e análise de dados de monitoramento. Dentre os diferentes problemas que podem se manifestar, pode-se citar a deterioração do concreto armado, a corrosão de elementos metálicos inseridos no terreno (grampos, chumbadores, barras/feixes de cordoalhas atirantadas), a perda de protensão de tirantes ou ainda o aumento da carga atuante nos mesmos devido a movimentações dos maciços. Todos esses fatores concorrem para reduzir os níveis de segurança de cortes e aterros rodoviários.

O acompanhamento das condições de um sistema de estabilização enfrenta a dificuldade de ser necessário avaliar o estado de elementos que não podem ser acessados com facilidade. Inspeções de rotina, limitadas ao campo visual, podem deixar de identificar patologias relevantes. Intervenções físicas nos elementos de concreto e nas ancoragens tendem a ser custosas e de difícil materialização, o que prejudica seu emprego mais amplo nas contenções existentes ao longo de um dado segmento rodoviário.

Hola & Schabowicz (2010) classificam os métodos utilizados na avaliação de estruturas em três categorias: destrutivos, semi-destrutivos e não destrutivos. Os ensaios destrutivos podem ser conduzidos tanto em laboratório como em elementos reais. Quando aplicados em escala real, é preciso selecionar alguns elementos que sejam representativos para a realização dos testes, tendo-se em mente que os mesmos serão perdidos após a execução dos ensaios. Como em estruturas de contenção os componentes a serem testados muitas vezes estão

enterrados, a escolha de elementos representativos consiste em uma barreira à aplicação da abordagem.

Os ensaios classificados como semi-destrutivos também podem ser realizados com amostras em laboratório ou em elementos reais. Envolvem uma pequena (e geralmente superficial) intrusão no material da estrutura a ser avaliada, resultando em perda local de propriedades e consequente necessidade de reparos após o término dos testes.

Em contrapartida, os ensaios não destrutivos (*Non Destructive Testing* – NDT) podem ser aplicados em um mesmo elemento e estrutura várias vezes e em diferentes momentos, por exemplo, durante a construção e ao longo de sua vida útil. Assim, técnicas não invasivas podem assumir particular interesse para sistematizar procedimentos de avaliação de contenções e embasar decisões referentes a intervenções de manutenção.

Palop *et al.* (2013) apresentam um estudo com aplicação de um método não destrutivo (cargas estáticas e dinâmicas) de avaliação da integridade de grampos com diferentes comprimentos de ancoragem em um modelo desenvolvido em centrífuga. Os autores comparam resultados de elementos posicionados horizontalmente com outros em diferentes inclinações, o qual possibilitou avaliar a sensibilidade do método a estas variações. Hartman *et al.* (2010) analisaram grampos instalados em rocha através de uma metodologia de ondas sísmicas, onde foi possível confirmar o comprimento de ancoragem e avaliar a integridade dos elementos quanto à corrosão.

Outros estudos ligados à avaliação de ensaios não destrutivos foram realizados (e.g. ACI 1998, Ciolko & Tatabai, 1999, Beutel *et al.* 2008, Davis 2003, Davis & Hertlein 1987, Garbacz 2007, Hola *et al.* 2009, Rybak *et al.* 2009), cabe destacar que a fronteira do conhecimento busca aplicações baseadas em técnicas ultra-sônicas, magnéticas, acústicas, reflectométricas e resistivas.

A depender do princípio físico de cada técnica não destrutiva, limitações e aplicações potenciais inclusive nas condições típicas de obras de contenção encontradas em território nacional ainda precisam ser compreendidas. Esse avanço no conhecimento constituiu um importante motivador para a pesquisa aqui proposta, a qual é detalhada nos itens subsequentes.

1.5 Objetivos

1.5.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral da presente pesquisa consistiu em consolidar procedimentos racionais para a avaliação e tomada de decisão quanto à real necessidade de intervenções de manutenção em estruturas de contenção, com ênfase em tecnologias não destrutivas

1.5.2 *Objetivos Específicos*

Para que o objetivo geral fosse alcançado, alguns objetivos específicos foram estabelecidos e concluídos:

- Identificação dos principais fatores que levam à degradação de estruturas de estabilização, com particular atenção a problemas construtivos e àqueles causados por corrosão das ancoragens;
- Caracterização do estado-da-arte do conhecimento referente a métodos não destrutivos para avaliação da integridade de estruturas de contenção, subsidiando-se a escolha de procedimentos a serem aplicados no desenvolvimento da pesquisa;
- Mapeamento das estruturas de contenção existentes ao longo da rodovia e definir um local para implantação de uma contenção experimental, com vistas à avaliação do(s) método(s) selecionado(s);
- Programação e execução de investigação geotécnica de campo (sondagens diretas) e de laboratório para caracterização da área de estudo experimental;
- Concepção e implantação de um sistema de estabilização composto por elementos estruturais íntegros e com anomalias conhecidas, na área definida previamente, materializando-se assim um campo experimental de estudos;
- Análise dos resultados obtidos buscando a calibração dos métodos de avaliação de integridade para aplicação em contenções reais existentes na área de estudo. Identificação do seu potencial de uso e limitações inerentes às diferentes técnicas;
- Consolidação dos resultados obtidos ao longo da pesquisa, propondo-se diretrizes para a análise e manutenção de estruturas de contenção no trecho estudado bem como em outras rodovias operadas pelo grupo Arteris.

1.6 Organização do trabalho

De forma sucinta, o projeto foi desenvolvido segundo as etapas abaixo, as quais serão detalhadas ao longo do presente relatório (itens 2 a 12):

1. Revisão bibliográfica dos métodos não destrutivos para avaliação de integridade de sistemas de ancoragem
2. Análise dos dados disponíveis na região em estudo e mapeamento das áreas com encostas já estabilizadas ao longo da rodovia
3. Visitas ao sítio de estudo
4. Investigação geotécnica para caracterização da área de estudos experimentais
5. Concepção e implantação de uma estrutura de estabilização experimental para avaliação de metodologias de análise não destrutivas
6. Execução de ensaios não destrutivos na estrutura experimental
7. Calibração dos resultados obtidos com base nos estudos experimentais
8. Análise de outras áreas com estruturas de estabilização implantadas
9. Consolidação de diretrizes e metodologias para a avaliação das condições de estruturas de contenção

1.7 Período de desenvolvimento do projeto

Maio de 2015 a Janeiro de 2019.

1.8 Cronograma de execução

ITEM	DESCRIÇÃO	1º TRIMESTRE			2º TRIMESTRE			3º TRIMESTRE			4º TRIMESTRE		
		fev/15	mar/15	abr/15	mai/15	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15	jan/16
1	Revisão bibliográfica dos métodos não destrutivos para avaliação de integridade de sistemas de ancoragem												
2	Análise dos dados disponíveis na região em estudo e mapeamento das áreas com encostas já estabilizadas ao longo da rodovia												
3	Visitas ao sítio de estudo												
4	Concepção e implantação de uma estrutura de estabilização experimental para avaliação de metodologias de análise não destrutivas												
5	Execução de ensaios não destrutivos na estrutura experimental												
6	Investigação geotécnica para caracterização da área de estudos experimentais												
7	Calibração dos resultados obtidos com base nos estudos experimentais												
8	Análise de outras áreas com estruturas de estabilização implantadas												
9	Consolidação de diretrizes e metodologias para a avaliação das condições de estruturas de contenção												
10	Capacitação de pessoas												
11	Emissão de relatórios												

ITEM	DESCRIÇÃO	5º TRIMESTRE			6º TRIMESTRE			7º TRIMESTRE			8º TRIMESTRE		
		fev/16	mar/16	abr/16	mai/16	jun/16	jul/16	ago/16	set/16	out/16	nov/16	dez/16	jan/17
1	Revisão bibliográfica dos métodos não destrutivos para avaliação de integridade de sistemas de ancoragem												
2	Análise dos dados disponíveis na região em estudo e mapeamento das áreas com encostas já estabilizadas ao longo da rodovia												
3	Visitas ao sítio de estudo												
4	Concepção e implantação de uma estrutura de estabilização experimental para avaliação de metodologias de análise não destrutivas												
5	Execução de ensaios não destrutivos na estrutura experimental												
6	Investigação geotécnica para caracterização da área de estudos experimentais												
7	Calibração dos resultados obtidos com base nos estudos experimentais												
8	Análise de outras áreas com estruturas de estabilização implantadas												
9	Consolidação de diretrizes e metodologias para a avaliação das condições de estruturas de contenção												
10	Capacitação de pessoas												
11	Emissão de relatórios												

ITEM	DESCRIÇÃO	9º TRIMESTRE			10º TRIMESTRE			11º TRIMESTRE			12º TRIMESTRE		
		fev/17	mar/17	abr/17	mai/17	jun/17	jul/17	ago/17	set/17	out/17	nov/17	dez/17	jan/18
1	Revisão bibliográfica dos métodos não destrutivos para avaliação de integridade de sistemas de ancoragem												
2	Análise dos dados disponíveis na região em estudo e mapeamento das áreas com encostas já estabilizadas ao longo da rodovia												
3	Visitas ao sítio de estudo												
4	Concepção e implantação de uma estrutura de estabilização experimental para avaliação de metodologias de análise não destrutivas												
5	Execução de ensaios não destrutivos na estrutura experimental												
6	Investigação geotécnica para caracterização da área de estudos experimentais												
7	Calibração dos resultados obtidos com base nos estudos experimentais												
8	Análise de outras áreas com estruturas de estabilização implantadas												
9	Consolidação de diretrizes e metodologias para a avaliação das condições de estruturas de contenção												
10	Capacitação de pessoas												
11	Emissão de relatórios												

ITEM	DESCRIÇÃO	13º TRIMESTRE			14º TRIMESTRE			15º TRIMESTRE			16º TRIMESTRE		
		fev/18	mar/18	abr/18	mai/18	jun/18	jul/18	ago/18	set/18	out/18	nov/18	dez/18	jan/19
1	Revisão bibliográfica dos métodos não destrutivos para avaliação de integridade de sistemas de ancoragem												
2	Análise dos dados disponíveis na região em estudo e mapeamento das áreas com encostas já estabilizadas ao longo da rodovia												
3	Visitas ao sítio de estudo												
4	Concepção e implantação de uma estrutura de estabilização experimental para avaliação de metodologias de análise não destrutivas												
5	Execução de ensaios não destrutivos na estrutura experimental												
6	Investigação geotécnica para caracterização da área de estudos experimentais												
7	Calibração dos resultados obtidos com base nos estudos experimentais												
8	Análise de outras áreas com estruturas de estabilização implantadas												
9	Consolidação de diretrizes e metodologias para a avaliação das condições de estruturas de contenção												
10	Capacitação de pessoas												
11	Emissão de relatórios												

1.9 Local de execução

Os trabalhos de campo da presente pesquisa foram conduzidos ao longo do trecho sob responsabilidade da Autopista Litoral Sul, sendo avaliadas as encostas situadas nas áreas de maior risco geotécnico: Serra do Mar Paranaense - BR-376 (entre os municípios de Curitiba e Garuva) e no maciço do Morro do Boi BR-101 – entre os municípios de Balneário Camboriú e Itapema. As demais atividades foram executadas pelas entidades parceiras.

1.10 Equipe executora

A execução da pesquisa proposta envolveu a seguinte equipe:

NOME	TITULAÇÃO	VINCULAÇÃO	COMPLEMENTO	BOLSA DE RDT
Sergio S. Asakawa	Eng. Civil	Arteris	Coordenador Geral	-
Daniele Rodrigues	Mestre	Arteris	Coordenadora de Planejamento	-
Guilherme Linhares	Eng. Civil	Arteris	Engenheiro Civil	-
Samuel Mezommo	Mestre	Arteris	Coordenador	-
Alessander Kormann	Doutor	UFPR/Consultor	Coordenador	-
Liamara P. Sestrem	Doutora	Consultora	Gerente de Projeto	-
Vítor Pereira Faro	Doutor	UFPR	Pesquisador	-
Andres Gonzalez	Doutor	UFPR	Estudante	Sim
Ana Paula Mikos	Doutoranda	UFPR	Estudante	Sim
Isabela Grossi da Silva	Mestranda	UFPR	Estudante	Sim
Isaac Aguiar Oliveira	Mestrando	UFPR	Estudante	Sim
Renan Cardoso Alano	Mestrando	UFPR	Estudante	Sim
Analieth Calvo Valdés	Mestranda	UFPR	Estudante	Sim
Marion Scheffer de Andrade Silva	Mestranda	UFPR	Estudante	Sim
Thiago da Silva Ribeiro	Graduando (Eng. Civil)	UFPR	Estudante	Sim
Polyana de Jesus Roque	Graduanda (Eng. Civil)	UFPR	Estudante	Sim
Lucas Ghion Zorzan	Graduando (Eng. Civil)	UFPR	Estudante	Sim
Isabel Cristina Salah	Mestranda	UFPR	Estudante	Sim
David Bispo Ferreira	Mestrando	UFPR	Estudante	Sim
Letícia Maria Oenning	Graduanda (Eng. Civil)	UFPR	Estudante	Sim
Júlia Caroline Cardoso	Graduanda (Eng. Civil)	UFPR	Estudante	Sim
Matheus Graciano	Graduando (Eng. Civil)	UFPR	Estudante	Sim
Emanuel Sidoski	Graduando (Eng. Elétrica)	UFPR	Estudante	Sim
Victor Augusto O. Freire	Graduando (Eng. Elétrica)	UFPR	Estudante	Sim
Lino José Ambiel Júnior	Graduando (Eng. Elétrica)	UFPR	Estudante	Sim
André Laurent Farah Aliot	Graduando (Eng. Civil)	UFPR	Estudante	Sim
Larissa Roedel	Graduanda (Eng. Civil)	UFPR	Estudante	Sim
Manuela Cabral Caetano	Graduanda (Eng. Civil)	UFPR	Estudante	Não

2 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS

Nos parágrafos subsequentes, as etapas desenvolvidas ao longo do desenvolvimento do projeto serão detalhadas. Em complemento a isso, nos itens 3 a 11 do presente relatório serão descritas as técnicas, métodos, procedimentos e parâmetros técnicos adotados na execução das etapas, incluindo resultados, análises e conclusões das atividades propostas e desenvolvidas.

Etapa 1 – Revisão bibliográfica dos métodos não destrutivos para avaliação de integridade de sistemas de ancoragem

Conforme discutido na justificativa desta pesquisa, as inspeções visuais e rotineiras da prática da engenharia rodoviária privilegiam a manutenção e recuperação apenas das porções de contenções que podem ser acessadas diretamente. Os elementos enterrados (tirantes, chumbadores, fundações), fundamentais para se garantir a estabilidade das estruturas, são em geral pouco conhecidos quanto ao seu estado de conservação e à sua capacidade de resistir adequadamente aos esforços para os quais foram concebidos. Os métodos diretos de ensaio usualmente empregados, como a aplicação de esforços em tirantes pré-selecionados, podem até mesmo levá-los à ruptura e contribuir para a deflagração de processos de instabilização. Torna-se, portanto, relevante identificar processos alternativos que busquem caracterizar de forma mais completa o estado de estruturas de contenção com vistas a se direcionar intervenções de manutenção ou recuperação.

Na presente pesquisa, propôs-se conduzir inicialmente uma ampla revisão bibliográfica para caracterizar o estado da arte dos principais fatores que levam à degradação de estruturas de estabilização. Ao longo dos primeiros semestres do projeto mapearam-se os principais danos causados aos elementos do sistema de estabilização (estruturas de concreto e armaduras), mediante análise crítica de dados contidos na bibliografia nacional e internacional.

Uma vez identificados os agentes de degradação, nos meses subsequentes foram estudados os métodos não destrutivos existentes para a avaliação da integridade de estruturas de contenção, com o propósito de estabelecer o estado atual do conhecimento e, com isso, subsidiar a escolha de tecnologias aplicadas no desenvolvimento da pesquisa.

Etapa 2 – Análise dos dados disponíveis na região em estudo e mapeamento das áreas com encostas já estabilizadas ao longo da rodovia

Esta etapa envolveu o levantamento das informações do trecho rodoviário em estudo com ênfase nas estruturas de contenções existentes. A partir desse mapeamento, foram avaliadas informações referentes a trabalhos realizados nesses locais, tais como: levantamentos planialtimétricos, investigações geotécnicas e projetos de obras anteriores. Com base nessas informações, foi possível avaliar a viabilidade de implantação de uma contenção experimental no trecho em estudo ou mesmo a conveniência da execução em outro local, no intuito de aplicar métodos NDT de avaliação de integridade.

Etapa 3 – Visitas ao sítio de estudo

Diversas visitas à região de estudo durante o desenvolvimento do presente projeto foram realizadas, com o objetivo de construir o entendimento das características do conjunto de estruturas de contenção existentes, acompanhar a execução de investigações geotécnicas no campo experimental de estudos e aplicar os métodos de avaliação de integridade.

Visitas iniciais foram realizadas no ano de 2015 e no início de 2016 com o objetivo principal de reconhecimento da área e dos sistemas de estabilização implantados. Em 2016 foram realizadas visitas ao campo experimental para realização da etapa de investigação geotécnica. Em 2017 novas visitas foram realizadas durante a instalação de estrutura de contenção (vide descrição na etapa 5), compreendendo o acompanhamento e fiscalização de todas as atividades em campo, com presença ativa no sítio de estudo. Neste mesmo ano, novas visitas foram conduzidas com o objetivo de acompanhar a aplicação de uma das metodologias de ensaio não destrutivo. Nos primeiros meses de 2018 fez-se o acompanhamento e fiscalização da execução dos demais ensaios não destrutivos na estrutura de contenção experimental, além do acompanhamento e fiscalização de uma campanha de investigações geotécnicas complementares. Em 2018 ainda foram realizadas visitas nas contenções já existentes na rodovia, para escolha da contenção de cortina atirantada e de solo grampeado para realização de ensaios não destrutivos, além das visitas destinadas à realização dos ensaios.

Etapa 4 – Investigação geotécnica para caracterização da área de estudos experimentais

Esta etapa compreendeu a programação e realização de uma campanha de investigação geotécnica para a descrição das propriedades do terreno presente na área de estudo

experimental. O estudo envolveu a realização de nove sondagens a percussão (SPT) e ensaios de laboratório (caracterização geotécnica completa e resistividade elétrica) em seis amostras coletadas no campo.

O ensaio de resistividade elétrica em laboratório consiste em se medir a resistividade do solo à passagem de corrente elétrica. Como resultado, obtém-se uma curva de condutividade com diferentes incrementos de corrente (Boszczowski, 2008). Nesta etapa da pesquisa se buscou interpretar a resposta resistiva do terreno de forma associada à sua estratigrafia e estado (umidade e índice vazios), informações que embasaram a interpretação crítica de resultados obtidos com as técnicas NDT.

Assim, as atividades da etapa 4 podem ser resumidas da seguinte forma:

- Concepção e planejamento do programa de investigações;
- Execução da investigação geotécnica (sondagens SPT, coleta de amostras e ensaios de laboratório);
- Análise e interpretação dos resultados (realizada em conjunto com a etapa 7).

Etapa 5 – Concepção e implantação de uma estrutura de estabilização experimental para avaliação de metodologias de análise não destrutivas

Esta etapa consistiu em conceber e implantar um sistema de estabilização composto por elementos estruturais íntegros e com anomalias conhecidas, em uma área previamente definida, desta forma se materializou um campo experimental de estudos.

Para tal, primeiramente foi necessário o desenvolvimento de uma atividade de planejamento e detalhamento da estrutura de contenção, que se estendeu de abril a dezembro de 2016. A escolha do local foi baseada na quantidade e qualidade de informações existentes, bem como condições de acesso e facilidade de delimitação de condições de contorno consideradas relevantes para o trabalho experimental. A inclusão de elementos estruturais com anomalias visou simular defeitos causados por degradação nas estruturas de concreto estrutural e ação de corrosão em componentes metálicos usualmente empregados em ancoragens ativas e passivas. O uso de elementos íntegros buscou criar padrões para comparação com as medições realizadas nas peças com anomalias conhecidas.

A segunda atividade desta etapa envolveu a materialização propriamente dita da estrutura de contenção, a qual teve início em fevereiro de 2017 e conclusão em abril deste mesmo ano. Foram programadas investigações geotécnicas complementares para o mapeamento da estratigrafia do local escolhido, conforme descrito na etapa 4.

Etapa 6 – Execução de ensaios não destrutivos na estrutura experimental

Após a concepção e execução da estrutura experimental e definição da metodologia de análise com base em ensaios não destrutivos, os mesmos foram aplicados e seus resultados avaliados criticamente. Foram realizados no mínimo 10 ensaios em cada um dos 27 tirantes e dos 30 grampos implantados na contenção experimental, totalizando mais de 500 resultados a partir da combinação das diferentes técnicas, pontos variados dos componentes em concreto e elementos metálicos do sistema implantado.

Etapa 7 – Calibração dos resultados obtidos com base nos estudos experimentais

Os resultados obtidos com os ensaios NDT no campo experimental foram interpretados com vistas a avaliar criticamente sua capacidade de identificar as anomalias simuladas. A viabilidade de calibração dos resultados, com a finalidade de aumentar a acurácia dos procedimentos, também foi objeto de análise. O estudo do potencial de uso e limitações inerentes às diferentes técnicas buscou envolver, em maior ou menor grau, os seguintes aspectos:

- Falsos positivos e falsos negativos;
- Atenuação de sinais no concreto / aço;
- Diferenças de comportamento entre barras de aço livres e solidarizadas a argamassa ou concreto;
- Sensibilidade a diferentes níveis de protensão;
- Influência do meio externo – propriedades geelétricas do terreno;
- Técnicas avançadas de processamento de dados brutos.

As atividades desenvolvidas nesta etapa podem ser detalhadas da seguinte forma:

- Avaliação dos resultados dos ensaios NDT, buscando-se qualificar sua capacidade de identificar as reais condições e anomalias implantadas na área experimental;
- Reprocessamento de sinais brutos e pesquisa de possibilidades de calibração dos resultados.

Deve-se observar que, em geral, a interpretação dos sinais obtidos com métodos NDT é realizada através de *softwares* comerciais de processamento, desenvolvidos especificamente para esta finalidade. Nesses pacotes computacionais, encontram-se implementados modelos matemáticos de filtragem e avaliação das ondas acústicas ou das correntes elétricas induzidas e captadas pelos equipamentos usados no campo durante a investigação.

Etapa 8 – Análise de outras áreas com estruturas de estabilização implantadas

Uma vez concluída a análise crítica dos resultados das metodologias NDT, foram selecionadas duas contenções para se testar sua aplicação sob condições reais, com isto, foi possível subsidiar o trabalho a ser desenvolvido na etapa subsequente. O escopo envolveu seis tipologias de estabilização distintos ao longo do trecho de estudo e em cada obra selecionada foram realizados pelo menos dez testes NDT.

As seguintes atividades foram desenvolvidas nesta fase do projeto:

- Seleção e planejamento do programa de ensaios com base nas informações reunidas nas etapas precedentes;
- Execução dos ensaios em campo com as técnicas NDT selecionadas na atividade anterior;
- Análise crítica dos resultados.

Etapa 9 – Consolidação de diretrizes e metodologias para a avaliação das condições de estruturas de contenção

Nesta etapa foram consolidados procedimentos práticos de avaliação de contenções, propondo-se diretrizes para a análise e manutenção de estruturas de contenção no trecho estudado bem como em outras rodovias operadas pela concessionária.

Etapa 10 – Emissão de relatórios

Os resultados parciais obtidos em cada etapa de trabalho foram apresentados em relatórios semestrais de acompanhamento, entregues nos meses de janeiro e julho de acordo com cronograma estabelecido pela ANTT. Os resultados da pesquisa encontram-se consolidados no presente relatório final.

Etapa 11 – Capacitação de pessoas

Esta etapa se refere à participação do corpo técnico do projeto de pesquisa no Workshop de Recursos de Desenvolvimento Tecnológico, promovido pela ANTT anualmente no mês de agosto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DOS MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS PARA AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE DE SISTEMAS DE ANCORAGEM

3.1 Contextualização

De modo geral, os procedimentos de manutenção previstos para avaliação de estruturas de contenção existentes envolvem inspeções visuais periódicas. Tais procedimentos visam detectar, por exemplo: erosão dos taludes, quedas de barreiras, trincas ou abatimentos nas pistas e acostamentos, desprendimentos de blocos nos cortes em rochas e necessidade de recomposição do revestimento vegetal ou de limpeza nos dispositivos de drenagem das estruturas de contenção (DNIT, 2005).

Contudo, o controle e verificação da integridade de elementos enterrados tais como tirantes, grampos e fundações, no que diz respeito ao seu estado de conservação e capacidade de atingir os esforços para os quais foram projetados, representa um desafio à manutenção dessas estruturas. A utilização de ensaios de arrancamento onde aplicam-se esforços em tirantes pré-selecionados representa uma alternativa comum na prática de engenharia, porém pode provocar danos ao elemento e refletir em processos de instabilização do talude.

Com base nesse contexto, propôs-se a realização de uma extensa revisão bibliográfica para avaliação das metodologias de ensaios não destrutivos utilizados nacional e internacionalmente para avaliação de estruturas de contenção. Para tal, inicialmente apresenta-se uma breve descrição sobre as principais técnicas de estabilização existentes.

3.1.1 Sistemas de estabilização

Dentre as diferentes técnicas de estabilização usualmente empregadas, citam-se três grandes grupos de acordo com sua finalidade: sistemas de drenagem (redução da poropressão), retaludamento e reconstrução de aterro (modificações na geometria da encosta) e um terceiro grupo composto por muros de arrimo, solos grampeados, tirantes, estacas, entre outros, que se classificam como estruturas de estabilização com elementos externos. Em alguns casos, a solução adotada pode envolver o uso combinado dessas metodologias, como por exemplo a execução de um retaludamento com inclusão de sistemas de drenagem (Sestrem, 2012).

Os sistemas de estabilização mais comumente utilizados para a contenção de taludes naturais ou sujeitos a instabilização são formados por duas estruturas principais: tirantes e grampos (chumbadores). A estabilização do solo através dessas estruturas é obtida tanto pelo aumento da força normal e consequentemente da resistência ao cisalhamento do solo ao longo das superfícies de deslizamentos potenciais, como pela redução dos esforços solicitantes ao longo dessas superfícies (Jayawickrama *et al.*, 2007).

Os sistemas de estabilização com grampos são formados por barras de aço fixas com calda de cimento ou resina, podendo ser utilizados tanto para conter blocos isolados, como para fixar obras de concreto armado. Esses chumbadores podem ser instalados horizontalmente ou sub-horizontalmente, aumentando assim a resistência ao cisalhamento do maciço devido basicamente ao seu trabalho à tração (Franco, 2010).

Cabe salientar ainda que a execução de tirantes se diferencia principalmente por um pré-tensionamento (protensão) desses elementos, desta forma evita-se deslocamentos da cortina. Nos grampos, esta tensão é muito pequena e visa apenas garantir a ligação do concreto projetado com o solo, portanto, considerados elementos passivos. A utilização de tirantes requer elementos mais longos e, consequentemente, a necessidade de equipamentos de maior porte que refletem em maiores custos de execução (Ortigão *et al.*, 1993). A integridade desses elementos depende do seu estado de conservação e capacidade de atingir os esforços aos quais foram projetados, sendo essa avaliação de natureza complexa.

A Figura 1 apresenta um comparativo indicando a distribuição de tensões com o uso de grampos e tirantes. Verifica-se que na solução com grampos os esforços são transmitidos para o solo ao longo de todo o seu comprimento, diferentemente do que ocorre no caso das paredes atirantadas, projetadas para resistir ao puncionamento gerado pelas cargas nos tirantes.

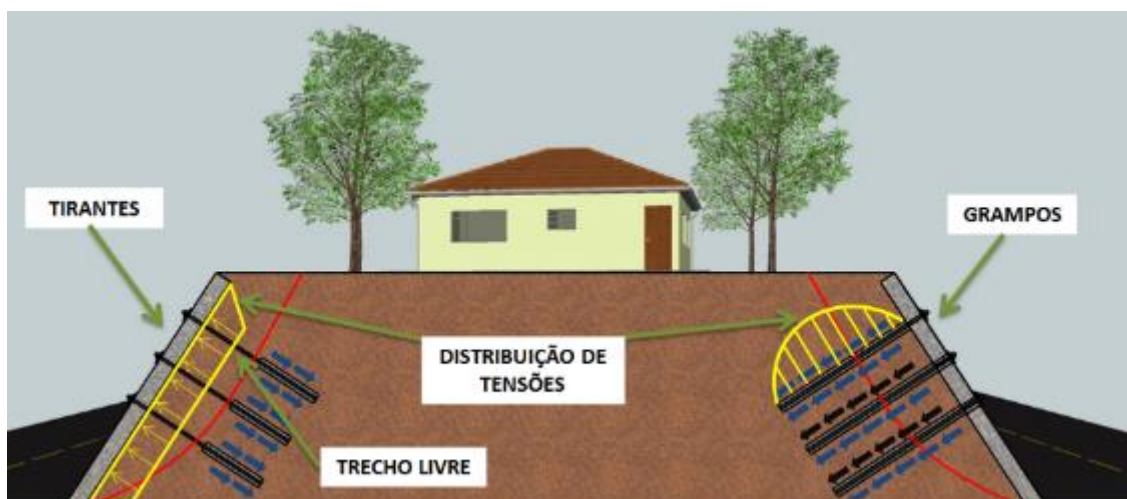


Figura 1 - Comparativo da utilização de sistemas de contenção com tirantes e grampos

FONTE: Sestrem (2012)

Segundo Jayawickrama *et al.* (2007), locais 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.

Com relação ao processo executivo, a construção de cortinas atirantadas é feita de maneira progressiva e descendente de acordo com o avanço das escavações, podendo ser dividida nas seguintes etapas: escavação de corte para a primeira linha de tirantes, perfuração do solo e instalação do tirante e preenchimento do furo com nata de cimento para formar o bulbo de ancoragem. Após o endurecimento dessa nata, os cabos do tirante são protendidos e ancorados junto às placas de concreto (Massad, 2010).

A sequência construtiva das cortinas grampeadas é similar, diferenciando-se pela injeção de nata ao longo de todo o comprimento do grampo e pela ausência de protensão. Com isso, a geometria da face torna-se mais esbelta, podendo ser realizada apenas com concreto projetado ou ainda com o uso de telas metálicas flexíveis.

3.1.2 Patologias nos sistemas de contenção

As patologias estão diretamente associadas ao método construtivo utilizado na estrutura de estabilização. Enquanto no solo grampeado as ancoragens apresentam todo o furo

preenchido com calda de cimento, nos tirantes, a injeção é realizada somente na ponta do elemento de fixação, desta maneira origina-se um bulbo de ancoragem e um trecho livre. Além disso, no solo grampeado o concreto projetado utilizado na parede não tem função estrutural, enquanto na cortina atirantada o paramento de concreto é uma estrutura de reação.

Jayawickrama *et al.* (2007) indicam que os problemas relacionados com os grampos ocorrem principalmente devido ao preenchimento incompleto do furo com a calda de cimento, visto que essa é uma condição essencial para garantir o desempenho deste tipo de estrutura de contenção. Souza *et al.* (2005) salientam que quando ocorrem falhas em solo grampeado, além de avaliar os detalhes executivos do chumbador, também é necessário verificar o revestimento do paramento e o sistema de drenagem. Os mesmos autores executaram um campo experimental para avaliar os detalhes executivos da contenção com grampos, foi constatado que quando a injeção é realizada somente com bainha, a exsudação da calda de cimento provoca vazios no furo com um preenchimento incompleto, como mostra a Figura 2.



Figura 2 – Chumbador parcialmente escavado com vazios

FONTE: Souza *et al.* (2005)

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 aos seguintes problemas:

- Problemas construtivos decorrentes da instalação das ancoragens ou execução de testes de qualidade (Figura 3a, Figura 3c);

- Preenchimento ineficiente dos furos com nata de cimento (causado normalmente pela falta de centralizadores, ausência de tubo guia, consistência da nata muito rígida ou muito fluída) (Figura 3b, Figura 3d, Figura 3e).
- Execução de perfurações menores que o comprimento das ancoragens (Figura 3f);



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3 – Exemplos de problemas construtivos em estruturas de contenção: (a) problemas executivos em alguns elementos de drenagem; (b) arrancamento devido a preenchimento incompleto do furo; (c) falta de centralização do tirante; (d) nata de cimento com consistência muito rígida; (e) nata de cimento com consistência muito fluida e (f) comprimento da perfuração inferior ao comprimento do tirante

FONTE: Jayawickrama et al. (2007)

Shiu & Cheung (2003) afirmam que a degradação de estruturas de contenção normalmente está associada a uma soma de fatores dos quais, citam-se: falhas no preenchimento do furo com calda de injeção, falta de proteção anticorrosiva nas barras, potencial corrosivo do solo e presença de água no maciço.

Dois estudos de caso para mapeamento da ocorrência de corrosão em solo grampeado foram avaliados por Shiu & Cheung (2003). No primeiro, realizado no Japão, foram exumados 9 grampos que estavam instalados há aproximadamente 10 anos. A ocorrência de processos corrosivos foi identificada em 7 dos 9 grampos, estando presente com maior intensidade próximo à cabeça dos mesmos. Os autores atribuem a ocorrência dessa patologia a irregularidades no preenchimento dos furos com argamassa, principalmente próximo à cabeça e nas regiões mais profundas dos furos. No segundo caso, em Hong Kong, dois grampos instalados há nove anos foram escavados e expostos para inspeção visual. Em um dos grampos, a calda de cimento estava intacta e não foi identificado nenhum sinal de corrosão. Em contrapartida, o segundo grampo apresentou pontos de corrosão devido a falhas no preenchimento do furo, este fato ressalta a importância da boa prática executiva de solo grampeado, no qual a nata de cimento assume um papel fundamental na proteção dos grampos.

Em cortinas atirantadas, as principais patologias e acidentes ocorrem devido à ruptura do tirante por processos de corrosão, normalmente na zona livre e próximo à cabeça. Pitta *et al.* (2006) e Peccin (2014) avaliaram obras com mais de 30 anos de execução em São Paulo e no Rio Grande do Sul e constataram 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.

Machado & Mendes (2014) e Peccin (2014) também identificaram patologias em cortinas atirantadas antigas, dentre as quais, citam-se: fissuras e trincas, lascas, eflorescências, líquens, exposição das cabeças e das placas dos tirantes e surgência de água em diversas regiões.

A primeira norma brasileira desenvolvida para regulamentar a construção de estruturas de contenção foi a NBR-5629 - Estruturas Ancoradas no Terreno - Ancoragens Injetadas no Terreno - Procedimento, publicada inicialmente em 1975 e revisada pela última vez em 2006. Apesar disso, Pitta *et al.* (2006) afirmam que grande parte das estruturas existentes foi construída apenas com base em procedimentos internos das empresas executoras, os quais nem sempre refletiam padrões de qualidade suficientes para evitar problemas ao longo da vida útil das obras.

3.1.3 Métodos não destrutivos

A utilização de métodos não destrutivos (MND) para a avaliação de estacas escavadas ou pré-moldadas representa uma prática comum e reconhecida há muitos anos. Apesar da similaridade entre estruturas de contenção (cortinas atirantadas ou solos grampeados) e elementos de fundação, existem poucos registros de aplicação de MND com essa finalidade.

De modo geral, esses ensaios funcionam com base no princípio da propagação de ondas de tensões ou eletromagnéticas através de materiais como concreto, aço e madeira (Jayawickrama *et al.*, 2007). A aplicação de métodos não destrutivos em estruturas de contenção como cortinas atirantadas e solos grampeados, representa uma alternativa de ensaio estudada, principalmente, em âmbito internacional. Como parte do escopo desenvolvido ao longo do desenvolvimento do presente projeto, uma extensa revisão bibliográfica buscou

identificar as principais metodologias de ensaio com histórico de uso. As principais técnicas estudadas, com os respectivos autores, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Métodos não destrutivos em solo grampeado

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

FONTE: Mikos (2017)

Com base em uma análise crítica desses trabalhos com ênfase na identificação das melhores alternativas de ensaio para verificação da integridade e características das barras de aço (grampos e tirantes) e da nata de cimento inseridas nas estruturas de contenção, foram selecionadas três técnicas para aplicação: *Sonic Echo*, *Time Domain Reflectometry* (TDR), *Reflectometric Impulse Measurement Technique* e Resistência elétrica. Nos itens subsequentes, uma breve descrição sobre cada um desses métodos será apresentada.

3.2 Resultados

3.2.1 Sonic Echo

Segundo Cheung (2003) trata-se de um ensaio cuja metodologia se baseia no mesmo princípio utilizado nos ensaios de integridade em estacas (PIT). O procedimento envolve a análise da geração, transmissão e recepção de uma onda acústica na ancoragem a ser testada, obtida normalmente pelo golpe de um martelo de mão (entre 1 e 2 kg). Um ou mais acelerômetros são instalados na calda de cimento para registro da vibração da barra.

A passagem da onda ao longo do comprimento do grampo é afetada por: (i) força de excitação inicial, (ii) propriedades físicas do grampo e da calda de cimento, e (iii) propriedades físicas do solo em torno do grampo. Como na ponta do grampo ocorre uma mudança significativa nas propriedades físicas (mudança de material), é comum a ocorrência de uma grande reflexão de onda nesse local. A Figura 4 apresenta um desenho esquemático com o princípio de funcionamento desse ensaio e a Figura 5 um exemplo de resultado obtido com a sua aplicação.

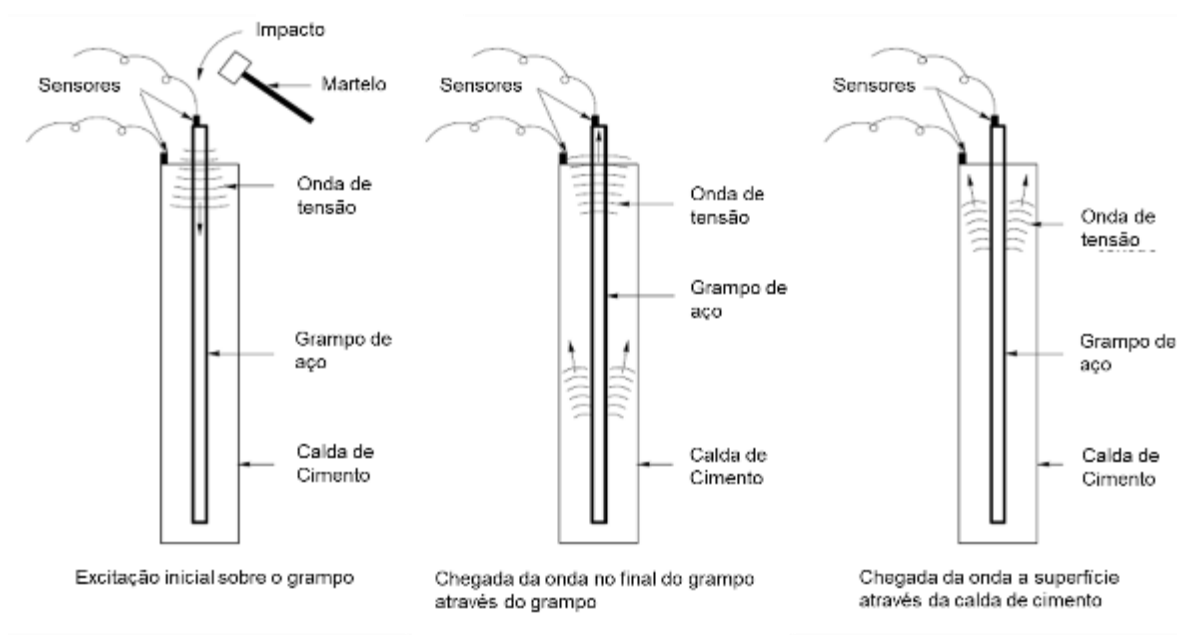
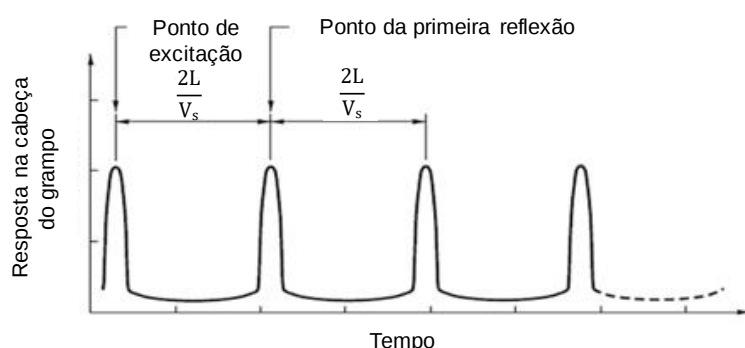


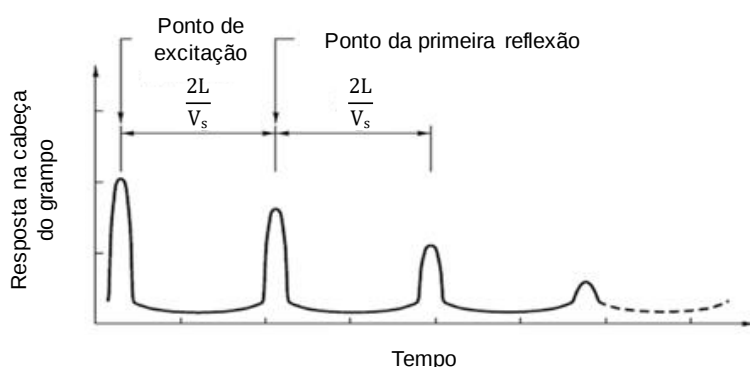
Figura 4 – Desenho esquemático com o procedimento do ensaio Sonic Echo

FONTE: Adaptado de Cheung (2003)

Um caso hipotético, no qual não há atenuação do sinal da onda ao longo do elemento, é retratado na Figura 5a que tem por objetivo mostrar a excitação e reflexão desta no elemento. Na prática, a energia da onda é dissipada como resultado do efeito de amortecimento. Em algumas situações, a energia aplicada pode não ser suficiente a onda alcançar a ponta do elemento em teste e o resultado obtido será parecido com o apresentado na Figura 5b. A atenuação do sinal acontece progressivamente, sendo um fenômeno normal de absorção da energia pela refração lateral do elemento. Para aumentar a qualidade do processamento dos dados do ensaio, um filtro de alta frequência para atenuar os sinais e vibrações não desejados pode ser utilizado, ampliando a resposta por uma equação exponencial para compensar o amortecimento e identificar a primeira onda de reflexão do final do grampo (Lee & Arup, 2007).



(a) Formato de onda ideal obtida a partir do Ensaio Sonic Echo



(b) Formato de onda ideal para leitura de amortecimento obtida a partir do Ensaio Sonic Echo

Figura 5 – Exemplo de resultado do ensaio Sonic Echo

FONTE: Adaptado de Cheung (2003)

Quanto ao processo executivo, Jayawickrama *et al.* (2007) descrevem algumas possíveis variações: o acelerômetro pode ser colocado na calda de cimento ou no aço, o local

de impacto pode ser a calda ou o aço e o tipo do martelo pode ser de alumínio ou de plástico (Figura 6).

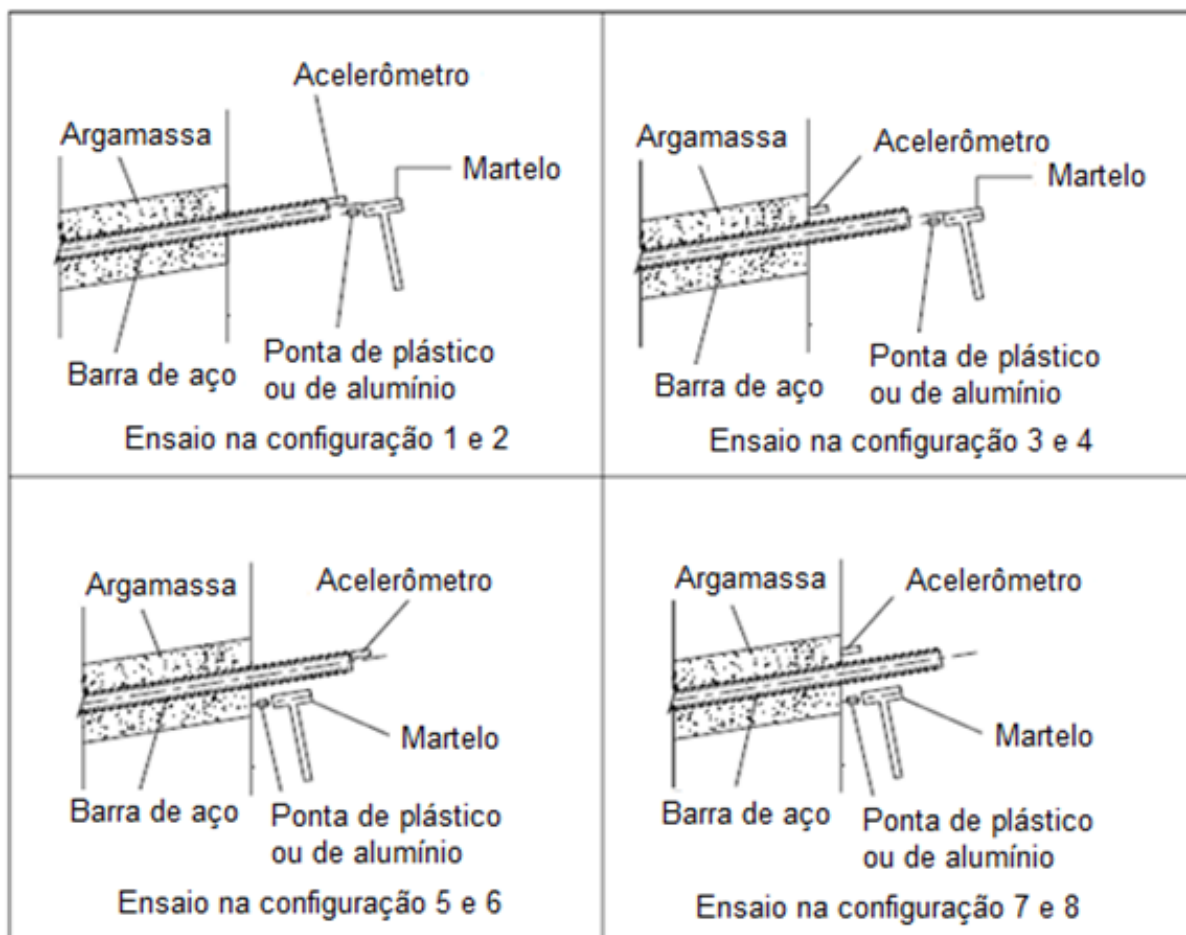


Figura 6 – Diferentes configurações do método Sonic Echo

FONTE: Adaptado de Jayawickrama et al (2007)

Em relação ao local de impacto, o autor conclui que a configuração com o acelerômetro e impacto no aço deve ser evitada, a menos que a calda de cimento próximo a cabeça do grampo não apresente boa qualidade, com grande quantidade de vazios, impossibilitando a instalação do acelerômetro. Quando executado com a aplicação de ambos dispositivos no aço há pouco espaço para a execução de um impacto de boa qualidade, além das ondas geradas apresentarem muitas vibrações transversais devido à alta quantidade de ruído provocado pela batida e leitura da onda na barra.

A configuração do acelerômetro no aço e o impacto na calda de cimento se mostrou satisfatória segundo esse estudo no que diz respeito à capacidade do *Sonic Echo* em detectar

defeitos importantes. No entanto, não é a mais recomendada, pois caso haja defeito na argamassa próximo à cabeça, a aplicação do impacto na calda de cimento faz com que o grampo se comporte como uma placa fina e a resposta gravada pelo acelerômetro apresente mais ruídos (Jayawickrama *et al.*, 2007).

Ao instalar o acelerômetro na argamassa e gerar o impacto no aço, a resposta tende a ser mais confiável pois a batida no aço aumenta a qualidade do impacto visto que este material não deve apresentar defeito logo após a execução da obra e se estende na totalidade do grampo.

Por fim, ensaios onde o acelerômetro e o impacto são gerados na calda de cimento dependem essencialmente da boa condição da argamassa na parte próxima à cabeça. Jayawickrama *et al.* (2007) afirmam que a melhor configuração do ensaio é o impacto com o martelo aplicado na barra e o acelerômetro instalado na calda de cimento quando não se tem certeza da condição da calda de cimento perto da cabeça do grampo.

Com relação ao tipo de martelo, a Tabela 2 apresenta um comparativo com características dos martelos de plástico e de alumínio.

Tabela 2 – Característica do martelo de plástico e de alumínio

<i>Martelo de plástico</i>	<i>Martelo de alumínio</i>
<i>Ondas de menores frequências;</i>	<i>Ondas de maiores frequências;</i>
<i>A dissipação é mais lenta;</i>	<i>A dissipação da onda ocorre mais rapidamente;</i>
<i>Pela menor atenuação a onda percorre maiores comprimentos;</i>	<i>Com maior dissipação, percorre menor comprimento do grampo;</i>
<i>Possível detecção de falhas mais profundas;</i>	<i>Usados para detecção de defeitos menores e localização mais próxima à superfície.</i>

FONTE: Adaptado de Jayawickrama et al. (2007).

Cheung (2003) realizou esse ensaio em 30 grampos com o golpe sendo aplicado na barra de aço e o acelerômetro instalado na barra ou na argamassa, sendo, contudo, obtidos os seguintes resultados: erros acima de 10% em 27% dos casos, 20% com resultados inconclusivos e 53% tiveram erros inferiores a 10%. Ressalta-se a ausência dos gráficos obtidos nos ensaios no referido estudo, impossibilitando com isso uma análise crítica desses resultados.

O Departamento de Transportes do Texas desenvolveu uma pesquisa sobre métodos não destrutivos (NDT) para avaliação da instalação de grampos no solo e concluiu que a metodologia é promissora para determinação da integridade da calda de cimento em solo grampeado para elementos de até 4,5 m, porém salienta que a aplicação desta técnica deve ser aprimorada principalmente para elementos entre 6,00 e 7,60 m (Jayawickrama et al., 2007).

O estudo apresentado por Cheung & Lo (2005) concluiu que a qualidade dos resultados obtidos pelo método *Sonic Echo* está associada a existência de um profissional qualificado para conduzir o ensaio e interpretar os resultados. Os autores ressaltam também a dificuldade em diferenciar as reflexões da onda que deveriam ser consideradas como fundamentais e as secundárias.

3.2.2 *Time Domain Reflectometry e Reflectometric Impulse Measurement Technique*

O método *Time Domain Reflectometry* (TDR) é baseado na reflectometria, com princípio de radar em circuito fechado, medindo-se o tempo em que sinais elétricos de alta frequência se propagam em um determinado meio. Quando um impulso elétrico é gerado, qualquer descontinuidade será refletida e com as características destes ecos (ondas), como o tempo de percurso e velocidade de transmissão, a localização da anomalia pode ser identificada (Cheung, 2003). Para aplicação da técnica é necessária a utilização de um fio elétrico paralelo a barra (Cheung 2003, Lee e Arup 2007, Jayawickrama et al. 2007), ou de um cabo coaxial (Chung et al. 2015).

Jayawickrama et al. (2007) relatam que a técnica TDR foi inicialmente estabelecida no campo da engenharia elétrica, com principal aplicação em linhas de transmissão e utilização também na engenharia geotécnica e na mineração. Recentemente, estudos avaliaram a capacidade do método detectar corrosão em barras de aço e em cabos protendidos. Um esquema explicativo para interpretação de ensaios baseados em reflectometria pode ser observado na Figura 7.

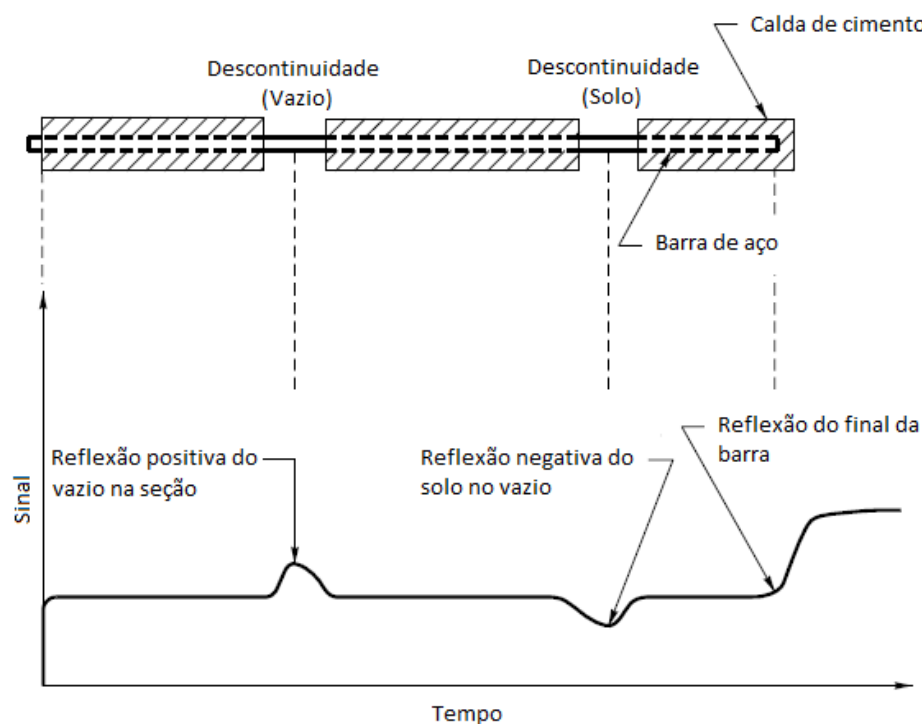


Figura 7 – Esquema explicativo para interpretação dos métodos baseados em Reflectometria

FONTE: Adaptado de Cheung & Lo (2005)

Como a impedância, ou resistência elétrica, da calda de cimento é maior que a do ar, haverá uma reflexão positiva no sinal pela maior facilidade da passagem de corrente elétrica neste trecho da barra. No entanto, se o vazio for preenchido com solo, cuja impedância é maior que a da calda de 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 é 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. As principais variáveis que interferem na estimativa do comprimento são o tempo que o pulso leva da cabeça à extremidade e a velocidade de propagação do pulso considerada. Incertezas associadas a qualquer um desses fatores podem levar a resultados menos precisos nos ensaios (Cheung, 2006).

Inicialmente, o procedimento de ensaio envolve ainda uma técnica de calibração no qual o instrumento TDR deve ser ligado à cabeça do grampo e então pulsos elétricos curtos e longos

são enviados e os tempos de reflexão registrados. Essa etapa possibilita o cálculo da média da velocidade de propagação do impulso em grampos com comprimento conhecido. Com a velocidade calibrada, estas etapas podem ser repetidas nos grampos a serem testados para determinação do seu comprimento.

Cheung (2003) utilizou em seu trabalho um fio elétrico instalado junto com o a calda de cimento a fim de melhorar a precisão desta técnica. O autor descreve que o fio deve ser isolado eletricamente do grampo para evitar corrosão resultante do contato entre esses diferentes tipos de metais. O trabalho testou a aplicação do TDR com fio pré-instalado e os erros na determinação do comprimento de grampos de 6 m variaram entre 0,1 e 0,2 metros, caracterizando, dessa forma, uma alta confiabilidade da técnica (erros inferiores à 3%).

Cheung & Lo (2011) também testaram o TDR em barras de 8, 12 e 14 metros, totalmente preenchidos com calda de cimento e com fio pré-instalado, buscando identificar fatores que poderiam alterar os resultados. Os resultados indicaram que o tempo de propagação do pulso é proporcional ao comprimento da barra. Assim, o tamanho do grampo pode ser estimado com o conhecimento da velocidade do pulso, obtido na calibração, e com o tempo de propagação, alcançado no ensaio (Figura 8).

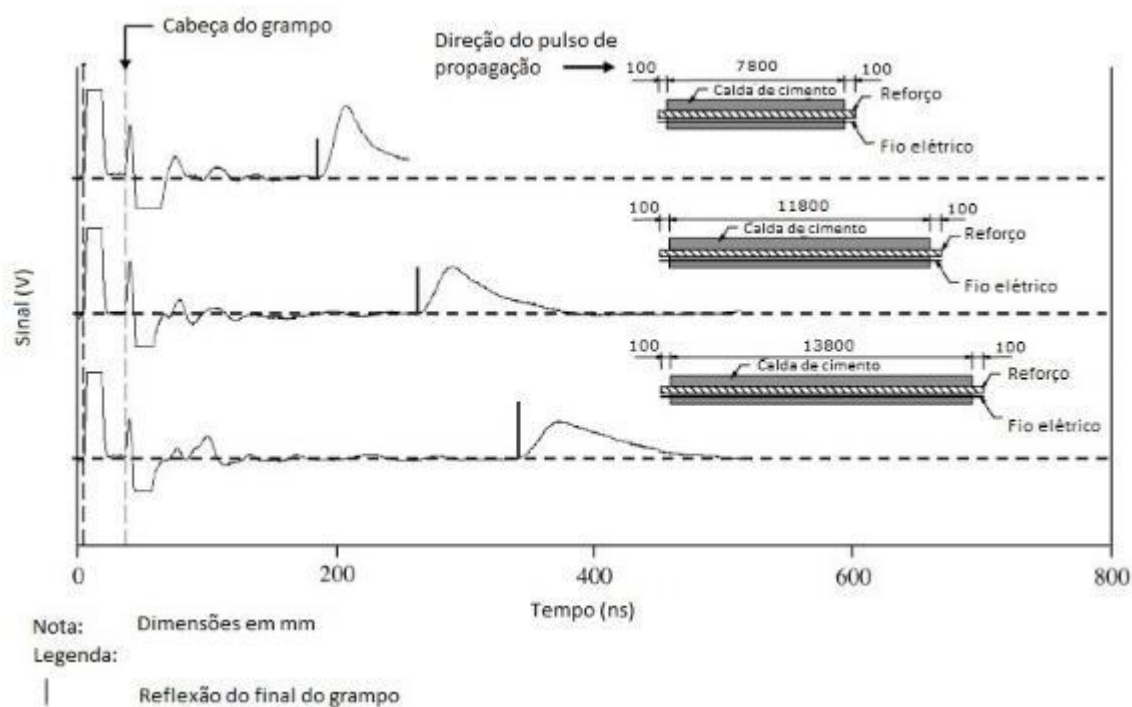


Figura 8 – Determinação do comprimento com o método TDR

FONTE: Adaptado de Cheung & Lo, 2011

Os autores concluíram também que as maiores interferências ocorrem quando a leitura das reflexões é feita por vários operadores, com a variação do tipo de fio e quando existem incertezas quanto à integridade da calda. No entanto, variáveis como: idade da calda de cimento, diâmetro dos grampos, diâmetro do furo e presença de emendas, não afetaram significativamente os resultados. Com base nos resultados obtidos mapeou-se um erro de $\pm 6,6\%$ que, devido aos fatores apresentados anteriormente, determinaram uma precisão de 91%, com erros de $\pm 9\%$, na aplicação do método TDR.

De acordo com Tang & Cheng (2014) a utilização do fio elétrico permite ainda detectar defeitos na calda de cimento quando a área comprometida é maior que 30% do comprimento total do grampo. Um exemplo com as reflexões obtidas nos ensaios TDR é apresentado na Figura 9 onde falhas com ar no final das barras foram identificadas. Os gráficos apresentam um retorno do pulso anterior ao da barra íntegra e que indica ser proporcional ao tamanho das falhas.

