UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS
DINÂMICAS DE MATERIAIS GEOLÓGICOS DA RMSP**

Fábio Taioli

Tese apresentada ao concurso para
obtenção do título de Livre-Docente
junto ao Departamento de Geologia
Sedimentar e Ambiental do Instituto de
Geociências da Universidade de São
Paulo, na Área de conhecimento:
Geologia Ambiental

SÃO PAULO
1999

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS
DINÂMICAS DE MATERIAIS GEOLÓGICOS DA RMSP**

Fábio Taioli

Tese apresentada ao concurso para
obtenção do título de Livre-Docente
junto ao Departamento de Geologia
Sedimentar e Ambiental do Instituto de
Geociências da Universidade de São
Paulo, na Área de conhecimento:
Geologia Ambiental

DEDALUS - Acervo - IGC

30900006685

SÃO PAULO
1999

Sumário

	pg.
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivos	7
2. ÁREA DE ESTUDO	8
2.1 Localização da área	8
2.2 Geologia da área	8
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
4. ORGANIZAÇÃO DE BANCO DE DADOS	31
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS	34
5.1 Formação São Paulo	35
5.2 Formação Resende	42
5.3 Solo de Alteração	47
5.4 Embasamento Cristalino	50
5.5 Considerações	51
6. DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA ENSAIO ENTRE-FUROS	52
6.1 Generalidades	52
6.2 Sistema de ensaios "crosshole"	53
6.3 Fonte sísmica	53
6.4 Sensor Triortogonal	67
6.5 Amplificadores e filtros	71
6.6 Conversor analógico-digital	72
6.7 Desenvolvimento de "software" de aquisição	74
6.8 Testes de campo	75
6.9 Custo do sistema	75
7. CONCLUSÕES	79
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

LISTA DE FIGURAS

Figura		pg
1	Mapa de localização da área de estudo.	9
2	Mapa geológico simplificado da RMSP (Silva, 1999).	10
3	Relações entre a litoestratigrafia e a tectônica no Rift Continental do Dueste do Brasil (Riccomini, 1989, modificado; Riccomini & Coimbra, 1992).	13
4	Tipos de configurações instrumentais que podem ser utilizadas para os ensaios SASW. (Gucunski & Woods, 1991).	19
5	Procedimento de campo utilizando-se a geometria do ponto médio para ensaios SASW. (Hiltinen & Woods, 1990, <i>apud</i> Gucunski & Woods, 1991)	20
6	Procedimento de campo utilizando-se a geometria da fonte comum para ensaios SASW. (Hiltinen & Woods, 1990, <i>apud</i> Gucunski & Woods, 1991)	20
7	Curva de dispersão gerada a partir dos dados de campo obtidos em ensaio SASW em solo, utilizando diversos espaçamentos entre sensores. (Stokoe <i>et al.</i> , 1991).	22
8	Curva de dispersão "alisada" gerada a partir dos dados obtidos no campo e apresentados na Figura 4. (Stokoe <i>et al.</i> , 1991).	22
9	Comparação entre as curvas de dispersão obtidas teoricamente e experimentalmente. (Stokoe <i>et al.</i> , 1991).	23
10	Exemplo mostrando o procedimento de inversão, onde vários modelos de perfil de subsolo foram propostos. (Stokoe <i>et al.</i> , 1991).	24
11	Comparação entre perfis de velocidades das ondas s determinadas por SASW e "crosshole", no mesmo local. (Stokoe <i>et al.</i> , 1991).	24
12	Esquema instrumental utilizado para ensaios "crosshole" (Dourado, 1984).	25
13	Comportamento observado para a camada de argila siltosa na área da estação Vila Madalena do Metro de São Paulo (Sobral <i>et al.</i> , 1993).	29

Figura		pg
14	Exemplo de ficha cadastral contendo os dados disponíveis.	33
15	Correlação entre velocidade de ondas <i>s</i> e altitude dos ensaios na Formação São Paulo.	36
16	Correlação entre velocidade de ondas <i>s</i> e profundidade dos ensaios na Formação São Paulo.	37
17	Correlação entre velocidade de ondas <i>s</i> e profundidade dos ensaios até 10 metros na Formação São Paulo, na Rua 13 de Maio.	37
18	Correlação entre velocidade de ondas <i>s</i> e profundidade dos ensaios até 10 metros na Formação São Paulo, na região da Vila Madalena.	38
19	Correlação entre velocidade de ondas <i>s</i> e profundidade dos ensaios até 18 metros na Formação São Paulo, na região da Vila Madalena.	39
20	Comparação entre as velocidades de ondas <i>s</i> e a seção-tipo da Formação São Paulo, conforme descrita por Suguio & Barbour, 1969 e definida por Riccomini, 1989.	41
21	Correlação entre velocidade de ondas <i>s</i> e altitude dos ensaios na Formação Resende.	43
22	Correlação entre velocidade de ondas <i>s</i> e profundidade dos ensaios na Formação Resende.	43
23	Correlação entre velocidade de ondas <i>s</i> das camadas de argila e altitude dos ensaios na Formação Resende.	44
24	Correlação entre velocidade de ondas <i>s</i> das camadas de areia e altitude dos ensaios na Formação Resende.	44
25	Correlação entre velocidade de ondas <i>s</i> das camadas de argila e profundidade dos ensaios na Formação Resende.	46
26	Correlação entre velocidade de ondas <i>s</i> das camadas de areia e profundidade dos ensaios na Formação Resende.	47
27	Correlação entre velocidade de ondas <i>s</i> e altitude dos ensaios no solo de alteração da Região Metropolitana de São Paulo.	49
28	Correlação entre velocidade de ondas <i>s</i> e profundidade dos ensaios no solo de alteração.	49
29	Correlação entre velocidade de ondas <i>s</i> e profundidade dos ensaios no embasamento cristalino.	50

Figura		pg
30	Desenho mecânico do batedor superior.	55
31	Desenho mecânico do batedor inferior.	56
32	Desenho mecânico dos tubos guias superiores.	57
33	Desenho mecânico dos tubos guias inferiores.	57
34	Desenho mecânico do batente inferior.	58
35	Desenho mecânico parcial do batente superior.	59
36	Desenho mecânico complementar do batente superior.	60
37	Desenho mecânico do centralizador superior.	61
38	Desenho mecânico do centralizador inferior.	62
39	Desenho mecânico do tubo interno.	63
40	Visão em perspectiva da fonte sísmica, mostrando o sistema pneumático de fixação, batedor e batente superiores.	63
41	Detalhe da saída do sinal de sincronismo e entrada de ar comprimido na fonte sísmica.	64
42	Diagrama esquemático de circuito opcional para sinal do "trigger" quando do uso de longos (maiores de 50 m) comprimentos de cabo.	65
43	Visão explodida do sensor triortogonal, mostrando o tubo de invólucro, unidade sensora e ponteira superior.	67
44	Unidade sensora do sensor triortogonal, composto das cerâmicas piezoelétricas, pré-amplificadores e conexão elétrica.	68
45	Diagrama elétrico do circuito do pré-amplificador do sensor desenvolvido.	69
46	Placa de circuito impresso desenvolvida, para acomodar dois pré-amplificadores. Face dos componentes.	70
47	Placa de circuito impresso desenvolvida, para acomodar dois pré-amplificadores. Face de soldagem.	70
48	Registro de campo obtido em ensaio "crosshole" utilizando o sensor triortogonal desenvolvido.	76
49	Registro devidamente interpretado onde é possível observar a chegada da onda <i>p</i> e da onda <i>s</i> (esta, com mudança de fase provocada pela inversão de polarização da fonte sísmica).	76

AGRADECIMENTOS

Para o desenvolvimento deste trabalho diversas pessoas e entidades colaboraram, a quem o autor deseja agradecer.

Ao Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto, Chefe do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental, pelo apoio, críticas, sugestões e discussões técnicas que vêm de longa data.

Ao Prof. Dr. Cláudio Riccomini, Vice-Chefe do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental, pelo apoio e disponibilidade para sanar as dúvidas a respeito dos materiais da RMSP e lançar intrigantes questões.

À Profa. Dra. Marta Silvia Maria Mantovani, Vice-Diretora do Instituto Astronômico e Geofísico da USP, pelo apoio e estímulo sempre positivo.

A todos os colegas professores do Instituto de Geociências - USP pelo constante apoio e estímulo.

Ao MSc. Adriano Marchioreto pelos aprimoramentos no "software" de aquisição.

Aos funcionários técnicos e administrativos do Instituto de Geociências da USP que vêm contribuindo com as atividades do autor e colaboraram para que os prazos estipulados fossem cumpridos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pelo auxílio financeiro através do Processo 96/2225-2 e ao Conselho Nacional de Pesquisas - CNPq, através de Bolsa de Produtividade em Pesquisa, Processo 300.364/96-2.

Finalmente, à minha esposa Isabel, que apoiou e deu todo o suporte para que esta tese pudesse ser concluída, e à minha filha Juliana que, mesmo temporariamente distante, tem estado sempre próxima.

RESUMO

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) é a maior concentração urbana do país, com população de mais de 17.200.000 habitantes, ocupa uma área de 8051 km², e tem um crescimento demográfico de cerca de 200.000 habitantes anualmente. Para acompanhar a necessidade de oferecimento de infraestrutura básica para esta população, têm-se adotado, a exemplo de outros centros urbanos no mundo, a utilização do espaço subterrâneo, a despeito das dificuldades que tais obras encerram.

Este trabalho objetivou, baseado em um banco de dados elaborado especificamente para este fim, apresentar uma análise crítica das propriedades elásticas dinâmicas de alguns materiais presentes na RMSP, como subsídio ao uso e ocupação racionais do meio físico, à luz do conhecimento geológico atual da região.

Foram analisados dados sobre as Formações São Paulo e Resende, no contexto da Bacia Sedimentar de São Paulo, e dados de solos saprolíticos e embasamento cristalino.

Os dados da Formação São Paulo apresentaram melhor correlação entre os valores de velocidades de propagação de ondas *s* versus altitude e profundidade.

Os demais materiais apresentaram baixa correlação entre esses parâmetros devido tanto ao pequeno universo de amostras, como às suas intrínsecas heterogeneidades.

Com o objetivo de aumentar o universo de ensaios para determinação das propriedades elásticas dinâmicas, atualmente demasiado dispendiosos para serem adotados rotineiramente, foi desenvolvido e testado um sistema para execução de ensaios "crosshole", de baixo custo instrumental e que, por utilizar furos de sondagem a percussão (SPT), normalmente executados na construção civil, possível de ser utilizado nas obras convencionais.

O sistema desenvolvido é composto de uma fonte sísmica otimizada para a geração de ondas *s*, de sensor piezoelétrico triortogonal, além do sistema de aquisição e tratamento dos dados.

Finalmente conclui-se que, apesar da quantidade de informações sobre as propriedades elásticas dinâmicas dos materiais da RMSP ser extremamente pequena, considerando-se sua importância, tanto econômica como social, é possível que, com a adoção do sistema desenvolvido, em pouco tempo seja possível ter um universo de dados que permita a elaboração de correlações consistentes.

ABSTRACT

The São Paulo Metropolitan Region (RMSP) is the major urban concentration in Brazil. With a population of more than 17.200.000 inhabitants, and na area of 8051 km², it has na annual demographic increment of 200.000 inhabitants. In order to accomplish the demand for basic infrastructure for such a population, it has been exploited, like other urban areas in the world, the underground space, despite the difficulties inherent to such option.

The first objetive of this thesis was to analyze, based on a database, the dynamic elastic properties of the materials present in RMSP, in the light of the new geological knowledge.

Data obtained from in situ measurements were selected according to RMSP geological formations, and analyzed statistically, in order to correlate the propagation velocities of the *s* waves with both altitude and depth. Due to the lack of representative number of samples, only the bedrock, the saprolitic soil and São Paulo and Resende Formations were studied.

Only the data of the São Paulo Formation presented good correlation between *s* wave velocity *versus* altitude and depth. The others units yielded poor correlations due to the relatively small sample number and to their intrinsic heterogeneities

In order to overcome this problem, a seismic crosshole system was developed. This system, composed of a borehole seismic source and a triortogonal piezoelectric sensor, is able to undertake measurements in the standard borehole (SPT) currently used in the investigation phase for foundation of civil and works.

Despite the economic and social importance of RMSP, the data on dynamic elastic properties of its rock mass is still poor. It is expected that the seismic crosshole system developed will make the acquisition of a more representative data universe possible, thus enabling more consistent correlations.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Nas últimas décadas, a acentuada migração para os centros urbanos tem provocado uma enorme concentração demográfica em cidades que não dispõem de condições de atender de maneira satisfatória essa imensa massa humana. Como exemplo, pode-se citar a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) cujo crescimento demográfico médio é da ordem de 200.000 novos habitantes por ano. Este incremento populacional permite afirmar que, para o atendimento satisfatório em termos de infraestrutura básica, equivale a construir uma cidade de médio porte por ano.

Nestes centros urbanos, a ocupação e uso do solo se apresentam de forma pouco criteriosa, acarretando graves problemas, uma vez que este processo se dá sem considerações técnicas quanto às reais possibilidades das áreas a serem ocupadas. As diferenças sociais marcantes nos centros urbanos levam a três origens diferentes de agressões ao meio físico.

De um lado, ocorre a instalação de habitações clandestinas em zonas consideradas de alto risco para ocupações, ocasionando instabilidade e erosão das encostas e conseqüente assoreamento dos córregos, com agravamento do quadro de enchentes no período de verão, principalmente nas zonas periféricas dos centros urbanos. Este quadro cria enorme tensão social e obriga o poder público a oferecer, em caráter emergencial, habitações alternativas a estas famílias, normalmente após acidentes graves.

Na outra extremidade da cadeia social, as dificuldades e limitações do meio físico são também normalmente ignoradas, ou enfrentadas com obras de alto custo e comportamento e desempenho duvidosos.

Ao mesmo tempo, com o acelerado crescimento, principalmente em direção às áreas periféricas da cidade, e com o adensamento demográfico, o Poder Público é levado a implantar infraestrutura (saneamento, obras viárias, comunicação, energia, iluminação pública, aterros sanitários, etc.) em pontos cada vez mais distantes e a uma velocidade cada vez maior. Esta implantação, muitas vezes, desrespeita as possibilidades das áreas utilizadas.

Paralelamente, com esse avanço do núcleo urbano para as regiões periféricas, freqüentemente atinge-se áreas já degradadas pela operação de minerações ou de agricultura intensiva, que contaminaram tanto o solo como os recursos hídricos, ou causaram danos irreparáveis à paisagem pela ação da erosão, assoreamento ou pela presença de cavas, lagoas de decantação, ou ainda "lixões" abandonados.

Em contrapartida, observa-se uma crescente preocupação, tanto do poder público como das próprias comunidades, com a preservação e proteção do meio ambiente. Essa preocupação se consolida pela edição de leis de proteção ambiental e pela fiscalização para seu efetivo cumprimento. Paradoxalmente, a própria aplicação dessas ações tem limitado as possibilidades para implantação de obras de infraestrutura e de grandes empreendimentos. Isto tem levado, a exemplo do que ocorre em diversos países do exterior, a se adotar cada vez mais a utilização do espaço subterrâneo.

A Geologia, e em particular a geologia de engenharia, tem desempenhado papel de importância, fornecendo subsídios tanto para o planejamento do uso e ocupação do solo, como na melhor definição dos parâmetros geológicos e geotécnicos para as obras de engenharia. No entanto, com a crescente utilização do espaço subterrâneo, faz-se necessário desenvolver e otimizar técnicas indiretas de mapeamento geológico-geotécnico, uma vez que as sondagens fornecem dados pontuais, insuficientes principalmente em áreas de maior complexidade geológica ou nas bordas das bacias sedimentares.

Outro aspecto de extrema importância e que não tem recebido a devida importância é o monitoramento, tanto de desempenho de obras implantadas, quanto de evolução ambiental.

Paralelamente, o planejamento do uso e ocupação do solo vem sendo objeto de preocupação dos cientistas da Terra desde a década de 50. No Brasil, essa preocupação começou a surgir na década de 70, principalmente nas Universidades e Centros de Pesquisas (e.g. Coulon, 1974; Prandini, 1974; Prandini *et al.*, 1974, Prandini, 1976; Maciel Filho, 1978).

Na década de 80 começaram a surgir livros textos de Geologia de Engenharia com uma visão mais abrangente, onde é levado em consideração o aspecto ambiental (e.g. Rahn, 1986; Archer *et al.*, 1987; Keller, 1996).

