

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	01
1 INTRODUÇÃO.....	01
1.1 OBJETIVOS.....	02
1.2 TRABALHOS ANTERIORES NO CAMPUS DA USP.....	06
1.3 ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS E LOCAIS.....	13
1.3.1 GEOLOGIA REGIONAL.....	14
1.3.2 GEOLOGIA LOCAL.....	17
CAPÍTULO 2	22
2 METODOS GEOFÍSICOS.....	22
2.1 MÉTODO GPR (<i>GROUND PENETRATING RADAR</i>).....	22
2.1.1 HISTÓRICO.....	22
2.1.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	24
2.1.3 TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	33
2.2 MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE.....	38
2.1.1 HISTÓRICO.....	38
2.1.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	38
2.1.3 TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	41
CAPÍTULO 3	47
3 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	47
3.1 DADOS GPR.....	47
3.2 DADOS DE ELETRORRESISTIVIDADE.....	56
3.3 DADOS GEOLÓGICOS.....	62
CAPÍTULO 4	65
4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS.....	65
4.1 DADOS GPR.....	65
4.1.1 IAG/FIS.....	65
4.1.2 IPEN.....	85
4.2 DADOS DE ELETRORRESISTIVIDADE.....	93
4.2.1 IAG/FIS.....	93

4.2.2 IPEN.....	110
CAPÍTULO 5.....	113
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	113
CAPÍTULO 6.....	116
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116
ANEXOS.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Área da Cidade Universitária, Campus da Universidade de São Paulo, com a localização das áreas de pesquisa.....	05
Figura 1.2 – Área de detalhe em frente ao IAG/USP, com a localização das principais aquisições geofísicas.....	06
Figura 1.3 – Área de detalhe próxima ao IPEN, com a localização das principais aquisições geofísicas.....	07
Figura 1.4 – Mapa de Isoespessura de sedimentos da Bacia de São Paulo dentro do campus da Universidade de São Paulo (modificado de Iritani, 1993).....	10
Figura 1.5 – Perfil Sísmico de reflexão realizado em frente ao IAG/USP, mostrando um refletor a 37m de profundidade (SE) mergulhando em direção a NW (Le Diagon, 2000).....	11
Figura 1.6 – Perfil litológico do poço P1, executado em frente ao IAG/USP, na distância 100m no perfil IAG/Física.....	12
Figura 1.7 – Perfil litológico do poço P2, executado em frente ao IAG/USP, na distância 115m no perfil IAG/Física.....	13
Figura 1.8 – Perfil litológico do poço P3, executado em frente ao IAG/USP, na distância 140m no perfil IAG/Física.....	14
Figura 1.9 – <i>Rift</i> Continental do Sudeste Brasileiro e Bacias Associadas (adaptado de Almeida, 1976).....	15
Figura 1.10 – Mapa Geológico da Bacia de São Paulo (Silva, 1999).....	18
Figura 1.11 – Distribuição espacial das formações geológicas na Cidade Universitária baseada no mapeamento realizado por J. M. V. Coutinho, publicado na escala 1:50.000 pela Emplasa (Emplasa, 1984, modificado de Iritani, 1993).....	20
Figura 1.12 – Seção geológica elaborada através da correlação dos 3 poços executados em frente ao IAG/USP.....	21
Figura 1.13 – Seção geológica elaborada com os dados de sondagem a trado executadas na linha IAG/FIS.....	22
Figura 1.14 – Seção geológica elaborada a partir de dados de sondagens a trado realizadas na área próxima ao IPEN.....	23
Figura 2.1 – Diagrama de uma antena transmissora monoestática.....	25