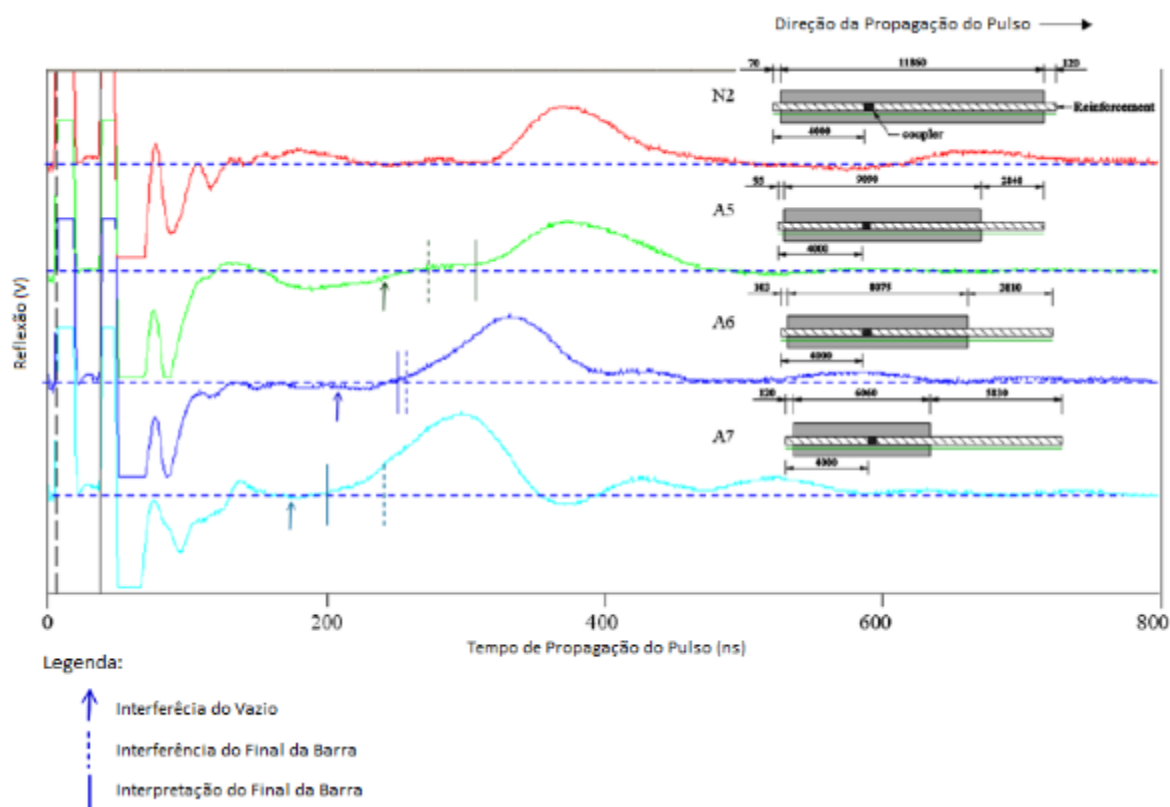


Figura 9 – Exemplo de resultados do Método TDR

FONTE: Adaptado de Tang & Cheng (2014)

Outros estudos recomendam ainda a aplicação do TDR com utilização de um cabo coaxial com base no mesmo princípio do fio elétrico. Chung *et al.* (2016) sugerem a utilização desse cabo conforme esquema ilustrativo apresentado na Figura 10. Observa-se que é possível realizar o ensaio somente no cabo coaxial e determinar o comprimento do cabo e da barra, uma vez que estes tenham o mesmo comprimento. O ensaio também pode ser realizado entre a barra de aço e o fio externo do cabo coaxial, para identificar eventuais falhas na calda de cimento.

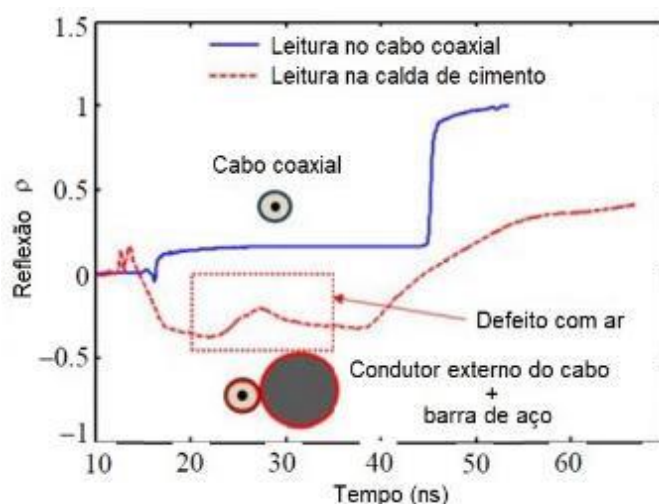


Figura 10 – Esquema do método TDR

FONTE: Adaptado de Chung et al., 2016

Ainda segundo o *National Cooperative Highway Research Program*, a reflectometria apresenta dois conceitos: o primeiro é o TDR (reflectometria no domínio do tempo), que requer a instalação prévia de um fio elétrico na estrutura. O segundo, também denominado *Surface Wave Time Domain Reflectometry* (SW-TDR), vem sendo estudado para potencial uso em concreto protendido, com a vantagem de não necessitar do fio pré-instalado e empregar apenas uma antena externa e um fio-terra para medição dos ecos gerados pelo impulso elétrico de alta frequência (Ciolko & Tatabai, 1999). Para realização do ensaio dessa forma, torna-se necessária uma modificação do equipamento TDR para que o pulso elétrico gere excitação suficiente na superfície da barra. Além disso, na prática, o eco apresenta menor intensidade, podendo com isso introduzir grandes erros nos dados interpretados (Cheung, 2003), principalmente por gerar reflexos que podem ser influenciados até por fatores externos (Lee e Arup, 2007).

Uma vertente do método SW-TDR foi registrada como *Reflectometric Impulse Measurement Technique* ou “Técnica da Medição da Reflectometria de Impulso”, e representa, portanto, uma variante do TDR, desenvolvida 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).

3.2.3 Método da Resistência Elétrica

O método consiste na medição da resistência elétrica entre a barra de aço e todo o solo ao seu redor. Cheung & Lo (2005) descrevem a resistência total do elemento como sendo compreendida pela resistência da barra de aço, de contato entre a barra e a calda de cimento, radial da calda de cimento e entre a calda de cimento e o solo. Segundo Lee & Arup (2007) é preciso considerar ainda a resistência radial do solo circundante à barra.

Em condições normais, a resistência da barra tende a ser desprezível quando comparada com as demais, devendo, entretanto, ser considerada quando da ocorrência de corrosão com acúmulo significativo de ferrugem. A resistência de contato é relativamente pequena e varia com a presença de proteção anticorrosiva da barra. A resistência radial depende do raio do furo e da mobilidade iônica no interior da calda de cimento. Com relação ao solo, a resistividade depende de sua homogeneidade, teor de umidade, teor de argila e condutividade iônica da água subterrânea (Cheung & Lo, 2005). A presença de maciços rochosos também pode interferir na resistividade, ainda que em menor grau, pois a corrente é radial e atua em todas as direções (Lee & Arup, 2007).

Para determinação da resistência elétrica do elemento são instalados dois eletrodos de aço inoxidável (corrente e potencial) em uma profundidade de 0,5 a 1 metro abaixo do nível do solo e a uma distância linear de no mínimo 20 e no máximo 50 metros entre eles e o local do teste (Cheung & Lo, 2005).

Um esquema ilustrativo do ensaio por resistência elétrica é apresentado na Figura 11. O procedimento envolve a aplicação de uma corrente elétrica na barra de aço, que retorna no eletrodo de corrente e é medido pelo eletrodo de potencial através da diferença do potencial elétrico entre a barra e o solo ao seu redor. Para manter o sistema em equilíbrio, o método utiliza corrente alternada evitando polarização dos eletrodos. A resistência total é dada pela relação entre a tensão e corrente elétrica. A tensão é gerada entre o eletrodo de potencial e a cabeça da barra e medida através do voltímetro. A intensidade da corrente é obtida entre o eletrodo de corrente e a barra pelo amperímetro. Em alguns casos, a resistência elétrica é fornecida diretamente pelo equipamento, não sendo necessário ser calculada (Lee & Arup, 2007).

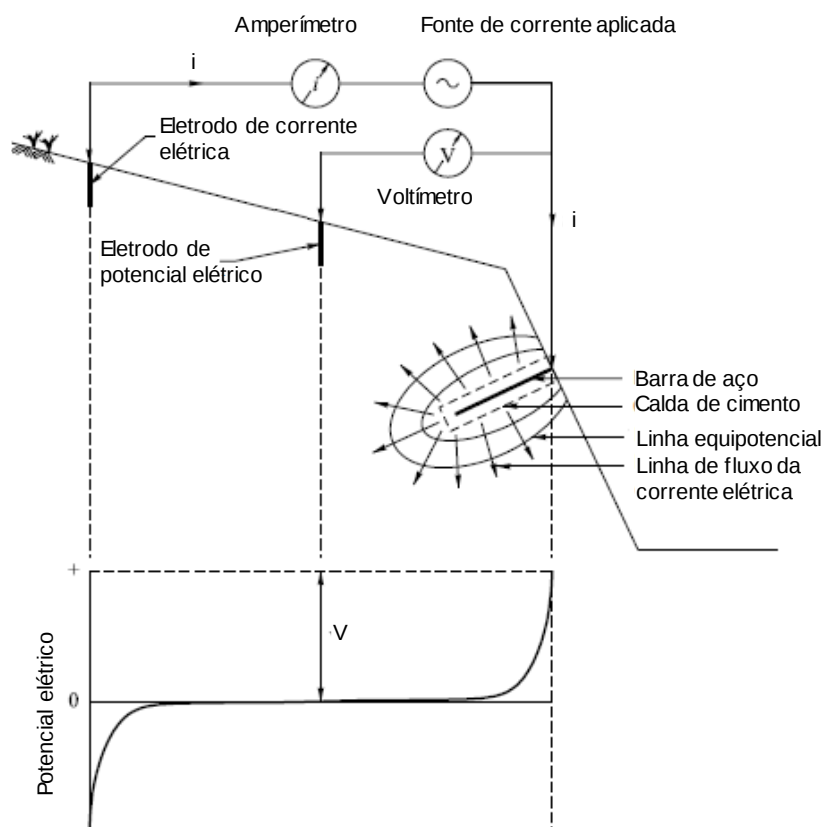


Figura 11 – Método da Resistência Elétrica: esquema ilustrativo

FONTE: Adaptado de Cheung & Lo (2005)

De acordo com Lee & Arup (2007) as medições normalmente são realizadas ao longo de linhas horizontais de barras, devendo ser executados, no mínimo, 10 ensaios com cada barra para estabelecer valores consistentes, onde as medições podem ser agrupadas de forma a se estabelecer um mapa de resistência baseado em métodos estatísticos.

Segundo Lee & Arup (2007), as variações de resistência refletem a profundidade e/ou comprimento da calda de cimento e não o comprimento da barra, pois a resistência desta é praticamente desprezível. Contudo, a sensibilidade se reduz com o aumento do comprimento do elemento. Segundo os autores, em barras com 9 metros de comprimento são identificados vazios com mais de um metro e, em barras com 15 metros de comprimento, com pelo menos dois metros.

Na Figura 12 é possível observar resultados obtidos por Lee e Arup (2007) em grampos de 15,0 m, onde a resistência elétrica variou entre 22,0 e 33,0 Ω . A linha rosa representa a média dos valores, onde o acréscimo lateral ocorre pela heterogeneidade do solo. O grampo 16, que

se apresenta fora da média, apresenta uma falha com 2,0 m na calda de cimento e resultado de resistência elétrica de 45 Ω . Em barras de 9,0 m foi possível identificar falhas na calda de cimento com ar em 1 m, e em barras de 15 m, foram identificados apenas vazios com 2 m.

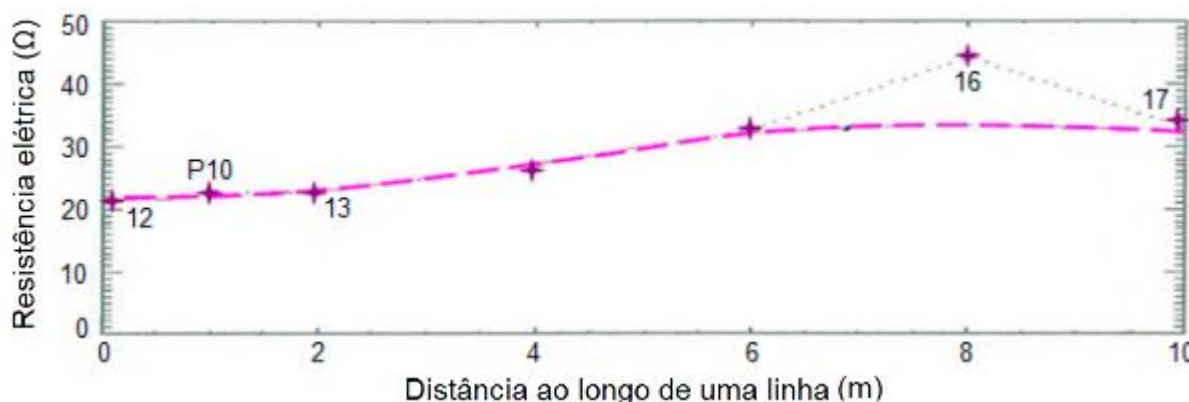


Figura 12 – Exemplo de resultado obtido em solo grampeado

FONTE: Adaptado de Lee e Rup (2007)

Cheung & Lo (2005) realizaram testes em grampos com 17 metros de comprimento para avaliar a integridade da calda de cimento. Os resultados de resistência em elementos da mesma linha variavam gradualmente devido à heterogeneidade do solo, de acordo com os autores. Grampos com um mesmo comprimento, mas preenchimento de calda de cimento total e inferior apresentaram resultados divergentes, validando a hipótese descrita no parágrafo anterior. Em barras com o mesmo comprimento de nata de cimento foram avaliados diferentes tipos de vazios preenchidos com solo e ar, sendo que a resistência elétrica foi menor com a barra exposta ao solo, e a identificação dos vazios é facilitada quando estes estão preenchidos com ar. Os resultados obtidos por Cheung e Lo (2005) para barras com preenchimento completo foram em torno de 20,0 Ω para barras de 15,0 m, 30,0 Ω para barras de 9,0 m, e 40,0 Ω para barras com 7,0 m de comprimento.

Em uma segunda fase de testes, Cheung & Lo (2005) também realizaram ensaios em dias de chuva e sol para verificar a influência das condições climáticas nos resultados. Os autores concluíram que para grampos com a calda de cimento intacta, a resistência elétrica total é pouco reduzida em dias de chuva. No entanto, se existem falhas na calda de injeção, a redução é mais significativa devido ao preenchimento do vazio com água.

3.3 Análise de resultados

3.3.1 *Sonic Echo*

A tecnologia de ensaio *Sonic Echo* representa uma ferramenta comercialmente disponível no cenário nacional, que se propõe a avaliar o comprimento das barras e a integridade da calda de cimento e, para tirantes, determinar o comprimento ancorado e livre, além da tensão nos elementos com nível de incerteza variando de 5 a 15%. Os dados obtidos no ensaio são tratados matematicamente e, posteriormente, uma análise da curva da relação entre vibração e impacto em função da frequência é executada. Tal curva é obtida com base em dois parâmetros: resposta em frequência, para determinar o comprimento, e rigidez dinâmica, indicando a integridade da barra (Rincenc, 2015). Com essas duas características e a medição da força da batida, o ensaio passa a ser conhecido como *Impulse Response*, o qual tem um exemplo de aplicação apresentado na Figura 13.

O parâmetro da rigidez dinâmica, segundo Jayawickrama *et al.* (2007), é uma propriedade do conjunto eixo-solo e pode ser utilizada para avaliar um grupo de elementos de forma comparativa, tanto para estabelecer uniformidade quanto como auxílio para selecionar elementos representativos para uma análise mais aprofundada utilizando outros ensaios. Valores de rigidez baixos são obtidos em eixos inclusos em solos fofos ou soltos e em elementos que contêm inclusão de solo, estrangulamento e quebras (Jayawickrama *et al.*, 2007).



Figura 13 – Realização do Ensaio Sonic Echo

FONTE: Rincent (2015)

De acordo com os Cheung (2003) e Jayawickrama *et al.* (2007), a aplicação do método *Sonic Echo* apresenta como vantagens o tempo de execução e aplicabilidade após a execução da estrutura de contenção desde que a cabeça do grampo esteja acessível. Cabe salientar que o efeito de amortecimento pode refletir na precisão dos resultados obtidos: quanto maior a rigidez da calda de cimento e do solo na região do grampo, maior esse efeito. Além disso, a presença de seções irregulares de argamassa pode resultar em reflexão parcial dos sinais, dificultando a interpretação do comprimento real do grampo.

Com relação às limitações, tal ferramenta permite determinar a continuidade linear de um eixo e, portanto, é menos eficaz para determinar mudança na seção transversal do elemento ou do comportamento sob carga. A obtenção precisa de um ponto de reflexão é limitada pelos defeitos presentes no eixo, sendo que uma restrição importante é a relação entre o comprimento e o diâmetro (L/D). Tal relação é influenciada pelas condições do solo em torno do eixo do concreto ou da calda de cimento, sendo que solos rígidos contribuem para a atenuação das ondas de compressão para eixos com alta relação L/D , e; quanto maior a semelhança entre o material de fundo do grampo e o concreto, menor a amplitude da onda refletida, o que dificulta a identificação da reflexão da onda.

Com base no contexto descrito no item de resultados do *Sonic Echo*, conclui-se que de modo geral, ensaios onde o acelerômetro e o impacto são dados na calda de cimento com o uso dos dois tipos de martelos tendem a apresentar resultados mais satisfatórios na determinação

do comprimento do elemento e de sua integridade. Os procedimentos executivos bem como a utilização de dois tipos de martelo, contudo, estão muitas vezes associados àqueles disponíveis no mercado, o que pode trazer limitações à forma de execução e interpretação dos resultados.

3.3.2 *Time Domain Reflectometry e Reflectometric Impulse Measurement Technique*

Esta metodologia apresenta execução rápida (cerca de meia hora por elemento ensaiado) e pode ser considerada mais precisa quando aplicada em locais com o fio elétrico ou cabo coaxial pré-instalado. 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).

Cheung (2006) alerta que alguns fatores podem influenciar nos resultados do TDR, tais como: erro humano na realização dos ensaios e em sua interpretação, tipo de fiação utilizada e características da calda de cimento e da barra. O autor indica que sempre deve ser utilizada a mesma fiação em uma mesma obra para que não ocorram diferenças de velocidade de propagação no fio. Além disso, variações na relação entre água e cimento da calda pode influenciar nos resultados. A padronização dos fatores deve reduzir os erros.

Cabe salientar que a maioria dos estudos em âmbito internacional para avaliação do método foram realizados em locais estabilizados com solo grampeado, mas, segundo aquele autor, a técnica também pode ser aplicada em cortinas atirantadas.

Nos casos onde não há a instalação prévia do fio no elemento de ancoragem, como por exemplo, na avaliação de obras já existentes, o TDR pode ser utilizado como um método de teste expedito para complementar outras avaliações, como ensaios de arrancamento, conhecendo-se suas limitações (Cheung, 2003).

3.3.3 *Método da Resistência Elétrica*

A técnica envolve a comparação de medições de resistência elétrica de barras próximas, sendo que valores distintos podem indicar problemas. Resistências obtidas em uma mesma barra devem refletir variações de no máximo 0,2% e diferenças acima dessa tolerância podem indicar deficiência na ligação do eletrodo com a cabeça da barra (Lee & Arup, 2007). Valores altos podem ser atribuídos a elementos com falhas ou vazios no preenchimento com calda de

cimento ou ainda à presença de uma barra de menor comprimento. Valores de resistência inferiores podem estar associados a excesso de argamassa no furo.

Segundo Cheung & Lo (2005), a metodologia não permite distinguir defeitos nem fornece diretamente o comprimento da barra, sendo recomendável, portanto, associá-la a um método complementar, a fim de determinar pelo menos uma dessas variáveis (integridade da calda de cimento ou comprimento da barra). Com o conhecimento do comprimento da barra, por exemplo, a interpretação dos resultados torna-se mais precisa, pela comparação entre eles. Ou seja, resultados de resistência elétrica diferentes da média podem indicar falhas.

Pode-se concluir que o método possui potencial de utilização, principalmente como uma técnica auxiliar/complementar a outros ensaios não destrutivos, de forma a colaborar no reconhecimento das barras e definir limites de variação de resistência elétrica. O uso da metodologia apresenta como vantagem a simplicidade e rapidez do ensaio, a possibilidade de testar barras próximas sem interferência nos resultados, a utilização de um equipamento com custos e disponibilidade conhecidos e cuja interpretação dos resultados não requer técnicas avançadas. Como fatores limitantes, cita-se o caso de barras com dupla proteção à corrosão e a necessidade de acesso à cabeça da barra (Lee & Arup, 2007).

4 ANÁLISE DOS DADOS DISPONÍVEIS NA REGIÃO EM ESTUDO E MAPEAMENTO DAS ÁREAS COM ENCOSTAS JÁ ESTABILIZADAS AO LONGO DA RODOVIA

4.1 Introdução

Como parte do desenvolvimento desta etapa, buscou-se mapear as estruturas de contenção existentes ao longo do trecho em estudo com base em dados fornecidos pela concessionária. Foram reunidas informações que permitiram a formação de um banco de dados completo sobre as obras de estabilização existentes.

4.2 Resultados

A Tabela 3 apresenta a relação de todas as obras analisadas.

Tabela 3 – Tabela resumo das contenções existentes no trecho Curitiba – Florianópolis

RODOVIA	TERRAPLENO (km)	PISTA	SOLUÇÃO PRINCIPAL	SOLUÇÕES SECUNDÁRIAS
BR-376/PR	616+110	Sul	Solo grampeado	Concreto projetado
BR-376/PR	637+700	Norte	Solo grampeado	
BR-376/PR	650+940	Norte	Cortina atirantada	
BR-376/PR	654+730	Sul	Cortina atirantada	
BR-376/PR	654+750	Norte	Cortina atirantada	Placas atirantadas
BR-376/PR	654+800	Norte	Cortina atirantada	
BR-376/PR	657+200	Norte	Solo grampeado	Retaludamento
BR-376/PR	658+400	Sul	Solo grampeado	Muro de gabião
BR-376/PR	659+270	Norte	Solo grampeado	Concreto projetado
BR-376/PR	659+280	Sul	Cortina atirantada	
BR-376/PR	660+380	Sul	Solo grampeado	
BR-376/PR	660+430	Sul	Solo grampeado	Cortina atirantada
BR-376/PR	665+290	Norte	Cortina atirantada	
BR-376/PR	666+950	Norte	Solo grampeado	Concreto projetado
BR-376/PR	667+050	Sul	Cortina atirantada	Bioengenharia
BR-376/PR	668+950	Norte	Cortina atirantada	
BR-376/PR	668+580	Sul	Solo grampeado	Concreto projetado
BR-376/PR	669+050	Sul	Solo grampeado	Concreto projetado
BR-376/PR	669-790	Sul	Solo grampeado	Concreto projetado
BR-376/PR	669+920	Sul	Cortina atirantada	Muro de gabião e solo grampeado
BR-376/PR	670+340	Sul	Cortina atirantada	
BR-376/PR	672+100	Sul	Solo grampeado	Concreto projetado
BR-376/PR	672+360	Sul	Cortina atirantada	
BR-376/PR	675+900	Norte	Solo grampeado	
BR-376/PR	675+900	Norte	Cortina atirantada	
BR-101/SC	012+350	Norte	Cortina atirantada	
BR-101/SC	013+100	Norte	Cortina atirantada	
BR-101/SC	048+300	Norte	Solo grampeado	
BR-101/SC	057+300	Sul	Solo grampeado	
BR-101/SC	139+250	Sul	Solo grampeado	
BR-101/SC	139+650	Sul	Solo grampeado	Reticulado de estaca raiz
BR-101/SC	139+800	Sul	Solo grampeado	Reticulado de estaca raiz
BR-101/SC	140+050	Sul	Solo grampeado	Rocha chumbada
BR-101/SC	140+400	Sul	Solo grampeado	

Tabela 3 – Tabela resumo das contenções existentes no trecho Curitiba – Florianópolis (continuação)

RODOVIA	TERRAPLENO (km)	PISTA	SOLUÇÃO PRINCIPAL	SOLUÇÕES SECUNDÁRIAS
BR-101/SC	140+500	Sul	Solo grampeado	Concreto projetado
BR-101/SC	141+030	Sul	Cortina atirantada	
BR-101/SC	191+000	Norte	Solo grampeado	Rocha chumbada
BR-101/SC	191+700	Sul	Solo grampeado	Concreto projetado
BR-101/SC	191+800	Sul	Solo grampeado	Rocha chumbada
BR-101/SC	196+700	Sul	Solo grampeado	Concreto projetado
BR-101/SC	231+990	Norte	Muro de solo reforçado	
BR-101/SC	232+240	Sul	Cortina atirantada	Solo grampeado+concreto projetado
BR-101/SC	232+340	Sul	Muro de gabião	Solo grampeado e malha dupla

Buscou-se também um levantamento específico com foco na identificação dos locais passíveis de aplicação de métodos não destrutivos, ou seja, com a presença de elementos de ancoragem, abrangendo, portanto, técnicas de solo grampeado e cortina atirantada. Com base no banco de dados recebido, verificou-se que essas soluções compreenderam 96% do total das obras existentes. Na Figura 14 é possível visualizar a distribuição dessas soluções ao longo das duas rodovias no trecho de estudo (BR-101 e BR-376).

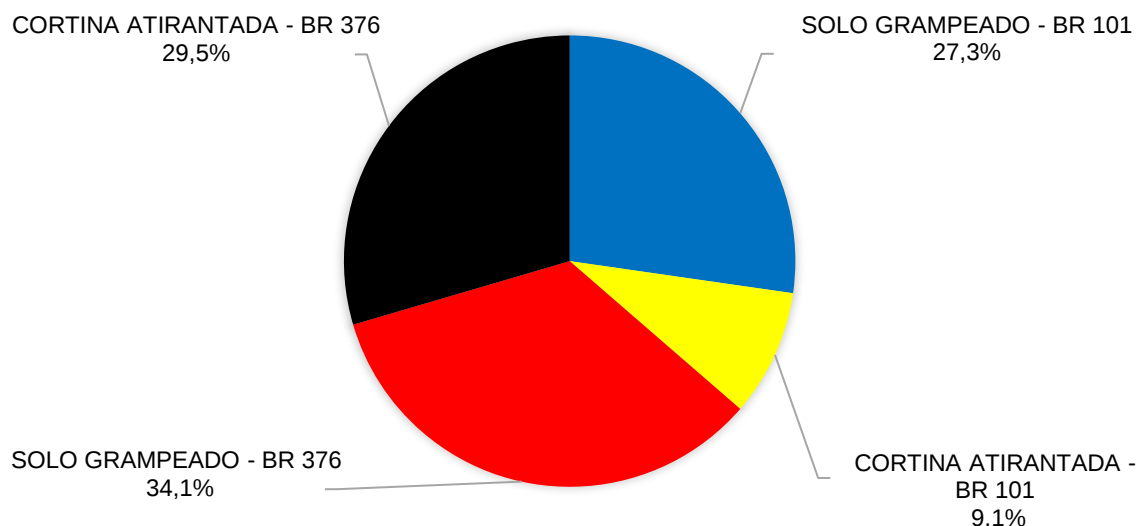


Figura 14 – Contenções na BR-101 e BR-376

Algumas diferenças pertinentes aos aspectos construtivos envolvendo essas duas técnicas que poderiam influenciar a aplicação das metodologias de ensaio foram mapeadas. Com relação à inclinação dos paramentos, verificou-se uma variação entre 45 a 90° nas estruturas em solo grampeado enquanto todas as cortinas atirantadas apresentaram inclinação de 90°.

O estudo envolveu ainda um levantamento sobre a idade dessas estruturas. Conforme descrito anteriormente, obras mais antigas possuem maior susceptibilidade a falhas e

desenvolvimento de manifestações patológicas (Pitta *et al.*, 2006). Um levantamento da idade das obras de solo grampeado existentes no trecho em estudo pode ser visualizado na Figura 15.

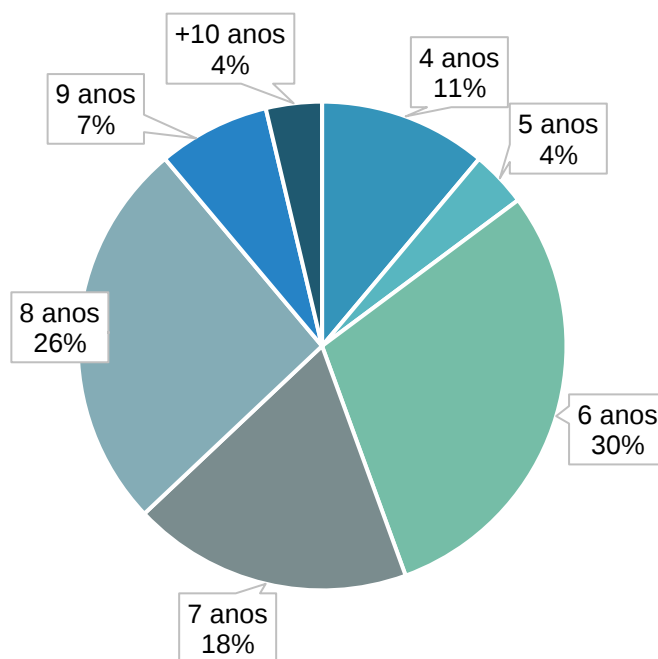


Figura 15 – Idade das obras de solo grampeado

A Figura 16 apresenta uma distribuição da idade das cortinas atirantadas existentes ao longo da BR-376/PR e BR-101/SC, trecho entre Curitiba e Florianópolis.

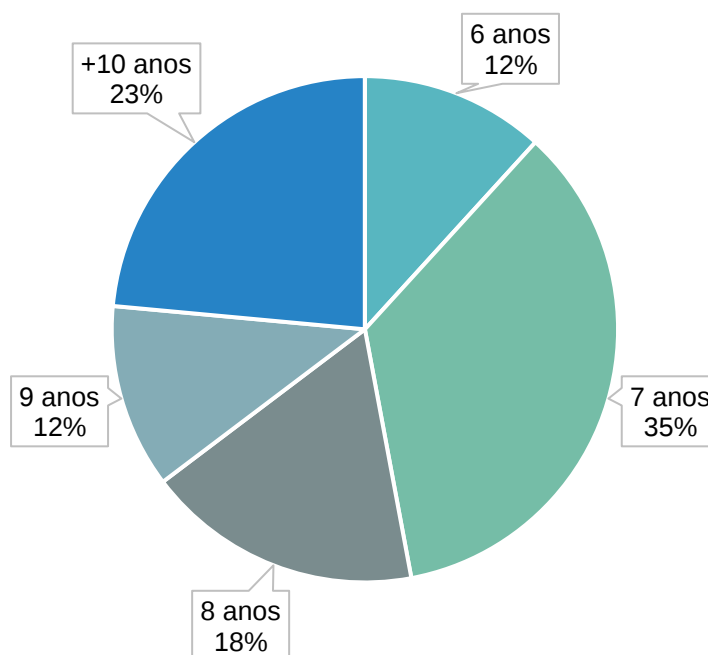


Figura 16 – Idade das obras de cortina atirantada

Buscou-se ainda informações sobre o regime pluviométrico local. A região de estudo que compreende as rodovias BR-101 no Estado de Santa Catarina e BR-376 no Estado do Paraná possui alguns pluviógrafos localizados em sua extensão. No entanto, não há um sensor localizado próximo e/ou pertencente à mesma bacia hidrográfica do local escolhido para implantação da contenção de estudos experimentais (item 6). Com isso, recomenda-se que em uma etapa futura seja instalado um pluviógrafo próximo a região do km 617+300 m de modo a permitir a correlação dos resultados de ensaios obtidos com a ocorrência de eventos

pluviométricos. A importância de tal informação/análise será descrita em maior detalhe no item 9.

4.3 Análise de resultados

Com base em todo o material analisado (43 contenções), verifica-se que as principais obras existentes ao longo do trecho em estudo são, em ordem decrescente: solo grampeado, cortina atirantada, muro de solo reforçado e muro de gabião, como representado na Figura 17.

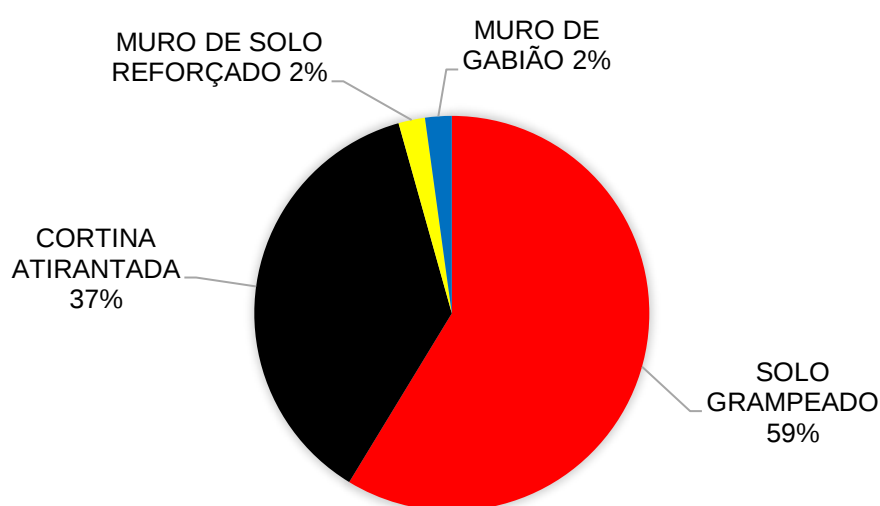


Figura 17 – Contenções existentes no trecho Curitiba – Florianópolis

Com base no banco de dados, foi possível ainda estabelecer quais as dimensões mais frequentes nestes tipos de contenções. Os grampos apresentaram comprimentos com variação entre 3 e 15 metros, sendo que os mais usuais possuíam 6 e 12 metros com diâmetro das barras normalmente de 20 ou 25 mm.

Soluções com cortina atirantada apresentavam um trecho livre que variava entre 5 a 20 metros e trecho ancorado de 3 a 18 metros, o qual perfaz um comprimento total variável de 8 a 30 metros. Com base nessas informações, foi possível verificar que a configuração de tirante mais frequente possui um comprimento de 10 metros de trecho livre e 10 metros de trecho ancorado, totaliza 20 metros de comprimento.

Analisando a Figura 15, cabe salientar que apenas 4% das obras em solo grampeado

mapeadas foram construídas previamente ao início da concessão, caracterizando o grande nível de investimentos realizado pela Autopista Litoral Sul no que diz respeito às obras de estabilização.

Observa-se ainda através da Figura 16 que a maioria das cortinas atirantadas do trecho tem menos de dez anos (77%), reforçando novamente o alto nível de investimentos em soluções de estabilização realizado pela concessionária.

Como a principal falha que ocorre em estruturas de solo grampeado é o preenchimento incompleto do furo com calda de cimento, decorrente das falhas executivas (Jayawickrama *et al.*, 2007), a avaliação dessas estruturas deve ser realizada independente da sua idade. No entanto, quanto mais antiga a obra, maiores são as chances da ocorrência de outras manifestações patológicas como a corrosão da barra exposta, por exemplo.

Assim como descrito para o solo grampeado, ressalta-se que obras mais antigas tendem a apresentar maior suscetibilidade à ocorrência de manifestações patológicas associadas à processos corrosivos, principal anomalia mapeada nesse tipo de estrutura. Irvin & Mothersille (2007) descrevem que as cortinas atirantadas são mais suscetíveis ao colapso por corrosão e que os efeitos nos tirantes são preocupantes, uma vez que a falha de um elemento pode causar sobrecarga nos elementos adjacentes e gerar um colapso da estrutura.

Alguns locais analisados se caracterizam por apresentarem soluções mistas, ou seja, envolvendo mais de uma técnica construtiva. No km 660+430 m da BR-376/SC tem-se um exemplo de estabilização com solução envolvendo o uso de cortina atirantada (Figura 18a) e solo grampeado (Figura 18b).



(a)



(b)

Figura 18 – Soluções mistas de contenção no km 660+430 m: (a) solo grampeado e (b) cortina atirantada

No km 669+920 m observa-se outro exemplo compreendendo a utilização de contenções com cortina atirantada e solo grampeado (Figura 19a), e muros de gabião (Figura 19b).



(a)



(b)

Figura 19 - Soluções mistas de contenção no km 669+290 m: solo grampeado, cortina atirantada e muros de gabião

Cabe salientar que em muitos locais onde a solução de estabilização é do tipo solo grampeado, a técnica utilizada envolve o uso de grampos não aparentes na face da contenção (Figura 20). Tal característica representa uma limitação para aplicação de algumas metodologias de ensaios não destrutivos conforme descrito nos itens subsequentes do presente relatório.



km 637+700 m PN



km 666+950 m PN



km 675+900 m PN



km 660+380 m OS



km 660+380 m PS



km 672+050 m OS

Figura 20 – Exemplos de pontos com solo grampeado sem cabeça do grampo aparente

Diversos autores (e.g. Cheung 2003, Lee & Arup 2007, Cheung & Lo 2011) descrevem que a calibração das técnicas de ensaio em elementos conhecidos pode ser fundamental para obtenção de variáveis de cada método e de resultados mais confiáveis e precisos. Contudo, a ausência de informações de projeto e execução detalhadas pode ser um fator limitante na avaliação de estruturas de contenção mais antigas.

5 VISITAS AO SÍTIO DE ESTUDO

5.1 Introdução

Diversas visitas à região de estudo durante o desenvolvimento do presente projeto foram realizadas, com o objetivo de construir o entendimento das características do conjunto de estruturas de contenção existentes, acompanhar a execução de investigações geotécnicas no campo experimental de estudos e aplicar os métodos de avaliação de integridade.

5.2 Resultados

De modo a complementar a etapa de análise dos dados disponíveis na região em estudo e mapeamento das áreas com encostas já estabilizadas, foram realizadas visitas às contenções ao longo da rodovia durante os meses iniciais da pesquisa. Nessas ocasiões, buscou-se avaliar algumas estruturas de contenção situadas no trecho da BR-376/PR e BR-101/SC, mapeadas nos relatórios de monitoramento recebidos e cuja descrição foi apresentada anteriormente.

A fim de escolher um local para implantação da estrutura de contenção experimental que compõe o escopo da presente pesquisa, visitas de campo no trecho da BR-376/PR também foram realizadas. Buscou-se inicialmente avaliar as encostas que poderiam ser utilizadas para a implementação das contenções em termos de acessibilidade e eventuais limitações ao tráfego durante o período de execução da obra. Foram avaliados ainda critérios como altura e extensão necessária para atender o planejamento dos experimentos.

Para atender critérios de segurança requeridos nas normas aplicáveis para essas atividades, buscou-se um local com espaço adequado entre o talude e a rodovia, com o objetivo de garantir a segurança, conforto dos operários e a circulação de equipamentos e usuários da rodovia. Também se optou por uma área com acessibilidade na parte superior do talude. E, após algumas visitas, que incluíram a presença de pesquisadores e representantes da Concessionária, definiu-se pela utilização do trecho compreendido na alça do retorno existente no km 617+300 m da BR 376/PR, pista norte/lado direito (Figura 21).



Figura 21 – Visão geral do local da contenção experimental

A Figura 22a mostra a vista frontal do talude anterior à obra (2016), e a Figura 22b indica como o local estava após a execução do campo experimental (2018).



(a)



(b)

Figura 22 – Vista frontal do campo experimental: a) 2016 e b) 2018

Também foram realizadas visitas com o objetivo de se efetuar a caracterização geotécnica da área, tais como acompanhamento de sondagens à percussão (Figura 23a) e coleta de amostras indeformadas (Figura 23b).



Figura 23 – Caracterização geotécnica do campo experimental: (a) sondagem SPT e (b) coleta de amostras indeformadas

Novas visitas ao local definido para a execução do campo experimental foram realizadas com a finalidade de se definir o posicionamento das estruturas da contenção experimental. Além disso, ressalta-se o acompanhamento de todas as atividades envolvidas na etapa de implantação do campo de estudos, desde a organização do canteiro de obras até a execução dos grampos e tirantes.

Durante o primeiro semestre de 2018, foram realizados e acompanhados os ensaios com os métodos não destrutivos da Resistência elétrica, *Time Domain Reflectometry* (TDR), *Sonic Echo* e *Reflectometric Impulse Measurement Technique*, como indicado na Figura 24. Informações sobre os resultados obtidos com esses procedimentos são apresentadas nos itens subsequentes.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 24 – Ensaios realizados na contenção experimental: (a) Resistência elétrica; (b) TDR; (c) Sonic Echo e (d) Reflectometric Impulse Measurement Technique

Por fim, ressaltam-se visitas em obras já existentes na rodovia para aplicação dos métodos não destrutivos em contenções, como exemplificado na Figura 25.



(a)



(b)

Figura 25 – Contenções ensaiadas ao longo da rodovia BR-376/PR: (a) Solo grampeado, (b) Cortina atirantada

5.3 Análise de resultados

Como resultados das visitas de campo realizadas ao longo do presente projeto, pode-se destacar o papel fundamental que as mesmas tiveram no desenvolvimento das demais etapas que serão descritas, em particular nas seguintes atividades:

- Complementar a etapa de análise dos dados disponíveis na região em estudo e mapeamento das áreas com encostas já estabilizadas;

- Escolher um local para implantação da estrutura de contenção experimental que compõe o escopo da presente pesquisa;
- Efetuar a caracterização geotécnica da área, tais como acompanhamento de sondagens à percussão e coleta de amostras indeformadas;
- Acompanhamento de todas as atividades envolvidas na etapa de implantação do campo de estudos, desde a definição do posicionamento das estruturas da contenção experimental, organização do canteiro de obras até à execução dos grampos e tirantes;
- Execução e acompanhamento dos ensaios não destrutivos no campo experimental instalado;
- Visitas a obras já existentes na rodovia para aplicação dos métodos não destrutivos em contenções já existentes.

6 INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA PARA CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS EXPERIMENTAIS

6.1 Introdução

Como parte do desenvolvimento da pesquisa, uma etapa de investigação geotécnica para a descrição das propriedades do terreno presente na área de estudo experimental foi realizada. Segundo Schnaid & Odebrecht (2012), esse tipo de estudo busca reconhecer o subsolo e apresenta grande importância em projetos de contenção, pois os tornam mais seguros, minimizam riscos e custos com reparos e/ou danos. Tal característica se deve ao fato de que a realização de ensaios de prospecção do subsolo permite identificar tanto características geométricas do terreno como parâmetros de resistência e deformabilidade para uso em projeto.

6.2 Resultados

6.2.1 Ensaio a percussão SPT

O SPT – *Standard Penetration Test* - além de fornecer um parâmetro de resistência à percussão (N_{SPT}) do solo a cada metro, permite a determinação do tipo de solo a partir de uma análise tátil-visual de uma amostra deformada, obtida por meio da cravação de um amostrador

padrão. É possível ainda identificar a profundidade ou ausência do nível do lençol freático durante o procedimento de perfuração.

Os pontos para a realização das sondagens SPT foram locados com precisão por meio de um levantamento planialtimétrico e, buscou-se otimizar o uso dos recursos disponíveis, garantir a obtenção dos parâmetros necessários para o dimensionamento e entendimento dos fenômenos associados às estruturas de contenção e suas patologias. Os resultados permitiram obter uma caracterização geotécnica detalhada da estratigrafia local.

Foram executadas nove sondagens de simples reconhecimento - SPT, três na base da contenção, três no topo e três em uma região intermediária da encosta (Fundestac, 2016). As profundidades mínimas de execução das sondagens foram determinadas a fim de abranger uma área significativa e representativa do campo experimental e para obtenção da estratigrafia do terreno (Figura 26).

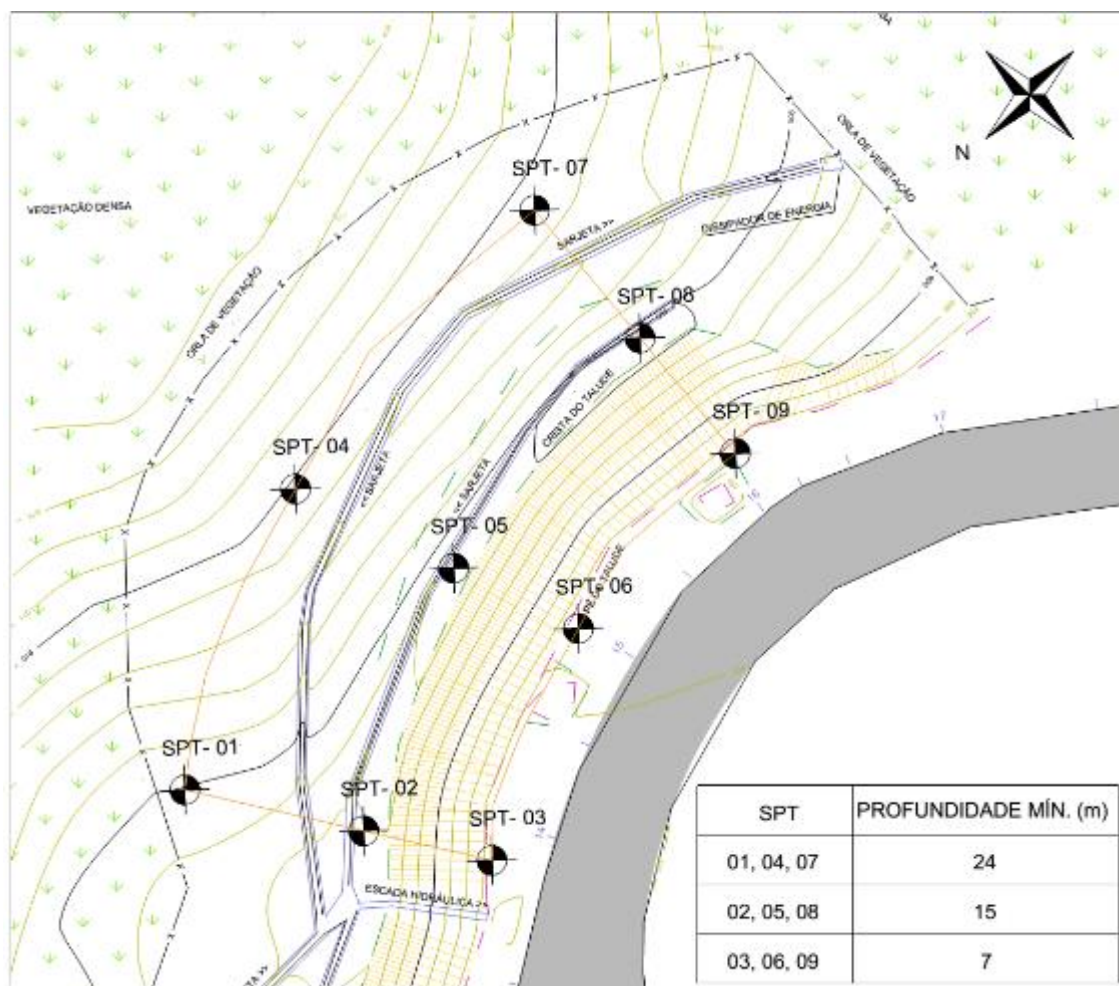


Figura 26 – Localização das sondagens SPT

Na Figura 27 é possível observar a execução de um dos furos, cujo procedimento de ensaio é normatizado pela NBR 6484 (ABNT, 2001). De forma simplificada, o ensaio consiste em cravar um amostrador padrão tipo Raymond com a queda livre de um peso de 65 kg, a uma altura de 75 cm, o que corresponde a uma energia potencial de 490 Joules, até que se obtenha uma penetração de 45 cm do amostrador. A partir desse valor, os 30 cm finais correspondem a um índice de resistência N_{SPT} .



Figura 27 – Sondagem SPT no campo experimental

Conforme descrito anteriormente, dentre as características desse ensaio, destaca-se a retirada de amostras ao longo da perfuração (Figura 28), permitindo assim uma caracterização tátil-visual das camadas. Foram coletadas ainda pelo menos duas amostras adicionais em cada furo para caracterização geotécnica completa em laboratório através de ensaios de resistividade elétrica, granulometria, determinação dos índices de consistência, umidade, índice de vazios e densidade relativa.



(a)



(b)

Figura 28 – Amostras de sondagem SPT: (a) as amostras obtidas a partir do barrilete e, (b) amostras do amostrador padrão

Os boletins de sondagens com os resultados dessa campanha de investigação são apresentados nas Figuras 29 a 37.

SP-01

Cliente : Autopista Litoral Sul S/A
Obra : BR 376/PR Km 617+420m - Pista Norte
Local: São José dos Pinhais - Paraná

Data: 02/07/16

Referência: 02696-16

Escala: 1/100 Nível d'água Inicial: N.E. Data Inicial: 02/07/16 : hs Coordenadas: N 7188127,891
Cota : 904,90 m Nível d'água Final : N.E. Data Final : 02/07/16 18:20 hs E 683641,057

Número Amostra	Cota do Furo	Penetração/30 Cm		Acum. 2a.+3a. Camada	Gráfico Nspt 2a.+ 3a. Camada	Nível água	Classificação do Material	Cota mudança de camada
		1ª + 2ª Camada	2ª + 3ª Camada					
0	1,00 m	2	2	2	TC TH	Revestimento 2 m	Argila silto arenosa, marrom, consistência muito mole.	-0,75 m
1	2,00 m	5	7	9			Silte argilo arenoso, marrom avermelhado, consistência média.	-2,00 m
2	3,00 m	6	7	16			Silte arenoso, marrom avermelhado, compactidade medianamente compacta.	-3,45 m
3	4,00 m	8	11	27			Areia siltosa, marrom variegado, com presença de pedregulhos, compactidade pouco compacta a medianamente compacta.	-5,87 m
4	5,00 m	9	7	34				
5	6,00 m	9	9	43				
6	7,00 m	15	13	56			Areia siltosa, marrom variegado, compactidade medianamente compacta.	-8,04 m
7	8,00 m	13	14	70				
8	9,00 m	15	16	86			Silte argilo arenoso, marrom avermelhado, consistência dura.	-9,50 m
9	10,00 m	20	24	110			Areia siltosa, cinza variegado, com presença de mica, compactidade compacta.	-11,80 m
10	11,00 m	22	26	136				
11	12,00 m	23	28	164			Silte argilo arenoso, cinza variegado, consistência dura.	-13,83 m
12	13,00 m	26	30	194			Areia siltosa, cinza variegado, compactidade compacta.	-14,15 m
13	14,00 m	29	32	226				
14	15,00 m	30	***	***			Impenetrável ao Trépano de Lavagem possivelmente por presença de pedras soltas, rocha ou alteração de rocha. Recomendamos o item 6.4.4. (Uso do método de perfuração Rotativa), caso haja necessidade técnica de continuar a investigação do subsolo até a profundidades superiores à cota -14,15 m, alcançada atendendo as especificações do item	
15	16,00 m							
16	17,00 m							
17	18,00 m							
18	19,00 m							
19	20,00 m							
20	21,00 m							

Eng. Civil Resp.: SAMUEL LOPES Desenho: Bruno Henrique Lopes Fiscal de Obra: Marcos Marcelino Sondador: Avelino José Moreira Filho
Parâmetros utilizado na execução deste ensaio de acordo com NBR6484-Soito-Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT

Diâmetro Revestimento = 63,50 mm

Hastes diâmetro interno = 25,00 mm

Trépano diâmetro nominal = 25,00 mm

Trado helicoidal diâmetro mínimo = 56,00 mm

Amostrador tipo Raymond diâmetro interno = 34,9 mm

Martelo com peso total = 65 Kg.

ENSAIO DE TREPANAÇÃO

10 min. 3 cm.

10 min. 2 cm.

10 min. 2 cm.

Avanço Trado Concha (TC): -4,5 m à -1, m

Avanço Trado Helicoidal (TH): -1,45 m à -14, m

Perfuração por percolação d'água (CA): -, m à -, m

Avanço Barrilete Amostrador (BA): -14, m à -14,15 m

Prof. Revestimento: -, m à -2, m

Uso de Lama Bentonítica: -, m à -, m

Figura 29 – Boletim de Sondagem SP-01

SP-02

Cliente : Autopista Litoral Sul S/A

Data: 24/06/16

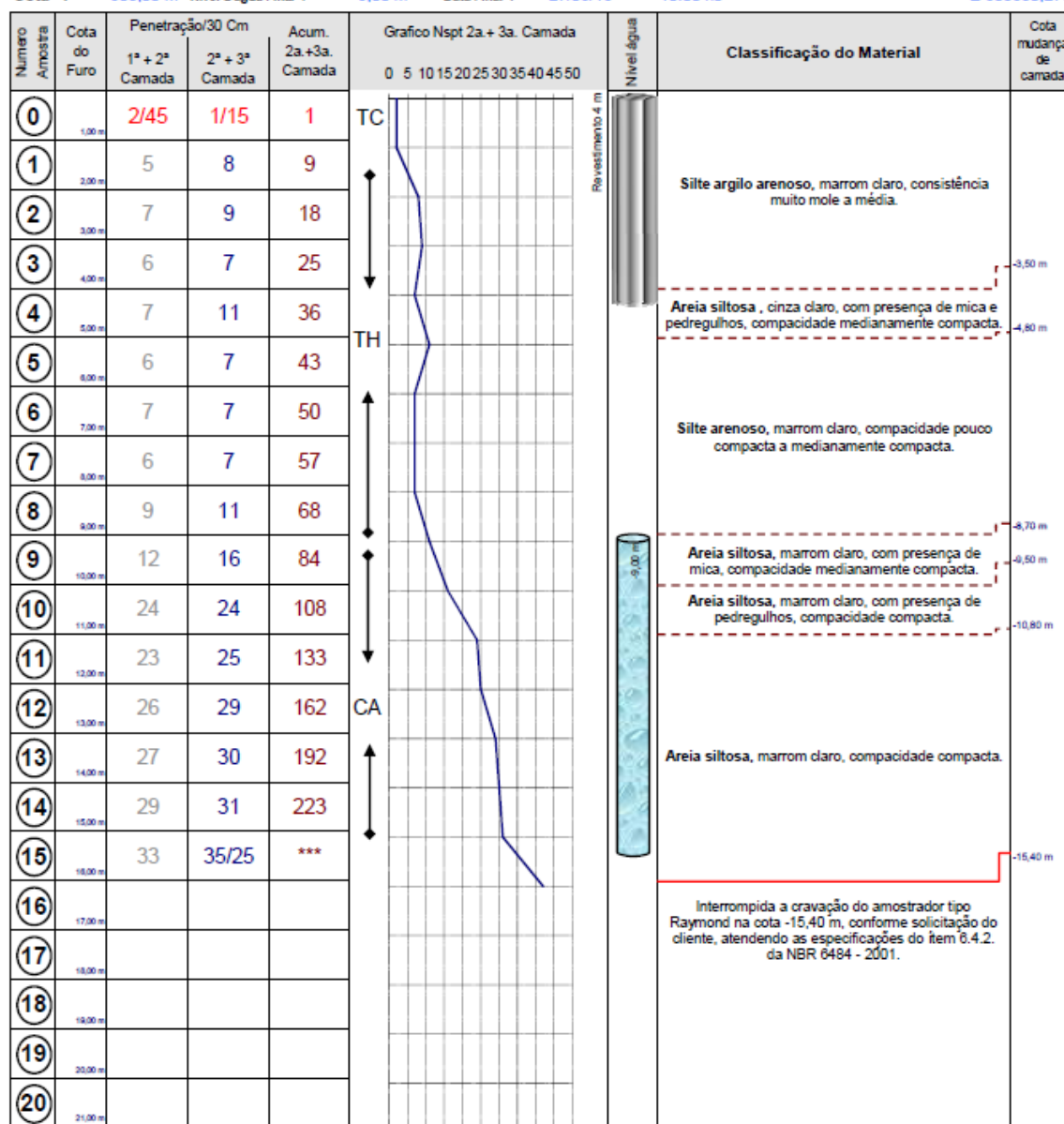
Obra : BR 376/PR Km 617+420m - Pista Norte

Local: São José dos Pinhais - Paraná

Referência: 02696-16

Escala: 1/100 Nivel d'água Inicial: -8,70 m Data Inicial: 24/06/16 15:35 hs Coordenadas: N 7168112,89

Cota : 903,00 m Nivel d'água Final : -9,00 m Data Final : 27/06/16 10:00 hs E 683630,277



Eng. Civil Resp.: SAMUEL LOPES Desenho: Bruno Henrique Lopes Fiscal de Obra: Marcos Marcelino Sondador: Avelino José Moreira Filho

Parâmetros utilizados na execução deste ensaio de acordo com NBR 6484-Solo-Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT

Diâmetro Revestimento = 63,50 mm
Hastes diâmetro interno = 25,00 mm
Trépano diâmetro nominal = 25,00 mm
Trado helicoidal diâmetro mínimo = 56,00 mm
Amostrador tipo Raymond diâmetro interno = 34,9 mm
Martelo com peso total = 65 Kg.

Avanço Trado Concha (TC): -4,5 m à -1, m
Avanço Trado Helicoidal (TH): -1,45 m à -9, m
Perfuração por percolação d'água (CA): -9, m à -15, m
Avanço Barrilete Amostrador (BA): -15, m à -15,4 m
Prof. Revestimento: -, m à -4, m
Uso de Lama Bentonítica: -, m à -, m

Figura 30 – Boletim de Sondagem SP-02



SP-03

Cliente : Autopista Litoral Sul S/A

Data: 20/06/16

Obra : BR 376/PR Km 617+420m - Pista Norte

Local: São José dos Pinhais - Paraná

Referência: 02696-16

Escala: 1/100 Nível d'água Inicial: -1,70 m Data Inicial: 20/06/16 17:30 hs Coordenadas: N 7168101,789
Cota : 896,80 m Nível d'água Final : 0,00 m Data Final : 00/01/00 : hs E 683622,545

Número Amostra	Cota do Furo	Penetração/30 Cm		Acum. 2a.+3a. Camada	Gráfico Nspt 2a. + 3a. Camada 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50	Nível água	Classificação do Material	Cota mudança de camada
		1ª + 2ª Camada	2ª + 3ª Camada					
0	1,00 m	2/45	1	1			Areia siltosa, marrom, compactidade fofa.	-0,80 m
1	2,00 m	9	9	10				
2	3,00 m	9	7	17				
3	4,00 m	13	14	31				
4	5,00 m	13	15	46				
5	6,00 m	12	15	61				
6	7,00 m	13	16	77				
7	8,00 m	14	17	94				
8	9,00 m						Silte arenoso, marrom variegado, compactidade pouco compacta a medianamente compacta.	-7,45 m
9	10,00 m							
10	11,00 m							
11	12,00 m							
12	13,00 m							
13	14,00 m							
14	15,00 m							
15	16,00 m							
16	17,00 m							
17	18,00 m							
18	19,00 m							
19	20,00 m							
20	21,00 m							

Eng. Civil Resp.: SAMUEL LOPES Desenho: Bruno Henrique Lopes Fiscal de Obra: Marcos Marcelino Sondador: Avelino José Moreira Filho
Parâmetros utilizados na execução desse ensaio de acordo com NBR 6484-Solo-Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT.
Diâmetro Revestimento = 63,50 mm
Hastes diâmetro interno = 25,00 mm
Trépano diâmetro nominal = 25,00 mm
Trado helicoidal diâmetro mínimo = 56,00 mm
Amostrador tipo Raymond diâmetro interno = 34,9 mm
Martelo com peso total = 65 Kg.
Avanço Trado Concha (TC): -, m à -, m
Avanço Trado Helicoidal (TH): -4,5 m à -7, m
Perfuração por percolação d'água (CA): -, m à -, m
Avanço Bartlett Amostrador (BA): -7, m à -7,45 m
Prof. Revestimento: -, m à -, m
Uso de Lama Bentonítica: -, m à -, m

Figura 31 – Boletim de Sondagem SP-03

SP-04

Cliente : Autopista Litoral Sul S/A
Obra : BR 376/PR Km 617+420m - Pista Norte
Local: São José dos Pinhais - Paraná

Data: 01/07/16

Referência: 02696-16

Escala: 1/100 Nível d'água Inicial: N.E. Data Inicial: 01/07/16 : hs Coordenadas: N 7168105,858
Cota : 909,80 m Nível d'água Final : N.E. Data Final : 02/07/16 16:30 hs E 683664,963

Número Amostra	Cota do Furo	Penetração/30 Cm		Acum. 2a.+3a. Camada	Gráfico Nspt 2a.+ 3a. Camada 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50	Nível água	Classificação do Material	Cota mudança de camada
		1ª + 2ª Camada	2ª + 3ª Camada					
0	1,00 m	3	4	4	TC		Argila silto arenosa, marrom, consistência mole.	-0,80 m
1	2,00 m	7	8	12			Silte argilo arenoso, marrom claro, consistência mole.	-1,92 m
2	3,00 m	9	11	23			Silte argiloso, marrom avermelhado, consistência rija.	-2,90 m
3	4,00 m	11	12	35			Areia siltosa, marrom claro, compactidade medianamente compacta.	-3,50 m
4	5,00 m	12	13	48			Silte argilo arenoso, marrom claro, consistência rija.	-4,78 m
5	6,00 m	13	15	63				
6	7,00 m	14	14	77			Areia siltosa, marrom claro, compactidade medianamente compacta.	
7	8,00 m	13	14	91				
8	9,00 m	14	15	106			Areia siltosa, marrom claro, com presença de mica, compactidade medianamente compacta.	-7,80 m
9	10,00 m	13	15	121	TH			-8,90 m
10	11,00 m	29	35	156				
11	12,00 m	22	19	175			Areia siltosa, marrom variegado, compactidade medianamente compacta a compacta.	
12	13,00 m	18	21	196				
13	14,00 m	21	26	222				-13,80 m
14	15,00 m	24	27	249			Silte arenoso, cinza variegado, compactidade compacta.	-14,97 m
15	16,00 m	34	26	275				
16	17,00 m	31	25	300			Silte argilo arenoso, cinza variegado, consistência dura.	
17	18,00 m	30	26	326				-17,45 m
18	19,00 m	30/25					Areia siltosa, cinza variegado, com presença de mica, compactidade compacta.	-18,10 m
19	20,00 m						Impenetrável ao Trépano de Lavagem possivelmente por presença de pedras soltas, rocha ou alteração de rocha. Recomendamos o item 6.4.4. (Uso do método de penetração Rotativa), caso haja necessidade técnica de continuar a investigação do subsolo até a profundidades superiores a cota -18,10 m, alcançada atendendo as especificações do item 6.4.3.3. da NBR 6484 - 2001.	
20	21,00 m							

Eng. Civil Resp.: SAMUEL LOPES Desenho: Bruno Henrique Lopes Fiscal de Obra: Marcos Marcelino Sondador: Avelino José Moreira Filho
Parâmetros utilizado na execução deste ensaio de acordo com NBR 6484-Soio-Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT

Diâmetro Revestimento = 63,50 mm
Hastes diâmetro interno = 25,00 mm
Trépano diâmetro nominal = 25,00 mm
Trado helicoidal diâmetro mínimo = 56,00 mm
Amostrador tipo Raymond diâmetro interno = 34,9 mm
Martelo com peso total = 65 Kg.