Hoje, observa-se que grande número de profissionais tem se formado e se encaminhado para atuar nessa área. É comum encontrarmos geólogos atuando em projetos de aterros sanitários, projetos de irrigação, na avaliação de processos de contaminação, obras de grande e pequeno portes, além daquelas atividades tradicionais (indústria do petróleo e mineração).

Qualquer que seja a área de atuação do geólogo, uma atividade básica e de extrema importância tem sido o correto e detalhado mapeamento, tanto litológico como estrutural.

Nos últimos 40 anos, desde o início do ensino de Geologia no Brasil, o conhecimento geológico do território vem se acumulando, tendo permitido a elaboração de mapas do país nas escalas 1:5.000.000 e 1:1.000.000. Vários estados já possuem seus mapas em escala 1:500.000, ou mesmo cartas geotécnicas em escala 1:250.000. O Município de São Paulo, em particular, dispõe de carta geotécnica em escala 1:25.000 (Prandini *et al.*, 1992), porém, sem base geológica compatível. Estes mapas têm servido como uma primeira base de dados para os trabalhos de maior detalhe.

Para que sirvam de base para o planejamento de uso e ocupação territorial e como instrumento de elaboração de plano diretor dos municípios, o mapeamento deve ser realizado em escalas maiores, por exemplo 1:20.000 ou 1:10.000, sendo que alguns municípios já dispõem destas cartas (Prandini *et al.*, 1992). Na área de Geologia de Engenharia, o mapeamento é feito em uma escala de obra, ou seja, com detalhes mapeáveis em escala de 1:2.000 a 1:500, dependendo da obra de interesse.

É interessante notar que a grande maioria dos trabalhos realizados até hoje no país com tais objetivos tem se baseado quase que exclusivamente em técnicas de pequena escala (sensoriamento remoto, radar, fotos aéreas) e em observações diretas, ou seja, no mapeamento de superfície por meio da descrição de afloramentos e testemunhos de sondagens.

Isto tem causado erros de avaliação dos custos de execução de obras que podem atingir muitas vezes o próprio valor estimado para a obra. Exemplo clássico foi o problema de investigação que ocorreu nas fundações da usina nuclear de Angra dos Reis, onde o substrato rochoso localizava-se abaixo do nível inicialmente admitido, obrigando a reforçar sensivelmente as fundações da usina (este fato foi amplamente divulgado na imprensa). Outro exemplo ocorreu na construção do canal de fuga da

barragem de Mogi Guaçu, onde uma grande quantidade de matações onerou sensivelmente a escavação do canal (Taioli, 1992). Em outros casos, a dificuldade de se avaliar a espessura de determinadas litologias tem obrigado a implantação de projetos extremamente superdimensionados.

Mais recentemente, fruto, de um lado, de uma maior conscientização da necessidade de preservação ambiental, e de outro motivado pela ocorrência de acidentes provocados muitas vezes pelo próprio adensamento demográfico em áreas impróprias para o uso, tornou-se necessário mapear a subsuperfície com um detalhe impossível de ser obtido por utilização exclusiva de sondagens exclusivamente. Como casos históricos podem ser lembrados o acidente ocorrido em Cajamar (SP), cidade localizada em terreno cárstico, com a posterior necessidade de delimitar as áreas de risco iminente, e os problemas enfrentados na cidade de Criciúma, polo carbonífero de Santa Catarina, cujo vetor de expansão localiza-se sobre áreas mineradas desde o século passado, e sem o menor controle das subsidências em subsuperfície (Fernandes, 1999).

Em resumo, o adensamento demográfico caracterizado pela concentração urbana, paralelo a um uso mais intenso das áreas cultiváveis, tem provocado um acréscimo de acidentes geológicos e o uso indiscriminado do solo. Isto somado à crescente poluição, no campo, gerada pela utilização de defensivos agrícolas em larga escala, e nos centros urbanos pela necessidade de maiores áreas para disposição de lixo domiciliar e industrial.

Paralelamente à evolução dos cursos de Geologia, diversos desenvolvimentos tecnológicos e metodológicos vêm ocorrendo, principalmente no exterior. Estes métodos podem ser classificados como de alta resolução, uma vez que objetivam mapear detalhes geológicos de importância e compatíveis com a escala de trabalho necessária à implantação de obras em áreas urbanas.

Uma evolução digna de nota tem sido a da resolução das imagens de satélites, que hoje chega a menos de 30 metros, e consiste em uma ferramenta importantíssima em qualquer estudo de planejamento de uso e ocupação do meio físico (Keller, 1996).

A disponibilidade de cartas geotécnicas do Estado de São Paulo, Região Metropolitana de São Paulo e de diversos municípios de São Paulo e do Brasil, assim como algumas cartas de planejamento do uso do solo, evidenciam a existência de uma

metodologia já consolidada no meio técnico do país. Hoje é claro que, sendo o solo a camada superficial da crosta a que mais tem sofrido com as ações antrópicas (Oliveira, 1990), é a que deve ser estudada com mais cuidado e detalhe, tanto para fins de proteção quanto de correção. Entretanto, o estudo desta camada, particularmente em áreas urbanas, traz novos desafios técnicos.

Essa tendência tem sido observada internacionalmente, haja visto o aumento do número de participantes dos SAGEEP (Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems), simpósios anuais que em seu primeiro ano (1989) contou com cerca de 120 participantes, número que cresceu exponencialmente para 600 em 1997. Ao mesmo tempo, a EEGS (Environmental and Engineering Geophysical Society) criada em 1993, já contava, no final de 1994, com cerca de 660 associados. Paralelamente, a SEG (Society of Exploration Geophysicists), atenta à nova demanda, criou uma seção especial dedicada à "geofísica rasa" (near-surface geophysics) cuja atividade vem crescendo anualmente.

Sternberg (1995) aponta que o esforço mundial de limpeza e recuperação do meio ambiente irá requerer um aprofundamento das técnicas geofísicas de alta resolução.

Evidentemente, outras técnicas de mapeamento de detalhe deverão ocupar papel de destaque, valendo ressaltar os ensaios "cross-hole", diagrfias instantâneas, televisionamento de furos de sondagens, ensaios de permeabilidade em 3D "in situ", etc. (Taioli et al., 1993). Ao mesmo tempo, diversos autores (e.g. Zuquette *et al.*, 1993; Camargo & Dobereiner, 1993; Gripp, 1993; Carvalho, 1993) têm alertado para a necessidade de uma caracterização geológico-geotécnica de detalhe para a implantação de obras subterrâneas, ressaltando que uma das técnicas mais promissoras deverá ser a geofísica.

As técnicas de mapeamento de detalhe cujas aplicações têm experimentado crescimento acentuado são a sísmica de reflexão de alta resolução e o GPR ("ground penetrating radar").

A utilização da sísmica de reflexão de alta resolução se deve a dois fatores principais, quais sejam: primeiro, a rápida evolução tecnológica ocorrida nos últimos anos, permitindo a miniaturização dos equipamentos, decréscimo no custo e a possibilidade de interface com computadores pessoais; segundo, a disponibilidade de

sistemas de processamento de dados desenvolvidos originalmente para a indústria de petróleo, e que se tornaram acessíveis para uso em microcomputadores, e a baixos custos (Taioli, 1992).

A técnica do GPR, diferentemente da sísmica, é mais recente. Foi desenvolvida nos anos 80, tendo surgido equipamentos comerciais somente na segunda metade dessa década. Esta técnica, apesar de se basear na propagação e reflexão de ondas eletromagnéticas (entre 4 MHz e 1 GHz), utiliza os mesmos sistemas de processamento sísmico, e, conseqüentemente, a imagem final gerada é bastante semelhante. Isto tem contribuído para sua acelerada popularização. Sua aplicação tem se mostrado eficaz na solução de problemas em diversas áreas tais, como engenharia, geologia de engenharia, neotectônica, estudos estratigráficos, arqueológicos, de mineração, túneis, água subterrânea e detecção e monitoramento de poluição ambiental (e.g. Davis and Annan, 1992).

A introdução desta técnica no Brasil foi muito questionada no início, sob a alegação de que ela não funcionaria devido à alta condutividade elétrica dos solos que recobrem o território brasileiro. No entanto, várias aplicações de GPR obtiveram sucesso e foram recentemente reportadas (e.g. Porsani, 1995; Sauck *et al.*, 1995a, Sauck *et al.*, 1995b e Porsani, 1999).

Outras técnicas têm merecido uma atenção especial nos últimos anos, devendo-se ressaltar as de levantamento das características de comportamento dos maciços, quais sejam, ensaios de bombeamento em 3D, para determinação do elipsóide de permeabilidade, ensaios "crosshole" e análise espectral de ondas de superfície (SASW - "spectral analysis of surface waves"), para determinação das propriedades elásticas dinâmicas de maciços tanto rochosos como de solo, tomografias, etc. Estas técnicas têm o mérito de quantificarem parâmetros utilizáveis imediatamente nas obras de engenharia.

Em zonas urbanas, a crescente necessidade de se utilizar o espaço subterrâneo, onde as exigências de projeto limitam o nível de deformações admissível, obrigam o bom conhecimento do comportamento do maciço a ser afetado pela obra.

Dentro deste cenário, a determinação dos parâmetros elásticos dinâmicos dos materiais geológicos presentes nas regiões urbanas tem grande importância para a engenharia de fundações, uma vez que para o dimensionamento da estrutura são

considerados e calculados eventuais efeitos (ou esforços) devidos a vibrações, sejam eles causadas por razões naturais (terremotos, ondas, marés) ou por causas antrópicas (e.g. tráfego, explosões, operação de máquinas, motores, etc.). adiciona-se a tais fatores, a possibilidade de, a partir da determinação desses parâmetros, calcular a deformação que os materiais sofrerão quando solicitados estaticamente.

1.1. Objetivos

Este trabalho buscou sistematizar os dados conhecidos das propriedades elásticas dinâmicas de diferentes litotipos presentes na Região Metropolitana de São Paulo, adicionalmente apresentando o desenvolvimento de sistema para execução de ensaios "crosshole", a baixo custo, de forma a possibilitar uma maior utilização e popularização deste ensaio e, conseqüentemente, promover um melhor conhecimento dessas propriedades.

Potanto, o presente trabalho objetivou abranger os seguintes aspectos:

1. apresentar um resumo do conhecimento de propriedades elásticas dinâmicas de materiais naturais presentes na Bacia Sedimentar de São Paulo, à luz do conhecimento geológico atual;
2. analisar criticamente os dados disponíveis sobre as propriedades elásticas;
3. apresentar o desenvolvimento de novo sistema de medida de propriedades elásticas dinâmicas "in situ"; visando minimizar o custo de execução e uma maior popularização do ensaio para sua determinação.

2. ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização da área

A área de estudo situa-se geograficamente entre os paralelos 23° 15' e 24°00' de latitude sul e os meridianos 47°00' e 45°45' de longitude oeste, compreendendo a designada Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), constituída pelo município de São Paulo, propriamente dito, e mais 37 municípios que o circunvizinham, conforme mostra a Figura 1. Tem uma população estimada de 17.218.461 de habitantes, distribuídos em uma área de 8051 km². É, sem dúvida, a maior aglomeração demográfica do Brasil, com aproximadamente 2138 habitantes/km², e taxa de crescimento populacional de 1,45 % ao ano (1991 a 1996). Desta população, cerca de 97% vive em áreas urbanas (<http://www.seade.gov.br> - 24/06/1999).

2.2 Geologia da área

O conhecimento geológico da área da Região Metropolitana de São Paulo cresceu sensivelmente, após 1980, por ocasião da Mesa Redonda "Aspectos Geológicos e Geotécnicos da Bacia Sedimentar de São Paulo", promovida pela Sociedade Brasileira de Geologia - SBG e Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE. Doze anos depois, em 1992, as mesmas Sociedades em conjunto com a Associação Brasileira de Águas Subterrâneas - ABAS promoveram novo Seminário sobre "Problemas Geológicos e Geotécnicos da Região Metropolitana de São Paulo". A comparação entre os artigos das publicações geradas em ambos eventos torna clara essa evolução do conhecimento geológico da área.

A RMSP está assentada principalmente sobre terrenos pré-cambrianos. A cidade de São Paulo, por outro lado, localizada aproximadamente na área central da RMSP, assenta-se em sua maior parte, sobre a Bacia Sedimentar de São Paulo (Figura 2).

Os terrenos pré-cambrianos, que circundam a Bacia Sedimentar de São Paulo, incluem ampla variedade de granitos, gnaisses, xistos, anfíbolitos, milonitos e rochas metassedimentares predominantemente pelito-psamíticas e, mais localmente, psefíticas e carbonáticas (Coutinho, 1980).

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo

Figura 2 – Mapa geológico simplificado da RMBSP (Silva, 1999).

A Bacia Sedimentar de São Paulo, de idade Cenozóica, compreende os depósitos terciários da Bacia de São Paulo e as coberturas aluviais mais recentes, de idade Quaternária, desenvolvidas ao longo dos principais rios que drenam a região. Está associada ao contexto do Rift Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini, 1989), sendo que os terrenos sedimentares são subdivididos conforme as Formações Resende, Tremembé, São Paulo e Itaquaquecetuba, além das unidades quaternárias já citadas. As maiores espessuras de sedimentos terciários encontram-se ao norte da área, em Guarulhos, e a leste, nos bairros da Moóca, Tatuapé e Vila Formosa, com mais de 170m (Riccomini & Coimbra, 1992).

A formação Resende é representada por um sistema de leques aluviais associados à planície aluvial de leques entrelaçados, de idade oligocênica, compreendendo rochas rudáceas sustentadas por matriz lamítica de coloração no geral esverdeada quando não alterada, e conglomerados com seixos e matações nas porções proximais dos leques, em associação lateral e interdigitados com lamitos arenosos, de coloração predominantemente esverdeada, e níveis conglomeráticos nas porções mais distais. Na planície fluvial predominam arenitos com estratos cruzados em forma de lençol (Riccomini, 1989, Riccomini & Coimbra, 1992).

A formação Tremembé, de idade oligocênica e origem lacustre, compreende camadas tabulares de argilas verdes maciças, intercaladas com argilas cinza-escuro a preta, ricas em matéria orgânica, ambas de espessura decimétrica. Sua espessura supera os 60 m, apesar de não aflorar na BSSP (Riccomini & Coimbra, 1992).

A Formação São Paulo aflora principalmente na região do espigão central da cidade, e secundariamente na região oeste. Outros pequenos afloramentos estão presentes na região norte, leste e central. Corresponde a depósitos de sistema fluvial meandrante, constituída por duas litofácies. A primeira encerra arenitos grossos, conglomeráticos com granodecrescência ascendente para siltitos e argilitos, correspondendo a depósitos de canais meandantes. A segunda constitui-se por arenitos de granulação média a grossa, com granodecrescência ascendente para arenitos finos, siltito e argilito, correspondendo a depósitos de planície de inundação. Esta formação atinge espessura de até 70 m (Riccomini & Coimbra, 1992), sendo que processos intempéricos geram horizontes de couraças ferruginosas (Sigolo & Ohnuma, 1996).

A Formação Itaquaquetuba corresponde aos depósitos de sistema aluvial entrelaçado que ocorrem sob os aluviões holocênicos dos rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí. Constitui-se por leques aluviais com conglomerados, blocos e matacões em matriz arenosa associados à planície aluvial com canais entrelaçados. Sua espessura pode atingir até 170m. (Riccomini & Coimbra, 1992).

As coberturas neocenoicas constituem-se em depósitos colúvio-aluviais de pequena espessura (máximo de 10 m) e distribuição restrita ao longo das várzeas e baixos terraços.

Registros de tectonismo sin e pós-sedimentar são presentes, sendo correlacionados ao contexto do Rift Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini, 1989, Riccomini & Coimbra, 1992). A Figura 3 apresenta as relações cronológicas entre a litoestratigrafia e a tectônica no Rift Continental do Sudeste do Brasil, segundo Riccomini (1989) e Riccomini & Coimbra (1992).

Por outro lado, as classificações geotécnicas dos materiais presentes na RMSP separam os materiais basicamente com respeito à sua cor e granulometria (e.g. Vargas, 1992), tendendo a considerar os estratos como sendo plano-paralelo-horizontais, a despeito do conhecido tectonismo que afetou toda a área.