Figura 2.2 – Diagrama de antenas GPR (modo biestático).....	25
Figura 2.3 – a) Procedimento envolvendo movimentos repetitivos das antenas transmissora e receptora com um espaçamento constante entre as antenas; b) Oito traços de GPR esquemáticos mostrando a chegada da onda aérea, da onda direta na Terra e da onda refletida no substrato de subsuperfície	43
Figura 2.4 – Sondagem de velocidade do tipo CMP.....	44
Figura 2.5 – Sondagem de Velocidade do tipo WARR.....	45
Figura 2.6 – Forma de onda típica de um pulso GPR e o respectivo espectro de amplitude (Annan, 1992).....	47
Figura 2.7 – Arranjo Eletródico Schlumberger (Telford <i>et al</i> , 1990).....	36
Figura 2.8 – Esquema de Sondagens dipolares (modificado de Strobino, 2001).....	38
Figura 2.9 – Esquema de arranjo dipolo-dipolo utilizado em caminhamentos elétricos (adaptada de Elis, 1998).....	38
Figura 2.10 – Esquema de configurações eletródicas de sondagens dipolares. a) SDD axial; b) SDD equatorial; e c) SDD azimutal (adaptada de Strobino, 2001).....	39
Figura 2.11 – Forma de plotagem dos dados para construção da seção de resistividade aparente (N = níveis de investigação).....	39
Figura 3.1 – Equipamento RAMAC fabricado pela empresa sueca MALÅ.....	54
Figura 3.2 – Diagrama esquemático de um sistema GPR (adaptada de Gandolfo, 1999).....	46
Figura 3.3 – Croqui da área em frente ao IAG/USP mostrando a localização das investigações geofísicas realizadas com o GPR.....	46
Figura 3.4 – Croqui da área próxima ao IPEN mostrando a localização das investigações geofísicas realizadas com o GPR.....	46
Figura 3.5 – Fluxogramas utilizados no Processamento dos dados GPR: a) aplicado em perfis de afastamento constante, e b) utilizados em sondagens de velocidade.....	51
Figura 3.6 – Equipamento para ensaios de resistividade Iris Syscal R2.....	54

Figura 3.7 – Croqui da área em frente ao IAG/USP mostrando a localização das investigações de eletrorresistividade.....	46
Figura 3.8 – Croqui da área próxima ao IPEN mostrando a localização das investigações de eletrorresistividade.....	46
Figura 3.9 – Croqui da área em frente ao IAG/USP mostrando a localização das investigações geológicas realizadas.....	46
Figura 3.10 – Croqui da área próxima ao IPEN mostrando a localização das investigações geológicas realizadas.....	46
Figura 4.1 – (a) Perfil GPR PERF00-IAG (25MHz), frequência de amostragem de 502,3MHz; 512 amostras por traço; antenas com frequência central de 25MHz; <i>stack</i> de 512; intervalo de medida dos traços de 1,0m; modo de aquisição transversal elétrico (TE); espaçamento entre as antenas de 4,0m. (b) Mesmo perfil com os principais refletores interpretados.....	59
Figura 4.2 – (a) Perfil GPR PERF01-IAG (50MHz), frequência de amostragem de 334,8MHz; 512 amostras por traço; antenas com frequência central de 50MHz; <i>stack</i> de 1024; intervalo de medida dos traços de 0,5m; modo de aquisição transversal elétrico (TE); espaçamento entre as antenas de 2,0m. (b) Mesmo perfil com os principais refletores interpretados.....	60
Figura 4.3 – (a) Perfil GPR PERF02-IAG (100MHz), frequência de amostragem de 1032,7MHz; 512 amostras por traço; antenas com frequência central de 100MHz; <i>stack</i> de 512; intervalo de medida dos traços de 0,5m; modo de aquisição transversal elétrico (TE); espaçamento entre as antenas de 1,0m. (b) Mesmo perfil, com os principais refletores interpretados.....	62
Figura 4.4 – (a) Perfil GPR PERF03-IAG (200MHz), frequência de amostragem de 1701,6MHz; 512 amostras por traço; antenas com frequência central de 200MHz; <i>stack</i> de 512; intervalo de medida dos traços de 0,5m; modo de aquisição transversal elétrico (TE); espaçamento entre as antenas de 0,6m. (b) Mesmo perfil, com os principais refletores interpretados.....	63
Figura 4.5 – Croqui mostrando a localização dos perfis GPR PERF01-PER (50 MHz) e PERF02-PER (100 MHz) realizados perpendicularmente ao Perfil IAG/FIS.....	64
Figura 4.6 – Foto mostrando a aquisição do perfil GPR PERF02-PER (100 MHz).	64

