

LEANDRO SCHEFFER

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DO CONE SÍSMICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre, março de 2005

LEANDRO SCHEFFER

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DO CONE SÍSMICO

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 18 de março de 2005

Prof. Fernando Schnaid
PhD pela Universidade de Oxford
orientador

Prof. Marcelo Maia Rocha
Dr. Techn. pela Universidade de Innsbruck
Orientador

Prof. Américo Campos Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Heraldo Luiz Giacheti (UNESP)
PhD pela Universidade Britânica de Columbia

Prof. Nilo César Consoli (UFRGS)
Phd pela Concórdia University

Prof. Edgar Odebrecht (UDESC)
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico carinhosamente este trabalho aos meus pais Lauro
e Sílvia e ao meu tio Waldir Rasche

AGRADECIMENTOS

Agradeço a CAPES pela bolsa de estudos que possibilitou a realização de parte fundamental deste trabalho.

Ao amigo André L. Hebmuller, por gentilmente fornecer os resultados de sua pesquisa.

Aos orientadores Profs. Fernando Schnaid e Marcelo Rocha ficam registrados meus agradecimentos pela atenção e dedicação oferecidas, pelo entusiasmo que me foi repassado e pela sabedoria disponibilizada visando à promoção do conhecimento.

A todos os professores do Grupo de Geotecnia do PPGEC/UFRGS pela atenção e conhecimentos transmitidos ao longo do curso.

À empresa Geoforma Engenharia pelo incentivo permanente, em especial ao Dr. Edgar Odebrescht e ao Professor Edson Fajardo, cuja larga experiência em Geotecnia de ambos foram essenciais para a minha formação. À empresa Macodesc, pelo apoio na etapa final deste trabalho, e em especial ao amigo Dr. Paulo César Sturmer pelos ensinamentos que me foram repassados.

Aos colegas do curso, em especial aos amigos Alexandre Knop, Rodrigo Lovato, Rodrigo Malysz, Rodrigo Caberlon, Rodrigo Silveira, Diana Azambuja, Danielle Clerman, Carolina, Raimundo (Paka) e Eli. Ao amigo e colega Fernando Maria Mántaras, sem o qual o desenvolvimento e aplicação prática deste trabalho não seriam possíveis. Ao amigo e colega Diego Nacci, cuja experiência e atenção oferecidas foram fatores fundamentais neste trabalho. Ao amigo Christiano cujos conhecimentos em montagem de circuitos eletrônicos e engenharia elétrica possibilitaram o desenvolvimento de uma etapa fundamental do projeto.

À INFRAERO, pelo acesso ao Aeroporto Internacional Salgado Filho para a realização dos estudos desta dissertação.

Agradeço aos meus irmãos, pelos incentivos constantes. A Lilian, que ofereceu incentivo e entusiasmo para que esta etapa fosse concluída.

Agradeço a todas as pessoas que direta ou indiretamente ajudaram para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

Um homem nunca sabe aquilo de que é capaz até que o
tenta fazer
Charles Dickens

RESUMO

A tendência atual de desenvolvimento de novos equipamentos geotécnicos combina diferentes técnicas, aliando a robustez do ensaio de cone às informações adicionais de outros ensaios. O cone sísmico constitui-se em exemplo típico adotado internacionalmente. Geofones ou acelerômetros podem ser incorporados ao fuste do cone para medida de velocidade de propagação de ondas de compressão e cisalhamento. O cone possibilita uma estimativa da resistência ao cisalhamento de materiais geotécnicos, enquanto as medias sísmicas permitem medir o módulo cisalhante a pequenas deformações. A combinação de valores de resistência e deformabilidade, expressa através da razão entre G_o/q_c , pode representar uma alternativa importante na caracterização de solos. Nesta dissertação o cone sísmico foi projetado, construído, calibrado e testado no depósito argiloso do Aeroporto Internacional Salgado Filho em Porto Alegre. O equipamento é composto de um módulo onde são acondicionados dois sensores (geofones), distantes de 1,0 m, para a captação das ondas de cisalhamento. Os sinais são captados e enviados para um pré-amplificador com filtro, acondicionado no módulo sísmico, sendo posteriormente conduzidos para um segundo amplificador cuja taxa de amplificação pode ser regulada. O sinal adquirido é armazenado em um computador para análise posterior.

O ensaio de cone sísmico consiste basicamente na geração de uma onda de cisalhamento na superfície do solo e seu armazenamento com o sistema de aquisição de sinais. A determinação do módulo de cisalhamento é feita através da teoria da elasticidade, medindo-se os tempos de chegada da onda de cisalhamento em cada geofone e calculando-se a velocidade de percurso da onda entre os dois sensores. O trabalho contempla o desenvolvimento do cone sísmico, montagem, calibração e aplicação na Área do Aeroporto Internacional Salgado Filho. Os resultados obtidos são comparados a resultados de ensaios de *cross-hole* existentes no referido local.

ABSTRACT

The trend for development of new equipments for geotechnical characterization lies in the combination of different techniques, often by combining the robustness of the cone with independent measurements from other tests. The seismic cone is one of the most important recent developments that has been gaining importance worldwide. The equipment has been developed from a standard electric cone fitted with an array of geophones from which the shear wave velocity can be measured. The small strain shear stiffness G_0 determined from this equipment is used in the analysis of soil behaviour, whereas the ratio of the elastic stiffness to tip cone resistance, G_0/q_c , is used for site characterization. In the present work, the UFRGS seismic cone has been designed, built, calibrated and later tested at the International Airport Salgado Filho, in Porto Alegre, southern Brazil. Two geophones mounted 1.0m apart within the cone body are able to clear record shear wave signal arrivals. The time for the shear wave to travel from the ground surface to the cone is measured using a computer controlled data logging system. Signals are sent to an amplifier with a filter, fitted in the seismic module. Subsequently they are conducted to a second amplifier having its amplification rate regulated in the surface. Finally the acquired signal is stored in a computer to further analysis. A limited experimental field program has been carried out to validate the equipment by comparing the results with previously reported data from cross-hole tests.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE SÍMBOLOS	12
1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 INTRODUÇÃO.....	15
2.2 MÓDULO DE CISALHAMENTO.....	16
2.2.1 Definição	16
2.2.2 Carregamento Cíclico.....	16
2.2.3 Fatores que afetam o módulo de cisalhamento	18
2.2.4 Relação Módulo de Cisalhamento x Amplitude de Deformação.....	20
2.3 ONDAS SÍSMICAS.....	22
2.3.1 Propagação de ondas sísmicas no solo.....	22
2.3.1.1 Tipos de ondas sísmicas.....	22
2.3.1.2 Propriedades das ondas sísmicas	24
2.3.1.3 Valores típicos de velocidade das ondas de cisalhamento.....	24
2.4 ENSAIOS SÍSMICOS.....	25
2.4.1 <i>Cross-hole</i>	25
2.4.2 <i>Down-hole</i>	27
2.4.3 Ensaio de Cone Sísmico	28
3 DESENVOLVIMENTO DO CONE SÍSMICO	30
3.1 GENERALIDADES.....	30
3.2 O TRANSDUTOR	41
3.2.1 Geofone.....	39
3.2.2 Acelerômetro	40
3.3 O MÓDULO SÍSMICO.....	41
3.4 A GERAÇÃO DA ONDA.....	46
3.5 CONDICIONAMENTO E AQUISIÇÃO DE SINAIS	48
3.5.1 Programa de aquisição de sinais.....	48
3.5.2 Geofones.....	49

3.5.3 Sistema de amplificação de sinais	51
3.5.4 Trigger	52
3.6 TESTES PRELIMINARES DO EQUIPAMENTO	53
3.6.1 Teste de estanqueidade do módulo sísmico	53
3.6.2 Montagem final.....	54
4 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DO LOCAL ENSAIADO	54
4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA	54
4.2 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS.....	55
5 ENSAIOS DE CONE SÍSMICO	58
5.1 INTRODUÇÃO	58
5.2 PROCEDIMENTOS PRÁTICOS DO ENSAIO DE CONE SÍSMICO	58
5.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	61
5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
APÊNDICE A – RESULTADOS DO ENSAIO SCPT 01	89
APÊNDICE B – RESULTADOS DO ENSAIO SCPT 02.....	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação da tensão e deformação de cisalhamento	16
Figura 2: Ensaio de cisalhamento simples – cilindro vazado (Hardin e Drnevich (1972a)).....	17
Figura 3: Laço da relação Tensão-Deformação para carregamento cíclico, Hardin e Drnevich, 1972a.....	18
Figura 4: Relação Módulo de Cisalhamento versus Deformação de Cisalhamento (Stokoe II e Hoar, 1978)	21
Figura 5: Variação do módulo de cisalhamento para três materiais. (Clayton e Heymann, 2001)	21
Figura 6: Esquema de comportamento do solo para diferentes níveis de deformação (Jardine et al, 1991; Jardine, 1992; Hight e Higgins, 1994).	22
Figura 7: Tipos de ondas no solo	23
Figura 8: Esquema básico do ensaio <i>cross-hole</i>	26
Figura 9: Sinal típico (exemplo) de um ensaio <i>cross-hole</i>	27
Figura 10: Ensaio sísmico <i>down-hole</i>	27
Figura 11: Layout Esquemático do Ensaio de Penetração de Cone Sísmico <i>down-hole</i> (Campanella et al, 1986).....	28
Figura 12: Esquema geral do equipamento para o ensaio de cone sísmico da UFRGS	31
Figura 13: Mackenzie delta.....	32
Figura 14: Resultado típico de ensaio sísmico com reversão de polaridade	33
Figura 15: Cone sísmico (Jacobs & Butcher, 1996)	34
Figura 16: Comparação de uso de arranjo simples e duplo de geofones (Butcher e Powell, 1996)	35
Figura 17: Trajetória de viagem da onda cisalhante (hipótese).....	37
Figura 18: Efeito da distância entre a fonte e o ponto de inserção do cone sísmico (Butcher e Powell, 1996).	37
Figura 19: Exemplo da atenuação da onda de cisalhamento ao longo da profundidade (Robertson e Campanella, 1986)	38
Figura 20: Esquema constitutivo de um Geofone.....	39
Figura 21: Esquema de um acelerômetro piezoelétrico (Brueel & kjaer)	40
Figura 22: Geofone GS 14-L3	41
Figura 23: Projeto básico do Módulo Sísmico.....	43

Figura 24: Cone Sísmico da UFRGS	45
Figura 25: Cone Sísmico da UFRGS em teste no laboratório	46
Figura 26: Placa e marreta metálicas em testes de laboratório	47
Figura 27: Sistema de geração da onda cisalhante em operação	47
Figura 28: Resultado de ensaio apresentado no programa READDAS16.....	49
Figura 29: Curva de calibração dos geofones (Fabricante)	50
Figura 30: Curva de calibração dos geofones (LDEC – UFRGS).....	50
Figura 31: Detalhe da caixa de comando e potenciômetros de ajuste de taxa de amplificação de sinais.....	52
Figura 32: Circuito eletrônico do trigger	53
Figura 33: Perfil típico da região do Aeroporto Internacional Salgado Filho (Schnaid et al, 2001)	56
Figura 34: Caracterização do depósito de argila mole (Schnaid et al, 2001)	56
Figura 35: Perfis estratigráficos representativos da área do aeroporto (Schnaid et al, 2001)...	57
Figura 36: Reboque com sistema hidráulico de cravação.....	59
Figura 37: Posicionamento da placa de geração da onda cisalhante	60
Figura 38: Eixo de orientação da placa de geração da onda.....	61
Figura 39: Locação do ensaio de cone sísmico – SCPT01	62
Figura 40: Perfil de variação de resistência de ponta e poro pressão com a profundidade (Soares, 1997).	63
Figura 41: Ensaio SCPT 01 realizado a 3,00 m de profundidade com o golpe efetuado de fora para dentro, no sentido do eixo do cone (IN)	64
Figura 42: Locação do ensaio de cone sísmico – SCPT02.....	65
Figura 43: Ensaio SCPT 02 realizado a 1,90 m de profundidade com o golpe efetuado de fora para dentro, no sentido do eixo do cone (IN)	66
Figura 44: Perfil de velocidade da onda cisalhante – SCPT01	69
Figura 45: Perfil do Módulo de Cisalhamento Máximo – SCPT 01	70
Figura 46: Perfis de ensaios CPT e SCPT 01 da área do AISF.	72
Figura 47: Perfil de velocidade da onda cisalhante para o ensaio SCPT02.....	75
Figura 48: Perfil do Módulo de Cisalhamento Máximo – SCPT02	76
Figura 49: Perfis de ensaios CPT e SCPT 02 da área do AISF.	78
Figura 50: Velocidade da onda S <i>versus</i> profundidade	80
Figura 51: Resultados de G_o <i>versus</i> profundidade.....	81

LISTA DE SÍMBOLOS

G: Módulo de Rigidez ou Módulo de Cisalhamento;

G_{VH}: Módulo de cisalhamento obtido pela propagação de onda na direção vertical com polarização horizontal;

G_{HV}: Módulo de cisalhamento obtido pela propagação de onda na direção horizontal com polarização vertical;

τ_{xz} : Tensão Cisalhante na direção do eixo x, sendo normal o eixo z;

τ_{zx} : Tensão Cisalhante na direção do eixo z, sendo normal o eixo x;

τ_{zx} : Deformação Cisalhante ver Poulos & Davis;

D: Razão de amortecimento;

A_I: Área do laço de histerese;

A_T: Área triangular hachurada do laço de histerese;

V_P: Velocidade de propagação da onda P;

V_S: Velocidade de propagação da onda S;

G_o: Módulo de Cisalhamento Máximo;

σ'_v : Tensão Efetiva Vertical;

σ'_h : Tensão Efetiva Horizontal;

P_a: Pressão Atmosférica;

P'_o: Tensão Efetiva Média;

1 INTRODUÇÃO

A utilização de ensaios *in situ* é, em inúmeras situações, a melhor solução na determinação de propriedades dos solos, uma vez que resultados de ensaios podem ser diretamente relacionados ao estado geostático de tensões. Além disso, apresentam a vantagem de (a) não amolgar o solo durante o processo de amostragem, quando da retirada de amostras para ensaios de laboratório, e (b) representar o real comportamento do depósito em função do volume de solo ensaiado.

Os ensaios geofísicos de campo foram desenvolvidos para medir as propriedades de deformação do solo no estado indeformado, nas condições reais de campo, no estado de tensões geostáticas efetivas, e em condições adequadas de drenagem. Muitos problemas da Engenharia Geotécnica exigem a determinação de propriedades dinâmicas do solo. Os projetos de fundações de máquinas são exemplos típicos nesse contexto. Internacionalmente, a avaliação de problemas de Geotecnia causados por terremotos também faz uso extensivo das características dos solos sob esforços dinâmicos. A determinação dessas características e propriedades tem sido feita normalmente com a utilização de ensaios sísmicos, impondo ao solo baixos níveis de deformação. Estudos recentes utilizam o módulo de cisalhamento a pequenas deformações, G_o , para modelar o comportamento de estruturas de contenção, seguindo o trabalho original de Burland (1989), ou utilizam G_o na caracterização do solo a partir de correlações entre o módulo de deformabilidade e a resistência ao cisalhamento do solo (Schnaid et al 2004). As aplicações associadas às medidas de G_o são portanto extensivas à prática de engenharia.

Os ensaios sísmicos de campo fazem uso da propagação de ondas no solo, que permitem a determinação de parâmetros a baixos níveis de deformação, pela determinação das velocidades de propagação das ondas. Portanto, é possível determinar a rigidez do solo, com base na teoria da elasticidade e na teoria de propagação de ondas. Os ensaios sísmicos normalmente usados são os ensaios *cross-hole* e *down-hole*. Basicamente, esses ensaios exigem a execução de pré-furos e a introdução de fontes e receptores de ondas em seu interior, para captação de sinais durante a propagação das ondas. Os parâmetros dinâmicos relevantes são então determinados para o maciço ensaiado: Módulo de Cisalhamento Máximo ($G_{m\acute{a}x}$ ou G_o), Módulo de Elasticidade (E) e Coeficiente de Poisson (ν).

Modernamente tem sido possível combinar vários sensores em um mesmo equipamento, o que permitiu a utilização dos ensaios de penetração de cone junto à incorporação de sensores de ondas sísmicas junto às ponteiras. As primeiras pesquisas ocorreram na década de 80, na Universidade Britânica de Colúmbia, no Canadá (Campanella et al, 1986). A partir daí ocorreram desenvolvimentos significativos nesta área e os resultados obtidos e a experiência adquirida demonstrou ser possível reduzir significativamente os custos e os tempos de execução dos ensaios sísmicos de campo (*cross-hole* e *down-hole*).

O ensaio de cone sísmico emprega procedimento análogo ao ensaio sísmico *down-hole*, mudando apenas o método de instalação do geofone no terreno. Neste ensaio, mede-se a propagação de uma onda sísmica polarizada na direção horizontal e propagando-se na direção vertical, cuja magnitude permite a determinação do módulo G_{VH}^* . Os equipamentos para a execução de ensaios de cone sísmico apresentam as mesmas características básicas, sendo compostos de uma ponteira para ensaio de cone e/ou piezocone, sistema de cravação, sensores sísmicos, fonte de ondas e sistema de armazenamento de sinais. Variações podem ocorrer quanto aos sensores usados (número de unidades, posição, orientação e tipo de sensor) e sistema de geração da onda, mas o princípio básico do ensaio permanece invariável.

Diante da necessidade de melhores técnicas de determinação de propriedades dinâmicas dos solos, da possibilidade de desenvolvimento de novos métodos de interpretação de resultados e dos avanços tecnológicos que se justifica este trabalho. O objetivo dessa dissertação consiste no projeto, construção, calibração e teste de um protótipo de cone sísmico, incluindo a ponteira, desenvolvimento do sistema de geração de ondas, concepção do programa de aquisição de sinais, projeto do sistema de amplificação dos sinais, execução de ensaios, análise e comparação dos resultados com aqueles obtidos a partir de ensaios sísmicos *cross-hole* previamente executados no local investigado. Essa dissertação está assim organizada:

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. Apresenta-se a definição do módulo de cisalhamento, os fatores que o afetam, ondas sísmicas (definições e valores típicos) e os ensaios sísmicos normalmente utilizados na engenharia geotécnica.

DESENVOLVIMENTO DO CONE SÍSMICO. Todas as etapas desde o projeto, passando pela montagem, calibração de todos os componentes até os testes finais de laboratório são apresentadas neste capítulo

* Definido nesta dissertação simplesmente como G_0

CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DO LOCAL ENSAIADO. Neste capítulo descrevem-se as propriedades do local onde são realizados os ensaios, mostrando-se perfis representativos da área do Aeroporto Internacional Salgado Filho de Porto Alegre.

ENSAIOS DE CONE SÍSMICO. São apresentados os procedimentos práticos do ensaio de cone sísmico, com ilustrações de ensaios em andamento, e os resultados experimentais obtidos.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES. São aqui descritos os aspectos relevantes do equipamento, dos ensaios e da análise dos resultados obtidos a partir da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

“Aliar a teoria à prática”. É com base nesta filosofia que se promove a construção do conhecimento de maneira sólida e confiável. De nada adiantam estudos teóricos profundos, sem sua comprovação e aplicação à prática de engenharia.

A engenharia de fundações submetidas a carregamentos dinâmicos fundamenta-se no conhecimento das propriedades do solo submetido aos mesmos padrões de carregamentos. Desse modo, é necessária a execução de ensaios dinâmicos que possibilitem a determinação de parâmetros de comportamento do solo. O ensaio de cone sísmico permite a determinação do Módulo de Cisalhamento Máximo (G_o), com base na teoria da elasticidade, parâmetro de comportamento dinâmico do solo de grande interesse na engenharia geotécnica.

A presente revisão bibliográfica tem por objetivo apresentar a teoria que fundamenta o desenvolvimento e aplicação do equipamento para o ensaio de cone sísmico. Duas dissertações de mestrado da UFRGS já foram desenvolvidas, a partir das quais a tecnologia dos ensaios sísmicos *cross-hole* e *down-hole* foram devidamente incorporados: Gonzalez (1997) e Hebmuller (1999). Assim, nesta dissertação, a revisão bibliográfica limita-se à descrição crítica de alguns aspectos essenciais ao entendimento destes ensaios.

2.2 MÓDULO DE CISALHAMENTO

2.2.1 Definição

O módulo de rigidez ou módulo de cisalhamento G é definido como a relação entre a tensão cisalhante τ e a deformação cisalhante γ , indicados na Figura 1, que representa uma amostra de solo sujeita a cisalhamento simples (LAMBE e WHITMAN, 1969), onde:

Módulo de Rigidez ou Módulo de Cisalhamento:

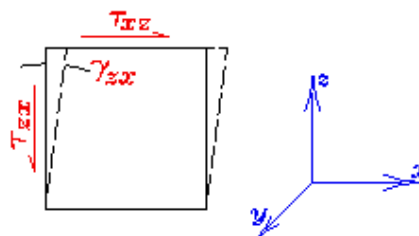


Figura 1: Representação da tensão e deformação de cisalhamento

(Equação 1) O comportamento tensão de cisalhamento *versus* deformação de cisalhamento foi estudado por vários autores, destacando-se os trabalhos de Hardin e Drnevich (1972a), Hoadley (1985), Hardin e Black (1968) e Stokoe et al. (2004), sendo estes os principais trabalhos que formam a base desta revisão.

2.2.2 Carregamento Cíclico

Segundo Luna e Jadi (2000), os ensaios sísmicos propagam ondas através do solo a um nível muito baixo de deformações cisalhantes ($<10^{-3}\%$). De acordo com a lei de Hooke, estas deformações são consideradas como idealmente elásticas e portanto reversíveis.

O estudo do comportamento do solo a pequenas deformações tem sido o objeto de pesquisas na geotecnia, especialmente nas duas últimas décadas. A importância do tema pode ser avaliada pelas referências internacionais abaixo listadas: Hardin e Black (1968), Hardin e

Drnevich (1972), Woods (1978), Hoadley (1985), Jardine (1994), Jamiolkovski et al (2001) e Tatsuoka et al (1997).

Hardin & Drnevich 1972a, estudaram o comportamento do solo sob carregamento dinâmico, sendo alguns dos fatores mais importantes discutidos a seguir. Foram realizados diversos ensaios em corpos de prova na forma de cilindro vazado (Figura 2), submetidos a uma pressão uniforme, onde foi gerada uma tensão cisalhante através de um torque em torno do eixo do cilindro. O sentido do torque pôde ser revertido e repetido a fim de simular carregamento cíclico.

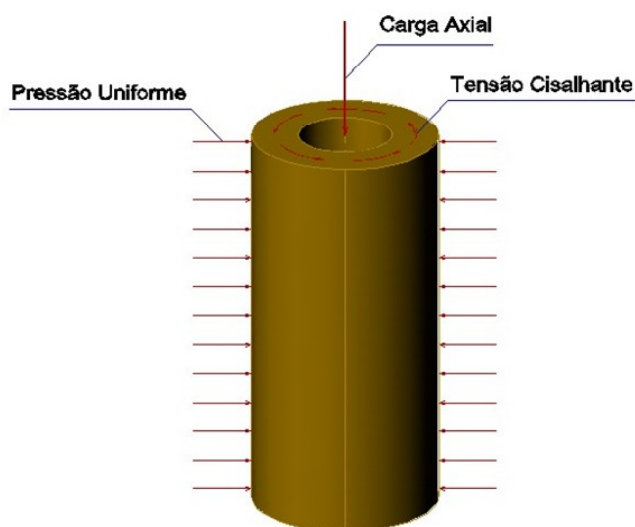


Figura 2: Ensaio de cisalhamento simples – cilindro vazado (Hardin e Drnevich (1972a)).

Solos sujeitos a carregamento cíclico apresentam um “laço” de histerese como mostra a Figura 3. A figura apresenta o caso em que ocorre completa reversão de tensões, variando-se a tensão cisalhante e a amplitude de deformação

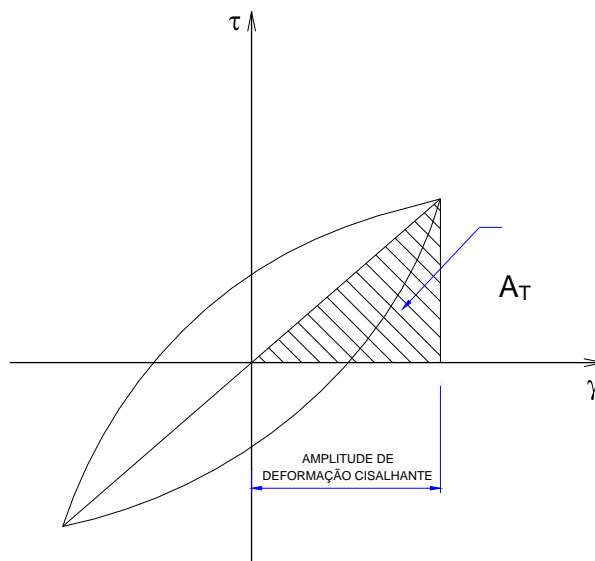


Figura 3: Laço da relação Tensão-Deformação para carregamento cíclico, Hardin e Drnevich, 1972a.