Rocha & Celestino (1992) apresentam um resumo da estratigrafia utilizada até então no meio geotécnico, constituída por seis "camadas":

1. "Areias Basais" - localizadas sob as atuais drenagens e sobre o embasamento pré-cambriano, abaixo da cota 715m;
2. "Areias e Argilas" - cinzentas e esverdeadas (TAGUÁ) - localizadas nos fundos dos vales, com poucos afloramentos, quase sempre abaixo do atual nível de base das drenagens principais;
3. "Camadas Intermediárias" de areias argilosas e argilas arenosas variegadas localizadas entre as cotas 715 e 790 m, sempre a meia encosta dos espigões;
4. "Argilas Vermelhas Rijas" - ocorrendo sob as camadas de argilas porosas entre as cotas 710 e 800 m;
5. "Argilas Porosas Vermelhas" - localizadas nos topos dos espigões entre as cotas 790 e 820 m;

6. "Aluviões Antigos dos Rios Tietê e Pinheiros" - ocorrendo sob os aluviões quaternários dos rios Tietê e Pinheiros, principalmente na região de Itaquaquecetuba.

Rocha & Celestino (1992) afirmam, ainda, que o modelo geológico proposto por Riccomini (1989) tem se mostrado bastante coerente com as observações de campo, principalmente nos afloramentos criados pelas escavações de túneis para o Metropolitano de São Paulo.

Em contrapartida, no meio geotécnico, os termos definidos pelas seis "camadas" ainda são de uso corrente (e.g. Vargas, 1992, Cozzolino *et al.*, 1994, Rocha, 1995 e Cozzolino, 1996), principalmente devido ao grande número de dados e correlações desenvolvidas nas últimas décadas utilizando tal classificação.

Fica claro, portanto, que estudos e correlações que considerem o novo conhecimento geológico-geotectônico da RMSP carecem de serem efetuados, fato este já levantado por Rocha & Celestino (1992) e Cozzolino *et al.* (1994).

Figura 3 - Relações entre a litoestratigrafia e a tectônica no Rift Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini, 1989, modificado; Riccomini & Coimbra, 1992).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os parâmetros elásticos dinâmicos de solos e rochas podem ser determinados tanto em ensaios efetuados em laboratório como em medidas "in situ".

Os ensaios em laboratório são executados sobre amostras pontuais, não deformadas, obtidas na área de interesse, dependendo, portanto, da possibilidade de acesso à profundidade de interesse e disponibilidade de amostra. Ao mesmo tempo, permitem um maior controle sobre as características do ensaio, uma vez que é possível controlar as deformações que serão impostas à amostra durante o ensaio. Porém, sua representatividade irá depender dos cuidados de amostragem, não levando em consideração as heterogeneidades intrínsecas do maciço, que eventualmente tenham dimensões maiores do que as da amostra. Barros (1997) apresenta uma abrangente descrição dos diversos ensaios laboratoriais, evidenciando que o que utiliza o princípio de coluna ressonante é o mais utilizado.

Por outro lado, os ensaios "in situ" possibilitam a obtenção dos parâmetros elásticos dos materiais em sua situação de campo sendo, portanto mais representativos do maciço.

Existem diversos métodos de determinação dos parâmetros elásticos dinâmicos de materiais geológicos "in situ". Praticamente todos se baseiam na propagação de ondas sísmicas *p* (longitudinais ou primárias) e *s* (transversais ou secundárias, ou ainda cisalhantes).

Com a determinação dessas velocidades, torna-se possível determinar os parâmetros elásticos, que se relacionam a estas pelas seguintes equações:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\delta(1-2\nu)(1+\nu)}}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\delta(1+\nu)}} \quad \text{ou}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\delta}} \quad \text{ou ainda}$$

$$G = \delta V_s^2$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 - 2} \quad \text{portanto,}$$

$$E = V_p^2 \delta \frac{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}{(1 - \nu)}$$

onde: V_p = velocidade de propagação da onda longitudinal (m/s); V_s = velocidade de propagação da onda transversal (m/s); δ = densidade do material (kg/m^3); ν = coeficiente de poisson dinâmico (adimensional); E = módulo de elasticidade ou módulo de Young (Pa); G = módulo de rigidez (Pa).

O método mais tradicional de obtenção das velocidades de propagação das ondas sísmicas é a sísmica de refração, utilizando-se geofones apropriados para captação de ondas *p* e *s*. Apresenta a grande vantagem de ser um método consagrado e de simples execução no campo. Como desvantagens aponta-se a necessidade de uma área para sua execução nem sempre disponível nos locais de obras de engenharia, além de, em certas ocasiões, ser difícil a geração de ondas *s* em superfície.

O método de análise espectral de ondas de superfície (SASW - "Spectral Analysis of Surface Waves") vem sendo desenvolvido durante os últimos 15 anos, e trata-se de uma técnica sísmica utilizada para avaliação "in situ" das velocidades de propagação das ondas *s* das diversas camadas de solo e conseqüentemente do

módulo de rigidez (G) e espessura do solo. Consiste em uma evolução do método “onda Rayleigh estacionária” (“steady-state Rayleigh wave”), o qual foi utilizado primeiramente por Jones (1962) e Ballard, (1964, apud Stokoe II *et al.*, 1994), no qual um sistema vibratório emite uma frequência definida perpendicularmente à superfície do terreno e um sensor, também vertical, é movido a partir da fonte para posições mais distantes. A distância entre dois pontos sucessivos onde a onda captada encontra-se em fase com o sinal emitido, é considerada como sendo um comprimento de onda da onda Rayleigh (λ_r). Como a frequência da onda emitida (f) é conhecida, pode-se calcular a velocidade da onda pela seguinte equação:

$$V_r = \lambda_r \cdot f$$

Um gráfico da velocidade da onda versus frequência ou comprimento de onda pode ser obtido repetindo-se o procedimento para diversas frequências. O gráfico assim gerado é chamado de “curva de dispersão”. Esta técnica é simples e facilmente entendida, porém sua execução no campo bastante demorada, além de exigir uma fonte de frequências estacionária com potência relativamente grande.

Com a evolução da eletrônica e disponibilidade de computadores, a técnica de “onda estacionária” tem evoluído para o uso de uma fonte impulsiva, “ruído branco”, ou mesmo uma fonte vibratória senoidal variável (tipo “vibroscis” utilizado em sismica de reflexão), ao invés de se utilizar uma frequência fixa por vez,

Na década de 80, vários artigos utilizando SASW foram publicados por pesquisadores da Universidade do Texas (e.g. Heisey *et al.*, 1982; Nazarian *et al.*, 1983; Nazarian & Stokoe II, 1986). Estes trabalhos visavam testar a técnica para determinar parâmetros elásticos dinâmicos e avaliar a espessura de diferentes camadas de solo, de forma rápida e não destrutiva.

A metodologia adotada por esses autores consiste no registro (no domínio do tempo) dos sinais a uma certa distância da fonte emissora, aplicando-se, em seguida, um algoritmo FFT (“Fast Fourier Transform”), que transforma a série temporal para o domínio de frequência, e calcula-se a diferença de fase (ϕ (f)) entre os sinais dos dois

sensores, para cada frequência. O tempo de trânsito de cada frequência ($t(f)$) é obtido pela seguinte equação:

$$t(f) = \phi(f) / 2\pi f$$

Como a distância entre os receptores ($d_2 - d_1$) é conhecida, a velocidade da onda pode ser calculada pela equação:

$$V_r = (d_2 - d_1) / t(f),$$

sendo que o comprimento de onda correspondente é dado por:

$$\lambda_r = V_r / f$$

Uma vez calculados estes valores para cada frequência, plota-se o gráfico na forma de curva de dispersão, que vem a ser a variação da velocidade em função da frequência (ou comprimento de onda). Essa variação de velocidade ocorre visto que diferentes comprimentos de onda deformam diferentes porções de um meio estratificado. Portanto, utilizando-se ondas Rayleigh com uma larga faixa de frequências, é possível amostrar diferentes porções do maciço.

Não obstante, Stokoe *et al.* (1994) observam que a resolução deste método irá depender de vários fatores, tais como o contraste de velocidade entre as camadas e sua espessura. Como regra prática sugerem que, para um meio estratificado, a camada deve ter espessura de, no mínimo, um quinto da profundidade em que ela se encontra, para que seja adequadamente resolvida, independentemente do intervalo de frequências utilizado.

A vantagem desta técnica em relação aos métodos que utilizam furos de sondagens é o fato de ser executada na superfície do terreno. Como desvantagens pode-se apontar a necessidade de instrumental oneroso, fontes de energia bastante

pesadas (quando o horizonte de interesse é relativamente profundo) e pessoal altamente qualificado para a execução dos ensaios no campo e, principalmente, o processamento e interpretação dos dados.

Este método consiste em três fases:

- a. aquisição dos dados no campo;
- b. avaliação da curva de dispersão da onda Rayleigh;
- c. inversão da curva de dispersão para obter o perfil de velocidade da onda cisalhante.

O instrumental utilizado para os ensaios SASW pode ser de três tipos diferentes, esquematizados na Figura 4. Com qualquer sistema que se resolva utilizar há a necessidade da execução do FFT em tempo real, para o que é necessário um FFT Analyzer (instrumento comum em laboratórios de eletrônica) ou algum sistema capaz de efetuar a aquisição dos dados em tempo real e dispor de programas para processar estes dados com algoritmos de FFT. Novamente, independentemente do sistema adotado, cuidados devem ser tomados na compatibilização quanto a tensão, impedância, etc., dos sensores utilizados.

Uma frente de ondas Rayleigh é gerada pela fonte sísmica, captada pelo par de sensores e registrada no analisador de forma de ondas. Este equipamento é utilizado por permitir uma avaliação da qualidade dos dados instantaneamente. Os dados assim coletados são armazenados em discos magnéticos para posterior avaliação da curva de dispersão. O teste é repetido para diversos espaçamentos entre receptores para cobrir uma gama desejada de comprimentos de ondas das ondas Rayleigh. O teste é também realizado em duas direções ortogonais para cobrir eventuais efeitos de mergulho de camadas ou mesmo problemas instrumentais.

Os sensores receptores podem ser geofones eletromagnéticos ou acelerômetros; entretanto, em ambos casos eles devem responder a baixas frequências (da ordem de 1 Hz), e terem idêntica resposta, tanto em amplitude como em frequência e fase. O acoplamento dos sensores ao solo deve ser bem cuidado e idêntico para ambos, de forma a assegurar que o sensor vibre em absoluta concordância com o solo. Alguns autores sugerem que o melhor acoplamento é obtido quando os sensores são enterrados alguns centímetros abaixo da superfície.

Dois tipos de arranjo de sensores são normalmente utilizados: a) a técnica chamada de geometria do ponto médio; b) a técnica chamada de geometria da fonte comum. Estes arranjos estão ilustrados nas Figuras 5 e 6, respectivamente. No primeiro arranjo (geometria do ponto médio) os dois receptores estão eqüidistantes de um ponto central imaginário, que é mantido fixo. A outra técnica (geometria da fonte comum) mantém a fonte sísmica estacionária e varia a posição dos sensores. A vantagem deste tipo é a possibilidade de se manter a fonte estacionária (importante quando envolve grandes massas como fonte sísmica).

Figura 4 - Tipos de configurações instrumentais que podem ser utilizadas para os ensaios SASW (Gucunski & Woods, 1991).

Figura 5 - Procedimento de campo utilizando-se a geometria do ponto médio para ensaios SASW (Hiltinen & Woods, 1990, *apud* Gucunski & Woods, 1991).

Figura 6 - Procedimento de campo utilizando-se a geometria da fonte comum para ensaios SAS. (Hiltinen & Woods, 1990, *apud* Gucunski & Woods, 1991).

Embora teoricamente seja possível utilizar somente uma distância entre sensores, na prática é conveniente utilizar vários espaçamentos diferentes. A distância entre o ponto da fonte de ondas e o sensor mais próximo varia, porém é mantida aproximadamente igual à distância entre os dois sensores. Tipicamente, para uma avaliação do perfil de solo até 50 metros de profundidade, a distância entre geofones utilizada é de 0,5, 1, 2, 4, 8, 16 e 64 m. Alguns autores sugerem que espaçamentos de 1, 4, 16 e 64 m são suficientes para gerar os dados necessários à análise.

Diversos tipos de fontes são utilizados para gerar a frente de ondas. Para os arranjos mais curtos um martelo ou uma marreta são normalmente suficientes. Para distâncias mais longas (de 2 a 8 metros) é sugerido o uso de uma queda de peso de 20 a 70 kg, enquanto para os espaçamentos ainda maiores, queda de pesos maiores (variando de 70 a 900 kg) são recomendados.

Diversos sistemas de aquisição de dados podem ser utilizados para o registro dos sinais, desde microcomputadores até analisadores de forma de ondas dedicados. No entanto, o instrumento utilizado deve ser capaz de fornecer o espectro do sinal em tempo real e operar com pelo menos dois canais simultaneamente.

Os dados obtidos no campo por meio do analisador FFT ($f(\phi)$, f), permitem calcular as velocidades de propagação das ondas Rayleigh e os comprimentos de ondas para cada frequência. A plotagem destes pares de valores permite obter a curva de dispersão experimental, conforme apresentada na Figura 7, que deve ser "limpa", conforme mostra a Figura 8.

Detalhes da teoria e do processamento dos dados de SASW podem ser obtidos no trabalho de Stokoe *et al.* (1991). A solução teórica baseia-se na solução bi-dimensional para ondas se propagando em uma superfície de um meio elástico. Evidentemente, para um meio estratificado a solução fica mais complexa e um conjunto de equações deve ser resolvido. Na prática, efetua-se o processamento para um modelo teórico que procura simular as condições geológicas esperadas no campo. Obtém-se, desta forma a curva de dispersão para o modelo proposto, curva esta que é comparada à de dispersão obtida experimentalmente. Segue-se, então, ajustando o modelo iterativamente até que se obtenha uma curva de dispersão teórica próxima à experimental. Evidentemente, é possível se obter um grande número de modelos que satisfaçam as condições obtidas experimentalmente. Portanto, é necessário um

Figura 7 - Curva de dispersão gerada a partir dos dados de campo obtidos em ensaio SASW em solo, utilizando diversos espaçamentos entre sensores (Stokoe *et al.*, 1994).

Figura 8 - Curva de dispersão "suavizada" gerada a partir dos dados obtidos no campo e apresentados na Figura 7 (Stokoe *et al.*, 1994).

conhecimento geológico razoável do local de ensaio para que se obtenha uma solução coerente com a realidade. A Figura 9 apresenta o resultado obtido no campo, comparado com os resultados de três modelos teóricos, cujos perfis são apresentados na Figura 10.

Figura 9 - Comparação entre as curvas de dispersão obtidas teórica e experimentalmente (Stokoe *et al.*, 1994).

O resultado final do ensaio SASW é um perfil do solo, com suas diversas camadas, espessuras e velocidades de propagação das ondas cisalhantes, o que permite calcular o módulo de rigidez para os diversos estratos. Portanto é uma ferramenta poderosa que se dispõe para investigações geotécnicas.

Deve-se ressaltar, no entanto, que o ensaio SASW envolve um volume muito maior do maciço (do que o amostrado em outros ensaios), fornecendo valores médios que representam o comportamento global da área, sendo que sua resolução decresce à medida que a profundidade de investigação aumenta. Um gráfico comparando os resultados obtidos por "crosshole" e SASW no mesmo local é apresentado na Figura 11.

Figura 10 - Exemplo mostrando o procedimento de inversão, onde vários modelos de perfil de subsolo foram propostos (Stokoe *et al.*, 1994).

Figura 11 - Comparação entre perfis de velocidades das ondas s determinadas por SASW e "crosshole", no mesmo local (Stokoe *et al.*, 1994).

O processamento dos dados ainda é bastante complexo e trabalhoso, porém, acredita-se que, uma vez dispondo-se de “softwares” interativos para cálculo e comparação das curvas de dispersão, esta técnica virá assumir um importante papel em investigações geotécnicas. Apesar de não ser ainda utilizado no Brasil, há uma pesquisa em andamento no Instituto de Geociências da USP que objetiva desenvolver e testar sua aplicação.

Outra técnica que permite determinar o módulo de elasticidade do maciço em estudo é o ensaio entre-furos, mais conhecido como “crosshole”. Este ensaio consiste na geração de ondas sísmicas em um furo de sondagem e seu registro em um ou mais furos adjacentes, devendo, fonte e sensores, estarem em um mesmo nível de investigação, conforme apresentado na Figura 12. A onda transmitida pela fonte é captada pelo sensor, cujo registro permite medir o tempo de percurso das ondas, determinando-se, desta forma, as velocidades de propagação das ondas p e s , uma vez que a distância entre os furos é conhecida.

Figura 12 - Esquema instrumental utilizado para os ensaios “crosshole” (Dourado, 1984).