ENSAIO DE TREPANÇÃO
10 min. 4 cm.
10 min. 3 cm.
10 min. 2 cm.

Avanço Trado Concha (TC): -45 m à -1, m
Avanço Trado Helicoidal (TH): -1,45 m à -18, m
Perfuração por percolação d'água (CA): -, m à -18,1 m
Avanço Barrilete Amostrador (BA): 18, m à -18,1 m
Prof. Revestimento: -, m à -2, m
Uso de Lama Bentonítica: -, m à -, m

Figura 32 – Boletim de Sondagem SP-04

SP-05

Cliente : Autopista Litoral Sul S/A

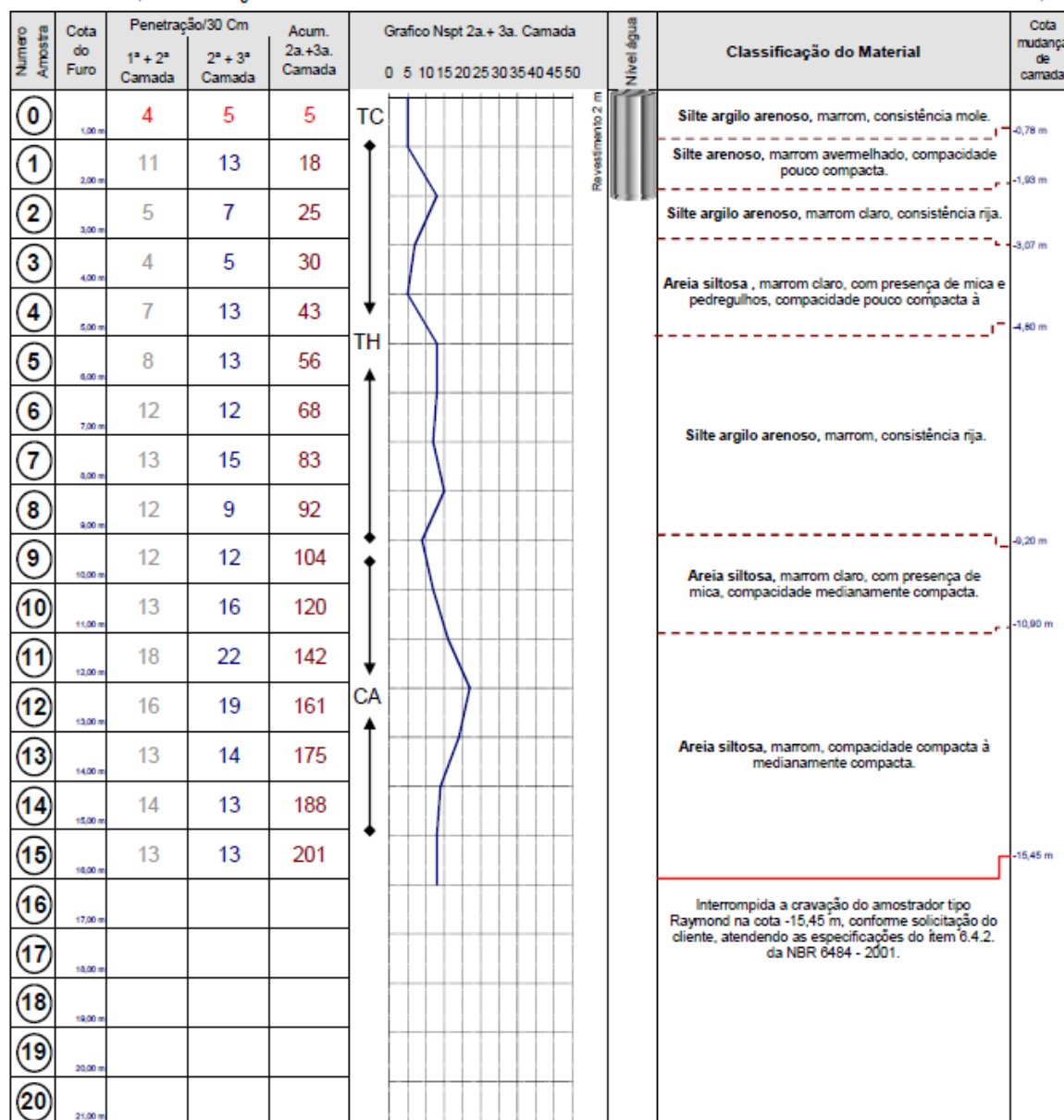
Obra : BR 376/PR Km 617+420m - Pista Norte

Local: São José dos Pinhais - Paraná

Data: 27/06/16

Referência: 02696-16

Escala: 1/100 Nível d'água Inicial: N.E. Data Inicial: 27/06/16 : hs Coordenadas: N 7168094,067
Cota : 904,10 m Nível d'água Final : N.E. Data Final : 29/06/16 16:00 hs E 683651,407



Eng. Civil Resp.: SAMUEL LOPES Desenho: Bruno Henrique Lopes Fiscal da Obra: Marcos Marcelino Sondador: Avelino José Moreira Filho
Parâmetros utilizados na execução deste ensaio de acordo com NBR6484-Solo-Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT
Diâmetro Revestimento = 63,50 mm
Hastes diâmetro interno = 25,00 mm
Trépano diâmetro nominal = 25,00 mm
Trado helicoidal diâmetro mínimo = 56,00 mm
Amostrador tipo Raymond diâmetro interno = 34,9 mm
Martelo com peso total = 65 Kg.
Avanço Trado Concha (TC): -45 m à -1, m
Avanço Trado Helicoidal (TH): -1,45 m à -9, m
Perfuração por percolação d'água (CA): -9,45 m à -15, m
Avanço Barilete Amostrador (BA): -15, m à -15,45 m
Prof. Revestimento: -, m à -2, m
Uso de Lama Bentonítica: -, m à -, m

Figura 33 – Boletim de Sondagem SP-05



SP-06

Cliente : Autopista Litoral Sul S/A

Data: 20/06/16

Obra : BR 376/PR Km 617+420m - Pista Norte

Local: São José dos Pinhais - Paraná

Referência: 02696-16

Escala: 1/100 Nível d'água Inicial: N.E. Data Inicial: 20/06/16 16:18 hs Coordenadas: N 7168084,696
Cota : 897,30 m Nível d'água Final : 0,00 m Data Final : 00/01/00 : hs E 683640,901

Número Amostra	Cota do Furo	Penetração/30 Cm		Acum. 2a.+3a. Camada	Gráfico Nspt 2a. + 3a. Camada 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50	Nível água	Classificação do Material	Cota mudança de camada
		1ª + 2ª Camada	2ª + 3ª Camada					
0	1,00 m	1/45	1	1			Silte arenoso, marrom variegado, compactidade fofa medianamente compacta.	-1,70 m
1	2,00 m	10	11	12				
2	3,00 m	12	13	25				
3	4,00 m	11	11	36				
4	5,00 m	11	12	48				
5	6,00 m	15	22	70				
6	7,00 m	24	26	96				
7	8,00 m	30	37	133			Argila siltosa, marrom, consistência rija a dura.	-7,45 m
8	9,00 m							
9	10,00 m							
10	11,00 m							
11	12,00 m							
12	13,00 m							
13	14,00 m							
14	15,00 m							
15	16,00 m							
16	17,00 m							
17	18,00 m							
18	19,00 m							
19	20,00 m							
20	21,00 m							

Eng. Civil Resp.: SAMUEL LOPES Desenho: Bruno Henrique Lopes Fiscal de Obra: Marcos Marcelino Sondador: Avelino José Moreira Filho
Parâmetros utilizado na execução deste ensaio de acordo com NBR 6484-Solo-Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT.

Diâmetro Revestimento = 63,50 mm	Avanço Trado Concha (TC):	- m	à	- m
Hastes diâmetro interno = 25,00 mm	Avanço Trado Helicoidal (TH):	-45 m	à	-7, m
Trépano diâmetro nominal = 25,00 mm	Perfuração por percolação d'água (CA):	- m	à	- m
Trado helicoidal diâmetro mínimo = 56,00 mm	Avanço Bartlete Amostrador (BA):	-7, m	à	-7,45 m
Amostrador tipo Raymond diâmetro interno = 34,9 mm	Prof. Revestimento:	- m	à	- m
Marfeto com peso total = 65 Kg.	Uso de Lama Bentonítica:	- m	à	- m

Figura 34 – Boletim de Sondagem SP-06

SP-07

Cliente : Autopista Litoral Sul S/A

Obra : BR 376/PR Km 617+420m - Pista Norte

Local: São José dos Pinhais - Paraná

Data: 30/06/16

Referência: 02696-16

Escala: 1/100 Nível d'água Inicial: N.E. Data Inicial: 30/06/16 : hs Coordenadas: N 7168072,806
Cota : 909,50 m Nível d'água Final : N.E. Data Final : 01/07/16 16:00 hs E 683681,807

Número Amostra	Cota do Furo	Penetração/30 Cm		Acum. 2a.+3a. Camada	Gráfico Nspt 2a. + 3a. Camada 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50	Nível água	Classificação do Material	Cota mudança de camada
		1ª + 2ª Camada	2ª + 3ª Camada					
0	1,00 m	2	3	3	TC	Revestimento 2 m	Argila silto arenosa, marrom, consistência mole.	-0,48 m
1	2,00 m	6	7	10			Silte arenoso, marrom avermelhado, compactidade pouco compacta.	-1,78 m
2	3,00 m	12	16	26				
3	4,00 m	13	17	43			Silte argilo arenoso, marrom claro, consistência rija a dura.	
4	5,00 m	21	28	71				
5	6,00 m	26	29	100	TH			-5,70 m
6	7,00 m	26	28	128				
7	8,00 m	20	20	148			Silte argilo arenoso, cinza variegado, consistência dura.	
8	9,00 m	21	23	171				-8,84 m
9	10,00 m	12	27	198			Areia siltosa, cinza variegado, compactidade muito compacta.	-10,09 m
10	11,00 m	30/24						
11	12,00 m						Impenetrável ao Trépano de Lavagem possivelmente por presença de pedras soltas, rocha ou alteração de rocha. Recomendamos o item 8.4.4. (Uso do método de perfuração Rotativa), caso haja necessidade técnica de continuar a investigação do subsolo até a profundidades superiores à cota -10,09 m, alcançada atendendo as especificações do item	
12	13,00 m							
13	14,00 m							
14	15,00 m							
15	16,00 m							
16	17,00 m							
17	18,00 m							
18	19,00 m							
19	20,00 m							
20	21,00 m							

Eng. Civil Resp.: SAMUEL LOPES Desenho: Bruno Henrique Lopes Fiscal de Obra: Marcos Marcelino Sondador: Avelino José Moreira Filho

Parâmetros utilizado na execução deste ensaio de acordo com NBR6484-Solo-Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT

Dímetro Revestimento = 63,50 mm	Avanço Trado Concha (TC):	-45 m	à	-1, m
Hastes diâmetro interno = 25,00 mm	Avanço Trado Helicoidal (TH):	-1,45 m	à	-10, m
Trépano diâmetro nominal = 25,00 mm	Perfuração por percolação d'água (CA):	- m	à	- m
Trado helicoidal diâmetro mínimo = 56,00 mm	Avanço Barilete Amostrador (BA):	10, m	à	-10,09 m
Amostrador tipo Raymond diâmetro interno = 34,9 mm	Prof. Revestimento:	- m	à	-2, m
Martelo com peso total = 65 Kg.	Uso de Lama Bentonítica:	- m	à	- m

ENSAIO DE TREPANAÇÃO

10 min. cm.

10 min. cm.

10 min. cm.

Figura 35 – Boletim de Sondagem SP-07

SP-08

Cliente : Autopista Litoral Sul S/A

Data: 28/06/16

Obra : BR 376/PR Km 617+420m - Pista Norte

Local: São José dos Pinhais - Paraná

Referência: 02696-16

Escala: 1/100 Nível d'água Inicial: N.E. Data Inicial: 28/06/16 : hs Coordenadas: N 7168067,849
Cota : 905,00 m Nível d'água Final : N.E. Data Final : 01/07/16 8:10 hs E 683665,737

Número Amostra	Cota do Furo	Penetração/30 Cm		Acum. 2a.+3a. Camada	Gráfico Nspt 2a.+ 3a. Camada	Nível água	Classificação do Material	Cota mudança de camada
		1ª + 2ª Camada	2ª + 3ª Camada					
0	1,00 m	5	3	3			Silte argilo arenoso, marrom, consistência mole.	0,00 m
1	2,00 m	6	6	9			Silte arenoso, marrom claro, compactidade pouco compacta à medianamente compacta.	-1,13 m
2	3,00 m	7	9	18				
3	4,00 m	7	9	27				
4	5,00 m	8	12	39			Areia siltosa, branco variegado, com presença de mica, compactidade medianamente compacta.	-3,85 m
5	6,00 m	6	7	46				
6	7,00 m	9	10	56			Areia siltosa, marrom claro, com presença de mica, compactidade pouco compacta à medianamente compacta.	-4,45 m
7	8,00 m	8	7	63				
8	9,00 m	8	10	73			Silte arenoso, marrom, compactidade pouco compacta.	-6,60 m
9	10,00 m	10	12	85				
10	11,00 m	8	9	94				
11	12,00 m	9	12	106			Areia siltosa, marrom claro, com presença de mica, compactidade medianamente compacta à compacta.	-7,80 m
12	13,00 m	17	19	125				
13	14,00 m	17	21	146				
14	15,00 m	19	24	170				
15	16,00 m	23	28	198			Areia siltosa, marrom, com presença de mica e pedregulhos, compactidade compacta.	-14,15 m
16	17,00 m							
17	18,00 m						Interrompida a cravação do amostrador tipo Raymond na cota -15,45 m, conforme solicitação do cliente, atendendo as especificações do item 6.4.2. da NBR 6484 - 2001.	-15,45 m
18	19,00 m							
19	20,00 m							
20	21,00 m							

Eng. Civil Resp.: SAMUEL LOPES Desenho: Bruno Henrique Lopes Fiscal de Obra: Marcos Marcelino Sondador: Avelino José Moreira Filho
Parâmetros utilizados na execução deste ensaio de acordo com NBR 6484-Solo-Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT

Diâmetro Revestimento = 63,50 mm
Hastes diâmetro interno = 25,00 mm
Trépano diâmetro nominal = 25,00 mm
Trado helicoidal diâmetro mínimo = 56,00 mm
Amostrador tipo Raymond diâmetro interno = 34,9 mm
Martelo com peso total = 65 Kg.

Avanço Trado Concha (TC): -4,5 m à -1, m
Avanço Trado Helicoidal (TH): -1,45 m à -9, m
Perfuração por percolação d'água (CA): -9,45 m à -15, m
Avanço Barilete Amostrador (BA): -15, m à -15,45 m
Prof. Revestimento: -, m à -2, m
Uso de Lama Bentonítica: -, m à -, m

Figura 36 – Boletim de Sondagem SP-08

SP-09

Cliente : Autopista Litoral Sul S/A

Obra : BR 376/PR Km 617+420m - Pista Norte

Local: São José dos Pinhais - Paraná



Data: 20/06/16

Referência: 02696-16

Escala: 1/100 Nível d'água Inicial: N.E. Data Inicial: 20/06/16 12:00 hs Coordenadas: N 7168083,174
Cota : 897,40 m Nível d'água Final : 0,00 m Data Final : 00/01/00 : hs O 683651,228

Número Amostra	Cota do Furo	Penetração/30 Cm		Acum. 2a.+3a. Camada	Gráfico Nspt 2a.+ 3a. Camada 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50	Nível água	Classificação do Material	Cota mudança de camada
		1ª + 2ª Camada	2ª + 3ª Camada					
0	1,00 m	3	4	4			Silte argiloso, marrom claro, consistência mole.	-0,50 m
1	2,00 m	10	13	17			Silte arenoso, marrom claro, compactidade medianamente compacta.	-1,80 m
2	3,00 m	6	7	24				
3	4,00 m	5	8	32			Idem, marrom variegado, compactidade pouco compacta a medianamente compacta.	
4	5,00 m	6	9	41				
5	6,00 m	7	10	51				
6	7,00 m	10	10	61				
7	8,00 m	10	11	72			Silte argilo arenoso, marrom claro, consistência média a rija	-7,45 m
8	9,00 m						Interrompida a cravação do amostrador tipo Raymond na cota -7,45 m, conforme solicitação do cliente, atendendo as especificações do item 6.4.2. da NBR 6484 - 2001.	
9	10,00 m							
10	11,00 m							
11	12,00 m							
12	13,00 m							
13	14,00 m							
14	15,00 m							
15	16,00 m							
16	17,00 m							
17	18,00 m							
18	19,00 m							
19	20,00 m							
20	21,00 m							

Eng. Civil Resp.: SAMUEL LOPES Desenho: Bruno Henrique Lopes Fiscal de Obra: Marcos Marcelino Sondador: Avelino José Moreira Filho

Parâmetros utilizado na execução desse ensaio de acordo com NBR 6484-Solo-Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT:

Diâmetro Revestimento = 63,50 mm	Avanço Trado Concha (TC):	-, m	à	-, m
Hastes diâmetro interno = 25,00 mm	Avanço Trado Helicoidal (TH):	-45 m	à	-7, m
Trépano diâmetro nominal = 25,00 mm	Perturação por percolação d'água (CA):	-, m	à	-, m
Trado helicoidal diâmetro mínimo = 56,00 mm	Avanço Bartlete Amostrador (BA):	-7, m	à	-7,45 m
Amostrador tipo Raymond diâmetro interno = 34,9 mm	Prof. Revestimento:	-, m	à	-, m
Martelo com peso total = 65 Kg.	Uso de Lama Bentonítica:	-, m	à	-, m

Figura 37 – Boletim de Sondagem SP-09

6.2.2 Resistividade elétrica do solo

Os ensaios laboratoriais com amostras deformadas seguiram os procedimentos descritos no Anexo C da Norma NBR 16254-1 (ABNT, 2014) com a utilização de uma caixa padrão, denominada *soil box*, com dimensões de 5 cm de altura, 5 cm de largura e 12 cm de comprimento. A caixa tem suas laterais e o fundo de acrílico (material isolante) e duas placas de cobre paralelas nas laterais maiores. O ensaio consiste em moldar uma amostra de solo em um volume conhecido e realizar medições de tensão e de corrente elétrica, uma vez que a relação entre tensão e corrente é a resistência elétrica do solo. Para obtenção da resistividade é necessário multiplicar a resistência elétrica obtida por um fator geométrico k , que para a *soil box* utilizada é definida pela ABNT (2014) como 0,24.

Para medição da resistência foram utilizados um regulador de tensão que gera uma diferença de potencial (ddp) no solo, em Volts (V); e um multímetro empregado para medir a corrente elétrica, em miliampères (mA). Os equipamentos utilizados nos ensaios são apresentados na Figura 38.



(a)



(b)



(c)

Figura 38 – Equipamentos utilizados para o ensaio de resistividade elétrica do solo: (a) Regulador de tensão; (b) Multímetro; (c) Soil box

FONTE: Mikos, 2017

Tais ensaios foram realizados com o solo proveniente da amostragem obtida com os ensaios de SPT nas camadas onde se dispunha de material suficiente para preencher a *soil box*. Desse modo, foram avaliados materiais com diferentes características geotécnicas, entre elas: teor de argila e finos e índices de liquidez e plasticidade. As camadas escolhidas, bem como

suas propriedades, são apresentadas na Tabela 4. Salienta-se que como o solo utilizado para o ensaio foi passante na peneira 2 mm, as porcentagens foram recalculadas, de modo que a fração passante na peneira correspondesse à 100% do solo.

Tabela 4 – Solos avaliados quanto a resistividade elétrica

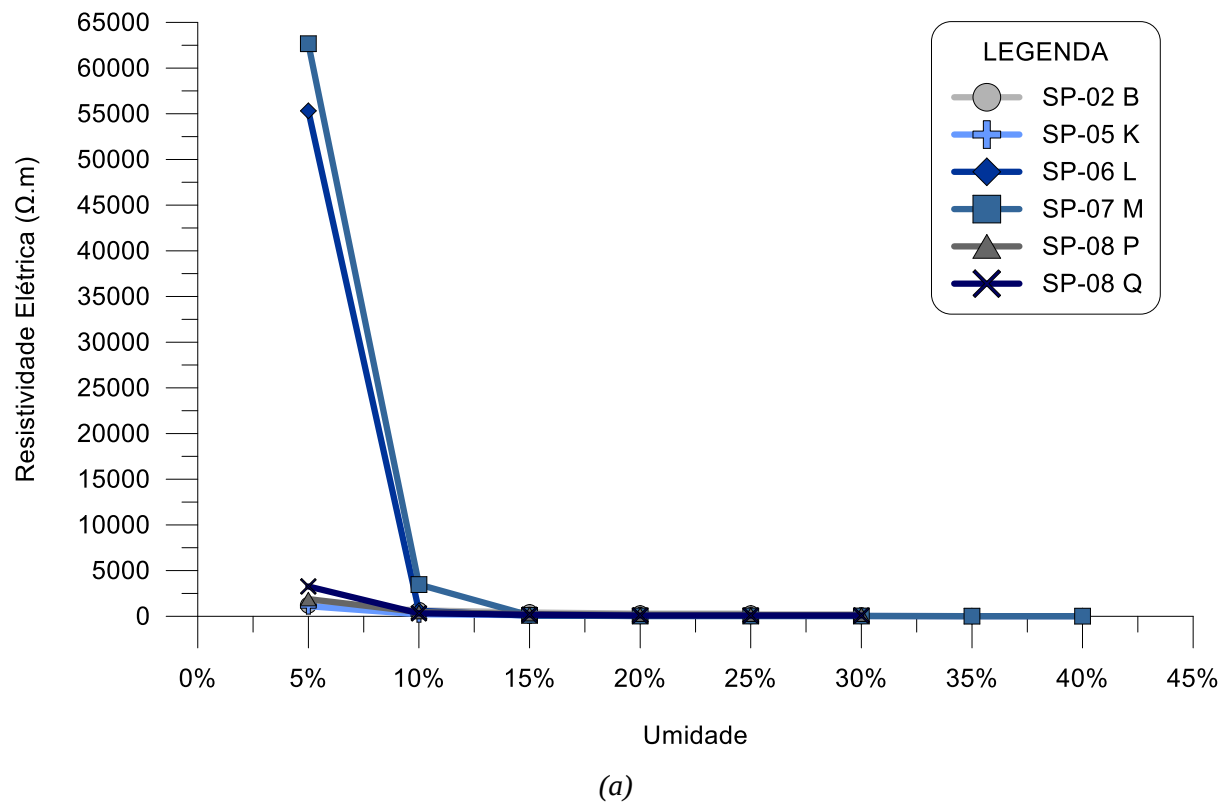
<i>Solo</i>	<i>% argila</i>	<i>% silte</i>	<i>% areia</i>	<i>LL (%)</i>	<i>LP (%)</i>	<i>IP (%)</i>	<i>Classificação</i>
<i>SP-02 E</i>	12	32	56	30	25	5	<i>Areia Siltosa</i>
<i>SP-05 K</i>	14	52	33	42	32	10	<i>Silte arenoso</i>
<i>SP-06 L</i>	19	46	35	48	36	12	<i>Silte arenoso</i>
<i>SP-07 M</i>	4	56	40	55	49	6	<i>Silte arenoso</i>
<i>SP-08 P</i>	8	43	49	34	30	4	<i>Areia Siltosa</i>
<i>SP-08 Q</i>	13	42	45	41	31	10	<i>Areia Siltosa</i>

FONTE: Mikos (2017)

Os solos M e P apresentaram porcentagem de argila inferior à 10%, enquanto nas demais amostras variou entre 12 e 19%. Os solos E e P apresentaram maior teor de areia, o que é refletido no limite de liquidez de 30 e 34%, respectivamente. As amostras com maior porcentagem de finos tenderam a apresentar maiores limites de consistência.

Para o melhor entendimento da resistividade elétrica do solo foram realizados dois tipos de ensaio: o tipo 1 com o índice de vazios constante e diferentes incrementos de umidade, e o tipo 2 com umidade constante e variações no índice de vazios. Para o ensaio tipo 1 foram realizados incrementos de 5% de umidade, com índice de vazios constante e igual à unidade ($e=1$). Para cada umidade foram realizadas 7 leituras de resistência elétrica, com aplicação de tensão de 10 V, 20 V, 30 V, 40 V, 60 V, 80 V e 100 V. Os resultados são expressos graficamente com valores de tensão no eixo das ordenadas e medidas de corrente elétrica no eixo das abscissas. Como a resistência elétrica é a relação entre tensão e corrente, o próprio coeficiente angular da reta é a resistência do solo.

Uma vez que os valores para os solos mais finos foram muito altos para baixas umidades, foi elaborado um gráfico geral (Figura 39a), e outro com aproximação dos patamares de resistividade elétrica residual (Figura 39b).



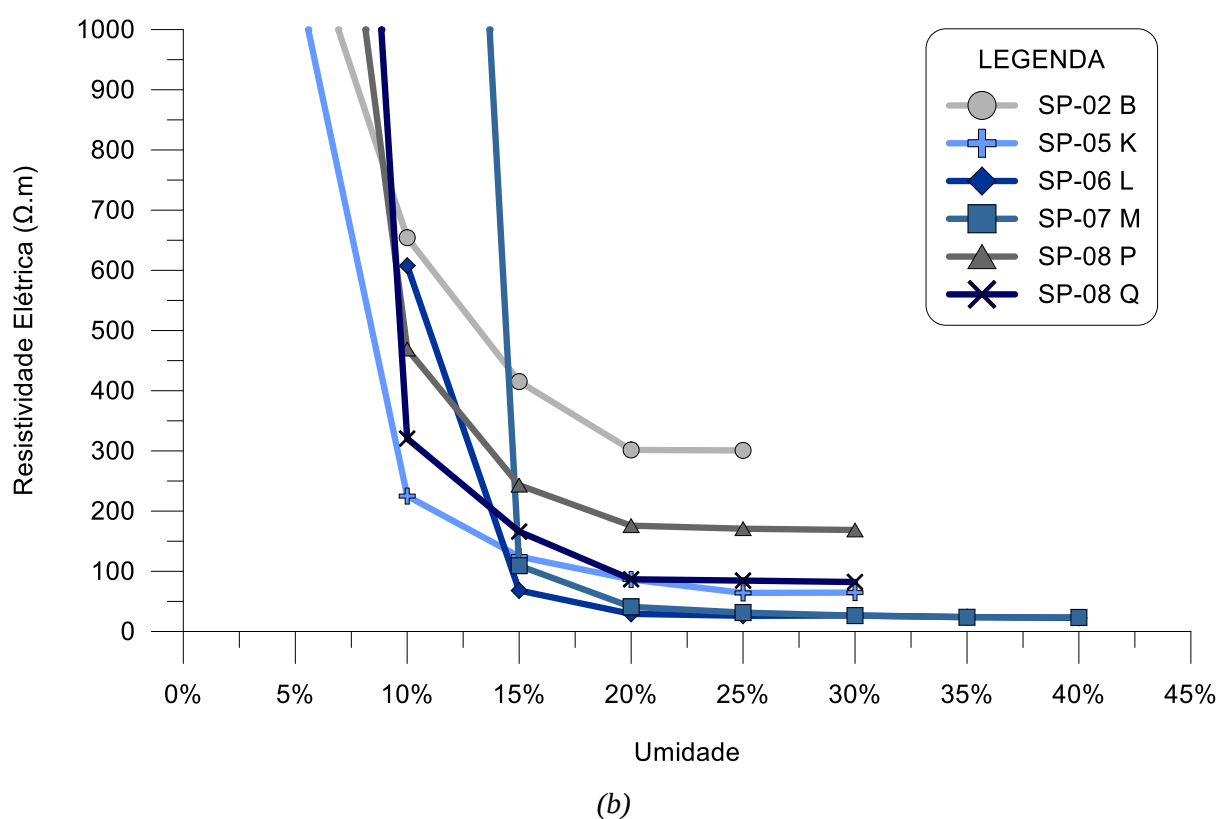


Figura 39 – Valores de resistência elétrica com variação da umidade

Para conhecimento do comportamento da resistividade elétrica do solo em relação ao índice de vazios, foram realizados ensaios com umidade constante e igual a 20%, valor em que o parâmetro elétrico se estabilizou. Para tal, foram ensaiadas quatro amostras com índice de vazios abaixo e acima da unidade. Os resultados de resistência elétrica obtidos nesse ensaio são apresentados na Figura 40, onde os pontos vermelhos foram obtidos pelo ensaio anterior, do tipo 1.

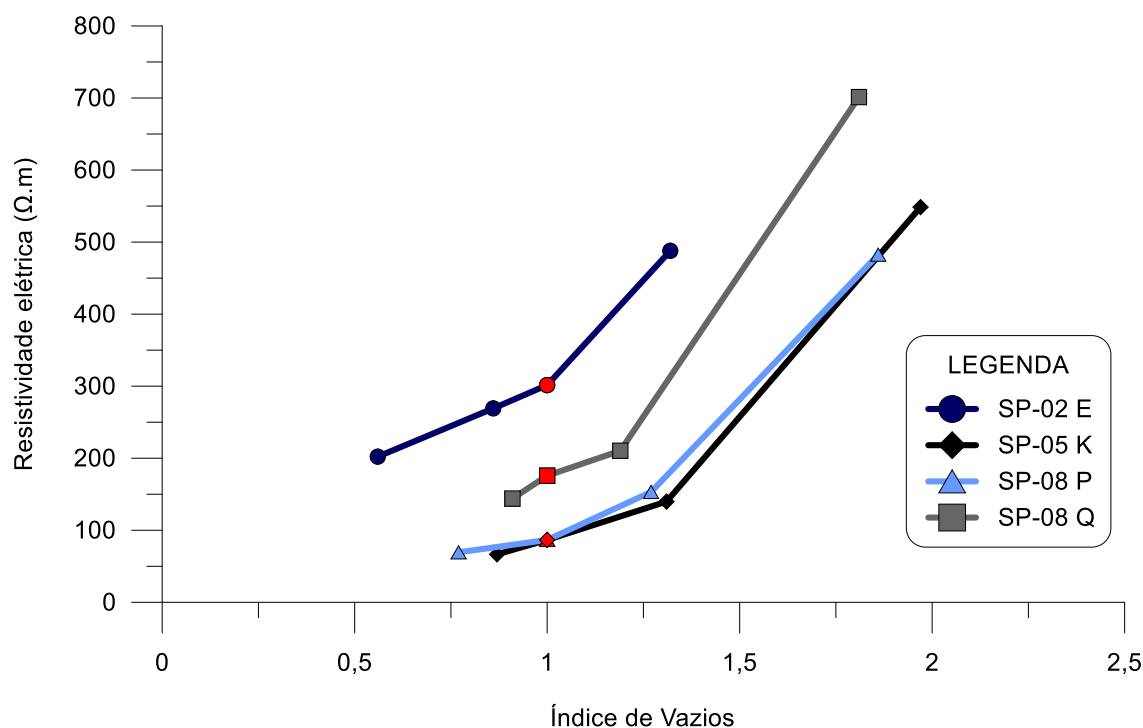


Figura 40 – Valores de resistência elétrica com variação do índice de vazios

FONTE: Mikos, 2017

6.2.3 Coleta de amostras indeformadas

Em complemento às investigações geotécnicas realizadas, foram efetuadas coletas de amostras indeformadas em 6 diferentes pontos da área de estudos experimentais. Em cada um desses locais foram coletadas cinco amostras em tubos de PVC com 10 cm de diâmetro e 6 cm de altura para obtenção específico natural, umidade natural, índices físicos e também para a realização do ensaio de resistividade elétrica. Também foram realizados ensaios de caracterização, tais como análise granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade e peso específico real dos grãos. A locação dos pontos de coleta de amostras indeformadas é apresentada na Figura 41.



Figura 41 – Localização da coleta de amostras indeformadas

Para a coleta foi considerada uma profundidade mínima de 50 cm e os PVC's foram cravados estaticamente, com a retirada de solo lateral ao tubo para alívio das tensões até o PVC ser cravado por inteiro. O procedimento de coleta da amostra indeformada é apresentado na Figura 42.



Figura 42 – Coleta de amostra indeformada

As amostras foram coletadas com excesso de solo nas duas extremidades e, de modo a manter a umidade natural, embrulhadas com plástico filme e colocadas em caixa de isopor isolada (Figura 43). Optou-se por não utilizar parafina visto que a mesma poderia influenciar na umidade da amostra.



Figura 43 – 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 44). Para fixar as chapas no PVC foi utilizado um grampo sargento.



Figura 44 – Ensaio de resistividade elétrica em amostra indeformada: (a) regularização das faces e (b) chapas de cobre.

Durante a realização do ensaio, foram colocadas garras jacaré nas “abas” das chapas de cobre, com procedimento e equipamentos iguais ao ensaio na *soil box*. 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 45.

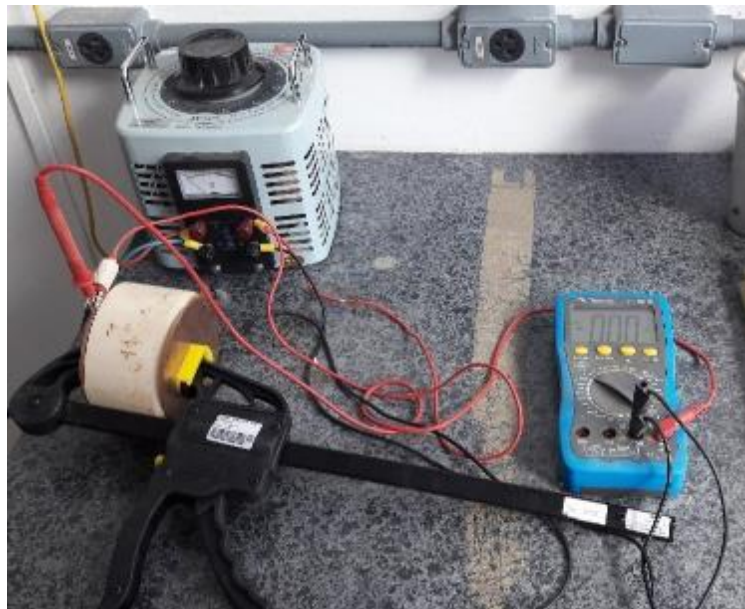


Figura 45 – Ensaio de resistividade elétrica em amostra indeformada

Um resumo com os resultados obtidos nos ensaios de laboratório pode ser visualizado na Tabela 5.

Tabela 5 – 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	2,542	0,66	90	Silte areno argiloso	45	31	14
2	268,6	31	1,79	1,37		0,85	91				
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	Argila			
3	1454,8	26	1,79	1,42	2,484	0,75	86	areno	47	31	16
3	1312,4	26	1,80	1,42		0,75	88	siltosa			
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	2,535	0,81	86	Argila			
4	2430,3	32	1,73	1,31		0,93	87	areno	53	31	22
4	1652,1	26	1,83	1,45		0,74	88	siltosa			
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	Argila			
5	1754,5	30	1,70	1,31	2,514	0,92	82	areno	52	35	17
5	1236,2	32	1,74	1,31		0,91	89	siltosa			
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	2,555	0,62	88	Argila silto			
6	2014,1	22	1,83	1,50		0,70	81	arenosa	56	36	20
6	2493,6	20	1,97	1,63		0,56	93				

* Dados obtidos através de ensaios da empresa Fassina (Anexo 1)

6.2.4 Resistividade elétrica da calda de cimento

Durante a etapa de execução da contenção experimental, corpos de prova da calda de cimento para ensaios de resistividade elétrica foram coletados. A nomenclatura adotada para essas amostras foi a mesma do nome de identificação do grampo (G) e do tirante (T), ou seja, um número que indica qual a variação executada e mais uma letra (a, b ou c) para identificar as 3 repetições em campo. Por fim, uma numeração no final indica o corpo de prova, pois foram coletados 3 CPs para cada furo.

Foram moldados um total 228 corpos de prova (CP's) cilíndricos com dimensões de 10 cm x 20 cm da calda de cimento utilizada para as injeções e reinjeções dos grampos e dos tirantes da obra. Ensaios de resistividade elétrica foram realizados na Universidade Federal do Paraná, com o equipamento Resipod, com idades de 7, 14, 28, 56, 112, 140, 364 e 588 dias, sendo as leituras realizadas em períodos múltiplos de 28 dias, de modo a entender o comportamento da resistividade elétrica ao longo do tempo.

Segundo Gowers e Millard (1999), o Método Wenner ou método de quatro pontos é a técnica mais utilizada para medição de resistividade e, apesar de ter sido desenvolvido originalmente determinar a resistividade do solo, possui grande aplicabilidade para o concreto. O procedimento de ensaio consistiu em utilizar quatro eletrodos espaçados a igual distância de 50 mm, onde os elementos externos aplicavam a corrente elétrica e os internos mediam a diferença de potencial (Medeiros Jr. & Gans, 2017). O equipamento Resipod e os corpos de provas ensaiados podem ser observados na Figura 46.



Figura 46 – Equipamento Resipod e corpos de prova da calda de cimento

O ensaio foi realizado de acordo com os procedimentos da Norma Espanhola PrUNE 83988 – 2 (*Determinación de la Resistividad Eléctrica Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner*), pois essa é a única que fornece um fator de forma de acordo com as dimensões do corpo de prova e do espaçamento entre eletrodos adotados. Para a correção do valor de resistividade, o valor medido pelo equipamento foi multiplicado pelo fator de forma. Para os ensaios realizados e apresentados no presente relatório, o fator de forma obtido de acordo com a norma foi de 0,377, aplicado em CPs de 10x20 cm e espaçamento dos eletrodos de 50 mm.

O procedimento do ensaio consistiu na medição de seis valores de resistividade de cada corpo de prova. Para tal, o equipamento foi encostado na face lateral do CP em seis seções diferentes, conforme a Figura 47 e, para cada idade previamente descrita, a medição foi realizada na mesma seção.



Figura 47 – Ensaio de resistividade elétrica

Como exemplo, cita-se que para a calda de cimento utilizada no preenchimento do elemento G3b foram coletados 6 corpos de prova, sendo 3 inseridos na câmara seca e os outros 3 mantidos na câmara úmida. Os corpos de prova G3b1, G3b2 e G3b3 foram armazenados na câmara seca, com umidade em torno de 50% e temperatura constante de 23°C. Os corpos de prova G3b4, G3b5 e G3b6 foram mantidos na câmara úmida, com umidade de aproximadamente 95% e temperatura de 23°C. Desse modo, os resultados obtidos de resistividade elétrica para os corpos de prova retirados do elemento G3b podem ser visualizados na Figura 48.

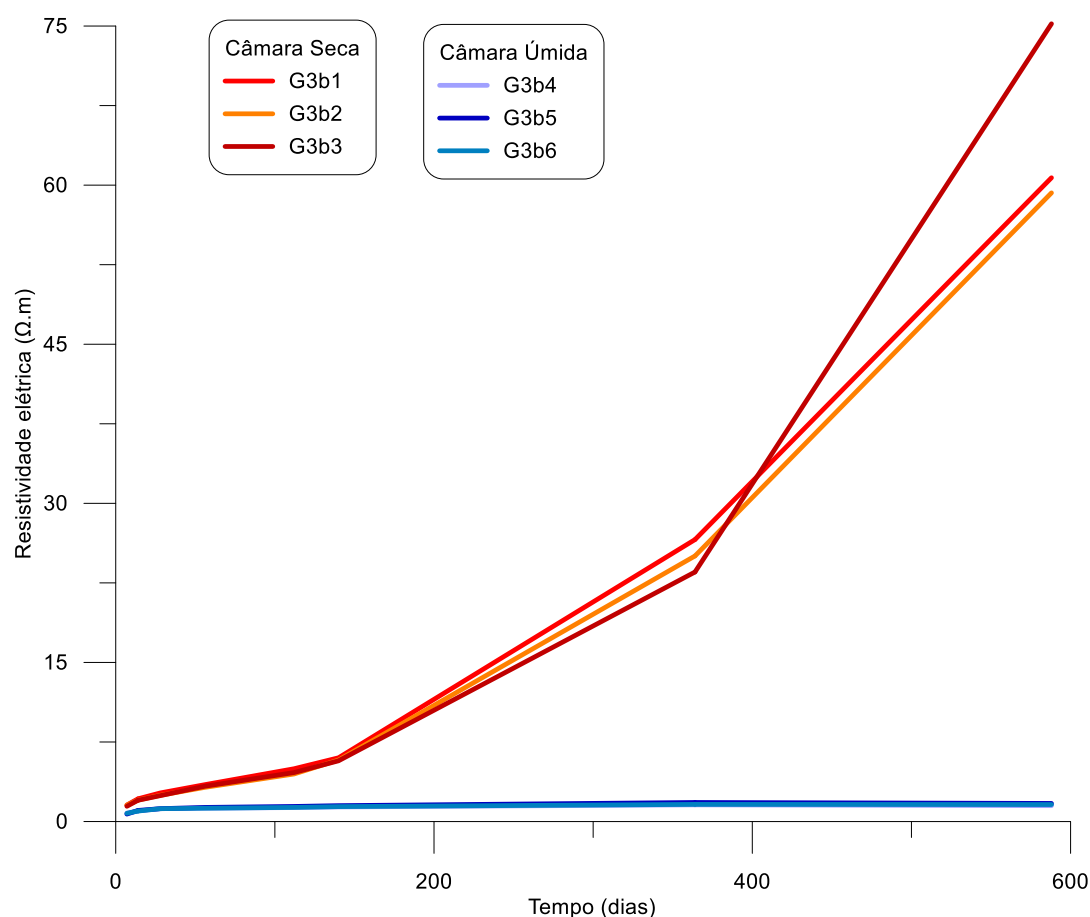


Figura 48 – Comparação da resistividade elétrica na câmara seca e câmara úmida

6.3 Análise de resultados

6.3.1 Ensaio a percussão SPT

Com base nos laudos de cada furo de sondagem foi possível avaliar a estratigrafia do local de maneira detalhada através da elaboração de perfis geológico-geotécnicos, definidos em seções pré-estabelecidas, conforme pode ser observado nas Figuras 49 e 50. Essas seções foram escolhidas de modo a abranger desde a parte superior do talude, até a porção inferior, na mesma direção em que os grampos e tirantes foram instalados.

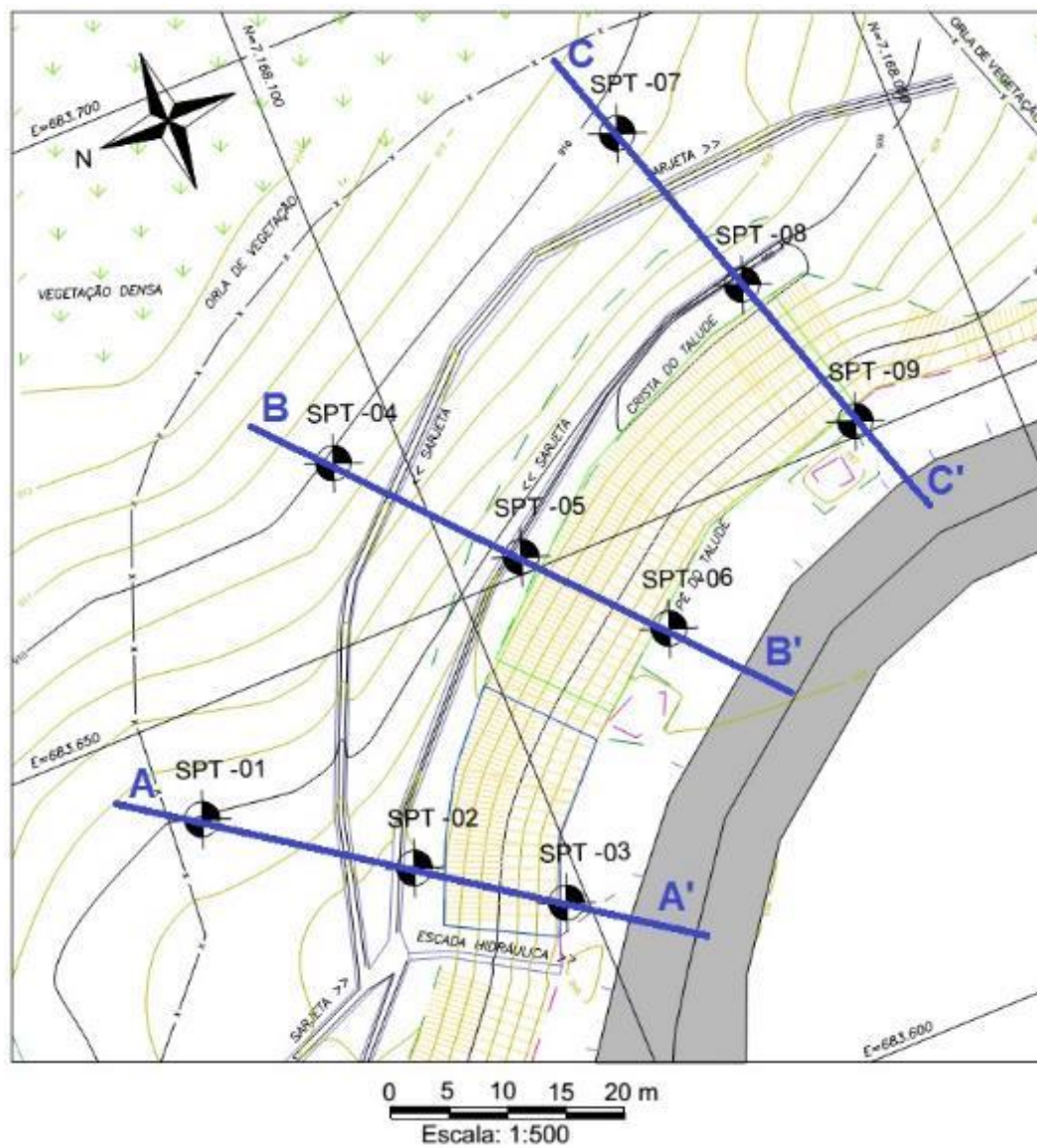
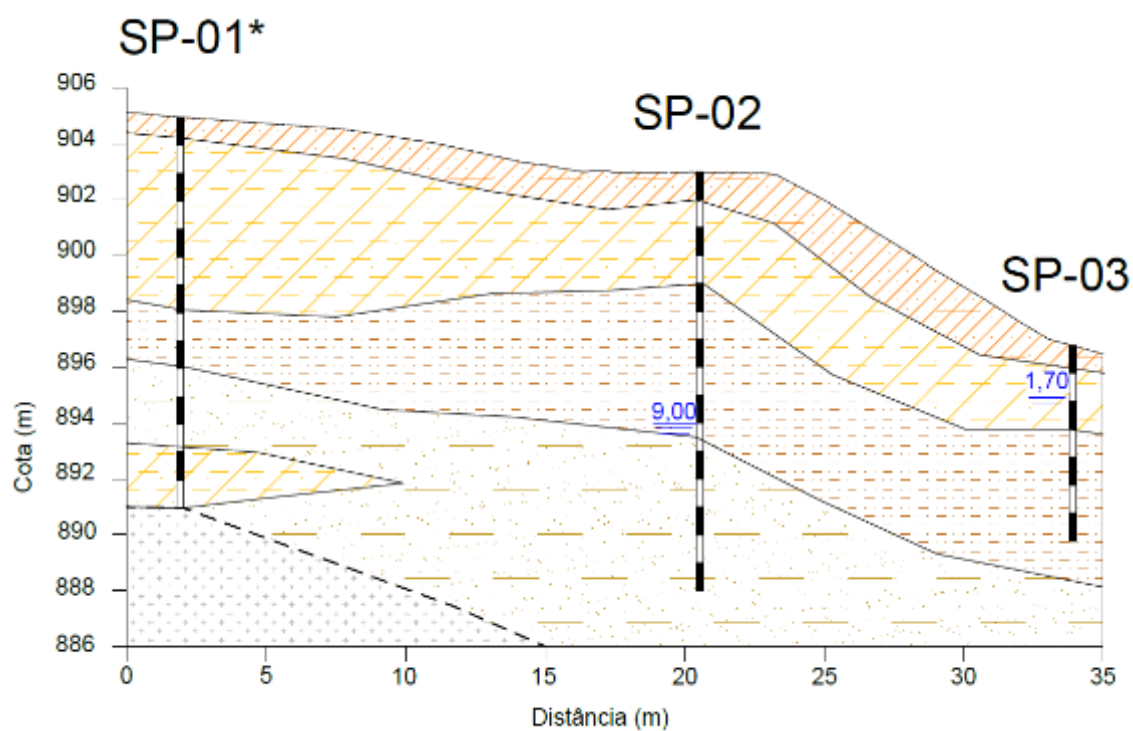
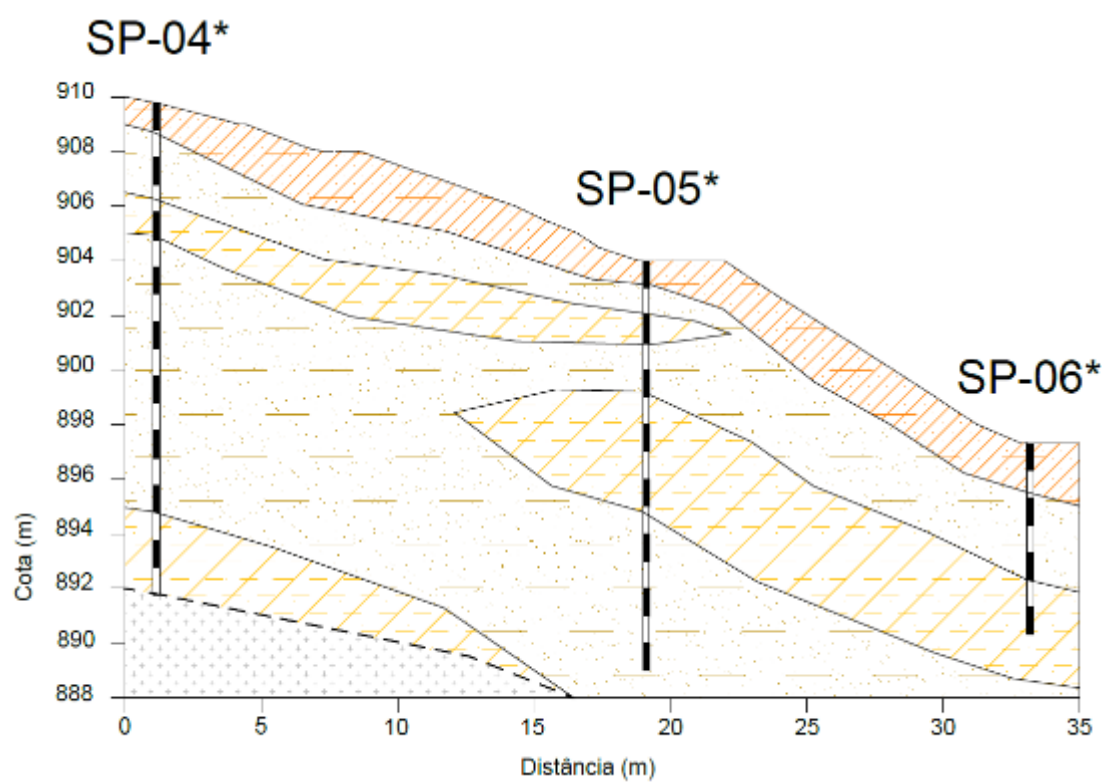


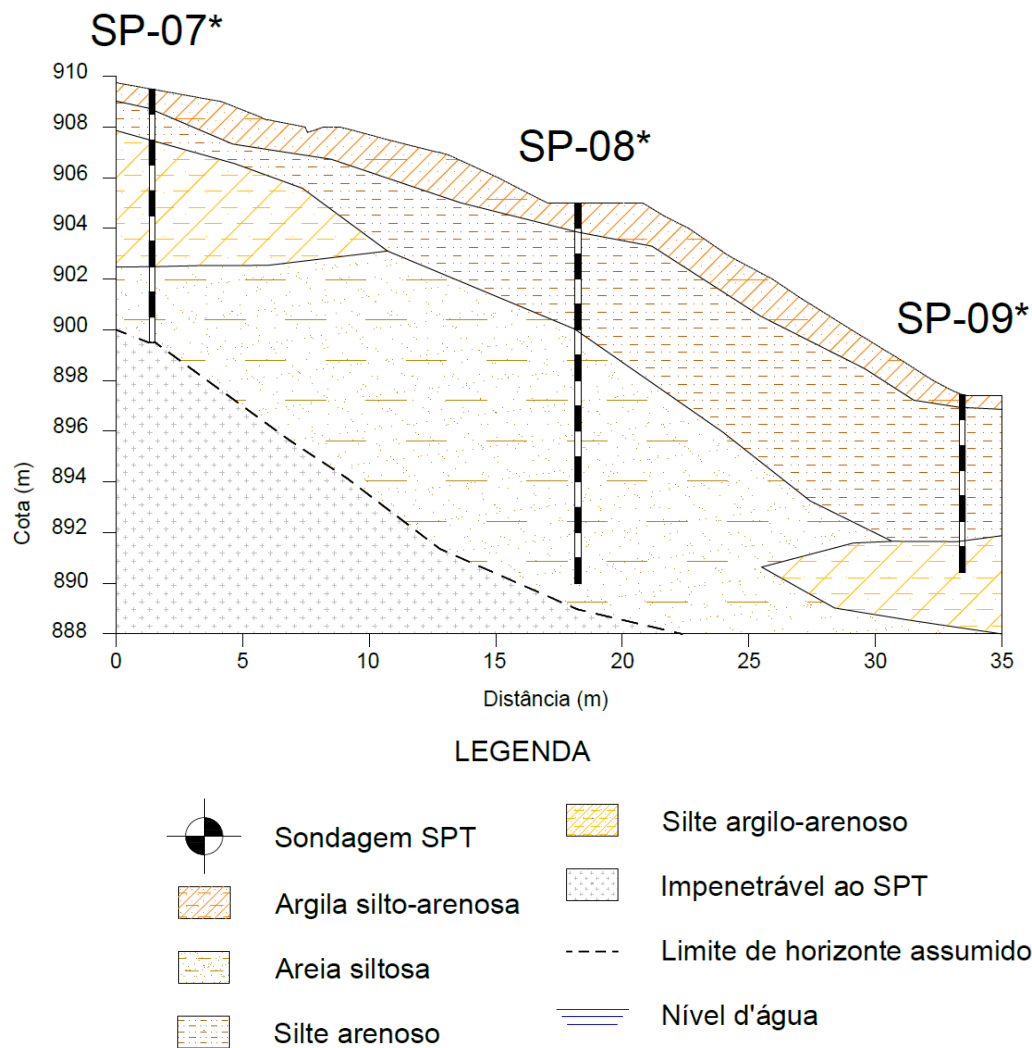
Figura 49 – Seções definidas para elaboração dos perfis geológico-geotécnicos



(a)



(b)



(c)

Figura 50 – Perfil geológico-geotécnico: (a) Seção A-A', (b) Seção B-B' e (c) Seção C-C'

* Nível de água não encontrado

Os perfis geológicos-geotécnicos foram reavaliados em conjunto com resultados de ensaios laboratoriais, isso permitiu uma caracterização completa do solo ao longo da profundidade. Tal atividade serviu de subsídio para o planejamento da estrutura de contenção experimental.

6.3.2 Resistividade elétrica do solo

As resistências elétricas obtidas variaram com a quantidade de água nas amostras, porém tenderam a se estabilizar após um valor de 20% e 25% de umidade, o que indica que a corrente elétrica passou, preferencialmente, pela água da amostra. Tais valores são os de maior interesse para o estudo, uma vez que a umidade natural do talude é em torno de 30%. Por outro lado, para umidades menores que 20% a resistividade elétrica foi muito alta devido à grande quantidade de ar na amostra.

Observou-se que a resistividade residual da amostra arenosa foi superior à da amostra siltosa. Segundo Campanella e Weemeees (1990), com o aumento de finos no solo ocorre uma redução da porosidade, uma vez que os grãos menores ocupam os vazios formados entre os grãos maiores de areia. Cabe salientar ainda que a alta superfície específica das partículas contribuiu para a redução da resistividade elétrica, aumentando a passagem de corrente elétrica. Valores de resistividade elétrica do solo também foram obtidos ao multiplicar a resistência residual pelo fator geométrico da *soil box* (Tabela 6).

Tabela 6 – Resistividade residual do solo

Solo	Resistividade elétrica ($\Omega.m$)	Classificação
SP-02 E	300,8	Areia siltosa
SP-05 K	64,5	Silte arenoso
SP-06 L	22,6	Silte arenoso
SP-07 M	23,5	Silte arenoso
SP-08 P	168,7	Areia siltosa
SP-08 Q	82,1	Areia siltosa

FONTE: Mikos (2017)

Para melhor entendimento dos resultados obtidos, os resultados foram plotados sobre um gráfico apresentado por Braga (2006) com diferentes faixas de variação de resistividade elétrica e de modo a classificar os solos em função da sua granulometria como indica a Figura 51.

