

Ana Cecília Campello Pereira Porto Soares

Métodos Geofísicos em Obras Lineares

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Sergio Augusto Barreto da Fontoura

Rio de Janeiro, março de 2009

Ana Cecília Campello Pereira Porto Soares

Métodos Geofísicos em Obras Lineares

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Sergio Augusto Barreto da Fontoura

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Franklin Antunes

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

José Araruna Tavares Jr.

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

José Eugênio Leal

Coordenador(a) Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 23 de março de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Ana Cecília Campello Pereira Porto Soares

Formada em engenharia civil, ênfase em geotecnia, pela PUC-Rio em 2005. Durante o curso foi bolsista do PRH-07 da ANP, quando tomou contato pela primeira vez com métodos sísmicos. Engenheira civil da Petrobras desde 2006, trabalha desenvolvendo projetos de faixas de dutos.

Ficha Catalográfica

Soares, Ana Cecília Campello Pereira Porto

Métodos geofísicos em obras lineares / Ana Cecília Campello Pereira Porto Soares ; orientador: Sérgio A. B. da Fontoura. – 2009.

127 f. : il.(color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Geotecnia. 3. Geofísica rasa. 4. Investigação de campo. 5. Perfuração direcional horizontal. 6. Túneis. I. Fontoura, Sérgio A. B. da. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

A todos que de alguma forma me ajudaram ao longo
de todos estes anos de estudo.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais por terem me mostrado que o conhecimento é o que existe de mais precioso, e por terem se esforçado para me dar o que havia de melhor. Conto com vocês na próxima fase. Aos meus irmãos, por aguentarem a sobrecarga nesses últimos 2 anos - agora acabou a desculpa!

Edu, você sabe que teve um papel importante nesse trabalho, não apenas com as revisões, mas também aguentando meus medos e insegurança. Obrigada por todo o apoio e carinho.

Professor Sérgio, obrigada pela confiança e pela paciência com minhas 'idas e vindas'. Sua orientação desde os tempos de graduação me trouxe até aqui.

Aos amigos, que nem sempre se pode ter tão perto quanto se gostaria, agradeço pela amizade. As conversas e os risos – pessoal ou virtualmente – sempre me recuperaram nas horas mais difíceis.

Agradeço à minha avó por todo o carinho e doces maravilhosos para repor as energias.

À minha madrinha, umas das pessoas que mais me fez a clássica pergunta 'E a dissertação?', me lembrando da importância de me esforçar sempre mais, muito obrigada.

A todos os familiares, vocês sabem que para agradecer a cada um individualmente seria necessário escrever quase uma nova dissertação, mas isso não diminui em nada a importância de cada um de vocês. Obrigada por todo o apoio.

Ao pessoal do GTEP, de hoje e de ontem, de quem aprendi tanto. Mércia, Leiderman, Freddy, Shelly, Suzana, Evânia, Olga(s), Nelly, Nelson, Flávia, Bruninha, cada um de vocês teve que me aturar e me ajudou - cada qual à sua maneira - a completar esse trabalho.

À equipe do EDUT, que me ensina uma nova lição a cada dia de nossa divertida convivência – Ralfo, Slow, Tales, Graciela, Dora, Lindemberg, obrigada por me aguentar falando desta dissertação diariamente.

Agradeço em especial à Michelle e ao Jakson, pois foi trabalhando com vocês que entendi melhor o tema que deveria abordar. Essa dissertação também é de vocês.

À Petrobras, por permitir a publicação deste trabalho.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro no início deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil, obrigada pela ajuda a cada vez que eu passava como um furacão pela secretaria.

Em um trabalho de 3 anos, certamente há mais pessoas a quem se deve agradecimentos do que é possível guardar na memória. A todos os que me ajudaram, e por ventura eu tenha esquecido, meu muito obrigada.

Resumo

Soares, Ana Cecília Campello Pereira Porto; Fontoura, Sérgio Augusto Barreto da. **Métodos Geofísicos em Obras Lineares**. Rio de Janeiro, 2009. 127p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O uso de métodos geofísicos nas engenharias civil, de minas e ambiental cresceu significativamente nas últimas décadas, e continua se expandindo na medida em que há uma queda em seus custos, decorrente do maior domínio da metodologia por parte de especialistas, bem como um maior conhecimento das técnicas existentes por parte dos engenheiros, que geralmente são os responsáveis por especificar as técnicas de investigação em um empreendimento. Este trabalho apresenta alguns dos métodos de investigação rasa mais utilizados, analisando-os do ponto de vista de sua aplicação em obras lineares. São analisados ainda alguns casos de estudos realizados, apresentando-se por fim uma sugestão de fluxograma de trabalho a partir das lições aprendidas nestes casos.