O primeiro trabalho, que este autor tem conhecimento, utilizando ensaios "crosshole" para determinar as propriedades elásticas dos materiais naturais, foi publicado por Stokoe & Woods (1972), baseado na tese de doutoramento do primeiro. Estes autores utilizavam uma barra metálica colocada em furo de sondagem que, quando impactada, gerava ondas sísmicas no fundo do furo. As ondas geradas dessa forma eram principalmente ondas SV. Para a instalação do sensor (geofone) no outro furo de sondagem, utilizavam outra barra metálica, em cuja extremidade inferior era parafusado o geofone. Dessa forma, à medida que a perfuração ia avançando, eram efetuadas medidas, utilizando um osciloscópio com memória analógica, do tempo de propagação das ondas SV. A divisão da distância entre os furos de sondagem pelo tempo de propagação da onda fornecia a velocidade de propagação da onda SV.

A metodologia foi muito bem aceita pelo meio técnico, sendo que em 1977 foi promovido um *Symposium on Dynamic Geotechnical Testing* em Denver, Estados Unidos, cujos trabalhos eram basicamente sobre diferentes aspectos do ensaio "crosshole". A *American Standard Testing Materials* (ASTM) publicou, no ano seguinte, os anais desse simpósio (ASTM, 1978 - *Special Technical Publication 654*.) Nesse simpósio foram apresentados trabalhos metodológicos, destacando-se o de Hoar & Stokoe (1978). Atualmente a ASTM dispõe de norma para execução de ensaios "crosshole" (ASTM, 1990).

De forma genérica, os ensaios "crosshole" vêm sendo utilizados para diversas finalidades.

Bois *et al.* (1972) utilizaram explosivos para a execução de ensaios entre furos, detectando anomalias de velocidades de propagação de ondas p , e sugeriram o uso desta técnica (na indústria de petróleo) para a avaliação de reservatórios.

La Porte *et al.* (1973), utilizaram ensaios "entre galerias" no planejamento de uso e ocupação territorial, visando a otimização da escolha de local para implantação de central hidrelétrica subterrânea na República do Zaire. Elaboraram um zoneamento do maciço, em termos de velocidade de propagação de ondas p , correlacionável com a qualidade do maciço do ponto de vista de fundação para obras civis.

McCann *et al.* (1975) utilizaram ensaios entre furos para definição de contatos entre estratos e mergulho de camadas em levantamento de caráter regional. Utilizaram fonte sísmica geradora de ondas p ('sparker') e furos de sondagens espaçados de 8 m,

enquanto a interpretação dos resultados foi baseada na propagação das ondas diretas e refratadas entre os furos de sondagens, devido aos contatos dos estratos. Apesar do título do trabalho referir-se à aplicação de ensaios entre furos em geologia de engenharia, o sentido da frase foi mais amplo, e não chegaram a estudar as propriedades elásticas dos materiais e sim sua conformidade deposicional, com vistas ao uso e ocupação territorial.

Fehler & Pearson (1984) utilizaram ensaios entre furos para determinar a localização e tamanho de fraturas associadas a um campo de exploração de energia geotermal.

Domenico (1984) apresentou estudo comparando as velocidades de propagação das ondas *p* e *s* em diferentes materiais e a diferentes níveis de tensão. Uma de suas conclusões é de que, utilizando os ensaios "crosshole", é possível separar litologias contrastantes pela diferença de seus coeficientes de Poisson.

Rector III (1995), em artigo de apresentação de volume da revista *Geophysics*, dedicado exclusivamente a métodos "crosshole", abordou o enorme progresso que esta técnica vem sofrendo, graças, principalmente, à sua grande aplicação em problemas de desenvolvimento e acompanhamento de reservatórios petrolíferos. Apontou como um fator importante para a disseminação do uso desta técnica à possibilidade de se obter altas frequências (até 2kHz) mesmo a distâncias da ordem de 600 m entre furos.

Mufti (1995), baseado em modelos numéricos, apresentou um estudo de diferentes situações estratigráficas, evidenciando os problemas de interpretação passíveis de serem encontrados. Apesar de seu estudo focar tomografia sísmica, as conclusões são perfeitamente válidas para ensaios "crosshole" convencionais.

Uma vez que os ensaios utilizando furos de sondagens são efetuados principalmente com aplicação em prospecção petrolífera, os trabalhos sobre a influência do acoplamento dos sensores nos ensaios entre furos tratam sobre o comportamento das ondas sísmicas na interface rocha-fluido de perfuração. Isto deve-se ao fato de que, em furos executados para prospecção de hidrocarbonetos, utiliza-se lama bentonítica para a equalização de pressões e, com isso, estabilização das paredes dos furos de sondagem. Blair (1984) apresentou estudo abordando o comportamento das ondas na presença de fluidos. Outro aspecto que tem sido objeto

de estudo é o comportamento de hidrofones em ensaios entre furos. Isto é devido ao fato de que nos estudos para a indústria de petróleo, o sensor utilizado é um hidrofone, sensível às variações de pressão, o qual é deslocado a cada nova medida (ensaio "downhole"). Estes ensaios destinam-se à definição do perfil de velocidades de propagação para as diferentes camadas. Com tal interesse podem ser citados os trabalhos de Lovell e Hornby (1990) e Peng et al. (1994).

Outros trabalhos discutem a influência da presença de revestimento nas medidas de velocidade de propagação de ondas sísmicas. Entre estes, o de Lee (1987) destaca que se o menor comprimento de onda de interesse for maior do que 40 vezes o diâmetro do furo de sondagem, tanto o tempo de percurso como a distorção da onda não são influenciados pela presença do furo. Portanto, no caso dos ensaios "crosshole" para aplicações em engenharia, pode-se considerar que a maior frequência de interesse é da ordem de 2000 Hz. Para velocidades máximas de propagação da onda p , da ordem de 5000 m/s, tem-se comprimento de onda mínimo de cerca de 2,5 m, ou seja, muitas vezes maior do que 40 vezes os diâmetros utilizados nestas aplicações.

Lou & Crampin (1993), em modelagem de ensaios "crosshole", mostram que as características de ondas de canal podem variar sensivelmente devido às alterações de orientação, densidade e grau de saturação de fraturas e poros presentes na rocha.

Kaelin & Johnson (1999), em um experimento de injeção de ar em maciço fraturado, utilizando equipamento capaz de trabalhar até 10kHz, observaram que a percolação de gás nas fraturas (milimétricas e sub-milimétricas) imprime grande influência na amplitude das ondas em ensaios "crosshole". No entanto, não altera significativamente a velocidade de propagação das ondas. Os mesmos autores apontam que esta técnica pode ser promissora para a medida de abertura de fraturas "in situ" e para a determinação da concentração de gás nas fraturas.

No Brasil, o trabalho pioneiro foi na avaliação das propriedades elásticas do maciço da fundação da Usina Nuclear de Angra dos Reis, efetuado no início da década de 80, pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, sob a orientação do Dr. Woods. No entanto a primeira publicação no Brasil foi de Dourado (1984), que aborda resumidamente as formulações matemáticas e aspectos

metodológicos, descrevendo o equipamento utilizado, a configuração ideal de campo e princípios de interpretação dos resultados.

Giacheti (1991) em estudo sobre solos tropicais do interior de São Paulo utilizou ensaios "crosshole" para a determinação de módulos dinâmicos e tentou correlacioná-los com parâmetros geotécnicos, particularmente com o NSPT.

Sobral et al. (1993) mostraram que a determinação dos módulos de elasticidade dinâmicos permite a elaboração de curvas como a expressa na Figura 13 (executada para a área da estação Vila Madalena do Metrô de São Paulo), onde são colocados os resultados tanto dos ensaios convencionais de laboratório, como os resultados obtidos a partir de ensaios "crosshole", possibilitando que o projetista assuma valores de deformação e recalque mais próximos das condições reais de trabalho.

Figura 13 - Comportamento observado para a camada de argila siltosa na área da estação Vila Madalena do Metro de São Paulo (Sobral et al., 1993).

Prado (1994) aborda, de forma mais abrangente, os princípios e aplicações dos ensaios "crosshole". Com resultados obtidos em ensaios realizados para obras do Metrô de São Paulo, sobre sedimentos da Formação São Paulo, também tenta

correlacioná-los com medidas de NSPT. Sugere, em suas conclusões, que um maior número de ensaios deve ser realizado para que se conheça melhor as propriedades elásticas dinâmicas dos materiais da cidade de São Paulo.

Por outro lado, Dourado *et al.* (1994) alertam para a dificuldade que se encontra para tais correlações e apontam para o risco de se adotar curvas de correlação baseando-se em poucas observações.

Mais recentemente, Barros (1997), em exaustivo estudo sobre módulo de elasticidade dinâmico de alguns solos tropicais, utiliza resultados de ensaios "crosshole" em comparação com resultados obtidos utilizando outros métodos, particularmente laboratoriais (coluna ressonante). Constaram desse estudo solos da Bacia Sedimentar de São Paulo e solos saprolíticos derivados do embasamento cristalino da cidade de São Paulo.

É interessante notar, no entanto, que os estudos de Prado (1994) e Barros (1997) procuram correlacionar as propriedades elásticas dinâmicas com parâmetros geotécnicos (principalmente NSPT). Estes trabalhos não entram em considerações sobre o aspecto genético dos materiais, ou seja, a diferenciação, por exemplo, de argilas de diferentes formações geológicas e, evidentemente, de diferentes gêneses e que resultaram em produtos distintos.

4. ORGANIZAÇÃO DE BANCO DE DADOS

Para o cadastramento e organização dos dados relativos às medidas de constantes elásticas dinâmicas da Região Metropolitana de São Paulo foi elaborado um banco de dados cujas características principais são:

- a. localização, por coordenadas UTM, dos furos de sondagem utilizados, tanto pela fonte como pelo(s) sensor(es);
- b. identificação da localização aproximada por meio de nome de rua, avenida, etc;
- c. identificação de eventual vínculo da medida a obra de engenharia;
- d. altitude da boca do furo no qual é instalada a fonte sísmica;
- e. cota do nível freático;
- f. profundidade, e correspondente altitude, do ensaio;
- g. distância entre furos;
- h. litologia ensaiada;
- i. equipamento utilizado (sismógrafo, sensor e fonte sísmica);
- j. densidade do material;
- k. autor das medidas;
- l. data das medidas;
- m. velocidades das ondas *p* e *s*;
- n. eventuais observações;
- o. autor do cadastro;
- p. data do cadastro.

A partir destes dados, o próprio sistema calcula os módulos de Young (*E*), de rigidez (*G*) e o coeficiente de Poisson (γ).

Em adição, para a entrada de dados e eventual modificação de qualquer dado do cadastro deve ser digitada senha própria do usuário. O arquivo gerado (com extensão "dbf") é compatível com a maioria das planilhas eletrônicas encontradas no mercado, o que o torna portátil e de fácil acesso, tornando possível a classificação das séries de dados e facilitando a geração de gráficos e correlações entre as propriedades.

Uma vez concluída a estruturação do banco de dados, procedeu-se à inclusão de todos os dados de ensaios conhecidos, o que totalizou cerca de 297 fichas cadastrais.

Deve ser ressaltado que os ensaios "crosshole" atualmente são solicitados para fornecer subsídios ao cálculo de fundações de obras de grande porte ou a fundações com problemas específicos. Desta forma, a maioria dos dados disponíveis estão concentrados em locais onde foram realizados estudos pormenorizados para a implantação de obras de engenharia, como por exemplo, Avenida Juscelino Kubitschek (túnel Tribunal de Justiça), Avenida Doutor Arnaldo (Estação Vila Madalena do Metrô), Avenida Francisco Morato (Estação Caxingui do Metrô), Avenida Nações Unidas (Estação Pinheiros do Metrô), Usina Hidrelétrica de Rasgão, etc.

Este total de cadastros não inclui certos ensaios realizados em condições especiais, como alguns que foram efetuados para avaliar fundações de concreto ou eficiência de cortina de injeção de calda de cimento, dentre outras finalidades, e não para definir as propriedades elásticas dos materiais.

A grande maioria dos dados considerados no cadastramento já foi objeto de publicações anteriores, tais como: IPT (1989); IPT (1993); IPT (1994); Prado (1994), Décourt *et al.* (1995), Barros (1997) e Taioli (1999).

O banco de dados completo, com todos os cadastros dos ensaios considerados neste trabalho não é aqui apresentado devido ao volume de quase 300 páginas, mas pode ser consultado em Taioli (1999). Por outro lado, uma ficha cadastral é apresentada como exemplo, na Figura 14.

**CADASTRAMENTO DE MEDIDAS DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS
DINÂMICAS DE MATERIAIS DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO**

LOCALIZAÇÃO

Latitude: Longitude: (fonte)

Latitude: Longitude: (sensor 1)

Latitude: Longitude: (sensor 2)

Localização em São Paulo (Rua, Avenida, etc): Rua Indiana x Rua Nova Iorque

Vinculação a obra: Fundações dos Edifícios do Grupo OK

Altitude da boca do furo da fonte: m

Profundidade: 7,0 m Cota de ensaio: -7,0 m

Cota do nível d'água: - 4 m

ENSAIO

Tipo de ensaio: crosshole

Distância entre furos: 4,16 m

Equipamento: Taioli

Tipo de fonte: mecânica - ϕ 50mm Tipo de geofone: Taioli - triortogonal

Executante: Fabio Taioli Data de execução: / /

Litologia: solo de alteração - gnaiss

Densidade: 2.037 kg/m³ SPT:

V_p = 1600 m/s

V_s = 232 m/s

E = MPa

G = 109,67 MPa

γ =

Obs.: Ensaio efetuado abaixo do N.A.

Autor do Cadastro: Fabio Taioli

Data: 05/09/1998

Figura 14 - Exemplo de ficha cadastral contendo os dados disponíveis, de um ensaio.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

A análise dos dados de propriedades elásticas da Região Metropolitana de São Paulo esbarra na limitação da amostragem. Apesar de ter sido possível catalogar um universo de 297 ensaios, como já citado, a maioria das medidas está concentrada em áreas de algumas obras de engenharia de maior porte, uma vez que ainda não é prática comum a execução desse tipo de medida em obras mais corriqueiras.

Portanto, as considerações levantadas aqui devem ser vistas com reservas e sempre considerando a limitação espacial das medidas, o que prejudica, no momento, eventuais generalizações.

Outra dificuldade observada é que, para a determinação das características elásticas dinâmicas dos materiais, são necessários os valores das velocidades de propagação de ondas p e s , além da densidade do material ensaiado. Infelizmente, a maioria dos ensaios executados sobre os materiais da RMSP foi executada abaixo do nível freático, o que impossibilita a utilização da velocidade de propagação das ondas p . Para os solos e mesmo rochas de alta porosidade nessa região, a velocidade da onda p assume velocidade próxima à da água (1500 m/s), o que pode não condizer com a realidade, portanto, mesmo para aqueles ensaios em que esta velocidade foi determinada, optou-se por não utilizá-los para evitar conclusões de validade discutível. Diversos dados obtidos também não dispunham da sua precisa localização, tanto em termos de coordenadas, como de altitude, o que também prejudicou, principalmente, uma análise estatística mais representativa da correlação dos valores de V_s com a altitude. Como normalmente os engenheiros de fundações solicitam apenas a determinação das velocidades das ondas p e s , não fornecendo os valores de densidade, a maioria dos ensaios realizados não dispunham desse dado, levando à impossibilidade de calcular os valores precisos dos módulos de elasticidade.

Desta forma, as análises estatísticas aqui apresentadas consideram apenas a velocidade de propagação das ondas s , uma vez que esta foi a única determinação efetuada em todos os ensaios.

Para correlação com altitude foram utilizadas somente as amostras que dispunham desta informação, o que diminui sensivelmente o universo de análise.

Deve ser ressaltado que, mesmo analisando-se apenas a velocidade das ondas *s*, eventuais correlações são extremamente bem vindas à comunidade geotécnica, pois permitiria a determinação (pelo menos a nível de pré-projeto ou estudo de viabilidade) do módulo de rigidez conhecendo-se apenas a densidade do material em questão, valor este que poderia inclusive ser estimado. Portanto, a análise e discussão dos dados aqui apresentada baseia-se nessa premissa.

O tratamento dos dados consistiu na seleção dos ensaios por litologia e análise da correlação das velocidades das ondas *s* com os dados disponíveis (altitude ou profundidade). A correlação analisada foi para um ajuste linear do tipo $y=ax+b$.

5.1 Formação São Paulo

Para a análise da Formação São Paulo contou-se com um universo de 54 medidas, todas obtidas na região do espigão central da cidade, sendo que 37 determinações estavam vinculadas às obras da Estação Vila Madalena do Metrô, enquanto as demais 17 vinculadas a obra na Rua 13 de Maio, cuja finalidade não foi mencionada.