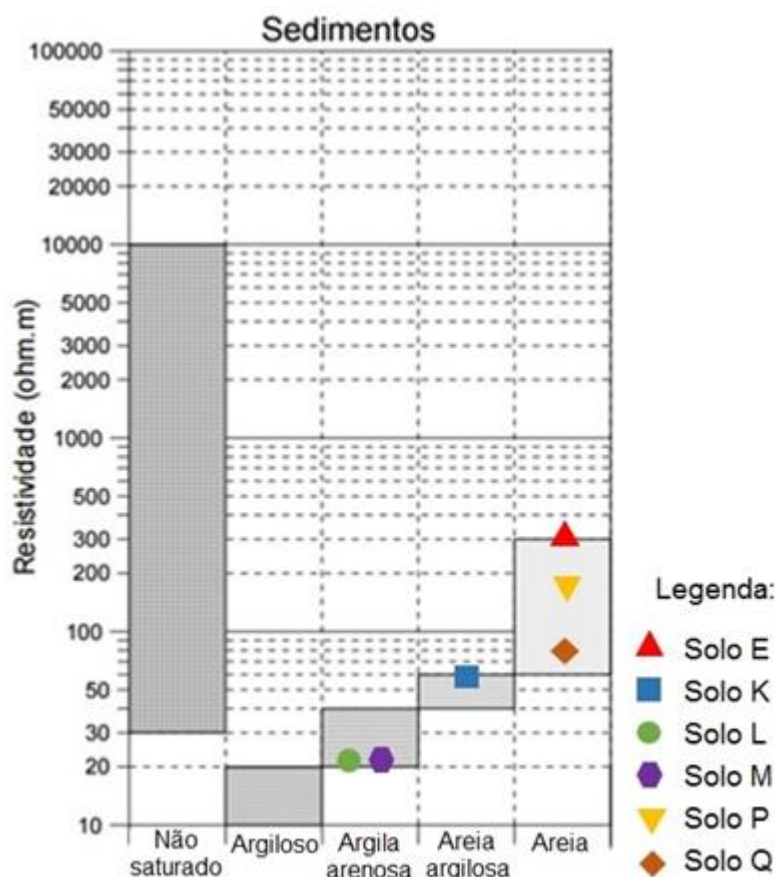


Figura 51 – Faixas de variação da resistividade elétrica

FONTE: Mikos, 2017

Os valores obtidos pelo ensaio condizem com as faixas apresentadas. Os solos L e M se enquadram em argila arenosa, pois mesmo com baixo teor de argila, apresentam comportamento plástico. O solo K também apresentou bastante teor de finos e foi classificado próximo a faixa de areia argilosa, e os solos E, P e Q, com valores mais altos, satisfazem solo arenoso, correspondente com suas classificações.

Percebeu-se uma tendência semelhante para os dois tipos de ensaio, onde a resistividade elétrica aumentou com a maior presença de vazios no solo. Tal característica correspondeu a um comportamento esperado, uma vez que um solo com maior índice de vazios, para uma mesma umidade, apresenta maior quantidade de ar em seus poros que dificulta a passagem de corrente elétrica e, conseqüentemente aumenta sua resistência elétrica.

6.3.3 Coleta de amostras indeformadas

Observou-se 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, observou-se que 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, cuja classificação foi a mesma do ponto 1 (silte areno-argiloso).

Com o intuito de aprofundar o entendimento dos resultados foram elaborados gráficos comparando a resistividade elétrica dos pontos com a umidade (Figura 52). 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 5723,0 $\Omega.m$, 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.

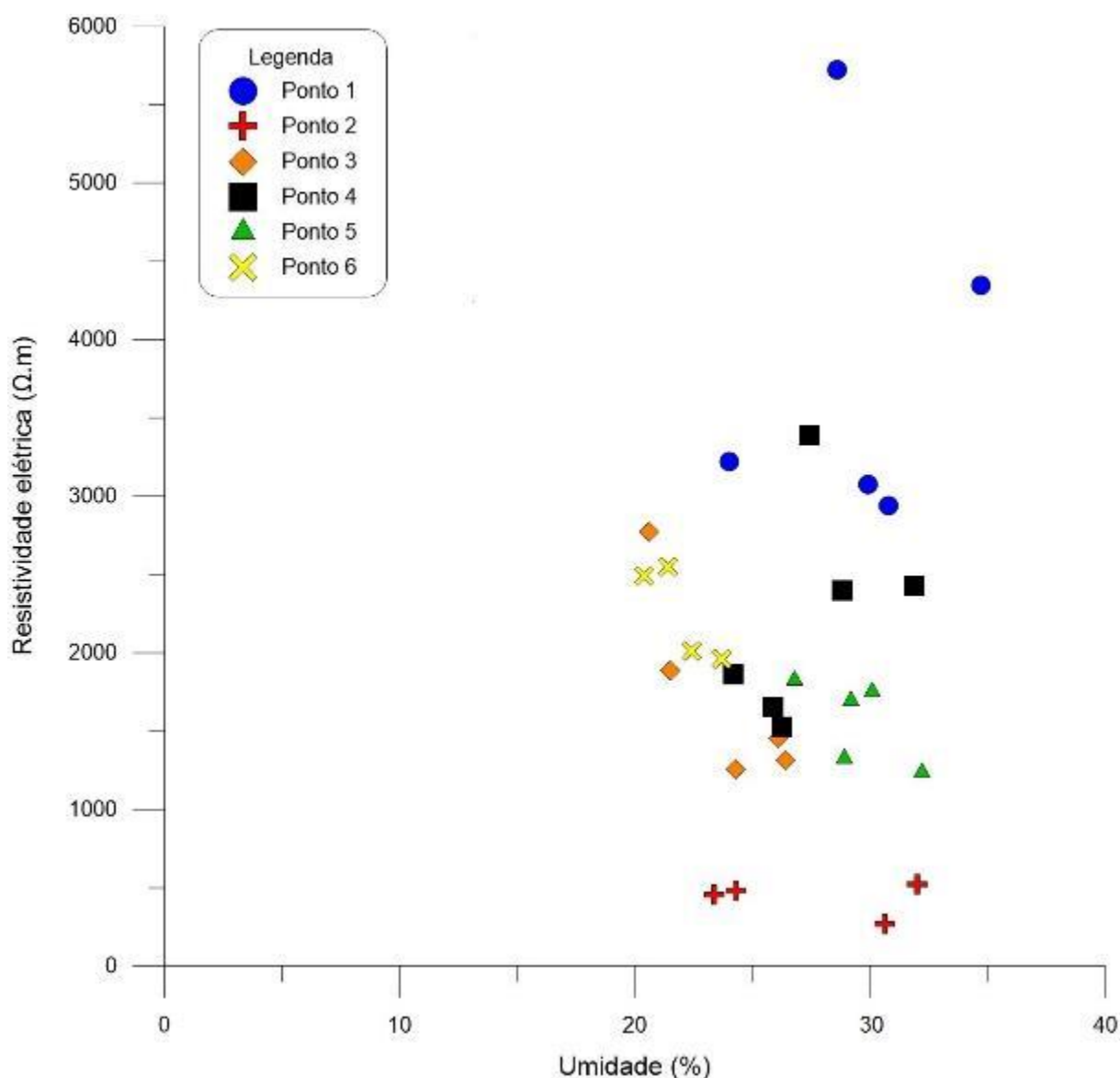


Figura 52 – Comparação entre a resistividade elétrica e a umidade

Verifica-se que de modo geral não foi possível obter homogeneidade nos resultados, provavelmente devido à fatores tais como heterogeneidade do solo, presença de pedregulhos e raízes na amostra (Figura 53), 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 53 – Amostra indeformada coletada no campo experimental (Ponto 1)

6.3.4 Resistividade elétrica da calda de cimento

Para os corpos de prova mantidos na câmara seca, percebeu-se um aumento da resistividade elétrica ao longo do tempo, sem estabilização. 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. Salienta-se que mesmo este estudo sendo voltado para o concreto, o princípio para o aumento da resistividade também se aplica para a pasta de cimento.

Para os corpos de prova mantidos na câmara úmida houve um aumento expressivo 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 pasta 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.

Para melhor comparação dos resultados, foram plotados em dois gráficos a variação da resistividade elétrica dos CPs mantidos em câmara seca, condição mais semelhante à calda de

cimento em campo. O principal objetivo foi a percepção do crescimento e da dispersão que ocorre ao longo do tempo. Um gráfico com os resultados obtidos para os corpos de prova dos grampos é apresentado na Figura 54.

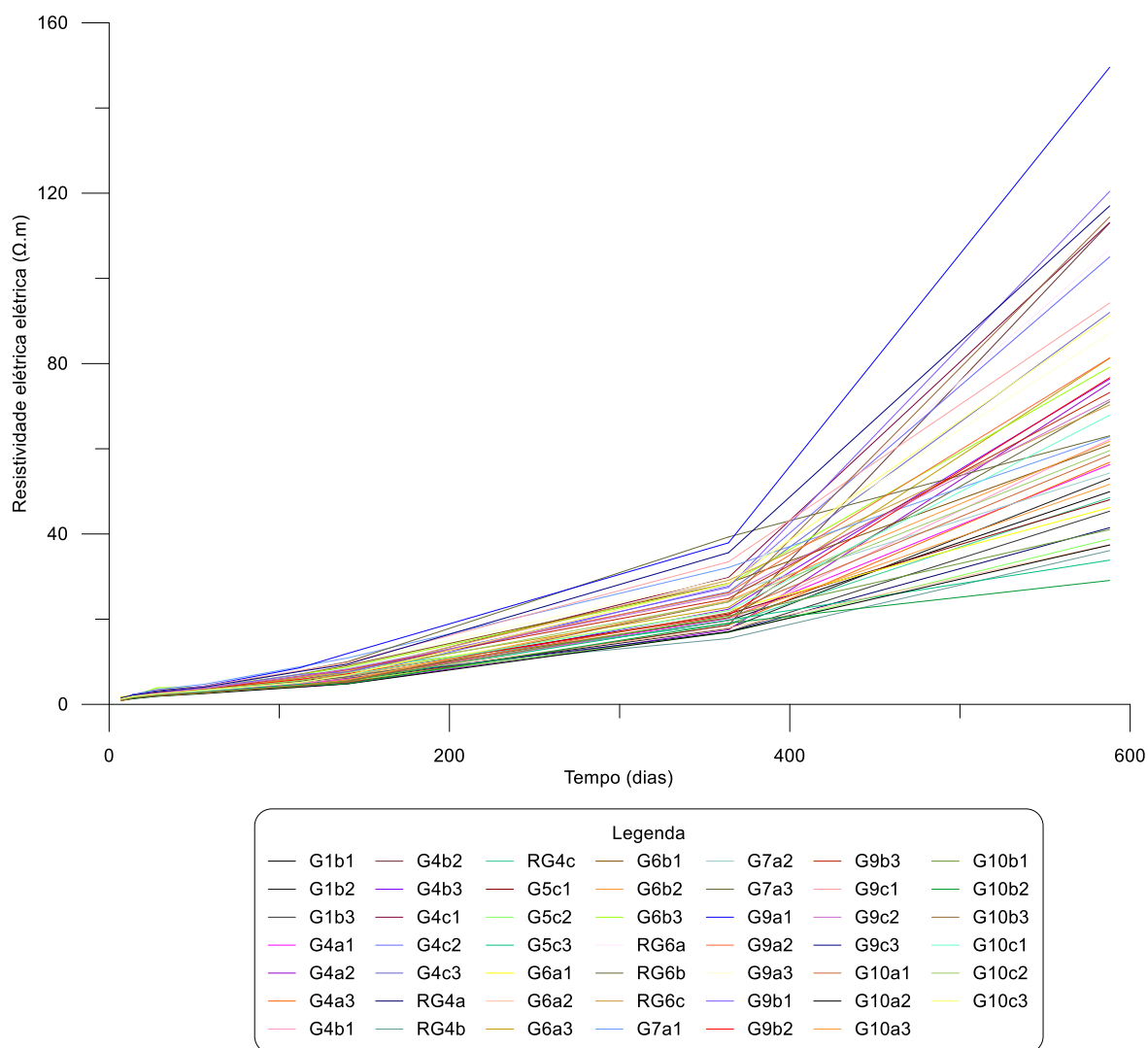


Figura 54 – Resistividade elétrica da calda de cimento dos grampos

Nos grampos, os valores de resistividade elétrica mínima foram de 43,2 $\Omega.m$ (G10b), e de no máximo com 80,55 $\Omega.m$ (G10b). Nos tirantes (Figura 55), a variação ocorreu de 38,1 $\Omega.m$ (T8a) até 79,0 $\Omega.m$ (T1a). A grande dispersão dos resultados para as diferentes amostras pode ser justificada pela variação das relações de água e cimento na produção da calda de cimento em campo. O entendimento/conhecimento dessa variação foi importante para a calibração do método

da Resistência Elétrica, uma vez que as propriedades elétricas da calda de cimento influenciam nos resultados.

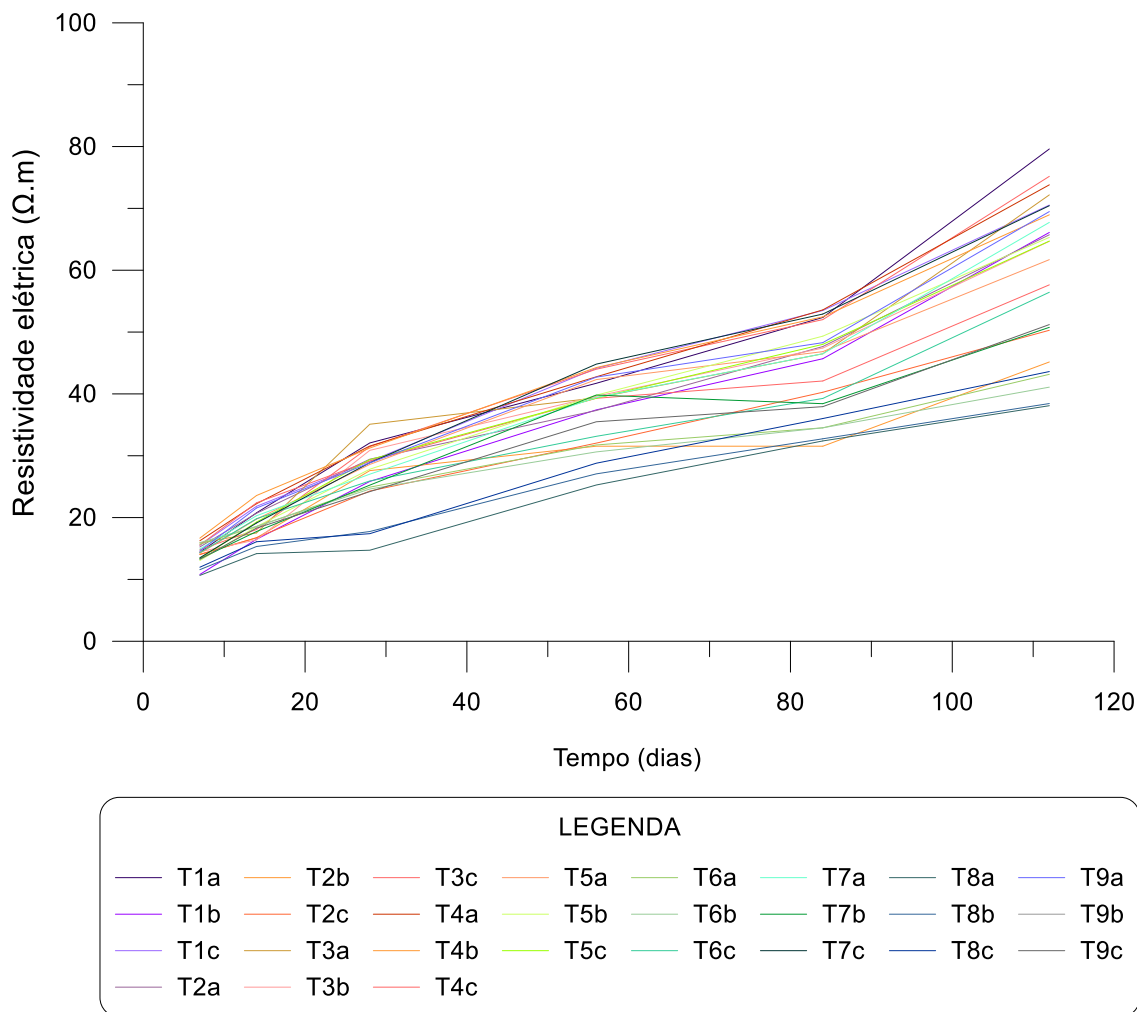


Figura 55 – Resistividade elétrica da calda de cimento dos tirantes

7 CONCEPÇÃO E IMPLANTAÇÃO DE UMA ESTRUTURA DE ESTABILIZAÇÃO EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE ANÁLISE NÃO DESTRUTIVAS

7.1 Introdução

Como parte do escopo desenvolvido ao longo do presente projeto, um campo experimental de estudos composto por um sistema de estabilização com elementos íntegros e com anomalias conhecidas foi concebido e implantado, visando avaliar os métodos não destrutivos selecionados e apresentados no item 0. Com relação às premissas para a análise, foram avaliados três aspectos principais: comprimento da barra, integridade da calda de cimento e presença de corrosão. Além disso, optou-se por utilizar um cabo coaxial paralelo as barras para melhor aplicação do método TDR (Chung *et al.*, 2015), tanto nos grampos como nos tirantes.

A localização do campo experimental foi definida com base em diferentes aspectos, tais como: características geométricas (altura e extensão do talude), localização, acessibilidade (equipamentos de sondagem e perfuração dos elementos de ancoragem) e posicionamento com relação à rodovia onde, por estar situado na alça de um retorno, eventuais limitações de tráfego durante o período de execução das estruturas representariam menos transtornos à operação da rodovia. Convergiu-se para um local situado no município de São José dos Pinhais – PR, região metropolitana de Curitiba, na pista norte da BR 376, km 617+300 m.

7.2 Resultados

7.2.1 Planejamento dos experimentos

Nos itens subsequentes são apresentados detalhes das etapas de planejamento da contenção experimental, incluindo dados sobre as variações adotadas nas estruturas de solo grampeado e cortina atirantada.

7.2.1.1 Solo grampeado

Os grampos executados no campo experimental compreenderam comprimentos de 6 e 12 m, valores esses que representavam os mais recorrentes nas obras da rodovia, sendo compostos

por barras CA-50 com diâmetro de 25 mm e se manteve 20 cm da barra para fora do terreno. Salienta-se que as barras de 12 m foram utilizadas somente nos elementos de controle (íntegros), com e sem reinjeção (G1 e G2). As demais variações foram executadas com barras de 6 m, sendo que os grampos íntegros também foram realizados com e sem reinjeção (G3 e G4), e os demais elementos foram executados com reinjeção (G5 a G10).

Programou-se uma variação do processo executivo, classificando os elementos como Tipo 1 e Tipo 2. Ambos foram perfurados sem revestimento e se diferenciam pelo fato de que no Tipo 1 não houve reinjeção, ou seja, tais elementos foram executados somente com bainha.

No total, foram executadas 10 variações, com 3 repetições cada, que resultou em 30 grampos e um comprimento total de 210 m, conforme pode ser observado na Tabela 1. Cabe salientar ainda que os grampos foram instalados em terreno natural, sem necessidade de concreto projetado ou outro revestimento da face.

Tabela 1 – Variações para avaliação dos grampos

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

Com relação aos aspectos construtivos dos elementos íntegros (Figura 56), destaca-se a inclusão de uma emenda nas barras de 12 m na união de duas barras de 6 m, representando procedimentos usuais em estruturas de solo grampeado. As barras íntegras de 6 m foram compostas por um único elemento.

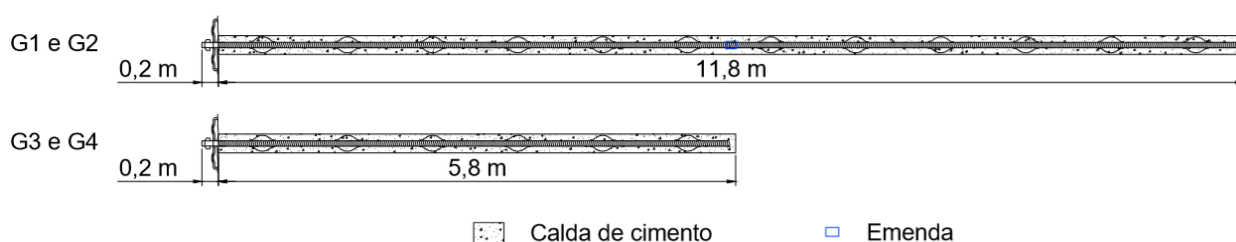


Figura 56 – Barras íntegras de 6 m e 12 m

De modo a avaliar a influência e possíveis erros de interpretação nos resultados, definiu-se pela inclusão de uma variação (G5) onde o posicionamento da emenda fosse avaliado. Propôs-se alternar a localização das emendas em barras de 6 m, sendo dispostas no início, meio e fim das barras, como indicado na Figura 57. Salienta-se que as barras de 6 m foram utilizadas com emendas somente nessa variação, os demais grampos desse comprimento eram formados por um único elemento.

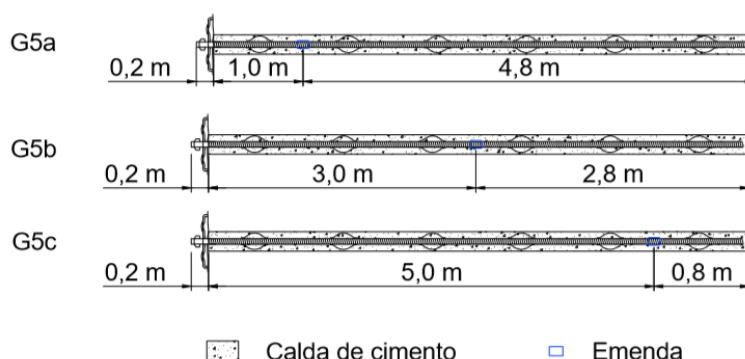


Figura 57 – Variação no posicionamento das emendas nos grampos

A variação G6 consistiu em cravar a barra de aço por 1 m no final do furo, com o objetivo de obter o contato direto da barra com o solo (Figura 58). Tal anomalia pode ocorrer por falha executiva, onde a perfuração é menor que o grampo e este é empurrado/cravado até atingir a profundidade requerida, ou por dificuldades em posicionar integralmente a barra ao longo de todo o furo.

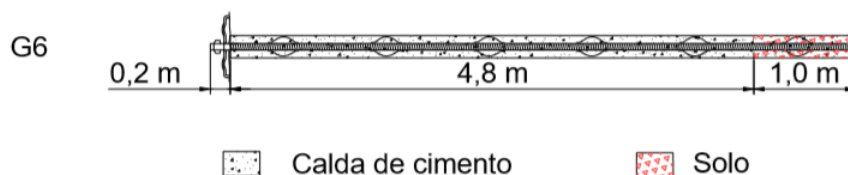


Figura 58 – Simulação de falha no final da barra com solo

Para simular falhas na calda de cimento no meio da barra, um tubo de PVC com mesmo diâmetro do furo fechado nas extremidades foi utilizado, a fim de garantir que a calda de cimento não penetrasse no vazio. Os vazios de ar simulados (Figura 59) compreenderam comprimentos de 10 cm, 50 cm e 100 cm e se associaram às falhas mais frequentes em solo grampeado (Jayawickrama *et al.* 2007).

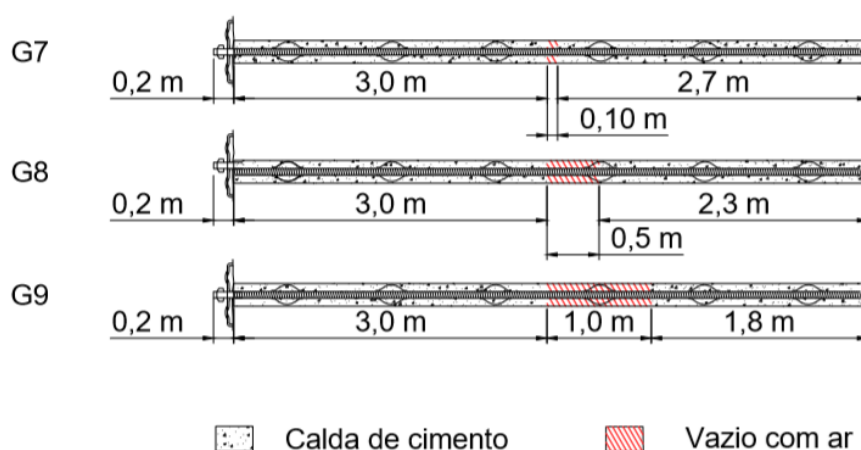


Figura 59 – Simulação de falha no preenchimento da calda de cimento

Buscou-se com esses resultados avaliar se os métodos estudados seriam capazes de identificar não apenas falhas do preenchimento na calda de cimento, mas também a localização e dimensão delas no comprimento do grampo. Para tal, propôs-se uma variação onde o comprimento da perfuração fosse maior que o da barra, ou seja, propôs-se a instalação de uma barra de 6 m em um furo de 7 m, preenchido totalmente com a calda de cimento (Figura 60), sendo esta uma anomalia recorrente segundo Jayawickrama *et al.* (2007). Buscou-se com essa simulação avaliar se as técnicas de ensaio seriam capazes de diferenciar o comprimento da barra do comprimento da calda de cimento.

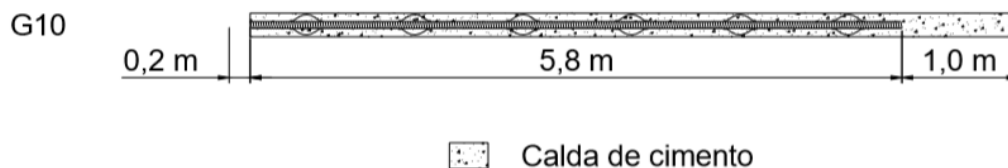


Figura 60 – Variação com o furo maior que a barra

De modo a garantir que os parâmetros de projeto seriam atendidos de maneira uniforme e controlada, foi realizada uma etapa de preparo dos elementos de ancoragem em campo, tais como a instalação do cabo coaxial paralelo à barra e montagem das barras mais longas (12 m). Com relação à disposição horizontal (Figura 61) previu-se uma malha triangular com espaçamento vertical e horizontal entre os grampos de 0,75 m e 1,5 m, respectivamente, o que representou um afastamento usualmente empregado em obras existentes. Desse modo, para a instalação dos grampos, foi ocupada uma área média de 37,8 m² em uma extensão de 15 m.

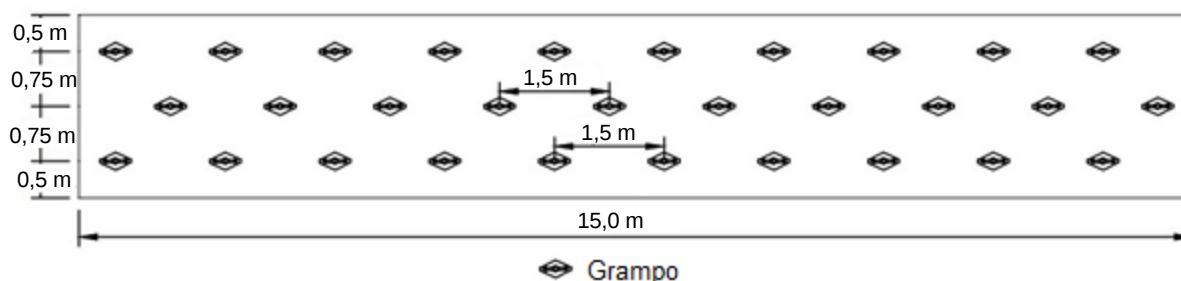


Figura 61 – Vista frontal da estrutura de solo grampeado

7.2.1.2 Cortina atirantada

Para a contenção experimental foram adotados tirantes monobarras de 32 mm, tirantes com 6 cordoalhas de 12,7 mm e tirantes com 6 fios de 7 mm. Foi utilizado um comprimento único de 18 m, sendo 1 m para fora do terreno, 11 m de trecho livre e 6 m de trecho ancorado. Cabe salientar a necessidade de manter um trecho do tirante para fora do terreno para a instalação do macaco hidráulico e realização da protensão. Tal dimensão foi definida com base na análise de estruturas existentes na rodovia e também de modo a se evitar o uso de emendas desnecessárias e desperdício de material visto que as monobarras seriam montadas com barras de 6 m. Um exemplo que contém a configuração tipo dos tirantes é apresentado na Figura 62.

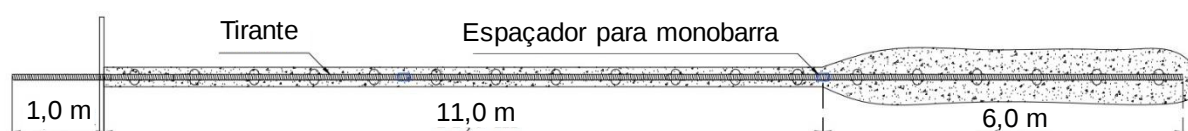


Figura 62 – Comprimentos dos tirantes

O espaçamento vertical adotado entre os elementos (1,5 m) limitou o projeto à implantação de 2 linhas de tirantes o que resultou em uma altura máxima de 2 m. Essa altura permitiu que a estrutura fosse executada sem a necessidade de andaimes. Na Tabela 2 são apresentadas as 9 variações propostas para avaliação da cortina atirantada, composta por 27 elementos que compreenderam um total de 460 m de perfuração.

Tabela 2 – Variações da Cortina Atirantada

<i>Variação</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Comprimento</i>	<i>Descrição</i>
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 próximo 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)

Os Tipos 1 e 2 diferem-se pela presença de bainha coletiva que consiste em uma proteção do trecho livre (barra e tubo de injeção) com um tubo de PVC. O Tipo 1 apresentou somente bainha individual, e o Tipo 2 foi executado com bainha individual e coletiva.

Também foram simulados vazios no início do furo, para refletir anomalias usuais executivas devido à retração da calda de cimento no furo e não preenchimento posterior, isso permitiu representar ainda a ocorrência de processos corrosivos nessa

região (Irvin & Mothersille, 2007). Propôs-se a avaliação dessa anomalia nos tirantes do tipo cordoalha (T5) e fio (T9), para tal, manteve-se em torno de 50 cm de vazio no início do furo (Figura 63).

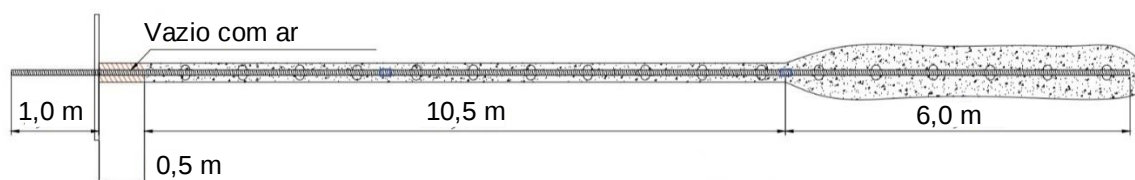


Figura 63 – Vazios com ar próximo à cabeça dos tirantes

Buscou-se alternativas para a simulação de corrosão, uma vez que cortinas atirantadas representam estruturas mais suscetíveis a falhas, principalmente na zona livre e próxima a cabeça do tirante devido a processos corrosivos (Ortigão *et al.* 1993, Pitta *et al.* 2006). Nos tirantes de monobarra foi realizada uma redução de 25% da seção da barra por 10 cm, com a seção de 32 mm para 25 mm no trecho próximo a cabeça (T3). Também foi realizada redução de seção e cortes totais nas cordoalhas (T7). Nos tirantes de fio, optou-se em não avaliar cortes, devido à semelhança com as cordoalhas.

Uma vista frontal da cortina atirantada, bem como a distribuição dos tirantes de monobarra, cordoalha e fio, é apresentada na Figura 64. A estrutura abrangeu uma área média de 50 m², com 20 m de extensão e 1,5 m de espaçamento horizontal.

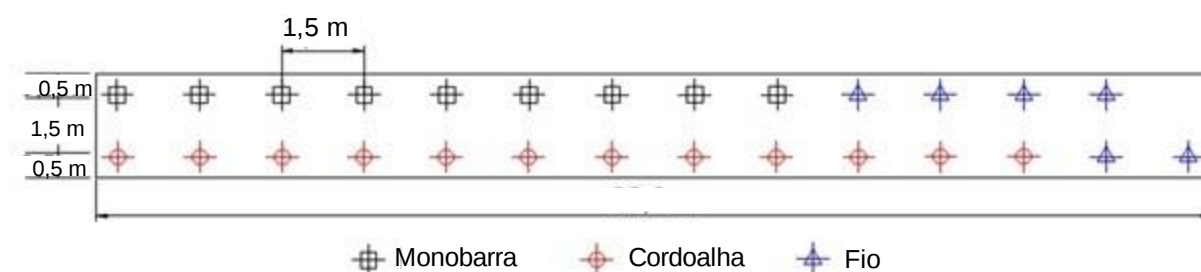


Figura 64 – Vista frontal da cortina atirantada

Apresenta-se também um resumo (Tabela 3) das quantidades de barras e seus respectivos comprimentos. Cabe salientar que foram consideradas 6 cordoalhas e 6 fios para cada tirante, enquanto para a monobarra utilizou-se somente uma barra. No total foram executados 460 m de perfuração.

Tabela 3 – Quadro resumo da cortina atirantada

<i>Tirante</i>	<i>Armação</i>	<i>Quantidade de tirantes</i>	<i>Quantidade de barras</i>	<i>Comprimento total</i>
<i>Monobarra</i>	<i>1 ϕ 32 mm</i>	<i>12</i>	<i>12</i>	<i>216 m</i>
<i>Cordoalha</i>	<i>6 ϕ 12,5 mm</i>	<i>9</i>	<i>54</i>	<i>972 m</i>
<i>Fio</i>	<i>6 ϕ 8 mm</i>	<i>6</i>	<i>36</i>	<i>648 m</i>

7.2.2 Implantação da estrutura de estabilização experimental

Inicialmente, o local de implantação da contenção experimental e áreas adjacentes foram delimitados com cerquite, de forma que a segurança dos funcionários fosse e dos usuários da rodovia fosse garantida, em atendimento às Diretrizes de Segurança e Saúde Ocupacional da Autopista Litoral Sul e da SEEL. O canteiro de obras compreendeu dois banheiros químicos (um feminino e outro masculino), um container para armazenamento de equipamentos e pequenos materiais tais como documentos e objetos pessoais, e uma tenda com mesas e cadeiras. Também foram utilizadas duas caixas d'água de 5.000 litros e duas de 1.000 litros para perfuração, produção da calda de cimento e limpeza dos equipamentos e tubulações. Uma visão geral do canteiro de obras pode ser observada na Figura 65.



(a)



(b)

Figura 65 – Organização do canteiro de obras: (a) Vista Geral e (b) detalhe área de vivência

7.2.2.1 Execução do solo grampeado

7.2.2.1.1 Perfuração

O equipamento utilizado para perfuração foi do modelo SM-5C, fabricado pela empresa italiana SoilMec e com a característica de se adequar a obras com espaço reduzido de circulação.

Seu peso é de aproximadamente 5,6 toneladas e possui dimensões de 4,8 m de comprimento, 1,6 m de largura e 1,5 m de altura. A altura do mastro pode chegar a até 3,5 m, com rotação de $\pm 90^\circ$ da sua base e $\pm 180^\circ$ em relação ao seu eixo (Soilmec, 2017). Nele, são instaladas as hastes, que são rosqueadas até a profundidade desejada por meio de um tricône posicionado na extremidade para realizar a perfuração com rotação (Figura 66).



Figura 66 - Tricône utilizado na perfuração

As perfurações foram realizadas com 10 cm de diâmetro (4'') e inclinação de 10 graus com a horizontal, conforme controle apresentado na Figura 67.



Figura 67 - Medidor de ângulo para aferição da inclinação

De modo a garantir que o PVC utilizado para simular falhas nos elementos permanecesse no local instalado, optou-se por realizar as perfurações com 100 mm de diâmetro, em contrapartida aos 75 mm previstos inicialmente. Na Figura 68 é possível observar um furo sendo executado, onde a velocidade média de perfuração foi de aproximadamente um metro por minuto.

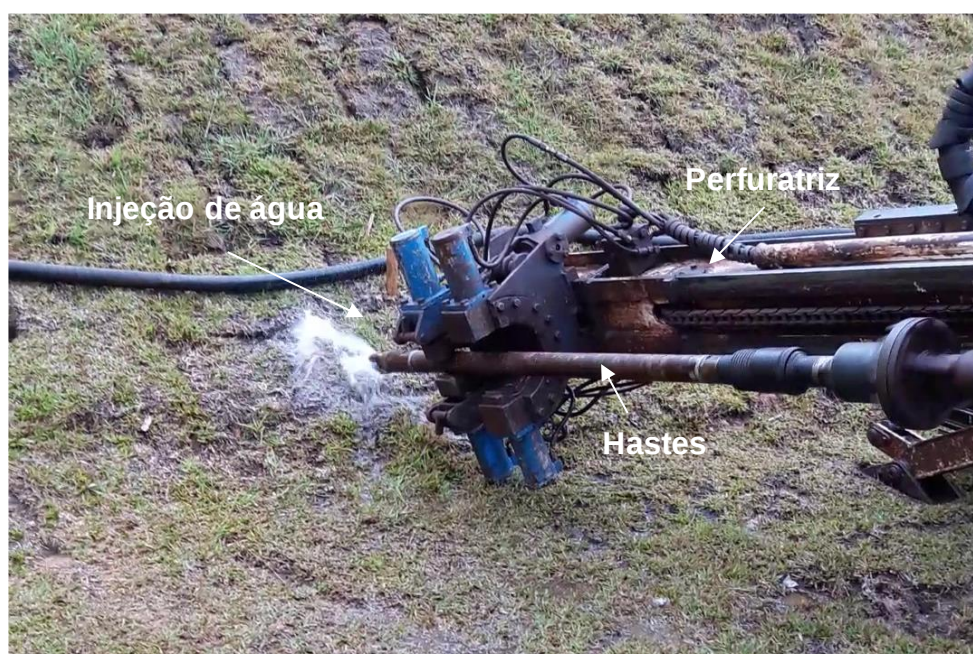


Figura 68 - Perfuração do solo grampeado

Após a perfuração, a barra foi inserida manualmente dentro do furo, como mostra a Figura 69. Para os elementos de 12 m, inseria-se um segmento de 6 m com uma luva de emenda e então uma outra barra de 6 m era conectada, em conjunto com o cabo coaxial. Na sequência, para realizar a injeção da bainha, o tubo de injeção auxiliar foi inserido paralelo a barra e até o final do furo.



Figura 69 - Instalação da barra dentro da perfuração

Tanto para as barras de 6 m, como para as de 12 m, foram mantidos 20 cm de ancoragem para fora do terreno (Figura 70) em furos com comprimentos de 6 e 12 m, respectivamente, de modo a evitar que a extremidade final ficasse posicionada de forma enterrada.



Figura 70 - Medição de 20 cm do grampo para fora do terreno

7.2.2.1.2 Injeção da calda de cimento

Conforme descrito anteriormente, foram utilizadas duas técnicas executivas para os elementos de ancoragem do solo grampeado. O Tipo 1 consistiu no preenchimento da perfuração com calda de cimento de forma ascendente, com auxílio de tubulação de injeção provisória, da extremidade inferior do furo para a boca, até que a calda extravasasse pela perfuração, conforme pode ser observado na Figura 71.



Figura 71 – Injeção da bainha no solo grampeado

Para o Tipo 2, além da bainha, incluiu-se uma etapa de reinjeção, através de um tubo auxiliar pré-instalado junto à barra (Figura 72), entre 6 e 24 horas após a execução da mesma (Solotrat, 2015). A reinjeção teve por objetivo preencher eventuais vazios que pudessem se formar apenas com a injeção da bainha. Para tal, foram feitos cortes de metro em metro no tubo e protegidos com fita crepe para evitar possíveis obstruções provocadas pela calda de cimento da bainha e pelo solo da perfuração.



Figura 72 – Grampos com tubo de reinjeção

A calda de cimento foi produzida em campo com o auxílio de um misturador manual com relação de água e cimento de 0,5. Dentre os cuidados executivos realizados durante essa etapa, ressalta-se a utilização de medidas inteiras para a realização do traço, ou seja: para cada saco de cimento de 50 kg utilizado, foram adicionados 25 litros de água com um balde graduado. A produção da calda em campo, realizada com um misturador manual, é apresentada na Figura 73.



Figura 73 – Misturador manual da calda de cimento

Durante as etapas de injeção e reinjeção foram coletados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10x20 cm da calda de cimento para cada furo, de modo a avaliar o comportamento da resistividade elétrica dessas amostras ao longo do tempo. Tal característica representa um fator de grande 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).

De modo geral, foram coletados 3 corpos de prova (CP's) para cada traço de calda de cimento, que foram imediatamente protegidos com plástico filme, identificados e armazenados no container por 24 h, tempo necessário para desmoldar. Na sequência, os CP's foram transportados e mantidos na câmara seca do laboratório da Universidade Federal do Paraná (UFPR), com umidade em torno de 50% e temperatura constante de 23°C. Na Figura 74 é possível observar a etapa de moldagem dos corpos de prova.



Figura 74 – Coleta de corpos de prova e calda de cimento

Os ensaios de resistividade elétrica foram realizados na Universidade Federal do Paraná, com o equipamento Resipod, de modo a entender o comportamento da resistividade elétrica ao longo do tempo, tanto na câmara seca, quanto na câmara úmida. O equipamento utiliza o Método Wenner ou método de quatro pontos que possui grande aplicabilidade para medição de resistividade elétrica para concreto.

7.2.2.1.3 Emendas

Conforme descrito anteriormente, para as barras de 12 m fez-se necessário utilizar luvas de emenda (Figura 75) para conectar duas barras de 6 m de comprimento ou ainda para a obtenção da variação G5, onde se buscou identificar os efeitos da variação do posicionamento das mesmas. As peças utilizadas para tal, representam acessórios produzidos especialmente para as barras Gewy de 25 mm, com dimensão de 115x40 mm.



Figura 75 – Luva de emenda rosqueada

7.2.2.1.4 Falhas

O preparo das barras compostas por variações para simulação de falhas com ar (G7, G8 e G9) foi realizado com o auxílio de canos de PVC com 75 mm de diâmetro e fechados com dois *caps*, um em cada extremidade. Cabe salientar a necessidade de introduzir três furos (Figura 76) em cada *cap*: um para a passagem da barra (diâmetro de 27 mm), um para o tubo de reinjeção (diâmetro de 25 mm) e um para o cabo coaxial (diâmetro de 5 mm), de modo a permitir a passagem desses elementos pelo tubo de PVC sem a presença de calda de cimento. Ainda, foi necessário cortar a “aba” externa dos mesmos, tornando assim seu diâmetro mais adequado para a perfuração de 100 mm.



Figura 76 – Caps ou “tampas” utilizados para falhas com ar nos grampos

Para vedar eventuais vazios entre os elementos e os furos foram avaliados diferentes materiais (Figura 77), tais como: silicone, cascola, epoxi, cola a base de epoxi e espuma de poliuretano. Os testes foram realizados de modo a simular a configuração proposta para os grampos, ou seja, com a inclusão do grampo, do tubo de reinjeção e do cabo coaxial. Após a secagem, foram realizados testes de estanqueidade com água e ainda verificada a resistência do material de modo a não produzir fissuras que pudessem comprometer o conjunto.



(a) Silicone



(b) Cascola



(c) Epóxi



(d) Adesivo estrutural a base de epóxi



(e) Espuma de poliuretano



(f) Acabamento da espuma

Figura 77 – Testes de vedação dos caps com diferentes materiais: (a) Silicone, (b) Cascola, (c) Epóxi, (d) Adesivo estrutural a base de epóxi, (e) Espuma de poliuretano e (f) Acabamento da espuma

Com base nesses procedimentos foi possível concluir que, depois de seco, o silicone possuía boa flexibilidade porém não proporcionava boa aderência e estanqueidade à barra de aço. O epóxi 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 (*coumpound* adesivo), apresentou ótima aderência, mas, devido a sua fluidez (média-alta), sua aplicação tornou-se inviável. Com relação à espuma de poliuretano, sua aplicação foi desconsiderada para esse fim por caracterizar um material com grande variação volumétrica. A Cascola Monta & Fixa PL 500 foi o produto que apresentou melhor aderência e consistência em comparação aos demais para a finalidade proposta, além de não fissurar depois de seca (Cascola, 2017).

Após a escolha da melhor cola, buscou-se simular a injeção de calda de cimento na região próxima ao PVC através da montagem de uma barra teste (Figura 78). Para tal, inicialmente um PVC foi inserido no centro da barra, o *cap* foi inserido e a cola foi aplicada. Após a secagem, inseriu-se uma fôrma feita com PVC de diâmetro de 10 cm e a mesma foi preenchida com calda de cimento.



Figura 78 – Barra teste

Com base nesses procedimentos, foi possível atestar a aplicabilidade da cola escolhida para vedação e simulação de uma falha com ar. Na sequência, as 9 barras planejadas para simular a ocorrência de vazios com ar foram montadas (Figura 79).



Figura 79 – Montagem das falhas com ar nos grampos

Foram simulados vazios de 10 cm, 50 cm e 100 cm. Os cortes dos tubos de reinjeção foram feitos com distância de um metro da falha, com a intenção de evitar a injeção de calda com pressão elevada próxima ao defeito. As barras finalizadas das variações G6, G7 e G8 são apresentadas na Figura 80.



Figura 80 – Grampos com falhas preenchidas com ar

7.2.2.2 Execução da cortina atirantada

O processo executivo realizado nos 27 elementos da cortina atirantada envolveu as seguintes fases: perfuração com diâmetro aproximado de 127 mm e 17,5 m de comprimento, inserção do tirante no furo, injeção da bainha por todo o furo no período da tarde e reinjeção no dia seguinte pela manhã. Para tal, foi utilizado um tubo de PVC pré-instalado com 40 mm de diâmetro no trecho livre e 32 mm no trecho ancorado. As etapas executivas adotadas foram semelhantes ao solo grampeado, divergindo apenas pela reinjeção. No trecho ancorado, foram realizados furos denominados válvulas manchete com espaçamento de um metro para permitir a reinjeção, conforme indicado na Figura 81. A borracha foi utilizada tanto para evitar a entrada de sujeira e água dentro do cano de PVC, como permitir a reinjeção em quantas fases fossem necessárias.



Figura 81 – Válvula manchete

O procedimento de reinjeção, diferentemente do solo grampeado, foi executado somente no trecho ancorado e com o auxílio de um obturador, inserido dentro do tubo de PVC. Foi utilizado um obturador duplo (Figura 82) para evitar que a calda extravasasse no cano de PVC e preenchesse somente o trecho que se pretendia injetar. Para tal, as válvulas manchetes foram medidas e o obturador permaneceu centralizado. Por fim, salienta-se que para os tirantes com monobarra, o cano de PVC utilizado para reinjeção foi instalado paralelo à barra, enquanto nos de cordoalhas e fios, o tubo foi inserido no meio das barras, dentro do espaçador, conforme descrito nos itens subsequentes.



Figura 82 – Reinjeção dos tirantes

7.2.2.2.1 Monobarras

Assim como descrito para os elementos que compreenderam a estrutura em solo grampeado, o fornecimento das monobarras utilizadas para a execução da cortina atirantada teve o apoio da empresa *Dywidag*. Foram fornecidas barras *Gewy* de 32 mm de diâmetro e 6 m de comprimento, luvas de emenda, placas e roscas. Como os tirantes possuíam 18 m foi necessário colocar duas luvas de emenda para unir as três barras. A união foi realizada em etapas, de forma individual, conforme cada elemento era inserido na perfuração, com procedimento semelhante ao solo grampeado.

Em todas as barras, no trecho livre, foi utilizada a bainha individual (Figura 83) com tubo de polietileno de 40 mm, preso com arame e massa plástica nas extremidades para evitar a entrada de calda e atuar como uma barreira contra a corrosão, de forma que se mantivesse a barra “livre” para a protensão.



Figura 83 – Bainha individual das monobarras

A execução dos elementos Tipo 2, com bainha coletiva, compreendeu tubos de PVC com 100 mm de diâmetro nos quais foram inseridas a monobarra com bainha individual, o tubo de injeção da bainha e o tubo de reinjeção, ao longo de todo o trecho livre. 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, de modo a verificar a qualidade da bainha (Figura 84).



Figura 84 - Execução da monobarra com bainha coletiva

A variação T3, que consistiu na redução de 20% da seção da barra (Figura 85), posicionada a 50 cm do paramento.



Figura 85 – Execução da redução de seção da monobarra

Um exemplo de como a redução de seção foi executada pode ser observado na Figura 86, permanecendo com um diâmetro médio de 25 mm e extensão de 10 cm nas três barras da variação T3.



Figura 86 – Redução de seção das monobarras

A redução de seção foi mantida sem a bainha individual (Figura 87), a qual simulou uma eventual falha na proteção e ocorrência de corrosão no trecho. O cabo coaxial foi instalado sobre a bainha individual, em todas as variações.



Figura 87 - Instalação das monobarras com redução de seção no furo

7.2.2.2.2 Cordoalha

Os tirantes de cordoalha foram compostos por 6 elementos com 12,7 mm de diâmetro, onde cada um era formado por 7 fios entrelaçados e com comprimento de 18 m. Por compreenderem um único elemento (sem emendas), foi necessário utilizar uma bancada para o preparo dos mesmos (inclusão de espaçadores de metro em metro e do tubo de reinjeção central). No trecho livre, um tubo de polipropileno, denominado espaguete, de 16 mm de diâmetro com bainha individual foi utilizado. A montagem dos tirantes de cordoalha é apresentada na Figura 88. O cabo coaxial também foi instalado de forma paralela e fixado com abraçadeiras plásticas nos espaçadores.

A variação T5, com falha no início da barra de comprimento de 50 cm, foi executada sem considerar o preenchimento posterior da boca do furo (Figura 89), com o objetivo de simular vazios que ocorrem normalmente devido à retração e acomodação da calda de cimento ao longo do furo.



Figura 88 – Montagem do tirante com cordoalha: (a) Final do tirante, (b) Passagem do trecho ancorado para o trecho livre e (c) Início dos tirantes



Figura 89 – Falha no início do furo com 50 cm de ar

Com relação à variação T6, caracterizada por uma falha com ar de 50 cm a 4 m da extremidade externa da barra, utilizou-se um cano de PVC de 100 mm, cortado lateralmente e encaixado entre dois espaçadores. O preenchimento do vazio foi realizado com espuma de poliuretano, finalizado com uma fita *silver tape* (Figura 90).



Figura 90 – Falha com ar nas cordoalhas

Para simular a ocorrência de corrosão nos tirantes de cordoalha, 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 91), sendo essas anomalias realizadas com três repetições (T7).

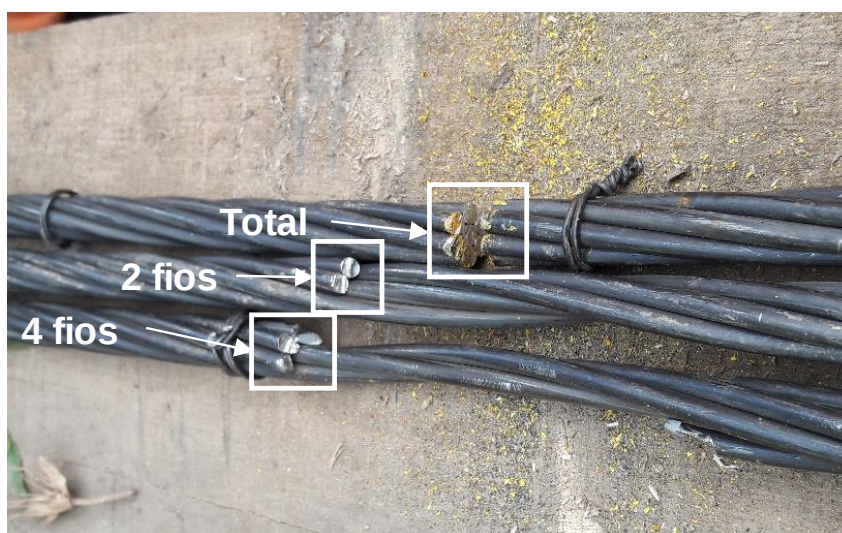


Figura 91 - Cortes nas cordoalhas

7.2.2.2.3 Fios

Por fim, foram executados os tirantes compostos por 6 fios de 8 mm de diâmetro e 18 m de comprimento (Figura 92). A montagem desses elementos foi realizada de maneira semelhante aos de cordoalha, com uma mangueira para a bainha individual, porém de diâmetro menor (100 mm). Ressalta-se que para esse tipo de tirante foram realizadas somente duas variações: elemento íntegro (T8) e com uma falha com ar no início do furo (T9).

Na Figura 93 é possível observar o momento da instalação dos tirantes de fio. A variação T9, com a falha no início do furo, é apresentada na Figura 94.



(a)



(b)



(c)

Figura 92 – Tirante de fio: (a) Extremidade final (ponta) do tirante de fio, (b) Passagem do trecho ancorado para o trecho livre e (c) Início (topo) do tirante



Figura 93 - Execução do tirante de fio



Figura 94 - Falha com ar no início do furo do tirante de fio

Uma vista geral da contenção experimental com cortina atirantada antes da colocação das placas de protensão é apresentada na Figura 95.



Figura 95 – Vista geral da cortina atirantada

7.2.2.2.4 Protensão

A protensão dos tirantes foi realizada no segundo semestre de 2017. Ensaios de recebimento nos tirantes foram realizados e seguiram 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 96, 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.

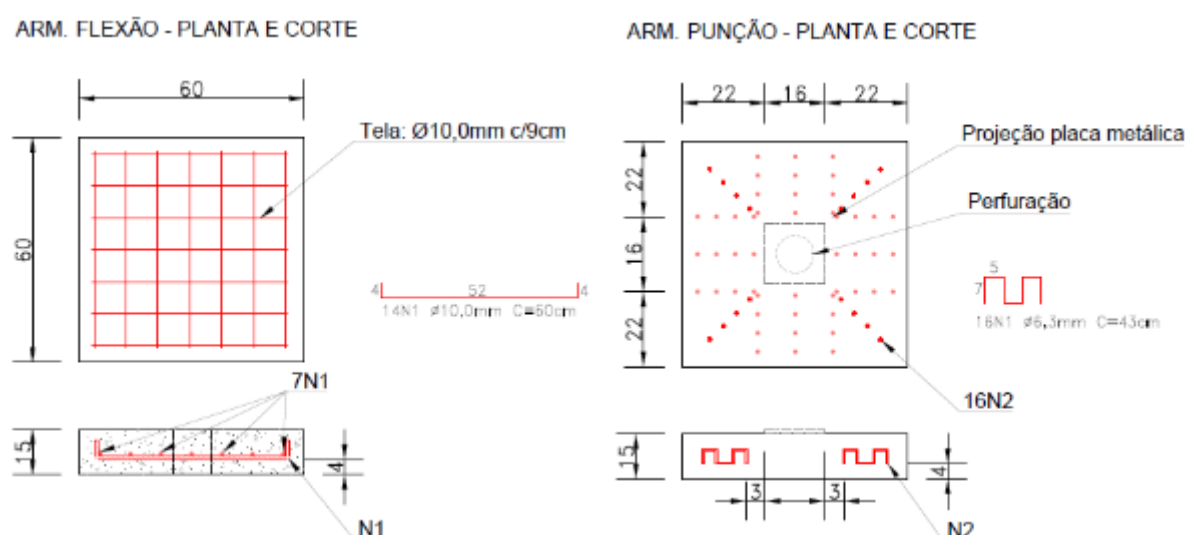


Figura 96 – Projeto das placas de reação dos tirantes

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, e foram projetados 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 (Figura 97).



Figura 97 – Preparação do talude para colocação das placas de concreto

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 98).



Figura 98 – Posicionamento das placas de concreto

Na sequência, uma chapa metálica com a função de apoiar a rosca dos tirantes de monobarra e os blocos dos tirantes de cordoalha e fio foi instalada. O elemento utilizado nas monobarras foi fornecido pela *Dywidag* e possuía dimensões de 16x16 cm e um furo de modo a permitir a passagem do cabo coaxial lateralmente à barra (Figura 99a). As chapas utilizadas nos tirantes de cordoalha e fio possuíam dimensões de 30x30 cm e sobre elas foi instalado 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 99b).



(a)



(b)

Figura 99 – Chapas metálicas: (a) Monobarras; (b) Cordoalhas.

Para a protensão foi utilizado um macaco pneumático que tensionava os tirantes ao mover seu pistão interno. O pistão era 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 além de um extensômetro instalado em um tripé para anotação das deformações. O sistema utilizado para protensão dos tirantes é apresentado na Figura 100. 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 (bomba do macaco, gerador e leitor da célula de carga) pode ser observada na Figura 101.



Figura 100 - Sistema para protensão dos tirantes



Figura 101 - Equipamento utilizados na protensão

Nos ensaios de recebimento foram realizadas as leituras dos deslocamentos das barras para cada estágio de aplicação das cargas. Inicialmente foi prevista a utilização de um extensômetro analógico, conforme indicado na Figura 100, porém não foi possível utilizá-lo uma vez que a medição máxima do aparelho era de 3 cm e os deslocamentos medidos superaram tal grandeza. Desse modo, optou-se pela utilização de um paquímetro para realização das leituras de

deslocamento das placas, sempre em relação a um ponto fixo no terreno (Figura 102). Também foram medidos os deslocamentos do pistão do macaco para comparação.



Figura 102 – Leituras do deslocamento com paquímetro

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. Cabe salientar que em dois tirantes de monobarra o solo rompeu durante a protensão e não foi possível chegar na carga de 15 tf, assim, os mesmos foram protendidos com a carga máxima suportada de 7 tf. 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. Os demais tirantes de monobarra e cordoalha foram protendidos com a carga de projeto.

Para as monobarras foram utilizadas porcas rosqueadas nas barras com ancoragem junto a placa metálica. Para as cordoalhas, clavetes que eram encaixados e travados nas placas metálicas. Os tipos de travamentos utilizados podem ser observados na Figura 103. Também é possível observar os cabos coaxiais paralelos às barras para realização dos ensaios com o TDR.



(a)



(b)

Figura 103 – Tirantes protendidos: (a) Monobarras travadas com porcas; (b) Cordoalhas travadas com clavetes.

Para a protensão dos tirantes de fio foi utilizado o mesmo bloco de ancoragem das cordoalhas e um clavete especial para o travamento. Na Figura 104 é possível observar tais elementos, onde a imagem da esquerda indica a parte da peça que entra no bloco e a da esquerda a parte externa do clavete.

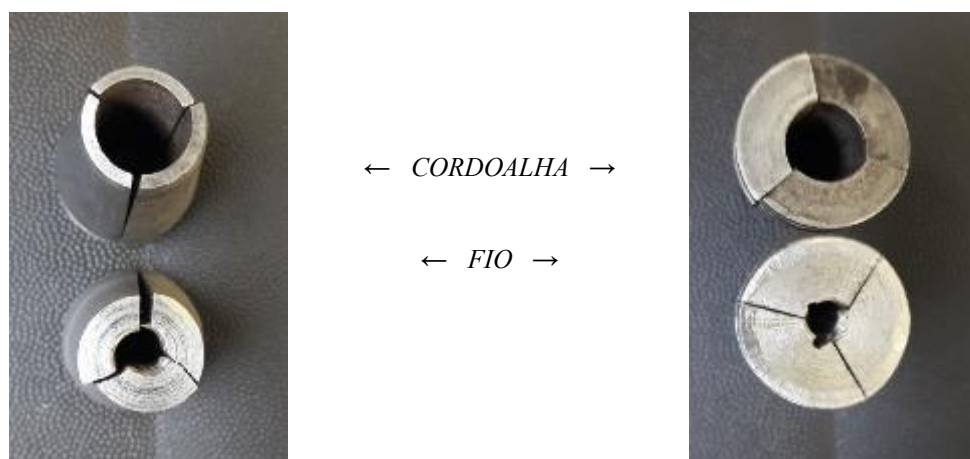


Figura 104 – Clavetes para os tirantes de cordoalha e fio

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 da cortina atirantada após a protensão pode ser observada na Figura 105.



Figura 105 – Vista da área ao final da protensão dos tirantes

7.3 Análise de resultados

7.3.1 Planejamento dos experimentos

7.3.1.1 Solo grampeado

O entendimento obtido com o desenvolvimento do planejamento de experimentos permitiu identificar a importância de avaliar diferentes métodos construtivos, englobando tanto técnicas utilizadas em obras novas como em estruturas já existentes. Logo, programou-se uma variação do processo executivo, classificando os elementos como Tipo 1 e Tipo 2. Ambos foram perfurados sem revestimento e se diferenciam pelo fato de que no Tipo 1 não houve reinjeção, ou seja, tais elementos foram executados somente com bainha. Ressalta-se a importância dessa variação, uma vez que representa um procedimento usual em estruturas antigas e reflete em falhas no preenchimento devido à retração da calda de cimento, principalmente na região próxima à cabeça dos elementos ancorados (Souza *et al.*, 2005).