Figura 4.7 – Perfil GPR PERF01-PER (50MHz). a) Refletor inclinado mergulhando em direção ao IAG/USP. b) Mesmo perfil, com o principal refletor interpretado.....	65
Figura 4.8 – Perfil GPR PERF02-PER (100 MHz). a) Refletor inclinado mergulhando em direção ao IAG/USP. b) Mesmo perfil, com o principal refletor interpretado.....	66
Figura 4.9 – a) CMP00, antena com frequência central de 200MHz; e b) Espectro de energia dos refletores identificados na CMP00. Identifica-se a presença de dois refletores, o primeiro a 40ns e outro a 65ns, ambos com a velocidade de 80m/μs (0,08m/ns).....	67
Figura 4.10 – a) CMP40, antena com frequência central de 200MHz; e b) Espectro de energia dos refletores identificados na CMP40. Identifica-se a presença de um refletor hiperbólico a 55ns com a velocidade de 90m/μs (0,09m/ns).....	68
Figura 4.11 – a) CMP60, antena com frequência central de 200MHz; e b) Espectro de energia dos refletores identificados na CMP60. Identifica-se a presença de dois refletores hiperbólicos, o primeiro a 45ns e o segundo a 65ns, ambos com velocidade de 85m/μs (0,085m/ns).....	68
Figura 4.12 – a) CMP90, antena com frequência central de 200MHz; e b) Espectro de energia dos refletores identificados na CMP90. Identifica-se a presença de dois refletores hiperbólicos mais marcantes, o primeiro a 47ns com velocidade de 90 m/μs (0,09m/ns) e o Segundo a 67ns com velocidade de 80m/μs (0,08m/ns).....	69
Figura 4.13 – a) WARR20, antena com frequência central de 50MHz; e b) Espectro de energia dos refletores identificados na WARR20. Identifica-se a presença de um refletor a 100ns com velocidade de 60m/μs (0,06m/ns).....	69
Figura 4.14 – a) WARR110, antena com frequência central de 50MHz; e b) Espectro de energia dos refletores identificados na WARR110. Identifica-se a presença de dois refletores, sendo o primeiro a 100ns com velocidade de 65m/μs (0,065m/ns), e um segundo a 135ns com velocidade de 60m/μs (0,06m/ns).....	70
Figura 4.15 – a) WARR140, antena com frequência central de 50MHz; e b) Espectro de energia dos refletores identificados na WARR140. Identifica-se a presença de um refletor a 120ns com uma velocidade de 60m/μs (0,06m/ns).....	70