O tratamento dos dados foi realizado tanto para o conjunto total de dados, como para os dois conjuntos de dados separadamente. Para aqueles vinculados à obra do Metrô foi possível analisar a correlação de *Vs* tanto com relação à profundidade como à altitude do ensaio. Para os outros dados, foi efetuada correlação apenas com a profundidade de ensaio, visto não se dispor das respectivas cotas. Os gráficos dos resultados obtidos, com as respectivas equações de ajuste linear são apresentados nas Figuras de 15 a 19.

A Figura 15 mostra o gráfico com a relação entre *Vs* e altitude do conjunto de dados da Vila Madalena. Observa-se que há uma correlação considerada muito boa, tratando-se de dados geológicos, com coeficiente de correlação de Pearson de -0,803. A maior dispersão dos dados ocorre nas cotas entre 773 e 770.

Deve ser ressaltado, todavia, que as rochas sedimentares da Formação São Paulo apresentam distribuição altimétrica irregular, principalmente na porção oeste da cidade, provavelmente resultante de tectonismo pós-sedimentar (Riccomini & Coimbra, 1992), e não se dispõe de qualquer determinação nestas rochas nessa região da

cidade. Por conseguinte, eventuais correlações com respeito à altitude não devem ser extrapoladas para outras áreas da bacia. No entanto, acredita-se que, devido à boa correlação existente para este conjunto de dados, a extrapolação do ajuste determinado para a região do espigão central talvez possa ser utilizada.

A Figura 16 mostra a relação entre V_s e a profundidade de ensaio, agora para todos os dados disponíveis da Formação São Paulo. A correlação obtida pode ser considerada boa para dados geológicos, apresentando coeficiente de Pearson de 0,759.

A Figura 17, com o conjunto de dados somente dos ensaios realizados na Rua 13 de Maio, mostra a excelente correlação linear entre V_s e profundidade ensaiada, com coeficiente de Pearson de 0,982.

Figura 15 - Correlação entre velocidade de ondas s e altitude dos ensaios na Formação São Paulo.

Para possibilitar uma comparação entre os dois conjuntos de ensaios, foi efetuada a análise dos dados relacionando V_s e profundidade dos ensaios da Vila Madalena somente para os 9 primeiros metros de profundidade (Figura 18). A análise deste conjunto de dados e sua comparação com os da Figura 17 evidenciam uma

Figura 16 - Correlação entre velocidade de ondas s e profundidade dos ensaios na Formação São Paulo.

Figura 17 - Correlação entre velocidade de ondas s e profundidade dos ensaios até 10 metros na Formação São Paulo, na Rua 13 de Maio.

correlação apenas razoável (coeficiente de Pearson de 0,570), quando comparada com o do conjunto de dados obtido nas determinações efetuadas na Rua 13 de Maio.

A Figura 19 apresenta o conjunto de dados obtidos nos ensaios realizados na Vila Madalena (até 18 metros de profundidade), o que melhora sensivelmente a correlação entre Vs e profundidade, obtendo-se um coeficiente de Pearson de 0,760, praticamente igual ao obtido para o conjunto total de dados.

Figura 18 - Correlação entre velocidade de ondas s e profundidade dos ensaios até 10 metros na Formação São Paulo, na região da Vila Madalena.

É interessante notar que ocorre uma aparente dispersão dos dados obtidos em dois horizontes distintos; um a profundidades variando de 2 a 4 metros e outro a profundidades de 15 a 17 metros, com variações de Vs de mais de 50%, e sensivelmente superiores à média esperada pela curva de regressão.

Figura 19 - Correlação entre velocidade de ondas *s* e profundidade dos ensaios até 18 metros na Formação São Paulo, na região da Vila Madalena.

A tentativa de explicação para este comportamento pode ser obtida quando se compara o gráfico da média aritmética das velocidades de ondas *s* em relação à profundidade, com o perfil tipo da Formação São Paulo, descrita originalmente por Suguio & Barbour (1969) e definida por Riccomini (1989), em local muito próximo daquele em que se obteve a maioria das medidas de *V_s*. Esta comparação, apresentada na Figura 20, permite verificar que em ambos horizontes ocorre material limonítico onde, devido à concentração anômala de óxido de ferro, pode-se esperar uma maior velocidade de propagação das ondas (tanto *p* como *s*).

Sígolo & Ohnuma (1996), em estudo dessas crostas ferruginosas presentes em vários afloramentos na cidade de São Paulo, mostraram que elas são formadas na realidade por minerais secundários, como goethita, óxidos hidróxidos amorfos de ferro, caolinita e quartzo secundário disseminados, ocorrendo em dois níveis distintos, definidos por estes autores como horizontes superficial e sub-superficial, o que justificaria tanto a dispersão como o acréscimo dos valores de *V_s* nesses níveis.

O restante do perfil apresenta boa correlação entre as litologias e os valores obtidos para *V_s*, observando-se um acréscimo progressivo de *V_s* com a profundidade.

Este fato pode também ser relacionado à própria gênese sugerida por Sígolo & Ohnuma (1996), ou seja, as crostas seriam formadas a partir da lixiviação dos sedimentos sotopostos, o que os tornaria mais homogêneos, porém com enriquecimento por óxidos de ferro se dando gradualmente e conseqüentemente, de comportamento elástico mais previsível.

Suguio & Barbour (1969) mostram, a partir da descrição de várias ocorrências, que as estruturas limoníticas presentes nos sedimentos da Formação São Paulo são de pequena espessura relativa, sendo que podem ocorrer a diferentes profundidades e altitudes. Este fato não permitiria, de antemão, extrapolar os resultados obtidos na região do espigão central para outras áreas de São Paulo. No entanto, pela análise dos dados levantados, a ocorrência de velocidades de ondas s da ordem de 600 m/s nas rochas sedimentares da Formação São Paulo parece estar associada à presença dessas concreções limoníticas, independentemente da sua profundidade, uma vez que para os demais materiais as velocidades de ondas s não ultrapassam o valor de 450 m/s. Apesar da pequena espessura desses horizontes, eles contribuiriam para o incremento da velocidade média das ondas s .

Figura 20 - Comparação entre as velocidades médias de ondas s e a seção-tipo da Formação São Paulo, conforme descrita por Suguio & Barbour (1969) e definida por Riccomini, 1989.

Legenda da seção-tipo: (1, 3, 10, 11 -arenito argiloso; 2, 5, 7 - arenito mais puro; 4 - argilito siltico-arenoso; 8 siltito argiloso; 6, 9 - argilito siltico; nível com pelotas de argila a 2,5m; (1) camada de arenito com cimento limonítico; (2) camadas limoníticas anastomosadas; (3a e 3b) crostas de concreções limoníticas; (4) siltito argiloso limonitizado.

5.2 Formação Resende

A Formação Resende, de distribuição geográfica generalizada, corresponde a cerca de 80% do material de preenchimento da Bacia Sedimentar de São Paulo (Riccomini & Coimbra, 1992). Este fato, em si, demonstra a importância econômica que o conhecimento do comportamento geotécnico de seus materiais encerra.

Para a análise das propriedades da Formação Resende contou-se com um universo de 170 medidas. No entanto, apesar do razoável universo de amostras, todos os dados disponíveis estão relacionados a ensaios efetuados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT na região da Avenida Juscelino Kubitschek, após acidente ocorrido durante a escavação do túnel Tribunal de Justiça (cruzamento da Avenida Juscelino Kubitschek com Avenida Santo Amaro).

A análise dos dados foi feita considerando-se tanto a profundidade como a altitude dos ensaios, e analisando-se primeiramente com o conjunto global de dados e, em seguida, separando-se os materiais classificados como "areia" e "argila". Para esta classificação foram consideradas as descrições das amostras constantes nos documentos consultados. Não se dispunha das amostras para que fosse tentada uma classificação com maior detalhe. Os gráficos obtidos são apresentados nas Figuras de 21 a 26.

A primeira análise, considerando o conjunto total de dados, Figura 21, mostra claramente não haver correlação entre a velocidade das ondas s e a altitude do ensaio. Esta análise forneceu um coeficiente de correlação de Pearson de 0,062, o que reflete esse comportamento.

Para o mesmo conjunto de dados procedeu-se à análise da correlação entre a velocidade das ondas s e a profundidade ensaiada. A Figura 22 apresenta o resultado obtido, evidenciando que esta análise oferece uma correlação ligeiramente superior à da Figura 21, porém, da mesma forma, baixa (coeficiente de correlação de Pearson de 0,498), mesmo considerando-se um universo de dados de origem geológica.

A análise, separadamente, das argilas e areias presentes na Formação Resende, e avaliação da relação entre velocidade da ondas s nesses materiais e altitude do ensaio (Figuras 23 e 24), evidencia que, para as argilas, a correlação é

Figura 21 - Correlação entre velocidade de ondas s e altitude dos ensaios na Formação Resende.

Figura 22 - Correlação entre velocidade de ondas s e profundidade dos ensaios na Formação Resende.

Figura 23 - Correlação entre velocidade de ondas s das camadas de argila e altitude dos ensaios na Formação Resende.

Figura 24 - Correlação entre velocidade de ondas s das camadas de areia e altitude dos ensaios na Formação Resende.

baixa (coeficiente de Pearson de 0,510), porém para as areias inexistente relação entre V_s e altitude de ensaio (coeficiente de Pearson de 0,206).

Deve ser também observado que, para as argilas, obteve-se uma dispersão muito grande (variação maior do que 100% entre algumas determinações), fato este muito mais evidente para as cotas menores, onde a dispersão chega a 150%.

Esta observação é de grande importância levando-se em conta que as argilas nessas cotas correspondem ao horizonte conhecido pelo meio geotécnico como "Taguá" (Rocha & Celestino, 1992), constituído por argilitos cinzas, e utilizado como horizonte preferencial de suporte para diversas obras de engenharia, principalmente túneis. Portanto, considerando-se o universo de amostras existentes, eventuais interpolações entre dados de ensaios não muito próximos podem levar a subdimensionamento do suporte e ocasionar rupturas, com acidentes indesejáveis. Dois exemplos recentes podem ser citados: aquele vinculado à construção do túnel Tribunal de Justiça (IPT, 1994) e o vinculado à escavação do túnel Ayrton Senna sob o Parque do Ibirapuera (Taioli *et al.*, 1997a e Taioli *et al.* 1997b).

A mesma análise, considerando-se a relação entre a profundidade do ensaio e a velocidade das ondas s , é apresentada nas Figuras 25 e 26. Observa-se que a correlação para ambos materiais (argilas e areias) é um pouco melhor do que quando se considera a altitude. Porém, ainda apresentam baixa correlação, com coeficientes de Pearson de 0,522 e 0,517, respectivamente para argilas e areias.

Portanto, o conjunto de resultados obtidos das análises sobre os materiais da Formação Resende permite afirmar que ocorre uma grande dispersão de valores de velocidades de ondas s , tanto considerando-se a profundidade como a altitude do ensaio.

Acredita-se que tal dispersão esteja diretamente relacionada à grande variação litológica lateral que ocorre nesta formação, relacionada ao próprio ambiente de sedimentação.

Outra hipótese que poderia ser aventada é a possibilidade de se encontrar areias ou argilas provenientes de fontes diferentes e depositadas contemporaneamente.

Uma terceira alternativa, que também deve ser lembrada, está relacionada ao fato de que os ensaios realizados sobre esta formação terem sido vinculados ao acidente ocorrido em novembro de 1993, o que pode ter modificado as características originais de alguns dos materiais ensaiados, e explicaria a grande dispersão observada.

Figura 25 - Correlação entre velocidade de ondas s das camadas de argila e profundidade dos ensaios na Formação Resende.

Figura 26 - Correlação entre velocidade de ondas s das camadas de areia e profundidade dos ensaios na Formação Resende.

5.3 Solo de Alteração

Para análise do comportamento do solo de alteração contou-se com universo de 53 ensaios distribuídos em diversas localidades da Região Metropolitana de São Paulo. Entretanto, todos os ensaios foram realizados em solo de alteração definidos como "gnáissico", sem que tenha havido um controle litológico melhor. Dos dados selecionados, no entanto, foi possível obter a altitude do ensaio em apenas 30.

Para a interpretação desses resultados há que se considerar que o material original (gnaisse) apresenta forte anisotropia em suas propriedades elásticas, dependendo da orientação da foliação, e, muitas vezes, preservada no solo de alteração. Infelizmente, no universo de dados utilizado, este parâmetro não foi considerado, pois, apesar de em certos locais terem sido efetuados ensaios ortogonais, aparentemente visando detectar eventuais anisotropias, não foram fornecidas as atitudes das foliações de forma a possibilitar uma análise mais detalhada.

Deve ser notado também que as cotas em que os ensaios foram realizados correspondem às altitudes mais elevadas do solo de alteração presentes na RMSP. Isto se torna claro quando se considera que, normalmente, os ensaios para determinação das propriedades elásticas "in situ" são realizados vinculados a obras de engenharia, as quais são sempre relativamente próximas à superfície.

Os gráficos correlacionando a velocidade de propagação das ondas s com a altitude e profundidade de ensaio são apresentados nas Figuras 27 e 28, respectivamente.

A análise da Figura 27 mostra uma alta correlação entre as velocidades de ondas s e altitude em que foi realizado o ensaio. Para este conjunto de dados o coeficiente de correlação de Pearson foi 0,877.

Por outro lado, considerando a profundidade do ensaio (Figura 28), a correlação decresce sensivelmente, para um coeficiente de Pearson de 0,420.

A análise da Figura 28 evidencia uma grande dispersão dos valores para profundidades entre 5 e 10 metros, sendo que para as demais profundidades ocorre uma melhor coerência entre estes dois parâmetros.

Não foi encontrada uma justificativa plausível para este comportamento. Por outro lado, deve-se lembrar que muitos ensaios são realizados com as escavações para as fundações da obra já iniciadas, considerando-se, desta forma, o valor de profundidade a partir do nível já escavado, ou seja, muitas vezes cinco a até dez metros abaixo do nível original do terreno. Infelizmente, estas informações não constam da documentação dos ensaios.

De toda forma, os resultados obtidos quando se considera a altitude dos ensaios, que apresentaram alta correlação com os valores de velocidades das ondas s são bastante interessantes, sugerindo-se maior número de ensaios para se verificar a consistência da curva obtida.

Figura 27 - Correlação entre velocidade de ondas *s* e altitude dos ensaios no solo de alteração da Região Metropolitana de São Paulo.

Figura 28 - Correlação entre velocidade de ondas *s* e profundidade dos ensaios no solo de alteração.

5.4 Embasamento Cristalino

Para análise do comportamento do embasamento cristalino foi utilizado um universo de 13 amostras, evidentemente pouco representativo para as dimensões da Região Metropolitana de São Paulo. Acrescente-se a isto o fato de, da mesma forma que o solo de alteração, não se dispor de um controle litológico confiável, pois não são diferenciados granitos de gnaisses, e, tampouco, a direção de ensaio em relação à foliação do gnaiss. Adicionalmente, embora parte da RMSP repousar sobre rochas do Grupo São Roque, tais como filitos, micaxistos e metacalcários, não se dispõe de ensaios sobre estas litologias.

Visto não se dispor de informações sobre a altitude dos ensaios, os resultados obtidos são apresentados na Figura 29, relacionando profundidade de ensaio às velocidades de ondas *s*. A análise deste gráfico evidencia o pequeno universo de amostras, cuja correlação razoável (coeficiente de correlação de Pearson igual a 0,653) deverá ser verificada com maior número de ensaios.

Figura 29 - Correlação entre velocidade de ondas *s* e profundidade dos ensaios no embasamento cristalino.

5.5 Considerações

Foi efetuado um levantamento, se não de todas as determinações de parâmetros elásticos dinâmicos dos materiais geológicos já realizadas na Região Metropolitana de São Paulo, com certeza da grande maioria delas. Foram desprezadas determinações vinculadas a outras finalidades que não a de determinar as propriedades elásticas dinâmicas dos materiais naturais. Foi implementado um banco de dados com todos os resultados obtidos e foram determinadas as litologias sobre as quais cada um dos ensaios foi realizado. Foram selecionadas as amostras de cada litologia e, em alguns casos, elaborou-se uma classificação considerando-se o material ensaiado. A análise estatística dos conjuntos de dados foi apresentada e, salvo o conjunto de dados dos materiais da Formação São Paulo, as correlações encontradas foram pobres.

Não foram analisadas as Formações Itaquaquetuba e Tremembé por não se dispor de ensaios nestas litologias, o mesmo sendo válido para as rochas do grupo São Roque.