A histerese observada pode ser definida através de dois parâmetros: a inclinação de uma linha que une os pontos finais do ciclo, chamada módulo de cisalhamento, G , e a razão de amortecimento, $D = \frac{A_l}{4\pi A_T}$, onde A_l = área do ciclo e

A_T = área triangular hachurada, mostrada na Figura 3 (Hardin e Drnevich, 1972a). 2.2.3 Fatores que afetam o módulo de cisalhamento

O Módulo de Cisalhamento e a Razão de Amortecimento dos solos são afetados por vários parâmetros. Hardin e Drnevich (1972a) em sua pesquisa agruparam os parâmetros em três categorias: parâmetros muito importantes (V), parâmetros de menor importância (L) e parâmetros relativamente sem importância (R). Parâmetros relativamente sem importância ou em que sua importância não estava claramente definida até aquele momento são representados pela letra U. A Tabela 1 apresenta os resultados da pesquisa de Hardin e Drnevich (1972a) com relação a influência dos diversos parâmetros no módulo de cisalhamento dos solos. Tabela 1: Influência de diversos parâmetros no Módulo de Cisalhamento dos solos (Hardin e Drnevich, 1972a)

Parâmetro	Importância para o Módulo de Cisalhamento
-----------	---

	Areias Limpas	Solos Coesivos
Amplitude de deformação	V	V
Tensão Efetiva Principal Média	V	V
Índice de Vazios	V	V
Número de ciclos de carregamento	R	R
Grau de saturação	R	V
Razão de Pré-Adensamento	R	L
Envoltória de Resistência efetiva	L	L
Tensão de cisalhamento octaédrica	L	L
Frequência de carregamento (acima de 0.1 Hz)	R	R
Outros efeitos de tempo (Tixotropia)	R	L
Características granulométricas, tamanho, forma, graduação, mineralogia	R	R
Estrutura do solo	R	R
Variação de volume devido à deformação de cisalhamento (deformações menores que 0.5%)	U	R

Do estudo realizados por esses autores observa-se que os parâmetros de maior influência no módulo de cisalhamento são a amplitude de deformação, tensão efetiva principal média e índice de vazios, para areias limpas e para solos coesivos. O grau de saturação tem muita importância para o caso de solos coesivos.

Ensaio de laboratório em coluna ressonante possibilitaram quantificar e isolar estas variáveis, mostrando que em argilas o módulo de cisalhamento é função principalmente da tensão efetiva média, e que o efeito de OCR está incluído na variação do índice de vazios. Com base nestas evidências foram estabelecidas correlações de natureza empírica, na forma:

$$G_0 = SF(e)(\sigma'_v \sigma'_n)^n P_a^{(1-n)}$$

na qual S e n são constantes, $F(e)$ é uma função do índice de vazios que pode ser expressa como:

$$1/e, (1+e), \frac{(2,17-e)^2}{(1+e)}$$

As propostas publicadas na literatura são:

$$G_o = 625 \frac{1}{(0.3+0.7e^2)} (p_o')^{0.5} OCR^k (kPa)$$

$$G_o = 480(e)^{-1.43} (\sigma_v')^{0.22} (\sigma_h')^{0.22} (p_a)^{1-2(0.22)}$$

A necessidade de expressar G_o como função das tensões efetivas vertical e horizontal é esclarecida por Jamiolkovski et al (1997). Shybuya et al (1997) consideram mais prático expressar G_o somente como função da tensão efetiva vertical, reconhecendo que a formulação é válida somente para solos normalmente adensados:

$$G_o = 24000(1+e)^{2.4} (\sigma_v')^{0.5}$$

O módulo de cisalhamento decresce rapidamente com o aumento da amplitude de deformação e aumenta com o aumento da tensão efetiva principal média. Em relação ao índice de vazios, os resultados mostram que quanto maior esse índice, menor é o valor do módulo de cisalhamento (Hardin e Drnevich, 1972a). O aumento do grau de saturação gera decréscimo no valor do módulo de cisalhamento, para o caso de solos coesivos (Hardin e Drnevich, 1972a).

2.2.4 Relação Módulo de Cisalhamento x Amplitude de Deformação

A relação Módulo de Cisalhamento *versus* deformação cisalhante para os solos é não linear e inelástica. A Figura 4 apresenta o comportamento observado para a maior parte dos solos (Hoar e Stokoe, 1978).

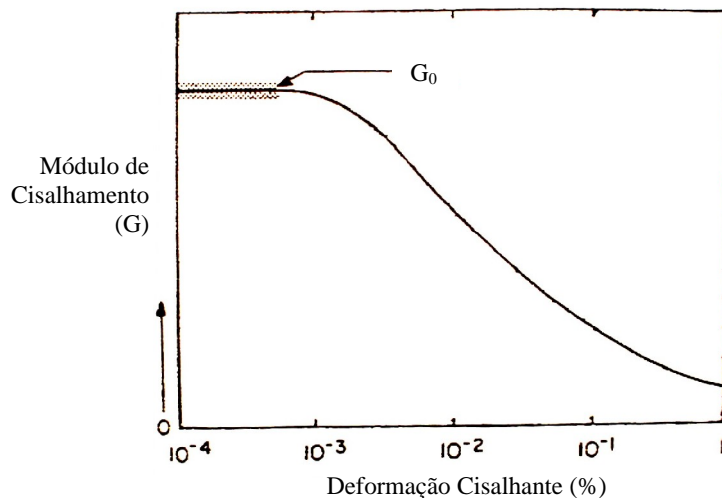


Figura 4: Relação Módulo de Cisalhamento versus Deformação Cisalhante (Hoar e Stokoe, 1978)

A literatura é rica em exemplos típicos de comportamento para diferentes materiais. A Figura 5 ilustra a variação do módulo para deformações crescentes em 03 materiais, a saber: argila mole (*Bothkennar clay*), argila pré-adensada (*London clay*) e solo fortemente cimentado (*Chalk*). (Clayton e Heymann, 2001).

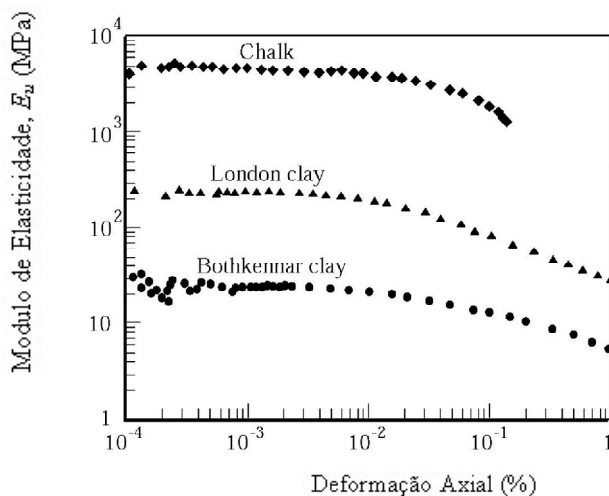


Figura 5: Variação do módulo de cisalhamento para três materiais. (Clayton e Heymann, 2001)

Para deformações menores que 10^{-3} % os solos se comportam de maneira elástica, gerando o trecho de módulo de cisalhamento máximo G_0 apresentado na figura 04.

A Figura 6 esquematiza o comportamento do solo para diferentes níveis de deformações (Jardine et al, 1991; Jardine, 1992; Hight e Higgins, 1994). A curva Y_3 é a curva de limite de estado do solo. Os solos que alcançam esta curva, quando submetidos a carregamentos, apresentam grandes deformações plásticas. Dentro da região formada pela curva Y_1 , o comportamento do solo é linear-elástico e é caracterizado por propriedades elásticas a pequenas deformações, em particular o módulo de cisalhamento máximo (G_0). Quando a trajetória de tensões atravessa Y_1 , mas permanece na zona 2, o comportamento é não-linear elástico. Entre as curvas Y_2 e Y_3 , o solo desenvolve deformações plásticas.

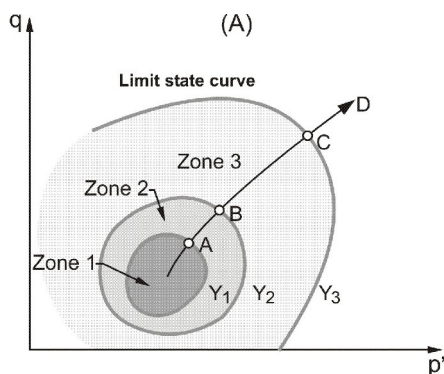


Figura 6: Esquema de comportamento do solo para diferentes níveis de deformação (Jardine et al, 1991; Jardine, 1992; Hight e Higgins, 1994).

2.3 ONDAS SÍSMICAS

2.3.1 Propagação de ondas sísmicas no solo

2.3.1.1 Tipos de ondas sísmicas

A natureza das ondas elásticas e as regras que elas observam permitem o seu uso na exploração do perfil de rigidez dos solos. De acordo com a Figura 7, a propagação de ondas sísmicas em sólidos elásticos pode ser classificada nos seguintes tipos:

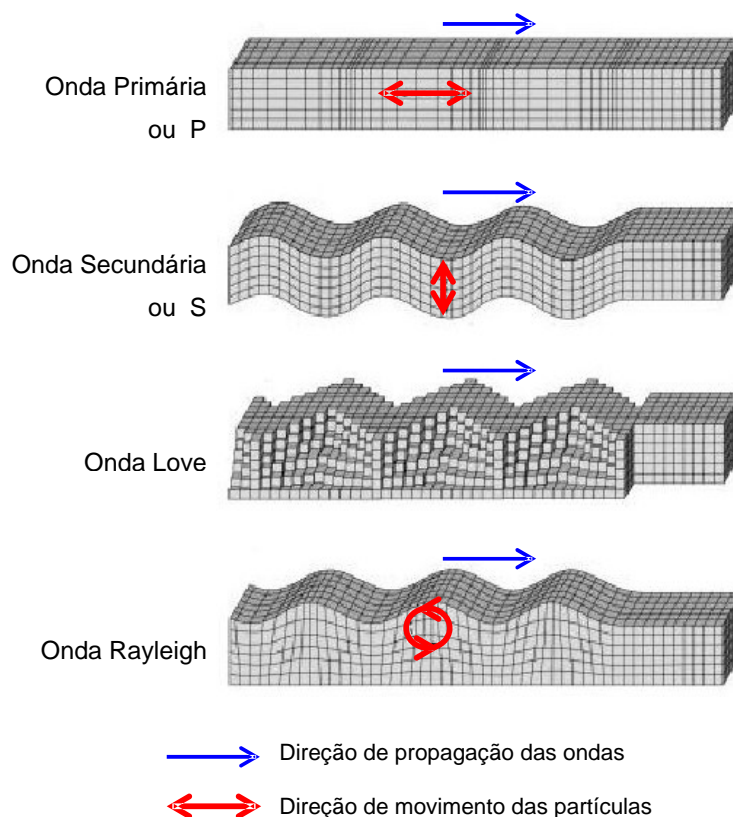


Figura 7: Tipos de ondas no solo (Menzies, 2003)

Ondas de corpo: o primeiro tipo de ondas de corpo são as **ondas Primárias ou de Compressão** ou **ondas P**. É uma onda longitudinal na qual a direção de movimento das partículas é a direção de propagação da onda. A onda P se propaga em uma velocidade V_P . As ondas de corpo podem ainda ser **ondas Secundárias ou de Cisalhamento** ou **S**. Trata-se de uma onda transversal, na qual a direção de movimento das partículas é perpendicular à direção de propagação da onda. A velocidade de propagação das ondas S é V_S .

É importante comentar que um fluido intersticial como a água, por exemplo, não transmite as ondas S. Assim, estas ondas são transmitidas apenas através da parte sólida do solo, e por este motivo dependem do nível de tensões médias efetivas.

Ondas de superfície: Ondas de superfície podem ser **ondas Rayleigh** ou **ondas Love**. São ondas nas quais as partículas do meio movem-se em planos verticais. O movimento das partículas descreve elipses nas quais o eixo vertical é igual a duas vezes o eixo horizontal. No

ponto mais alto das elipses o movimento das partículas é oposto à direção de avanço da onda. Se o material for estratificado surge um tipo de onda Rayleigh conhecido como onda Love.

2.3.1.2 Propriedades das ondas sísmicas

A propagação de ondas em meio elástico, homogêneo e isotrópico depende somente das propriedades elásticas do meio e da densidade dos materiais que o constituem. Entretanto, é reconhecido que o solo é um meio heterogêneo, anisotrópico e imperfeitamente elástico, que não correspondem às condições ideais dos meios para os quais se estabelecem as teorias da elasticidade e propagação das ondas.

Todavia, para deformações muito pequenas, o solo apresenta comportamento elástico. Segundo observações feitas nos estudos de Hardin e Drnevich (1972a), para valores de amplitude de deformação abaixo de $10^{-4}\%$ o valor do Módulo de Cisalhamento é máximo (G_0) e constante. Assim, nessa condição de deformação, o comportamento do solo permite a aplicação das teorias da elasticidade e propagação das ondas.

De acordo com a teoria da elasticidade, o Módulo de Cisalhamento Máximo (G_0) pode ser calculado da velocidade da onda de cisalhamento elástica pela expressão:

$$G_0 = \rho v_s^2$$

onde ρ é a densidade do solo e V_s é a velocidade da onda de cisalhamento elástica, gerada em amplitudes de deformação de cisalhamento de $10^{-4}\%$ ou menos.

2.3.1.3 Valores típicos de velocidade das ondas de cisalhamento

Os valores da velocidade das ondas de cisalhamento variam de 120 m/s até 430 m/s (Hoar e Stokoe, 1978). Entretanto, a experiência de diversos autores mostra que os valores podem variar além dessa faixa de velocidades. Hoadley (1985) apresenta a tabela seguinte para os valores de velocidades de ondas de cisalhamento:

Tabela 2: Valores típicos de ondas de cisalhamento nos solos
(Hoadley, 1985)

Material	v_s (m/s)
Areia fina uniforme	120 - 200
Silte arenoso fino	100 - 170
Areia	150 - 200
Argila mole	100 - 150
Argila rija	400 - 600

As velocidades de ondas cisalhantes para argilas moles representativas da Região Metropolitana de Porto Alegre foram determinadas em pesquisa realizada por Hebmuller (1999). Os valores variaram da ordem de 55 m/s até 100 m/s, encontrando-se no limite inferior preconizado por Hoadley (1985).

2.4 ENSAIOS SÍSMICOS

Para a determinação das propriedades do solo sob carregamento dinâmico são usados basicamente os seguintes ensaios sísmicos de campo: (a) ensaio sísmico de reflexão; (b) ensaio sísmico de refração; (c) ensaio sísmico *cross-hole*; (d) ensaio sísmico *down-hole*; (e) cone sísmico; (f) análise espectral de ondas superficiais.

Referências para os ensaios geofísicos de laboratório podem ser encontradas em publicações que descrevem o conhecimento nesta área (Richard et al, 1970; Aki e Richards, 1980; Ward, 1990; Sharma, 1997; Santamarina et al, 2001; ASCE Press, 1998 e NRC, 2000).

2.4.1 *Cross-hole*

O ensaio sísmico *cross-hole* é considerado por muitos engenheiros como o método mais confiável de determinação dos parâmetros dinâmicos dos solos, pois a onda propaga-se ao longo de uma camada, em uma trajetória perfeitamente definida. O tempo para que as ondas de corpo viajem ao longo de uma trajetória horizontal entre dois pontos em um maciço de solo é medido, determinando o módulo que representa uma trajetória de deslocamento horizontal em uma onda polarizada verticalmente ou horizontalmente (isto é, calcula-se G_{VH} ou G_{HV}). As ondas de corpo são geradas por um impulso vertical aplicado em um dispositivo no interior do furo. A chegada da energia na forma de ondas de compressão e cisalhamento é

monitorada em outros dois furos através de transdutores de velocidade. Assim, conhecendo-se a distância entre os furos, as velocidades das ondas podem ser calculadas.

Preferivelmente os furos devem estar sobre uma mesma linha. Dessa forma a precisão dos resultados é maior, uma vez que são eliminadas as fontes de erros, como os erros inerentes ao sistema de trigger. A Figura 8 mostra o esquema básico do ensaio *cross-hole*.

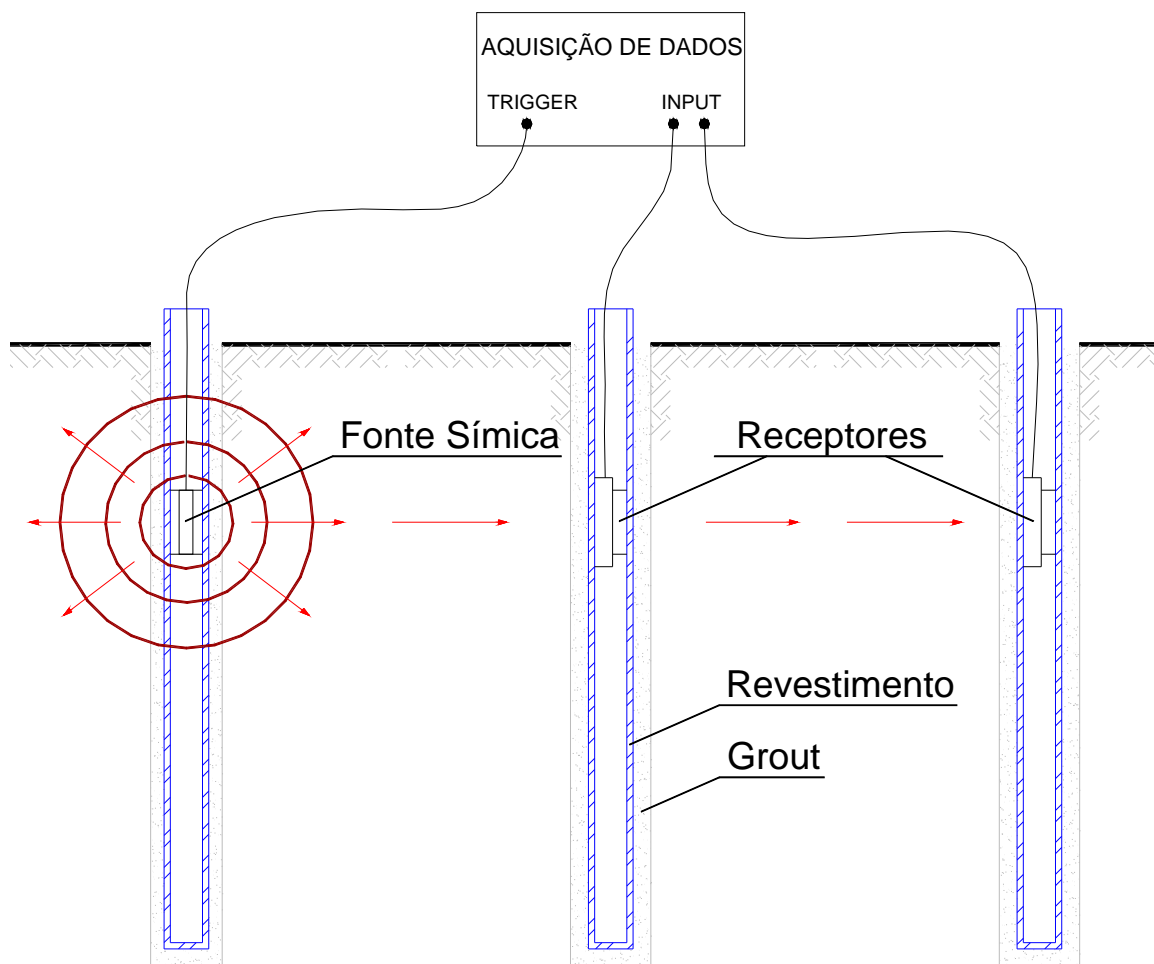


Figura 8: Esquema básico do ensaio sísmico *cross-hole*

A Figura 09 mostra um sinal típico de um ensaio sísmico *cross-hole*. O receptor 01 é aquele posicionado no furo mais próximo da fonte sísmica, enquanto que o receptor 02 representa aquele receptor no furo mais afastado da fonte (ver Figura 08).



Figura 9: Resultado típico (exemplo) de um ensaio sísmico *cross-hole*

2.4.2 *Down-hole*

O ensaio sísmico *down-hole* é um método bem aceito para a determinação da variação da velocidade da onda cisalhante *in situ* com a profundidade. Neste método, é medido o tempo de viagem das ondas de corpo entre a superfície e pontos no interior da massa de solo. As velocidades das ondas são então calculadas a partir do conhecimento da distância entre a fonte e o receptor (Hoar & Stokoe, 1978).

O arranjo para o ensaio sísmico *down-hole* é mostrado esquematicamente na Figura 10.

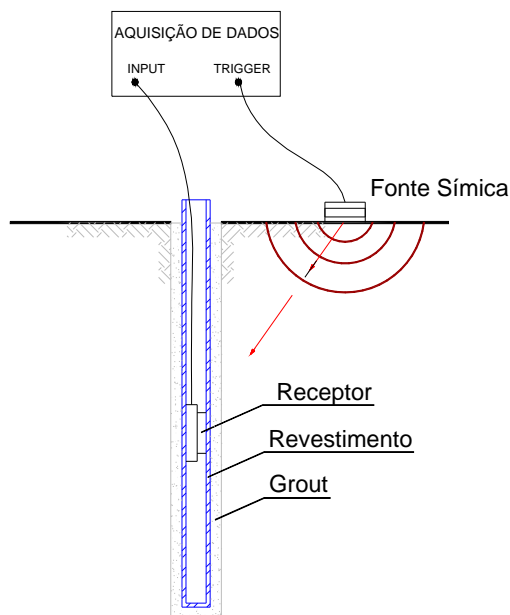


Figura 10: Ensaio sísmico *down-hole*

Uma vantagem executiva importante do ensaio sísmico *down-hole* em relação ao ensaio sísmico *cross-hole* é a necessidade de somente um furo de sondagem, ou o uso de uma ferramenta de penetração para a instalação do sensor no interior do solo. Os dados são plotados de forma similar ao ensaio sísmico *cross-hole*.

2.4.3 Ensaio de Cone Sísmico

O ensaio de Cone Sísmico é um desenvolvimento do ensaio sísmico *down-hole* apresentado no item anterior. O receptor, ou receptores são acondicionados em uma ponteira para o tradicional Ensaio de Penetração de Cone (CPT). Dessa forma, omite-se a execução de pré-furo, uma vez que os receptores são posicionados no interior do solo através da penetração da ponteira de forma semelhante ao método de ensaio CPT.

O equipamento para o ensaio de cone Sísmico foi originalmente desenvolvido por Robertson et al (1986). A Figura 11 apresenta um diagrama esquemático mostrando o layout do ensaio padrão de Cone Sísmico.

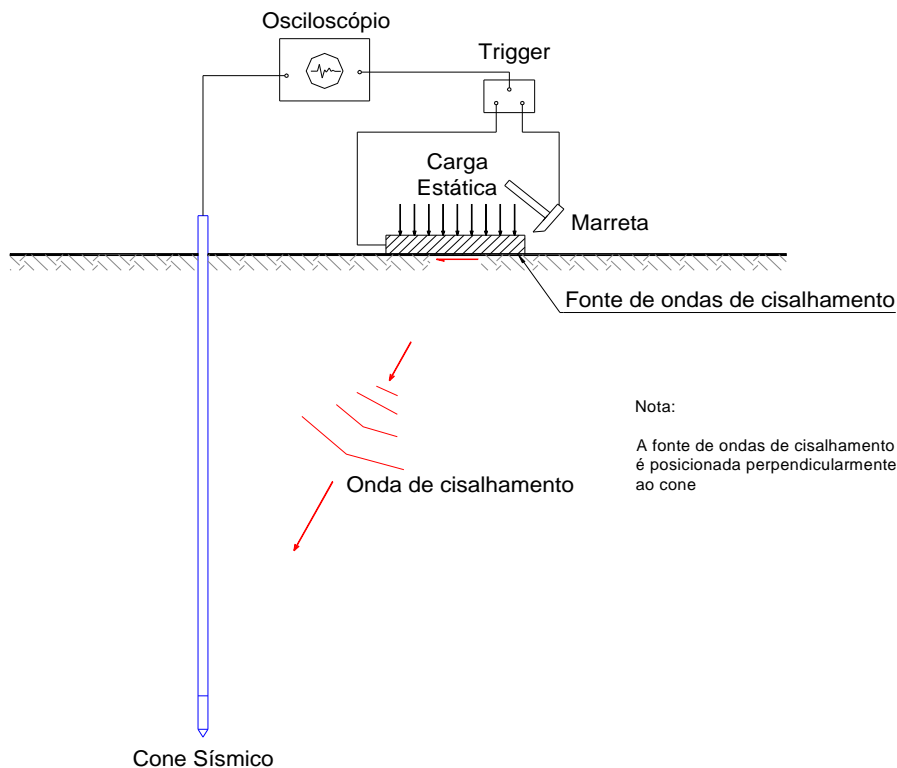


Figura 11: Layout Esquemático do Ensaio de Penetração de Cone Sísmico *down-hole* (Campanella et al, 1986)

A hipótese básica do ensaio de cone sísmico é que a trajetória das ondas entre a fonte e os receptores seja linear. A fonte de ondas normalmente é uma placa metálica posicionada perpendicularmente ao cone sísmico (Butcher & Powell, 1996).

O ensaio é realizado por meio da cravação do cone até a profundidade desejada. Interrompe-se a cravação e golpeia-se a placa com a marreta, gerando-se uma onda de cisalhamento, a qual é captada pelo receptor no interior do cone. Os sinais são armazenados de forma semelhante aos ensaios sísmicos *cross-hole* e *down-hole*. No Capítulo 03 será apresentado o desenvolvimento do cone sísmico da UFRGS, detalhando-se cada etapa desse processo.

3 DESENVOLVIMENTO DO CONE SÍSMICO

3.1 GENERALIDADES

O cone sísmico da UFRGS, descrito neste capítulo, foi desenvolvido para a determinação do módulo de cisalhamento máximo (G_o) do solo. O desenvolvimento compreendeu as seguintes etapas: transdutor, módulo sísmico, geração da onda, condicionamento e aquisição dos sinais e testes preliminares do equipamento.

O desenvolvimento do cone sísmico envolveu o Laboratório de Dinâmica Estrutural, o Laboratório de Usinagem e o Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geoambiental da UFRGS, cada qual atuando em determinadas etapas de projeto. O Laboratório de Dinâmica Estrutural – LDEC participou no desenvolvimento do sistema de condicionamento e aquisição de sinais e na escolha e calibração dos transdutores. A usinagem do módulo sísmico foi executada no Laboratório de Usinagem. O sistema de geração da onda, a montagem do equipamento e os testes preliminares foram realizados no Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geoambiental – LEGG.

O ensaio de Cone Sísmico é um desenvolvimento do ensaio *down-hole*. Este, por sua vez, tem os princípios básicos de funcionamento baseados no ensaio *cross-hole*. Assim, as pesquisas para o desenvolvimento de equipamentos de Cone Sísmico têm por base o ensaio *cross-hole*, o qual é padronizado internacionalmente pela ASTM D4428.