Com relação aos aspectos construtivos dos elementos íntegros, de modo a avaliar a influência e possíveis erros de interpretação nos resultados, definiu-se pela variação do posicionamento das emendas. Destaca-se que a inclusão de emendas nas barras de aço representa um procedimento usual em estruturas de solo grampeado.

Com o avanço no detalhamento da estrutura experimental e no entendimento das características relevantes para análise, verificou-se que as falhas são normalmente associadas a vazios de ar e que essas “anomalias” simuladas possuem maior controle executivo (Souza *et al.* 2005, Jayawickrama *et al.* 2007). Desse modo, sugeriu-se a avaliação de diferentes dimensões de vazios com ar na calda de cimento.

Na prática, ocorrem casos onde a perfuração acaba sendo menor que o grampo e este é empurrado/cravado até atingir a profundidade requerida, ou por dificuldades em posicionar integralmente a barra ao longo de todo o furo. Tal variação também foi feita em campo experimental.

Por forma a simular falhas na calda de cimento no meio da barra, um tubo de PVC com mesmo diâmetro do furo fechado nas extremidades foi utilizado, a fim de garantir que a calda de cimento não penetrasse no vazio.

Buscou-se com esses resultados avaliar se os métodos estudados seriam capazes de identificar não apenas falhas do preenchimento na calda de cimento, mas também a localização e dimensão delas no comprimento do grampo.

7.3.1.2 Cortina atirantada

Neste tipo de estrutura, buscou-se avaliar diversas configurações, tais como: diferentes tipos de tirantes (fios, cordoalhas e monobarras) e respectivas reduções de seção no aço. 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, porém com diâmetro de 22 a 100 mm, dependendo da obra, entretanto o mais comum é o diâmetro de 32 mm. As cordoalhas são compostas por 3 ou 7 fios, onde cada tirante pode ter até 12 cordoalhas, normalmente com diâmetro de 12,7 mm. A execução de tirantes com fios é uma técnica antiga onde normalmente utiliza-se de 4 a 12 fios com diâmetro podendo variar entre 4 e 9 mm cada.

Como proposto na estrutura de solo grampeado, para a cortina atirantada foi definida a instalação dos elementos ancorados com base em dois processos executivos distintos. Para os

tirantes, os Tipos 1 e 2 diferem-se pela presença de bainha coletiva que consiste em uma proteção do trecho livre (barra e tubo de injeção) com um tubo de PVC. O Tipo 1 apresentou somente bainha individual, e o Tipo 2 foi executado com bainha individual e coletiva.

Vazios no início do furo foram simulados para refletir anomalias usuais executivas devido à retração da calda de cimento no furo e não preenchimento posterior, isso permitiu representar ainda a ocorrência de processos corrosivos nessa região (Irvin & Mothersille, 2007).

Uma vez que cortinas atirantadas representam estruturas mais suscetíveis a falhas, principalmente na zona livre e próxima a cabeça do tirante devido a processos corrosivos (Ortigão *et al.* 1993, Pitta *et al.* 2006), buscaram-se alternativas para a simulação de corrosão. Nos tirantes de monobarra foi realizada uma redução de 25% da seção da barra por 10 cm, com a seção de 32 mm para 25 mm no trecho próximo a cabeça. Também foi realizada redução de seção e cortes totais nas cordoalhas. Nos tirantes de fio, optou-se em não avaliar cortes, devido à semelhança com as cordoalhas.

7.3.2 *Implantação da estrutura de estabilização experimental*

Com o apoio da empresa Serviços Especiais de Engenharia Ltda – SEEL, o campo experimental foi implantado no primeiro semestre de 2017.

As duas estruturas (solo grampeado e cortina atirantada) foram implementadas no mesmo no nível, com uma distância de 2 m entre elas. Uma vista geral do posicionamento final das contenções é apresentada na Figura 106.



Figura 106 - Vista frontal: Posicionamento das contenções

7.3.2.1 Execução do solo grampeado

A execução da estrutura em solo grampeado compreendeu um total de 30 grampos, sendo 24 unidades com 6 m de comprimento e 6 unidades com 12 m. Cabe salientar o apoio da empresa *Dywidag Ltda*, responsável pelo fornecimento dos materiais necessários para a execução da contenção (barras de aço *Gewy* com 25 mm de diâmetro, luvas de emenda, porcas sextavadas, placas de aço de 140x140x16 mm e espaçadores).

Em relação à locação espacial, o espaçamento triangular foi de 1,5 m na horizontal e 0,75 m na vertical e a inclinação dos furos de foi de 10° em relação à horizontal. Um cabo coaxial para aplicação do método não destrutivo *Time Domain Reflectometry* (TDR) foi instalado em paralelo a todos os elementos. O cabo foi fixado à barra por abraçadeiras plásticas e preso com fita isolante em sua extremidade final, de modo a permanecer fixo, esticado e sem contato com a barra. O cabo coaxial utilizado foi o RG-58 da marca RFS KMP, com impedância elétrica de 50 Ω , a mesma do equipamento TDR que foi utilizado nas etapas futuras, evitando assim o uso de adaptadores.

Em todas as barras foram utilizados espaçadores a cada metro, um cabo coaxial e, nas barras com reinjeção, um tubo pré-instalado. Todos os furos foram locados no talude com utilização piquetes de madeira.

A execução do solo grampeado ocorreu de acordo com o que havia sido planejado, parabenizando-se a equipe de instalação pelo rigor e profissionalismo empregados.

7.3.2.2 Execução da cortina atirantada

Para a execução da cortina atirantada foram programados tirantes de monobarra, cordoalhas e fios, instalados em conjunto com um cabo coaxial preso paralelamente à barra. Conforme descrito anteriormente, foram aplicados dois processos executivos conforme tipo de proteção anticorrosiva: o Tipo 1, com bainha individual, e o Tipo 2, composto por bainha individual e coletiva.

Os elementos de ancoragem utilizados nesta solução possuíam comprimento total de 18 m, estando 1 m para fora do terreno, 11 m no trecho livre e 6 m no trecho ancorado, instalados com uma inclinação de 15°. A distância horizontal entre os tirantes foi de 1,5 m.

Assim como descrito para os elementos que compreenderam a estrutura em solo grampeado, o fornecimento das monobarras utilizadas para a execução da cortina atirantada teve o apoio da empresa *Dywidag*.

Ressalta-se que a execução da cortina atirantada foi realizada de acordo com a norma em vigor NBR 5629 – Execução de Tirantes Ancorados no Terreno, de abril de 2006 (ABNT, 2006). A calda de cimento empregada na injeção dos tirantes respeitou um fator água/cimento máximo de 0,5 e uma resistência à compressão mínima de 25 MPa (ABNT, 2006).

A protensão dos tirantes foi realizada no período que compreendeu o segundo semestre de 2017, também com o apoio da empresa SEEL. Ensaio de recebimento nos tirantes Tipo B foram realizados e seguiram os procedimentos descritos na norma NBR 5629 (ABNT, 2006). Uma carga de 15 tf foi aplicada para os tirantes íntegros. Para as barras com redução de seção, foi considerada uma carga proporcional à área da seção transversal, de modo que todos os tirantes fossem submetidos a uma mesma tensão. Nas monobarras com redução de seção de 32 mm para 25 mm foi atingida uma protensão de 9,2 tf e nas cordoalhas com cortes se aplicou 10,5 tf.

Semelhante ao ocorrido para o solo grampeado, a execução da cortina atirantada também ocorreu de acordo com o que havia sido planejado, parabenizando-se a equipe de instalação pelo

rigor e profissionalismo empregados. Salienta-se apenas a dificuldade 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.

8 EXECUÇÃO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS NA ESTRUTURA EXPERIMENTAL

8.1 Técnicas aplicadas

Como parte do escopo proposto e desenvolvido ao longo desta etapa, foram testadas quatro técnicas de ensaios não destrutivos na contenção experimental: *Time Domain Reflectometry* (TDR), *Reflectometric Impulse Measurement Technique*, Resistência Elétrica e *Sonic Echo*, cuja descrição, aplicação e limitações foram descritas em maior detalhe no item 0. Nos parágrafos subsequentes são apresentados os equipamentos utilizados para cada técnica, procedimentos de ensaio e os principais resultados obtidos nos grampos e tirantes.

8.1.1 *Time Domain Reflectometry e Reflectometric Impulse Measurement Technique*

Os procedimentos de ensaio com TDR foram baseados nos estudos de Cheung (2003), Cheung & Lo (2005), Cheung (2006), Jayacwickrama *et al.* (2007), Cheung & Lo (2011), Tang & Cheng (2014) e Chung *et al.* (2016). Para execução dos ensaios foi utilizado o equipamento TDR 200 da marca *Campbell Scientific* (Figura 107). As principais características e especificações técnicas do equipamento são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características do equipamento TDR 200

Características técnicas	
Impedância de saída	50 Ω
Gerador de 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

O funcionamento desse equipamento se dá através de sua conexão com um *notebook* à um cabo USB que faz a alimentação elétrica do TDR e a partir de um *software* denominado PCTDR onde são gerados pulsos e obtidas as leituras.



Figura 107 – Equipamento TDR 200

Para avaliação da metodologia TDR, as medições foram divididas em duas etapas principais. A primeira consistiu na leitura do comprimento do cabo coaxial de modo a definir sua extensão que, para a estrutura experimental, era conhecida e equivalente ao comprimento dos grampos e tirantes. Na segunda foi realizada uma medição no cabo coaxial e nas barras que buscou identificar falhas na calda de cimento e outras anomalias avaliadas na contenção experimental.

Além disso, no decorrer do documento são apresentados resultados realizados mediante a aplicação do pulso elétrico somente na barra, sem considerar o cabo coaxial.

Cabe salientar que 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, para a conexão com os elementos de ancoragem, duas garras do tipo “jacaré”. Como o cabo coaxial é composto por um fio condutor interno e outro externo, cada garra foi presa a um desses cabos. Para tal, foi necessário desencapá-los, de modo a permitir acesso aos condutores interno e externo do cabo coaxial e sem que ocorresse o contato entre eles. Na Figura 108 é possível visualizar em detalhe o desencapador utilizado e as ligações realizadas com as garras jacaré.



(a)



(b)

Figura 108 – Desencape e conexão elétrica com garras jacaré: (a) Desencapador; (b) Conexão com o cabo coaxial.

A configuração geral necessária para realização do ensaio envolveu o uso do *notebook*, do TDR 200, dos cabos USB e auxiliar com a conexão em um cabo coaxial teste conforme pode ser observado na Figura 109. Cabe salientar que o fato do cabo coaxial estar enrolado no momento das medições não afeta os resultados.

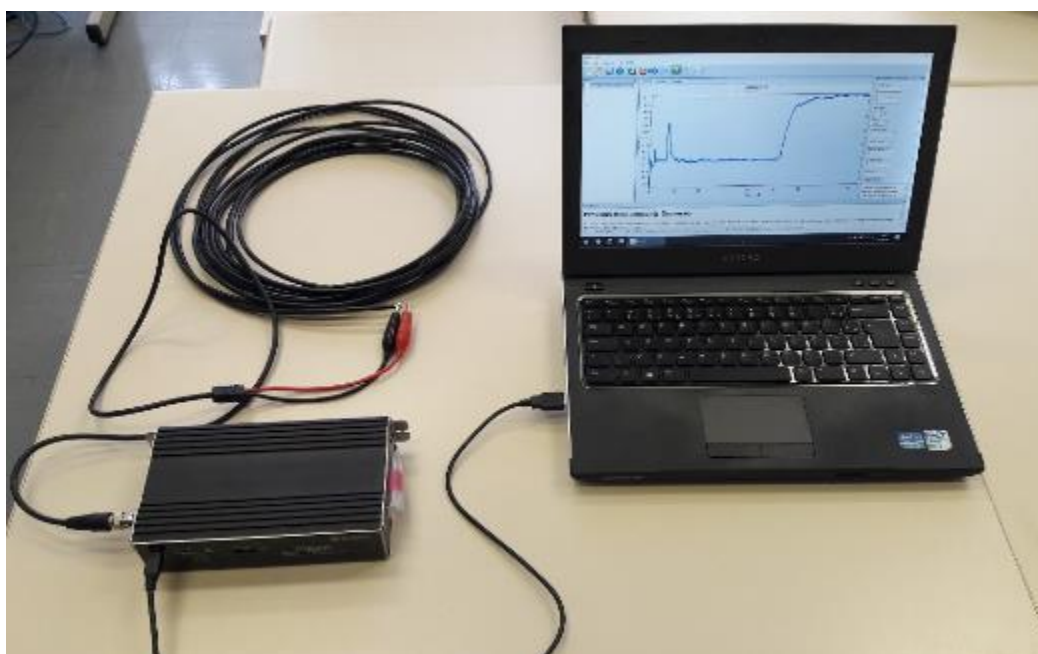


Figura 109 – Configuração geral do ensaio TDR para medição do tamanho do cabo coaxial

Previamente à realização dos ensaios na estrutura de contenção experimental fez-se necessário desencapar todos os cabos coaxiais (Figura 110a) e então protegê-los com um elemento plástico, evitando, dessa forma, possíveis processos de corrosão/ferrugem (Figura 110b).



(a)



(b)

Figura 110 – Preparação dos cabos coaxiais para o ensaio TDR: (a) Procedimento em campo; (b) Proteção da ponta do cabo coaxial

As leituras realizadas indicam o tempo de propagação do pulso elétrico de alta frequência no meio medido, em nano segundos (ns). Com o conhecimento do comprimento do cabo ou das barras foi possível determinar a velocidade de propagação do pulso a partir da Equação 1. Cabe salientar que os resultados obtidos a partir da calibração dos resultados do TDR são usualmente comparados com a velocidade de propagação da luz no vácuo ($3,0 \times 10^8$ m/s).

$$v_p = \frac{L}{t} \quad (1)$$

Sendo:

v_p = Velocidade de propagação do pulso elétrico no meio (m/s);

L = comprimento do cabo coaxial ou da barra (m);

t = tempo de propagação do pulso (s).

Como parte do escopo proposto para avaliação dos tirantes por meio de técnicas de ensaios não destrutivos, buscou-se aplicar a metodologia denominada *Reflectometric Impulse Measurement Technique*, disponível comercialmente. 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. Para tal, foram realizados ensaios na contenção experimental de modo a testar o equipamento TDR com variações sem utilizar o cabo coaxial e não foram obtidos resultados conclusivos.

No método, o equipamento utilizado pela empresa que oferece o serviço é composto por um cabo que se divide em dois, uma extremidade com a “garra jacaré” e outro com uma 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 111.



Figura 111 – 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. 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.

Segundo o fornecedor, as conclusões do método *Reflectometric Impulse Measurement Technique* 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.

8.1.2 Resistência elétrica

Em complemento às técnicas de ensaios não destrutivos executadas, ensaios de resistência elétrica foram realizados no solo grampeado e na cortina atirantada, de modo a entender a aplicabilidade e limitações dessa ferramenta. Para tal, foi utilizado o medidor de aterramento FLUKE 1625-2 Geo, com faixa de leitura de $0,02 \Omega$ até $300 \text{ k} \Omega$. Tal equipamento é normalmente empregado 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 112, 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 112 – Equipamento utilizado para medição de resistência elétrica das barras

Para a realização do ensaio foram utilizadas duas hastes metálicas, também denominadas eletrodos, instalados no solo para medição da resistência elétrica. Os eletrodos de corrente e de potencial possuíam 35 cm de comprimento e foram completamente enterrados, 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 113.



Figura 113 – Hastes metálicas instaladas no solo para leitura da resistência elétrica

O ensaio consistiu em gerar uma corrente elétrica entre a barra de aço e uma haste metálica inserida no solo do patamar superior do talude, de modo a ler a diferença de potencial do sistema através de uma terceira haste posicionada entre as duas. A resistência elétrica foi obtida pelo equipamento de forma direta, em ohms (Ω). A análise dos resultados se baseou em comparar os valores de resistência elétrica de barras próximas de forma que, para cada elemento, foram realizadas 5 medições e calculada a média. Os procedimentos de ensaio seguiram os descritos em Cheung e Lo (2005) e Lee e Arup (2007). Na Figura 114 é possível observar um croqui esquemático com a configuração de ensaio adotada.

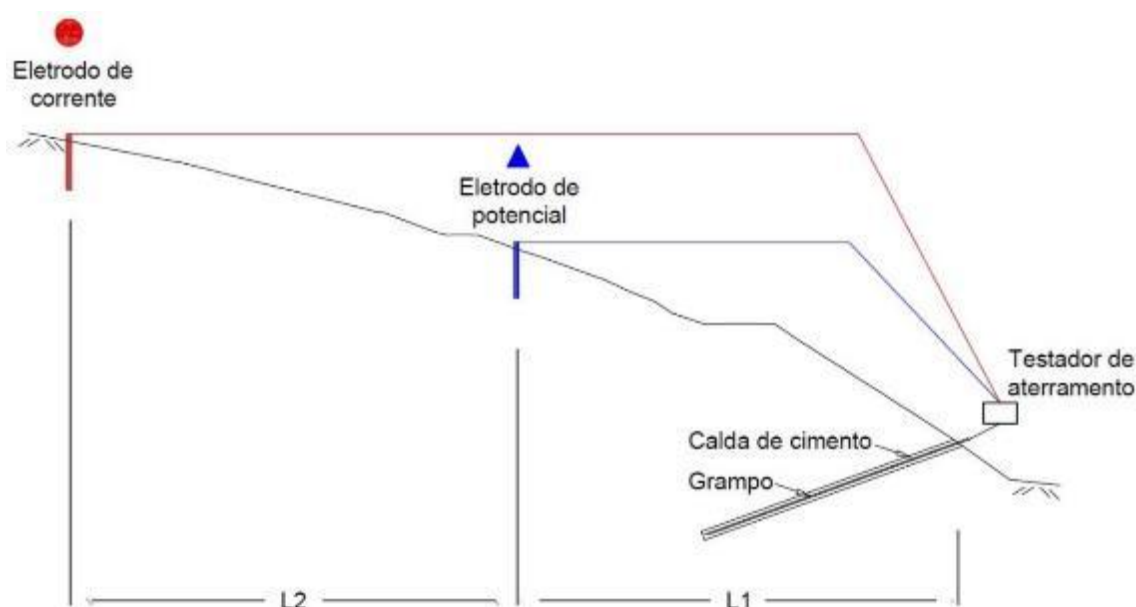


Figura 114 – Configuração do ensaio não destrutivo da resistência elétrica

Os tirantes também foram avaliados pelo método da resistência elétrica. Quando comparados com os grampos, os tirantes são mais longos (18 m), apresentam trecho livre e ancorado, ou seja, somente 6 m de trecho ancorado estão em contato com a calda de cimento, além de compreenderem três tipos de barras diferentes: monobarras, cordoalhas e fios. Ressalta-se que as monobarras são elementos iguais aos utilizados nos grampos, porém com diâmetro de 32 mm. As cordoalhas são compostas de 7 fios entrelaçados, com diâmetro de 12,7 mm, e os fios dos tirantes de fios, tem 7 mm de diâmetro. Cabe salientar ainda que os tirantes de cordoalha e fio apresentam 6 barras por tirante, as quais foram todas ensaiadas. Para obtenção do valor de resistência elétrica dos tirantes, fez-se uma média dos valores das 6 barras, com desvio padrão inferior à 5% da média. Na Figura 115 são apresentados os diferentes tipos de barras encontrados na contenção experimental.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 115 – Elementos da contenção experimental: (a) Grampos; (b) Tirante de monobarra; (c) Tirante de cordoalha; (d) Tirante de fio

Para realização do ensaio nos tirantes de monobarra foi necessário utilizar uma garra com maior abertura, para melhor consistência e repetitividade dos resultados de resistência elétrica obtidos em campo. Na Figura 116 é possível perceber a diferença entre a abertura das garras.



Figura 116 – Abertura das garras utilizadas no ensaio de resistência elétrica

8.1.3 Sonic Echo

Por fim, apresentam-se os resultados obtidos por meio da técnica de ensaio denominada *Sonic Echo*. O equipamento necessário para a realização do ensaio consistiu em um martelo com um dispositivo de disparo e um acelerômetro vertical anexado a um computador portátil com *software* para a leitura dos dados, conforme apresentado na Figura 117. Uma técnica similar ao *Sonic Echo*, denominada *Impulse Response* também foi aplicada, que se difere pela medição da força da batida, análise dos resultados no domínio da frequência e pela existência de mais um parâmetro de análise chamado de rigidez dinâmica, como explicado no item 0.



Figura 117 – Equipamentos utilizados no ensaio Sonic Echo

Essa ferramenta representa uma técnica comercialmente oferecida no cenário nacional, cujo ensaio consistiu em gerar um golpe com um martelo instrumentado com medidor de força (F) e realizar a leitura da reflexão (V) da onda mecânica gerada na barra através de um geofone. Tanto o martelo quanto o geofone foram ligados a um receptor de sinais, que estava conectado a um *notebook* que, a partir de um *software* específico da empresa responsável pelos ensaios, gerava e tratava os resultados matematicamente a fim de obter uma curva de mobilidade (V/F) em função da frequência. A forma de aquisição dos resultados é mostrada na Figura 118.

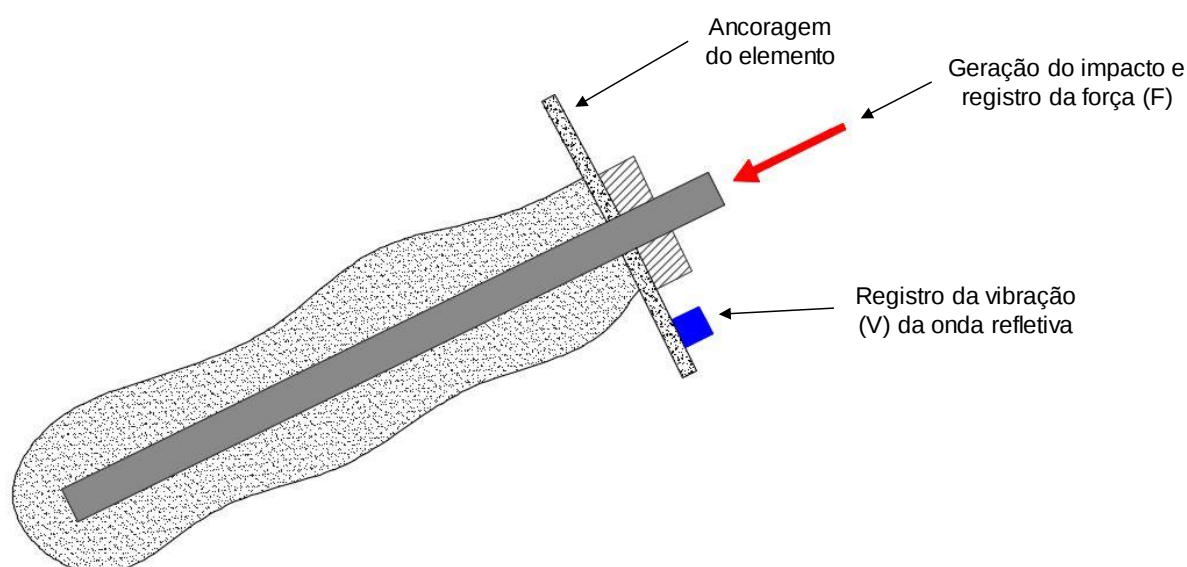


Figura 118 - Esquema de realização do ensaio não destrutivo

O martelo utilizado tinha um peso aproximado de 2 kg. O geofone foi colocado na mesma direção das barras, sendo utilizada graxa para fixação do aparelho na chapa de aço a fim de se evitar a presença de ar entre o geofone e a onda refletida.

O ensaio realizado utilizou o geofone para aquisição dos dados, procedimento que tem a vantagem de medir a velocidade diretamente, não necessitando de uma integração para obtê-la como ocorre com o acelerômetro. Os geofones são considerados transdutores de frequência baixa, dado que medem frequências abaixo de 2 kHz (Jayawickrama *et al.*, 2007). Ainda segundo estes autores, a frequência varia de 0 a 1000 Hz para as ondas geradas por martelo flexível de borracha. Os ensaios foram realizados com um martelo composto por plástico, possivelmente pelo fato de não se ter o conhecimento do comprimento do elemento incluso no solo, escolheu-se, então, o equipamento que permitiria a onda percorrer maiores comprimentos por gerar ondas de frequências menores. Também se observou que não houve modificação da disposição do local de leitura e da batida na realização do ensaio, fato que provavelmente se deve à impossibilidade de se utilizar a calda de cimento existente no grampo pela falta de regularização, e ainda por ser um processo executivo já consolidado na prática do operador.

8.2 Resultados

8.2.1 *Time Domain Reflectometry e Reflectometric Impulse Measurement Technique*

Os ensaios de TDR geraram gráficos onde o eixo das abscissas indica o tempo de propagação da onda elétrica em nano segundos e o eixo das ordenadas é o coeficiente de reflexão da onda, representada pela letra grega ρ e definido pela relação entre tensão refletida e tensão aplicada. Quando a linha está com seu final aberto, ou seja, sem contato entre os fios elétricos interno e externo do cabo coaxial, o valor do coeficiente de reflexão ρ é igual à 1. Se, no final da linha os fios estiverem em contato, 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. Por se tratar de uma relação entre tensões, ρ é adimensional.

Nos gráficos obtidos foram identificados picos iniciais que ocorrem devido à diferença de impedância (resistência à passagem de corrente elétrica) entre os cabos, conectores elétricos e a barra de aço utilizada para realizar as medições. Essas reflexões também foram encontradas por outros autores citados anteriormente que estudaram o método TDR (e.g. Cheung 2003, Chung *et al.* 2016). 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 119).

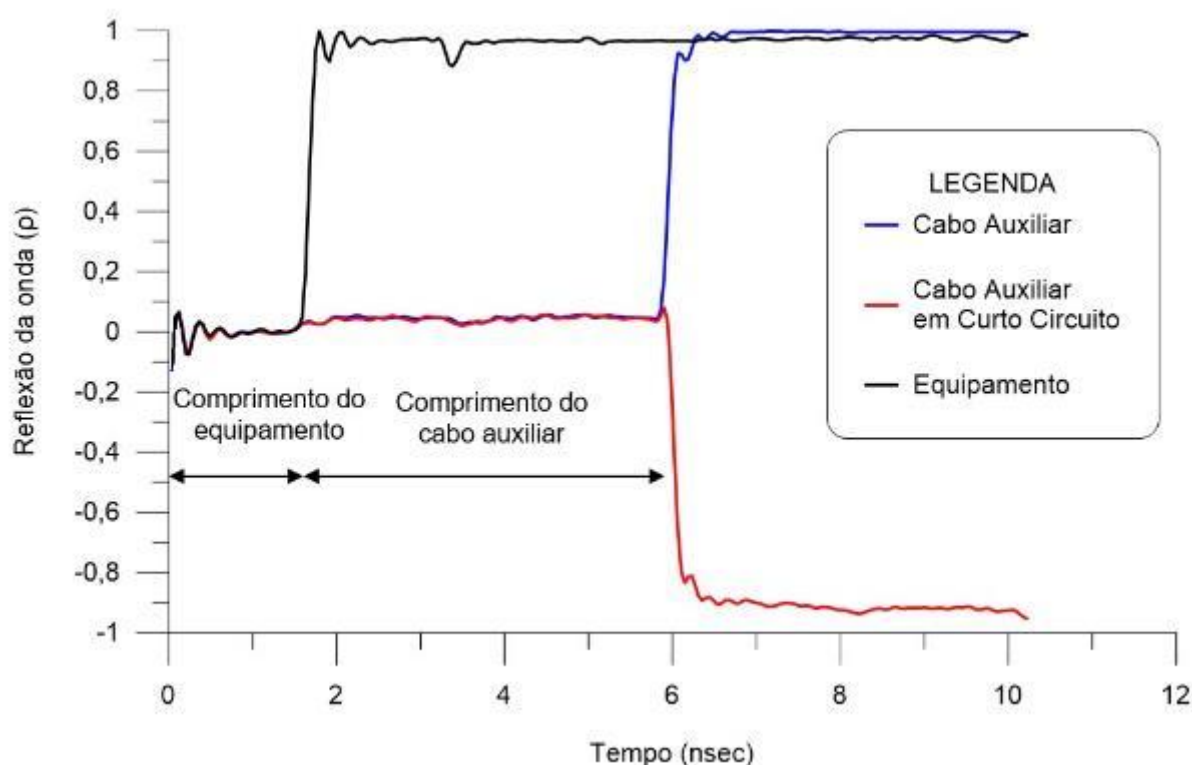


Figura 119 – Análise dos pulsos iniciais do equipamento TDR

As reflexões ocorreram devido ao final do cabo ou mudança de meio em que a onda se propaga. Ao analisar a Figura 119, com a sobreposição dos gráficos obtidos para cada medição foi possível perceber que o equipamento apresenta um “comprimento interno” em que o pulso é aplicado, indicado no gráfico como comprimento do equipamento. O cabo auxiliar com as garras jacaré também apresentou um comprimento com outro pico e no ponto em que a onda do cabo auxiliar em curto circuito mudou de sentido é definido como o ponto inicial de aplicação do pulso no cabo coaxial ou nas barras. Assim, em todos os ensaios realizados, para obtenção do tempo correto de propagação do pulso, deve-se descontar o tempo inicial, que ocorre devido às configurações do ensaio e do equipamento. Para determinação do tempo final utilizou-se o método das tangentes em que é adotado o ponto de maior curvatura entre a tangente horizontal e a tangente vertical com declividade positiva.

Inicialmente, o comprimento dos cabos coaxiais pré-instalados foi verificado mediante sua conexão com o equipamento TDR a partir do cabo auxiliar com garra jacaré. 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 120. Foram escolhidos três elementos de cada comprimento para

apresentação dos resultados, uma vez que os gráficos dos cabos de mesmo comprimento foram similares. Assim, ao se conhecer o comprimento dos cabos e o tempo de propagação do pulso elétrico foi possível determinar a velocidade de propagação no cabo coaxial. Ressalta-se que, conforme descrito anteriormente, o ponto em que essas curvas mudam de direção representam o início do pulso que se propaga no cabo em teste.

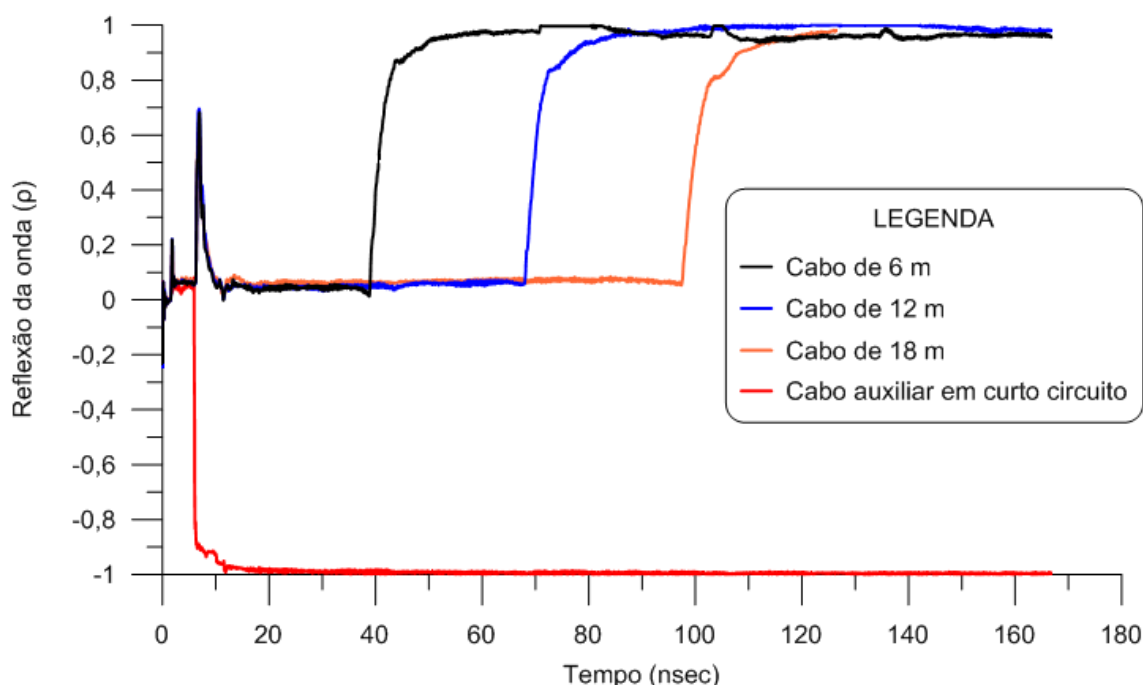


Figura 120 – Comprimento dos cabos coaxiais no campo experimental

A velocidade de propagação do pulso foi calculada com base no comprimento conhecido do cabo e no tempo de reflexão de início e fim do mesmo, de acordo com a Equação 1. 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). Tal valor corresponde 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.

8.2.1.1 Grampos

Os ensaios com TDR foram efetuados com a geração do contato entre o fio externo do cabo coaxial e a barra avaliada, como demonstrado na Figura 147a, de modo a obter a velocidade de propagação na calda de cimento que se encontra ao redor da barra. Os primeiros elementos a serem ensaiados foram os grampos íntegros de 6 m e 12 m, uma vez que foram executados como elementos de referência e, portanto, a calibração da velocidade de propagação do pulso elétrico na barra em contato com a calda de cimento foi elaborada a partir desses elementos. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 121, onde o símbolo “↑” indica o tempo inicial e o símbolo “↓” representa o tempo final de propagação do pulso na barra.

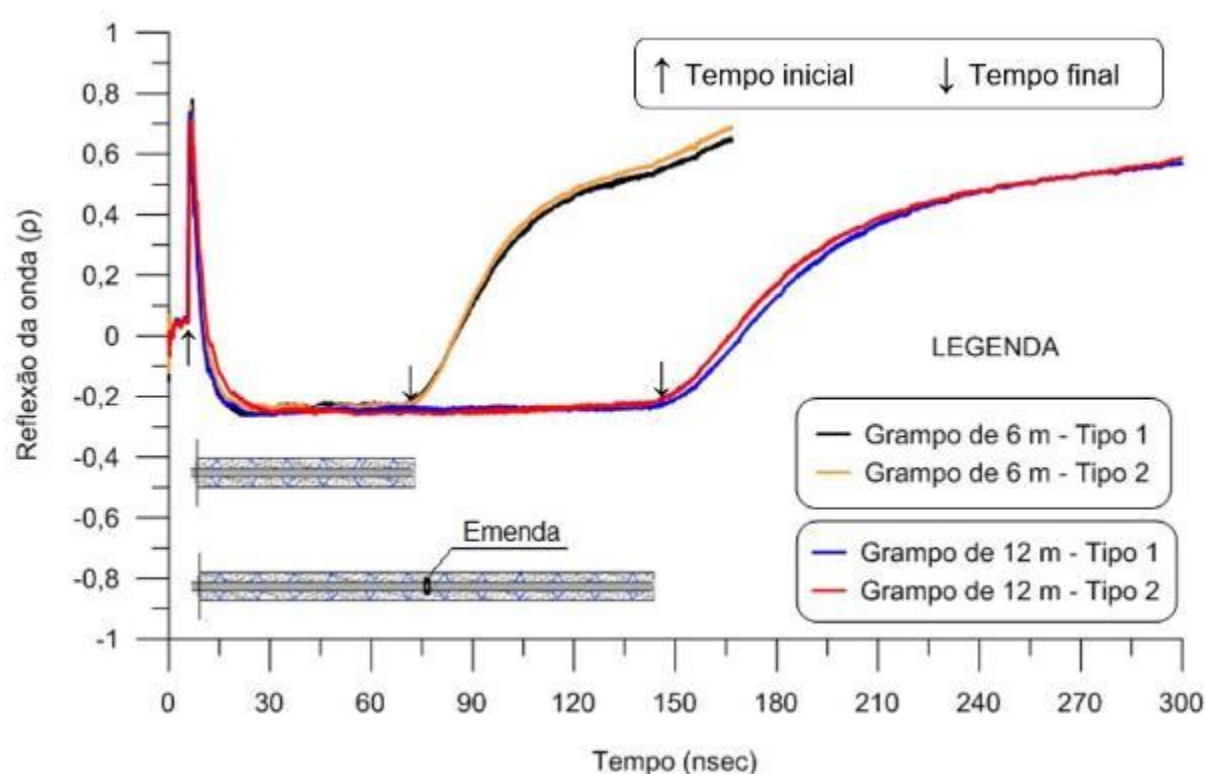


Figura 121 – Resultados do método TDR nos grampos íntegros

Com base nesses resultados foi possível observar que os gráficos dos grampos de mesmo comprimento apresentaram comportamento similar, o que indica que o preenchimento da calda de cimento nas barras foi semelhante. A reflexão da onda na barra de 6 m ocorre em um tempo menor que a de 12 m, caracterizando os diferentes comprimentos instalados. Cabe salientar que as

reflexões do final da barra não foram tão acentuadas como do cabo coaxial, pois o sinal não se propagou por um meio ideal e isolado como o cabo, e sim na barra de aço.

As curvas obtidas nos grampos G1 e G2, ambos de 12 m, são apresentadas na Figura 122. Destaca-se que ambos são grampos íntegros mas os elementos G1 não tiveram reinjeção e os grampos G2 foram executados com reinjeção.

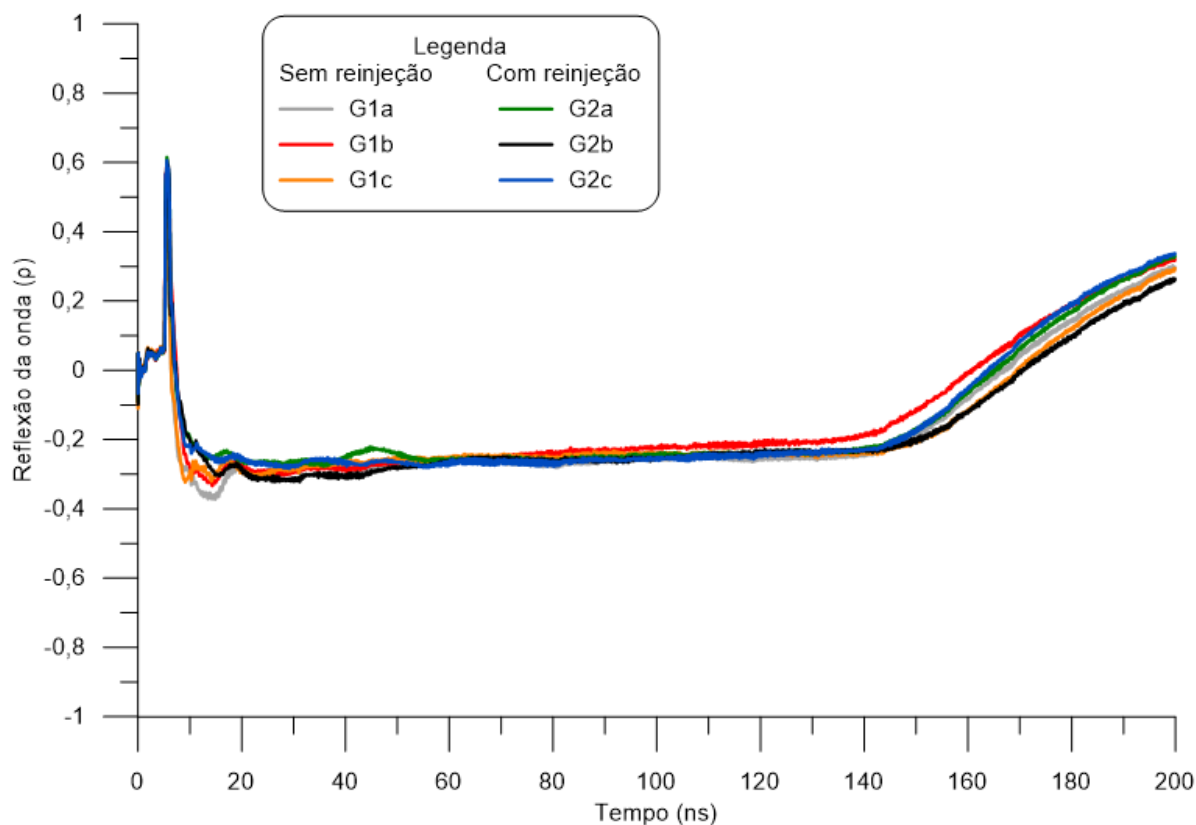


Figura 122 – Ensaio TDR nos grampos de 12 m

Todas as barras apresentaram reflexões irregulares, logo após o pico inicial, provavelmente pela passagem da corrente elétrica entre meios diferentes, do ar para a calda de cimento. A barra G1a apresentou uma reflexão negativa inicial maior que as demais barras, o que poderia indicar uma falha no início não premeditada, mas também poderia estar associada aos processos executivos dos grampos. Os ensaios foram refeitos e o resultado encontrado foi o mesmo. Os pulsos iniciais, que foram encontrados em todos os elementos podem ser visualizados com maior detalhe na Figura 123.

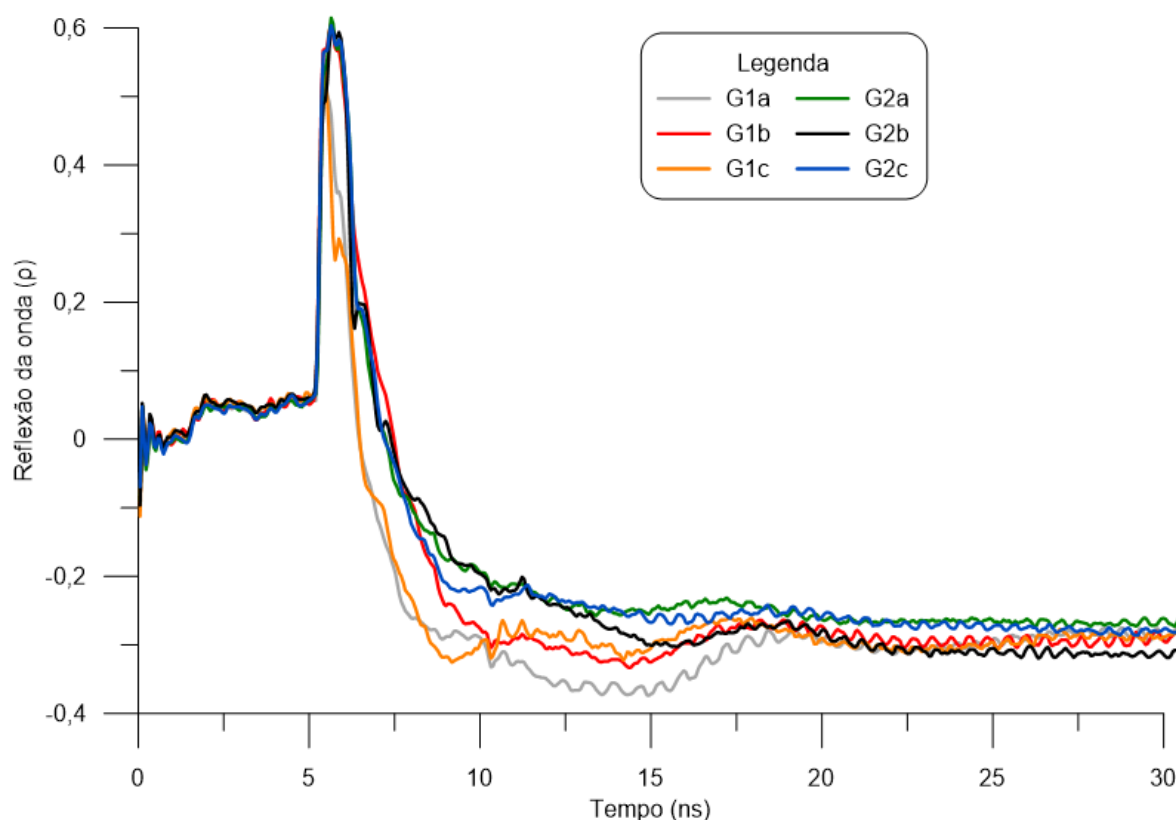


Figura 123 – Pulsos iniciais das barras G1 e G2

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.

É possível perceber que o grampo G1b teve o retorno do pulso um pouco antes quando comparado aos demais, porém sua velocidade foi próxima da média, pois apresenta um trecho maior da barra fora do terreno (L ar), o que faz com que o pulso retorne mais rápido. A barra G2a apresentou uma reflexão positiva próximo aos 2 m (40 ns), que pode estar associada a uma falha com ar na calda de cimento, mas não influencia no cálculo da velocidade de propagação. Observa-se que a existência de emendas no meio das barras (elementos G1 e G2) não representou mudanças nos resultados. Os resultados dos grampos de 6 m com o método TDR podem ser observados na Figura 124.

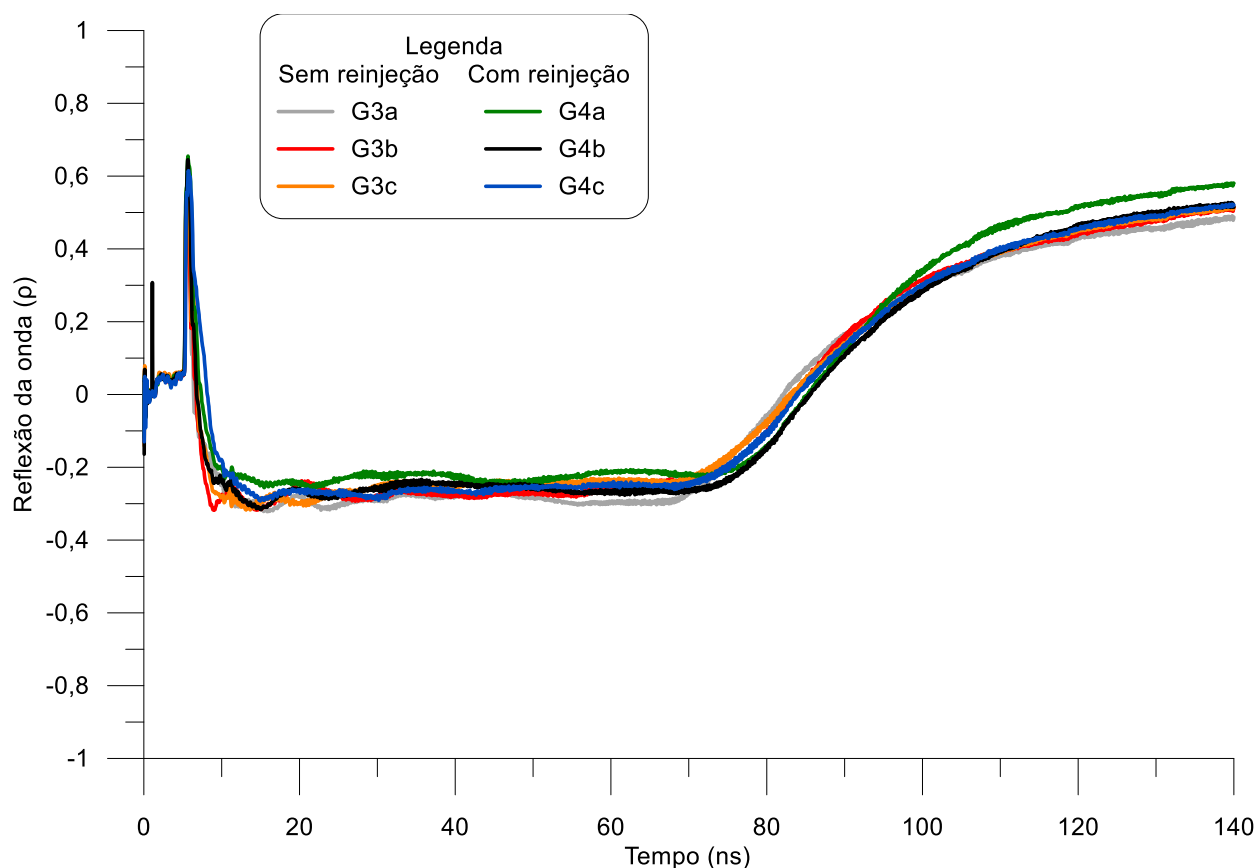


Figura 124 – Ensaio TDR nos grampos íntegros de 6 m

É possível observar que todas as curvas seguiram a mesma tendência, com reflexão entre -0,3 e -0,2. Nenhum elemento apresentou reflexão muito acentuada ao longo dos ensaios. O grampo G4c apresentou velocidade próxima à obtida com as barras sem reinjeção, com retorno anterior ao das barras de 6 m com reinjeção, 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 125.

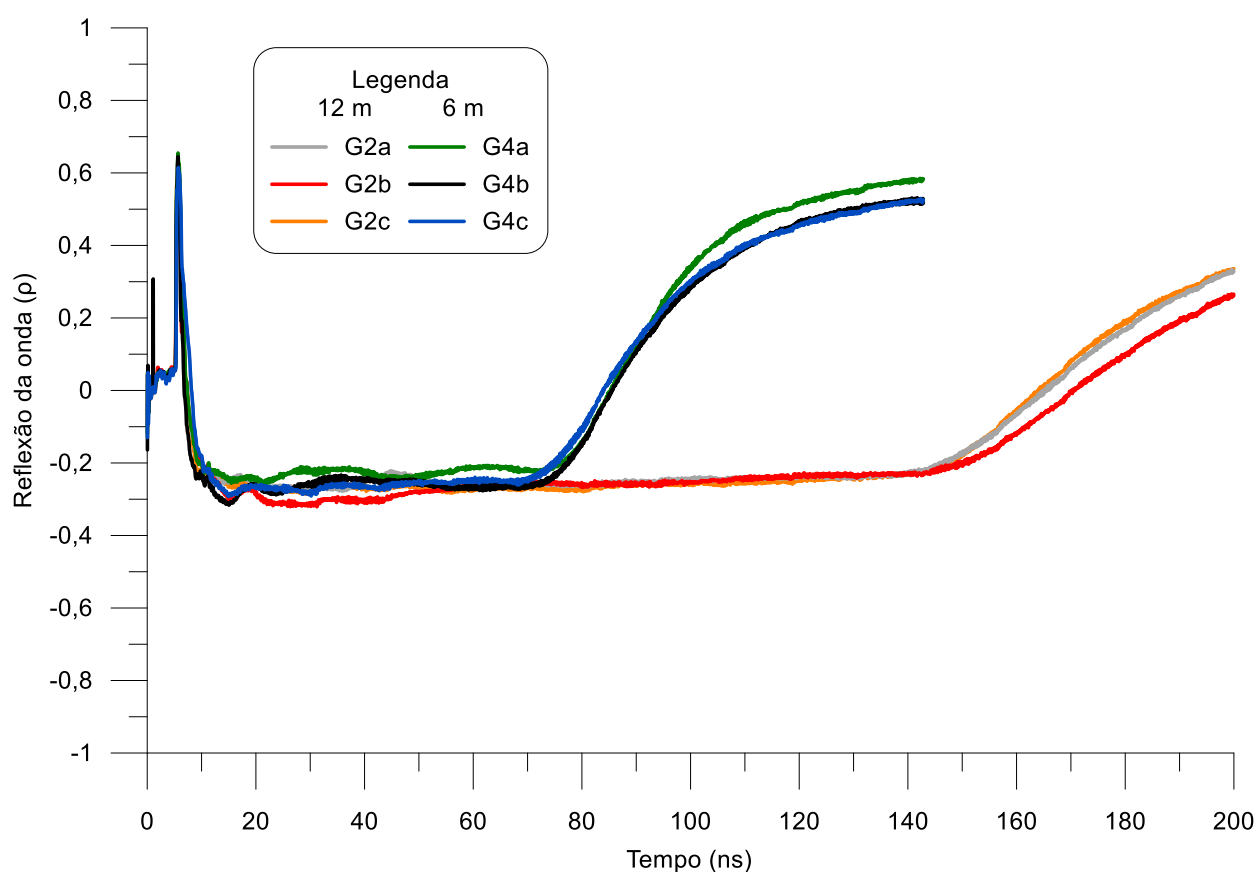


Figura 125 – Comparação entre os ensaios TDR nos grampos de 6 m e 12 m íntegros

Com base nesses resultados, observa-se que as curvas apresentaram reflexões semelhantes e com poucas reflexões, 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.

Com relação às barras de 6 m com emendas no início (G5a), meio (G5b) e fim (G5c), os resultados obtidos são apresentados na Figura 126, em conjunto com a curva obtida para a barra íntegra com reinjeção G4a.

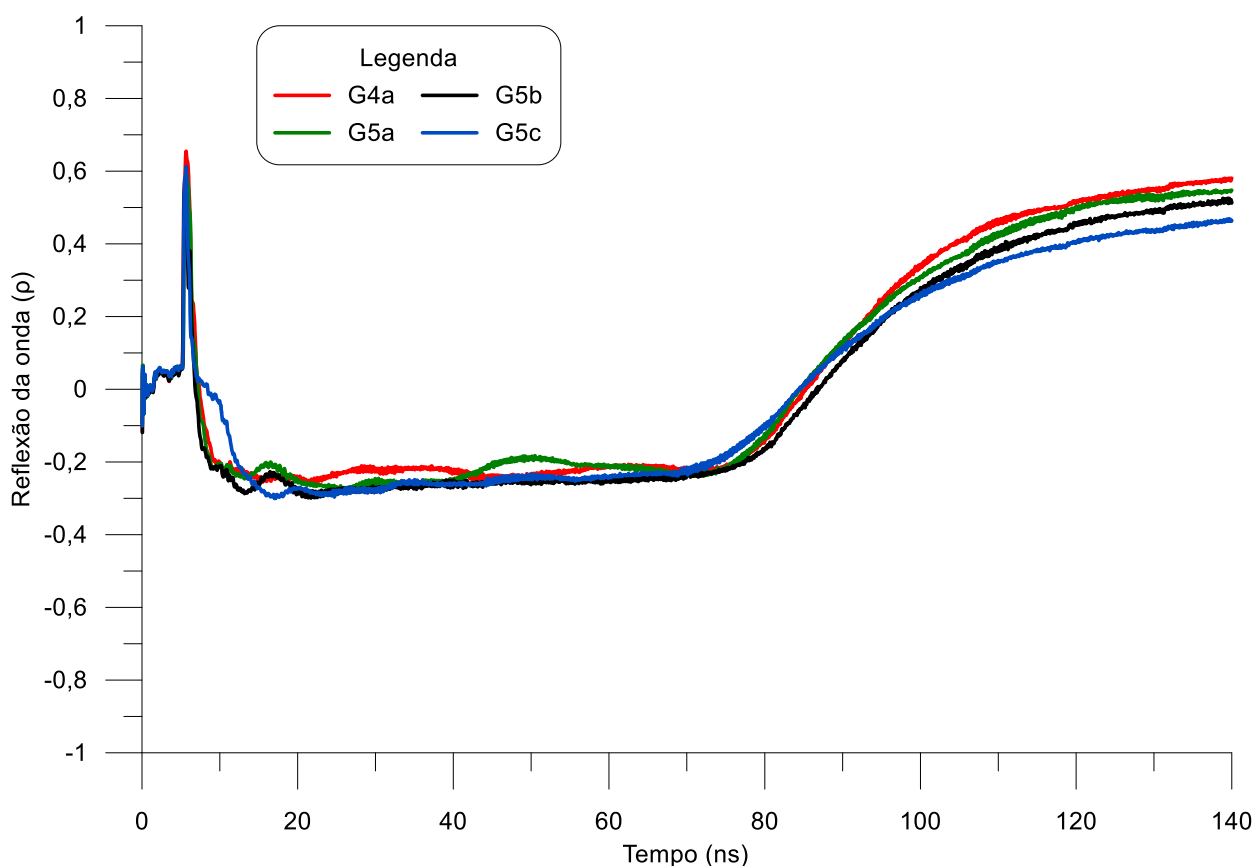


Figura 126 – Resultados do TDR nas barras com emenda (6 m)

Verifica-se que 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 central da emenda nas barras. 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 G5c apresentou uma velocidade maior que as demais barras, o que pode estar associado à presença de ar no preenchimento com a calda de cimento.

Os resultados obtidos para os grampos de 6 m da variação G6, executados com um metro final cravado no solo, são apresentados na Figura 127.

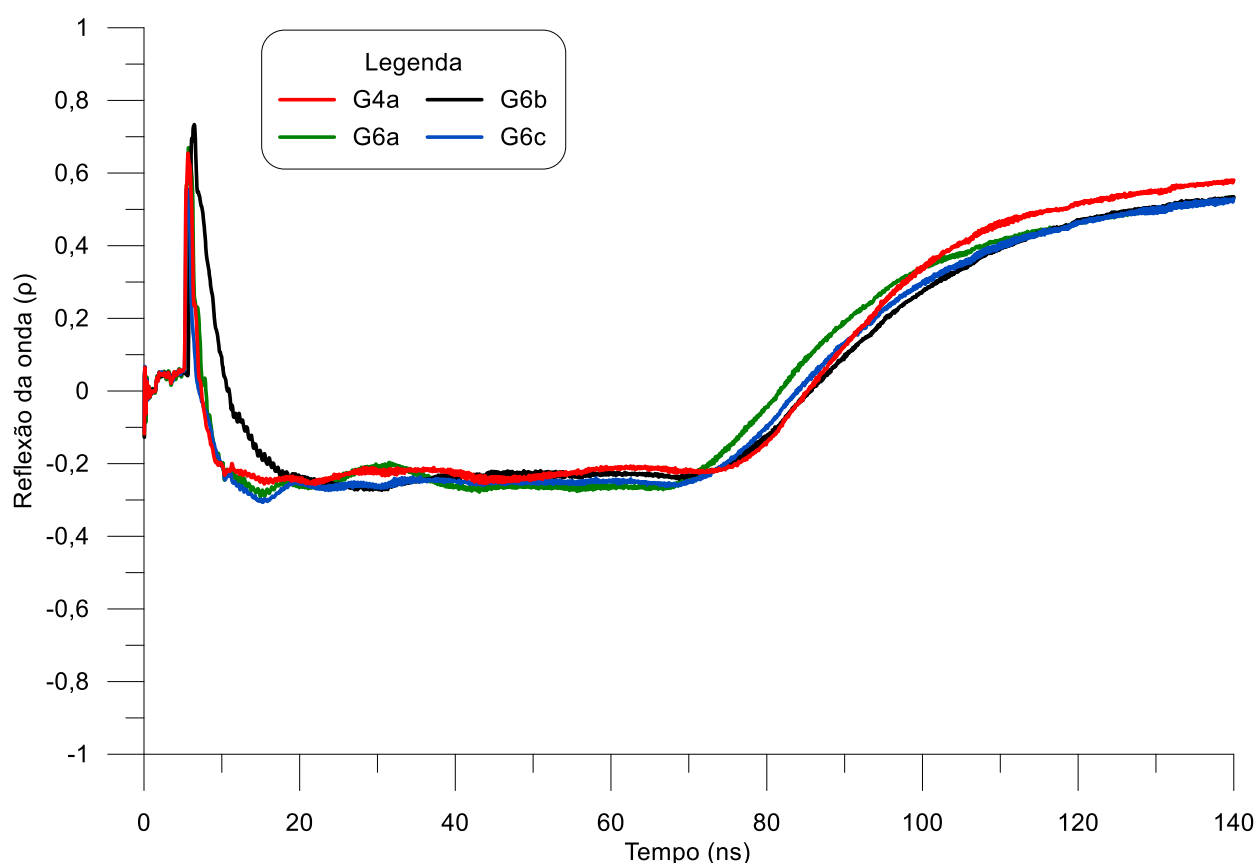


Figura 127 – Resultados TDR nas barras G6

Observa-se que todas as curvas apresentaram um tempo de propagação menor, o que indica velocidade maior, 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 e 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. O grampo G6a apresentou uma pequena reflexão positiva próxima aos 2 m de barra, o que pode revelar uma falha, porém não afetou na velocidade. O grampo G6 foi a variação que apresentou menor dispersão dos resultados na calibração da velocidade de propagação na calda de cimento.

Na Figura 128 são demonstradas as curvas obtidas para a variação de falha com ar de 10 cm no meio dos grampos.