Acredita-se que o universo de amostras considerado seja demasiadamente pequeno para a complexidade e variedade dos materiais estudados, o que denota a necessidade de que tais determinações sejam efetuadas mais corriqueiramente de forma a se ampliar o banco de dados e possibilitar uma análise estatística mais representativa e passível de ser utilizada nas fases de análise de viabilidade e de pré-projeto de obras de engenharia, conforme citado anteriormente por Rocha & Celestino (1992) e Prado *et al.* (1994).

Para que tais ensaios sejam efetuados com maior frequência deve-se torná-lo mais acessível à comunidade. Considerando que um dos grandes limitantes para uma maior popularização dos ensaios "crosshole" no meio técnico brasileiro tem sido seu alto custo de execução (e.g. Décourt, 1995), sugere-se a busca de alternativas que diminuam seu custo e facilitem sua execução.

6. DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA ENSAIOS ENTRE-FUROS

6.1 Generalidades

A composição do custo do ensaio "crosshole" é dada pela execução dos furos de sondagem, a instalação do revestimento, a injeção de calda de cimento no espaço anelar (entre o maciço e o revestimento), além da realização do ensaio propriamente dito.

Os equipamentos disponíveis no mercado exigem furos de sondagens de grande diâmetro (da ordem de 100 mm, ou 4"), de forma a possibilitarem a instalação de revestimento de diâmetro de 75 mm (3"). Sabe-se que, para tubos de revestimento com maiores diâmetros, faz-se necessário que estes possuam paredes mais resistentes, ou seja, se o material considerado é o PVC, mais espessas.

É possível encontrar no mercado tubos com paredes de diferentes espessuras, dependendo da aplicação prevista. Desta forma, se a aplicação é para a condução de água, os tubos têm espessura compatível com a pressão a que estará submetido (cerca de 1 MPa). Por outro lado, os tubos destinados ao transporte de esgoto têm espessura significativamente menor pois não é esperado o acúmulo de pressão. Evidentemente, o custo destes tubos é diferenciado e proporcional à quantidade de material utilizado em sua confecção, ou seja, os tubos destinados a esgoto são significativamente menos onerosos do que aqueles destinados a água.

O desenvolvimento do sistema aqui apresentado foi efetuado levando-se em conta o maior diâmetro de tubo de PVC disponível no mercado, possível de ser colocado como revestimento em furo de sondagem de 75 mm (3 polegadas) de diâmetro.

Tal premissa foi adotada objetivando minimizar o custo final de execução do furo de sondagem (que inclui além do furo propriamente dito, o revestimento de PVC). Em adição, apesar das sondagens a percussão com amostragem SPT serem executadas em furos de 2 ½" (63,5 mm), é prática comum efetuar o furo com 3" (75 mm) e só a amostragem no diâmetro nominal do amostrador. Portanto, pesquisa de mercado efetuada apontou que a melhor alternativa seria utilizar, como revestimento, tubos de esgoto de PVC com diâmetro externo de 50 mm, facilmente encontrados nas lojas de

materiais de construção como "PVC branco DN 50". Este tubo, além de ser de baixo custo, permite um espaço anelar suficiente para que seja injetada calda de cimento que irá proporcionar um perfeito acoplamento mecânico entre a fonte sísmica e o maciço. A junção entre os tubos é feita por cola de PVC, que oferece grande resistência à tração e rápida aderência.

Um ponto a ser considerado é a resistência do tubo à pressão exercida pela calda de cimento, que pode ser elevada em profundidades maiores e ocasionar a deformação do tubo, obstruindo, desta forma, a passagem do equipamento. Contudo, diversos testes realizados mostraram que, para as profundidades usuais em que os ensaios são realizados (até 35 metros), tal problema não ocorre.

A parede desse tubo de PVC tem 3,5 mm de espessura, o que o confere diâmetro interno de 43 mm, dimensão tomada como diâmetro limite para o diâmetro externo tanto da fonte como do sensor.

6.2 Sistema de ensaios "crosshole"

Como foi visto anteriormente, o equipamento para ensaios "crosshole" consiste em uma fonte sísmica, um sensor e o equipamento de registro. A fonte sísmica deve ser capaz de gerar preferencialmente ondas *s*, uma vez que a velocidade de propagação destas ondas é o parâmetro mais importante para a engenharia de fundações. No entanto, a determinação das velocidades das ondas *p* é também desejável para o cálculo principalmente do coeficiente de Poisson dos materiais. O sensor deve ser, também, sensível a ambas as ondas, sendo que a melhor alternativa consiste no sensor que responde triortogonalmente, ou seja, sua componente vertical sendo mais sensível às ondas *s*, enquanto as componentes horizontais às ondas *p*, visto que as fontes geram preferencialmente ondas *sv* (ondas *s* polarizadas verticalmente).

6.3 Fonte sísmica

A fonte sísmica apresentada neste trabalho resulta de uma evolução de fonte anteriormente desenvolvida pelo autor no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do

Estado de São Paulo - IPT, e utilizada em alguns trabalhos realizados para a Companhia do Metropolitano de São Paulo - Metrô.

Ela consiste em um êmbolo deslizante com dois batedores (Figuras 30 e 31), um em cada extremidade, que deslizam por dois tubos guias (Figuras 32 e 33), à medida que se movimenta, da superfície, um cabo de aço ao qual é preso o êmbolo. Estes batedores se chocam contra o corpo da fonte (que é fixado no maciço por meio de sistema pneumático) tanto no movimento ascendente (puxando-se o cabo de aço), como descendente (soltando-se o cabo de aço).

No movimento ascendente, o êmbolo inferior se choca com o batente inferior (Figura 34), enquanto no movimento descendente, o êmbolo superior se choca com o batente superior (Figuras 35 e 36). Com isso torna-se possível gerar frentes de ondas cisalhantes com polaridades invertidas, que, por sua vez, irão gerar sinais sísmicos com polaridade invertida. A utilização desta propriedade irá facilitar sobremaneira a interpretação dos resultados dos ensaios, principalmente em áreas com índice de ruído ambiental elevado (caso típico de áreas urbanas), pois torna-se possível determinar com grande precisão o exato instante de mudança de polaridade do sinal. No batente superior está instalado o sistema de alimentação pneumática para que o tubo de borracha interno se infle, pressionando as sapatas contra a parede do furo. A rigidez e o alinhamento do sistema são garantidos pelos tubos guias, juntamente com dois cilindros (Figuras 37 e 38) colocados nas extremidades dos tubos guia e por um tubo interno (Figura 39), que une os dois batentes. A Figuras 40 mostra visão em perspectiva da fonte.

Figura 30 – Desenho mecânico do batedor superior.

Figura 31 – Desenho mecânico do batedor inferior.

GUIAS SUPERIORES (02 peças)

Figura 32 – Desenho mecânico dos tubos guias superiores.

GUIAS INFERIORES (02 peças)

Figura 33 – Desenho mecânico dos tubos guias inferiores.

Figura 34 – Desenho mecânico do batente inferior.

Figura 35 – Desenho mecânico parcial do batente superior.

Figura 36 – Desenho mecânico complementar do batente superior.

Figura 37 – Desenho mecânico do centralizador superior.

Figura 38 – Desenho mecânico do centralizador inferior.

Figura 39 – Desenho mecânico do tubo interno.

Figura 40 - Visão em perspectiva da fonte sísmica, mostrando o sistema pneumático de fixação, batedor e batente superiores.

O sistema de sincronismo (*trigger*), que indica o momento do impacto, é feito por intermédio de uma cerâmica piezoelétrica instalada em cavidade apropriada também no batente superior do corpo da fonte, sendo que o sinal gerado é transmitido por cabo elétrico blindado ao sismógrafo, a partir da extremidade de um dos tubos guia (Figura 41).

Figura 41 - Detalhe da saída do sinal de sincronismo e entrada de ar comprimido na fonte sísmica.

A conexão elétrica da cerâmica piezoelétrica é feita pela carcaça do equipamento (polaridade negativa) e por meio de soldagem de um fio em sua parte superior (polaridade positiva da pastilha piezoelétrica). Um cabo blindado é utilizado para essa finalidade, sendo que o condutor central transmite o sinal de polaridade positiva e a malha o sinal negativo. A malha do cabo é ligado à carcaça do equipamento por meio de um pequeno parafuso.

Este sistema mostrou-se apropriado para transmissão do sinal do "trigger" até comprimentos de cabo da ordem de 50 metros. A cerâmica piezoelétrica, de zirconato titanato de chumbo e bário consiste em um pequeno cilindro de 10 mm de diâmetro por

4 mm de espessura, sendo que as superfícies polarizadas são cobertas por uma película de prata condutora.

Deve ser lembrado que o sinal gerado pela cerâmica piezoelétrica, apesar de ser de alta tensão (pode atingir milhares de Volts), é de baixa potência, sendo atenuado em seu percurso devido à capacitância do cabo elétrico.

Portanto, para a execução de ensaios a grandes profundidades (maiores do que 50 metros), foi implementado um pequeno circuito amplificador (*buffer*), cujo diagrama esquemático é apresentado na Figura 42. Trata-se de um amplificador de ganho unitário, porém com alta impedância de entrada. Com a inclusão deste circuito foi possível trabalhar com cabos com comprimentos maiores do que 100 metros.

Figura 42 - Diagrama esquemático de circuito opcional para sinal do “trigger” quando do uso de longos (maiores de 50 m) comprimentos de cabo.

O cabo elétrico, ligado à cerâmica piezoelétrica, passa por dentro de um dos tubos guia, estando, desta forma, protegido na região de maior solicitação mecânica (região de impacto do batedor superior).

O sistema de fixação do corpo da fonte nas paredes do furo é formado por quatro sapatas metálicas deslizantes e semi-flexíveis que são pressionadas contra a parede do furo por meio de uma mangueira de borracha com alma de lona de alta resistência. Esta mangueira é inflada por ar comprimido enviado da superfície por mangueira plástica especial, de pequeno diâmetro, e conectores de engate rápido.

A entrada de ar comprimido ao sistema central (pneumático) da fonte é feita através do outro tubo guia, evitando, novamente conexão direta na região de maior solicitação mecânica. Do batente superior à câmara pneumática interna, o ar comprimido é transmitido através de um orifício com cerca de 2 mm de diâmetro. A estanqueidade entre a mangueira de borracha e a câmara pneumática é feita por meio de uma braçadeira executada manualmente com fio *invar* (arame de aço inoxidável de alta resistência).

Os ensaios realizados evidenciaram que esta fonte sísmica é suficiente caso se utilize sensor triortogonal, não sendo necessária fonte adicional de ondas *p*. Isto se deve ao fato de que a fonte gera, concomitantemente às ondas *s*, ondas *p*, sendo que a componente vertical do sensor irá registrar com grande detalhe a onda *s*, e as componentes horizontais estão otimizadas para sentir a onda *p*.

Apesar da relativa pequena quantidade de energia fornecida pela fonte, devido principalmente às suas pequenas dimensões (pouca massa dos batedores deslizantes e pequena altura de queda), deve-se lembrar que os sistemas sismográficos atuais permitem que o sinal captado pelo sensor seja "empilhado" (*stacking*) o que minimiza tal limitação, garantindo a possibilidade de registro interpretável.

Deve ser notado também que, uma vez que de acordo com a norma ASTM a distância entre os furos é especificada para ser menor ou igual a 5 metros, mesmo com as fontes sísmicas convencionais (comerciais), quando as boas condições de acoplamento mecânico entre revestimento e maciço não estão satisfeitas, o sinal recebido no sensor não permite uma interpretação confiável, independentemente da quantidade de energia gerada pela fonte e pelo número de empilhamentos adotado.

Portanto, a experiência tem mostrado ser muito mais importante a boa execução do furo de sondagem, instalação do revestimento e preenchimento do espaço anelar com argamassa, do que a quantidade de energia gerada pela fonte.

6.4 Sensor Triortogonal

A exemplo da fonte sísmica, o diâmetro externo do sensor foi limitado pelo diâmetro interno do revestimento de PVC (43 mm). Após intensa pesquisa de tubos de alumínio disponíveis no mercado, optou-se pela utilização de tubo com diâmetro externo de 38 mm e diâmetro interno de 32 mm. Portanto, um tubo de parede com espessura de 3 mm. Este tubo é o "invólucro" do conjunto sensor, o qual foi montado em uma estrutura de alumínio projetada e usinada especialmente para acomodar as três unidades sensoras propriamente dito, e seus respectivos pré-amplificadores (Figura 43).

Figura 43 - Visão explodida do sensor triortogonal, mostrando o tubo de invólucro, unidade sensora e ponteira superior.

O conjunto sensor (Figura 44) é composto por um "chassis" onde na extremidade inferior é colocada a unidade sensora sensível a deslocamentos verticais. O compartimento contíguo acomoda placa de circuito impresso com dois pré-amplificadores (um para a unidade sensora vertical e outro para uma das unidades sensoras horizontais, a qual é instalada no terceiro compartimento do chassis (de baixo para cima). O compartimento seguinte acomoda a outra unidade sensora horizontal, a qual é ligada ao pré-amplificador instalado no compartimento contíguo e acima. O compartimento superior é utilizado para a conexão do cabeamento interno com o cabo multicondutor ligado à superfície.

Figura 44 - Unidade sensora do sensor triortogonal, composto das cerâmicas piezoelétricas, pré-amplificadores e conexão elétrica.

As unidades sensoras são compostas por uma cerâmica piezoelétrica (zirconato titanato de chumbo e bário) colada por meio de uma finíssima película de adesivo epoxi ao chassis. A espessura da película de adesivo deve ser muito bem controlada, uma vez que esse material é isolante elétrico. Sobre a cerâmica piezoelétrica é, também, colado um cilindro de aço inoxidável das mesmas dimensões da cerâmica, cuja função

é atuar como massa sísmica ou massa inercial do sistema. Novamente, a aplicação de adesivo deve atender às recomendações expressas anteriormente.

Deve ser notado que o projeto do sensor foi executado objetivando a possibilidade de fácil montagem e desmontagem, tanto para fins de calibração como de eventual manutenção.

Os princípios físicos, teóricos e considerações sobre a montagem mecânica não serão aqui abordadas, pois estão detalhadas em Taioli (1992) e Taioli (1996).

A eletrônica do sensor foi implantada internamente no conjunto sensor com a finalidade de minimizar o comprimento do cabo elétrico entre a pastilha piezoelétrica e o amplificador. Este cabo pode ser considerado como um capacitor em paralelo ao sensor fazendo com que o sinal decresça, diminuindo a sensibilidade do sensor (Taioli, 1996). Portanto, o cabo que liga a cerâmica piezoelétrica ao pré-amplificador possui apenas cerca de 4 cm.

Um potenciômetro permite o ajuste do ganho do amplificador, possibilitando sua calibração. O sinal, uma vez amplificado, torna-se possível de ser transmitido a longas distâncias, apesar de que, para ensaios com finalidades de engenharia, a profundidade máxima típica não supera os 35 metros. O diagrama esquemático do circuito do pré-amplificador é apresentado na Figura 45, enquanto o "lay-out" da placa de circuito impresso desenvolvida e utilizado é apresentado nas Figuras 46 e 47.

Figura 45 - Diagrama elétrico do circuito do pré-amplificador do sensor desenvolvido.

Figura 46 - Placa de circuito impresso desenvolvida, para acomodar dois pré-amplificadores. Face dos componentes.

Figura 47 - Placa de circuito impresso desenvolvida, para acomodar dois pré-amplificadores. Face de soldagem.

O cabo elétrico utilizado entre o sismógrafo e o sensor é um cabo blindado com 7 condutores flexíveis (AWG # 26). Isto permite que pelo mesmo cabo sejam fornecidas as alimentações aos pré-amplificadores e seja transmitido o sinal de saída dos três sensores. O cabo é marcado a cada 50 cm para que se consiga controlar a profundidade em que se encontra.

Para a fixação do sensor na parede do furo de sondagem foi inicialmente implementado um sistema de mola, que pressiona o sensor à parede do furo. O efeito de mola é conseguido por uma cinta de aço flexível (semelhante àquelas utilizadas para amarração de embalagens). Esta mola é presa nas ponteiros do corpo do sensor por meio de dois anéis deslizantes e reguláveis. Apesar da vantagem deste sistema, principalmente devido à praticidade de operação, testes de campo evidenciaram a dificuldade de se obter ou um acoplamento adequado (no caso da mola estar regulada para imprimir pequena pressão), ou de deslizamento no interior do tubo de revestimento (caso a mola fosse regulada para imprimir maior pressão). Desta forma, optou-se por manter o sistema pneumático convencional, que consiste em uma câmara pneumática que é inflada por tubulação de ar comprimido a partir da superfície, assim que se atinge a cota especificada para ensaio.