O esquema geral de funcionamento do ensaio de cone sísmico da UFRGS é mostrado na Figura 12:

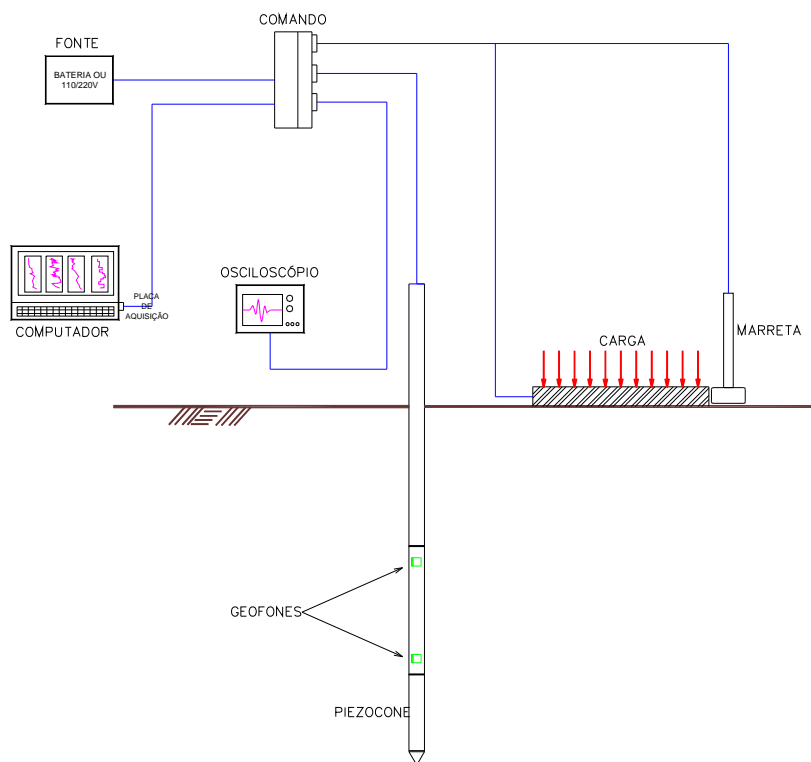


Figura 12: Esquema geral do equipamento para o ensaio de cone sísmico da UFRGS

O módulo sísmico contendo os geofones é cravado até a profundidade desejada. Todos os componentes para o condicionamento de sinais são ajustados, com o auxílio do osciloscópio, sendo então golpeada a placa, submetida a uma carga para garantir contato adequado com o solo, gerando-se uma onda de cisalhamento que viaja no interior do solo até atingir os geofones. Os sinais são então filtrados e armazenados em um computador para análises posteriores.

A ASTM D4428 “Métodos de ensaio padrão para Ensaio Sísmico *cross-hole*” no seu item 3.1.2 trata dos receptores (sensores) a serem utilizados nos equipamentos do ensaio *cross-hole*:

“Os receptores destinados para uso no ensaio de *Cross-hole* devem ser transdutores possuindo características de frequência e sensibilidade apropriados a fim de determinar a chegada do trem de ondas sísmicas. Exemplos típicos incluem geofones e acelerômetros.”

E segue orientando quanto ao sistema uniaxial ou triaxial:

“...Quando a chegada da onda P não é desejada, um transdutor vertical uniaxial pode ser usado.”

Para o entendimento do projeto foi necessária a avaliação de equipamentos já existentes, verificando suas características, vantagens e limitações. Um breve relato é apresentado a seguir para justificar o tipo de cone sísmico desenvolvido.

O grupo de ensaios *in situ* da Universidade Britânica de Columbia foi solicitado pela secção de métodos sísmicos da Geological Survey of Canadá (GSC) a fim de avaliar o equipamento, procedimentos de ensaios e técnicas usando um Cone Sísmico abaixo do solo do fundo do mar próximo à costa do Mar d Beaufort na área do Delta do Mackenzie (Campanella et al, 1987). Foram utilizados geofones com ressonância de 28 Hz. Alguns cones usaram acelerômetros. Tanto geofones como acelerômetros foram considerados receptores aceitáveis. Geralmente, os sinais de geofones não filtrados forneceram os melhores dados de chegada de onda cisalhante devido ao seu amortecimento relativamente alto e baixa ressonância (28Hz). A figura 13 apresenta um exemplo dos dados obtidos.

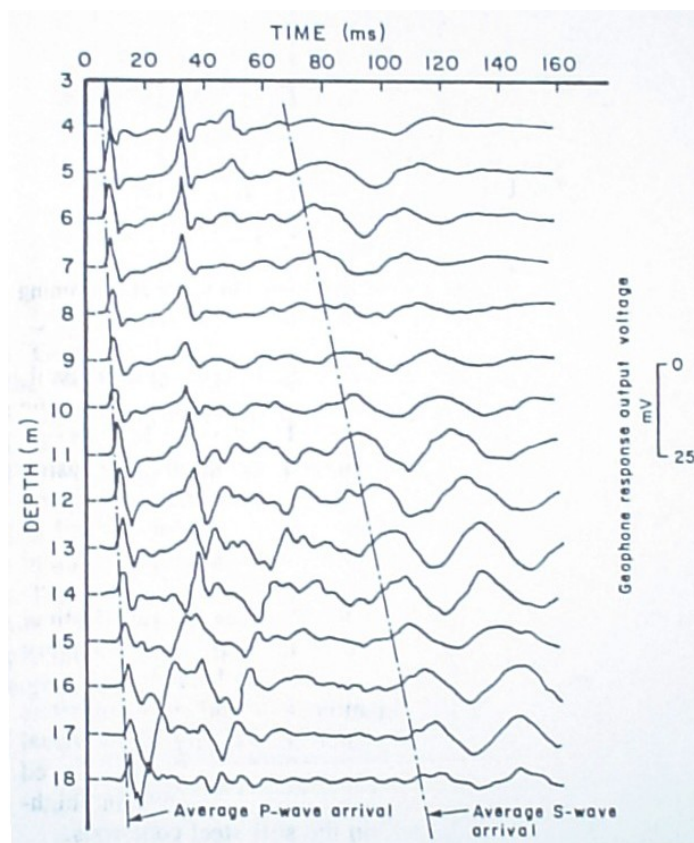


Figura 13: Mackenzie delta (Campanella et al, 1987)

Segundo Burns e Mayne (2002) podem ser usados geofones ou acelerômetros no Cone Sísmico: “A adição de um acelerômetro ou geofone a uma ponteira de cone possibilita a medida direta da velocidade da onda cisalhante (V_s) com a profundidade durante a pausa da cravação das hastes”.

Jacobs & Butcher (1996) desenvolveram um Cone Sísmico, contemplando a utilização de dois geofones espaçados em 1 metro. Os resultados foram comparados aos resultados de ensaios de *cross-hole* e apresentaram boa concordância. Jacobs & Butcher, 1996 esclarecem muito bem as diferenças entre a utilização de um sensor ou dois sensores no Cone Sísmico. No caso da utilização de apenas um sensor no interior do cone, caracteriza-se o ENSAIO DE CONE SÍSMICO INCREMENTAL: Para definir a chegada da onda cisalhante, duas ondas cisalhantes são geradas na superfície para cada profundidade ensaiada, sendo que cada sinal tem reversão de polaridade em relação ao outro. Isso é conseguido pela aplicação de golpes da marreta em lados opostos da placa de geração da onda cisalhante. Um sinal típico desse ensaio com reversão de polaridade é mostrado na Figura 14.

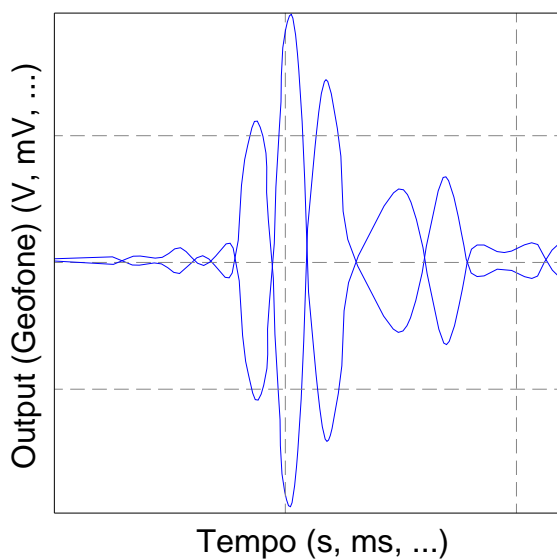


Figura 14: Resultado típico de ensaio sísmico com reversão de polaridade

Quando da obtenção do resultado acima para uma dada profundidade, o cone é então avançado para a próxima profundidade de ensaio e o procedimento de ensaio é repetido. Esse

tipo de ensaio realizado com apenas um sensor é frequentemente chamado de **Ensaio de Cone Sísmico Incremental**.

A fim de reduzir o tempo requerido para a realização de ensaios de Cone Sísmico e melhorar a confiabilidade na interpretação dos dados, um Cone Sísmico com dois sensores foi desenvolvido (Jacobs & Butcher, 1996). Os dois geofones são montados a uma distância fixa separados verticalmente, tipicamente 1,0 m (ver Figura 15).

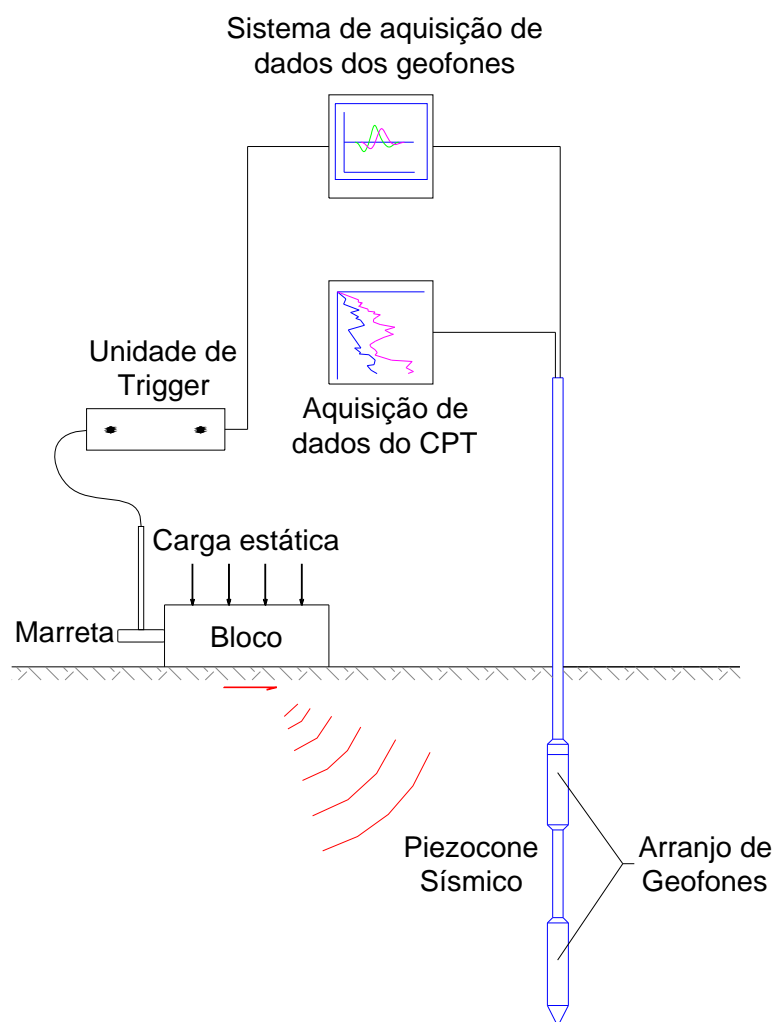


Figura 15: Cone sísmico (Jacobs & Butcher, 1996)

Este equipamento fornece os tempos de viagem de onda cisalhante total e diferencial, para apenas um único golpe da marreta, reduzindo substancialmente o tempo necessário para a realização de uma série de ensaios.

Segundo Jacobs & Butcher (1996), o arranjo duplo de sensores tem uma série de vantagens em relação ao ensaio de cone sísmico incremental quando da interpretação das velocidades de onda cisalhantes. As maiores vantagens são:

- (1) as medidas de tempo de chegada de onda são independentes da precisão do trigger;
- (2) as medidas não são afetadas pela variação na energia da fonte de ondas;
- (3) a precisão no controle de profundidade não é crítica na análise dos resultados.

Butcher e Powell (1996) realizaram estudos comparativos entre o uso de arranjo simples (um geofone) e arranjo duplo de geofones. A figura 16 apresenta os resultados obtidos pelos autores.

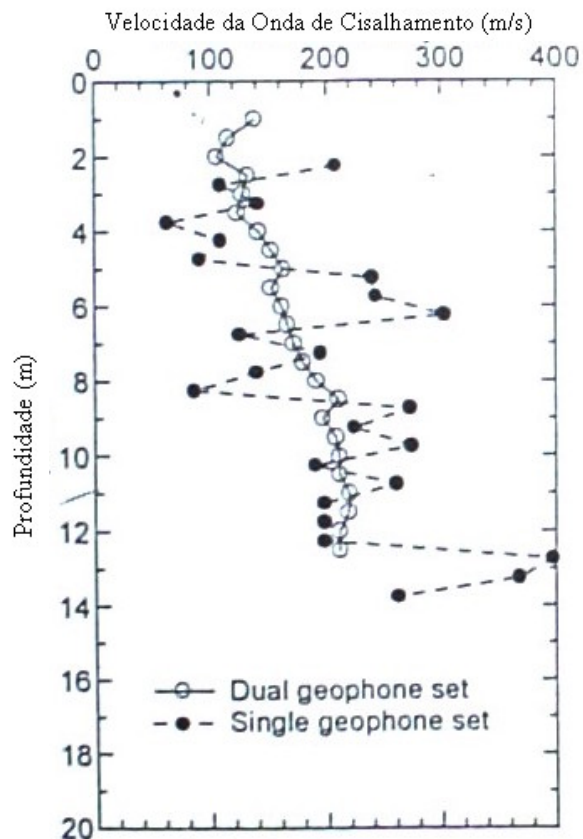


Figura 16: Comparação de uso de arranjo simples e duplo de geofones (Butcher e Powell, 1996)

Nota-se que a variação nos resultados devido ao uso de apenas um geofone pode chegar próximo a 100% (por exemplo para a profundidade de 13 m, Figura 16). Entretanto, é importante lembrar que foram obtidos bons resultados com o uso de apenas um geofone e um trigger de boa qualidade (Campanella et al, 1986).

Outro fator que influencia significativamente a qualidade dos resultados é a fonte de sinal. Esta deve gerar preferencialmente ondas de cisalhamento com grande amplitude, com pouca ou nenhuma componente de onda de compressão (Campanella et al, 1986). Os resultados obtidos por estes autores mostraram que um dispositivo que gera ondas excelentes é constituído de uma viga envolta por chapas de aço pressionada contra o solo da superfície. Os autores acima sugerem que seja utilizado o peso do equipamento de cravação para pressionar a viga contra o solo, imprimindo ao sistema excelente contato entre a viga e o solo. A viga é usualmente posicionada com as extremidades equidistantes em torno de 3 metros do eixo do cone. Pesquisas posteriores indicam que quanto mais próximo a fonte estiver do eixo do cone, melhores são os resultados obtidos (Butcher & Powell, 1996).

A viga deverá ser seguramente pressionada no solo minimizando as perdas de energia devido às deformações plásticas no solo sob a viga.

Butcher & Powell (1996) fazem algumas considerações práticas a respeito da fonte de ondas do ensaio de cone sísmico: Sugere-se a utilização de uma marreta para efetuar o golpe contra a placa (viga) de em torno de 10 Kg. Segundo esses autores, a distância a partir do ponto de inserção do cone sísmico no solo até a fonte de ondas cisalhantes pode ter efeito significativo na medida do tempo de viagem da onda e conseqüentemente nas velocidades de onda cisalhante calculadas. Isto ocorre devido ao fato de que a trajetória de viagem das ondas cisalhantes assumida é uma linha reta diretamente da fonte até os receptores no cone sísmico. (Ver Figura 17).

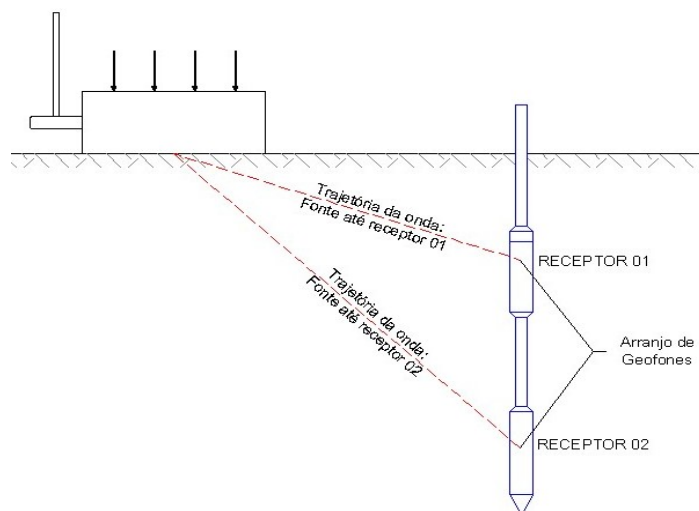


Figura 17: Trajetória de viagem da onda cisalhante (hipótese)

Com o aumento da distância horizontal a partir do cone sísmico eleva-se a probabilidade de que a chegada da primeira onda tenha sido refratada para uma trajetória horizontal. O resultado obtido apresentará tempos de viagem de onda curtos, conduzindo a altas velocidades de onda cisalhante.

A Figura 18 apresenta o efeito na velocidade de onda cisalhante – perfis de profundidade *versus* velocidade de onda cisalhante para diversas distâncias entre a fonte e o ponto de inserção do cone (resultados obtidos em Madingley, Butcher & Powell, 1996).

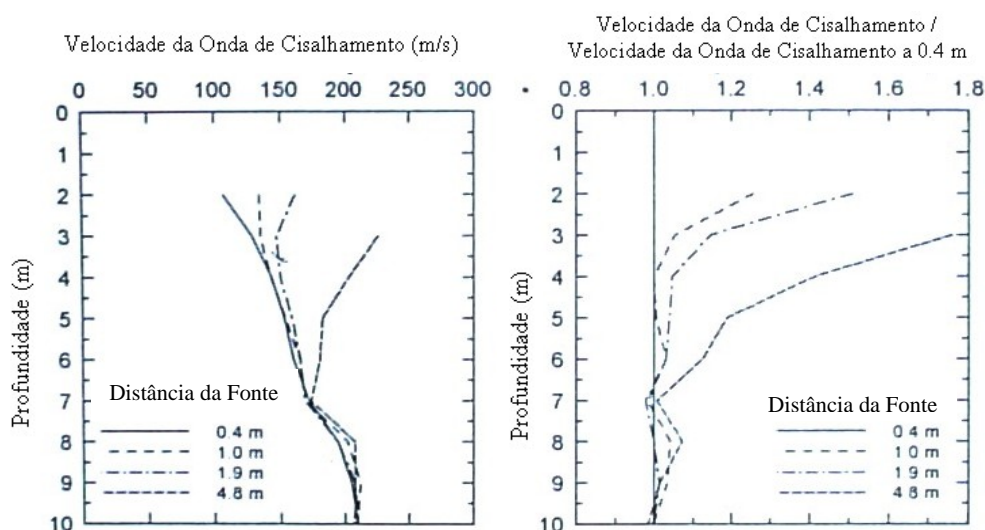


Figura 18: Efeito da distância entre a fonte e o ponto de inserção do cone sísmico (Butcher e Powell, 1996).

À medida que a fonte é aproximada do eixo do cone sísmico, a dispersão dos resultados diminui, indicando a necessidade de se ter a fonte o mais próximo possível do eixo do cone.

Quando, no ensaio de cone sísmico, ocorre o impacto da marreta metálica com a placa de aço, gera-se uma onda de cisalhamento que viaja no interior do solo, com uma determinada energia, que varia com a grandeza do impacto e com a distância da onda à fonte.

A quantidade de energia transmitida ao solo diminui com a profundidade. Ocorre assim a **atenuação** da onda de cisalhamento ao longo do seu percurso no interior do solo. Assim, em pontos mais afastados da superfície, os sinais produzidos apresentam amplitudes menores à pontos localizados mais próximos à superfície.

A Figura 19 mostra a ocorrência do fenômeno acima citado:

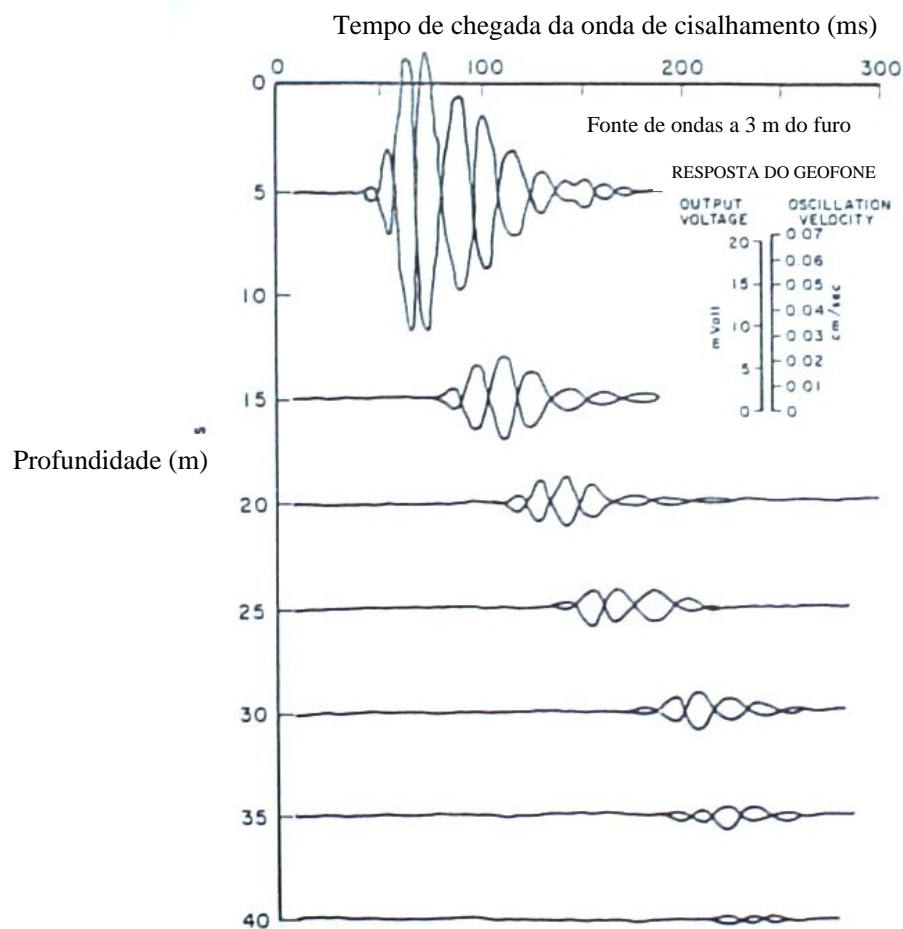


Figura 19: Exemplo da atenuação da onda de cisalhamento ao longo da profundidade (Robertson e Campanella, 1986)

A amplificação de sinais é variável ao longo da profundidade e também muda com o tipo de solo. Quando do projeto do módulo sísmico, a taxa de amplificação de sinais é desconhecida, sendo necessário realizar ensaios de campo para assim poder definir a referida taxa em função do tipo de solo e das suas propriedades.

3.2 O TRANSDUTOR

Os transdutores são em geral selecionados em função da sua aplicação. Os fatores mais importantes a considerar na escolha do transdutor mais adequado são:

O tipo do transdutor: GEOFONES OU ACELERÔMETROS;

O número de transdutores a serem utilizados;

A sensibilidade dos transdutores;

A faixa de frequência de operação dos transdutores.

É evidente que outros fatores, tais como custos, dimensões e disponibilidade dos transdutores também são importantes na escolha. Este item trata da escolha do transdutor, especificamente, em relação ao item a da lista de fatores acima.

3.2.1 Geofone

O **Geofone** é um sensor constituído por um sistema massa e mola suspensos e um ímã fixo, conforme ilustrado na Figura 20.

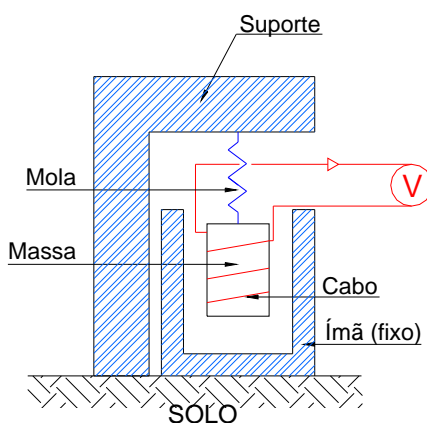


Figura 20: Esquema constitutivo de um Geofone

A hipótese básica de funcionamento do geofone é que quando ocorre movimento no solo a massa permanece fixa e o ímã se move. O movimento do ímã produz uma voltagem no cabo envolto à massa, devido ao campo magnético gerado. A voltagem é proporcional à velocidade na qual o ímã se move.

3.2.2 Acelerômetro

O **acelerômetro** é um sensor largamente aceito como o melhor transdutor para a medida de vibrações. A figura 21 apresenta um modelo de acelerômetro da Bruel & kjaer. Os elementos ativos são elementos piezoelétricos. Eles atuam como molas conectando a base do acelerômetro à massa sísmica através de uma coluna triangular central rígida.