Palavras-chave

Geotecnia, Geofísica Rasa, Investigação de Campo, Perfuração Direcional Horizontal, Túneis

Abstract

Soares, Ana Cecília Campello Pereira Porto; Fontoura, Sérgio Augusto Barreto da (Advisor). **Geophysical Methods applied to Linear Constructions.** Rio de Janeiro, 2009. 127p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The use of geophysical methods in Civil, Environmental and Mining Engineering has significantly grown over the past years, and continues to grow due to lower costs, which is a consequence of the greater knowledge by specialists, as well as more access to information on its benefits by engineers, usually the ones to define the survey methods. This piece presents some of the most used methods of shallow investigation, analyzing them based on their applicability on linear structures. Some real cases are presented and studied, and a suggestion of workflow is made based on the lessons learnt on those cases.

Keywords

Geotechnics, Shallow Geophysics, Field Investigation, Horizontal Directional Drilling, Tunnelling

Sumário

1 Introdução	16
1.1. Generalidades	16
1.2. Obras lineares e transporte	16
1.3. Projeto de obras lineares	18
1.4. Levantamentos de Campo	20
1.5. Objetivo	23
1.6. Escopo	23
2 Métodos indiretos para investigação geotécnica	24
2.1. Introdução	24
2.1.1. Potenciais versus Ativos	25
2.1.2. Superfície versus Downhole	25
2.1.3. Planejando uma Aquisição	26
2.2. Métodos sísmicos	27
2.2.1. Sísmica rasa de reflexão	32
2.2.2. Sísmica de refração	36
2.2.3. Sub-bottom profiler	41
2.3. Métodos elétricos e eletromagnéticos	43
2.3.1. Caminhamento elétrico	45
2.3.2. Ground penetrating radar	51
3 Casos e exemplos	56
3.1. O projeto de túneis	56
3.1.1. Apresentação de um caso	60
3.2. Perfuração Direcional Horizontal	74
3.2.1. Caso 1: Rio Paraíba do Sul	78
3.2.2. Caso 2: substituição de trecho	92
4 Conclusões	102
4.1. Casos Estudados	102

4.2. Fluxograma de Investigação	104
4.3. Classificação de maciço	106
5 Referências bibliográficas	107

Lista de figuras

Figura 1: Diversas opções de traçado são estudadas antes da definição final	19
Figura 2: Possibilidade de arranjos em métodos tipo 'downhole'	26
Figura 3: Propagação da onda sísmica (a) Compressional (b) Cisalhante [8]	27
Figura 4: Frequência amostral de Velocidades de Onda P para diferentes litologias (adaptado de [9])	29
Figura 5: Exemplos de Wavelets (a) Morlet (b) Chapéu Mexicano	30
Figura 6: O fenômeno de Faseamento	31
Figura 7: Geometrias de aquisição sísmica 2D	34
Figura 8: Empilhamento em método CMP	34
Figura 9: Esquema de comparação entre onda direta e onda refratada	38
Figura 10: Geometria de aquisição sísmica pelo método de refração	38
Figura 11: Exemplo de software de processamento (a) First Break Picking (b) Tempo versus afastamento para diversas fontes [19]	40
Figura 12: Conceito do método GRM	40
Figura 13: Equipamento SBP da marca Edge Tech [20]	41
Figura 14: Conteúdo de água versus constante dielétrica [21]	45
Figura 15: Equipamento ER 300 de Caminhamento elétrico, com detalhe de instalação do eletrodo no solo	46
Figura 16: Esquema dos pares de eletrodos de corrente (AB) e potencial (MN)	46
Figura 17: Campo elétrico de um ponto de profundidade 'h'	48
Figura 18: Arranjos de eletrodos mais usados	49
Figura 19: GPR modelo Ramac I	52
Figura 20: Uma escavação com TBM (a) Canteiro com anéis pré-moldados (b) Cabeça de corte	57
Figura 21: (a) Escavação mecanizada	