6.5 Amplificadores e filtros

O sinal gerado pelo sensor é enviado a uma unidade de amplificação e filtros, igual à utilizada por Taioli (1992). Consiste em um conjunto de amplificadores que compatibilizam o sinal de saída dos sensores com a entrada do conversor analógico-digital. Possuem um ganho fixo de 20 dB (100 vezes). Os filtros consistem em uma unidade passa-altas, cujo objetivo é atenuar as frequências abaixo de 20 Hz, e outra unidade passa-baixas sintonizada em 1.000 Hz que tem, também, a função de filtro anti-alias. As frequências foram escolhidas em função dos seguintes aspectos:

- 1) filtro passa-altas - o ruído normalmente presente em centros urbanos é de baixa frequência, que, comumente, prejudica ou impossibilita a interpretação dos registros;
- 2) passa-baixas - apesar do sistema como um todo responder até frequências mais elevadas, a adoção de filtro de frequência de corte mais elevada necessitaria de rampa mais abrupta, uma vez que este filtro atua também como anti-alias. Portanto,

visando simplicidade e compatibilização com menor custo, foram implementados filtros com frequência de corte de 1.000 Hz.

A implementação dos filtros foi efetuada baseando-se em Johnson & Hilburn (1975). Ambos filtros são do tipo Chebyshev, com rampa de 12 dB/oitava para o passa-altas e 24 dB/oitava para o passa-baixas. A rampa mais acentuada do filtro passa-baixas se justifica, pois, como já citado, ele atua também como anti-alias. A cada unidade de filtro é associado um amplificador com ganho de 10 vezes, o que fornece o ganho conjugado de 100 vezes (20 dB).

Para a confecção dos filtros e amplificadores foram utilizados resistores de filme de metal, com precisão nominal de 1%, e capacitores de poliéster com precisão nominal de 10%, porém, em ambos casos, os componentes foram escolhidos individualmente utilizando-se resistivímetro e capacitímetro. Em certos casos, houve necessidade de fazer uma associação (em série ou em paralelo) entre dois componentes para a obtenção do valor especificado no projeto.

Adicionalmente, tendo em vista que a grande maioria dos ensaios "crosshole" é executada em área urbana, onde é comum ocorrer indução de sinal da rede de distribuição elétrica (60 Hz para o Brasil), foi implementado um filtro sintonizado (*notch*) que, por funcionar por realimentação, atenua tanto mais quanto maior for o ruído nessa frequência. O projeto deste filtro foi baseado em Texas Instruments (1982).

Um cuidado adicional que é necessário ao se desenvolver um sistema de registro para ensaios "crosshole" é uma eventual defasagem provocada pela resposta de fase dos circuitos. Visando evitar este problema, foram implementados circuitos o mais semelhantes possível, sendo que o levantamento de resposta de fase mostrou ocorrer a mesma defasagem para todos os circuitos, sendo que o método de medidas utilizado, assim como os resultados obtidos são apresentados em Taioli (1992).

6.6 Conversor analógico-digital

A comunicação entre os amplificadores e o microcomputador é feita por um conversor analógico digital (A/D) fabricado no Brasil e adquirido no mercado. Consiste em um conversor A/D marca Lynx, modelo ADS 2120, cujas principais características são listadas a seguir:

1. número de canais: 16 canais multiplexados;
2. frequência de amostragem: 100 kHz;
3. número de bits: 16 bits;
4. impedância de entrada: 100 k Ω ;
5. possibilidade de programação utilizando linguagem de alto nível;
6. possibilidade de programar com quatro níveis de ganho (1, 2, 5 e 10 vezes), em adição àquele fixo dos amplificadores;
7. precisão de $\pm \frac{1}{2}$ bit menos significativo;
8. possibilidade de operar em ambientes com temperatura entre 0°C e 50°C.

O diferencial maior entre este conversor A/D e o utilizado por Taioli (1992), consiste no sistema de comunicação entre o conversor A/D e o microcomputador.

Enquanto o primeiro efetuava a comunicação diretamente no *bus* do computador, utilizando-se do “acesso direto à memória” (DMA - *Direct Memory Access*), este utiliza a porta de comunicação paralela (ou *Centronics*), graças à implementação de uma memória FIFO (*first in - first out*). Esta porta de comunicação, utilizada comumente pelas impressoras e alguns outros periféricos, vem sofrendo evoluções nos últimos anos, permitindo a transferência bi-direcional de grande quantidade de dados com razoável rapidez. Diversos modelos são encontrados hoje nos microcomputadores, além daquele conhecido como “padrão” (*standard*). Como exemplo podem ser citadas a bi-direcional (*bi-directional*), a EPP (*enhanced parallel port*) e a ECP (*enhanced centronics port*).

Para que a comunicação entre o sistema de aquisição de dados, mais especificamente o conversor A/D e o computador fosse possível, foi desenvolvido um programa de controle e apresentação dos dados dedicado.

Esta opção foi escolhida em contraposição à simples aquisição de “softwares” prontos existentes no mercado, pois possibilita a adequação do programa às necessidades únicas do ensaio, sem necessidade de que a cada novo ensaio fossem redefinidas todas as variáveis (procedimento adotado nos programas comerciais).

6.7 Desenvolvimento de "software" de aquisição

Foi desenvolvido um "software" para aquisição de dados, gravação em disco, apresentação dos dados no monitor, impressão em papel e recuperação do arquivo para posterior análise.

O "software" foi escrito em linguagem Pascal, utilizando-se o compilador Turbo Pascal versão 5.5 da Borland International, no ambiente MS-DOS. Foi escolhida esta linguagem pois ela permite fácil controle de endereços, entrada e saída de dados e manipulação individual de bits, além de, por ser uma linguagem estruturada, possibilitar manutenção e aprimoramento com pequeno investimento de tempo.

Como já comentado, os programas comerciais, por serem fornecidos em arquivos executáveis, impossibilitam seu aprimoramento, criando grande dependência às empresas que os desenvolveram. Este aspecto ganha importância maior à medida que se considera que o sistema como um todo foi desenvolvido também com objetivos didáticos. O compilador utilizado possui, também, uma extensa biblioteca de comandos gráficos (BGI), o que facilita a implementação das rotinas gráficas.

A arquitetura do "software" procura emular a operação de um sismógrafo digital convencional, porém com "menus" específicos que fornecem as alternativas disponíveis ao usuário. A arquitetura básica está descrita em detalhe em Taioli (1992). Evidentemente, apesar da arquitetura ser a mesma, o programa é sensivelmente diferente, a fim de atender as peculiaridades específicas dos ensaios "crosshole" e, como já citado, da alteração da forma de comunicação do conversor A/D com o microcomputador.

A vantagem óbvia deste sistema sobre aquele desenvolvido por Taioli (1992) é sua universalidade, possibilitando a utilização de qualquer microcomputador, sem necessidade de adaptações ou modificações. Este fator se torna particularmente importante para os trabalhos de campo, onde é mais conveniente a utilização de microcomputadores portáteis (*notebooks*), cujas características (principalmente de expansão) são muito mais limitadas do que os computadores de mesa.

As características mais importantes que foram implementadas são:

- a. possibilidade de trabalhar com apenas um, ou dois sensores triortogonais concomitantemente;

- b. inclusão de uma rotina que recupera a configuração instrumental utilizada no último ensaio, evitando assim a necessidade de entrar com todos os dados de ganho, filtro, etc., a cada novo ensaio;
- c. inclusão de uma rotina de cursor que permite medir o tempo de percurso com precisão de uma amostra;
- d. possibilidade de reversão de polaridade para o “empilhamento” (*stacking*) do sinal, mesmo com reversão da polaridade da fonte;
- e. funções de zoom, amplificação, etc.

6.8 Testes de campo

Diversos testes de campo foram realizados, inclusive durante o desenvolvimento e implementação do sistema. Alguns dos dados disponíveis no banco de dados apresentado no Capítulo 4 desta tese foram obtidos utilizando-se este sistema.

Sua operação mostrou-se ser fácil e bastante prática para, inclusive a interpretação dos resultados ainda no campo.

Como termo de comparação com sistemas convencionais, pode-se citar exemplo de ensaio ocorrido para estudo visando a determinação das propriedades elásticas dinâmicas de solo de alteração na região do bairro do Brooklin, onde o tempo utilizado para montagem, execução de 8 ensaios, interpretação e registro dos resultados, além da desmontagem do sistema, foi de menos de 2 horas, necessitando de apenas 2 pessoas. Isto se torna possível graças à grande portabilidade do sistema. A Figura 48 apresenta um registro típico de ensaio realizado exatamente em um dos ensaios citados, enquanto a Figura 49 mostra dois registros obtidos no mesmo ensaio, porém com polaridade de fonte invertida, de forma a facilitar a interpretação do exato instante de chegada da onda *s*.

6.9 Custo do sistema

Uma tarefa importante, porém extremamente difícil de ser executada, é a avaliação do custo de um sistema cuja produção foi de apenas uma unidade. Isto se deve ao fato de que os custos do tempo utilizado para a concepção, projeto e testes, além do desenvolvimento do *software*, não podem ser agregados em apenas uma unidade, devendo ser diluídos em vários exemplares. No entanto, é possível avaliar o

Figura 48 - Registro de campo obtido em ensaio "crosshole" utilizando o sistema e sensor triortogonal desenvolvidos.

Figura 49 - Registro devidamente interpretado onde é possível observar a chegada da onda *p* e da onda *s* (esta, com mudança de fase provocada pela inversão de polarização da fonte sísmica).

custo dos componentes utilizados, assim como da mão de obra das usinagens necessárias.

Pode-se, desta forma, resumir o custo do sistema (junho/1999) da seguinte forma:

a. componentes	R\$ 1.200,00
b. usinagem	R\$ 1.500,00
c. conversor A/D	R\$ 3.000,00
d. montagem do sistema	R\$ 500,00
TOTAL	R\$ 6.200,00

Deve-se adicionar também o preço de um microcomputador, tipo "notebook", para a aquisição e processamento dos dados.

A simples comparação de preços com sistemas comerciais existentes evidencia a grande diferença já nos custos de aquisição do sistema, que para os importados ultrapassa sempre a casa dos US\$ 20.000,00 (FOB).

Deve-se ressaltar, no entanto, que o sistema aqui proposto permite execução de ensaios em furos normalmente utilizados na fase de investigação (sondagens a percussão - SPT), não necessitando de furos adicionais ou de diâmetros especiais, exigência dos sistemas convencionais.

Neste aspecto, uma comparação entre custo de execução de furos de sondagens para este sistema e para os sistemas convencionais (comerciais), evidencia uma diferença de preços que atualmente é da ordem de R\$ 50,00 por metro perfurado, não se considerando a diferença de custo do revestimento e preenchimento do espaço anelar entre furo e maciço. Deve ser notado que os furos para os sistemas convencionais devem ser feitos especialmente, normalmente utilizando-se sondagens rotativas, ou seja, são furos adicionais àqueles utilizados para a investigação convencional (ensaio SPT).

Tanto a diferença de preço do sistema de aquisição de dados, como da infraestrutura para a execução dos ensaios, certamente poderá viabilizar uma maior popularização dos ensaios "crosshole", à medida que o torna acessível mesmo a pequenos empresários que atuam tanto na área de geofísica aplicada como na de engenharia de fundações.

Evidentemente, aqui não se considera a economia que a adoção rotineira deste ensaio, pela engenharia de fundações, pode trazer às obras, mesmo de edifícios convencionais. Pode-se, neste aspecto, citar um exemplo de estudo realizado para definir o tipo de fundação a ser utilizado em edifício na região da Avenida Paulista, que a simples determinação dos parâmetros elásticos dinâmicos das rochas sedimentares ali presentes possibilitou alternativa de fundação com custo da ordem de US\$ 30.000,00 inferior à solução convencional e inicialmente proposta (Décourt, 1994).

Espera-se que, à medida que a comunidade vá adotando o sistema proposto neste trabalho, um maior número de determinações de propriedades elásticas dos materiais geológicos da RMSP seja efetuado e, conseqüentemente com mais dados, se torne possível efetuar correlações com maior universo de amostras e maior confiabilidade.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os resultados obtidos no âmbito da linha de pesquisa sobre o comportamento dinâmico dos materiais geológicos da Região Metropolitana de São Paulo.

Foi efetuado um levantamento das determinações das propriedades elásticas dinâmicas realizadas sobre materiais geológicos da RMSP. Paralelamente, foi desenvolvida estrutura de um banco de dados que possibilitasse a rápida recuperação e classificação dos dados existentes. Este foi então alimentado com todos os dados disponíveis, o que totalizou 298 ensaios.

A partir do banco de dados procedeu-se à classificação dos dados por litologia, adotando-se o conhecimento geológico atual da RMSP, e efetuou-se tratamento estatístico considerando-se a variação das velocidades de ondas *s* em relação à profundidade ensaiada e, dependendo da disponibilidade de informação, em relação à altitude dos ensaios.

Considerando as rochas sedimentares da Formação São Paulo, os resultados mostraram uma boa correlação das velocidades de propagação de ondas *s* com a altitude ensaiada, para o que se obteve uma equação de ajuste linear com coeficiente de correlação de -0,803, enquanto que, em relação à profundidade de ensaio, a correlação encontrada foi de 0,759. Com respeito à correlação em altitude, deve-se tomar o cuidado de lembrar que os ensaios analisados correspondem todos à região do espigão da Avenida Paulista - Rua Doutor Arnaldo, e devido à própria tectônica presenciada pela Bacia de São Paulo, estas correlações podem não ser válidas para outras regiões de afloramento desta formação.

Por outro lado, a comparação dos dados obtidos com a seção-tipo descrita por Suguio & Barbour (1969) e definida por Riccomini (1989), levando-se também em conta as observações apontadas por Sigolo & Ohnuma (1996), torna possível afirmar que velocidades de ondas *s* da ordem de 600 m/s estão associadas às crostas ferruginosas, presentes nesta unidade estratigráfica.

Com relação às rochas sedimentares da Formação Resende, foram feitas análises tanto com o conjunto de dados, como separando-se os materiais (argilas e areias) tanto em termos de altitude como de profundidade do ensaio. Nenhuma destas análises evidenciou uma boa correlação entre as velocidades das ondas *s*, o que pode

estar relacionado à grande variação lateral, característica desta formação. Adicione-se a isto o fato de as argilas cinzas, conhecidas no meio geotécnico como "Taguá", terem apresentado grande dispersão dos resultados. Estas conclusões permitem afirmar que devem ser intensificados estudos sobre esta litologia, principalmente devido à sua importância como horizonte de suporte provisório na construção civil.

Quanto aos solos de alteração da RMSP, dispõem-se de dados somente para solos saprolíticos de gnaisses. Os resultados obtidos da análise efetuada evidenciaram uma boa correlação das velocidades de ondas s com a altitude do ensaio (coeficiente de Pearson de -0,877), enquanto para os referenciados em profundidade esta correlação decresce para 0,420, com grande dispersão dos dados entre as profundidades de 5 a 10 metros. Estes fatos podem estar relacionados ao pequeno universo de amostras ou às próprias informações sobre profundidade, que desconsideram eventuais escavações já realizadas nas obras onde os ensaios foram conduzidos.

Não se dispõe de ensaios sobre a Formação Itaquaquecetuba e Formação Tremembé.

A análise dos dados referentes ao embasamento cristalino limita-se a um universo de dados muito pequeno (apenas 13 amostras), sendo que as informações não diferenciam os granitos de gnaisses, assim como não consideram as anisotropias presentes nestes últimos. Não se dispõe, também, de dados sobre outras litologias, particularmente aquelas associadas ao Grupo São Roque. Portanto, a correlação obtida (coeficiente de Pearson de 0,653), apesar de razoável, considerando a análise de dados geológicos, deve ser considerada com grande reserva.

Uma análise crítica do conjunto de dados catalogado leva a considerar que o universo de dados disponível é ainda pequeno para as dimensões da RMSP. Este fato tem sido creditado principalmente ao alto custo dos ensaios para determinação das propriedades elásticas dinâmicas (Décourt, 1995), o que impossibilita sua utilização de forma corriqueira nos estudos geológico-geotécnicos para engenharia de fundações em obras convencionais.

Visando promover uma maior popularização do uso de ensaios "crosshole" para determinação dos parâmetros elásticos dinâmicos, foi desenvolvido e testado um sistema composto por fonte sísmica e sensor triortogonal, que utiliza furos de

sondagem convencionalmente utilizados em obras de engenharia, na fase de investigação (SPT).