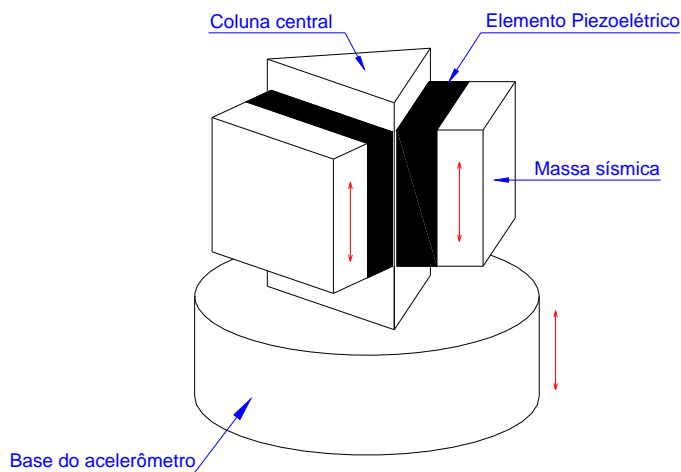


Figura 21: Esquema de um acelerômetro piezoelétrico

Quando o acelerômetro é vibrado, uma força, igual ao produto da aceleração da massa sísmica e sua massa, atua em cada elemento piezoelétrico. Os elementos piezoelétricos produzem uma carga proporcional à força aplicada. As massas sísmicas são constantes e portanto os elementos produzem uma carga que é proporcional à aceleração da massa sísmica. O sinal de saída de um acelerômetro é proporcional à aceleração da base e conseqüentemente à aceleração da superfície na qual o acelerômetro é montado (Serridge e Licht, 1987).

Os fatores que determinaram o sensor a ser utilizado foram: (1) Dimensões do sensor; (2) Custos; (3) Disponibilidade do sensor; (4) Tempo para entrega do sensor.

O espaço disponível para o acondicionamento do sensor é de 25 mm de diâmetro, sem restrições quanto à altura. Nesse espaço faz-se necessária a passagem dos cabos da ponteira do ensaio de cone, bem como a saída dos cabos do geofone. Portanto é necessário que o sensor seja adequadamente dimensionado para essas condições.

Em termos de custos, os geofones são mais viáveis aos acelerômetros.

O geofone escolhido para o Cone Sísmico da UFRGS é o modelo GS 14-L3, da Geospace Corporation. Este geofone foi usado no trabalho original (Campanella et al, 1984). O geofone possui dimensões compatíveis com o espaço disponível no projeto desenvolvido na UFRGS.

A figura 22 apresenta o geofone GS 14-L3:



Figura 22: Geofone GS 14-L3

3.3 O MÓDULO SÍSMICO

O módulo sísmico foi projetado a fim de determinar o tempo de chegada da onda cisalhante. Para tal, foram dimensionados espaços de modo a permitir o posicionamento adequado dos transdutores bem como do amplificador de sinais e cabos.

O módulo sísmico é composto por peças em Aço Inox VC 140 e Aço 1045 ST 52. O segundo tipo de aço foi utilizado na usinagem da haste intermediária, enquanto que o primeiro foi aplicado para os sistemas de acondicionamento dos componentes eletrônicos (geofones e amplificador).

Diante das vantagens do uso de arranjo duplo de geofones apresentadas no item 3.1, o projeto do cone sísmico da UFRGS adotou tal configuração e para proporcionar maior flexibilidade e versatilidade ao ensaio, projetou-se uma unidade acondicionadora dos geofones,

completamente independente mecânica e eletronicamente da ponteira do ensaio de penetração de cone.

O projeto prevê a utilização de dois geofones separados de uma distância de 1 metro, orientados horizontalmente. O módulo sísmico, conforme apresentado na figura 12, é constituído de duas unidades para acondicionamento dos geofones, além de uma haste entre essas duas unidades garantindo a distância padrão de 1 metro entre os geofones.

Na extremidade inferior do módulo sísmico existe um sistema de acoplamento da ponteira para a realização do ensaio de cone sísmico. Tal sistema foi projetado mecanicamente, sendo capaz de acoplar a ponteira do ensaio de penetração de cone ao módulo sísmico sem a necessidade de girar o cone de penetração e o módulo sísmico. Nos casos em que não há necessidade de realização de um perfil do subsolo a partir de ensaios CPT juntamente ao ensaio sísmico, a ponteira é substituída por uma ponta cega, sem componentes eletrônicos.

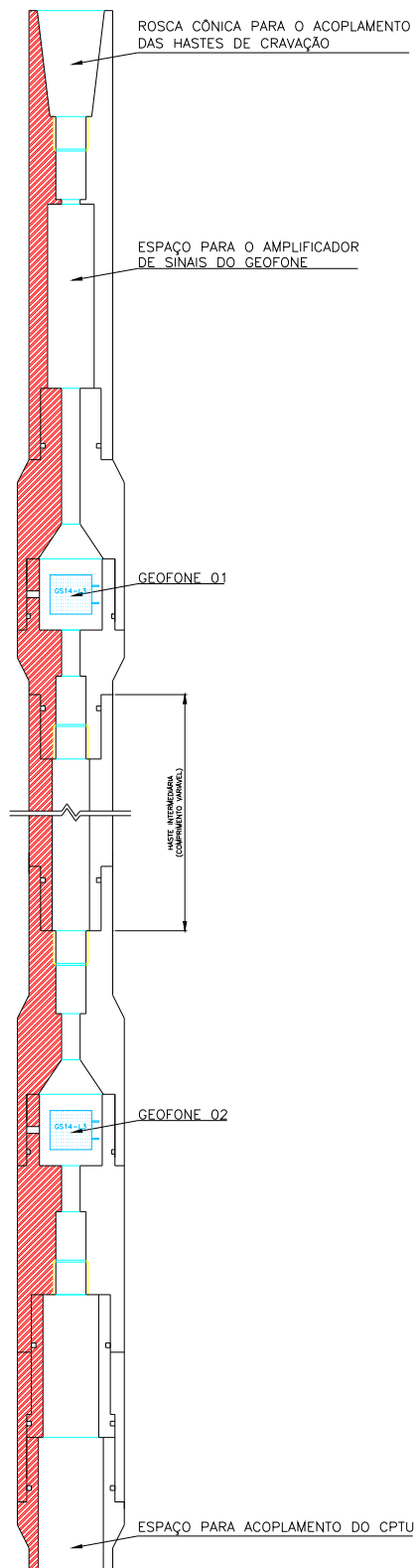


Figura 23: Projeto básico do Módulo Sísmico

Os geofones estão dispostos horizontalmente, posicionados exatamente em perpendicular ao eixo do módulo sísmico. A fim de garantir perfeito contato entre os geofones e a parede do módulo sísmico, foi desenvolvido um sistema em latão que envolve o geofone e pressiona o mesmo às paredes com o auxílio de parafusos (Figura 24). Todo esse processo não ocasiona dano algum ao geofone, pois foram observadas todas as recomendações do fabricante quanto aos cuidados com o sensor.

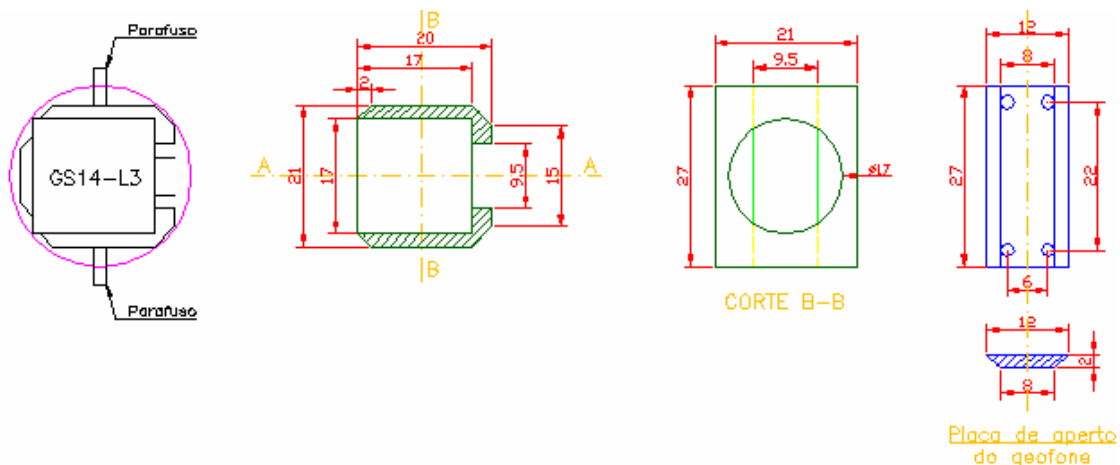


Figura 24: Sistema de acondicionamento do geofone

A união das peças mecânicas é feita por meio de roscas apropriadas, garantido contato mecânico a fim de fornecer resistência mecânica adequada à compressão e tração das hastes.

Para impedir a entrada de água no interior do módulo sísmico, foram previstos e projetados anéis de vedação nas uniões das peças, bem como dispositivos prensa-cabo no interior do módulo sísmico. O resultado de testes de estanqueidade realizados no módulo sísmico desenvolvido é apresentado posteriormente.

Na extremidade superior do Módulo Sísmico existe um espaço destinado ao amplificador dos sinais dos geofones, bem como rosca cônica para acoplamento das hastes de cravação. (Ver Figura 12). Em todos os componentes do módulo sísmico projetou-se um espaço para a passagem dos cabos do cone de penetração e do módulo sísmico.

As figuras 24 e 25 apresentam o Cone Sísmico da UFRGS.

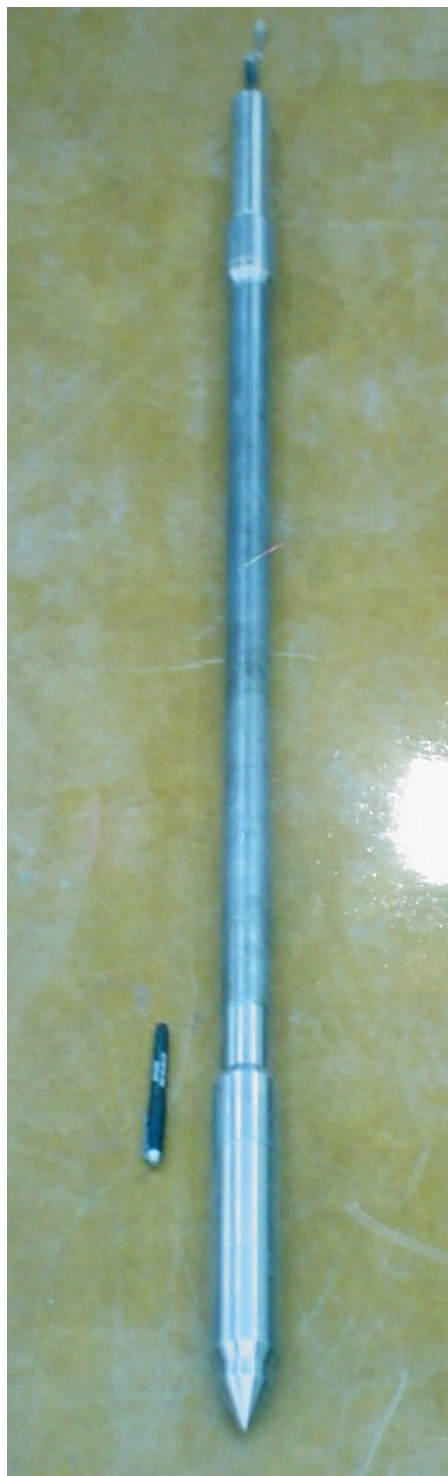


Figura 24: Cone Sísmico da UFRGS



Figura 25: Cone Sísmico da UFRGS em teste no laboratório

A Figura 25 mostra todos os componentes do cone sísmico da UFRGS: computador, caixa de comando e osciloscópio (na mesa) e módulo sísmico, marreta e placa metálicas no piso.

3.4 A GERAÇÃO DA ONDA

Diante das pesquisas realizadas optou-se pelo seguinte sistema de geração da onda cisalhante, para o Cone Sísmico da UFRGS:

- Marreta metálica com 10Kg;
- Placa de aço com dimensões de 45 x 45 x 2,5 cm;

- Aplicação de carga na placa através do posicionamento de um dos apoios do sistema de cravação sobre a placa;
- Distância entre o centro da placa e o eixo do cone sísmico: 0,80 m.

As Figuras 26 e 27 apresentam os componentes do sistema de geração da onda e o sistema em operação:



Figura 26: Placa e marreta metálicas em testes de laboratório



Figura 27: Sistema de geração da onda cisalhante em operação

Observa-se na Figura 27 a escarificação realizada para obter o nivelamento na placa, bem como sua orientação de modo que seu eixo permaneça perpendicular ao eixo das hastes de cravação.

3.5 CONDICIONAMENTO E AQUISIÇÃO DE SINAIS

3.5.1 Programa de aquisição de sinais

O esquema geral do cone sísmico da Figura 12 apresenta os diversos componentes do sistema. Junto ao computador encontra-se o dispositivo de interface entre os sensores e o computador. Trata-se de um cartão PCMCIA, cuja finalidade é transformar os sinais dos sensores em dados a serem armazenados no computador.

O gerenciamento das informações transferidas ao computador pelo cartão é feito através de um programa computacional. O software utilizado no cone sísmico da UFRGS é o Matlab versão 6.0 R12. Desenvolveu-se um programa para a aquisição dos sinais utilizando a ferramenta “Data Acquisition Toolbox”, do Matlab. Esta ferramenta é específica para a aquisição de sinais, sendo unicamente necessária à definição dos dados do sistema. O programa permite a geração de gráficos e o acompanhamento dos resultados no campo, dispensando-se a utilização do osciloscópio. Neste projeto utilizou-se o osciloscópio para monitoramento em tempo real, uma vez que o equipamento está em desenvolvimento, exigindo assim, ferramentas para verificação de quaisquer resultados.

O programa de aquisição de sinais foi totalmente desenvolvido e testado em conjunto com o Laboratório de Dinâmica Estrutural da UFRGS – LDEC. O programa, chamado READDAS16 permite a aquisição de sinais de até oito canais, sendo dados de entrada: frequência de aquisição, tempo de aquisição, número de canais e a especificação do dispositivo de interface (cartão PCMCIA) através de fornecimento dos dados do fabricante.

Como se observa, a manipulação do programa é simples. Gera-se um *script*, bastando então a entrada de um comando simples para a ativação do programa. Dessa forma, garante-se a agilidade no momento da execução do ensaio.

A seguir é apresentada uma janela do programa com um resultado obtido em campo:

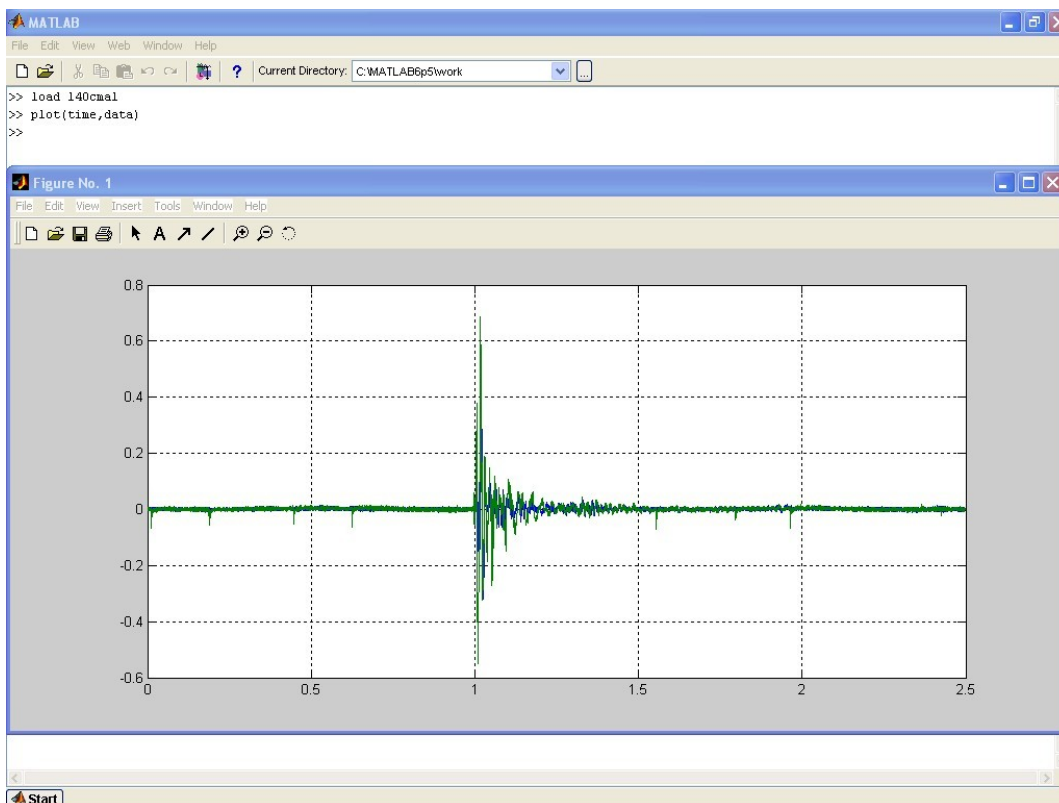


Figura 28: Resultado de ensaio apresentado no programa READDAS16

3.5.2 Geofones

Os geofones foram submetidos a uma verificação no Laboratório de Dinâmica Estrutural da UFRGS – LDEC. Realizou-se o ensaio de Mesa Vibratória, o qual permitiu a verificação de resposta em frequência dos geofones. O ensaio consiste em fixar os geofones a uma mesa vibratória, juntamente com um acelerômetro a fim de monitorar e gerar acelerações conhecidas à mesa. Os acelerômetros são conectados ao controlador da mesa vibratória, equipamento que permite o gerenciamento do ensaio, controlando-se a frequência e a aceleração da mesa. Os sensores foram submetidos a uma aceleração de $1,0 \text{ m/s}^2$, com uma faixa de frequências variável. O resultado obtido foi a curva de calibração dos geofones, apresentada na Figura 30.

A figura 29 apresenta a curva de calibração dos geofones fornecida pelo fabricante (Geospace Corporation).

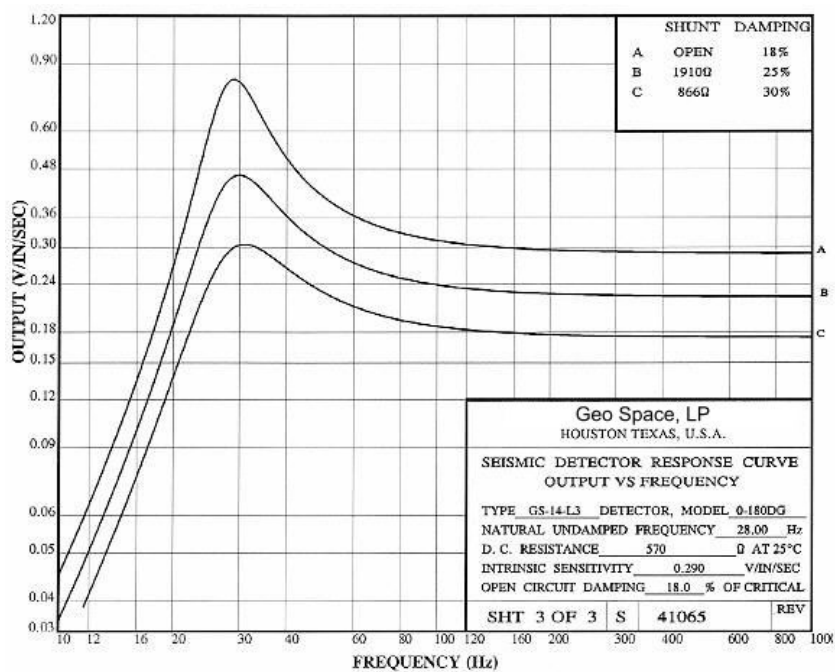


Figura 29: Curva de calibração dos geofones (Fabricante)

Curvas de Calibração dos Geofones

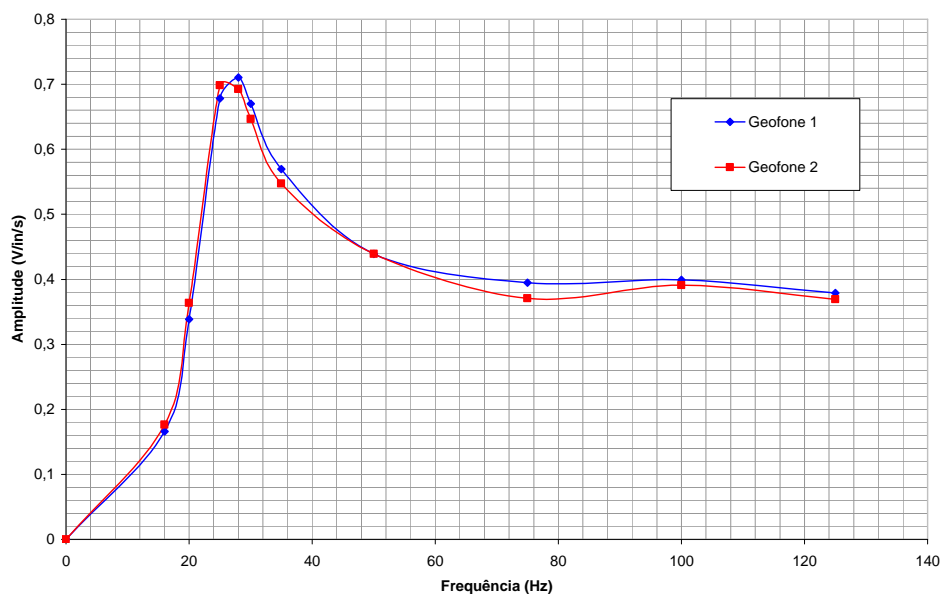


Figura 30: Curva de calibração dos geofones (LDEC – UFRGS)

Observa-se que o comportamento, a resposta dos geofones apresentada na curva obtida no Laboratório da UFRGS é muito semelhante ao comportamento da curva fornecida pelo fabricante. Os resultados obtidos aproximam-se da curva A do fabricante, uma vez que a impedância do sistema de aquisição é muito alta.

Dessa forma, os geofones foram considerados adequados para serem utilizados no projeto e desenvolvimento do cone sísmico.

Esta verificação de laboratório dos geofones não é suficiente para garantir a aceitabilidade final do equipamento como um todo. São necessários ensaios de campo passíveis de comparação com resultados pré-existentes, a fim de efetuar a validação do equipamento.

3.5.3 Sistema de amplificação de sinais

Desenvolveu-se um sistema de amplificação de sinais que permite a variação da taxa de amplificação no momento da realização dos ensaios. Possui também filtros eletrônicos que eliminam frequências abaixo de 10Hz. O módulo sísmico da UFRGS possui dois amplificadores: o primeiro localiza-se logo acima dos geofones e possui uma taxa de amplificação fixa. Com esse amplificador junto aos geofones diminui-se a quantidade de ruído gerado ao longo das hastes.

O segundo amplificador localiza-se na caixa de comando e permite o ajuste da taxa de cada geofone através de dois potenciômetros. A figura abaixo apresenta a caixa de comando com os potenciômetros de ajuste da taxa de amplificação.

É importante observar que para o ensaio em questão a amplitude do sinal não é relevante, devendo apenas ser alta o suficiente para ser medida. O parâmetro que realmente importa é o tempo de chegada da onda.



Figura 31: Detalhe da caixa de comando e potenciômetros de ajuste de taxa de amplificação de sinais.

3.5.4 Trigger

Para o cálculo do módulo de cisalhamento máximo a velocidade da onda de cisalhamento é elevada ao quadrado. Portanto, é fundamental a precisão na determinação do tempo de viagem da onda uma vez que pequenas variações geram grandes erros na determinação do G_0 .

De acordo com as pesquisas de Campanella et al (1986), um erro de 10% na determinação da velocidade da onda de cisalhamento representa um erro de 20% em G_0 .

O módulo sísmico da UFRGS realiza o ensaio conhecido como Método de intervalo de tempo real. Assim, para a determinação do tempo de viagem da onda entre os dois sensores basta assumir como tempo inicial o tempo de chegada da onda no primeiro sensor e a partir daí determinar o tempo de viagem desta até o segundo sensor. Entretanto a fim de obter mais dados foi projetado um trigger visando determinar o tempo de viagem da onda entre a fonte e os sensores.

O circuito eletrônico do trigger, desenvolvido no Laboratório de Dinâmica Estrutural da UFRGS – LEDEC, gera um pico de voltagem quando do contato da marreta metálica com a placa de aço. O esquema de funcionamento do circuito é apresentado na figura 32:

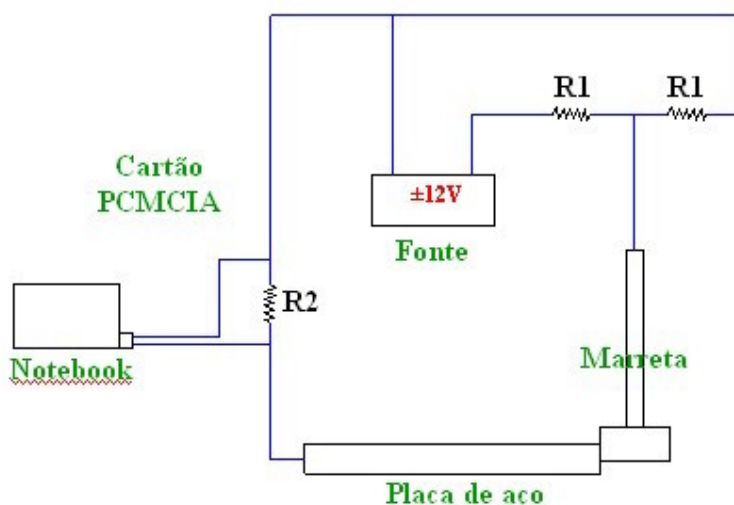


Figura 32: Circuito eletrônico do trigger

O circuito foi montado internamente a caixa de comando permitindo a fácil conexão da marreta e placa aos resistores R1 e R2 acima mostrados.

3.6 TESTES PRELIMINARES DO EQUIPAMENTO

3.6.1 Teste de estanqueidade do módulo sísmico

O módulo sísmico foi submetido a um teste de estanqueidade no Laboratório de Ensaios Geotécnicos e Geoambientais da UFRGS – LEGG. O ensaio consistiu da aplicação de uma pressão de água internamente ao módulo sísmico sem os componentes eletrônicos. Foram verificadas as conexões quanto a possíveis vazamentos.