(b) Perfuração para instalação de explosivos [26]	58
Figura 22: Esquema da utilização de enfilagens, com sobreposição para proteger a frente de escavação.	58
Figura 23: Tabela de classificação pelo método Q	60
Figura 24: Diretriz primária para o túnel (em azul) sobre modelo digital de terreno. Em vermelho, lineamento significativo interpretado como dique de diabásio [29]	61
Figura 25: Esquema do projeto, com túnel associado a poço [29]	61
Figura 26: Densidade de lineamentos foto-interpretados na região do túnel [29]	62
Figura 27: Sondagens diretas e indiretas realizadas no emboque [29]	63
Figura 28: Perfil geológico do túnel, fruto do mapeamento realizado [29]	64
Figura 29: Sobreposição do perfil geológico com o levantamento elétrico; destaque para as zonas milonitizadas e com diques de diabásio [29]	65
Figura 30: Seções sísmicas realizadas no emboque, que identificaram 3 zonas distintas [29]	67
Figura 31: Sobreposição de seção de resistividades com camadas sísmicas [29]	68
Figura 32: Sela topográfica à frente do emboque previsto. (adaptado de [29])	69
Figura 33: Zona de baixa resistividade, que parece estar relacionada à sela topográfica [29]	69
Figura 34: Equipamento realizando sondagem SM 05	70
Figura 35: Sobreposição de dados de caminhamento elétrico com sondagens realizadas (adaptado [29])	71
Figura 36: Exemplos de brocas utilizadas para materiais inconsolidados (Mill Tooth, ou dentes fresados) e materiais de maior resistência (TCI, com insertos de Tungstênio). [31]	74
Figura 37: Fases da Perfuração Direcional (A) Furo Piloto (B) Alargamentos (C) Puxamento da coluna	75
Figura 38: Esquema do canteiro no lado da sonda (Rig Side)	77

Figura 39: Esquema do canteiro no lado da coluna de tubos (Pipe Side)	77
Figura 40: Travessia do rio Paraíba do Sul	78
Figura 41: Mapa geológico da região, com a travessia em destaque [32]	79
Figura 42: Sondagens diretas e indiretas realizadas [29]	81
Figura 43: Resultado da análise petrográfica por lâmina delgada [29]	82
Figura 44: Corpos de prova retirados de testemunhos da SM 07 [29]	85
Figura 45: Ponteira de metal utilizada no ensaio CERCHAR [29]	86
Figura 46: Perfil de GPR interpretado [29]	87
Figura 47: Linha transversal interpretada, especial interesse nos sinais hiperbólicos identificados [29]	87
Figura 48: Perfil de Caminhamento Elétrico interpretado, com algumas fraturas inferidas na base do talude [29]	88
Figura 49: Seção de sub-bottom profiler interpretada (adaptada de [29])	89
Figura 50: Mapa de isopacas da travessia do Paraíba do Sul [29]	90
Figura 51: Comparação entre o mergulho do topo rochoso nas margens direita (acima) e esquerda (abaixo). O ângulo de ataque é mais vantajoso na margem direita. [29]	91
Figura 52: Inclinação transversal do topo rochoso [29]	91
Figura 53: Mapa geológico da região das duas travessias [39]	93
Figura 54: Planilha de campo do Rio Mossoró [29]	94
Figura 55: Planilha de campo do Rio Carmo [29]	95
Figura 56: Estudos realizados no Rio Mossoró [29]	97
Figura 57: Resultados de GPR e SBP do Rio Mossoró [29]	97
Figura 58: Estudos realizados no rio Carmo [29]	98
Figura 59: Resultados de GPR e SBP no rio Carmo [29]	98
Figura 60: Perfil geológico-geotécnico do rio Mossoró [29]	100
Figura 61: Perfil geológico-geotécnico do rio Carmo [29]	100
Figura 62: Fluxograma sugerido para investigações geotécnicas	105

Lista de tabelas

Tabela 1: Modais de transporte em relação às principais variáveis logísticas [4]	18
Tabela 2: Técnicas de investigação versus fase de projeto [5]	21
Tabela 3: Correlação entre velocidade sísmica e escavabilidade [12]	29
Tabela 4: Propriedades elétricas dos materiais (adaptada de [21,22])	45
Tabela 5: Estimativa de coeficiente de reflexão (adaptado de [21])	53
Tabela 6: Correlação aproximada entre frequência, penetração do radar e resolução vertical (adaptado de [21,22]). Variabilidade está ligada à velocidade de propagação da onda no material.	54
Tabela 7: Material utilizado na primeira fase de investigação geológico-geotécnica [29]	62
Tabela 8: Correlação entre classe de maciço e os índices RMR e Q [29]	66
Tabela 9: Comprimento inferido para as classes rochosas ao longo do túnel [29]	68
Tabela 10: Classificação geomecânica da sondagem SM 05	73
Tabela 11: Identificação das amostras ensaiadas [29]	83
Tabela 12: Resultados dos diversos ensaios realizados [29]	84
Tabela 13: Resultados dos ensaios CERCHAR [29]	86

- *A Geofísica.*
- *Que é isso?*
- *A Geofísica é a ciência de ver, apalpar, medir as rochas que estão lá no fundo.*
- *Ver, como, se estão lá no fundo?*
- *Ver é modo de dizer. A Geofísica consiste na aplicação de uns tantos princípios da Física, por meio das quais os sábios adivinham o que não podem ver, nem apalpar. Espécie de Raios X do fundo da Terra.*

Monteiro Lobato, em ‘O Poço do Visconde’.