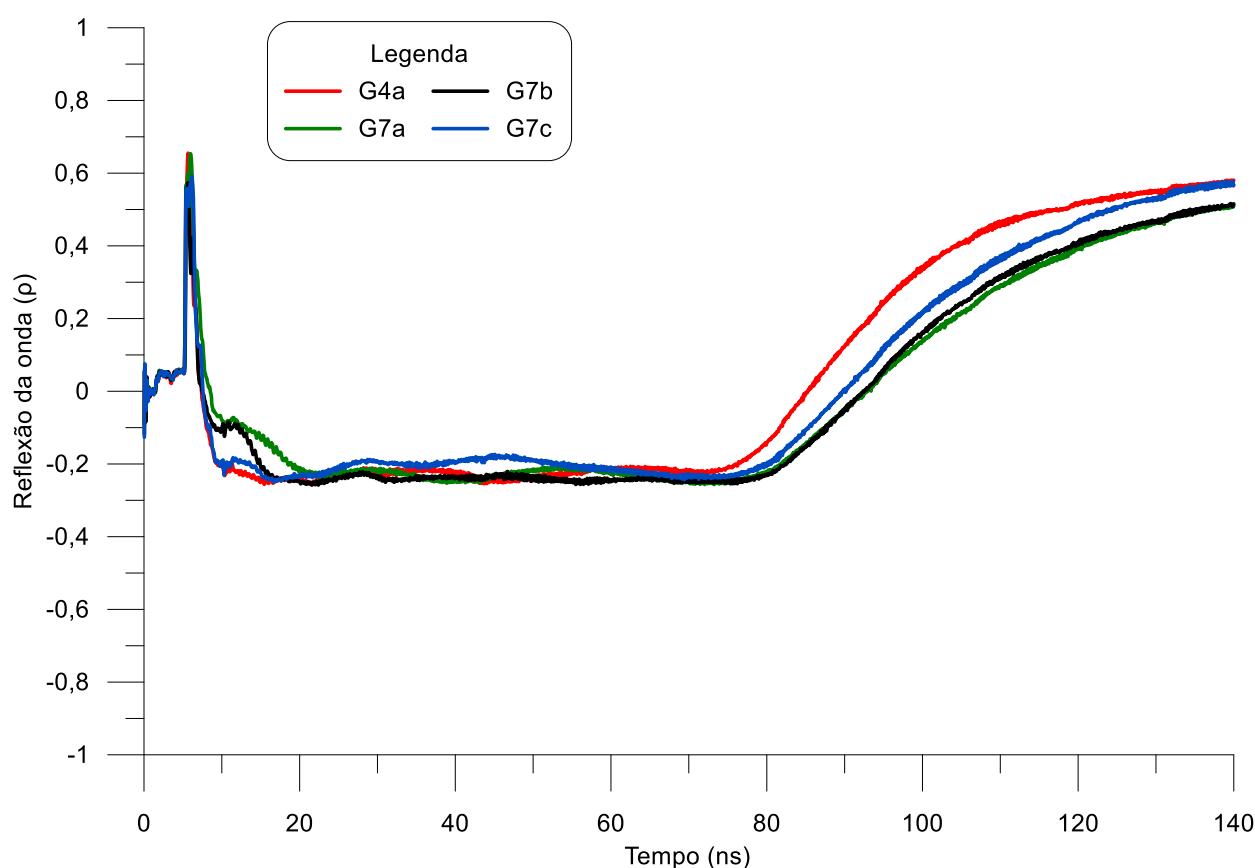


Figura 128 – Resultados TDR nos grampos G7

Os resultados obtidos na variação G7 não permitiram identificar graficamente a falha de ar de 10 cm, porém todas estas variações apresentaram velocidades inferiores quando comparadas às obtidas com os grampos íntegros. A barra G7c apresentou uma suave variação da reflexão da onda, mas não é possível afirmar que reflete a presença da anomalia, uma vez que nas demais barras não foi encontrada nenhuma variação nas curvas. A velocidade de propagação encontrada foi inferior, quando comparado 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 do sinal e apresenta uma velocidade final inferior.

Os resultados obtidos nos grampos com falha com ar de 50 cm são apresentados na Figura 129.

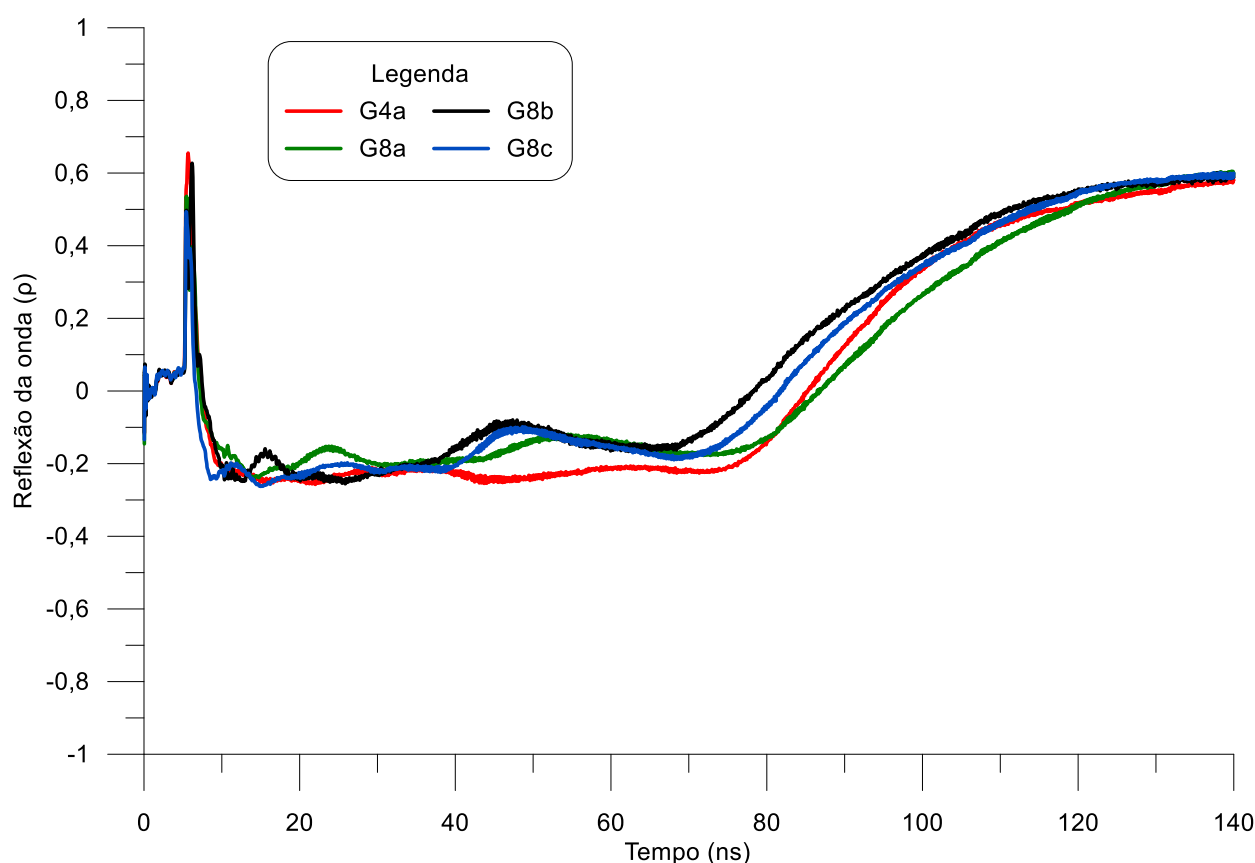


Figura 129 – Resultados TDR nos grampos G8

A variação G8, com falha de 50 cm de ar, apresentou gráficos com dispersão da reflexão da onda no meio das barras, permitindo identificar as falhas simuladas com reflexões positivas de amplitude 0,1. 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, como citado no parágrafo anterior, tal redução deve-se possivelmente a um decréscimo de velocidade por atenuação após o pulso passar pela falha e retornar à calda de cimento. 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 130 são apresentados os resultados obtidos com o TDR na variação G9, com falha com ar de 1,0 m.

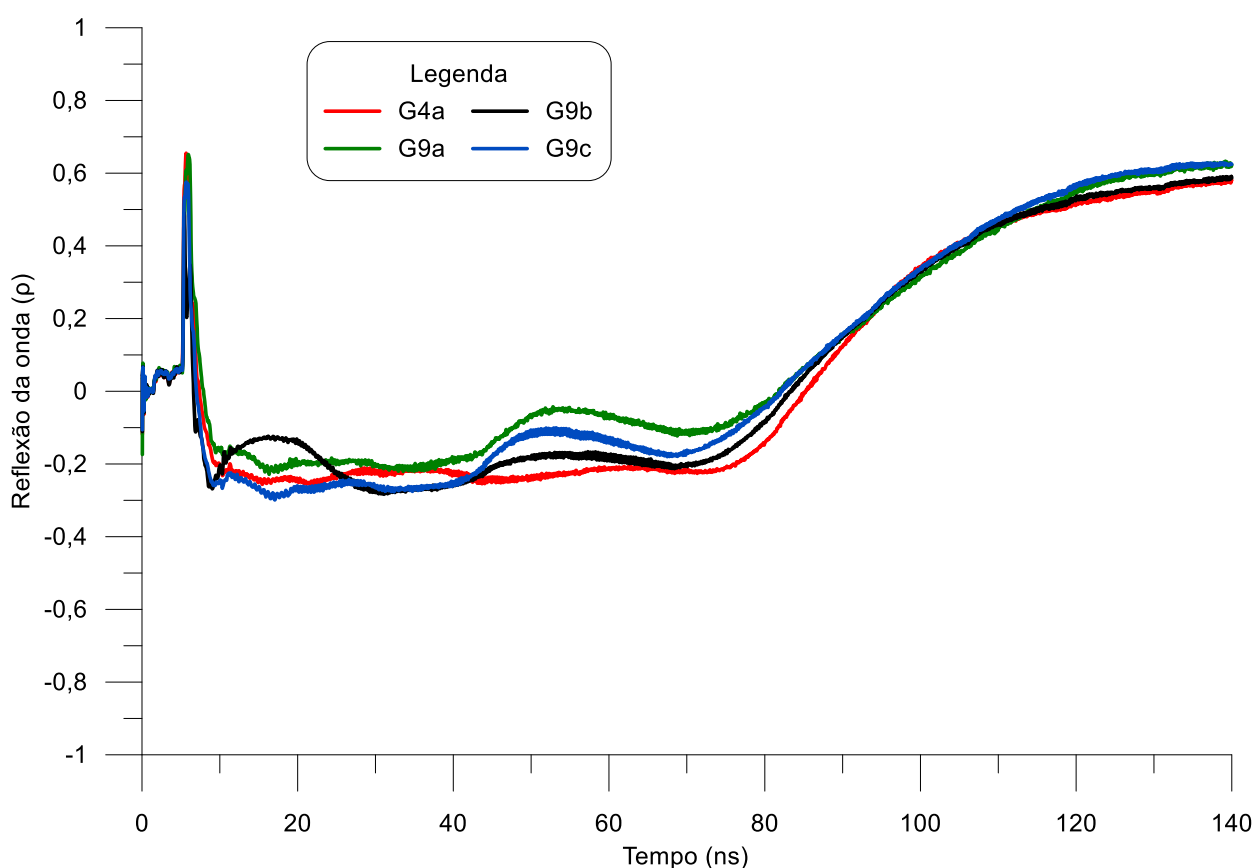


Figura 130 – Resultados TDR nos grampos G9

Observa-se que o vazio de 1,0 m no meio da barra 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. A velocidade para essa variação G9 foi a menor de todas avaliadas. 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, o que pode indicar uma falha com ar no início, porém a velocidade e o reflexo final foram semelhantes às demais barras.

Na Figura 131 é indicado os resultados obtidos para a variação G10.

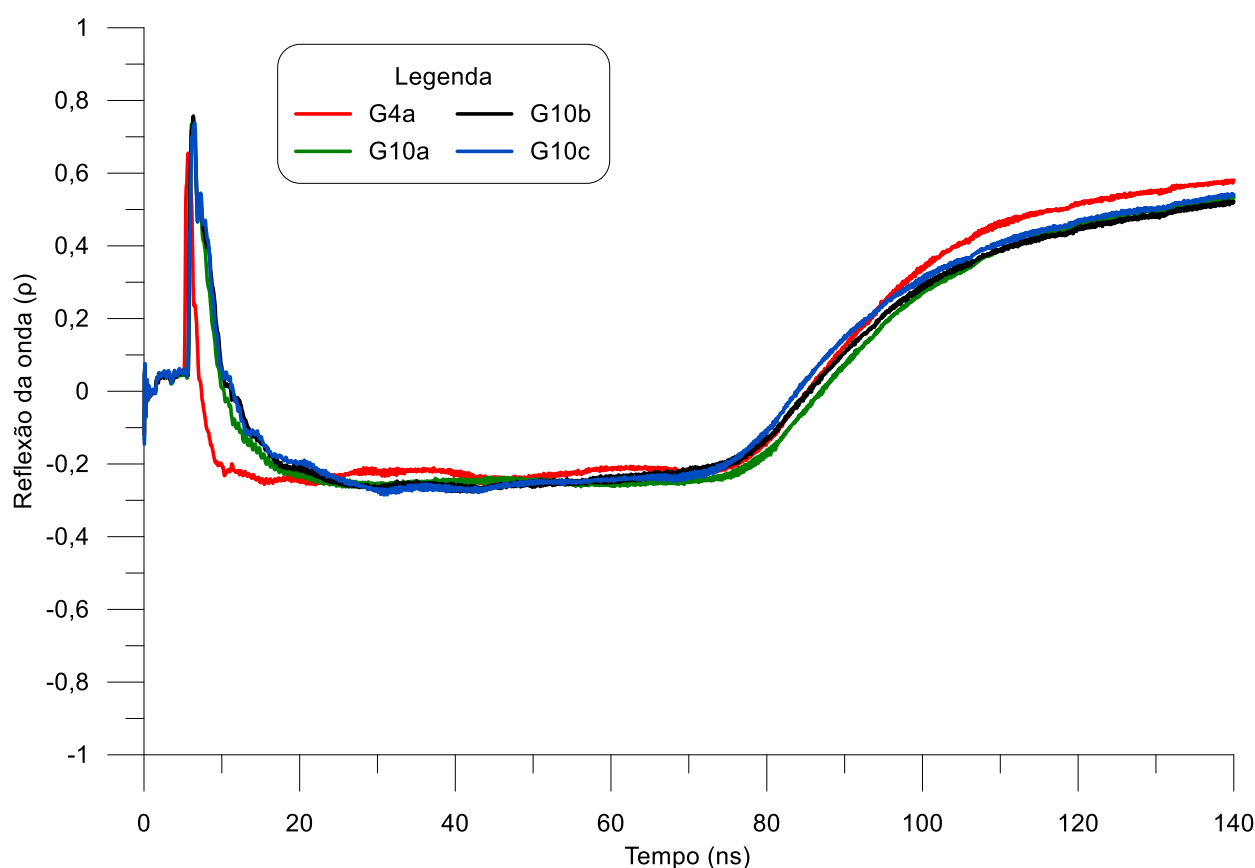


Figura 131 – Resultados TDR nos grampos G10

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. 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).

8.2.1.2 Tirantes

Ensaio com os tirantes também foram realizados por meio da aplicação da técnica de TDR. Na Figura 132 apresenta-se um gráfico representativo do comportamento observado para os ensaios em tirante de monobarra. 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 (11 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 ar. Por outro lado, no trecho ancorado (6 m) a barra está envolta por calda de cimento, e por isso ocorre reflexão pela mudança de material em contato com o tirante.

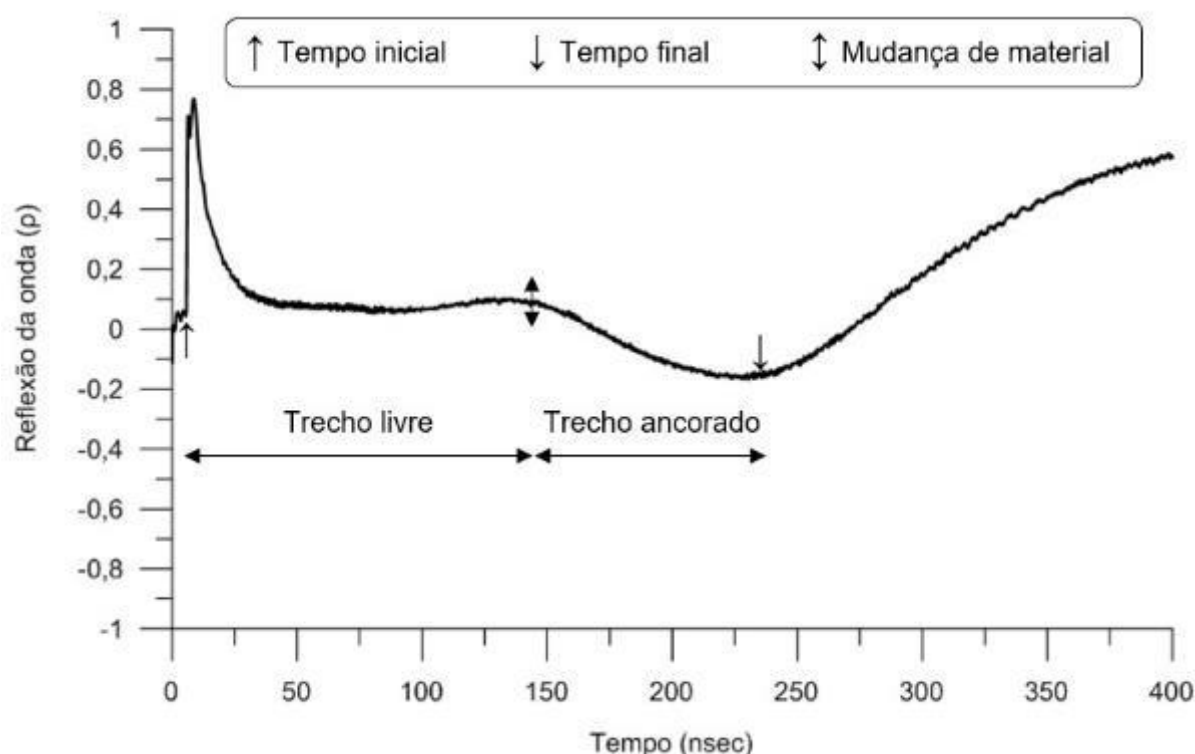


Figura 132 – Resultado do método TDR em um tirante de monobarra

Ressalta-se que 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 nata de cimento, se aproximou de $\rho = -0,2$, semelhante às que ocorreram nos grampos.

Ensaio com diferentes tipos de tirantes (monobarra, cordoalha e fio) e de mesma geometria (comprimento total com 18 m, sendo 11 m de trecho livre e 6 m de trecho ancorado, com 1 m para fora do paramento) também foram realizados (Figura 133). Observa-se que a curva que apresentou reflexão mais acentuada foi a da monobarra, seguida do elemento de cordoalha. Tal característica pode ser possivelmente associada às diferentes composições dos elementos, uma vez que a monobarra compõe-se de uma barra íntegra e a cordoalha de vários fios entrelaçados.

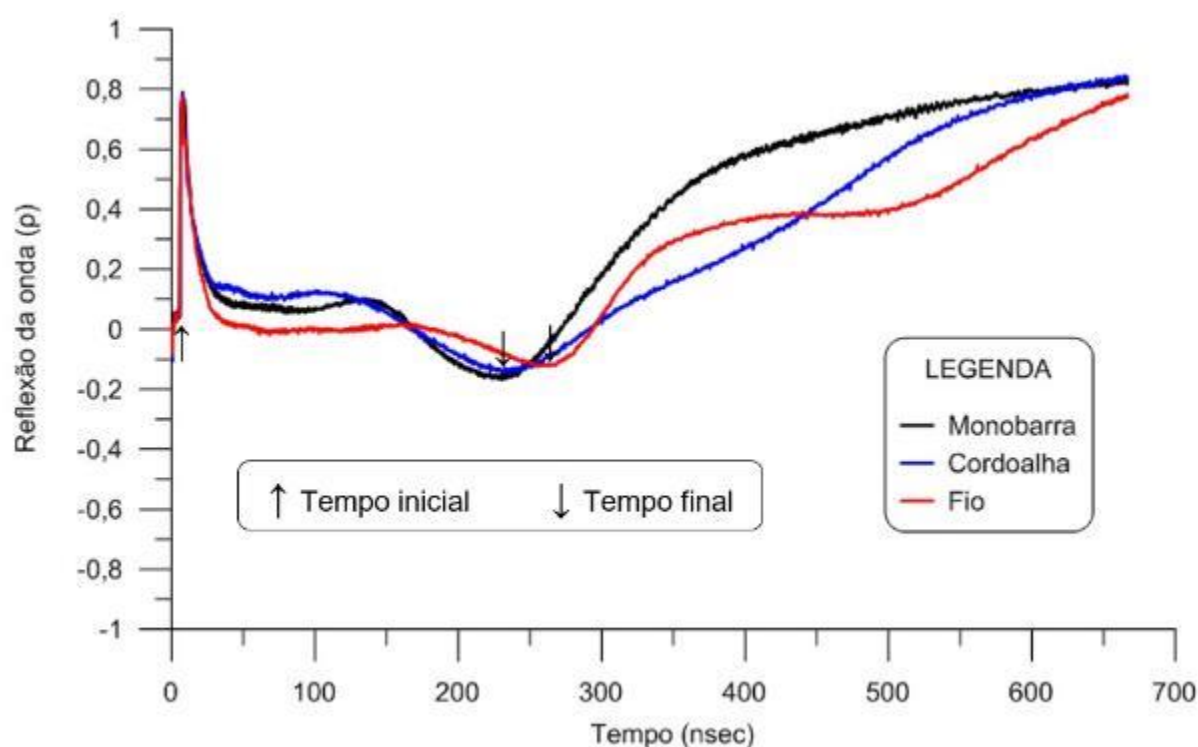


Figura 133 – Resultados do método TDR nos diferentes tipos de tirantes

De modo geral os resultados obtidos nos tirantes foram bem semelhantes aos apresentados na Figura 133, com exceção dos tirantes de fio que apresentaram resultados muito divergentes entre os fios do mesmo elemento. Foi possível observar ainda que os valores de velocidade de propagação nos tirantes foram diferentes dos obtidos nos grampos. Um resumo com as médias desses valores é apresentado na Tabela 5, sendo que nos tirantes de fio não foi possível chegar em um padrão e, por isso, os resultados não foram apresentados.

Tabela 5 – Velocidades obtidas nos tirantes

Tirante	Velocidade/Velocidade da luz no vácuo	
	Trecho livre	Trecho ancorado
Monobarra	0,42	0,23
Cordoalha	0,41	0,17

Cabe salientar que no trecho livre os tirantes foram envoltos por um tubo de PVC, não permitindo contato com a calda de cimento e, no trecho ancorado, a barra está em contato direto com a mesma. Desse modo, percebe-se que no trecho livre, a velocidade média entre os tirantes

de monobarra e de cordoalha foram semelhantes, porém bem abaixo do valor encontrado em laboratório para velocidade de propagação no ar, com relação de aproximadamente 0,80 entre as velocidades. Isso indica que a condição em que as barras se encontram no trecho livre é diferente à exposição ao ar, de modo que o tubo de PVC, também denominado bainha individual, provavelmente gera influência na velocidade. Além disso, falhas no preenchimento do trecho livre não são detectadas pelo método, uma vez que o TDR detecta apenas o meio ao redor do tirante e as barras estão protegidas pela bainha individual fazendo com que a calda de cimento não esteja em contato com a barra.

No trecho ancorado, em que a barra está em uma condição semelhante aos grampos, a relação entre as velocidades se apresentou inferior ao valor encontrado nos grampos de 0,3. Este fato pode ser explicado pela atenuação do sinal ao longo dos 12 m de trecho livre dos tirantes até chegar no trecho ancorado e nas diferenças construtivas, como reinjeção localizada e protensão dos elementos.

O método TDR se mostrou com boa aplicabilidade nos tirantes para a detecção do trecho livre e do trecho ancorado após calibração das velocidades de propagação em barras conhecidas, uma vez que para os tirantes de monobarra a velocidade de propagação do pulso elétrico no trecho livre se mostrou menor que à velocidade nas cordoalhas. Nos tirantes de cordoalha, os gráficos obtidos em todas as seis cordoalhas do mesmo tirante apresentaram o mesmo comportamento. Por outro lado, nos tirantes de fio os resultados foram inconclusivos. Para realização do ensaio é necessário o acesso elétrico à cabeça das barras dos tirantes e ao cabo coaxial pré-instalado. Cabe salientar a necessidade de cuidados executivos com o cabo coaxial durante a inserção das barras no furo, principalmente na etapa de protensão.

Conforme descrito em item precedente, ensaios complementares foram realizados sem que se utilizasse o cabo coaxial pré-instalado através de uma metodologia denominada *Reflectometric Impulse Measurement Technique*, semelhante ao TDR. A Figura 134 apresenta um resultado típico dessa técnica. Nota-se que há duas linhas presentes no gráfico: uma vermelha tracejada, que se refere ao comportamento teórico do tirante (em situação ideal - sem presença de corrosão), e uma linha azul, atribuída ao comportamento real lido pelo equipamento.

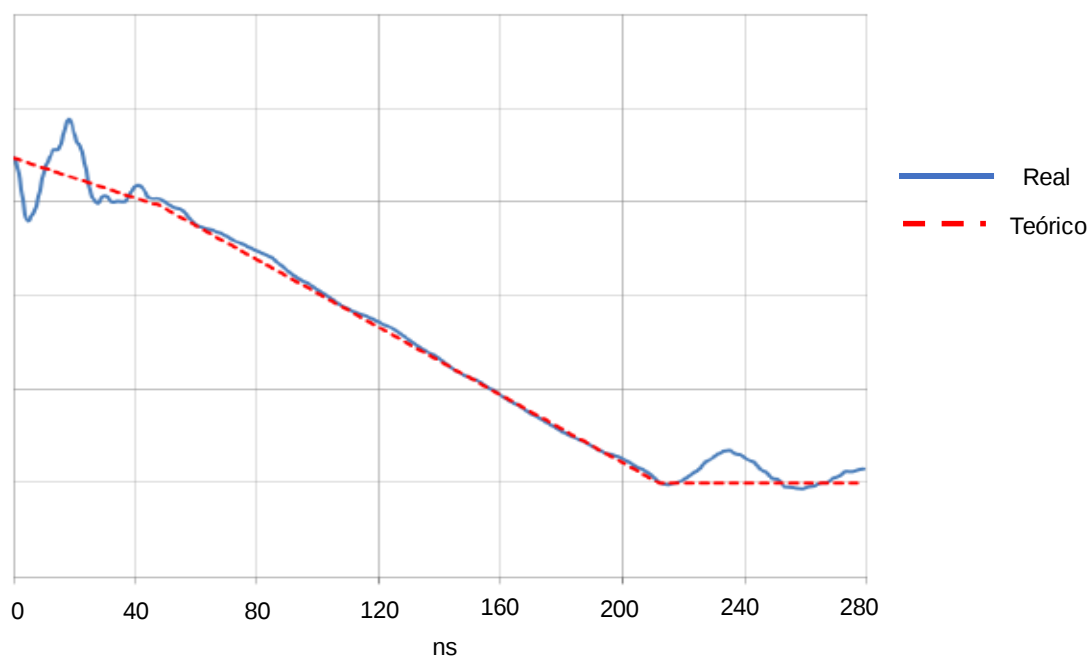


Figura 134 - Gráfico método Reflectometric Impulse Measurement Technique

Após a realização dos ensaios nos tirantes do campo experimental, executados sem que fosse informado ao executor o comprimento dos elementos, os resultados apresentaram-se aproximadamente 30% abaixo dos comprimentos reais das barras. Adicionalmente, não foram reportadas anomalias relevantes nas barras.

Ressalta-se que o processamento dos dados de ensaio foi obtido a partir de uma única velocidade de propagação do pulso elétrico no comprimento livre e no ancorado no valor de $1,432 \times 10^8$ m/s. Os valores de comprimento dos elementos, apresentados como resultados finais após a primeira análise são os expostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados após primeira análise

Tirante	Descrição	Variação		
		A	B	C
T1	Tirante Monobarra Íntegro TIPO 1	12,26	11,78	12,02
T2	Tirante Monobarra Íntegro TIPO 2	12,13	11,67	12,36
T3	Tirante Monobarra com redução de seção próximo à cabeça	12,15	12,21	12,5
T4	Tirante cordoalha íntegro TIPO 1	12,95	12,19	12,36
T5	Tirante cordoalha com falha no início do furo (50 cm)	12,45	12,49	13,05
T6	Tirante cordoalha com falha no meio do furo (50 cm com ar)	12,45	13,29	13,87
T7	Tirante cordoalha com cortes próximo à cabeça	13,01	13,52	13,64
T8	Tirante de fio íntegro TIPO 1	13,17	12,67	12,71
T9	Tirante de fio com falha no início do furo (50 cm com ar)	12,82	13,24	-

É importante ressaltar que no tirante T9c foi encontrado um grau de interferência elevado e, mesmo com a aplicação de diversos filtros, não foi possível realizar uma leitura adequada. Após o recebimento e análise dos resultados desta primeira análise, foi solicitado ao executor uma reinterpretação dos ensaios tendo como informação adicional o comprimento real das barras presentes no campo experimental. A velocidade da onda, considerada inicialmente igual a $1,432 \times 10^8$ m/s, 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..

8.2.2 Resistência elétrica

Um resumo dos dados obtidos no campo experimental pode ser observado graficamente através da Figura 135.

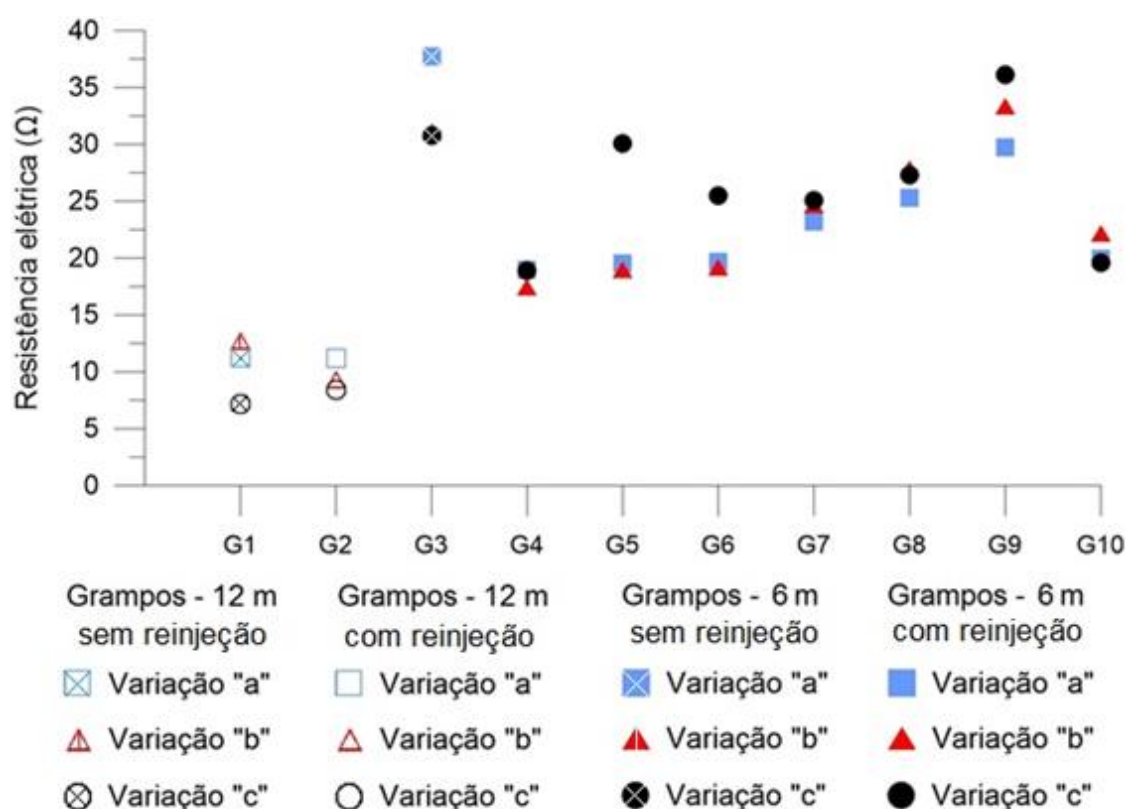


Figura 135 – Resultados de resistência elétrica no solo grampeado

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), resultado esse coerente visto que a resistência elétrica é inversamente proporcional ao comprimento. Elementos íntegros com reinjeção (G2 e G4) tiveram menor dispersão de valores 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 apresentarem um comprimento de calda de cimento menor. 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.

Também foram realizados ensaios após períodos chuvosos, não sendo observada, contudo, diferenças nos resultados quando comparado com períodos secos. Além disso, por se tratar de um ensaio comparativo, não foi possível apontar qual o comprimento do elemento e o posicionamento das anomalias, apenas obteve-se uma indicação de qual teria a maior possibilidade de estar em

desconforme com os demais. Com isso, seria possível dizer que o elemento G3a, G5c e G6c podem apresentar alguma falha quando comparado com outros de mesma variação.

Na Figura 136 apresenta-se a variação média obtida com os ensaios nos tirantes, onde a letra M representa monobarra, a letra C representa os tirantes de cordoalha e a letra F os tirantes de fio.

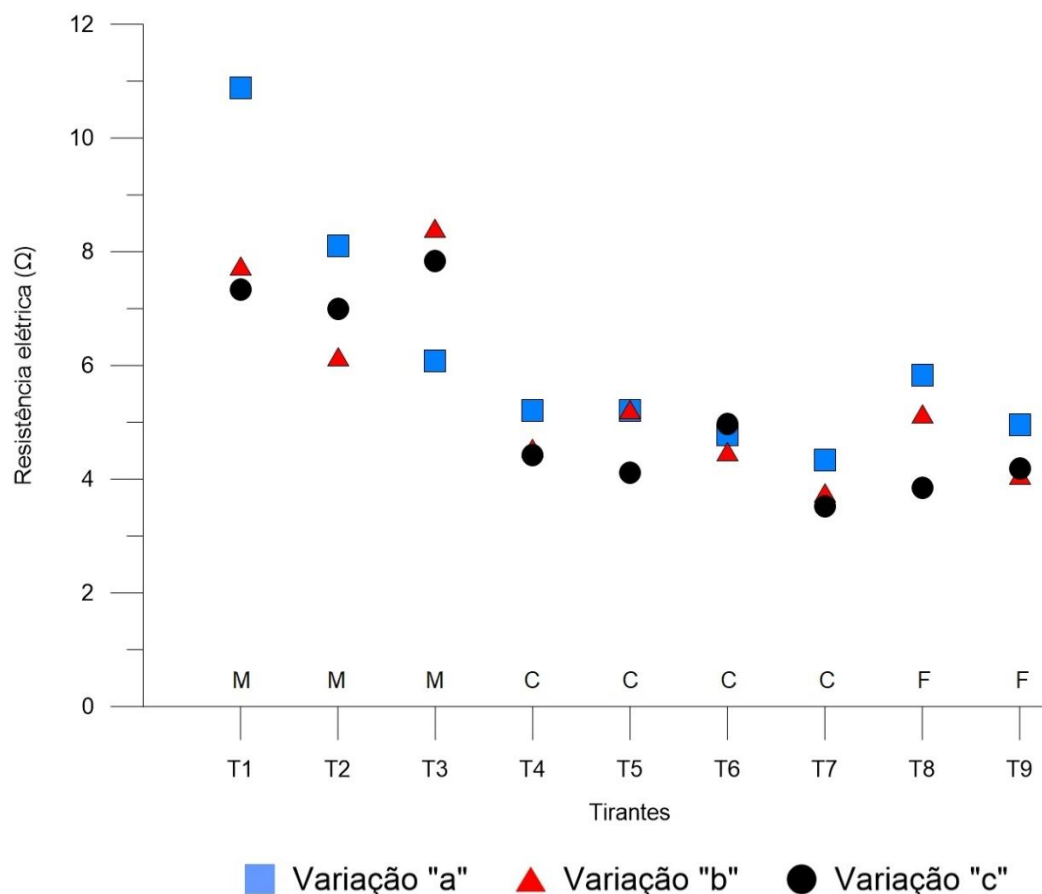


Figura 136 – Variação dos valores de resistência elétrica nos tirantes

Com base nesses resultados, nota-se que os valores de resistência elétrica tenderam a ser menores quando realizados em seções próximas dos elementos. Para ilustrar tal fato, foram adotadas 3 seções principais (2', 3' e 5') para os tirantes da linha inferior e apresentadas graficamente na Figura 137.

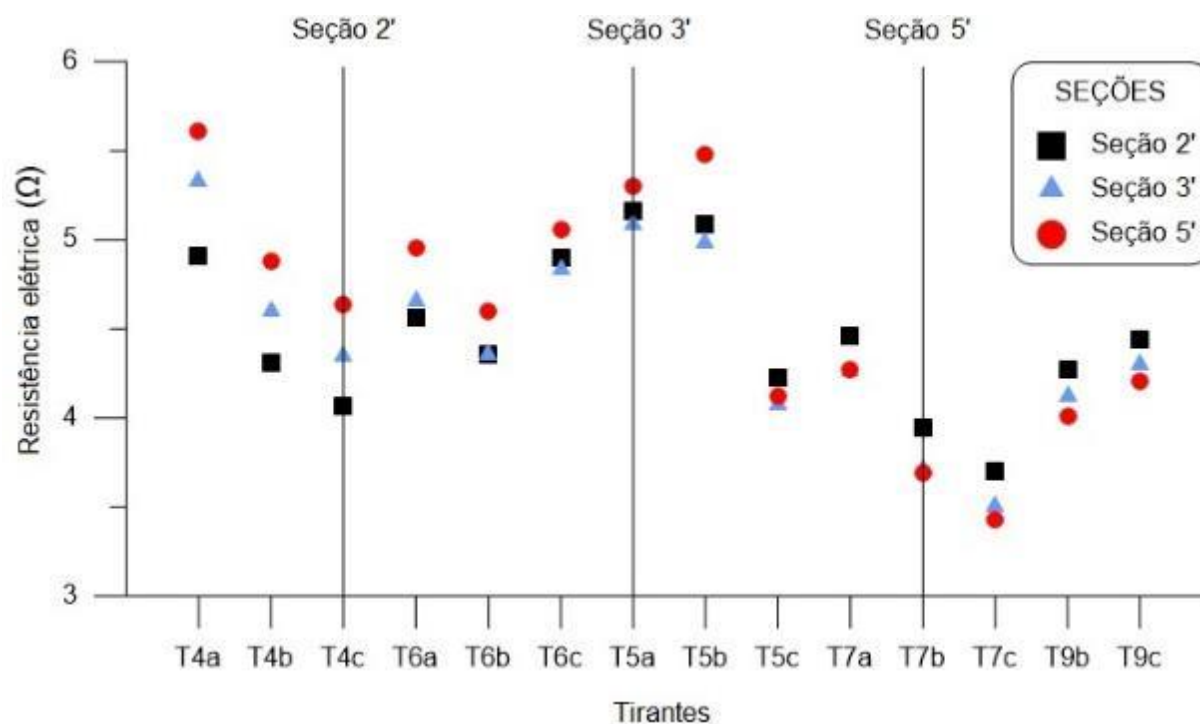


Figura 137 – Variação dos valores de resistência elétrica dos tirantes inseridos na linha inferior

Verifica-se que quando os elementos estavam próximos da seção de leitura tenderam a apresentar valores inferiores de resistência elétrica quando comparado com seções mais distantes. Na Figura 138 são apresentados os valores dos tirantes inseridos na linha superior. Assim como nos tirantes da linha inferior, esses também tiveram valores menores de resistência elétrica quando medidos mais próximos da seção.

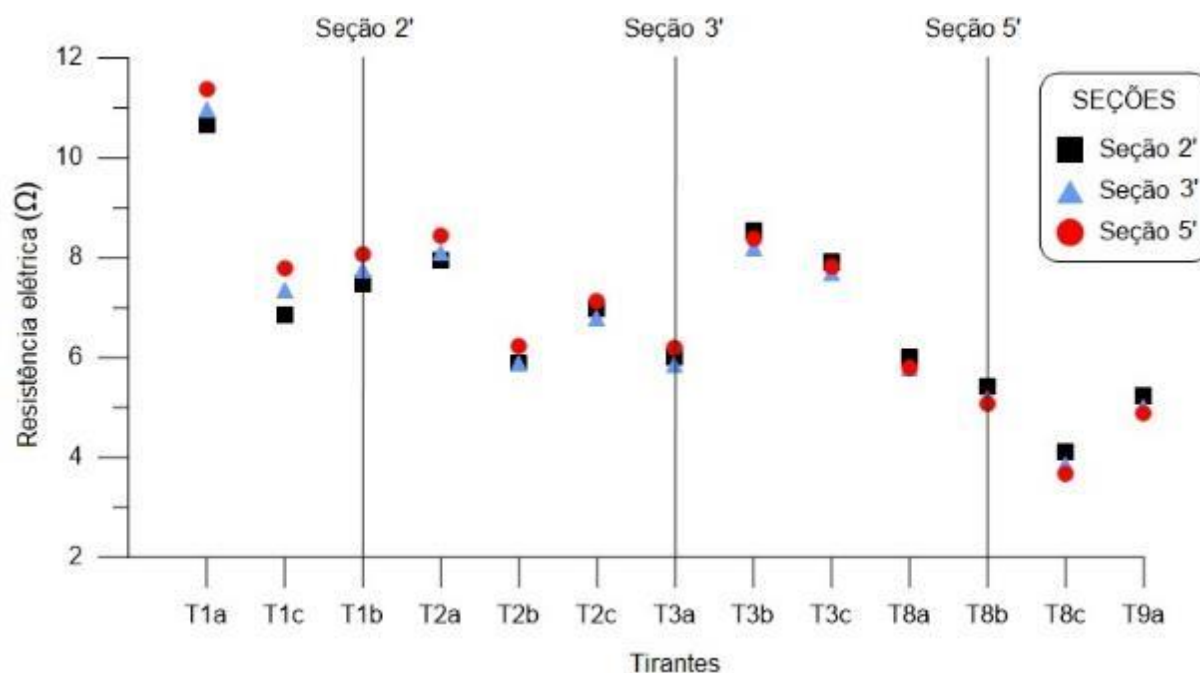


Figura 138 – Variação dos valores de resistência elétrica dos tirantes inseridos na linha superior

Buscando delimitar uma faixa de valores de resistência que seria esperada para cada elemento, independentemente de sua patologia, apresentam-se na Figura 139 todos os resultados obtidos. Verifica-se uma grande dispersão nos valores para 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 cordalha e de fio entre 3 Ω e 6 Ω .

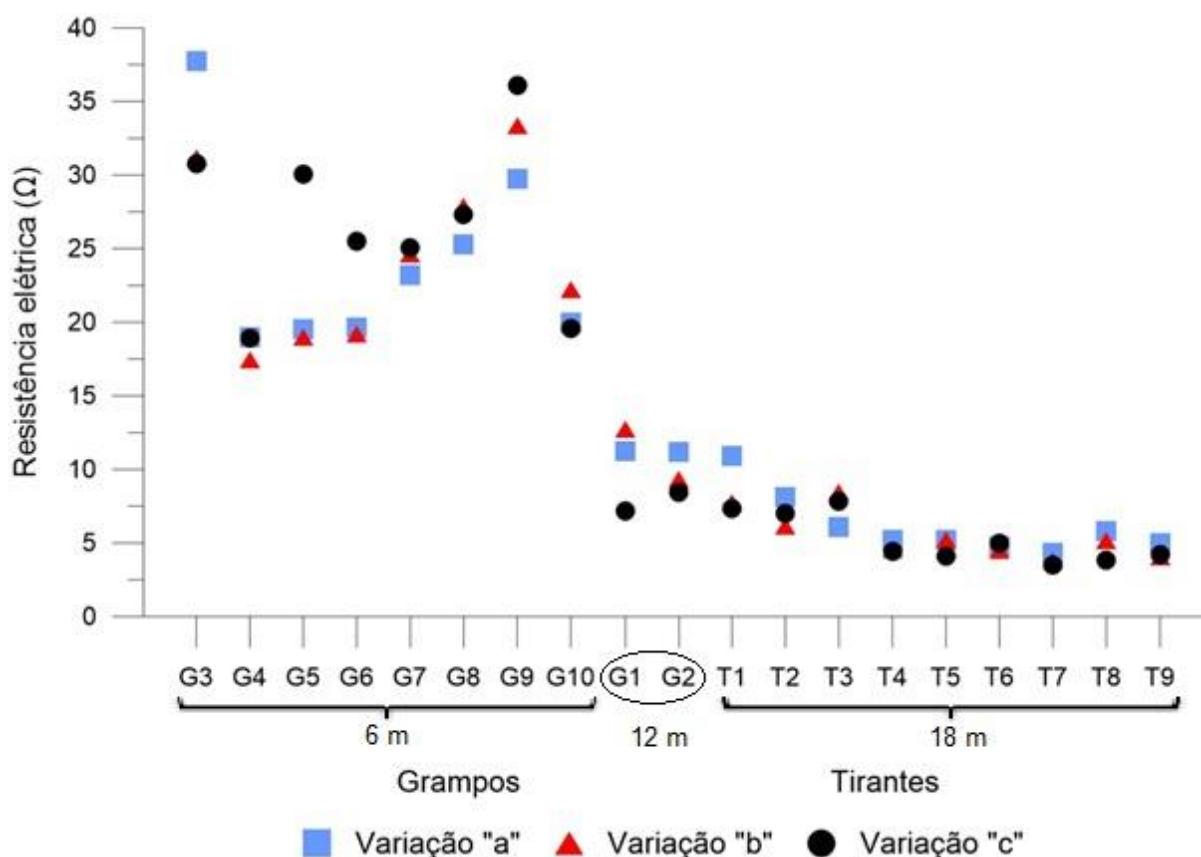


Figura 139 – Comparação de resistência elétrica entre grampos e tirantes

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 então preenchidos com calda de cimento (trecho ancorado).

Desse modo, recomenda-se a comparação entre resultados de elementos de uma mesma contenção e de 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 aos dos demais tirantes, mesmo com o comprimento de trecho livre e trecho ancorado igual. Porém, quando comparados entre si apresentaram valores próximos e coerentes.

8.2.3 Sonic Echo

Os resultados foram analisados em função da frequência e da rigidez dinâmica. Com os regimes vibratórios dominantes presentes no gráfico é possível determinar o comprimento total e livre do tirante, como apresentado na Figura 140.

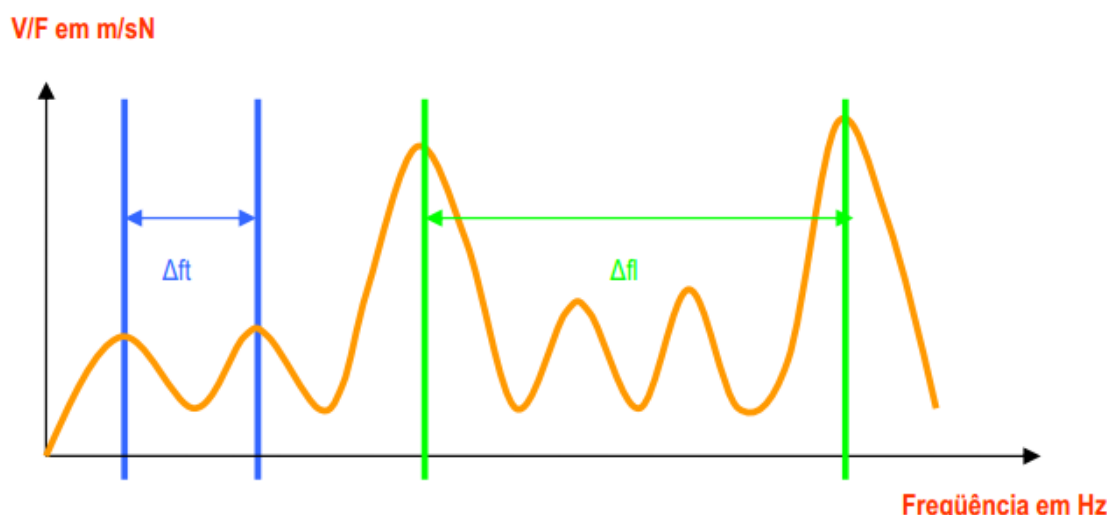


Figura 140 - Forma de retirada do Δf do gráfico

FONTE: Relatório ensaio sônico

O comprimento do elemento é calculado com base na Equação 2, onde V é a velocidade de propagação da onda sônica no componente e Δf é a diferença de frequência entre os picos ou cavidades sucessivas retiradas do gráfico.

$$L = \frac{V}{2\Delta f} \quad (2)$$

Dessa forma, para o cálculo do comprimento livre utiliza-se a diferença de frequência Δf_l (diferença de frequência em relação ao comprimento livre) e para o comprimento total utiliza-se o Δf_t (diferença de frequência em relação ao comprimento total). A velocidade de propagação empregada nos cálculos foi a mesma para ambas as partes do tirante, assim como para o grampo.

Para a execução do ensaio, o *software* utilizou as velocidades de 4500 e 5100 m/s, as quais no relatório com os resultados da interpretação foram recalculadas para 4000 e 4500 m/s pois, de acordo com o executor, estes seriam os valores padrão para um tirante com bulbo de ancoragem.

Em relação à rigidez dinâmica, o relatório com os resultados apresentou esta variável como sendo proporcional ao inverso da inclinação na origem da curva e dependente da inércia do sistema ensaiado e do meio ao redor. Na conjuntura do tirante, a rigidez dinâmica depende do tipo das suas características, da ancoragem, dos esforços aplicados e da estrutura geral do tirante. Uma rigidez correta significa uma correta ancoragem do tirante, ausência de corte e continuidade do comprimento do elemento, enquanto uma rigidez fraca identifica um provável corte ou perda de tensão na ancoragem.

8.2.3.1 Grampos

Nos grampos o procedimento de execução do ensaio consistiu na utilização de duas roscas e uma chapa de aço entre elas, de modo a criar um nível de tensão para realização do ensaio. Para tal, foi retirado o excesso de calda de cimento que estava presente nas barras devido o processo executivo e colocadas as roscas e a chapa com ajuda de chave inglesa. Diferentemente dos tirantes, o golpe foi gerado na cabeça da barra e não na chapa de aço, e o geofone foi instalado na chapa, como indicado na Figura 141. Foi utilizado o martelo de ponta de borracha, considerado de ponta flexível.



Figura 141 – Ensaios Sonic Echo nos grampos

Nos grampos, cada elemento foi representado por um gráfico e, em sua maioria, com 3 cursores os quais tenderam a ser simétricos e facilitarem a interpretação do resultado. Os resultados de Δf (diferença de frequência) foram obtidos pelos vales (Figura 142) ou pelos picos (Figura 143), não sendo possível identificar um padrão para tal escolha.



Figura 142 - Gráfico do elemento G10b

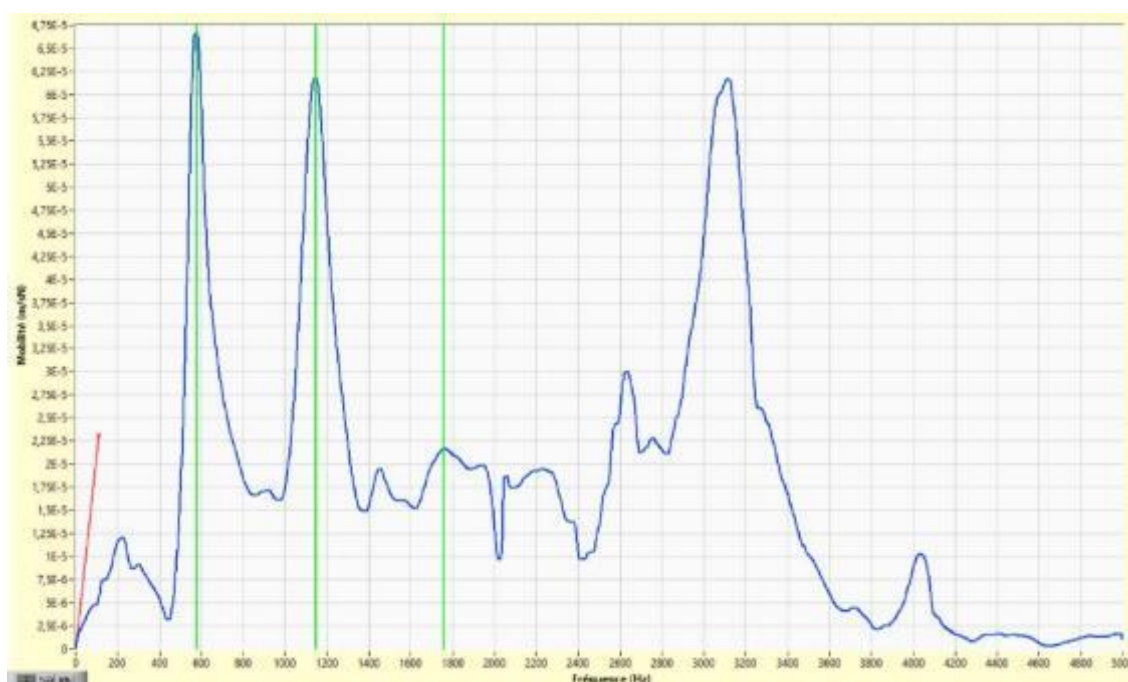


Figura 143 - Gráfico do elemento G10c

De acordo com o relatório apresentado pelo executor do ensaio, os grampos possuíam comprimentos totais compreendidos na faixa de 4,6 m a 13,8 m. A rigidez dinâmica medida foi considerada como sendo correta e apresentou uma homogeneidade nos resultados, a qual caracteriza que os elementos estariam íntegros. Ou seja, não foram identificados as falhas e variações dos elementos.

O erro percentual do comprimento do grampo apresentou dispersão considerável, sendo o menor valor igual a 3% e o maior de 114%. Além disso, não foi possível observar um padrão de resultados, pois elementos com o mesmo defeito simulado apresentaram diferença de erro de 98% como no caso do G10, como observado na Tabela 7.

Tabela 7 - Análise dos resultados comprimento dos grampos

Grupo	Descrição	Comprimento real (m)	Média entre as velocidades			Erro percentual		
			Variações			Variações		
			a	b	c	a	b	c
G1	Grampo 12 m sem reinjeção	12,0	9,2	6,0	10,2	-24%	-50%	-15%
G2	Grampo 12 m com reinjeção	12,0	13,1	8,8	6,7	9%	-27%	-44%
G3	Grampo 6 m sem reinjeção	6,0	11,6	11,4	12,9	93%	90%	114%
G4	Grampo 6 m com reinjeção	6,0	8,1	10,1	8,2	35%	68%	36%
G5	Variação do posicionamento da emenda (início)	6,0	10,6	5,4	6,3	76%	-10%	5%
G6	Grampo enterrado no final (1 m)	6,0	6,6	6,2	8,6	10%	3%	43%
G7	Falha no meio (10 cm)	6,0	6,3	7,0	7,0	4%	16%	17%
G8	Falha no meio (50 cm)	6,0	8,0	4,9	8,2	33%	-18%	36%
G9	Falha no meio (100 cm)	6,0	7,9	11,9	7,3	31%	98%	22%
G10	Furo maior que a barra (6,8 m)	6,0	12,9	8,5	4,9	114%	42%	-18%

Com relação à rigidez dinâmica, o relatório apresentou uma tabela com os valores dessa variável obtida para os grampos, sendo apresentado a média, o desvio-padrão e um intervalo de média mais desvio-padrão e média menos o desvio-padrão conforme apresentado na Tabela 8. Dessa forma, foi possível identificar os grampos encontrados fora desse intervalo. No entanto, a variação de rigidez não apontou nenhum elemento com falha.

Tabela 8 – Resultado de rigidez dinâmica para os grampos.

Grampo	Rigidez dinâmica	Média	Desvio padrão (DP)	Média + DP	Média - DP
G1a	3,65E+07				
G1a	3,15E+07				
G1b	4,14E+07				
G2c	3,22E+07				
G2a	5,05E+07				
G2b	3,25E+07				
G3c	1,88E+07				
G3b	1,87E+07				
G3c	2,81E+07				
G4a	4,12E+07				
G4b	3,90E+07				
G4c	2,75E+07				
G5a	2,55E+07				
G5b	2,97E+07				
G5c	4,91E+07	3,39E+07	9,44E+06	4,34E+07	2,45E+07
G6a	3,13E+07				
G6b	3,17E+07				
G6c	3,06E+07				
G7a	4,51E+07				
G7b	2,13E+07				
G7c	2,62E+07				
G8a	3,19E+07				
G8b	3,50E+07				
G8c	2,76E+07				
G9a	4,80E+07				
G9b	2,74E+07				
G9c	3,41E+07				
G10a	5,94E+07				
G10b	3,38E+07				
G10c	3,25E+07				

De modo complementar, solicitou-se uma segunda avaliação dos elementos ao executor dos ensaios tendo como informação adicional o comprimento real das barras presentes no campo

experimental. Com isso, o erro diminuiu para aproximadamente 12% para a média das velocidades dos comprimentos apresentados. Os valores de rigidez dinâmica não foram modificados, sendo que os grampos ainda foram considerados íntegros.

8.2.3.2 Tirantes

Nos tirantes de monobarra, cordoalha e fio, o geofone foi colocado na placa de aço e o golpe também foi gerado sobre a placa. Foram realizados alguns ensaios com o golpe na placa de reação de concreto apenas para avaliação de interferências. As variações executivas desse ensaio são apresentadas na Figura 144. Foi utilizado um tipo de martelo flexível.



Figura 144 – Variações do ensaio Sonic Echo nos tirantes: (a) Geofone da placa de aço; (b) Geofone na placa de reação de concreto.

Nos tirantes de fio os resultados foram inferiores dos demais, provavelmente por não estarem protendidos. Segundo o executor, é necessário haver um nível de tensão dos tirantes para obter sucesso com o procedimento, de modo que a ligação entre a placa de aço e as barras seja boa para propagação da onda mecânica. Em relação a esses elementos, foram apresentados dois gráficos para cada elemento, sendo que do primeiro, com maior Δf , retirou-se o comprimento livre (Figura 145) e do segundo, com menor Δf , obtinha-se o comprimento total (Figura 146).

A seguir são mostrados alguns exemplos de resultados gráficos reportados pela empresa que realizou os ensaios.

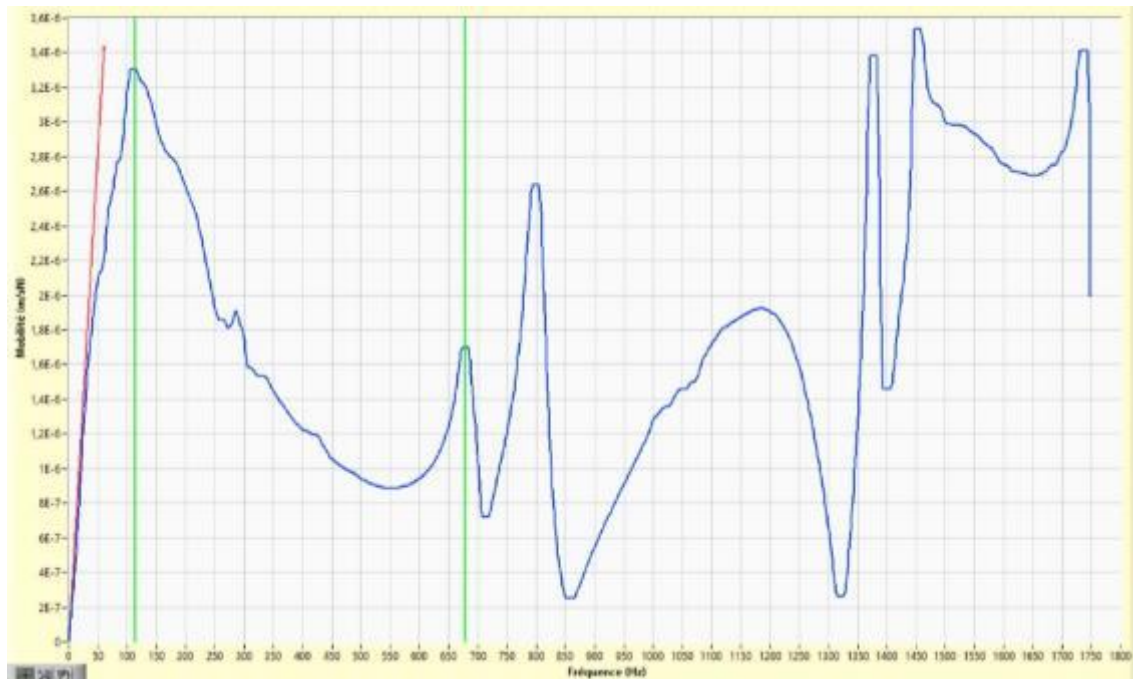


Figura 145 – Gráfico do comprimento livre do elemento T2c



Figura 146 - Gráfico do comprimento total do elemento T2c

Ressalta-se que o operador não tinha informação sobre o comprimento das barras em um primeiro momento, onde foram obtidas as seguintes conclusões: as monobarras possuíam comprimentos livres que variaram de 3,0 m a 5,1 m e comprimentos totais entre 10,8 m a 18,7 m. A rigidez medida foi correta e apresentou uma homogeneidade nos resultados, isso demonstrou que os tirantes estavam íntegros. As cordoalhas possuíam comprimentos livres compreendidos na faixa de 2,6 m a 4,3 m e comprimentos totais compreendidos de 12,0 m a 19,4 m. A rigidez dinâmica medida foi considerada correta e apresentou uma homogeneidade nos resultados, tal fato aponta a integridade dos elementos. Em relação aos fios, a rigidez medida foi considerada fraca, o que indica que não havia tensão no tirante, fato observado em campo pelo executor do ensaio e relatado à equipe que acompanhou a execução. Por este motivo, não foram determinados os comprimentos dos fios.