Com a aplicação de uma pressão de 400 KPa durante 2 horas não foram observados vazamentos nas conexões. Para as pressões nas quais o módulo sísmico será submetido (até 100 KPa) o equipamento foi considerado adequado.

3.6.2 Montagem final

Após os testes das partes constituintes individuais foi realizada a montagem eletrônica final do equipamento no Laboratório de Ensaios Geotécnicos e Geoambientais da UFRGS – LEGG, com o apoio do Laboratório de Dinâmica Estrutural da UFRGS – LEDEC. Todas as partes do cone sísmico foram montadas e o equipamento foi submetido a diversos testes de aquisição de sinais. O equipamento foi posicionado no piso do laboratório, com os geofones orientados verticalmente, sendo então efetuados golpes verticais no piso, a fim de avaliar a aquisição de sinais. O equipamento apresentou-se adequado para a realização de ensaios de campo.

4 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DO LOCAL ENSAIADO

Determinou-se como local para a realização dos ensaios de cone sísmico a região onde se situa o Aeroporto Internacional Salgado Filho (AISF), em Porto Alegre, RS. Várias pesquisas e trabalhos já foram desenvolvidos no local, destacando-se a tese de doutorado de Soares (1997), a dissertação de mestrado de Hebmuller (1999) e a campanha de investigação geotécnica para a obra de ampliação e modernização do aeroporto (Schnaid et al, 2001).

Estabeleceu-se como condição para validação da tecnologia desenvolvida, a seleção de um local no qual houvesse experiência prévia com ensaios sísmicos. Assim, como a dissertação de Hebmuller (1999) estudou a região do Aeroporto Internacional Salgado Filho com ensaios de *cross-hole*, decidiu-se pela realização dos primeiros ensaios com o equipamento neste local.

4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

O Aeroporto Internacional Salgado Filho situa-se em uma região que se caracteriza pela presença de um extenso depósito superficial de argila mole, descrita em detalhes por Schnaid et al (2001). O local dos ensaios encontra-se em áreas baixas, denominadas “solos de várzeas”.

Conforme apresentado por Schnaid et al, 2001 o pacote sedimentar que se encontra abaixo da planície do sistema lagunar Guaíba-Gravataí é constituído por intercalações de sedimentos

lagunares (lamas e areias finas ricas em matéria orgânica e restos de conchas e moluscos) e sedimentos de canal e de planície de inundação (areias médias, lamas e lamas orgânicas).

4.2 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

A validação dos resultados experimentais obtidos através do cone sísmico só foi possível devido ao grande número de dados geotécnicos disponíveis no local ensaiado. A seguir apresenta-se o perfil de subsolo típico da área (Soares, 1997; Schnaid et al, 1998, 2000; Schnaid et al, 2001). (Figura 33).

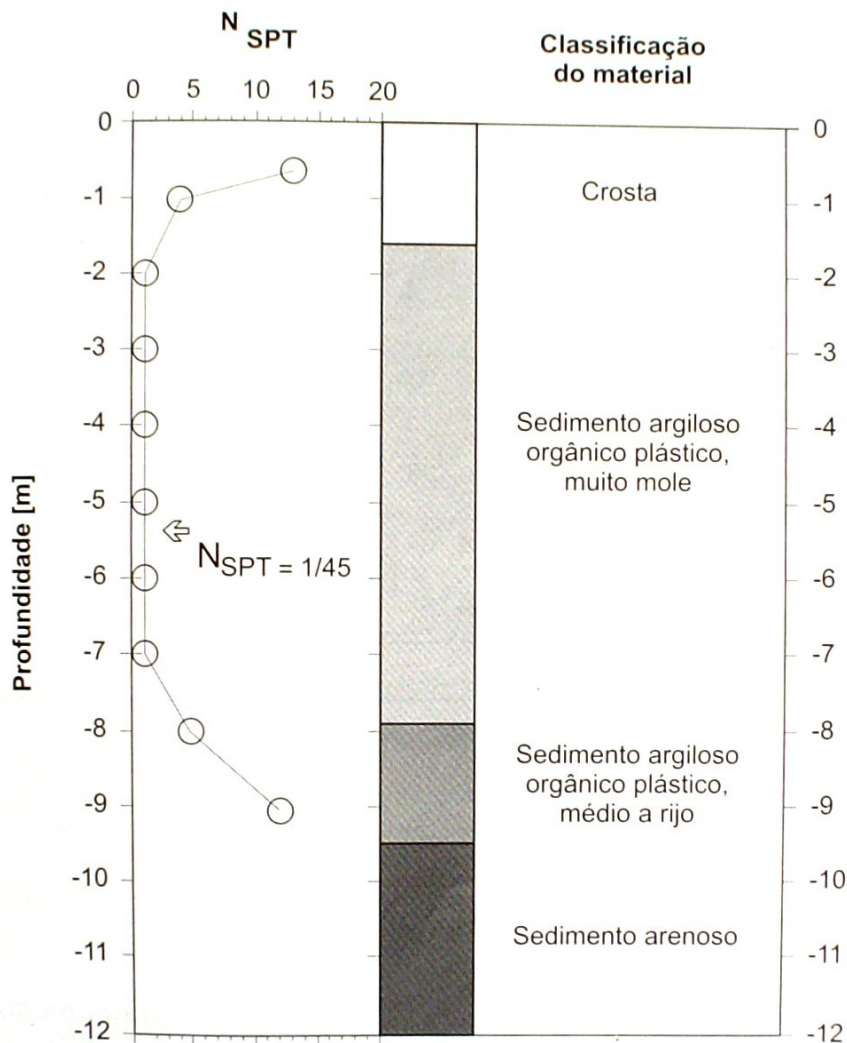


Figura 33: Perfil típico da região do Aeroporto Internacional Salgado Filho (Schnaid et al, 2001)

A figura 34 reúne os dados de caracterização do depósito de argila mole da região metropolitana de Porto Alegre, que compreende a área do aeroporto, conforme apresentado por Schnaid et al (2001). São apresentados na figura os limites de Atteberg (LL e LP), umidade do material (W), teor de argila e resistência ao cisalhamento não-drenada (S_u).

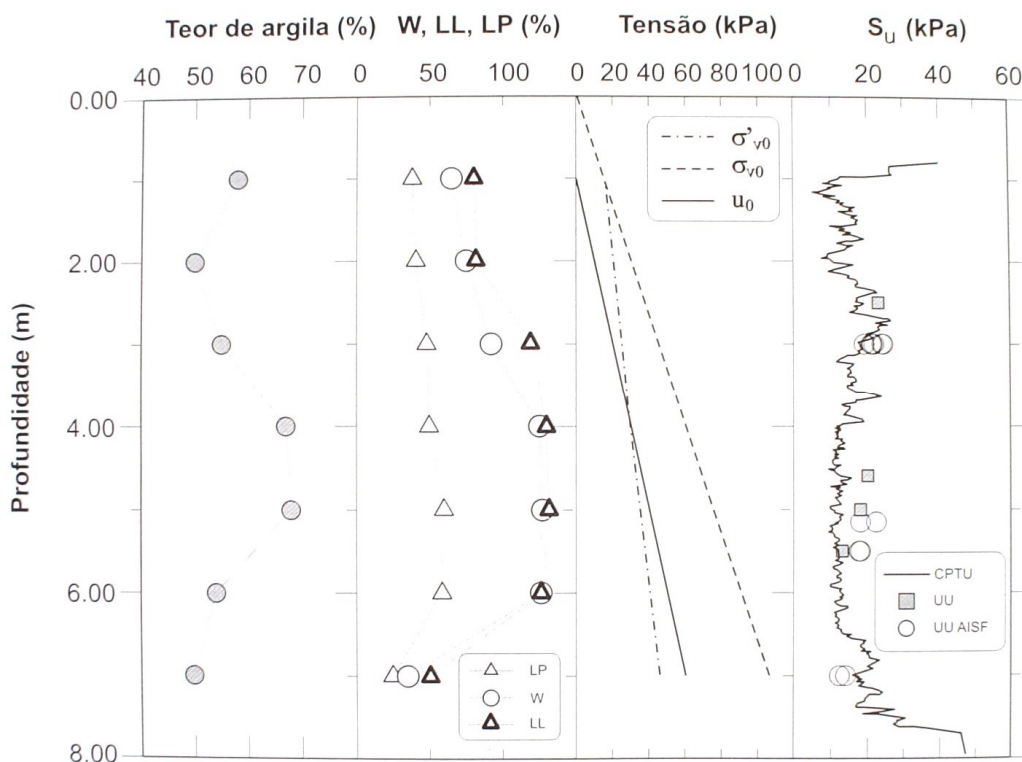


Figura 34: Caracterização do depósito de argila mole (Schnaid et al, 2001)

A área do Aeroporto Internacional Salgado Filho apresenta como peculiaridade a presença localizada de aterros antigos de brita e saibro argiloso executados pela administração do aeroporto. Apresentam-se na Figura 35 os dois perfis representativos da área em estudo, cuja diferença reside na presença, ou não, de um aterro antigo sobre o perfil do terreno natural.

A importância geotécnica destes aterros reside no seu impacto na história de tensões do depósito, alterando o OCR da camada argilosa. Nos locais com aterro o solo tende à condição normalmente adensada.

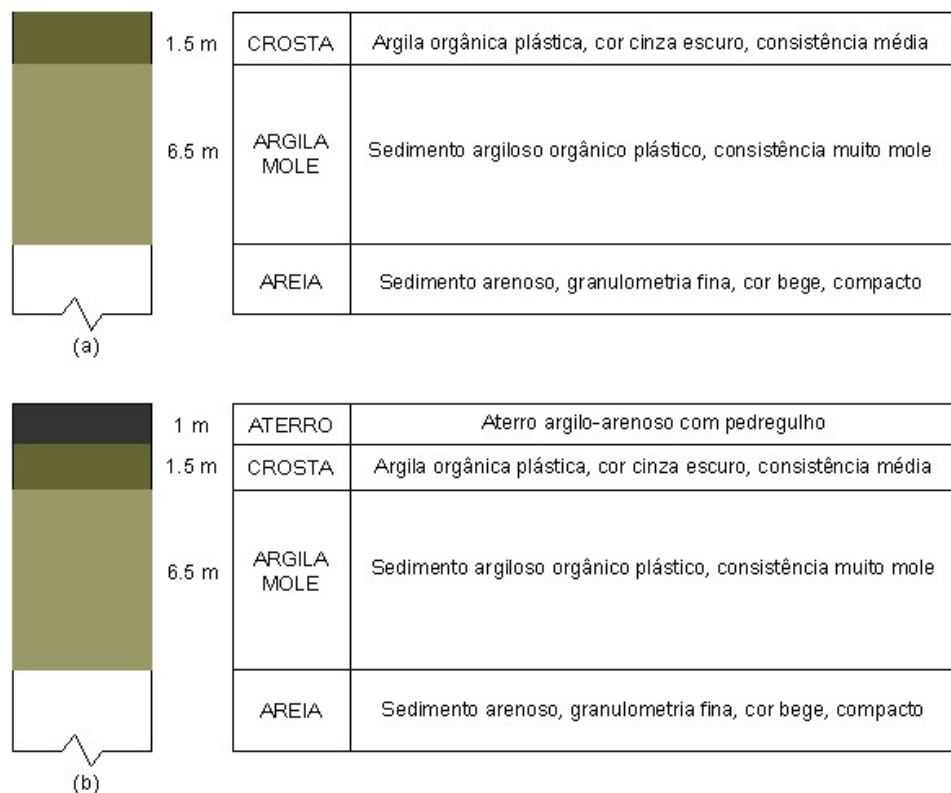


Figura 35: Perfis estratigráficos representativos da área do aeroporto (Schnaid et al, 2001)

O perfil de subsolo da área em estudo é basicamente composto de uma crosta pré-adensada, seguindo-se de uma camada de argila mole de natureza orgânica, de consistência muito mole, chegando a profundidades de até 10 m. A resistência ao cisalhamento não drenada da argila é de aproximadamente 10 KPa (variando entre 8 KPa e 20 KPa), não havendo variação significativa com a profundidade. A camada de argila mole é relativamente homogênea e, portanto, ideal para calibração do cone sísmico.

5 ENSAIOS DE CONE SÍSMICO

5.1 INTRODUÇÃO

Descreve-se neste capítulo a realização dos ensaios de cone sísmico. São discutidos os procedimentos adotados na execução dos ensaios: preparação do equipamento no laboratório, transporte do equipamento, preparo do local para a realização dos ensaios, teste expedito antes da cravação da sonda, procedimentos adotados quando da geração e aquisição da onda e retirada da sonda. O capítulo mostra também os resultados obtidos, bem como sua análise e comparação com resultados de ensaios sísmicos *Cross-hole* realizados no local.

5.2 PROCEDIMENTOS PRÁTICOS DO ENSAIO DE CONE SÍSMICO

O equipamento foi testado no laboratório com todos os seus componentes durante três dias consecutivos, anteriormente à realização dos ensaios, conforme citado no item 4.2. Este procedimento permite detectar eventuais problemas do equipamento.

Todos os componentes foram devidamente acondicionados em embalagens adequadas ao seu transporte, evitando danos. O cone sísmico foi envolto em espuma e posicionado no interior do veículo de forma que o eixo dos geofones permaneça na posição vertical, a fim de evitar vibrações no sentido contrário ao eixo dos geofones, o que poderia danificar os mesmos. O osciloscópio, notebook e caixa de comando foram transportados em suas pastas próprias.

No local dos ensaios foi utilizada uma fonte de energia AC 110V e também uma fonte móvel DC 12V (bateria). Tal alimentação foi prevista na caixa de comando, permitindo-se alimentar o sistema através de uma ou outra fonte.

O equipamento de cravação foi posicionado no local da perfuração. Para esta mobilidade utilizou-se reboque com sistema hidráulico acoplado. Os procedimentos de posicionamento e

cravação foram descritos em detalhes por Soares (1997) e são compatíveis com as recomendações internacionais (IRTP, 1988).



Figura 36: Reboque com sistema hidráulico de cravação

Todos os equipamentos de medição, do sistema de aquisição do cone sísmico, foram ligados realizando-se então um teste expedito a fim de verificar a operacionalidade do sistema no campo. O teste consistiu no posicionamento do cone sísmico horizontalmente junto ao solo (externamente) e a aplicação de golpes no terreno, realizando-se a aquisição de sinais. Como o equipamento funcionou corretamente, procedeu-se a sua cravação no terreno.

O cone sísmico foi posicionado concêntrico ao sistema hidráulico de aplicação de carga e mantido no nível do terreno a fim de proceder ao posicionamento da placa de geração da onda cisalhante.

Foi então colocada a placa metálica para a geração da onda cisalhante embaixo da sapata de nivelamento do equipamento. A placa foi nivelada junto ao terreno, através da escarificação

superficial do mesmo com uma enxada e sua horizontalidade verificada através de nível de bolha. O eixo horizontal da placa (de aplicação do golpe com a marreta) foi locado perpendicularmente ao eixo vertical do cone sísmico. Tal procedimento é fundamental para a aquisição de sinais de qualidade visando minimizar a ocorrência de eventuais ondas de compressão durante o impacto da marreta. A Figura 37 mostra o posicionamento da placa de geração da onda.



Figura 37: Posicionamento da placa de geração da onda cisalhante

O eixo dos geofones deve ser corretamente alinhado ao eixo da placa de geração de onda. Este procedimento é fundamental para a aquisição dos sinais. A Figura 38 apresenta o alinhamento da placa com a sonda.



Figura 38: Eixo de orientação da placa de geração da onda

O sistema hidráulico de cravação foi então acionado cravando-se o cone sísmico até a profundidade desejada. Neste ponto, o equipamento de cravação é desligado a fim de evitar ruídos indesejáveis nos sinais obtidos pelos geofones. Os ensaios são realizados golpeando-se a placa em ambos os lados, a fim de promover a reversão de polaridade de sinais. Foi encontrada certa dificuldade no momento de aplicação dos golpes devido ao pouco espaço disponível para o deslocamento do martelo.

Após a aquisição dos sinais, o motor é novamente acionado, verificando-se a centralização e verticalidade da composição, previamente à cravação do cone até a nova profundidade para realização de ensaios sísmicos.

Atingida a profundidade final da cravação, o equipamento foi removido sendo então desmontado e efetuada a limpeza de todos os componentes. Posteriormente, já no laboratório foram efetuados novos testes para verificação da funcionalidade de todos os componentes.

Alguns problemas foram identificados na campanha experimental. Houve a danificação de um potenciômetro durante a execução do ensaio, sendo este substituído em laboratório. O sistema de trigger não funcionou, possivelmente devido à oxidação da placa e ao acúmulo de solo no contato da marreta com a placa.

Descreve-se a seguir a campanha de ensaios de cone sísmico realizados no Aeroporto Internacional Salgado Filho, bem como apresenta-se os resultados obtidos.

5.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram realizados 2 perfis de sondagem de cone sísmico para validação do equipamento. O número de ensaios é reduzido, porém reitera-se que o objetivo desta etapa da pesquisa era somente de validação da técnica, através de comparação com resultados de ensaio *Cross-hole*. A experiência acumulada anteriormente na região do AISF com ensaios de piezocone facilitou a comparação. Os dois ensaios geraram um total de 136 registros, que possibilitaram uma análise cuidadosa (e criteriosa) da técnica e dos procedimentos de interpretação. Todos os resultados são apresentados no Apêndice I.

Como os dois locais onde foram realizados os ensaios de cone sísmico são próximos e existem inúmeros ensaios de piezocone demonstrando a homogeneidade da camada de argila mole, adotou-se um único perfil de sondagem de piezocone como representativo do local. Este perfil é utilizado na interpretação dos dados sísmicos.

O primeiro ensaio foi realizado junto ao prédio do Corpo de Bombeiros, conforme planta de localização abaixo mostrada e descrito no perfil de resistência de ponta e poro pressão com a profundidade apresentado na figura 40.

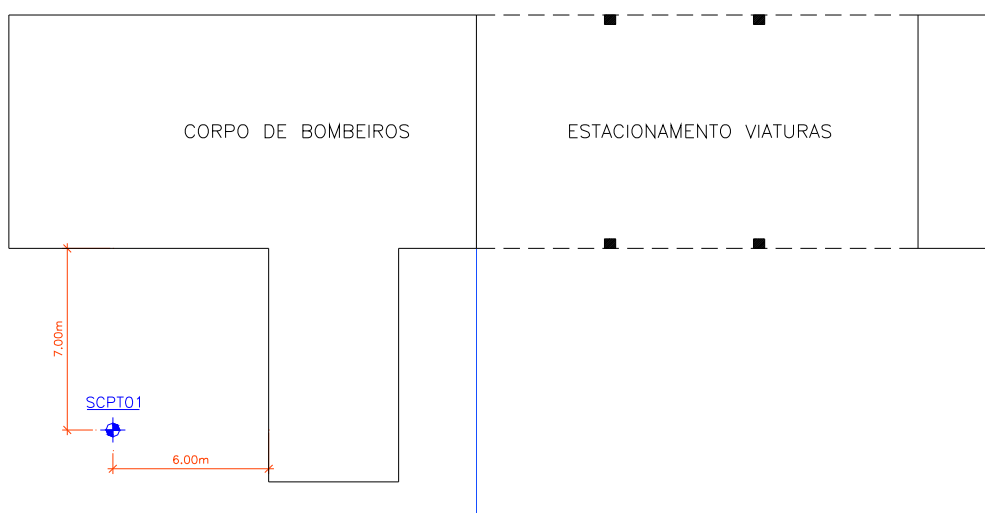


Figura 39: Localização do ensaio de cone sísmico – SCPT01

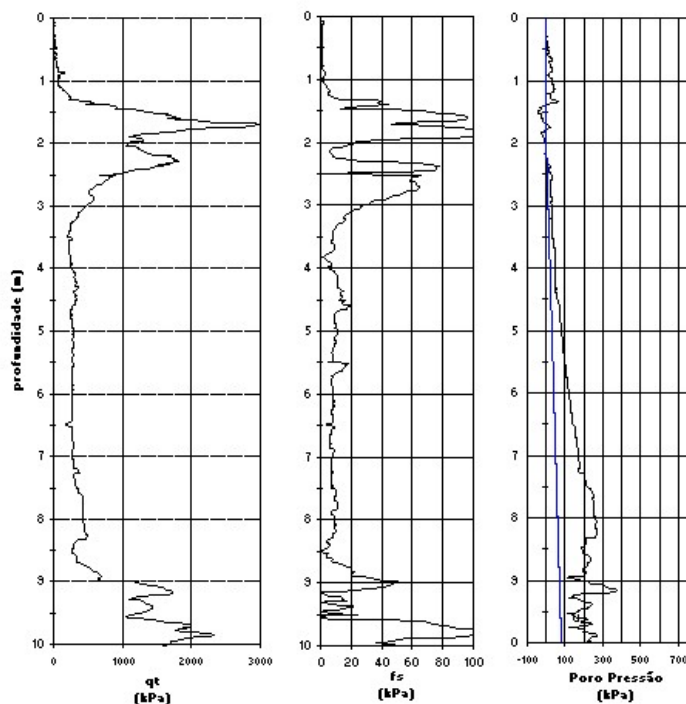


Figura 40: Perfil de variação de resistência de ponta, atrito lateral e poro pressão com a profundidade (Soares, 1997).

O SCPT01 foi realizado até a profundidade de 6,00 m, com intervalos de paralisação da cravação para realização dos ensaios a cada 50 cm, gerando um **total de 32 registros (APENDICE I)**. Foram registrados 2 eventos a cada profundidade, correspondendo à geração, obtenção, análise e armazenamento do sinal. Apresentam-se a seguir dois registros típicos obtidos neste primeiro ensaio, nas profundidades de 3,00 m e 4,00 m. Na figura 41 são apresentados sinais de variação de voltagem com o tempo para sinais obtidos simultaneamente através das respostas dos dois geofones a um único golpe da marreta, nas profundidades de 3,00 e 4,00 m.

O ensaio de penetração de cone (CPT) foi realizado anteriormente à realização do ensaio de cone sísmico, este último sendo executado no mesmo furo do ensaio CPT.

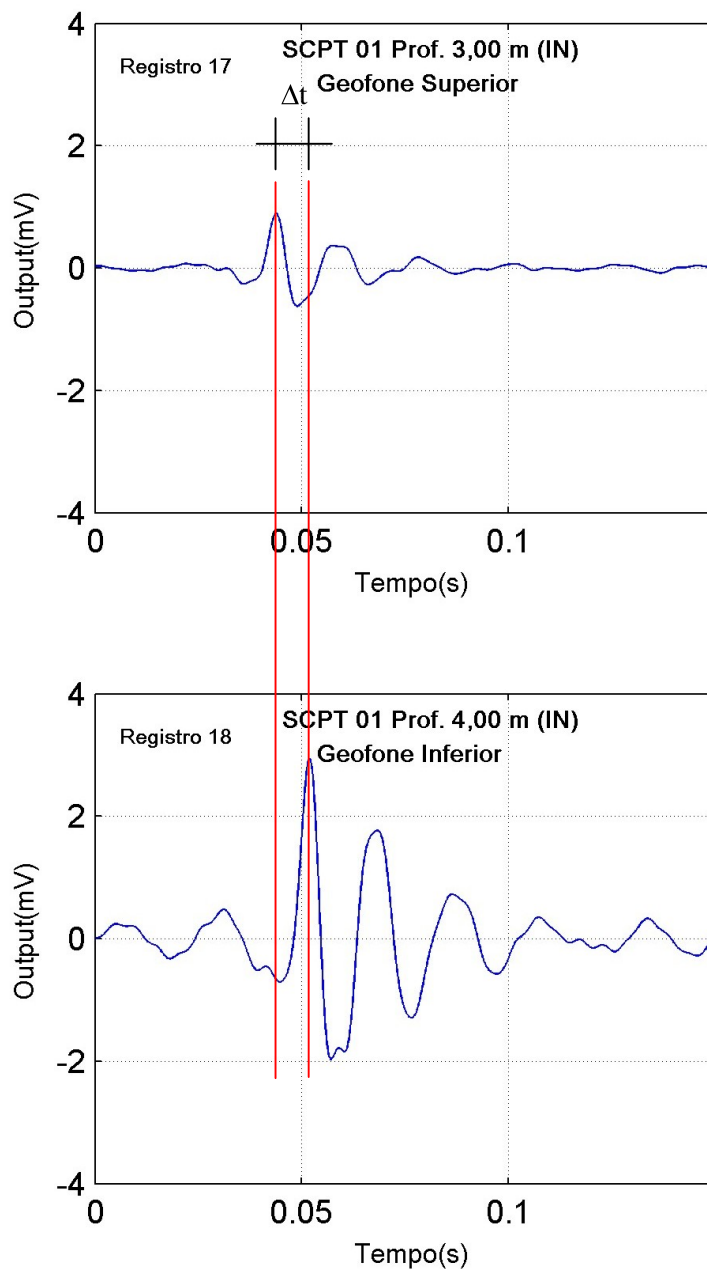


Figura 41: Ensaio SCPT 01 realizado entre as profundidades de 3,00 e 4,00 m com o golpe efetuado de fora para dentro, no sentido do eixo do cone (IN)

Para a determinação do tempo de percurso da onda cisalhante entre o geofone superior e o geofone inferior, foram tomados os dois picos de onda indicados na figura 41. A diferença de leituras (Δt) possibilitou o cálculo da velocidade da onda de cisalhamento entre o geofone superior e inferior (distantes de 1,00 m).

Observa-se nos sinais acima obtidos o momento da chegada da onda de cisalhamento nos geofones. Esse momento é caracterizado pelo aumento significativo da amplitude da onda. Nota-se também a diferença nos tempos de chegada da onda entre o geofone superior e o geofone inferior, o que era esperado, uma vez que desta diferença resulta a velocidade de propagação da onda no solo, no trecho compreendido entre o geofone superior e o geofone inferior.

A amplitude do sinal obtido a 4,00 metros é maior em função de que os geofones possuem taxas de amplificação diferentes.