- Figura 4.16 – a) WARR170, antena com frequência central de 50MHz; e b) Espectro de energia dos refletores identificados na WARR170. Identifica-se a presença de um refletor a 105ns com uma velocidade de 60m/ μ s (0,06m/ns)..... 71
- Figura 4.17 – (a) Perfil GPR PERF00-IAG (25MHz), mostrando dois refletores inclinados. O primeiro refletor está localizado entre as posições 40 e 100m, em uma profundidade de 8 a 9m, correlacionável a interferência da parede do Instituto de Física. O segundo refletor está localizado a uma profundidade de 10m (NW) mergulhando para 14m (SE), que é correlacionável à uma camada de areia grossa. (b) Mesmo perfil, com os principais refletores interpretados..... 97
- Figura 4.18 – (a) Perfil GPR PERF01-IAG (50MHz), mostrando duas zonas refletoras e dois refletores subhorizontais. A primeira zona (forte reflexão) encontra-se na porção mais superficial ao longo de todo perfil, relacionada ao aterro. A segunda (ausência de reflexão), ocorre logo abaixo da primeira e está relacionada com os sedimentos da Formação São Paulo. O primeiro refletor subhorizontal está localizado a 7,5m de profundidade e é correlacionável com a interferência da parede do Instituto de Física. O segundo refletor está localizado a uma profundidade de 10m (NW) a 12m (SE) e é correlacionável à uma camada de areia grossa. (b) Mesmo perfil, com os principais refletores interpretados..... 98
- Figura 4.19 – (a) Perfil GPR PERF02-IAG (100MHz), mostrando duas zonas refletoras e dois refletores subhorizontais. A primeira zona (forte reflexão) encontra-se na porção mais superficial ao longo de todo perfil, relacionada com o aterro. A segunda (ausência de reflexão), ocorre logo abaixo da primeira e está relacionada com os sedimentos da Formação São Paulo. O primeiro refletor subhorizontal está localizado a 7,5m de profundidade, correlacionável à interferência da parede do Instituto de Física. O segundo refletor está localizado a uma profundidade de 10m (NW) e mergulhando até 12m (SE), e é correlacionável com uma camada de areia grossa. (b) Mesmo perfil, com os principais refletores interpretados..... 99
- Figura 4.20 – (a) Perfil GPR PERF03-IAG (200MHz), mostrando duas zonas refletoras. A primeira zona (forte reflexão) encontra-se na porção mais superficial ao longo de todo perfil, relacionada ao aterro. A Segunda (ausência de reflexão), ocorre logo abaixo da primeira zona e está relacionada aos sedimentos da Formação São Paulo. (b) Mesmo perfil, com os principais refletores interpretados..... 100
- Figura 4.21 – (a) Perfil GPRHU (50MHz), frequência de amostragem de 506,9MHz; 512 amostras por traço; antenas com frequência central de 50MHz; *stack* de 512; intervalo de medida dos traços de 0,5m;

modo de aquisição transversal elétrico (TE); espaçamento entre as antenas de 2,0m. (b) Mesmo perfil, com os principais refletores interpretados.....	73
Figura 4.22 – Croqui da área próxima ao IPEN, mostrando a distância dos objetos em superfície do Perfil GPRHU (50MHz).....	74
Figura 4.23 – a) CMP100P (100MHz); e b) Espectro de energia dos refletores identificados na CMP100P (100MHz). Identifica-se a presença de dois refletores horizontais, o primeiro a 95ns e o segundo a 125ns, ambos com velocidade de 290m/μs (0,29m/ns).....	75
Figura 4.24 – a) CMP100T (100MHz); e b) Espectro de energia dos refletores identificados na CMP100T (100MHz). Identifica-se a presença de dois refletores horizontais, o primeiro a 100ns e o segundo a 145ns, ambos com velocidades de 290m/μs (0,29m/ns).....	76
Figura 4.25 – Croqui mostrando a localização do perfil GPR GPRHU-T (200MHz) realizado perpendicularmente ao Perfil GPRHU (50MHz)	76
Figura 4.26 – a) Perfil GPR GPRHU-T (200MHz) com destaque (linha preta) de um refletor inclinado a 85ns mergulhando em direção a Av. Prof. Lineu Prestes. b) Mesmo perfil, com o principal refletor interpretado.....	77
Figura 4.27 – (a) Perfil GPRHU (50MHz), mostrando duas zonas refletoras, um refletor acompanhando a topografia e inúmeros refletores hiperbólicos. A primeira zona (forte reflexão) encontra-se na porção mais superficial ao longo de todo perfil, relacionada ao aterro. A segunda (ausência de reflexão), ocorre logo abaixo da primeira e está relacionada com uma camada de argila da Formação São Paulo. O refletor que acompanha a topografia está localizado a 3m de profundidade, correlacionável com a interferência da cerca metálica do IPEN. Os refletores hiperbólicos, dispersos ao longo de todo o perfil, são correlacionáveis com as interferências superficiais provocadas pelos postes de iluminação pública. (b) Mesmo perfil, com os principais refletores interpretados.....	102
Figura 4.28 – Dados da SS01-IAG/Física ajustados ao modelo (lado esquerdo) e modelos equivalentes de camadas horizontais 1D (lado direito). O erro de ajuste é de 10,2%.....	79
Figura 4.29 – Modelo Geológico-Geolétrico para os dados da SS01-IAG/Física....	79
Figura 4.30 – Dados da SS02-IAG/Física ajustados ao modelo (lado esquerdo) e modelos equivalentes de camadas horizontais 1D (lado direito). O erro de ajuste é de 11,72%.....	81