Com os resultados apresentados no relatório, formulou-se a Tabela 9 e a Tabela 10, as quais trazem o comprimento obtido através dos gráficos e dos cálculos, além do erro percentual calculado em relação ao comprimento real do projeto da contenção experimental. Observa-se que o erro percentual do comprimento do trecho livre encontrado foi em torno de - 70%. Já o comprimento total teve um erro de aproximadamente 15% (Tabela 10), pois os erros do

comprimento livre e o ancorado se compensaram, gerando um erro final menor. Assim, o comprimento total calculado ficou em torno de 15,3 m, onde o real é de 18 m.

Tabela 9 – Análise dos resultados do trecho livre do tirante

Tirante	Descrição	Média dos comprimentos do trecho livre					
		Comprimento livre (m)			Erro percentual		
		Varição a	Varição b	Varição c	Varição a	Varição b	Varição c
T1	Tirante Monobarra Íntegro (bainha individual)	4,85	4,70	3,35	-60%	-61%	-72%
T2	Tirante Monobarra Íntegro (bainha individual e coletiva)	3,50	3,90	4,80	-71%	-68%	-60%
T3	Tirante Monobarra com redução de seção próximo à cabeça	3,20	3,40	3,50	-73%	-72%	-71%
T4	Tirante cordoalha íntegro (bainha individual)	3,85	2,90	3,10	-68%	-76%	-74%
T5	Tirante cordoalha com falha no início do furo (50 cm)	3,80	3,20	3,95	-68%	-73%	-67%
T6	Tirante cordoalha com falha no meio do furo (50 cm com ar)	4,05	3,40	3,00	-66%	-72%	-75%
T7	Tirante cordoalha com cortes próximo à cabeça	3,30	3,40	2,75	-73%	-72%	-77%

Tabela 10 – Análise dos resultados comprimento total dos tirantes

Tirante	Descrição	Média dos comprimentos totais					
		Comprimento total (m)			Erro percentual		
		Variação a	Variação b	Variação c	Variação a	Variação b	Variação c
T1	Tirante Monobarra Íntegro (bainha individual)	13,80	11,50	12,00	23%	36%	33%
T2	Tirante Monobarra Íntegro (bainha individual e coletiva)	17,65	14,80	16,50	2%	18%	8%
T3	Tirante Monobarra com redução de seção próximo à cabeça	14,45	14,55	17,40	20%	19%	3%
T4	Tirante cordoalha íntegro (bainha individual)	14,85	15,25	14,75	18%	15%	18%
T5	Tirante cordoalha com falha no início do furo (50 cm)	17,53	14,70	16,73	3%	18%	7%
T6	Tirante cordoalha com falha no meio do furo (50 cm com ar)	15,93	14,35	16,38	12%	20%	9%
T7	Tirante cordoalha com cortes próximo à cabeça	15,90	16,08	17,68	12%	11%	2%

Assim como para os grampos, foi apresentada uma tabela para os tirantes de monobarra (Tabela 11) e cordoalha (Tabela 12) com os valores de rigidez dinâmica, a média, o desvio-padrão e um intervalo de média mais desvio-padrão e média menos o desvio-padrão. No entanto, como a variação de rigidez não foi associada a nenhum elemento com falha, tendo os tirantes sido relatados como íntegros.

Tabela 11 - Resultado de rigidez dinâmica para os tirantes tipo monobarra

Tirante tipo monobarra	Rigidez dinâmica (N/m)	Média (N/m)	Desvio padrão (DP) (N/m)	Média + DP (N/m)	Média – DP (N/m)
T1a	1,35E+08				
T1b	9,10E+07				
T1c	1,96E+08				
T2a	1,82E+08				
T2b	2,00E+08	1,45E+08	3,96E+07	1,85E+08	1,05E+08
T2c	1,00E+08				
T3a	1,36E+08				
T3b	1,40E+08				
T3c	1,25E+08				

Tabela 12 - Resultado de rigidez dinâmica para os tirantes tipo cordoalha

Tirante tipo cordoalha	Rigidez dinâmica (N/m)	Média (N/m)	Desvio padrão (DP) (N/m)	Média + DP (N/m)	Média – DP (N/m)
T4a	4,97E+07				
T4b	5,24E+07				
T4c	5,58E+07				
T5a	5,60E+07				
T5b	5,04E+07				
T5c	5,63E+07	5,79E+07	7,63E+06	6,55E+07	5,02E+07
T6a	6,92E+07				
T6b	6,24E+07				
T6c	5,10E+07				
T7a	7,46E+07				
T7b	5,91E+07				
T7c	5,75E+07				

Da maneira análoga aos grampos, uma segunda análise dos resultados foi solicitada à empresa contratada, para tal se forneceu o comprimento total e ancorado das barras presentes no campo experimental. Com isso, os comprimentos livres e totais obtidos se aproximaram dos valores reais e o erro diminuiu para um máximo de 16% ao considerar os resultados da média das velocidades utilizadas. Os valores de rigidez dinâmica foram mantidos, com os elementos ainda sendo considerados íntegros em sua totalidade.

8.3 Análise dos resultados

Com base nos resultados obtidos com o ensaio *Time Domain Reflectometry* 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. Desse modo, o ensaio identificou que com a pré-instalação do cabo coaxial na estrutura se torna possível estimar o comprimento das barras enterradas no solo de forma confiável, procedimento este que pode ser recomendado e adotado em novas estruturas de estabilização.

Para a realização dos ensaios TDR com medições no cabo coaxial e nas barras, foi necessário proceder-se algumas adaptações. Tanto em campo quanto em laboratório, foi utilizado um cabo coaxial com o fio interno adaptado com *plug* de rádio e conectado ao cabo coaxial pré-instalado na barra, e para o fio externo do cabo coaxial que fica em contato com a barra, foram utilizados alguns prendedores, como indica a Figura 147.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 147 – Adaptação do ensaio TDR: (a) Grampo; (b) Monobarra; (c) Cordoalha e (d) Fio

Os resultados de ensaios realizados com grampos mostraram que a técnica torna-se promissora para uma análise qualitativa de elementos de mesmo comprimento, ainda que a diferença no sinal obtido sem a utilização do cabo coaxial não seja tão acentuada como quando se dispôs-se do mesmo. A técnica mostrou-se limitada para identificação de procedimentos de reinjeção da calda de cimento e a presença de emendas ao longo das barras. Resultados promissores foram encontrados para os elementos cravados em furos de menor comprimento bem

como com falhas na calda de cimento de 10, 50 e 100 cm: apesar de não identificar de forma quantitativa ou ainda direta tais limitações, ao comparar os resultados dos ensaios realizados nesses elementos com o de barras íntegras foi possível identificar diferenças nas curvas obtidas.

Com relação aos ensaios realizados em tirantes, foi possível identificar de forma qualitativa o trecho livre e o trecho ancorado dos tirantes após calibração das velocidades de propagação em barras conhecidas, sendo ainda encontrados respostas diferentes ao variar o tipo de elemento de ancoragem (monobarra, cordoalha e fio). Cabe salientar, entretanto, que com os tirantes de fio apresentaram resultados muito divergentes entre os fios do mesmo elemento, não sendo possível, contudo, estabelecer valores médios de velocidade de propagação do pulso elétrico nesses elementos.

Ao se avaliar os resultados obtidos com os ensaios realizados sem a utilização do cabo coaxial (técnica *Reflectometric Impulse Measurement Technique*), diferenças na ordem de 30% com relação aos comprimentos reais das barras foram identificadas, além da ausência de sinais/respostas distintas para os elementos de ancoragem que possuíam anomalias.

Com base nos resultados obtidos com a técnica de resistência elétrica, conclui-se que o ensaio possui 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. No entanto, tais resultados foram obtidos para as condições encontradas no campo experimental, sendo necessário realizar ensaios de calibração para aplicá-lo em outras contenções.

Com relação ao procedimento executivo, sugere-se realizar leituras em seções paralelas e na direção das barras, além de intercalar entre os elementos testados. Variações de posicionamento também devem ser avaliadas. Para barras de mesmo comprimento, a ocorrência de falhas na calda de cimento ao longo do furo pode ser associada a um aumento dos valores de resistência elétrica. Cabe salientar que a comparação dos resultados deve se limitar a uma mesma obra/contenção, pois as condições da calda de cimento e do solo variam em função do local de instalação.

Os resultados obtidos com a técnica denominada “Sonic Echo” mostraram-se inconclusivos para a identificação de falhas e/ou variações nos elementos de ancoragem. A técnica

apresentou ainda uma dispersão alta para análise/definição do comprimento dos grampos com erros acima de 100%. Na análise realizada para os tirantes, resultados um pouco mais promissores foram observados para a definição do comprimento total onde o erro encontrado em relação ao comprimento real foi de aproximadamente 15%. Assim como descrito para os grampos, o uso dessa ferramenta mostrou-se pouco eficiente para identificação de falhas/anomalias nos tirantes.

9 CALIBRAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM BASE NOS ESTUDOS EXPERIMENTAIS

9.1 Introdução

Nesta etapa, diversos ensaios com objetivo de calibrar as metodologias estudadas e apresentadas no item 8 foram realizados. Cabe salientar que foram avaliados/testados os métodos *Time Domain Reflectometry* e da Resistência Elétrica, cujos resultados mostraram-se com maior potencial de aplicação conforme descrito nas etapas precedentes deste relatório.

9.2 Resultados

9.2.1 *Time Domain Reflectometry*

Como parte do escopo desenvolvido para esta etapa, os resultados obtidos com o ensaio TDR foram calibrados de modo a obter a velocidade de propagação do pulso elétrico em diferentes meios. Os pontos de início e fim das curvas foram obtidos através de planilhas eletrônicas com o método das tangentes.

9.2.1.1 Grampos

Em complemento aos ensaios executados em campo, foram realizados testes em laboratório 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 encontrados são apresentados na Figura 148, incluindo a curva do curto circuito, que indica o início da leitura (7,4 ns).

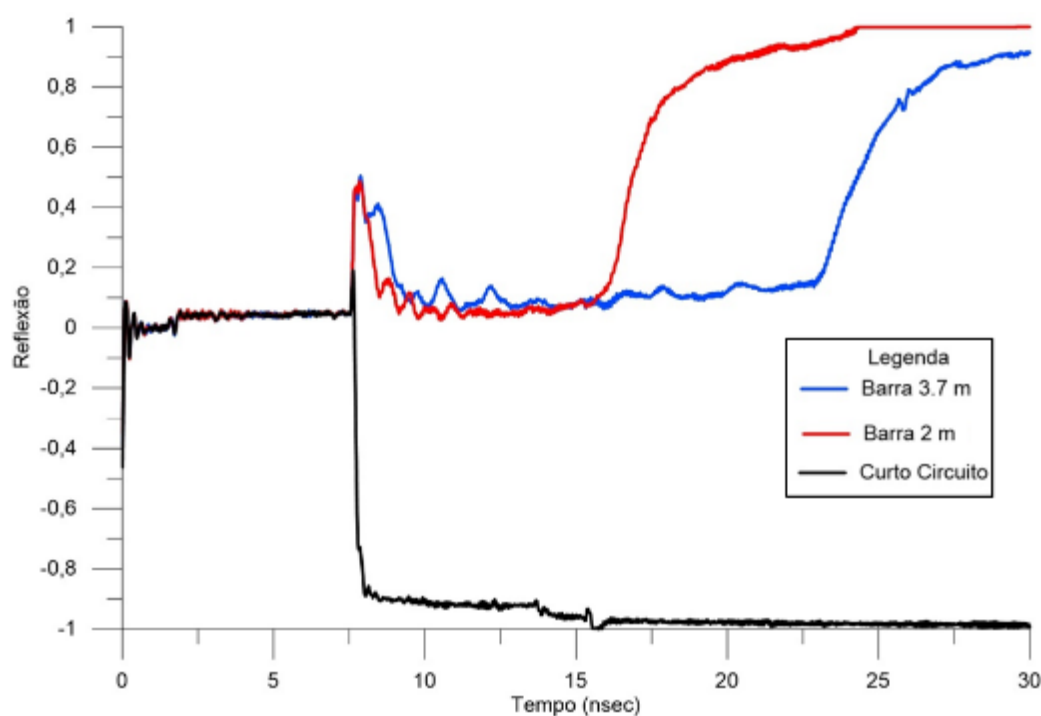


Figura 148 – Ensaios TDR das barras de aço em laboratório

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 13, onde é possível observar 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.

Tabela 13 – Velocidade de propagação da barra de aço em contato com o ar

Medição	Tempo		Comprimento (m)	Velocidade (m/s)	V/Vvácio
	Inicial (ns)	Final (ns)			
Barra 2 m	7,4	15,9	2,0	2,42E+08	0,805
Barra 3,7 m	7,4	23,1	3,7	2,39E+08	0,796

Tal velocidade 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 (em torno de 20 cm). Com base nos gráficos apresentados no item 8.1.1 e considerando os trechos com vazios e aqueles em que os grampos estavam 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. Tal velocidade foi calculada com base na velocidade de propagação do pulso no ar (obtida em laboratório), no comprimento do trecho com ar (L ar) e no trecho envolto por calda de cimento (L calda). Os resultados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Dados do TDR nos grampos

Grupo	L ar (m)	L calda (m)	Tempo total (ns)	V calda (m/s)	Vcalda/Vvácuo	
G1a	0,18	11,82	137,95	8,62E+07	0,287	
G1b	0,21	11,80	137,25	8,65E+07	0,288	0,288
G1c	0,19	11,81	138,15	8,60E+07	0,287	
G2a	0,24	11,76	138,25	8,57E+07	0,286	
G2b	0,27	11,73	143,65	8,23E+07	0,275	0,282
G2c	0,24	11,77	138,45	8,56E+07	0,285	
G3a	0,24	5,76	62,95	9,30E+07	0,310	
G3b	0,27	5,73	65,45	8,91E+07	0,297	0,303
G3c	0,29	5,72	64,65	9,01E+07	0,300	
G4a	0,25	5,75	68,85	8,48E+07	0,283	
G4b	0,27	5,73	67,55	8,63E+07	0,288	0,292
G4c	0,22	5,78	63,85	9,18E+07	0,306	
G5a	0,27	5,74	66,75	8,74E+07	0,291	
G5b	0,32	5,68	69,85	8,29E+07	0,277	0,287
G5c	0,25	5,75	66,75	8,75E+07	0,292	
G6a	0,21	5,79	63,55	9,24E+07	0,308	
G6b	0,26	5,75	64,25	9,09E+07	0,303	0,307
G6c	0,22	5,78	63,25	9,27E+07	0,309	
G7a	0,32	5,68	71,65	8,08E+07	0,269	
G7b	0,35	5,65	72,15	7,99E+07	0,267	0,268
G7c	0,34	5,66	71,55	8,07E+07	0,269	
G8a	0,74	5,26	70,75	7,77E+07	0,259	
G8b	0,81	5,20	64,45	8,50E+07	0,284	0,272
G8c	0,82	5,18	66,41	8,22E+07	0,274	
G9a	1,36	4,64	67,25	7,53E+07	0,251	
G9b	1,27	4,73	67,05	7,66E+07	0,255	0,258
G9c	1,24	4,77	64,55	8,02E+07	0,268	
G10a	0,20	5,80	67,55	8,69E+07	0,290	
G10b	0,26	5,74	68,25	8,55E+07	0,285	0,283
G10c	0,26	5,74	70,85	8,23E+07	0,274	

9.2.1.2 Tirantes

Para os tirantes, fez-se necessário calibrar uma velocidade no trecho livre e outra no trecho ancorado, uma vez que os gráficos apresentaram diferentes comportamentos em tais trechos. Para tal, o cálculo foi separado em duas partes e as velocidades no foram calculadas através de três tempos obtidos graficamente. O T1 indica o início do pulso, o T2 a passagem do trecho livre para o trecho ancorado, e o T3 é o tempo da reflexão final, todos obtidos pelo método das tangentes. Desse modo, a velocidade total representa a soma da velocidade no trecho livre (V1) e a velocidade no trecho ancorado (V2). Os valores obtidos são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Dados de TDR nos tirantes

Barra	T1 (ns)	T2 (ns)	T3 (ns)	V1 (m/s)	V1/Vvácuo	V2 (m/s)	V2/Vvácuo
T1a	5,25	100	182	1,27E+08	0,422	7,32E+07	0,244
T1b	5,25	98	184	1,29E+08	0,431	6,98E+07	0,233
T1c	5,25	98	187	1,29E+08	0,431	6,74E+07	0,225
T2a	5,25	99	185	1,28E+08	0,427	6,98E+07	0,233
T2b	5,25	102	184	1,24E+08	0,413	7,32E+07	0,244
T2c	5,25	105	188	1,2E+08	0,401	7,23E+07	0,241
T3a	5,25	106	197	1,19E+08	0,397	6,59E+07	0,220
T3b	5,25	104	195	1,22E+08	0,405	6,59E+07	0,220
T3c	5,25	106	197	1,19E+08	0,397	6,59E+07	0,220
T4a	5,25	112	228	1,12E+08	0,375	5,17E+07	0,172
T4b	5,25	110	230	1,34E+08	0,446	4,44E+07	0,148
T4c	5,25	114	219	1,01E+08	0,437	6,32E+07	0,211
T5a	5,25	125	225	1E+08	0,434	6,00E+07	0,200
T5b	5,25	112	228	1,12E+08	0,375	5,17E+07	0,172
T5c	5,25	95	231	1,34E+08	0,446	4,41E+07	0,147
T6a	5,25	95	239	1,34E+08	0,446	4,17E+07	0,139
T6b	5,25	98	221	1,29E+08	0,431	4,88E+07	0,163
T6c	5,25	95	211	1,34E+08	0,446	5,17E+07	0,172
T7a	5,25	95	213	1,34E+08	0,446	5,08E+07	0,169
T7b	5,25	95	214	1,34E+08	0,446	5,04E+07	0,168
T7c	5,25	95	216	1,34E+08	0,446	4,96E+07	0,165

9.2.2 Resistência elétrica

A calibração do método da resistência elétrica foi realizada com a variação do posicionamento dos eletrodos, de modo a entender como e se tal variação poderia refletir nos resultados.

9.2.2.1 Grampos

Cheung e Lo (2005) propõem 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. De modo a validar tais distâncias, foram realizados ensaios em que se variaram as 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).

Lembrando que 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 16 e na Figura 149.

Tabela 16 – Valores de 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

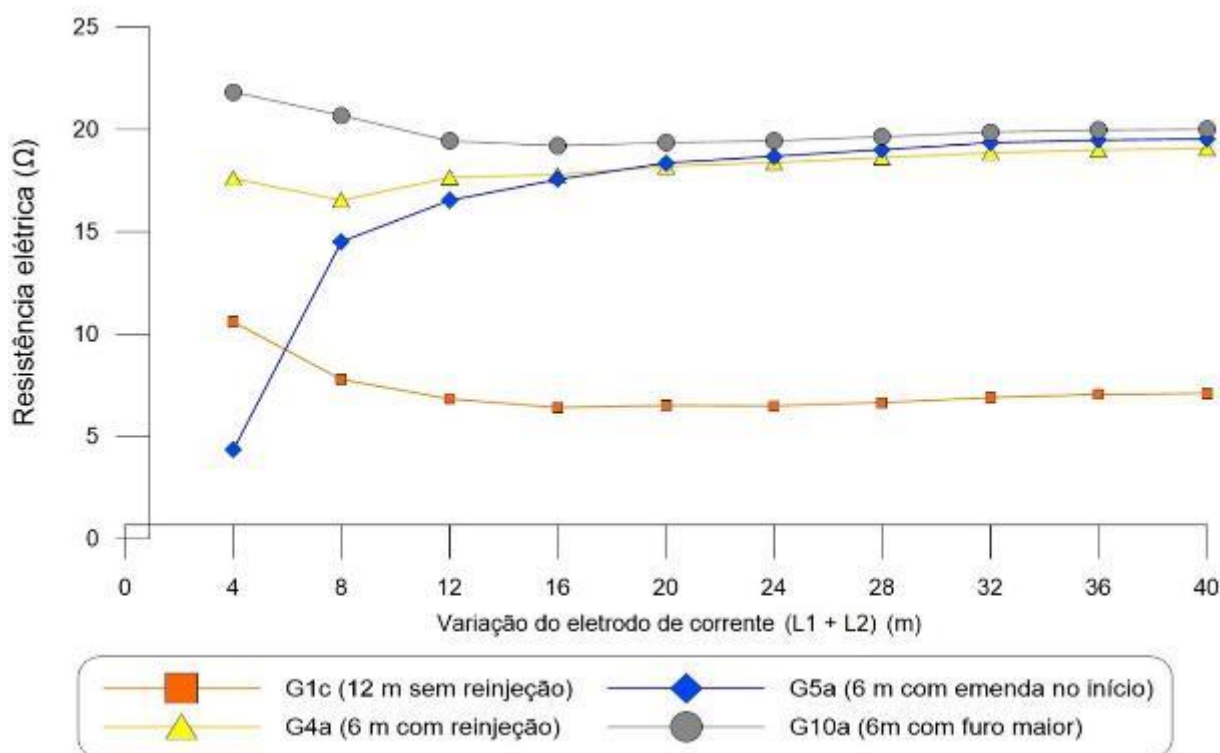


Figura 149 – Resistência elétrica em grampos com a variação do posicionamento dos eletrodos

Verifica-se que o elemento G1c, que corresponde ao grampo com 12 m, apresentou valor inferior 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), sendo esta, contudo, definida como a distância mínima para execução dos ensaios no campo experimental e demais estruturas avaliadas. Ressalta-se ainda que o elemento G5a apresentou uma curva diferente das demais o que pode ser associado a proximidade entre o eletrodo e o grampo.

Ensaio em todos os grampos foram realizados com a variação lateral dos eletrodos de corrente e potencial 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 150). Os valores de resistência elétrica obtidos nos grampos para cada seção são apresentados na Tabela 17.

Com base nesses resultados foi possível concluir que a variação lateral dos eletrodos resultou em valores próximos e sem tendência de variação. Na Tabela 18, uma análise estatística

onde são apresentados os valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação para cada elemento é apresentada, permitindo uma análise mais detalhada desses resultados. O coeficiente de variação (CV) é uma medida padronizada de dispersão de uma 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.

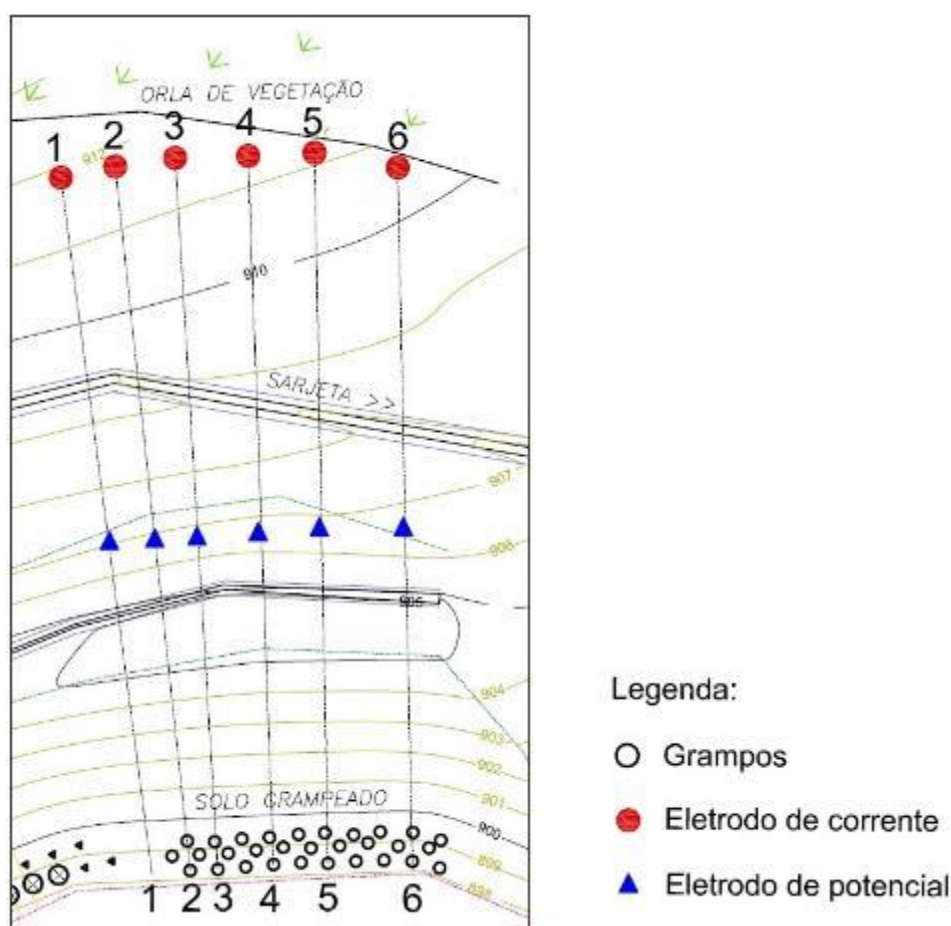


Figura 150 – Seções de medição da resistência elétrica no solo grampeado

Tabela 17 – 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

Tabela 18 – Análise estatística dos dados de resistência elétrica nos grampos

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

Com base nos dados apresentados na Tabela 18, observa-se que o coeficiente de variação obtido foi baixo, caracterizando valores foram homogêneos e de alta precisão segundo a

classificação previamente apresentada. 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 à 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 fazem-se necessárias.

Com base nos ensaios de resistência elétrica realizados no campo experimental foi possível concluir que com exceção dos elementos G4, G7 e G8, cujo coeficiente de variação foi inferior à 5%, a diferença entre os três elementos com a mesma configuração se apresentou alta. Tal comportamento pode ser associado à grande variabilidade que o processo executivo gera nos elementos, como por exemplo devido diferenças na quantidade de calda de cimento injetada em cada furo. Uma análise estatística desses resultados foi realizada e é apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 – Comparação da resistência elétrica entre elementos da mesma variação

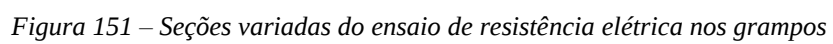
Grupo	Descrição	Média (Ω)	Desvio Padrão (Ω)	Variação máxima (Ω)	Coefficiente de Variação (Ω)
G1	Grupo 12 m sem reinjeção	10,38	2,35	5,74	22,63%
G2	Grupo 12 m com reinjeção	9,66	1,16	2,99	12,05%
G3	Grupo 6 m sem reinjeção	33,15	3,24	7,70	9,78%
G4	Grupo 6 m com reinjeção	18,47	0,71	1,68	3,87%
G5	Grupo 6 m com emenda	22,85	5,11	11,34	22,36%
G6	Grupo 6m enterrado no final (1 m)	21,45	2,88	6,78	13,45%
G7	Grupo 6 m com falha no meio (10 cm)	24,30	0,85	3,06	3,52%
G8	Grupo 6 m com falha no meio (50 cm)	26,80	1,12	3,06	4,17%
G9	Grupo 6 m com falha no meio (100 cm)	33,07	2,62	7,03	7,91%
G10	Grupo 6 m com furo maior (6,8 m)	20,57	1,16	2,89	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. É possível perceber que os grampos de 12 m apresentaram resultados menores de resistência elétrica. Tal comportamento é coerente com o esperado pois, quanto maior o comprimento da barra, maior a área de passagem de corrente elétrica e menor a resistência elétrica.

Em relação aos grampos de 6 m, cujos resultados permaneceram entre 18,47 Ω e 33,15 Ω , conclui-se que o fator com maior influência no ensaio foi o preenchimento com a calda de cimento e não o comprimento da barra. Valores altos podem ser justificados pela menor quantidade de calda de cimento, como por exemplo no elemento G3 que, diferente dos demais, foi executado sem reinjeção.

Os elementos com anomalias apresentaram valores de resistência elétrica crescente com o aumento do tamanho da falha. O elemento G7 apresenta um vazio de 10 cm com ar, e seu valor foi um pouco maior que o grampo íntegro de 6 m (G4). 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. Nas barras de 12 m essa diferença não foi significativa.

Para melhor entendimento desta técnica, também foram realizadas medições em seções com diferentes direções, não somente na direção alinhada com os elementos. Tal avaliação foi realizada pois em algumas estruturas já existentes pode não haver espaço suficiente na parte superior do talude ou contenção para executar o ensaio. As seções avaliadas são apresentadas na Figura 151. As medições foram realizadas nos elementos G3a (grampo 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). Adotou-se uma distância $L1 + L2$ de 36 m pois após 20 m os resultados foram praticamente constantes para o campo experimental em estudo.



211

Tabela 20 – Resistência elétrica em diferentes seções

<i>Seção</i>	<i>G3a (Ω)</i>	<i>G9b (Ω)</i>	<i>G9c (Ω)</i>
<i>A</i>	37,1	33,0	35,3
<i>B</i>	37,1	32,9	35,5
<i>C</i>	37,1	32,9	35,6
<i>D</i>	37,4	33,1	35,8
<i>E</i>	37,2	32,9	35,6
<i>F</i>	37,2	33,0	35,7
<i>G</i>	37,8	33,6	36,3
<i>H</i>	37,0	33,0	35,3
<i>Média</i>	37,2	33,1	35,6

Com base nesses resultados, observa-se que ensaios em seções com diferentes sentidos também podem fornecer resultados confiáveis para o campo experimental em estudo. A seção G se mostrou com maior variação quando comparada às demais, mas ainda inferior a 2% da média.

Devido à impossibilidade de se locar os eletrodos a montante do talude, foram obtidos os valores de resistência elétrica com a variação do posicionamento dos eletrodos de corrente e de potencial na seção E. Os dados são apresentados na Tabela 21. Destaca-se que a direção da seção foi perpendicular aos elementos e os eletrodos de corrente e potencial foram instalados entre os demais grampos e tirantes.

Tabela 21 – Valores de resistência elétrica com a variação dos eletrodos na seção E

$L1$ (m)	$L1+L2$ (m)	$G3a$ (Ω)	$G9b$ (Ω)	$G9c$ (Ω)
1	2	35,4	48,7	48,5
2	4	38,3	46,2	38,8
3	6	35,1	31,0	34,5
4	8	35,6	31,7	34,5
5	10	36,3	31,8	35,0
6	12	36,4	32,0	35,0
7	14	36,6	32,4	35,1
8	16	36,6	32,3	35,0
9	18	36,5	32,3	35,0
10	20	36,7	32,5	35,2
12	24	36,8	32,6	35,3
14	28	36,9	32,7	35,4
16	32	37,0	32,8	35,5
18	36	37,2	33,0	35,8

Os resultados apresentados na Figura 152 mostraram-se bem próximos a partir de 10 m de distância do eletrodo de corrente com os grampos ($L1+L2$). Os valores foram divergentes dos obtidos com a disposição dos eletrodos na mesma direção dos grampos, onde o valor de estabilização da resistência elétrica encontrado foi de 20 m, como indicado anteriormente. Tal comportamento pode ser associado à proximidade dos eletrodos com os elementos, uma vez que quando foram testados na mesma direção apresentaram-se mais próximos. Assim, nota-se ainda que para a contenção experimental, elementos próximos não influenciaram nos resultados de resistência elétrica.

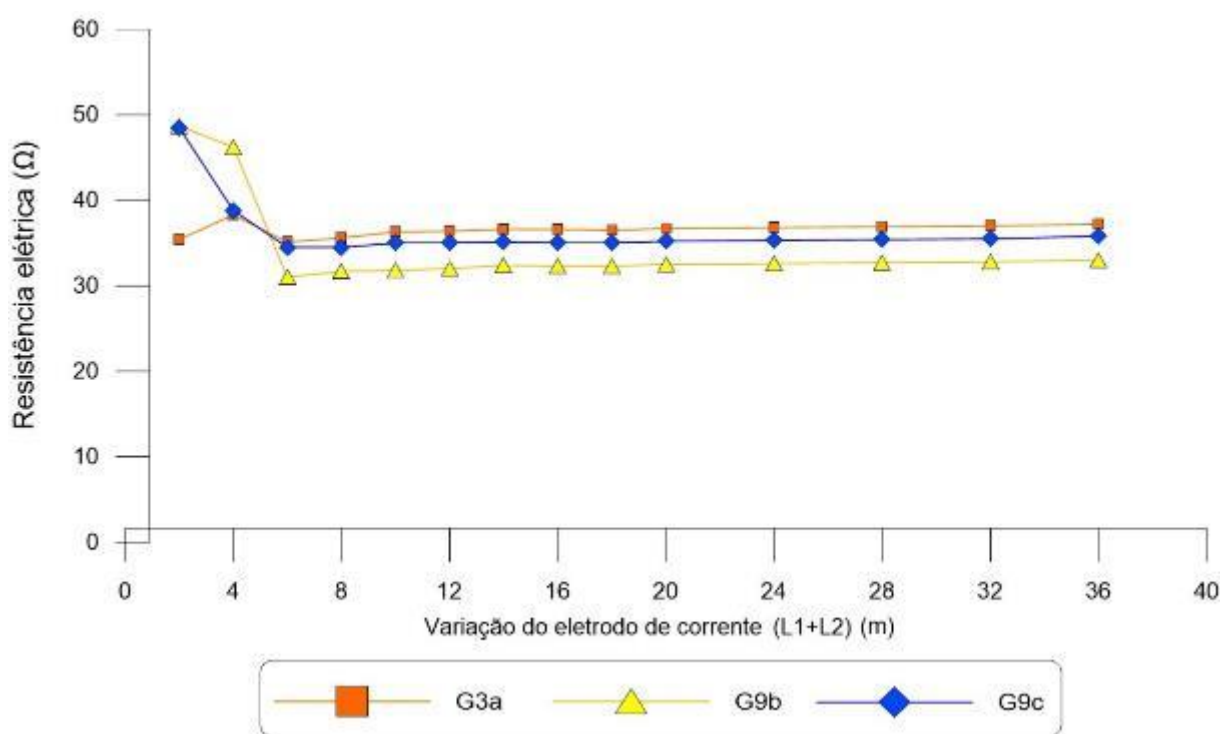


Figura 152 – Variação dos eletrodos na seção E

9.2.2.2 Tirantes

Assim como para o solo grampeado, os tirantes foram avaliados quanto à variação do posicionamento dos eletrodos de 2 m em 2 m (Tabela 22). Valores de resistência elétrica de tirantes de monobarra (T3b e T3c), cordoalha (T5c) e fio (T8a) foram obtidos, com os eletrodos de potencial e corrente na mesma direção dos elementos.

Tabela 22 – Valores de 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 153 onde verifica-se que assim como observado para os grampos, a resistência elétrica aproximou-se de um valor constante após 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. A resistência elétrica reduziu com o aumento do comprimento da barra e com o aumento do diâmetro da calda de cimento. Isso ocorreu porque a calda de cimento ao redor da barra produz o efeito de uma barra de grande seção transversal, que é inversamente proporcional à resistência elétrica da barra (Mamede Filho, 2007). Desse modo, os valores inferiores obtidos pelos tirantes de cordoalha e fio, quando comparados com as monobarras, estão associados possivelmente ao fato destas barras apresentarem maior diâmetro de calda de cimento ao seu redor, devido ao seu diâmetro menor.

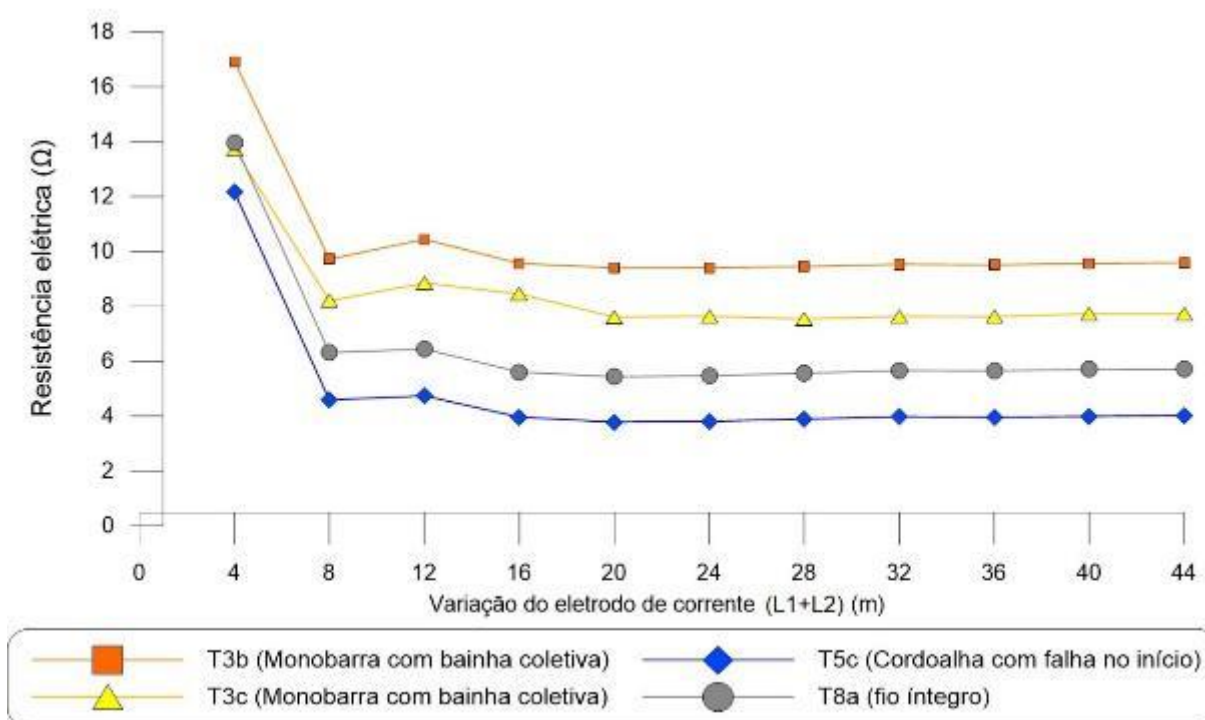


Figura 153 – Variação da resistência elétrica dos tirantes

Observa-se ainda que 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 influenciaram nos resultados de forma individual (Figura 154a). Para tal, foi avaliado o tirante de cordoalha T7c, que apresenta cortes nas cordoalhas, sendo assim possível realizar uma análise comparativa com a leitura na cordoalha inteira (Figura 154b).

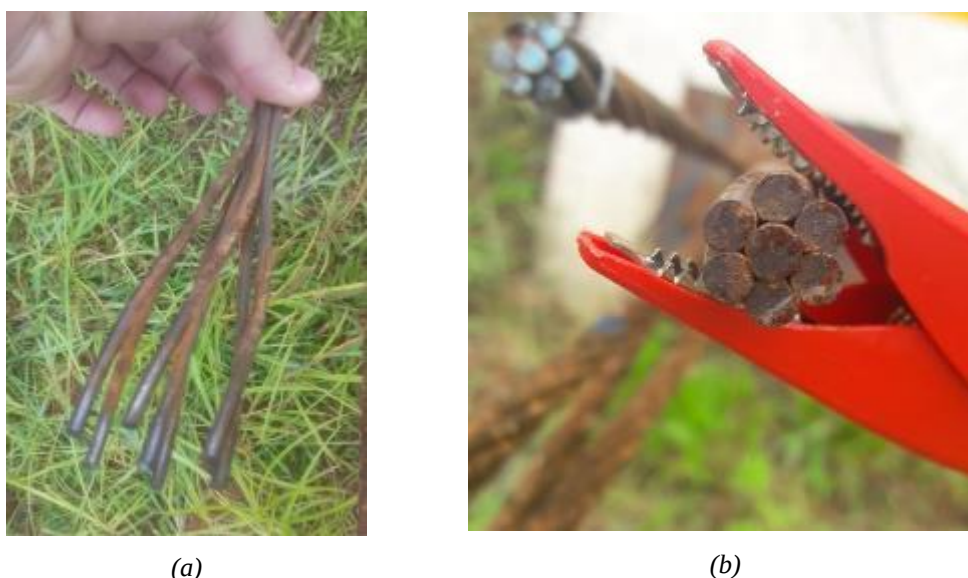


Figura 154 – Ensaio de resistência elétrica nos tirantes de cordoalha: (a) Fios da cordoalha individual e (b) Fios da cordoalha inteira

Os dados de resistência elétrica obtidos em cada um dos 7 fios que compõem as 4 cordoalhas do tirante T7c podem ser analisados na Tabela 23. Ressalta-se que 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.

Tabela 23 – 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 24).

Tabela 24 – Comparação entre a média dos fios e da cordoalha do elemento T7c

<i>Cordoalha do T7c</i>	<i>Resistência elétrica (Ω)</i>	<i>Média dos fios (Ω)</i>	<i>Relação entre resultados</i>
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%
<i>Média</i>	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. Logo, 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 155). Em algumas seções não foi possível medir todos os elementos por limitações do comprimento dos cabos que compõem o equipamento de resistência elétrica.

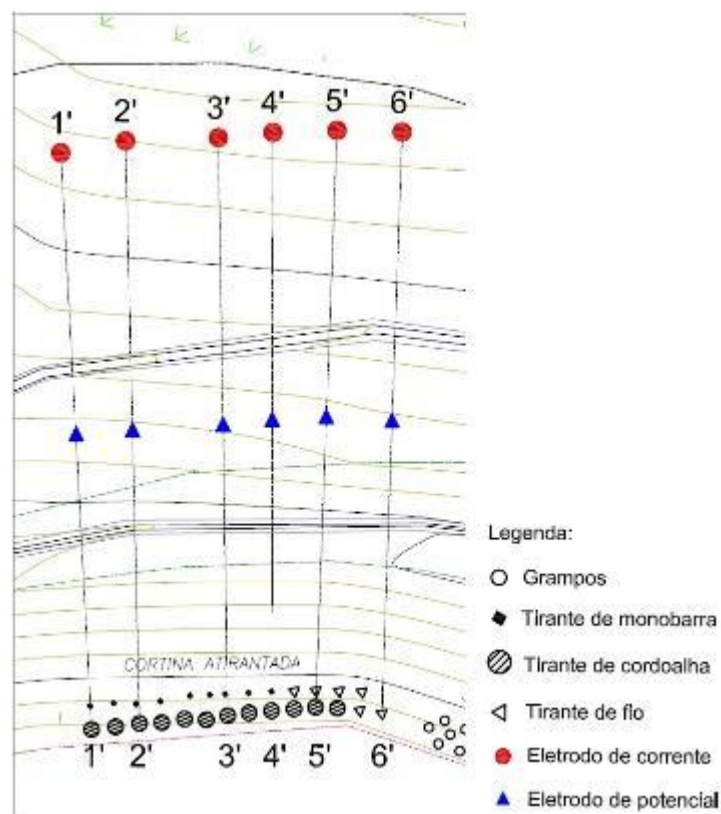


Figura 155 – Seções de resistência elétrica dos tirantes

Os resultados obtidos para as diferentes seções paralelas são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Resultados de resistência elétrica dos tirantes para diferentes seções

Elemento	Tirante	Seção 1'	Seção 2'	Seção 3'	Seção 4'	Seção 5'	Seção 6'
T1a	Monobarra	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		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	Cordoalha	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		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	Fio	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		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 tratarem de valores menores de resistência elétrica, tais diferenças foram mais significativas. 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 26.

Tabela 26 – Análise estatística dos valores de resistência elétrica nos tirantes

Elemento	Variação	Média (Ω)	Variação máxima (Ω)	Desvio padrão (Ω)	Coefficiente de variação
T1a	Tirante monobarra com bainha individual	10,89	0,83	0,37	3,41%
T1b		7,75	0,64	0,30	3,85%
T1c		7,33	0,95	0,47	6,41%
T2a	Tirante monobarra com bainha coletiva	8,11	0,66	0,27	3,31%
T2b		6,15	0,76	0,29	4,70%
T2c		7,00	0,43	0,17	2,40%
T3a	Tirante monobarra com redução de seção	6,07	0,56	0,21	3,47%
T3b		8,42	0,55	0,19	2,31%
T3c		7,84	0,25	0,09	1,14%
T4a	Tirante cordoalha com bainha individual	5,20	0,71	0,33	6,41%
T4b		4,54	0,57	0,26	5,73%
T4c		4,42	0,63	0,25	5,71%
T5a	Tirante cordoalha com falha no início	5,21	0,22	0,09	1,67%
T5b		5,22	0,49	0,18	3,52%
T5c		4,11	0,19	0,08	1,90%
T6a	Tirante cordoalha com falha no meio	4,78	0,46	0,20	4,14%
T6b		4,49	0,50	0,19	4,33%
T6c		4,97	0,30	0,11	2,20%
T7a	Tirante cordoalha com cortes	4,33	0,20	0,10	2,21%
T7b		3,76	0,44	0,17	4,39%
T7c		3,52	0,45	0,16	4,43%
T8a	Tirante de fio com bainha individual	5,82	0,39	0,15	2,49%
T8b		5,14	0,62	0,22	4,27%
T8c		3,84	0,63	0,22	5,68%
T9a	Tirante de fio com falha no início	4,96	0,87	0,29	5,78%
T9b		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 encontrados nas variações com os grampos, podendo tal comportamento ser atribuído à heterogeneidade do solo. No entanto, como a média dos valores de resistência elétrica é menor que dos grampos, o coeficiente de variação tornou-se maior. Salienta-se, contudo que valores de

coeficiente de variação abaixo de 10% são considerados homogêneos e de alta precisão (Pimentel Gomes, 2000).

9.3 Análise de resultados

Com base nos resultados de ensaios obtidos para a aplicação da técnica *Time Domain Reflectometry* em grampos apresentados no item 9.2.1.1, observa-se que a média da velocidade na calda de cimento obtida para as barras de 12 m íntegras (G1 e G2) representou valores inferiores quando comparada com as barras íntegras de 6 m (G3 e G4), o que pode indicar que o aumento do comprimento das barras faz com que o pulso se propague mais lentamente por perdas ao longo do comprimento. Entre as barras com e sem reinjeção de 12 m e 6 m, a velocidade encontrada nos grampos sem reinjeção (G1 e G3) foi um pouco maior quando relacionada com os grampos com reinjeção (G2 e G4). Tal fato provavelmente ocorre devido a pequenas falhas na calda de cimento com ar nos grampos onde não houve reinjeção, e isso faz com que a velocidade na calda de cimento calculada seja maior.

Com relação aos resultados de ensaios realizados com tirantes (item 9.2.1.2) foi possível notar que o tempo final (T3) é um pouco inferior nos tirantes de monobarra quando comparados com os tirantes de cordoalha. Como a velocidade V1 obtida no trecho livre foi próxima entre tais tirantes, conclui-se que nas monobarras a velocidade no trecho ancorado foi maior que nas cordoalhas, caracterizada por um retorno mais rápido do pulso elétrico. Além disso, a velocidade no trecho livre dos tirantes foi inferior à velocidade calibrada com a barra no ar em laboratório ($V/V_{\text{vácuo}}=0,8$), o que indica que a bainha individual (tubo de PVC) também influenciou na velocidade. Para o trecho ancorado, a velocidade também foi inferior à média obtida nos grampos, em que a condição é semelhante. Tal fato pode ser explicado pela atenuação do pulso ao longo dos 12 m de trecho livre, e pelas diferenças construtivas, como reinjeção localizada e protensão.

10 ANÁLISE DE OUTRAS ÁREAS COM ESTRUTURAS DE ESTABILIZAÇÃO IMPLANTADAS

10.1 Introdução

Como parte do escopo previsto para o desenvolvimento do presente projeto, fez-se um levantamento das contenções existentes na BR-376/PR e BR-101/SC sob concessão da Autopista Litoral Sul. Buscou-se mapear estruturas que permitissem a execução dos ensaios não destrutivos, por meio dos seguintes critérios:

- Face da contenção: em concreto projetado, solo ou rocha;
- Área disponível para realização dos ensaios;
- Local de parada próximo;
- Espaço livre na parte superior ou lateral da encosta;
- Existência de projeto.

Com base nessas premissas foram definidos dezesseis locais para vistoria de campo (Figura 156 e Tabela 27).



Figura 156 – Contenções visitadas

FONTE: Google Earth, 2018

Tabela 27 – Trajeto das contenções visitadas

<i>Localização</i>	<i>Tipo de contenção</i>
<i>BR376 - km 654+730 m - Pista Sul</i>	<i>Cortina atirantada</i>
<i>BR376 - km 658+400 m - Pista Sul</i>	<i>Solo grampeado</i>
<i>BR376 - km 659+280 m - Pista Sul</i>	<i>Cortina atirantada</i>
<i>BR376 - km 660+380 m - Pista Sul</i>	<i>Solo grampeado</i>
<i>BR376 - km 660+430 m - Pista Sul</i>	<i>Solo grampeado</i>
<i>BR376 - km 672+100 m - Pista Sul</i>	<i>Solo grampeado</i>
<i>BR376 - km 672+360 m - Pista Sul</i>	<i>Cortina atirantada</i>
<i>BR101 - km 13+100 m - Pista Norte</i>	<i>Cortina atirantada</i>
<i>BR101 - km 12+350 m - Pista Norte</i>	<i>Cortina atirantada</i>
<i>BR376 - km 667+230 m - Pista Norte</i>	<i>Cortina atirantada</i>
<i>BR376 - km 667+160 m - Pista Norte</i>	<i>Solo grampeado</i>
<i>BR376 - km 667+120 m - Pista Norte</i>	<i>Solo grampeado</i>
<i>BR376 - km 665+290 m - Pista Norte</i>	<i>Cortina atirantada</i>
<i>BR376 - km 659+270 m - Pista Norte</i>	<i>Solo grampeado</i>
<i>BR376 - km 657+200 m - Pista Norte</i>	<i>Solo grampeado</i>
<i>BR376 - km 650+940 m - Pista Norte</i>	<i>Cortina atirantada</i>

Dentre as várias obras visitadas, foram selecionadas duas contenções: um talude com solo grampeado no km 658+400 m, na pista Sul, e uma cortina atirantada no km 650+940 m, pista Norte. Tais estruturas atenderam todas as premissas avaliadas e contemplaram boa variedade de grampos e tirantes, necessária para avaliar os resultados dos diferentes ensaios em condições reais.

10.2 Resultados

10.2.1 Contenção km 658+400 m, pista Sul

A contenção do km 658+400 m constitui-se por três taludes de solo grampeado (Figura 157), não possui concreto projetado na face e dispõe de grampos com 4 m, 6 m e 8 m de comprimento e 25 mm de diâmetro.



Figura 157 – Contenção km 658+400, pista Sul

A Figura 158 apresenta a vista superior dos taludes e a disposição dos grampos escolhidos para realização dos ensaios. Tal definição foi baseada nas seguintes premissas: distância da rodovia, possibilidade de estender o equipamento, inclinação dos taludes, vegetação presente e condição do grampo. Foram escolhidos 10 grampos em cada patamar, totalizando 30 grampos, com 3 comprimentos diferentes.

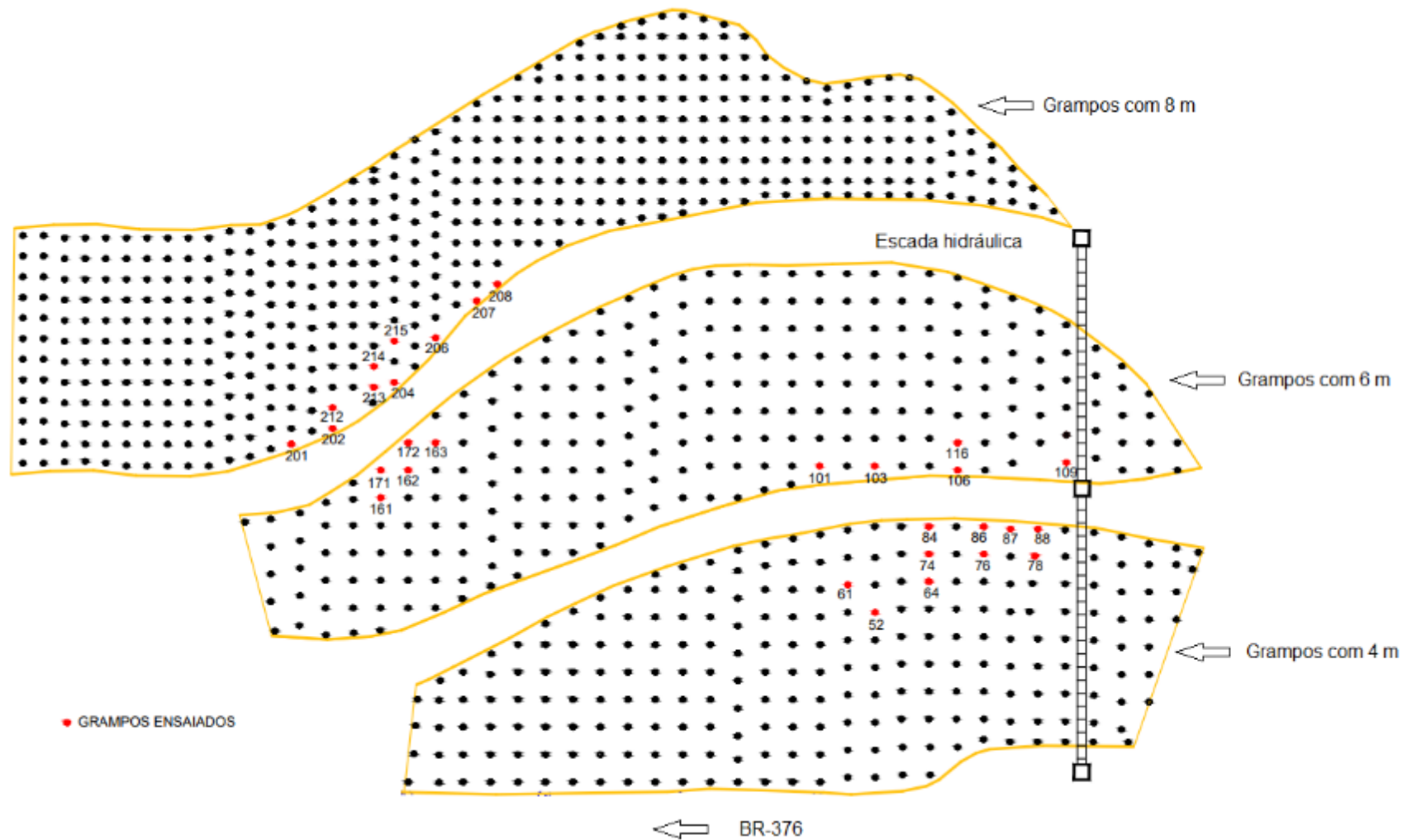


Figura 158 – Vista superior, km 658+400, pista Sul FONTE: Adaptado de Autopista Litoral Sul, 2011

Inicialmente, para aplicação do método da resistência elétrica foram realizados testes para determinação da distância entre eletrodos, assim como realizado durante a calibração executada no campo experimental. Todos os grampos ensaiados foram lixados para melhorar o contato elétrico com o equipamento e, em cada elemento de ancoragem, foram realizadas 10 leituras buscando reduzir a dispersão dos resultados. Os primeiros testes foram realizados nos grampos de 4 m próximos a rodovia, em 3 seções diferentes. Os resultados encontrados nos 10 grampos são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Resultados de resistência elétrica em grampos de 4 m

<i>Elemento</i>	<i>Seção 1</i>	<i>Seção 2</i>	<i>Seção 3</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>Coef. Var.</i>
<i>G1</i>	0,21	0,22	1,05	0,49	0,48	98%
<i>G2</i>	0,26	0,25	1,10	0,54	0,49	91%
<i>G3</i>	0,22	0,14	0,96	0,44	0,45	103%
<i>G4</i>	0,94	0,81	1,60	1,12	0,42	38%
<i>G5</i>	0,42	0,24	1,07	0,58	0,43	75%
<i>G6</i>	0,45	0,29	0,92	0,55	0,33	59%
<i>G7</i>	0,70	0,35	0,92	0,66	0,29	44%
<i>G8</i>	0,64	0,44	0,94	0,67	0,26	38%
<i>G9</i>	0,40	0,25	1,00	0,55	0,40	72%
<i>G10</i>	0,25	0,10	0,93	0,43	0,44	103%

Verifica-se que os resultados de resistência elétrica foram inferiores aos encontrados na contenção experimental e na literatura, com altos valores de coeficiente de variação, mesmo em diferentes seções de ensaio. Fez-se então alguns ensaios na tela metálica presente na contenção e, como o resultado da resistência foi muito próximo ao valor do obtido no grampo, constatou-se que a tela metálica poderia estar influenciando nos resultados, uma vez que estava em contato com a chapa metálica e conseqüentemente com a barra.

Cabe salientar ainda que os ensaios nas seções 1 e 2 foram realizados após um dia muito chuvoso, justificando assim os valores obtidos inferiores à seção 3, o que também indica a influência da tela no ensaio (mais úmida após a chuva).

Desse modo, optou-se em desrosquear alguns grampos com chave grifo para possibilitar a realização do ensaio sem o contato com a tela metálica. Nesse momento, foi possível perceber que grande parte do contato elétrico com a tela ocorria pela chapa metálica. Com isso, após soltar a porca, foram colocados pedaços de borracha embaixo da chapa, de modo a evitar o contato elétrico (Figura 159b). Cabe salientar que devido à proteção anticorrosiva nas barras, encontrou-se um nível alto de dificuldade para desrosquear as porcas e, por isso foi desrosqueado somente o necessário para colocar a borracha (Figura 159a). A escolha dos grampos a serem ensaiados também ficou limitada à possibilidade de desrosquear a porca.



(a)



(b)

Figura 159 – Ensaio de resistência elétrica: a) Desrosquear porca e erguer a placa; b) Isolamento dos grampos com pedaços de borracha

Após desrosquear as porcas e isolar o elemento de ancoragem, os resultados se apresentaram condizentes com os obtidos no campo experimental e na literatura. No entanto, alguns grampos ainda exibiram valores muito baixos e, quando possível, buscou-se desrosquear a porca por completo. Nessas barras, foi identificado o contato direto entre a tela metálica e a barra de aço (Figura 160). Então, após desencostar a tela da barra, os resultados do ensaio foram maiores e mais coerentes, comprovando a hipótese de que a tela metálica influencia na qualidade dos resultados. Cabe salientar que 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 160 – Contato da tela metálica com o grampo

Os resultados obtidos no solo grampeado são apresentados na Tabela 29, e graficamente na Figura 161.