O segundo ensaio foi realizado junto ao Canteiro de obras da Better, conforme planta de locação abaixo mostrada:

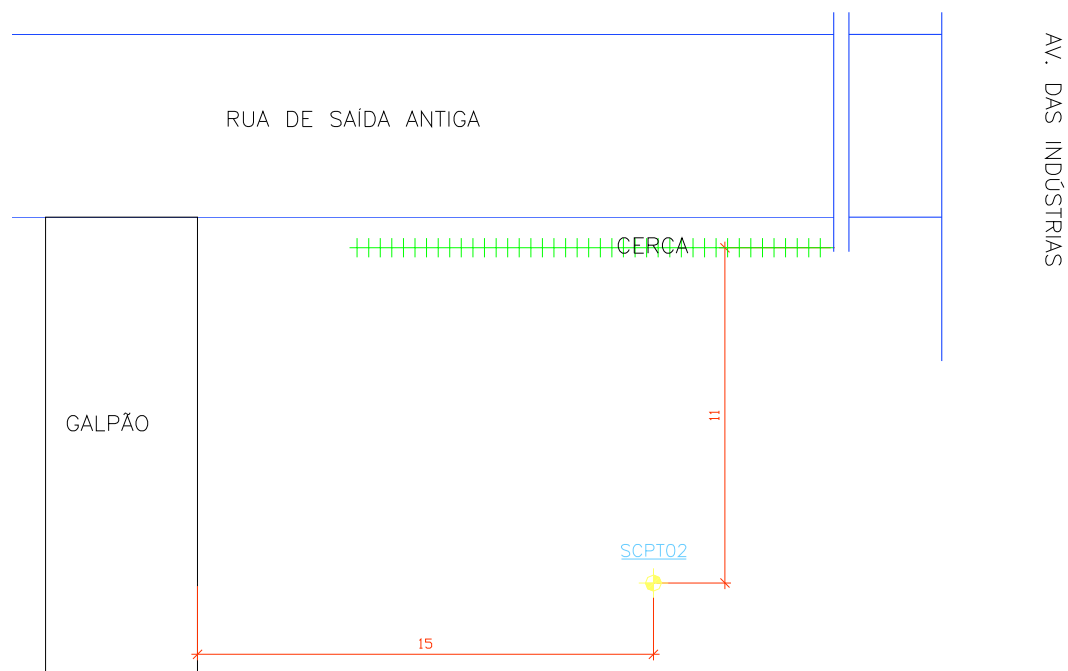


Figura 42: Locação do ensaio de cone sísmico – SCPT02

O SCPT02 foi realizado até a profundidade de 7,15 m, com intervalos de paralisação da cravação para realização dos ensaios a cada 50 cm, gerando um **total de 104 registros (ANEXO 01)**. Foram registrados 4 eventos (geração, obtenção, análise e armazenamento do sinal) a cada profundidade.

Apresentam-se a seguir dois registros obtidos no SCPT 02, nas profundidades de 1,40 m e 2,40 m.

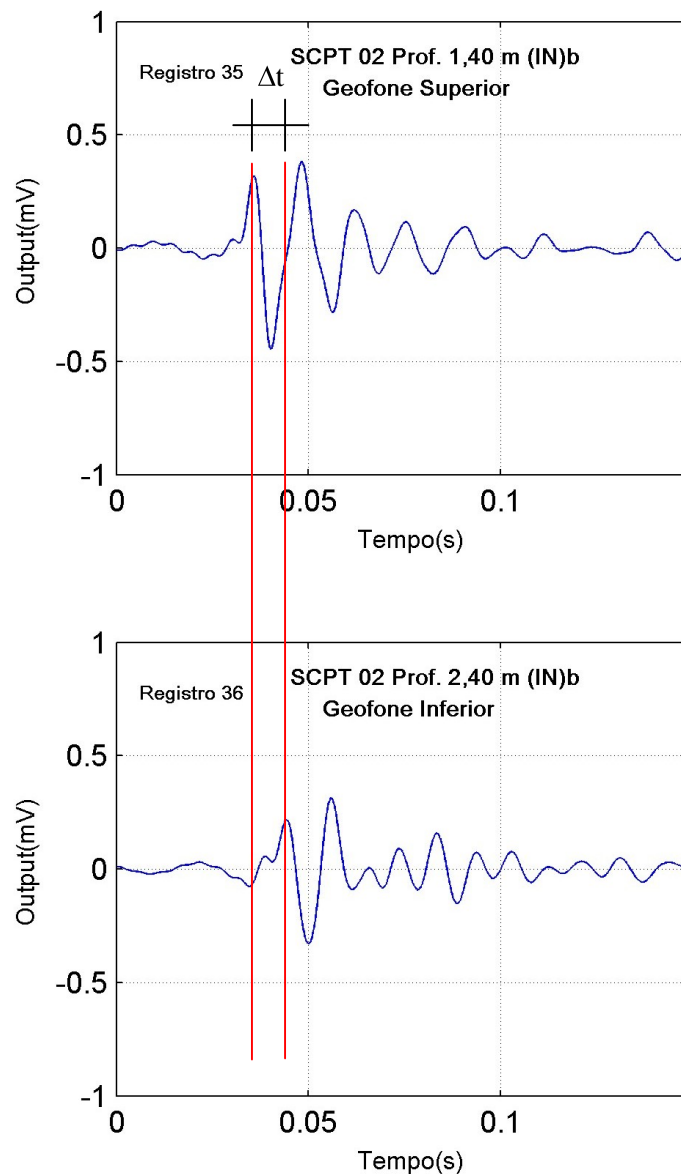


Figura 43: Ensaio SCPT 02 realizado a 1,90 m de profundidade com o golpe efetuado de fora para dentro, no sentido do eixo do cone (IN)

Novamente conforme descrito na figura 41, para a determinação do tempo de percurso da onda cisalhante entre o geofone superior e o geofone inferior, foram tomados dois picos de onda o que permitiu o cálculo da velocidade da onda de cisalhamento entre o geofone superior e inferior.

A interpretação dos sinais é discutida na seqüência deste capítulo. Nem sempre é possível caracterizar com segurança a chegada da onda de cisalhamento, porém é visível a presença dos picos de voltagem que são utilizados para identificar a diferença de tempo de propagação entre os dois geofones.

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os sinais obtidos foram armazenados em formato *.mat*, a fim de possibilitar sua análise com o programa Matlab. Conforme mencionado anteriormente, foram realizados 68 eventos, sendo que cada evento corresponde à geração, recepção e armazenamento da onda cisalhante. Cada evento resultou em dois sinais (dois registros), um correspondente ao Geofone Superior e o outro correspondente ao Geofone Inferior. Foram produzidos então 136 registros durante a campanha experimental, apresentados no Anexo I.

A fim de possibilitar a interpretação dos resultados utilizou-se um programa de filtro de sinais denominador *geofilter*. Frequências em uma oitava abaixo e uma oitava acima da frequência de pico (em torno de 80 Hz) do gráfico do domínio da frequência foram filtradas. Desse modo os sinais gerados puderam ser analisados com maior facilidade devido à remoção dos ruídos indesejáveis.

Os registros foram tomados de dois a dois, Geofone Superior e Geofone Inferior, determinando-se o tempo de chegada da onda cisalhante em cada geofone, t_s (tempo de chegada da onda cisalhante no geofone superior) e t_i (tempo de chegada da onda cisalhante no geofone inferior).

Determinou-se então o tempo de viagem da onda entre o Geofone Superior e o Geofone Inferior:

$$t_{s-i} = t_s - t_i$$

Uma vez que a distância entre os geofones é de 1,00 m, determinou-se a velocidade de propagação da onda entre o geofone superior e o geofone inferior:

$$v_s = \frac{1,00}{t_{s-i}}$$

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos no ensaio realizado junto ao prédio do Corpo de Bombeiros do Aeroporto Internacional Salgado Filho.

Tabela 3: Cálculo da velocidade da onda de cisalhamento SCPT 01

Profundidade (m)		Tempo (s)			Velocidade entre	Velocidade média	Módulo de Cisalhamento Máximo (MPa)
Geofone Superior (GS)	Geofone Inferior (GI)	GS	GI	Tempo entre GS e GI (s)	GS e GI (m/s)	GS e GI (m/s)	
1,00	2,00	0,0455	0,0508	0,0053	188,68	186,93	49,97
		0,0401	0,0455	0,0054	185,19		
1,50	2,50	0,0199	0,0204	0,0005	2000,00	161,29	37,20
		0,0504	0,0566	0,0062	161,29		
2,00	3,00	0,0411	0,0514	0,0103	97,09	112,65	18,15
		0,0499	0,0577	0,0078	128,21		
2,50	3,50	0,0414	0,0499	0,0085	117,65	119,06	20,27
		0,0496	0,0579	0,0083	120,48		
3,00	4,00	0,0439	0,0520	0,0081	123,46	126,66	22,94
		0,0503	0,0580	0,0077	129,87		
3,50	4,50	0,0420	0,0519	0,0099	101,01	105,45	15,90
		0,0500	0,0591	0,0091	109,89		
4,00	5,00	0,0428	0,0529	0,0101	99,01	98,52	13,88
		0,0316	0,0418	0,0102	98,04		
4,50	5,50	0,0360	0,0502	0,0142	70,42	72,52	7,52
		0,0297	0,0431	0,0134	74,63		

Foram realizados dois eventos para cada profundidade ensaiada. No primeiro evento o golpe na placa foi efetuado no sentido do sistema hidráulico de cravação (IN) e no segundo evento a placa foi golpeada no sentido oposto do sistema hidráulico de cravação (OUT).

Os valores de velocidade de onda de cisalhamento obtidos foram muito próximos para os dois registros na mesma profundidade. Ocorreu desvio significativo nas profundidades de 1,50 a 2,50 m, sendo determinada uma velocidade de 2000 m/s, caracterizando um erro no ensaio ou a possível refração da onda pelas hastes do cone. Também houve dispersão de valores da velocidade da onda de cisalhamento nas profundidades de 2,00 a 3,00 m, podendo esta ser atribuída a erros do próprio processo do ensaio (fonte de ondas, precisão do equipamento, interpretação de sinais, etc).

Vários sinais foram medidos mas não foram armazenados. Tampouco houve padronização dos ensaios (ou do golpe); o objetivo foi proceder aos golpes e os registros, armazenando resultados típicos representativos de cada profundidade.

A Figura 44 apresenta o perfil de velocidade de onda cisalhante ao longo da profundidade:

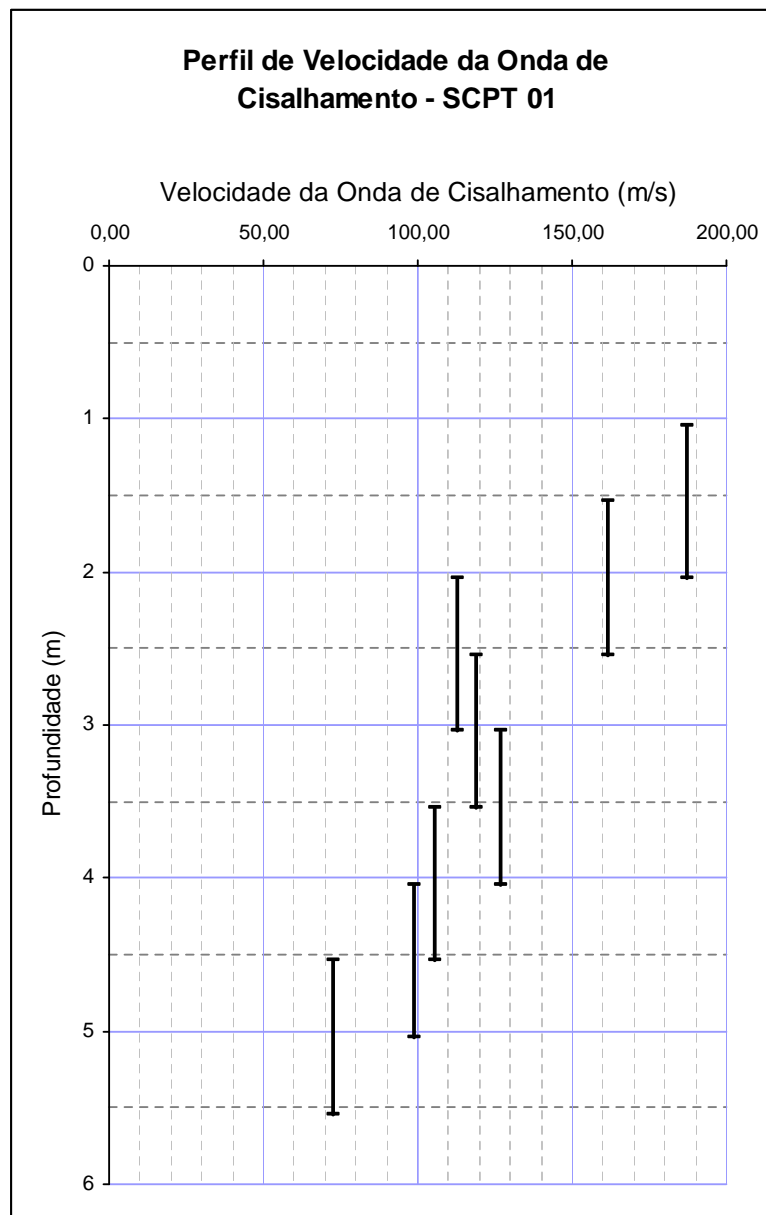


Figura 44: Perfil de velocidade da onda cisalhante – SCPT01

Observa-se um decréscimo nos valores das velocidades de onda cisalhante ao longo da profundidade, comportamento típico para o perfil estratigráfico da área do Aeroporto Internacional Salgado Filho (Soares, 1997; Hebmuller, 1999)

Os valores do módulo de cisalhamento máximo são calculados pela seguinte expressão:

$$G = \rho \times V_s^2$$

Admitiu-se que o peso específico do solo do Aeroporto Internacional Salgado Filho tem um valor médio de $14,3 \text{ KN/m}^3$, a fim de possibilitar a comparação dos resultados com pesquisas anteriormente desenvolvidas no mesmo local (Hebmuller, 1999). Os valores do Módulo de Cisalhamento Máximo calculados são diretamente proporcionais ao quadrado da velocidade de propagação das ondas S.

O perfil seguinte mostra os valores obtidos para o módulo de cisalhamento máximo para o ensaio SCPT01:

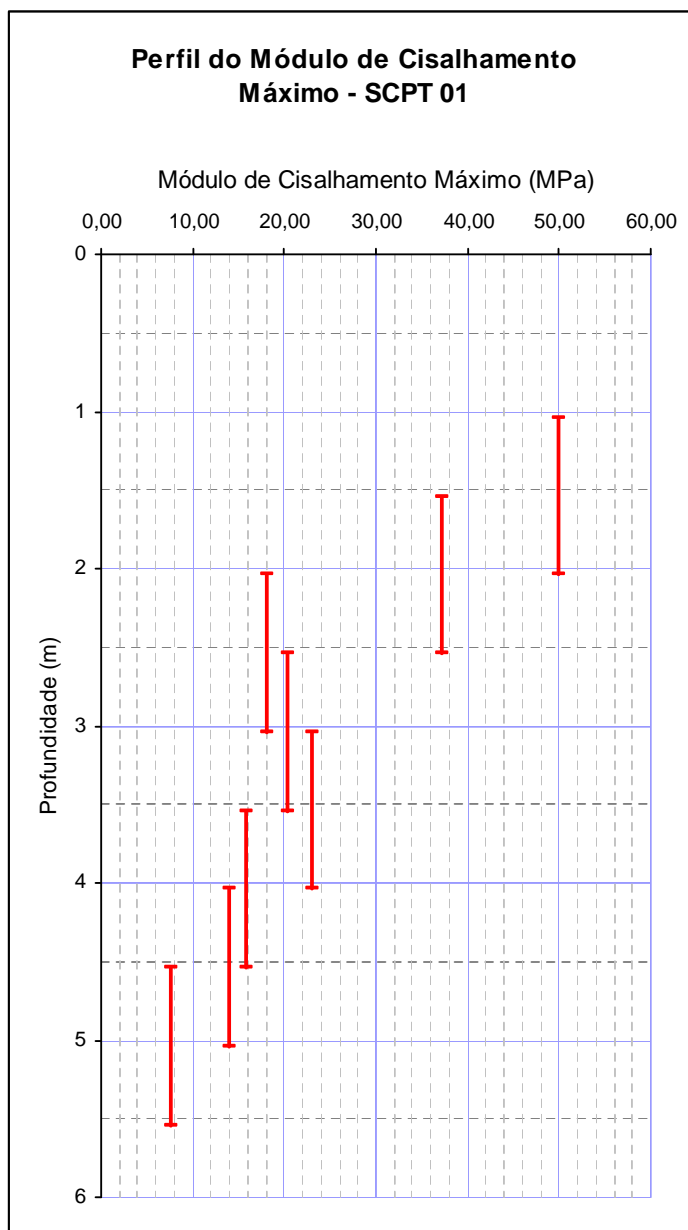


Figura 45: Perfil do Módulo de Cisalhamento Máximo – SCPT 01

Os valores de G_o obtidos no ensaio SCPT 01 variam de 49,97 a 7,52 MPa, para profundidades de 1,00 m a 5,50 m, respectivamente.

A Figura 46 apresenta os perfis obtidos com ensaios de penetração de cone comparados aos resultados obtidos com os ensaios de cone sísmico SCPT 01 desta dissertação.

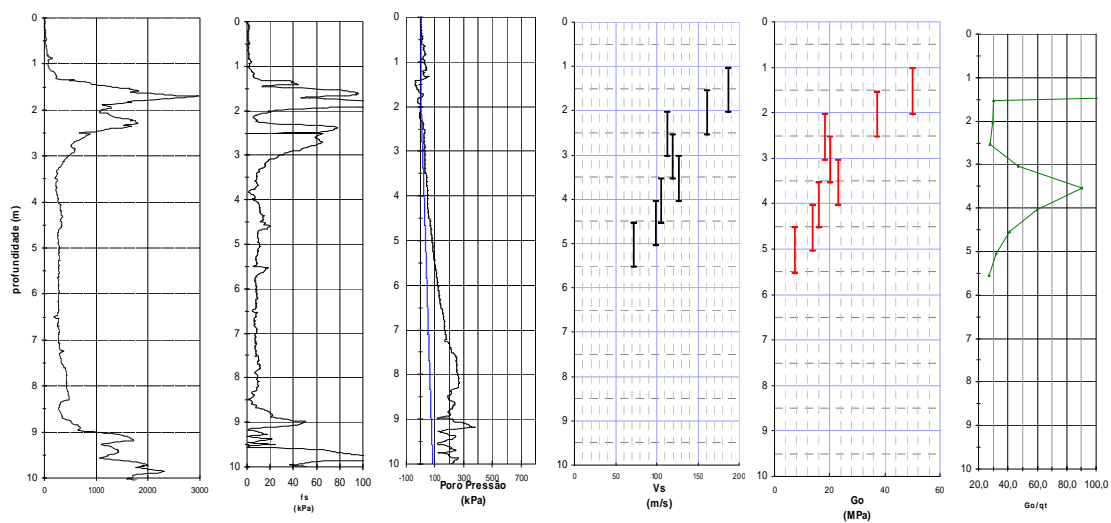


Figura 46: Resultados do ensaio SCPT 01 da área do AISF.

Observa-se na figura 46 o comportamento geral das propriedades do solo da região estudada. É visível a presença de camada pré-adensada na superfície, depósito argiloso em profundidades acima de 3 m até 8 m e em seguida camadas de areia compacta.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos no ensaio realizado junto ao canteiro de obras da Better (solo em adensamento).

Tabela 04: Cálculo da velocidade da onda de cisalhamento SCPT 02

Profundidade (m)		Tempo (s)		Tempo entre GS e GI	Velocidade entre GS e GI	Velocidade média entre GS e GI	Módulo de Cisalhamento Máximo (MPa)
Geofone Superior (GS)	Geofone Inferior (GI)	GS	GI				
1,40	2,40	0,0359	0,0392	0,0033	303,0303	243,7314	84,95
		0,0398	0,0498	0,0100	100,0000		
		0,0416	0,0450	0,0034	294,1176		
		0,0420	0,0456	0,0036	277,7778		
1,90	2,90	0,0391	0,0499	0,0108	92,5926	93,4988	12,50
		0,0389	0,0499	0,0110	90,9091		
		0,0324	0,0428	0,0104	96,1538		
		0,0323	0,0429	0,0106	94,3396		
2,40	3,40	0,0336	0,05	0,0164	60,9756	60,4541	5,23
		0,0202	0,0355	0,0153	65,3595		
		0,0274	0,0414	0,0140	71,4286		
		0,0275	0,0502	0,0227	44,0529		
2,90	3,90	0,0322	0,0499	0,0177	56,4972	54,8361	4,30
		0,0323	0,051	0,0187	53,4759		
		0,0326	0,0504	0,0178	56,1798		
		0,0314	0,0502	0,0188	53,1915		
3,40	4,40	0,0312	0,0511	0,0199	50,2513	52,1730	3,89
		0,0308	0,0505	0,0197	50,7614		
		0,0219	0,0412	0,0193	51,8135		
		0,0328	0,0507	0,0179	55,8659		
3,90	4,90	0,0356	0,0226	0,0130	76,9231	115,5711	19,10
		0,0365	0,0240	0,0125	80,0000		
		0,0263	0,0198	0,0065	153,8462		
		0,0264	0,0198	0,0066	151,5152		
4,40	5,40	0,0408	0,0188	0,0220	45,4545	44,8634	2,88
		0,0530	0,0301	0,0229	43,6681		
		0,0498	0,0281	0,0217	46,0829		
		0,0504	0,0278	0,0226	44,2478		
4,90	5,90	0,0498	0,0294	0,0204	49,0196	47,8068	3,27
		0,0497	0,0289	0,0208	48,0769		
		0,0504	0,0289	0,0215	46,5116		
		0,0503	0,0293	0,0210	47,6190		
5,40	6,40	0,0497	0,0270	0,0227	44,0529	44,7612	2,87
		0,0390	0,0174	0,0216	46,2963		
		0,0611	0,0387	0,0224	44,6429		
		0,0614	0,0387	0,0227	44,0529		
5,90	6,90	0,0498	0,0318	0,0180	55,5556	53,8109	4,14
		0,0418	0,0227	0,0191	52,3560		
		0,0597	0,0416	0,0181	55,2486		
		0,0501	0,0309	0,0192	52,0833		
6,40	7,40	0,0418	0,0290	0,0128	78,1250	79,4322	9,02
		0,0499	0,0368	0,0131	76,3359		
		0,0499	0,0376	0,0123	81,3008		
		0,0501	0,0379	0,0122	81,9672		
6,90	7,90	0,0411	0,0335	0,0076	131,5789	137,1822	26,91
		0,0415	0,0340	0,0075	133,3333		
		0,0476	0,0404	0,0072	138,8889		
		0,0501	0,0432	0,0069	144,9275		
7,15	8,15	0,0401	0,0337	0,0064	156,2500	147,9605	31,31
		0,0393	0,0328	0,0065	153,8462		
		0,0538	0,0468	0,0070	142,8571		
		0,0528	0,0456	0,0072	138,8889		

No ensaio SCPT 02, foram realizados 4 eventos para cada profundidade ensaiada. Em dois eventos o golpe na placa foi efetuado na direção (IN) do sistema hidráulico de cravação e os

outros dois eventos a placa foi golpeada no sentido externo (OUT) do sistema hidráulico de cravação. Os valores das velocidades da onda de cisalhamento variam de 243,73 m/s (a 1,40 m) passando por 44,86 m/s (a 4,40 m) chegando a 147,96 m/s (a 8,15 m).

A figura 47 apresenta o perfil de velocidade de onda cisalhante ao longo da profundidade para o ensaio SCPT02:

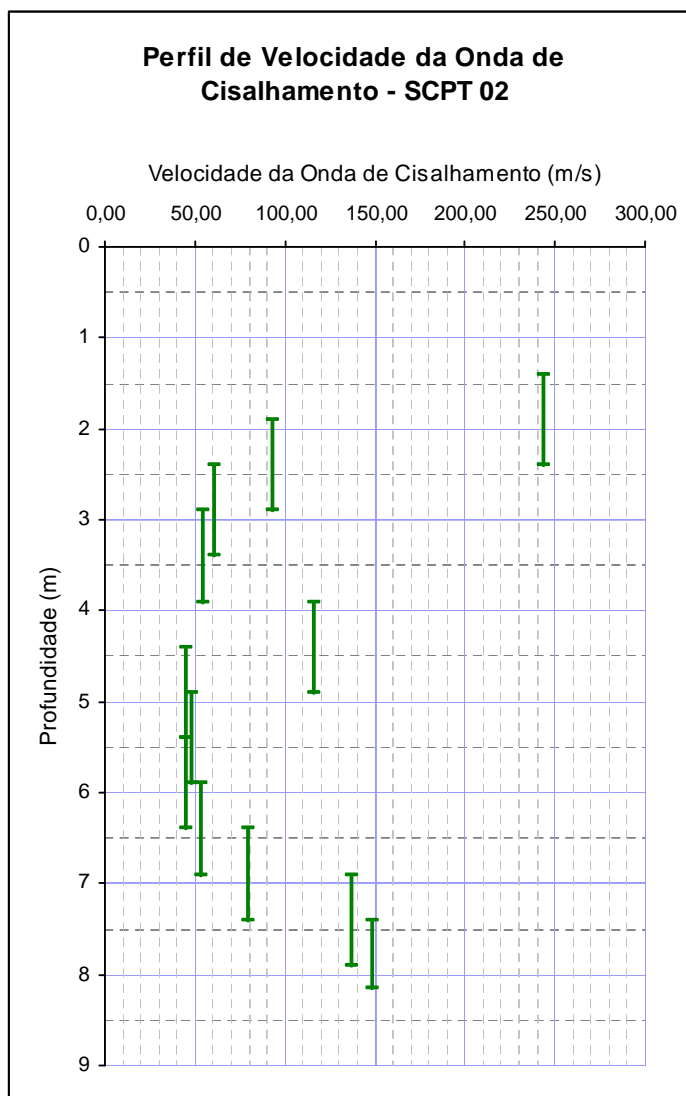


Figura 47: Perfil de velocidade da onda cisalhante para o ensaio SCPT02

O perfil obtido é característico da região do Aeroporto Internacional Salgado Filho. Observa-se novamente a presença de uma camada pré-adensada na superfície do terreno, o depósito de

argilas moles abaixo dos 2,5 metros, sobrejacente a uma camada mais resistente abaixo dos 8 metros.