Figura 4.31 – Modelo Geológico-Geolétrico para os dados da SS02-IAG/Física....	81
Figura 4.32 – Dados da SDD01-IAG ajustados ao modelo (lado esquerdo) e modelos equivalentes de camadas horizontais 1D (lado direito). O erro de ajuste é de 12,1%.....	83
Figura 4.33 – Modelo Geológico-Geolétrico para os dados da SDD01-IAG.....	83
Figura 4.34 – Dados da SDD02-IAG ajustados ao modelo (lado esquerdo) e modelos equivalentes de camadas horizontais 1D (lado direito). O erro de ajuste é de 13,7%.....	85
Figura 4.35 – Modelo Geológico-Geolétrico para os dados da SDD02-IAG.....	85
Figura 4.36 – Dados da SDD03-IAG ajustados ao modelo (lado esquerdo) e modelos equivalentes de camadas horizontais 1D (lado direito). O erro de ajuste é de 26,7%.....	87
Figura 4.37 – Modelo Geológico-Geolétrico para os dados da SDD03-IAG.....	87
Figura 4.38 – (a) Dados de resistividade aparente do caminhamento elétrico CE-10. (b) Pseudoseção de resistividade aparente do caminhamento elétrico CE-10.....	90
Figura 4.39 – (a) Dados de resistividade aparente do caminhamento elétrico CE-20. (b) Pseudoseção de resistividade aparente do caminhamento elétrico CE-20.....	91
Figura 4.40 – Seção geológica-geolétrica elaborada a partir dos dados de Sondagens Elétricas Verticais com arranjo Schlumberger (SS) e Dipolo-Dipolo (SDD) realizadas em frente ao IAG/Física.....	104
Figura 4.41 – Dados da SS01 – HU/IPEN ajustados ao modelo (lado esquerdo) e modelos equivalentes de camadas horizontais 1D (lado direito). O erro de ajuste é de 5,65%.....	92
Figura 4.42 – Modelo Geológico-Geolétrico para os dados da SS01-HU/IPEN.....	93
Figura 5.1 – Seção geológica elaborada a partir de dados geofísicos (GPR, SS, SDD, Caminhamentos Elétrico e sísmica de reflexão) e geológicos (poços de investigação geológica e furos de sondagem a trado).....	115

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Constante dielétrica (ϵ_r') e condutividade elétrica (σ_0), observadas nos materiais comuns para as frequências utilizadas no GPR (Porsani, 1999).....	28
Tabela 2.2 – Frequência x Profundidade de Penetração (Ramac-Mala, 1997; Porsani, 1999).....	32
Tabela 2.3 – Resistividades médias de algumas rochas (Fernandes, 1984).....	34
Tabela 3.1 – Arranjo Schlumberger utilizado em algumas sondagens elétricas verticais.....	51
Tabela 4.1 – Sondagens de Velocidade CMP e WARR realizadas em frente ao IAG/Física com os refletores identificados e suas respectivas velocidades.....	70