Tabela 29 – Resultado de resistência elétrica no solo grampeado

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	G210	64,8
G61	37,8	G104	47,0	G201	56,3
G64	43,4	G107	22,8	G202	37,5
G74	50,8	G114	32,8	G204	39,1
G76	56,7	G124	38,3	G206	33,6
G78	63,5	G164	58,4	G207	35,9
G84	41,6	G165	57,6	G208	34,0
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%	

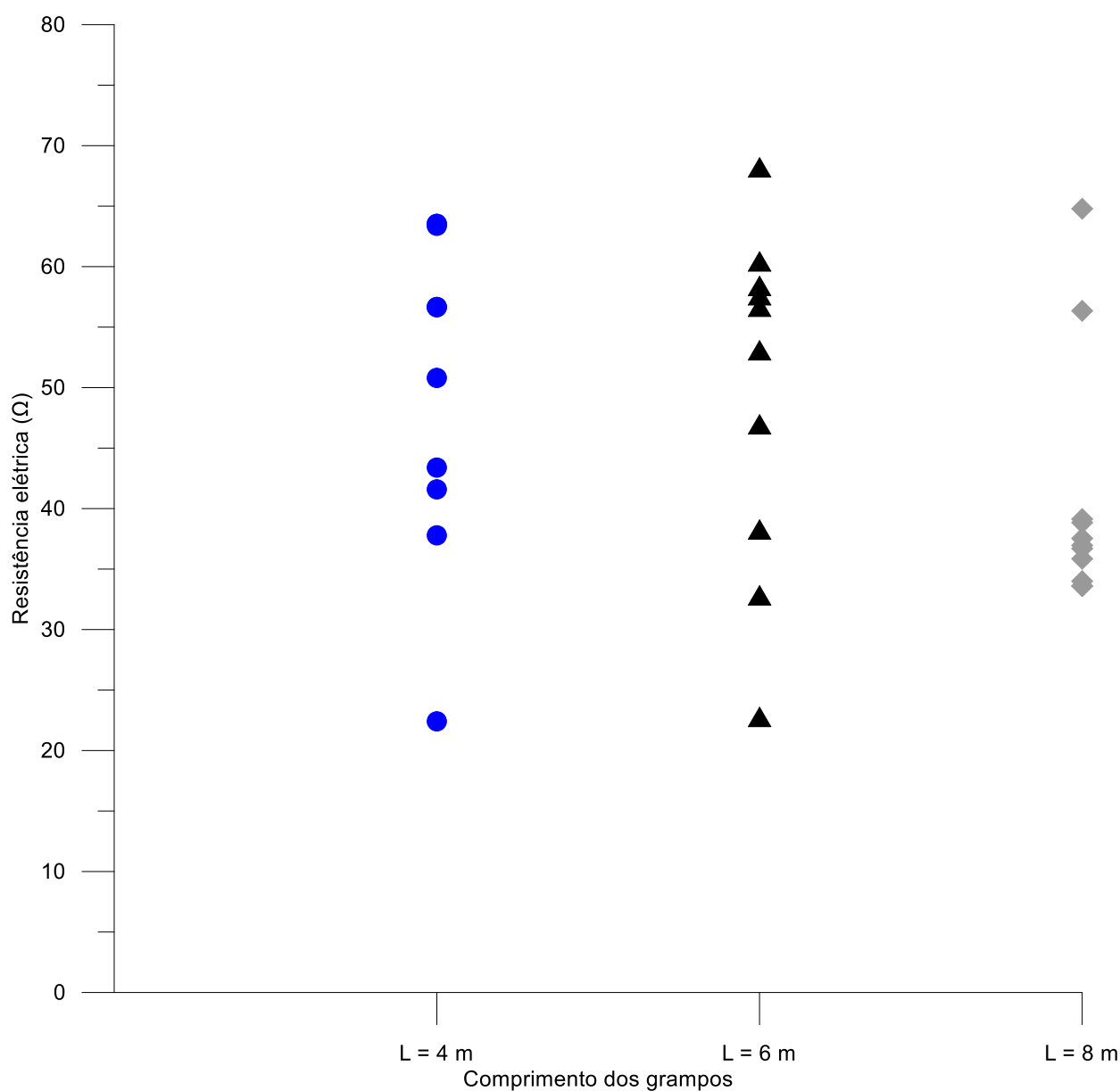


Figura 161 – Resultados de resistência elétrica no solo grampeado

Os resultados de resistência elétrica apresentaram grande dispersão, com alto coeficiente de variação. Percebe-se através da Figura 161 que os resultados para os três comprimentos diferentes apresentaram uma mesma faixa de variação (entre 20 e 70 Ω), não sendo observada uma tendência dos valores.

10.2.2 Contenção km 650+940 m, pista Norte

De maneira complementar, novos ensaios foram realizados em uma estrutura de cortina atirantada situada no km 650+940 m, composta por quatro configurações distintas de tirantes. Trata-se de uma contenção em aterro onde a face da estrutura encontra-se voltada para uma via marginal que serve de acesso apenas aos moradores, conforme apresentado na Figura 162. 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 162 – Face da contenção km 650+940, pista Norte

FONTE: Autopista Litoral Sul, 2012

Foram selecionados 32 tirantes para realização dos ensaios. 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 situavam-se na plataforma de trabalho 2, nas linhas inferior, intermediária e superior, respectivamente. As características dos tirantes são apresentadas na Tabela 30, e o posicionamento na Figura 163.

Tabela 30 – Levantamento de tirantes acessíveis

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

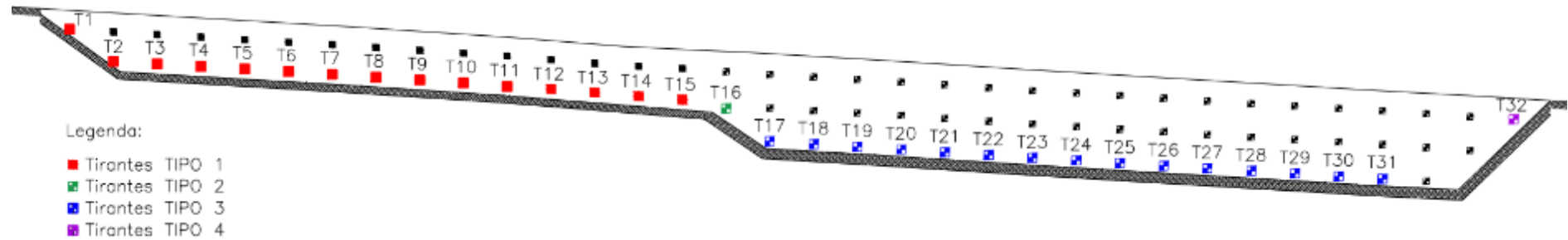


Figura 163 – Vista frontal da cortina atirantada

De modo a permitir o acesso à cabeça das barras dos tirantes, protegidas por um “capacete” de concreto, foi necessário inicialmente remover tal estrutura (Figura 164a). Cabe salientar que após a realização dos ensaios, os capacetes foram reconstruídos (Figura 164b), de modo a evitar a corrosão dos elementos de ancoragem.



(a)



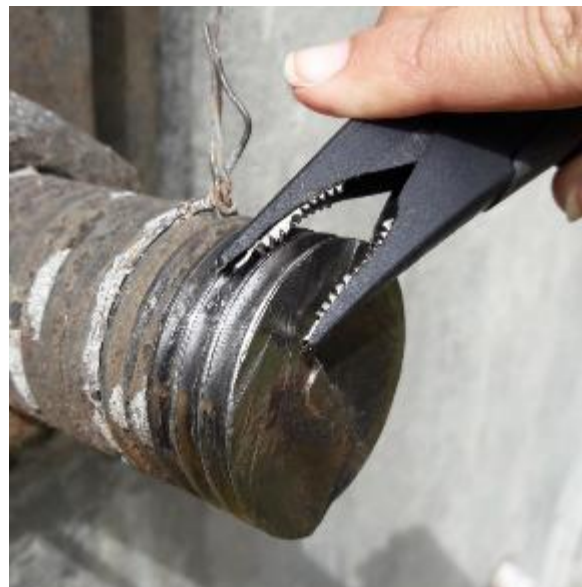
(b)

Figura 164 – Capacetes de concreto: a) Retirada; b) Reconstrução

Foram ensaiados grampos de 32 mm e 50 mm mas, como não existe garra jacaré com a abertura de 50 mm, fez-se necessário realizar o ensaio com a garra na lateral da barra. Após alguns testes, percebeu-se que os resultados eram iguais com as duas configurações, a que envolve a barra (Figura 165a) e lateralmente (Figura 165b).



(a)



(b)

Figura 165 – Garra jacaré nos tirantes monobarra: a) Tirante 32 mm; b) Tirante 50 mm

O caminhamento realizado com os eletrodos para calibração do método no local é apresentado na Figura 166, sendo para tal escolhidos dois tirantes de diâmetro 32 mm e outros dois de 50 mm, em cada uma das extremidades da cortina atirantada.

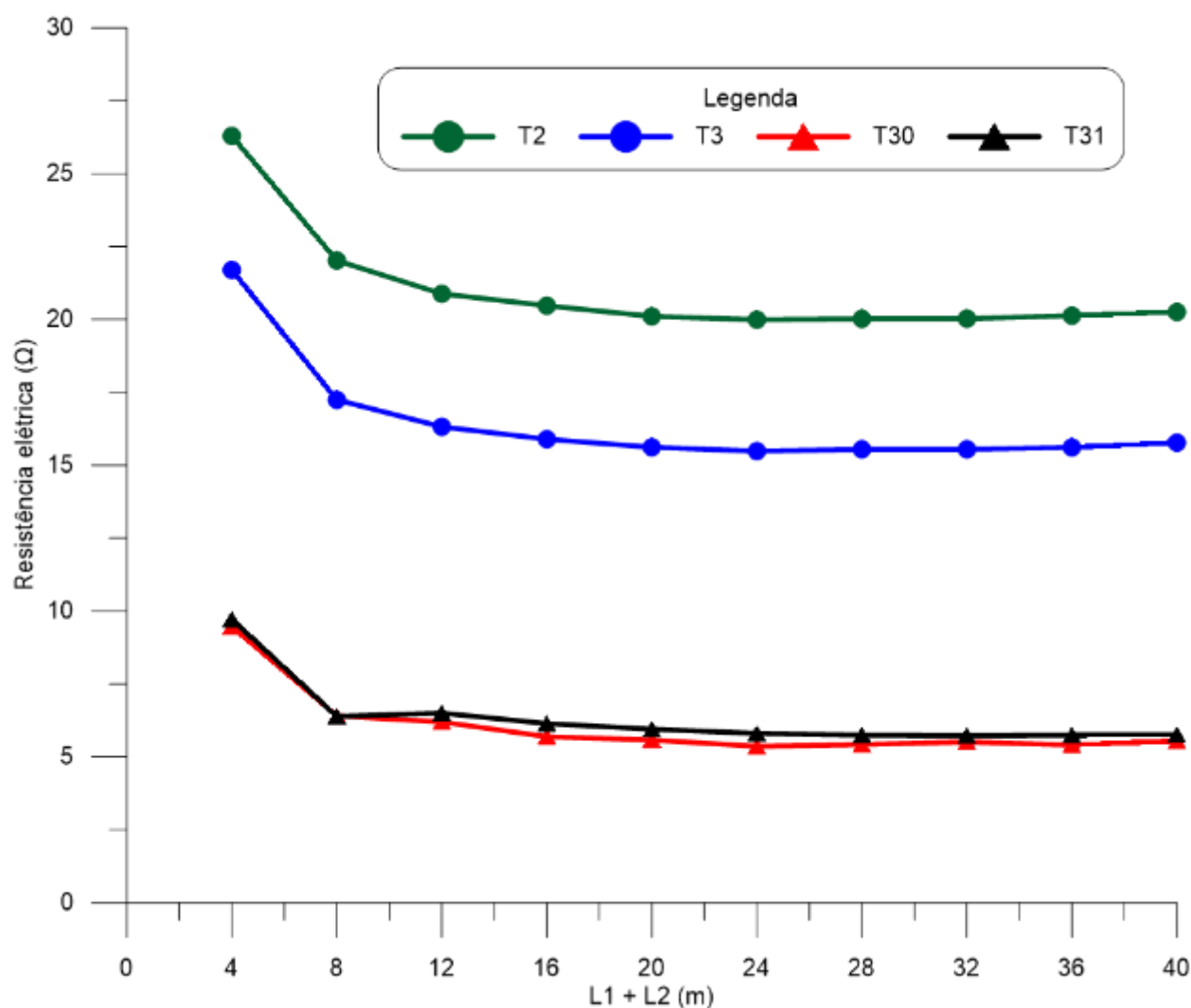


Figura 166 – Resultados da calibração do método de resistência elétrica na cortina atirantada

Com base nesses resultados, observa-se uma estabilização das leituras a partir de 8 m ($L1+L2$). Para os ensaios foi adotado uma distância de 28 m, permitindo assim avaliar 4 tirantes próximos, distanciados em 3 m, sempre dentro do patamar de leitura. Foram adotadas ainda duas seções paralelas à cortina atirantada, com sentidos opostos, como apresentado na Figura 167, de modo a verificar se os resultados nas diferentes seções eram semelhantes. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 168.

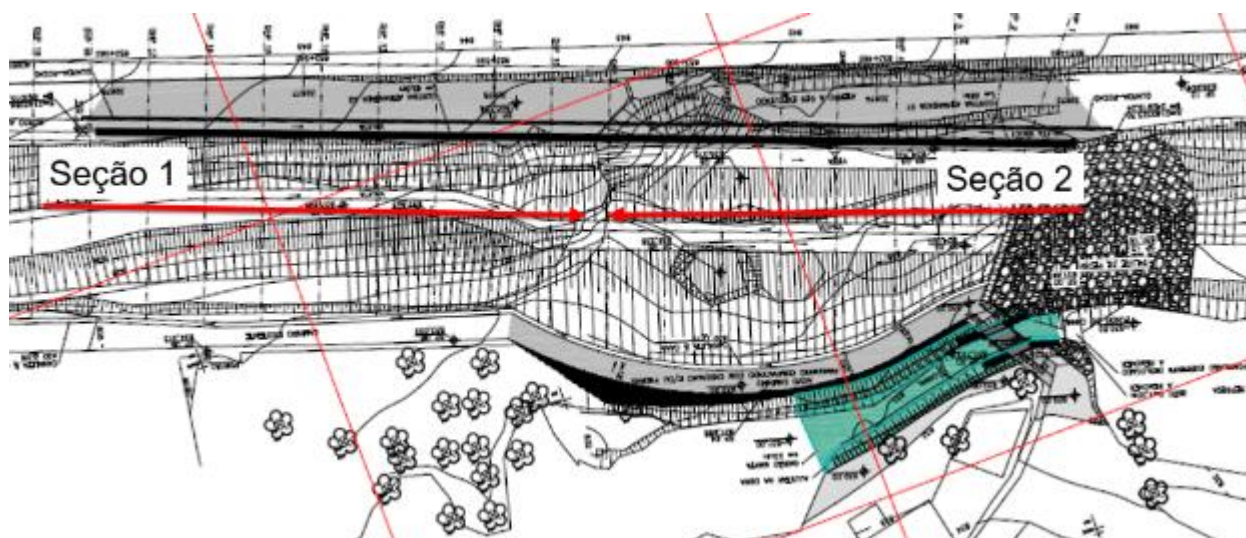


Figura 167 – Seção 1 e 2 nos ensaios de resistência elétrica

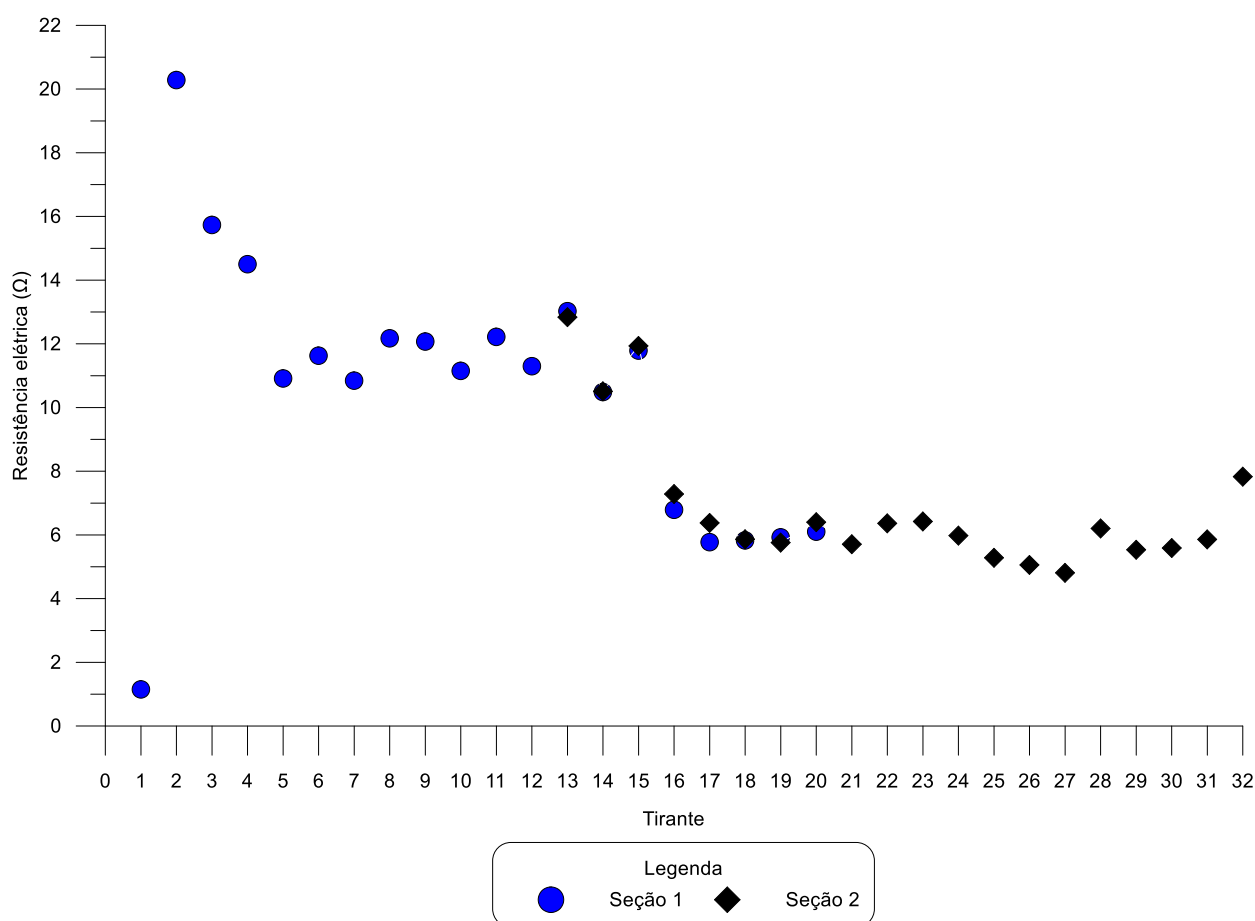


Figura 168 – Resistência elétrica em duas seções da cortina atirantada

Verifica-se que mesmo variando completamente a seção, com sentidos opostos, os 8 tirantes analisados (T13 a T20) nas duas seções apresentaram resultados praticamente iguais,

indicando que a direção do posicionamento dos eletrodos paralelos à cortina não influenciou no resultado. O resultado final de resistência elétrica medida, com a média dos resultados das duas seções pode ser observado na Figura 169

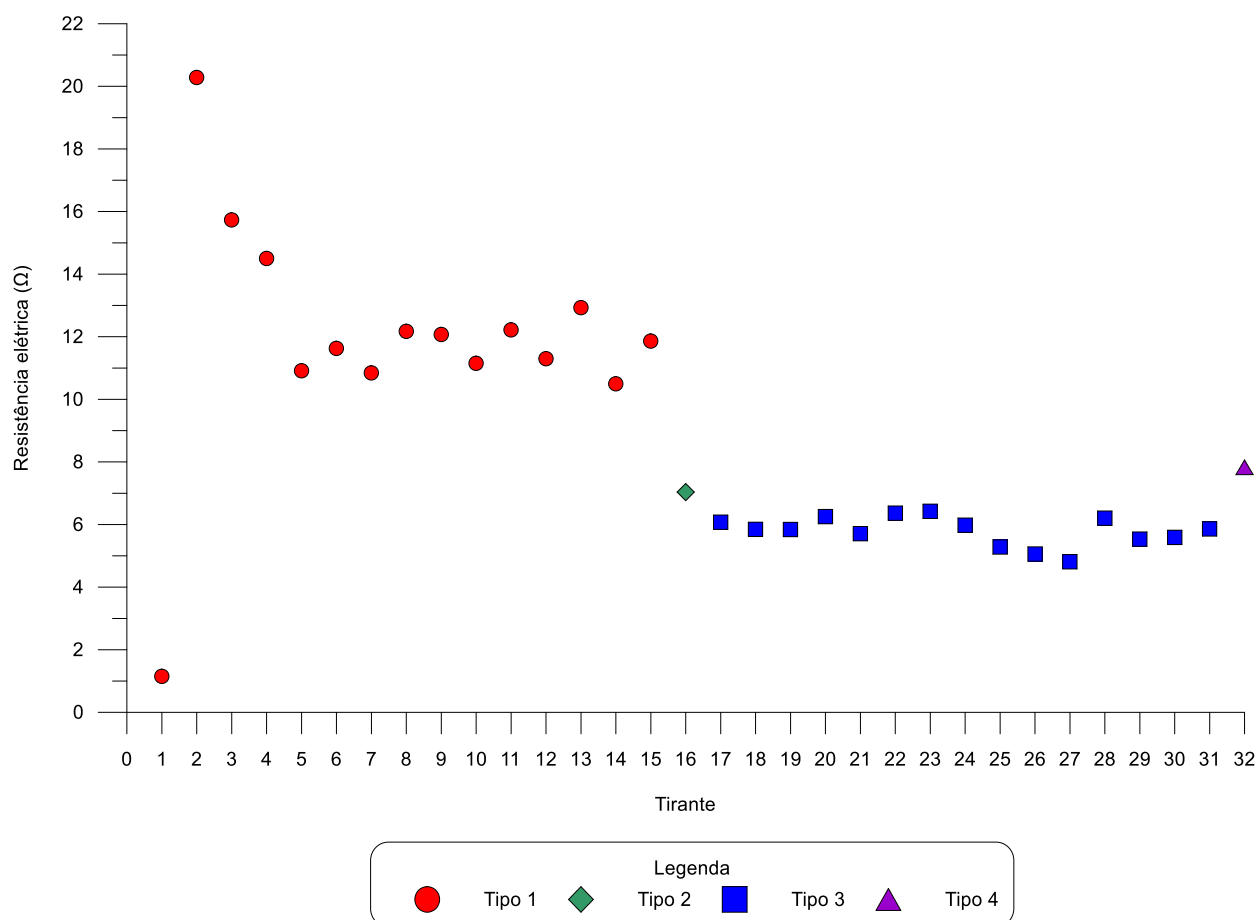


Figura 169 – Resultados de resistência elétrica na cortina atirantada

10.3 Análise de resultados

10.3.1 Contenção km 658+400 m, pista Sul

Impedido o contato entre os grampos e a tela metálica, obtiveram-se resultados coerentes com o postulado na literatura internacional. Ainda assim, os resultados apresentaram grande dispersão, com alto coeficiente de variação.

Para melhor análise dos resultados, estes foram examinados separadamente por cada patamar. Os grampos do primeiro patamar, com comprimento de 4 m, são mostrados na Figura 170, estando ainda representados graficamente conforme seu posicionamento da contenção.

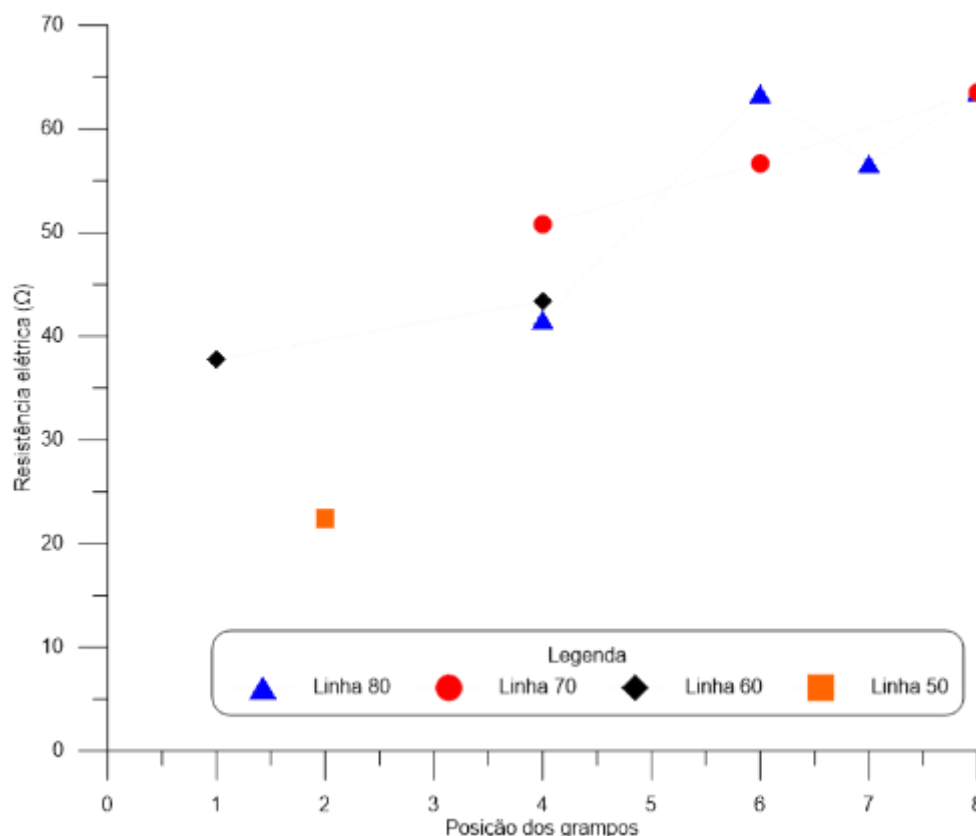


Figura 170 – Resultados de resistência elétrica para os grampos de 4 m

Verifica-se um crescimento lateral da resistência elétrica, que pode ser associado à heterogeneidade do solo local. Informações sobre sondagens realizadas na região na época da construção da obra foram avaliadas, porém o projeto apresenta apenas um perfil transversal do talude, não permitindo identificar variações laterais. Além disso, salienta-se que 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 submetidos a ensaios não destrutivos adicionais, ou até mesmo ensaios de arrancamento. Para esse patamar, os resultados indicam que seria interessante reavaliar por meio de outras técnicas os grampos G61, G74 e G86, que foram os elementos que apresentaram valores altos quando comparados com grampos próximos. Os resultados obtidos no segundo patamar, com grampos de 6 m, são apresentados na Figura 171.

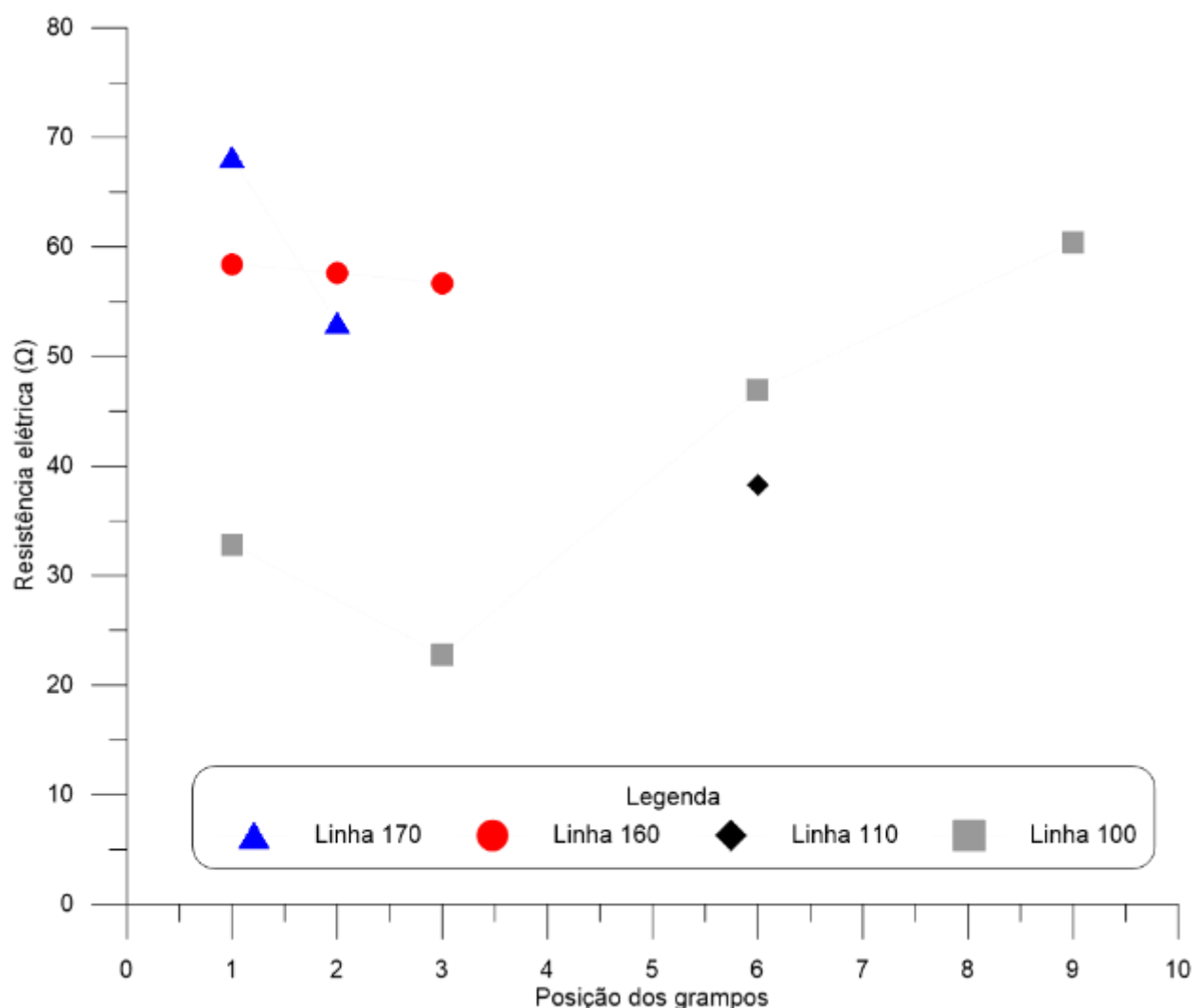


Figura 171 – Resultados de resistência elétrica para os grampos de 6 m

É possível notar que 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 um pouco 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 o primeiro patamar. Tal fato também pode ser associado à heterogeneidade lateral do solo. Para esse patamar, 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 172.

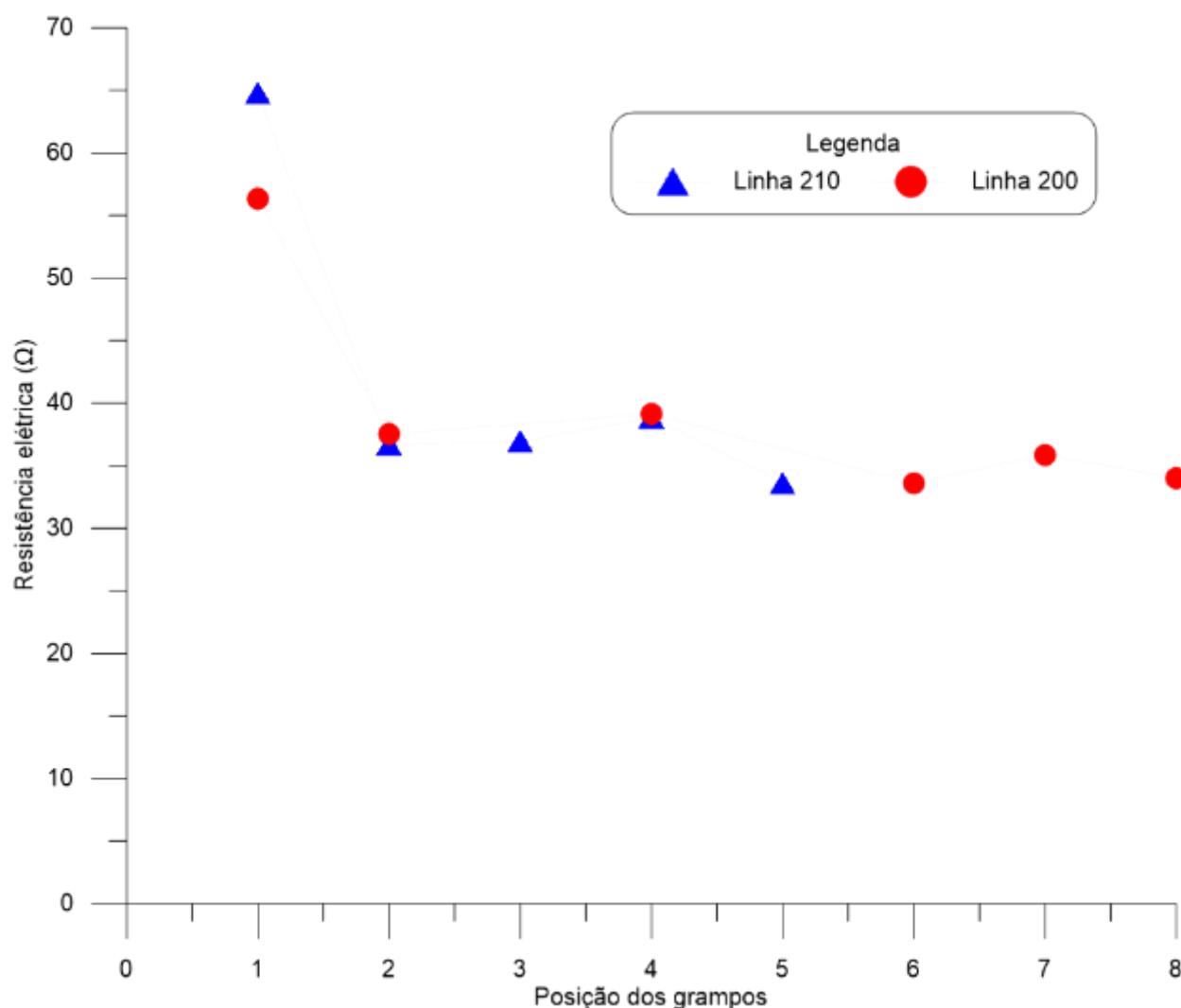


Figura 172 – Resultados de resistência elétrica para os grampos de 8 m

Diferentemente dos demais patamares, os grampos de 8 m apresentaram resultados bem próximos, com exceção do G201 e G210, que apresentaram valores maiores que a média e, por esse motivo, poderiam ser melhor analisados com outras técnicas. Os demais grampos apresentaram um valor médio de resistência elétrica de 35 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.

10.3.2 Contenção km 650+940 m, pista Norte

Com base nos resultados da Figura 169 conclui-se que a resistência elétrica nos tirantes tipo 1 e em especial os elementos T1 a T4 apresentaram grandes dispersões nos valores medidos. O elemento T1 apresentou um valor muito abaixo do esperado, próximo do encontrado nos grampos que estavam sofrendo influência da tela metálica. Em contrapartida, os tirantes T2, T3 e T4 apresentaram valores acima da média encontrada com os demais, podendo tal comportamento ser associado às heterogeneidades do solo no local, composto por um aterro. Buscou-se também uma análise de resultados de sondagens no local, porém não foram encontradas informações nas regiões de interesse. Os resultados encontrados permitem concluir que se ensaios complementares para avaliação da integridade dos tirantes fossem necessários recomendar-se-ia a avaliação do T1 cuja resistência foi muito abaixo da média obtida com as demais ancoragens.

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. Os tirantes tipo 3 apresentaram um comportamento bem constante, com exceção dos tirantes T20 e T28, que poderiam ser escolhidos caso ensaios adicionais fossem programados para avaliação dessa estrutura.

11 CONSOLIDAÇÃO DE DIRETRIZES E METODOLOGIAS PARA A AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO

11.1 Introdução

Após o detalhamento e realização de todas as etapas pertencentes a este projeto, importantes avanços foram obtidos no que diz respeito a utilização de ensaios com métodos não destrutivos em estruturas de contenção.

11.2 Resultados

Observou-se que as metodologias comercialmente ofertadas no mercado nacional, em especial a do ensaio *Sonic Echo* e *Reflectometric Impulse Measurement Technique*, ao menos no caso da contenção experimental, não forneceram resultados satisfatórios, tanto para avaliação do comprimento como da integridade dos elementos.

Outras duas técnicas de ensaio foram avaliadas: *Time Domain Reflectometry* (TDR) e Resistência Elétrica. O método de Resistência Elétrica mostrou-se com grande potencial de uso por ser de simples e rápida execução e permitir sua aplicação em todos os elementos da contenção com custos reduzidos. Como limitação, ressalta-se que o mesmo representa uma ferramenta de análise qualitativa, ou seja, a análise dos resultados permite identificar elementos fora do padrão (cujos valores medidos apresentam-se acima da média observada) e com isso programar testes adicionais (tais como ensaios de arrancamento, por exemplo).

Os resultados obtidos com a aplicação do método TDR nos grampos da contenção experimental permitiram diferenciar os elementos de 6 e 12 m. Além disso, foi possível identificar algumas anomalias previamente definidas no campo experimental, conforme exposto a seguir. O grampo executado com 1 m de barra enterrada no solo teve como resposta um menor tempo de propagação da curva, não sendo possível, no entanto, identificar o tipo de defeito e seu comprimento com a interpretação do gráfico. Com relação às falhas na calda de cimento simuladas, resultados promissores foram obtidos a partir de 50 cm de comprimento. Outras variações/anomalias foram avaliadas (grampo com ou sem reinjeção, emenda em diferentes locais da barra e furo maior que a barra) porém os resultados não foram conclusivos.

Com relação aos ensaios executados nos tirantes, foi possível identificar o trecho livre e o trecho ancorado, uma vez que apenas este último está em contato com a calda de cimento. Para tal, fez-se necessária uma etapa de calibração em tirantes com comprimentos conhecidos de forma a auxiliar na obtenção da velocidade em cada segmento, sendo observado que a velocidade encontrada nesses é menor que a dos grampos. Os resultados obtidos com os tirantes de fio não foram satisfatórios, o que pode estar associado à ausência de protensão dos mesmos.

11.3 Análise de resultados

Metodologias comercialmente ofertadas no mercado nacional, tais como a do ensaio *Sonic Echo* e *Reflectometric Impulse Measurement Technique*, ao menos no caso da contenção experimental, não forneceram resultados satisfatórios, tanto para avaliação do comprimento como da integridade dos elementos.

O método de Resistência Elétrica, usado como uma ferramenta para análise quantitativa, mostrou-se com grande potencial de uso por ser de simples e rápida execução e permitir sua aplicação em todos os elementos da contenção com custos reduzidos. A técnica da Resistência Elétrica pode ser aplicada tanto em obras novas, como em obras já existentes. É um ensaio simples e rápido, e permite a avaliação de todos os elementos da contenção. O ensaio possui potencial para obtenção de resultados qualitativos no que diz respeito à comparação de elementos de mesma configuração. Apesar de ser um ensaio comparativo, os dados obtidos na presente pesquisa indicaram que elementos que apresentam possíveis falhas tendem a apresentar valores destoantes dos demais, normalmente acima da média. Desse modo, a técnica visa a identificação de possíveis falhas para uma avaliação adicional com outra metodologia (por exemplo, um ensaio de arrancamento sob condições controladas). Com relação ao procedimento executivo, sugere-se realizar leituras em seções paralelas e na direção das barras, além de intercalar entre os elementos testados. Variações de posicionamento também devem ser avaliadas. Cabe salientar que os resultados podem ser comparados somente com elementos da mesma obra, pois as condições da calda de cimento e do solo variam em função do local de instalação.

O método TDR permite a identificação do comprimento das barras e presença de falhas ao longo dos elementos. Para aplicação do método TDR é necessário o acesso à cabeça das barras e que um cabo coaxial esteja pré-instalado ao longo da barra, não sendo possível a aplicação em

obras já existentes. Esse procedimento já é adotado em outros países, como Hong Kong, tornando os testes nas barras um item fundamental de avaliação de qualidade após a construção. O ensaio permite a obtenção do comprimento das barras com os testes realizados no cabo coaxial, além da identificação de possíveis vazios ao longo da barra. Os resultados dos ensaios realizados com grampos mostraram que a técnica torna-se promissora para uma análise qualitativa de elementos de mesmo comprimento. O método TDR também se mostrou com boa aplicabilidade nos tirantes para a detecção do trecho livre e do trecho ancorado.

Diversas configurações com o equipamento TDR 200 sem o uso do cabo coaxial foram avaliadas, mas os resultados obtidos não foram promissores tanto para a avaliação de grampos como de tirantes. Dessa forma, com a configuração atual do equipamento obtêm-se resultados satisfatórios apenas com o uso do cabo coaxial, o que não se aplica a obras existentes, mas pode representar um importante avanço nos procedimentos executivos a serem adotados em novas contenções.

Uma continuidade do presente projeto permitiria explorar tal técnica de ensaio, buscando-se, por exemplo, modificar o equipamento para que a onda eletromagnética seja propagada pela superfície do aço. Assim, a barra poderia ser modelada com uma linha Goubau, que consiste em um material dielétrico revestido por uma única linha condutora, possibilitando que o sinal refletido seja medido com apenas um condutor, sem a necessidade do cabo coaxial auxiliar (Cheung, 2003).

12 CAPACITAÇÃO DE PESSOAS

A presente pesquisa teve a participação com provisão de bolsa de estudos para 14 alunos de graduação (bolsa de iniciação científica para alunos dos cursos de engenharia civil e elétrica), 4 alunos de mestrado e 2 alunos de doutorado. Em particular, cabe menção à tese de doutorado em elaboração por A. P. Mikos (2020), desenvolvida na UFPR e com estágio na *Hong Kong University of Science and Technology*, que contribuiu significativamente para as informações da pesquisa consolidadas no presente documento.

Tabela 31 – Resumo com os trabalhos publicados ao longo do desenvolvimento da pesquisa

Congressos, simpósios, etc	Evento	Ano
MANUELA CABRAL CAETANO ; LARISSA ROEDEL ; ANA PAULA MIKOS ; VÍTOR PEREIRA FARO ; LIAMARA PAGLIA SESTREM . DRENAGEM EM OBRAS DE CONTENÇÕES VIÁRIAS. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte.	XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica	2016
ANA PAULA MIKOS; LARISSA ROEDEL ; MANUELA CABRAL CAETANO ; ALESSANDER CHRISTOPHER MORALES KORMANN ; VÍTOR PEREIRA FARO ; LIAMARA PAGLIA SESTREM ; SIDNEI HELDER CARDOSO TEIXEIRA . APLICABILIDADE DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO: CORTINAS ATIRANTADAS E SOLO GRAMPEADO. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte, 2016.	XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica	2016
LARISSA ROEDEL ; MANUELA CABRAL CAETANO ; ANA PAULA MIKOS ; VÍTOR PEREIRA FARO ; LIAMARA PAGLIA SESTREM . POTENCIAL DE CORROSÃO DOS SOLOS EM CORTINAS ATIRANTADAS. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte, 2016.	XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica	2016
MIKOS, A. P.; CABRAL, M. C. ; ROEDEL, L. ; FARO, V. P. ; SESTREM, L. P. ; KORMANN, A. C. M. ; TEIXEIRA, S. H. C. . APLICABILIDADE DO MÉTODO NÃO DESTRUTIVO TIME DOMAIN REFLECTOMETRY (TDR) EM SOLO GRAMPEADO. In: 8º Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia, 2016, Porto. Taludes e Encostas em Risco, 2016.	8º Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia	2016

Congressos, simpósios, etc	Evento	Ano
MIKOS, A. P.; CABRAL, M. C. ; ROEDEL, L. ; FARO, V. P. . Estudo das manifestações patológicas em solo grampeado e cortina atirantada. REVISTA TÉCNICO CIENTÍFICA DO CREA-PR, v. 1, p. 1, 2017.	REVISTA TÉCNICO CIENTÍFICA DO CREA-PR	2017
MIKOS, ANA PAULA; CAETANO, MANUELA CABRAL ; ROEDEL, LARISSA ; FARO, VITOR PEREIRA . Manifestações Patológicas decorrentes em Solo Grampeado e Cortina Atirantada. In: 2º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções, 2017, Curitiba, 2017. p. 537-546.	2º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções	2017
Ferreira, K. S. M. ; Silva, A. C. G. ; FURMAN, Jordana ; MIKOS, A. P. ; FARO, V. P. . GRUPO DE ESTUDOS EM GEOTECNIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ ? PRIMEIRO ANO DE ATUAÇÃO. In: XLV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2017, Joinville. COBENGE, 2017	XLV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia	2017
MIKOS, ANA PAULA; TEIXEIRA, SIDNEI HELDER CARDOSO . Estudo do método da resistência elétrica para avaliação da integridade de solo grampeado. REVISTA DE ENGENHARIA CIVIL IMED, v. 5, p. 121, 2018.	REVISTA DE ENGENHARIA CIVIL IMED	2018
MIKOS, A. P. ; RIBEIRO, T. S. ; FARO, V. P. ; TEIXEIRA, S. H. C. . Estudo da resistividade elétrica do solo com variação da umidade e índice de vazios. In: 16CNG - 16º Congresso Nacional de Geotecnia, 2018, Ponta Delgada - Açores. Anais do 16CNG - 16º Congresso Nacional de Geotecnia, 2018.	16º Congresso Nacional de Geotecnia	2018
SILVA, I. G. ; MIKOS, A. P. ; FARO, V. P. Análise de sensibilidade de parâmetros geomorfológicos na estabilidade de taludes. In: 16CNG - 16º Congresso Nacional de Geotecnia, 2018, Ponta Delgada - Açores. Anais do 16CNG - 16º Congresso Nacional de Geotecnia, 2018.	16º Congresso Nacional de Geotecnia	2018
SILVA, I. G. ; MIKOS, A. P. ; FARO, V. P. Análise probabilística de um talude de solo homogêneo em relação à influência da inclinação e do nível d'água. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2018, Salvador.	XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica	2018
MIKOS, A. P. ; RIBEIRO, T. S.; FARO, V. P. Avaliação da Resistividade Elétrica da Calda de Cimento na Aplicação do Método Não Destrutivo da Resistência Elétrica em Solo Grampeado. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2018, Salvador.	XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica	2018

13 CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS

13.1 Apresentação dos Resultados e Conclusões

Os principais resultados da presente pesquisa envolveram a consolidação de procedimentos para a avaliação e tomada de decisão quanto à necessidade de intervenções de manutenção em estruturas de contenção, tendo-se identificado como técnicas não destrutivas mais promissoras a Resistência Elétrica e o *Time Domain Reflectometry*. A seguir, são discutidos o atendimento a objetivos, métodos, resultados, aplicação e produtos do projeto.

13.2 Objetivos do Projeto

O objetivo da pesquisa consistiu na consolidação de procedimentos para avaliação e tomada de decisão quanto à real necessidade de intervenções de manutenção em estruturas de contenção, com a aplicação de métodos não destrutivos. Além disso, alguns objetivos específicos foram traçados para se atingir o objetivo geral. Pode-se destacar a identificação dos fatores responsáveis pela degradação nas estruturas de contenção, caracterização do estado-da-arte relacionada aos métodos não destrutivos e mapeamento das contenções já existentes para definição de um local para execução do campo experimental.

Em relação ao campo experimental, os objetivos específicos foram a execução de investigação geotécnica de campo e de laboratório, concepção e implantação de uma contenção com elementos íntegros e outros com anomalias conhecidas e análise dos resultados obtidos com as técnicas selecionadas. Outros objetivos envolveram ainda a calibração dos métodos para aplicação em condições reais e identificação do potencial e limitações das técnicas. Por fim, os objetivos envolveram conduzir uma consolidação dos resultados, de modo a se propor diretrizes para análise e manutenção das estruturas de contenção no trecho estudado, bem como em outras rodovias.

O objetivo geral e os objetivos específicos foram alcançados ao longo do extenso trabalho experimental e analítico da pesquisa, descrito no presente documento.

13.3 Avaliação dos Métodos e Técnicas Utilizadas

Uma abrangente revisão bibliográfica foi realizada de modo a identificar os principais problemas que ocorrem em estruturas de contenção com solo grampeado e cortina atirantada, e para permitir a simulação das falhas nos elementos da contenção experimental. Também foi realizado um levantamento com as principais metodologias não destrutivas utilizadas internacionalmente, de modo a se selecionar as técnicas a serem aplicadas na contenção experimental para identificação das patologias estudadas.

O mapeamento das contenções ao longo da rodovia em estudo permitiu a identificação das principais características destas obras. Dados como comprimento, diâmetro e tipo das barras, diâmetro da perfuração, e nos casos dos tirantes, o comprimento livre e ancorado e força de protensão, foram essenciais para o planejamento do campo experimental.

Após a escolha do melhor local para a execução do campo experimental, uma extensa caracterização geotécnica foi realizada, com ensaios de campo e de laboratório, de modo a avaliar a influência dos parâmetros do solo nos ensaios não destrutivos. A construção do campo experimental com a utilização de grampos e tirantes com características conhecidas permitiu a avaliação das técnicas não destrutivas selecionadas. As técnicas avaliadas que apresentaram maior potencial de uso foram o método da Resistência Elétrica e o *Time Domain Reflectometry*. Ambas técnicas podem ser aplicadas em todos os elementos da contenção e permitem avaliar a integridade das barras sem a necessidade de ensaios destrutivos, como os ensaios de arrancamento. As técnicas *Sonic Echo* e *Reflectometric Impulse Measurement Technique* não apresentaram resultados satisfatórios.

Em linhas gerais, os métodos e técnicas adotados no desenvolvimento da pesquisa concorreram para que os objetivos geral e específicos fossem alcançados. Dentre as técnicas que se mostraram mais promissoras, cabe ressaltar que o TDR tende a agregar resultados mais objetivos quando houver um cabo coaxial previamente instalado ao longo do elemento ensaiado. Isso implica em limitações para a avaliação de contenções mais antigas, mas mostra grande potencial de uso em novas estruturas, onde pode-se prescrever ainda na fase de projeto a instalação do cabo coaxial. A incorporação gradual desse procedimento à prática da engenharia nacional

traria um grande avanço para a racionalização de futuras intervenções de manutenção, aperfeiçoando-se a garantia da segurança das contenções ao longo de sua vida útil.

Por sua vez, o método da Resistência Elétrica mostrou-se apto para aplicação em quaisquer condições, sendo que o mesmo deve ser usado com a finalidade de se mapear comparativamente elementos de comportamento anômalo.

13.4 Avaliação dos Resultados e Utilidade Prática

Conforme discutido no item precedente, os métodos e técnicas adotados no desenvolvimento da pesquisa contribuíram para que os objetivos geral e específicos fossem alcançados. Quanto aos resultados, pode-se avaliar que o fato da pesquisa ter permitido delimitar duas técnicas não destrutivas para aplicação em estruturas de contenção caracteriza o atendimento do objetivo geral.

Da mesma forma, os resultados encontrados nas diversas etapas do estudo contribuíram para o atendimento dos objetivos específicos. A revisão bibliográfica permitiu identificar como principal patologia falhas na calda de cimento, próximas à cabeça dos elementos de ancoragem. Ainda na revisão da literatura, foram selecionadas quatro técnicas não destrutivas para testes na pesquisa: *Sonic Echo*, *Reflectometric Impulse Measurement Technique*, Resistência Elétrica e *Time Domain Reflectometry*. Os resultados dessa etapa, juntamente com o levantamento de contenções existentes no trecho concessionado, permitiram planejar e materializar o campo experimental de contenções, onde as técnicas não destrutivas foram testadas. Os resultados das fases de calibração e identificação de vantagens e limitações de cada método, inclusive com testes em condições de estruturas reais, contribuíram para se consolidar diretrizes gerais para uso das tecnologias selecionadas: Resistência Elétrica e *Time Domain Reflectometry*.

Quanto à utilidade prática dos resultados, entende-se que são contribuições do estudo aqui descrito:

- A materialização de um campo experimental de contenções bem documentado, que fica disponível para a realização de novos estudos;

- A indicação de se reduzir o uso de ensaios destrutivos para a verificação do estado de grampos, tirantes e ancoragens em geral, em particular empregando-se o método da Resistência Elétrica para uma avaliação inicial, buscando-se identificar elementos anômalos;
- A recomendação de se aplicar a técnica *Time Domain Reflectometry* para uma avaliação do estado de elementos de interesse ao longo da vida útil de uma contenção, inclusive incorporando-se à prática nacional de projeto a instalação de um cabo coaxial de baixo custo, que permitiria conduzir medições objetivas do estado físico das ancoragens para confirmar continuamente a segurança das estruturas rodoviárias e, conseqüentemente, contribuir para se evitar operações de manutenção dispendiosas ou acidentes que prejudiquem a segurança dos usuários.
- A recomendação de se prosseguir com pesquisas que permitam aperfeiçoar a técnica *Time Domain Reflectometry*, buscando-se modificar o equipamento para que a onda eletromagnética se propague de maneira a ser possível modelar a barra com uma linha Goubau, o que eliminaria a necessidade de um cabo coaxial.

13.5 Produtos Gerados

Como principais produtos gerados listam-se:

- O conhecimento desenvolvido pelos participantes da equipe da pesquisa, proporcionado ao longo do desenvolvimento do projeto, e difundido em dissertações de mestrado, tese de doutorado e artigos em revistas e congressos nacionais e internacionais (vide capítulo 12);
- a consolidação de diretrizes e metodologias para a avaliação das condições de estruturas de contenção, cujo resumo se encontra no capítulo 11;
- a concepção de um campo experimental, que apresenta elementos com características e patologias conhecidas, o que permitiu e permitirá futuras avaliações de diferentes métodos não destrutivos, contribuindo assim para o avanço do estudo destas e de outras metodologias de ensaios não destrutivos.

14 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE REPORT ACI 228.2R-98. Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures, ACI. Farmington Hills, Michigan, 1998.

ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Manual de monitoração de rodovias sob concessão. Volume 5. Manual de monitoração dos terraplenos e estruturas de contenção. Rio de Janeiro: 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16254-1: Materiais para sistemas de aterramento. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5629: Execução de Tirantes Ancorados no Terreno. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR. 6484. Solo-Sondagens de Simples Reconhecimentos com SPT-Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

AUTOPISTA LITORAL SUL – ALS. Relatório de Acompanhamento V - julho/17 – Taludes rodoviários da BR-376/PRr e BR-101/SC: gerenciamento da segurança e da manutenção de estruturas de contenção através de ensaios não destrutivos. 2018.

AUTOPISTA LITORAL SUL – ALS. Relatório Final – Riscos geológico-geotécnicos em taludes rodoviários: Desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento e gerenciamento digital de informações para a BR-376, trecho da Serra do Mar (PR-SC) – FASE 2. 2017.

BEUTEL, Ralf et al. Comparative performance tests and validation of NDT methods for concrete testing. Journal of Nondestructive Evaluation, v. 27, n. 1-3, p. 59-65, 2008.

BOSZCZOWSKI, R. B. Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro, 2008.

BRAGA, A. C. O. Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro: 2006.

CAMPANELLA, R. G.; WEEMES, I., Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies. Canadian Geotechnical Journal, v. 27, p. 557-567, 1990.

CASCOLA. Cascola monta & fixa PL500 interno. Descrição do produto. Disponível em: <http://www.cascola.com.br/pt/produtos/adesivo-de-montagem/PL500_interno.html>. Acesso em: 20 jun. 2017.

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. Maio: 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. Dezembro: 2006.

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.; 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. Dezembro: 2005.

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.

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.

CIOLKO, A. T., TATABAI, H. Nondestructive methods for condition evaluation of prestressing steel strands in concrete bridges. Final Report. National Cooperative Highway Research Program. Illinois. Março: 1999.

CORDEC. Método RIMT®. Disponível em: <<http://www.cordecdobrasil.com.br/servicos/metodo-himt.php>>. Acesso em: 25/11/2015.

DAVIS A.G., HERTLEIN B.H.: Nondestructive testing of concrete pavement slabs and floors with the transient dynamic response method, Proc Int. Conf Struct. Faults Repair, London, 1987.

DAVIS, Allen G. The nondestructive impulse response test in North America: 1985–2001. NDT & E International, v. 36, n. 4, p. 185-193, 2003.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de conservação rodoviária. IPR 710. 2005.

FRANCO, B. O, M. Uso de sistema computacional em projeto de solo grampeado. Dissertação (Mestrado). Escola de Minas. UFOP. 2010.

FUKUE, M., MINATO, T., HORIBE, H., & TAYA, N. The micro-structures of clay given by resistivity measurements. Engineering geology, 54(1), 43-53. 1999.

FUNDESTAC. Parecer geotécnico. Fundestac Engenharia de Fundações Ltda. São José dos Pinhais: 2016. Relatório técnico.

GARBACZ A., On the usability of wavelet analysis for nondestructive evaluation of repair efficiency by impact-echo method, Adhesion in Interfaces of Building Materials - a Multi-scale Approach (ed. Czarnecki L, Garbacz A.), Advances in Materials Science and Restoration, No 2, Aedificatio Verlag, p. 47-60, 2007.

GOWERS, K. R., MILLARD, S. G. Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique. ACI Materials Journal. Título No 96-M66. Outubro: 1999.

HARTMAN, W., LECING, B., HARVEY, F., TONGUE, D., HIGGS, J. Managing geotechnical risk through non-destructive rock reinforcement testing trialed at the George Fisher mine, Mt Isa. Second Australian Ground Control in Mining Conference. Sydney, UNSW, Australia. Novembro: 2010.

HOŁA J., SADOWSKI Ł., SCHABOWICZ K.: Nondestructive evaluation of the concrete floor quality using impulse response method and impact-echo method, e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics, Vol. 14, No. 3, 2009.

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.

IRVIN, C. MOTHERSILL, 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– 0-4484-1. 258 p. 2007.

LEE, C. F.; ARUP, O.; Partners Hong Kong Ltd. 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. Dezembro: 2007.

MACHADO, A. X.; MENDES, L. C. Durabilidade e vida útil de estruturas de contenção de encosta situadas na cidade do Rio de Janeiro. VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. 2014.

MAMEDE FILHO, J. Instalações Elétricas Industriais. Editora LTC. 7ª Edição, 2007.

MASSAD, F. Obras de Terra. Editora Oficina de Textos, São Paulo, 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. Caracterização geotécnica de campo experimental para avaliação do método não destrutivo da resistência elétrica em solo grampeado. Tese - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Curitiba, 2020 (não publicada, em andamento).

MIKOS, A. P. Utilização de métodos não destrutivos na avaliação da integridade de estruturas de contenção Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Curitiba, 2017.

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:1993.

PALOP, K., IVANOVIC, A., BRENNAN, A. J. Centrifuge modeling of the nondestructive testing of soil anchorages. American Society of Civil Engineering. Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering. ASCE. 139 p 880 – 891. Junho: 2013.

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.

PIMENTEL GOMES, F. Curso de estatística Experimental. 14 ed. Piracicaba: Degasparo, 2000. 477p.

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.

RINCENT. Método não destrutivo de verificação de tirantes. Disponível em: <<http://www.rincent.com.br/Folders%20site/Folder%20Tirantes.pdf>>. Acesso em: 02/11/2015.

RYBAK J., SADOWSKI Ł., SCHABOWICZ K.: Non-destructive impulse Response S'Mash method for concrete pile testing, e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics, Vol. 14, No. 3, 2009.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. Ensaios de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações: 2ª edição. Oficina de Textos, 2012.

SESTREM, L. P. Concepção e implantação de um plano de instrumentação para avaliação das condicionantes geotécnicas de uma encosta litorânea. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Curitiba - PR. 2012.

SHIU, Y. K.; CHEUNG, W. M. Long-term durability of steel soil nails. Geo Report 135. Geotechnical engineering office. Civil engineering and development department. Junho: 2003.

SOILMEC. Hydraulic Microdrilling Rig SM-5. Soilmec Índia. Disponível em: <<http://soilmecindia.co.in/Microdrilling/data/SM-5%20by%20Puntel.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

SOLOTRAT. Manual de Serviços Geotécnicos Solotrat. 5ª ed. 108 p. São Paulo: 2015.

SOUZA, G. J. T.; PITTA, C. A.; ZIRLIS, A. C. Solo grampeado – aspectos executivos do chumbador. IV COBRAE – Conferência Brasileira sobre estabilidade de encostas. Salvador-BA, p. 835-844, 2005.

TANG, C.S.C., CHENG, P.F.K. Use of Time Domain Reflectometry (TDR) with pre-instaled wires to check the grout integrity of soil nail. GEO Report 304. Geotechnical engineering office. Civil engineering and development department. Dezembro: 2014.