O comportamento do módulo de cisalhamento ao longo da profundidade é apresentado na figura 48:

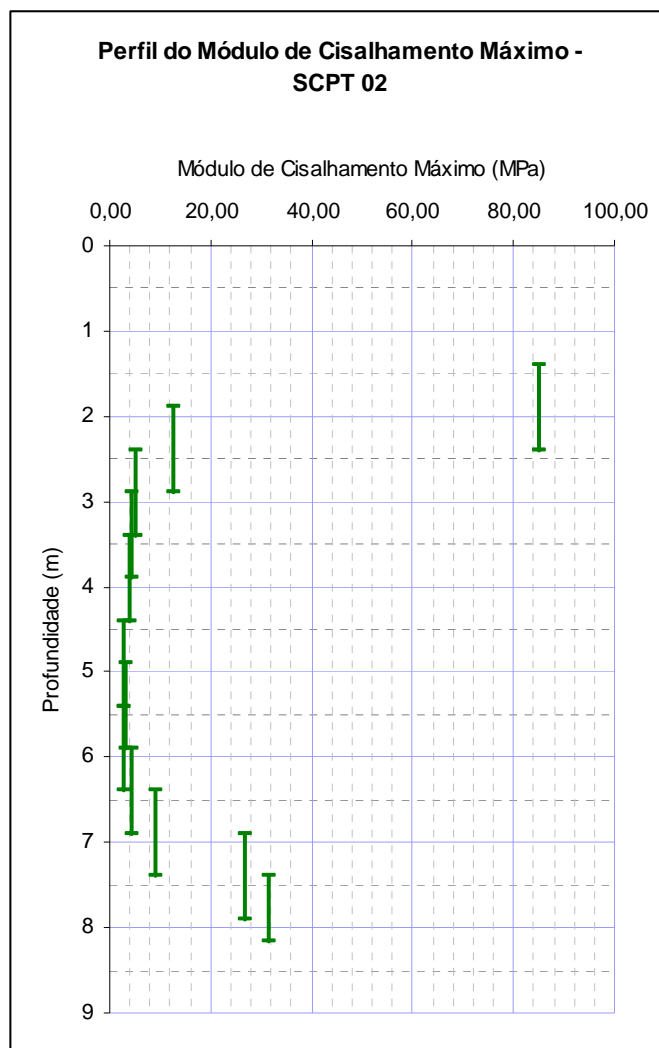


Figura 48: Perfil do Módulo de Cisalhamento Máximo – SCPT02

Os valores do Módulo de Cisalhamento variam de forma semelhante à descrita para as velocidades: valores altos próximos à superfície, valores baixos em profundidades de 2,50 m a 7,50 m e valores crescentes em profundidades maiores que 7,50 m.

A Figura 49 apresenta os perfis obtidos com ensaios de penetração de cone comparados aos resultados obtidos com os ensaios de cone sísmico SCPT 02 desta dissertação.

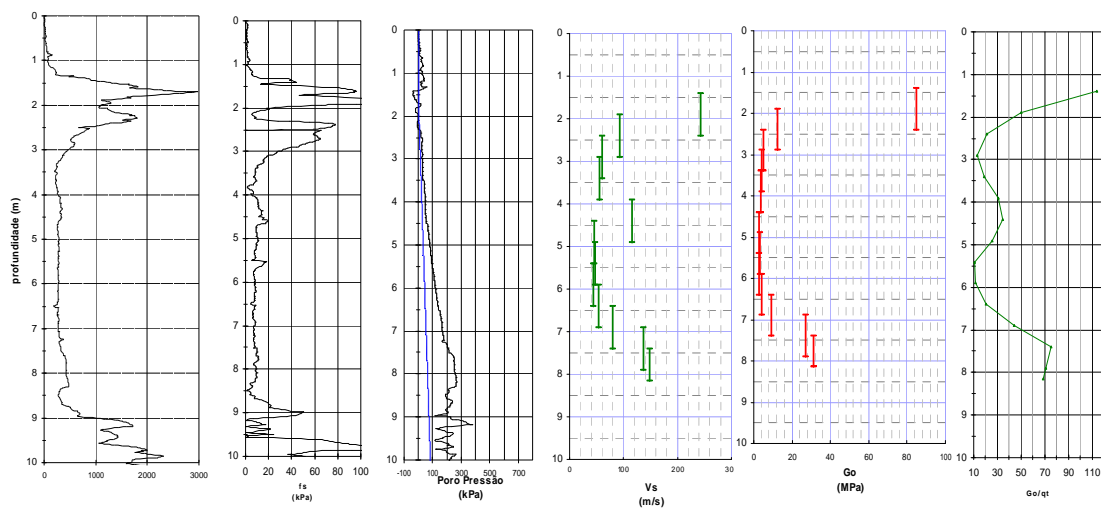


Figura 49: Resultados do ensaio SCPT 02 da área do AISF.

O padrão de comportamento da região do AISF novamente se repete para o ensaio SCPT 02, indicando a coerência dos resultados obtidos pelo cone sísmico da UFRGS.

Os dois ensaios sísmicos apresentam valores de V_s (ou G_o) distintos, sendo a diferença atribuída ao estado de tensões *in situ*. O ensaio SCPT01 foi realizado na área adjacente ao Corpo de Bombeiros, que possui uma camada de aterro de aproximadamente 3 m colocada no local há aproximadamente 2 anos (anteriores a realização dos ensaio). O segundo ensaio foi realizado junto ao antigo Canteiro de Obras da Beter Engenharia, que apresenta uma camada de aterro antiga de espessura aproximada de 2 metros. A diferença de altura de aterro entre os dois locais sugere que na área do Corpo de Bombeiros a argila encontra-se adensada, com um índice de vazios inferior local do segundo ensaio. Isto equivale a um nível de tensões efetivas maior na área do Corpo de Bombeiros e portanto valores de G_o também superiores.

As figuras 50 e 51 apresentam os perfis de velocidade da onda cisalhante V_s e módulo de cisalhamento máximo G_o ao longo da profundidade obtidos por Hebmuller (1999), juntamente com os dados obtidos nesta dissertação. Observa-se que os perfis de cone sísmico obtidos nesta dissertação obedecem ao mesmo padrão de comportamento dos resultados obtidos por Hebmuller, com valores altos de V_s e G_o próximos à superfície e valores decrescentes ao longo da profundidade até aproximadamente 3,0 metros de profundidade.

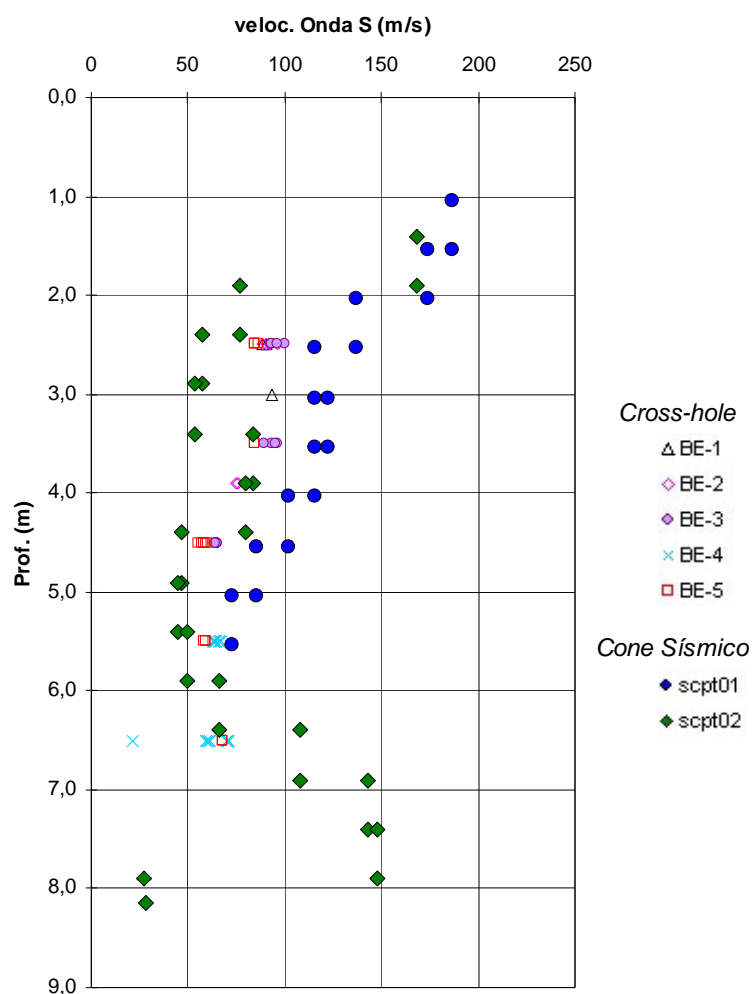


Figura 50: Velocidade da onda S versus profundidade

As seqüências BE-1 a BE-5 representam os resultados de ensaios sísmicos *cross-hole* realizados por Hebmuller (1999) e as seqüências SCPT01 e SCPT02 representam os resultados dos ensaios de cone sísmico. Observa-se dispersão dos resultados até profundidades de 3,0 a 4,0 metros. Após os 4,0 metros ocorre convergência dos resultados. Os principais fatores geradores desta dispersão são: (a) Diferença de grau de adensamento (OCR) para a camada pré-adensada superficial, uma vez que o ensaio SCPT 02 foi realizado dentro de um antigo canteiro de obras, sujeito a cargas constantes de veículos pesados, enquanto que o SCPT 01 foi realizado em um jardim junto ao corpo de bombeiros (SCI) distante de movimento de veículos pesados e (b) Comportamento anisotrópico elevado próximo à superfície, uma vez que, nos ensaios realizados por Hebmuller (1999) a trajetória da onda de cisalhamento é horizontal, enquanto que nos ensaios de cone sísmico a trajetória é vertical.

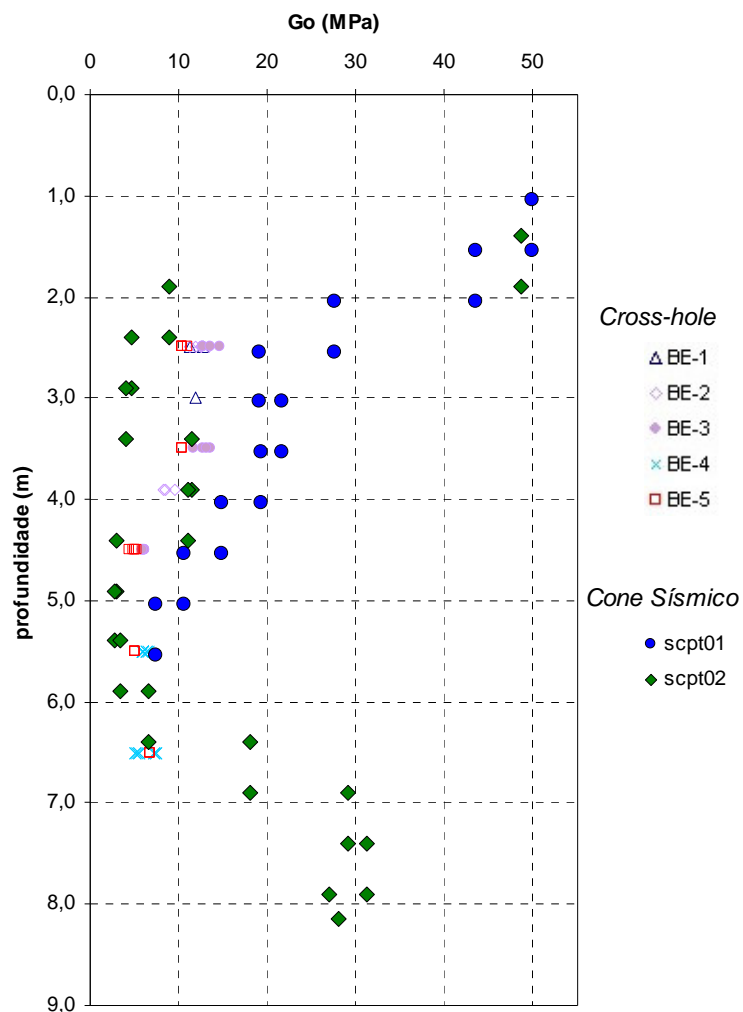


Figura 51: Resultados de G_0 versus profundidade

Os resultados apresentados nas Figuras 50 e 51 sugerem uma ligeira variação entre as medidas de resistência obtidas através do ensaio sísmico SCPT02 e os ensaios *cross-hole*. Esta variação seria, em princípio, atribuída à anisotropia da argila, devendo esta ser investigada através de uma campanha de ensaios mais expensiva.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A campanha experimental e a interpretação dos resultados permitem estabelecer algumas conclusões, relatadas neste capítulo:

Este estudo iniciou pelo projeto e desenvolvimento de um cone sísmico, tecnologia conhecida internacionalmente, mas ainda não dominada no Brasil. Esta é, ao conhecimento do autor, o primeiro protótipo inteiramente desenvolvido com tecnologia nacional. Todos os componentes do cone sísmico foram desenvolvidos na UFRGS: módulo sísmico, trigger, caixa de comando, amplificadores e programa de aquisição de sinais.

Alguns aspectos importantes são a seguir descritos:

(A) Quanto ao desempenho de equipamento desenvolvido

1. É fundamental a utilização de materiais de qualidade a fim de obter resultados confiáveis, por exemplo a utilização cabos blindados para a aquisição dos sinais, para minimizar o ruído. O acondicionamento dos geofones deve garantir contato adequado entre os geofones e as hastes. Esse fator produz sinais de melhor qualidade, uma vez que maior quantidade de energia produzida pela onda de cisalhamento é transmitida ao geofone.
2. O eixo do geofone superior deve ser alinhado com o eixo do geofone inferior, a fim de garantir a qualidade dos sinais. A orientação dos geofones influencia significativamente a qualidade dos sinais obtidos. É fundamental manter a orientação dos geofones de acordo com a orientação da placa de geração da onda cisalhante, uma vez que o movimento principal das partículas de solo quando da geração da onda é na direção da orientação da placa. Além disso, a sensibilidade do geofone uniaxial é maior na direção do seu eixo central, diminuindo progressivamente com o desalinhamento do seu eixo em relação à orientação da placa de geração da onda.
3. O sistema de geração da onda – placa de aço e marreta metálica – mostrou-se adequado. A eficiência do sistema foi obtida pela aplicação da carga do sistema hidráulico de cravação na placa de aço, garantindo contato adequado com o solo; Entretanto salienta-se a falta de padronização de procedimento, inclusive a nível internacional, seguindo-se um procedimento seletivo de golpes em campo e avaliação qualitativa dos resultados.

4. O canal trigger apresentou dificuldades na aquisição do sinal do contato pois o tempo de resposta do sistema é inferior ao tempo de contato da marreta com a placa. Testes de laboratório validaram o trigger, porém, nas condições de campo – com a oxidação da marreta e da placa, e a acumulação de solo e outros materiais no contato marreta placa de aço – não foram obtidos os sinais esperados. Recomenda-se a limpeza (esmerilhamento) da marreta e da placa, bem como cuidados intensivos a fim de evitar o depósito de solo no contato metálico das partes citadas. Justamente pelas incertezas associadas ao trigger, a prática internacional tem sido de recomendação de uso de 2 geofones, conforme adotado na presente pesquisa.

5. Em função do pouco espaço disponível enfrentou-se dificuldade operacional quando da execução do golpe da marreta no sentido da reversão de polaridade. É portanto necessário prever espaço para uma pessoa efetuar os golpes do martelo sem obstaculização do movimento.

6. O programa de aquisição de sinais mostrou-se adequado ao ensaio. O programa utilizado (Matlab) permite a fácil manipulação e gerenciamento dos dados obtidos. O programa possui ferramentas de precisão que permitem a exata identificação dos picos de sinais obtidos.

(B) Quanto ao comportamento dos solos estudados

1. Houve boa concordância dos resultados de cone sísmico com resultados de ensaios *cross-hole* previamente executados no local (Hebmuller, 1999), o que sugere que: o cone sísmico (UFRGS) produz resultados compatíveis com os ensaios de *down-hole*, nas condições geotécnicas do AISF. Esta técnica possibilita, de forma rápida e econômica, a determinação do módulo cisalhante, complementando as informações quanto à resistência ao cisalhamento dos solos classicamente obtida através do ensaio de piezocone.

(C) Sugestões para pesquisas:

1. Produzir desenvolvimentos no equipamento: adicionar sensores para captação de ondas P, criar trigger com maior eficiência, padronizar energia dos golpes na placa e padronizar número de eventos para cada profundidade.

2. Gerar maior número de dados através da realização de ensaios e realizar ensaios em solos residuais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKI, K., e Richards, P. G. Quantitative Seismology: Theory and Methods, W. H. Freeman and Co., Vol. I. 1980;

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS D 4428/D 4428 M – 91 (Reapproved 1995). Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing. Annual Book of ASTM Standarts, 1991;

ASCE Press. Geophysical Exploration for engineering and environmental investigations. Adapted from de US Army Corps of Engineers, No. 23, Technical engineering and design guides, 204 p. 1998;

BURLAND, J.P. “Small is Beautiful: the stiffness of soils at small strains.” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 26, No. 4, pp. 499-516, 1989;

BURNS, S. E. e Mayne, P. W. “Interpretation of Seismic Piezocone Results For the Estimation of Hydraulic Conductivity in Clays”. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 25, No. 3, 8 pag. Setembro, 2002;

BUTCHER, A. P. e POWELL, J. J. M. “Practical Considerations for field geophysical techniques used to assess ground stiffness”. *Advances in site investigation practice*. Proceedings of the international conference held in London on 30-31 March 1995. Thomas Telford, London, 1996;

CAMPANELLA, R. G., Robertson, P. K., GILLESPIE, D. “Seismic cone penetration test in the near offshore of the Mackenzie Delta”. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 24, pp. 791-803. 1986;

CLAYTON, C. R. I. e HEYMANN, C. 2001. “The stiffness of geomaterials at very small strains. *Géotechnique*, 51 (3): 245-256.

GONZALEZ, A. E. R. “O uso de Métodos Sísmicos e Não-Destrutivos Aplicados à Geotecnia”. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – PPGEC. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997;

HARDIN, B. O. e BLACK, W. L. “Vibration Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 94, No. SM2, Março, 1968;

HARDIN, B. O. e DRNEVICH, V. P., “Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers.* , Vol. 98, Nº. SM6, Junho, 1972;

HARDIN, B. O. e DRNEVICH, V. P., “Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers.* , Vol. 98, Nº. SM7, Julho, 1972;

HEBMULLER, A. L. “Desenvolvimento e Aplicação de um Equipamento para a Realização de Ensaios Sísmicos Crosshole no Aeroporto Internacional Salgado Filho”. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – PPGEC. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999;

HIGHT, D. W. e HIGGINS, K. G. “An approach to the prediction of ground movements in engineering practice: background and application”. Keynote Lecture. Int. Symp. on Pre-Failure Deformation Characteristics of Geomaterial, IS-Hokkaido, Vol 2, 909-945, 1994;

HOADLEY, P. J. “Measurement of Dynamic Soil Properties”. *Alalysis and Design of Foundations for Vibrations*, P. J. Moore, 1985;

HOAR, R. J., STOKOE, K. H., II. Generation and measurement of shear waves in situ. *Dynamic Geotechnical Testing*. ASTM STP 654, American Society for Testing and Materials, p. 3-29, 1978;

IRTP / ISSMFE. "Standard Penetration Test (SPT): Internacional Reference Test Procedure", in: Proc. 1st European Symp. On Penetration Testing (ESOPT 1), Vol 1 3-26, 1998;

JACOBS, P. A. e BUTCHER, A. P. "The development of seismic cone penetration test and its use in geotechnical engineering". *Advances in site investigation practice*. Proceedings of the international conference held in London on 30-31 March 1995. Thomas Telford, London, 1996;

JADI, H. e RONALDO, L. "Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods". *Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure*. St. Louis, MO, December 2000;

JAMIOLKOWSKI, M., LANCELLOTTA, R., and LO PRESTI, D. (Eds.), *Pre Failure Deformation Characteristics of Geomaterials*. Vols. 1 e 2, A.A. Balkema Publishers, Tokyo, 2001;

JARDINE, R. J. "One Perspective of the Pre-Failure Deformations Characteristics of Some Geomaterials". In: *International Symposium on Pre-Failure Deformations Characteristics of Geomaterials* Sapporo, p151-182, 1994;

JARDINE, R. J. "Observations on the kinematic nature of soil stiffness at small strains". *Soils and Foundations*, Vol. 32, No 2, pp 111-124, 1992;

JARDINE, R. J., POTTS, D. M., ST. JOHN H. D. and HIGHT, D. W. "Some applications of a non-linear ground model". Proc. 10th ECSMFE, Florence, Vol.1, pp 23-228, 1991;

LAMBE, T. W., WHITMAN, R.V. "Soil Mechanics". New York: John Wiley. 553p. 1969;

MENZIES, B. "Near-surface site characterisation by ground stiffness profiling using surface wave geophysics". Chairman & Director, GDS Instruments Ltd, U.K. <Disponível em: www.gdsinstruments.com>. Acesso em 20.08.2003.

NRC. Seeing into the earth. Committee for Noninvasive Characterization of the Shallow Subsurface for Environmental and Engineering Applications, P. R. Roming, Chair. 129 p. 2000;

RICHARD, F. E., Jr., Hall, J. R. and Woods, R. D. Vibrations of Soils and Foundations. *Englewood Cliffs*, New Jersey, Prentice Hall, 414p, 1970;

ROBERTSON, P.K., CAMPANELLA, R.G., GILLISPIE, D. e RICE, A. "Seismic CPT to measure in situ shear wave velocity". *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 22, No. 8, Agosto, 1986;

SANTAMARINA, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. Soils and Waves. John Wiley & Sons, Ltd., Rexdale, Ontario, Canada, 488 p. 2001;

SCHNAID, F.; LEHANE, B.M. e FAHEY, M. "In situ test characterisation of unusual geomaterials". *2nd Int. Conf. On Site Characterisation*, Milpress, Porto, 1: 49-74, 2004;

SCHNAID, F., Nacci, D. e Milititsky, J. "Aeroporto Internacional Salgado Filho: Infraestrutura Civil e Geotécnica". Porto Alegre: Editora Sagra Luzzatto, 2001;

SCHNAID, F., SOARES, J. M. D., MANTARAS, F. M.. "Ensaio de campo: Técnica insubstituível à engenharia geotécnica." In: Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul – *GEOSUL '2000*. Anais...v1, p. 63-67. Porto Alegre, 2000;

SERRIDGE, M. e Licht, R. T. "Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers". *Theory and Application Handbook*. Brüel & Kjaer, 1987;

SHARMA, P. V. Environmental and Engineering Geophysics, *Cambridge University Press*, Cambridge, U. K. 475 pp. 1997;

SHIBUYA, S., MITACHI, T. FUKUDA, F. e HOSOMI, A. "Modelling of strain-rate dependent deformation of clay at small strains. *Proc. 12th Int. Conf. On Soil Mech. And Geotech. Engng.*, Hamburg, Vol. 1: 409-412;

SOARES, J. M. D. "Estudo do comportamento geotécnico do depósito de argila mole da grande Porto Alegre. Tese (Doutorado), 300 p. CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 1997;

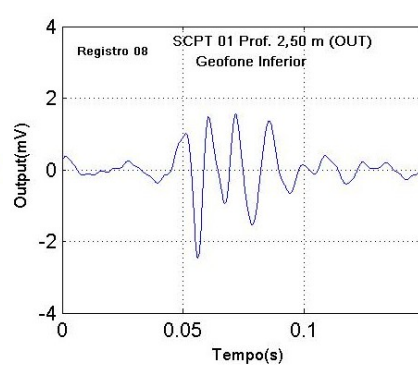
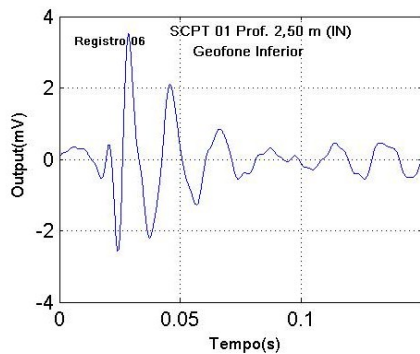
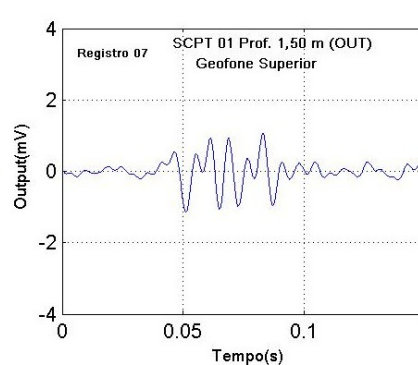
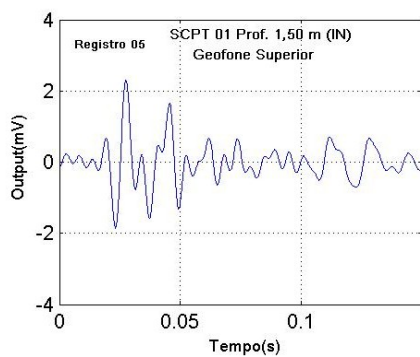
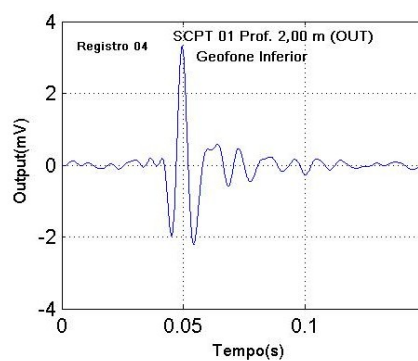
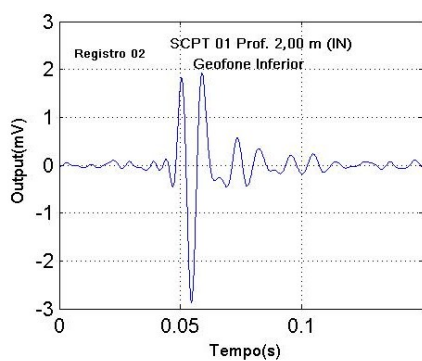
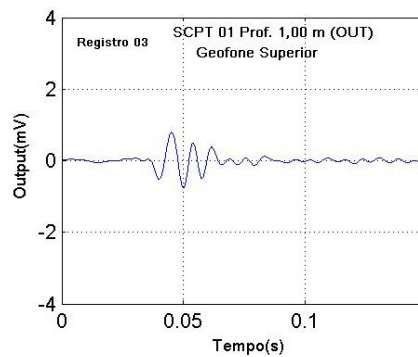
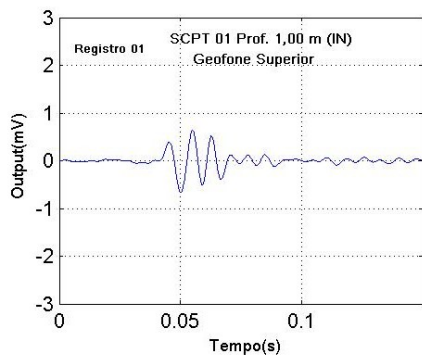
STOKOE, K. H., II, ROSENBLAD, B. L., WONG, I. G., BAY, J. A., THOMAS, P.A., e SILVA, W. J., "Deep V_s profiling along the top of Yucca Mountain using a vibroseis source and surface waves." 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B. C., Canada (accepted for publication), 2004.