Este sistema, por ser de pequeno diâmetro, permite sua instalação em revestimentos com diâmetro interno de 43 mm e diâmetro externo de 50 mm, perfeitamente compatíveis com os diâmetros das sondagens SPT. O sistema desenvolvido pode ser facilmente adaptado a sismógrafos convencionais ou mesmo ao sistema sismográfico dedicado, também desenvolvido no âmbito deste trabalho. Este sistema vem sendo utilizado, com sucesso, em ensaios "crosshole" na RMSP.

Tendo em vista que tanto o sistema de aquisição de dados, como a infraestrutura necessária para a execução dos ensaios com o sistema proposto apresentam custos significativamente inferiores àqueles vinculados aos sistemas convencionais, espera-se que se viabilize uma maior popularização dos ensaios "crosshole", à medida que o torna acessível mesmo a pequenos empresários que atuam tanto na área de geofísica aplicada como na de engenharia de fundações.

Espera-se que, com a adoção do sistema proposto neste trabalho, um maior número de determinações de propriedades elásticas dos materiais geológicos da RMSP seja efetuado e, à medida que se disponha de mais dados, se torne possível efetuar correlações com maior universo de amostras e, conseqüentemente, com maior confiabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCHER, A.A.; LUTTIG, G.W.; SNEZHKO, I.I. 1987. *Man's dependence on the earth*. Nairobi, UNEP; Paris. UNESCO. 216p.
- ASTM - D4428/D4428M-84. 1990. Standard test methods for crosshole seismic testing, In *Annual Book of ASTM Standards*, Sec.4, Construction, v.04-08, Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics, p. 674-688.
- BARROS, J.M.C. 1997. *Módulo de cisalhamento dinâmico de solos tropicais*. São Paulo. 637p (Tese de Doutorado Escola Politécnica da Universidade de São Paulo).
- BLAIR, D.P. 1984. Rise times of attenuated seismic pulses detected in both empty and fluid-filled cylindrical boreholes. *Geophysics*. **49**(4): 398-410.
- BOIS, P.; LA PORTE, M.; LAVERGNE, M.; THOMAS, G. 1972. Well-to-well seismic measurements. *Geophysics*. **37**(3): 471-480.
- BORN, W.T. 1960. A review of geophysical instrumentation. *Geophysics*. **25**(1): 77-91.
- CAMARGO, F.P.; DOBEREINER, L. 1993. Geologia de Engenharia na Europa e no Brasil - Situação atual e perspectivas para o ano 2000. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 7, Poços de Caldas, 1993. *Anais...*, Poços de Caldas, ABGE. V.1, p. 33-42,
- CARVALHO, N.S. 1993. A utilização do espaço interior dos maciços rochosos do município do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 7, Poços de Caldas, 1993. *Anais...*, Poços de Caldas, ABGE. V.1, p. 197-209.
- COUTINHO, J.M.V. 1980. *Carta geológica da região metropolitana da Grande São Paulo*, 1:100.000. São Paulo, EMPLASA, 2 folhas.
- COZZOLINO, V.M.. 1996. "Areias Basais" fofas na área central da cidade de São Paulo e sua provável relação com o tectonismo local. *Solos e Rochas*, **19**(2): 163-174.
- COZZOLINO, V.M.; MARTINATI, L.R.; BUONO, A.V.D.. 1994. Contribuição ao estudo dos movimentos tectônicos sin e pós-sedimentares na Bacia de São Paulo a partir de evidências observadas nas escavações do túnel da Eletropaulo. *Solos e Rochas*, **17**(1): 13-29.
- DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. 1992. Applications of ground penetrating radar to mining, groundwater and geotechnical projects: selected case histories; in Pilon, J. ed. *Ground Penetrating Radar*. Geological Survey of Canada, Paper 90-4, pp. 49-55.
- DÉCOURT, L. 1994. *Comunicação pessoal*.
- DÉCOURT, L. 1995. *Comunicação pessoal*.

- DÉCOURT, L.; NIYAMA, S.; CAMPOS, G.C.; TAIOLI, F.; DOURADO, J.C. 1995. Experimental behavior of a piled footing. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE MECÂNICA DE SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 10, Guadalajara, 1995., *Anais...* Guadalajara, IASMFE. V.2, p. 1083-1094.
- DOMENICO, S.N. 1984. Rock lithology and porosity determination from shear and compressional wave velocity. *Geophysics*, **49**(8): 1188-1195.
- DOURADO, J.C. 1984. *A utilização da sísmica na determinação de parâmetros elásticos de maciços rochosos e terrosos "in situ"*. São Paulo, ABGE, 12 p. (Publicação Especial).
- DOURADO, J.C.; PRADO, R.L.; TAIOLI, F.; IYOMASA, W.S.; CORDEIRO, R.P. 1994. O ensaio crosshole e as correlações com outros ensaios geotécnicos. CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 10, Foz do Iguaçu, 1994. *Anais...* Foz do Iguaçu, ABMS, V.2, p. 523-529.
- FEHLER, M.; PEARSON, C. 1984. Cross-hole seismic surveys: Applications for studying subsurface fracture systems at dry rock geothermal site. *Geophysics*, **49**(1): 37-45.
- FERNANDES, L. 1999. *A mineração de carvão e a água. O caso de Criciúma*. São Paulo. 190 p. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo).
- GIACHETI, H.L. 1991. *Estudo experimental de parâmetros dinâmicos de alguns solos tropicais do Estado de São Paulo*. São Paulo, 232 p (Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo).
- GIACHETI, H.L.; ZUQUETTE, L.V.; CORDEIRO, R.P.; DOURADO, J.C. 1993. Parâmetros dinâmicos de solos tropicais determinados a partir da técnica sísmica do "cross-hole". In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 7, Poços de Caldas, 1993. *Anais...*, Poços de Caldas, ABGE. V.1, p. 241-252.
- GRIPP, M.F.A. 1993. O planejamento para ocupação do espaço subterrâneo nas grandes cidades. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 7, Poços de Caldas, 1993. *Anais...*, Poços de Caldas, ABGE. V.1, p. 189-195.
- GUCUNSKI, N.; WOODS, R.D. 1991. Instrumentation for SASW testing. ASCE. *Recent Advances in Instrumentation, Data Acquisition and Testing in Soil Dynamics*, p. 1-16. (Geotechnical Special Publication Nº 29).
- HOAR, R.J.; STOKOE II, K.H. 1978. Generation and measurement of shear waves "in situ". In: SYMPOSIUM ON DYNAMIC GEOTECHNICAL TESTING. Denver, 1977. ASTM. *Special Technical Publication 654*. p. 3-29.

- HEISEY, J. S.; STOKOE, K. H.; MEYER, A. H. 1982. Moduli of pavement system from spectral analysis surface waves. *TRB, Transportation Research Record* **852**: 22-31.
- IPT. 1989. *Aplicação de ensaios sísmicos "crosshole" na avaliação de injeções em maciços terrosos*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 20p. (Relatório 27.432).
- IPT. 1993. *Ensaio sísmico entre furos ("crosshole") em área de fundação de edifício na cidade de São Paulo, SP*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 10p. (Relatório 31.631).
- IPT. 1994. *Investigação geológico-geotécnica através de reflexão de alta resolução e de ensaios "crosshole" em furos de sondagens mecânicas*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 16p. (Relatório 32.010).
- JOHNSON, D.E.; HILBURN, J.L. 1975. *Rapid practical designs of active filters*. New York, John Wiley & Sons, 264 p.
- KAELIN, B.; JOHNSON, L.R. 1999 Using seismic crosswell surveys to determine the aperture of partially water-saturated fractures. *Geophysics*, **64**(1):13-23.
- KELLER, E.A. 1996. *Environmental geology*. 7ed. New York, MacMillan Pub. Co. 521 p.
- LA PORTE, M; LAKSHMANAN, J.; LAVERGNE, M.; WILLM, C. 1973. Mesures sismiques par transmission - Application au génie civil. *Geophysical Prospecting*, **21**(1):146-157.
- LEE, M.W. 1987. Particle displacements on the wall of a borehole from incident plane waves. *Geophysics*, **52**(9): 1290-1296.
- LOU, M.; CRAMPIN, S. 1993. Modelling guided waves in cross-hole surveys in uncracked and cracked rock. *Geophysical Prospecting*, **41**(3): 241-265.
- LOVELL, J.R.; HORNBY, B.E. 1990. Borehole coupling at sonic frequencies. *Geophysics*, **55**(7):806-814.
- MACIEL FILHO, C.L. 1978. Mapeamento geotécnico e planejamento da ocupação urbana de Santa Maria, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 2, São Paulo, 1978. *Anais...*, São Paulo, ABGE. V.1, p. 257-265.
- MCCANN, D.M.; GRAINGER, P.; MCCANN, C. 1975. Inter-borehole acoustic measurements and their use in engineering geology. *Geophysical Prospecting*, **23**(1): 50-69.
- MUFTI, I.R. (1995) Pitfalls in crosshole seismic interpretation as a result of 3-D effects. *Geophysics*, **60**(3): 821-833.

- NAZARIAN, S.; K. H. STOKOE 1983.. Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems. *Transportation Reserch Record* **930**. p. 38-45.
- NAZARIAN, S. ; K. H. STOKOE II (1986). Use of surface waves in pavement evaluation. *Transportation Reserch Record* **1070**. p. 132-144.
- NAZARIAN, S.; DESAI, M. R. 1993. Automated surface wave method: field testing. *Journal of Geotechnical Engineering* **119**(7): 1094-1111.
- OLIVEIRA, A.M.S. 1990. Depósitos tecnogênicos associados à erosão atual. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 6, Salvador, 1990. *Anais...*, Salvador, ABGE. V.1, p. 411-419.
- PENG, C.; CHENG, C.H.; TÖKSOZ, M.N. 1994. Cased borehole effects on downhole seismic measurements. *Geophysical Prospecting*, **42**(7): 777-811.
- PORSANI, J.L. 1995. Aplicações do método GPR na geofísica ambiental: localização de área com tanque desenterrado e dutos. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 4, Rio de Janeiro, 1995. *Bol. Res. Exp...*, Rio de Janeiro, SBGf, p.942-943.
- PORSANI, J.L. 1999. Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado - SP. São Paulo. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista).
- PRADO, R.L. 1994. *O ensaio sísmico entre furos ("crosshole") no estudo de maciços terrosos e rochosos*. São Paulo. 123 p. (Dissertação de Mestrado, Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo).
- PRANDINI, F.L. 1974. Geological-geotechnical factors conditioning environmental degradation. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 2, São Paulo, 1974. *Proc...*, São Paulo, IAEG. V3, p.168-175.
- PRANDINI, F.L. 1976. O Brasil e a geologia no planejamento territorial e urbano. 1º In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1, Rio de Janeiro, 1976. *Anais...*, Rio de Janeiro, ABGE. V3, p. 354-370.
- PRANDINI, F.L.; GUIDICINI, G.; GREHS, S.A. 1974. Geologia ambiental ou de planejamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre, 1974. *Anais...*, , Porto Alegre, SBG. V.7, p. 273-290.
- RAHN, P.H. 1986. *Engineering Geology - an environmental approach*. 6. ed. New York, Elsevier S. Pub. Co. 589 p.
- RECTOR III, J.W. 1995. Crosswell methods: where are we, where are we going?. *Geophysics*, **60**(3): 629-630.

- RICCOMINI, C. 1989 *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. São Paulo. 256 p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo).
- RICCOMINI, C.; COIMBRA, A.M. 1992. Geologia da bacia sedimentar. In: Ferreira, A.A.; Alonso, U.R.; Luz, P.L. ed. *Solos da cidade de São Paulo*. São Paulo, ABMS/ABEF. p.37-94.
- ROCHA, H.C. 1995. *Algumas características dos solos arenosos terciários de São Paulo e suas implicações em obras subterrâneas*. São Paulo 156 p. (Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo).
- ROCHA, H.C.; CELESTINO, T.B. 1992. Conhecimentos recentes sobre a bacia de São Paulo e o projeto e construção de túneis. In: *Problemas geológicos e geotécnicos na região metropolitana de São Paulo*. ABAS, ABGE, SBG/SP, p. 97-113.
- SAUCK, W.A.; OLIVEIRA, J.A.D.; CARVALHO, J.S. 1995a. GPR in the middle Amazon Basin, Amazonas State, Brazil. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 4, Rio de Janeiro, 1995. *Bol. Res. Exp...*, Rio de Janeiro, SBGf. V.2, p.972-973.
- SAUCK, W.A.; ALVES, J.G.V.; LUIZ, J.G. 1995b. Successful applications of GPR in the lower Amazon Region, Belém, Pará, Brazil. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 4, Rio de Janeiro, 1995. *Bol. Res. Exp...*, Rio de Janeiro, SBGf. V.2, p. 974-975.
- SÍGOLO, J. B.; OHNUMA, C. S. 1996. Provável modelo de origem e evolução dos horizontes ferruginosos da Bacia de São Paulo com base na geoquímica de superfície. *Bol. IG-USP, Série Cient.*, **27**: 137-149.
- SILVA, A. 1999. *Evolução geológica da Bacia de São Paulo: Contribuição da aquisição geofísica*. São Paulo. 102 p. (Tese de Doutorado, Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo).
- SOBRAL, A.C.S.; PRADO, R.L.; ROCHA, H.C. 1993. Perspectivas de aplicação do ensaio sísmico "cross-hole" na determinação de parâmetros geotécnicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 7, Poços de Caldas, 1993. *Anais...*, Poços de Caldas, ABGE. V.1, p. 227-240.
- STOKOE, K.H. II; WOODS, R.D. 1972. In situ shear wave velocity by crosshole method. *J. Soil Mech. and Found. Division*, **98**(5): 443-460.
- STOKOE, K.H., II; WRIGHT, S.G.; BAY, J.A.; ROESSET, J.M. 1994. Characterization of Geotechnical Sites by SASW Method. In: *ISSMFE Technical Committee 10*, Woods, R.D., ed. New Delhi, Oxford Publishers. p. 15-25.
- STERNBERG, B.K. 1995. Status and future growth of near-surface geophysics. *The Leading Edge*. **14**(4): 230 and 269.

- SUGUIO, K.; BARBOUR, A.. 1969. Morfologia e gênese das estruturas limoníticas dos sedimentos da Bacia de São Paulo. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **41**: 161-180.
- TAIOLI, F. 1992. *Desenvolvimento e testes de sistema sismográfico de alta resolução*. São Paulo 119 p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo).
- TAIOLI, F. 1996. Desenvolvimento de acelerômetro para uso em sísmica de alta resolução. *Revista Brasileira de Geofísica*, **14**(3): 263-271.
- TAIOLI, F. 1995. Desenvolvimento e testes de sistema sismográfico de alta resolução. *Bol. IG-USP, Série Cient.*, **26**: 29-43.
- TAIOLI, F. 1999. *Levantamento das características elásticas dinâmicas das rochas e solos da região metropolitana de São Paulo*. Relatório Técnico Final. Processo Fapesp 96/2225-2. 316p.
- TAIOLI, F.; DOURADO, J.C.; CORDEIRO, R.P.; SERRA JR., E. 1993. Considerações sobre a utilização de técnicas de investigações indiretas em geologia de engenharia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 7, Poços de Caldas, 1993. *Anais...*, Poços de Caldas, ABGE. V.1, p. 1-5.
- TAIOLI, F.; DOURADO, J.C.; GALLAS, J.D.; PRADO, R.L.; IYOMASA, W.S.; CORDEIRO, R.P. 1997a. Geophysical data integration to delineate rupture extension in a urban tunnel. In: SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING & ENVIRONMENTAL PROBLEMS (SAGEEP), 10, Reno, 1997. *Proceedings...*, Reno, EEGS., V.2, p.835-841.
- TAIOLI, F.; DOURADO, J.C.; GALLAS, J.D.; PRADO, R.L.; IYOMASA, W.S.; CORDEIRO, R.P. 1997b. Use of geophysical methods to define the extension of a tunnel roof failure. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 5, SÃO PAULO, 1997. *Bol. Res. Exp...*, São Paulo, SBGf, V. 1, p. 421.
- TEXAS INSTRUMENTS. 1982. *DFS V - drawings manual*. Houston, Texas Instruments, p. 2.9.
- VARGAS, M. 1992. Evolução dos conhecimentos. In: Ferreira, A.A.; Alonso, U.R.; Luz, P.L ed. *Solos da cidade de São Paulo*. São Paulo, ABMS/ABEF. p.1-35.
- ZUQUETTE, L.V.; PARAGUASSU, A.B.; VILAR, O.M.; RODRIGUES, J.E. 1993. Desenvolvimento da Geologia de Engenharia nos próximos 10 anos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 7, Poços de Caldas, 1993. *Anais...*, Poços de Caldas, ABGE. V.1, p. 7-12.