ANEXOS

Anexo 01 – Perfil geológico do furo de sondagem a trado FTIAG01 executado na posição 165,0m na Linha IAG/Física.....	128
Anexo 02 – Perfil geológico do furo de sondagem a trado FTIAG02 executado na posição 60,0m na Linha IAG/Física.....	129
Anexo 03 – Perfil geológico do furo de sondagem a trado FTIAG03 executado na posição 40,0m na Linha IAG/Física.....	130
Anexo 04 – Perfil geológico do furo de sondagem a trado FTIAG04 executado na posição 0,0m na Linha IAG/Física.....	131
Anexo 05 – Perfil geológico do furo de sondagem a trado FTIAG05 executado na posição 20,0m na Linha IAG/Física.....	132
Anexo 06 – Perfil geológico do furo de sondagem a trado FTIAG06 executado na posição 90,0m na Linha IAG/Física.....	133
Anexo 07 – Perfil geológico do furo de sondagem a trado FTIAG07 executado na posição 200,0m na Linha IAG/Física.....	134
Anexo 08 – Perfil geológico do furo de sondagem a trado FTIAG08 executado na posição 180,0m na Linha IAG/Física.....	135
Anexo 09 – Perfil geológico do furo de sondagem a trado FTIAG09 executado na posição 130,0m na Linha IAG/Física.....	136
Anexo 10 – Perfis geológicos dos furos de sondagem a trado FTIPEN01 e FTIPEN02, ambos executados na posição 0,0m do Perfil GPRHU (50MHz).....	137
Anexo 11 – Perfis geológicos dos furos de sondagem a trado FTIPEN03 e FTIPEN04, ambos executados ao longo do Perfil GPRHU (50MHz), o primeiro a 5,0m e o segundo a 50,0m.....	138
Anexo 12 – Perfil geológico do furo de sondagem a trado FTIPEN05 executado ao longo do Perfil GPRHU (50MHz) na posição de 100 metros.....	139
Anexo 13 – Perfis geológicos dos furos de sondagem a trado FTIPEN06 e FTIPEN07, ambos executados ao longo do Perfil GPRHU (50MHz), o primeiro a 199,0m e o segundo a 189,0m.....	140
Anexo 14 – Etapas do processamento utilizado na elaboração da seção GPR do PERF00-IAG (25 MHz).....	141

Anexo 15 – Etapas do processamento utilizado na elaboração da seção GPR do PERF01-IAG (50 MHz).....	142
Anexo 16 – Etapas do processamento utilizado na elaboração da seção GPR do PERF02-IAG (100 MHz).....	143
Anexo 17 – Etapas do processamento utilizado na elaboração da seção GPR do PERF03-IAG (200 MHz).....	144
Anexo 18 – Etapas do processamento utilizado na elaboração da seção GPR do PERF01-PER (50 MHz).....	145
Anexo 19 – Etapas do processamento utilizado na elaboração da seção GPR do PERF02-PER (100 MHz).....	146
Anexo 20 – Etapas do processamento utilizado na elaboração das sondagens do velocidade CMP00 e CMP40.....	147
Anexo 21 – Etapas do processamento utilizado na elaboração das sondagens do velocidade CMP60 e CMP90.....	148
Anexo 22 – Etapas do processamento utilizado na elaboração das sondagens do velocidade WARR20 e WARR110.....	149
Anexo 23 – Etapas dos processamentos utilizado na elaboração das sondagens do velocidade WARR140 e WARR170.....	150
Anexo 24 – Etapas do processamento utilizado na elaboração da seção GPRHU (50MHz).....	151
Anexo 25 – Etapas do processamento utilizado na elaboração da seção GPRHU-T (200MHz).....	152
Anexo 26 – Etapas dos processamentos utilizados na elaboração das sondagens de velocidade CMP100P (100MHz) e CMP100T (100MHz).....	153