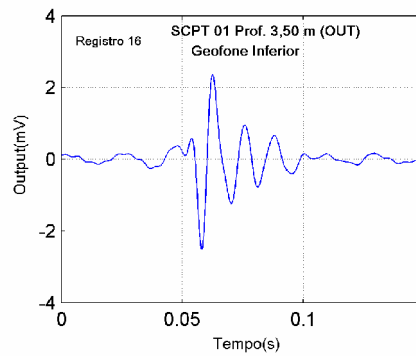
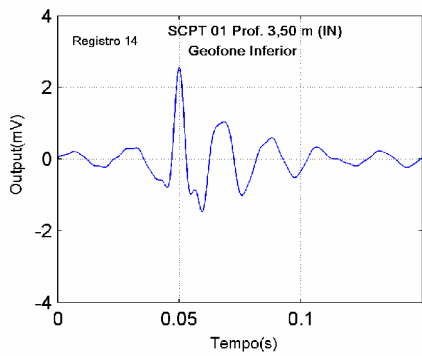
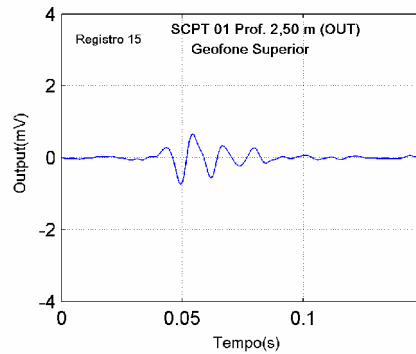
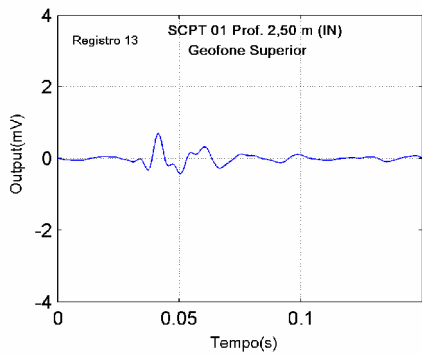
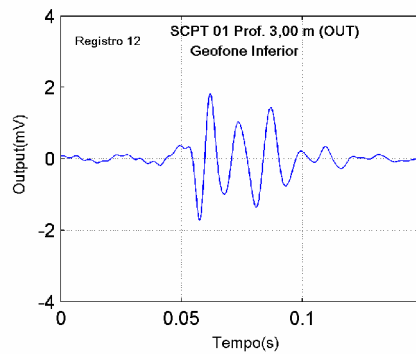
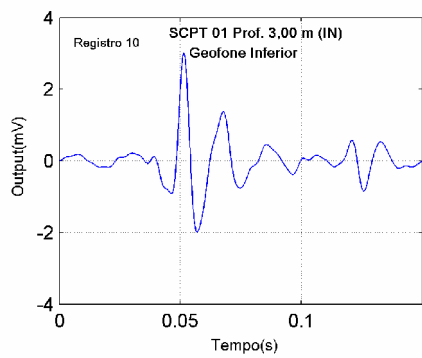
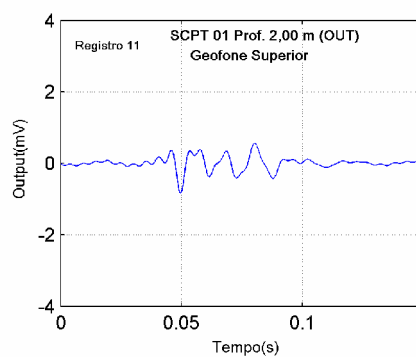
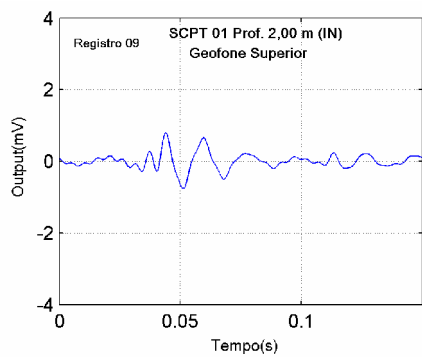
TATSUOKA, F.; JARDINE, R. J.; LO PRESTI, D.; DI BENEDETTO, H.; KODAKA, T. "Theme Lecture: Characterising the pré-failure deformation properties of geomaterials". 14th *Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng*, Hamburg, 4; 2129-2164, 1997;

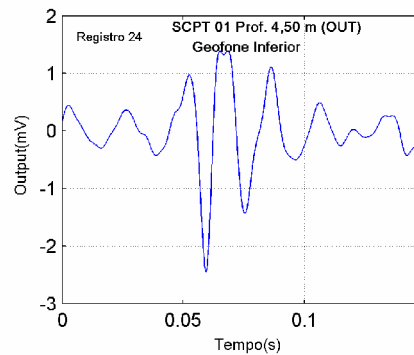
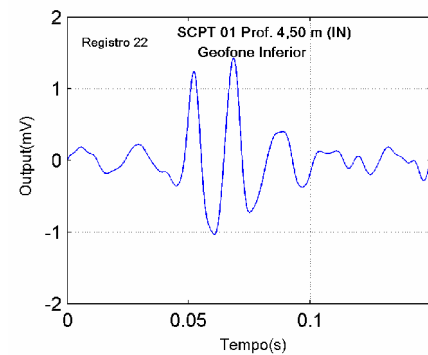
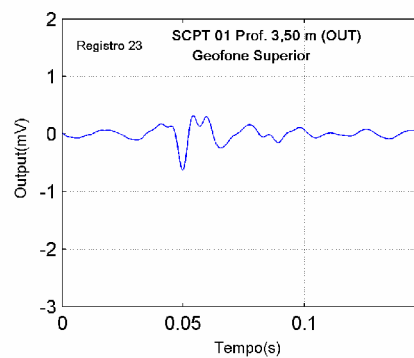
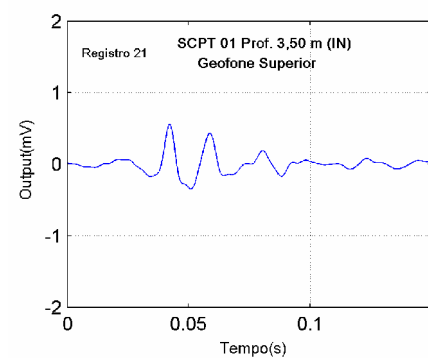
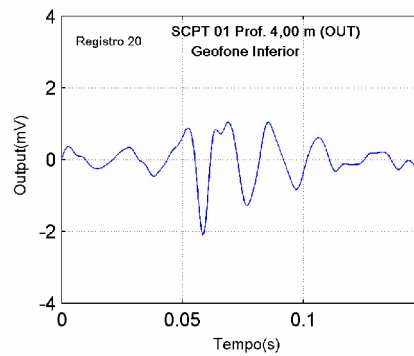
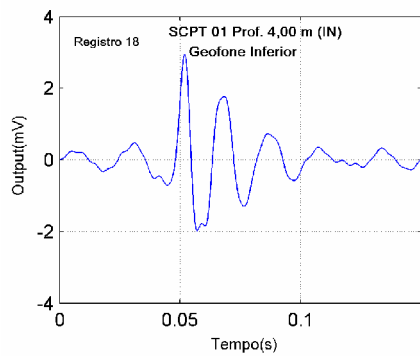
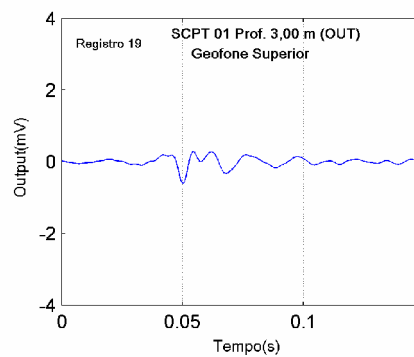
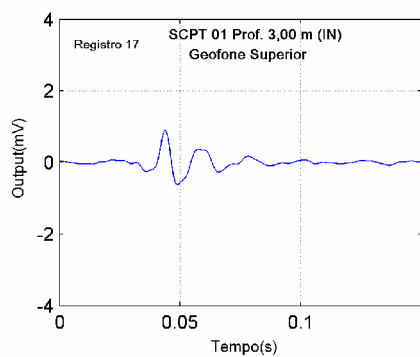
WARD, S. H. Geotechnical and Environmental Geophysics. *Investigations in Geophysics* No. 5, Society of Exploration Geophysics, 3 volumes, 1990;

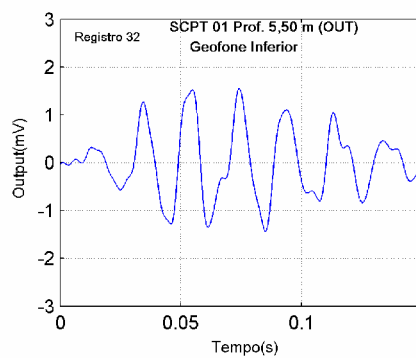
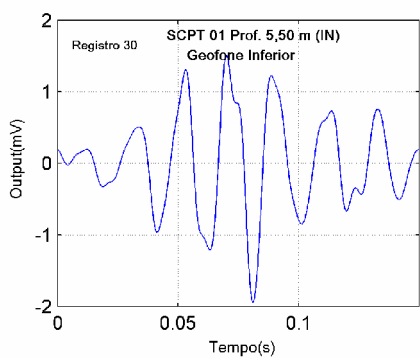
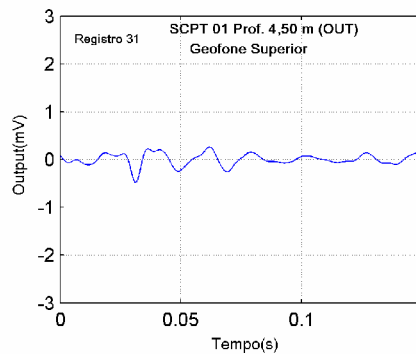
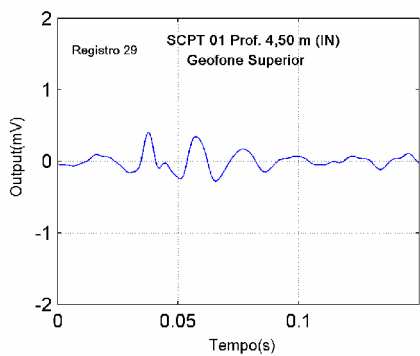
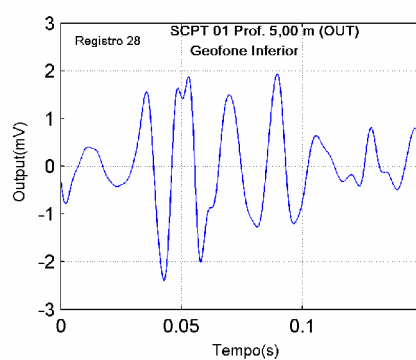
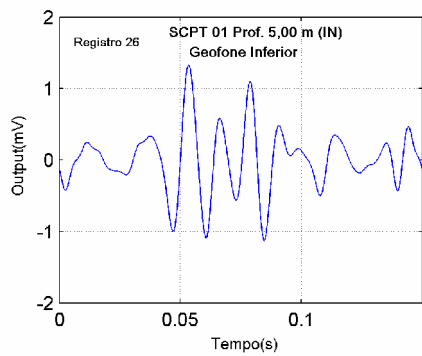
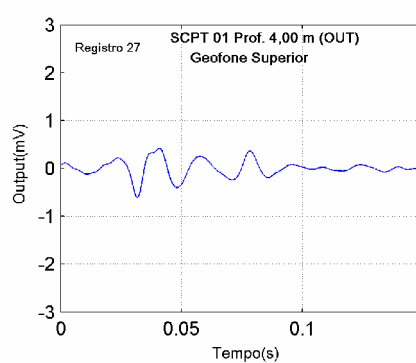
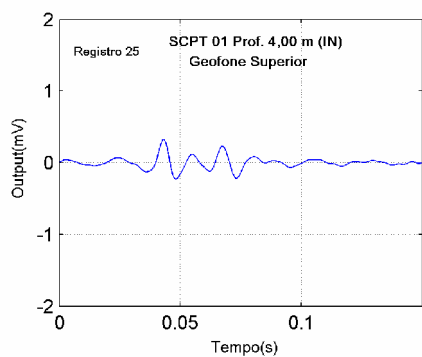
WOODS, R. D. "Measurement of Dynamic Soil Properties". *In: Geotechnical Division Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Pasadema, Califórnia, Proc. ASCE, vol 1., p91-180, 1978.

APÊNDICE A – RESULTADOS DO ENSAIO SCPT 01

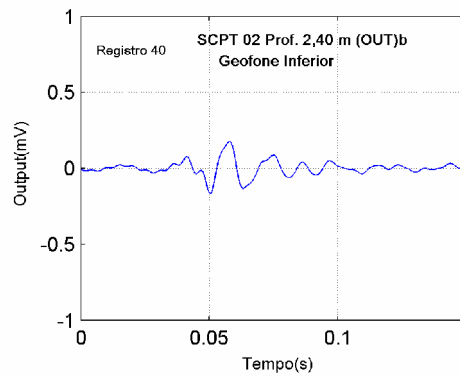
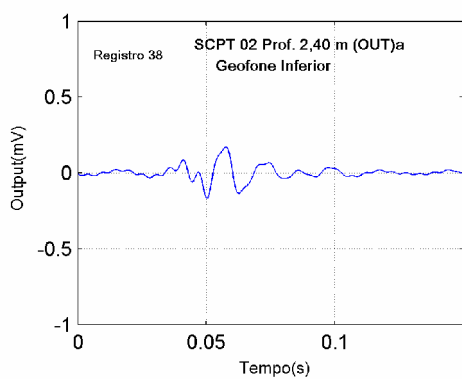
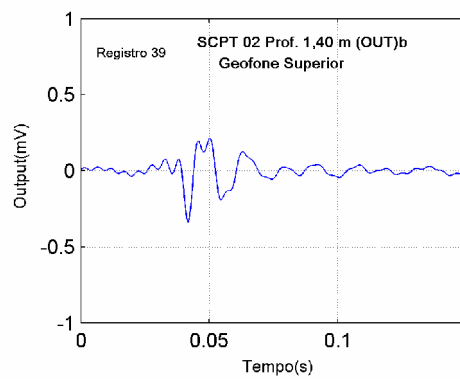
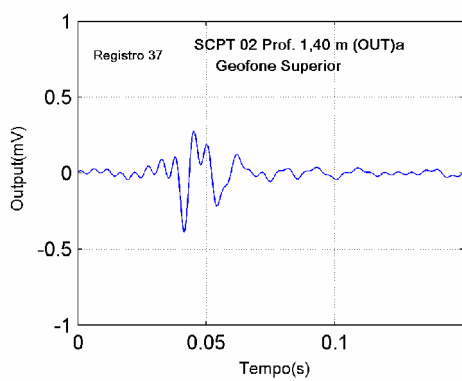
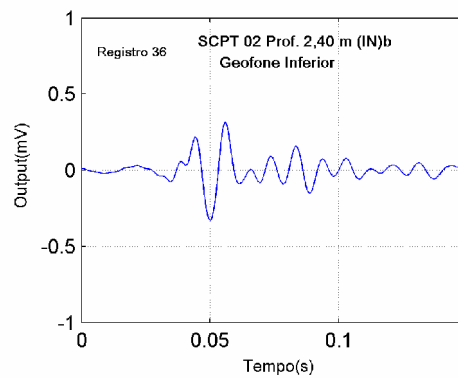
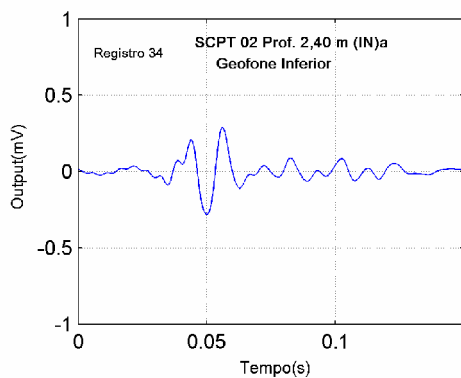
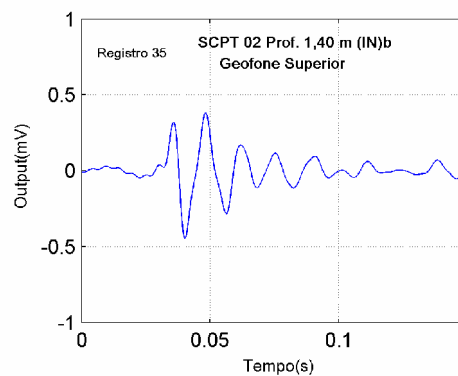
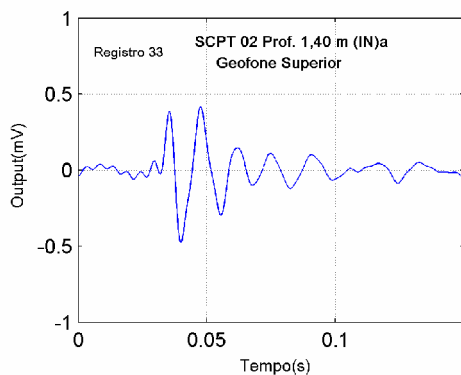


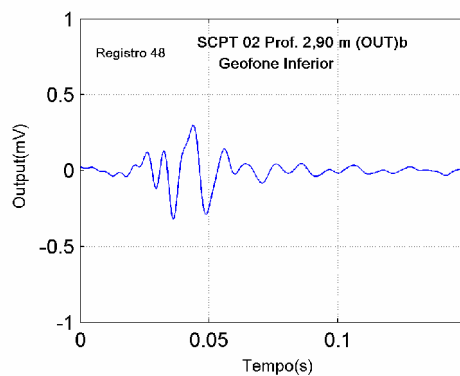
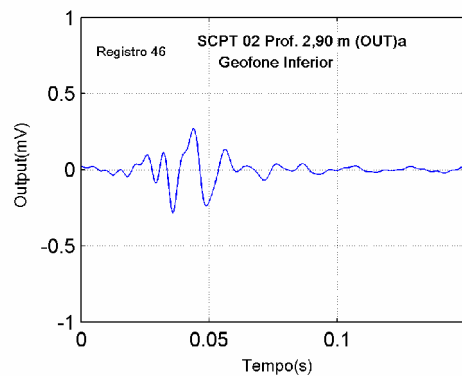
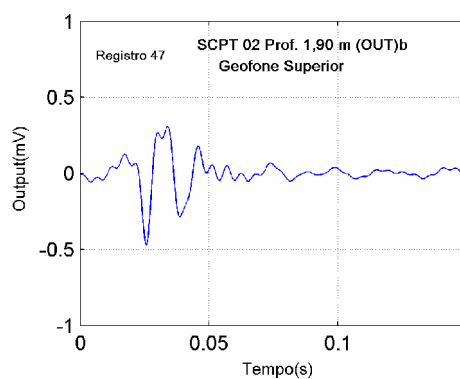
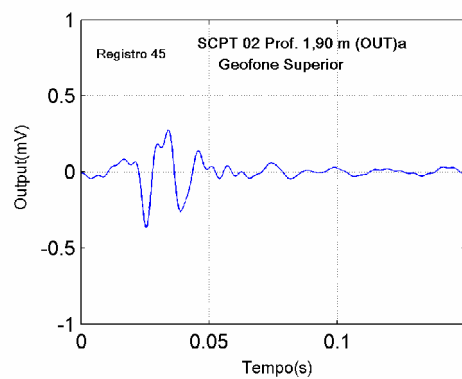
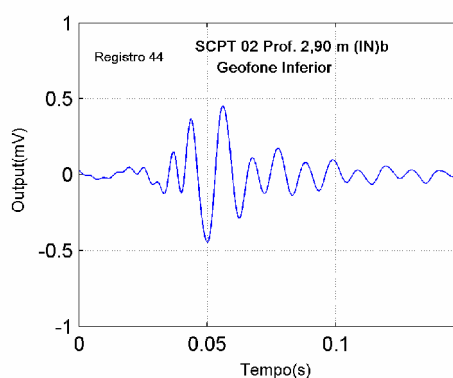
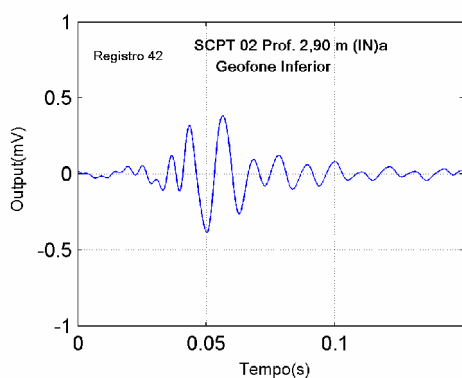
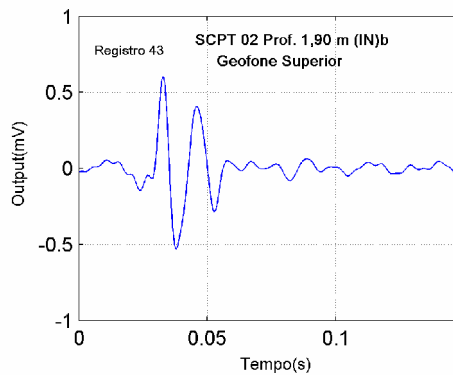
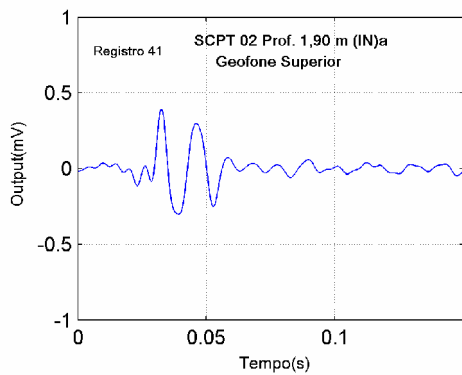


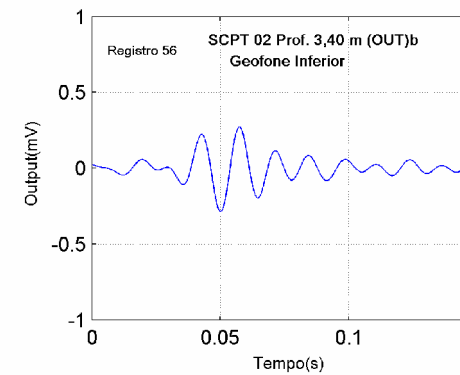
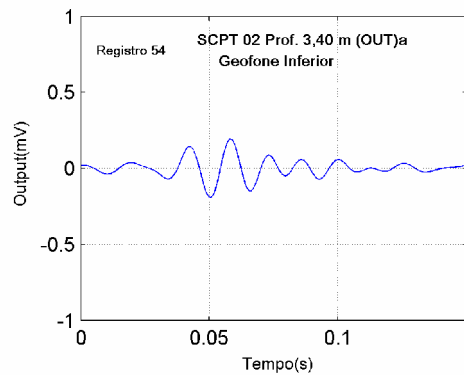
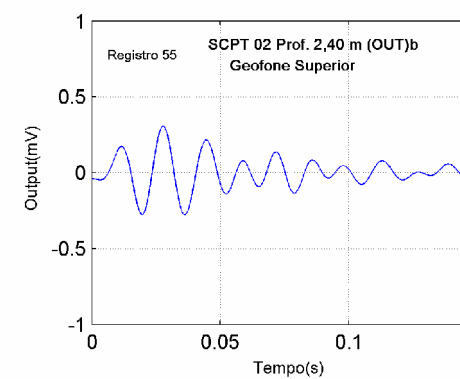
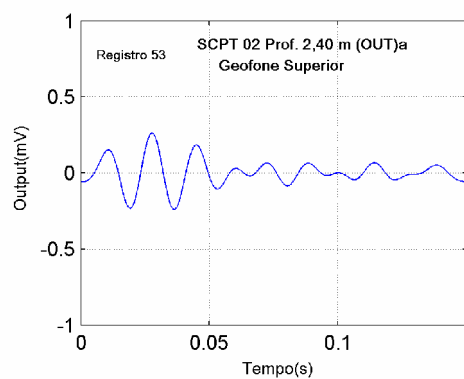
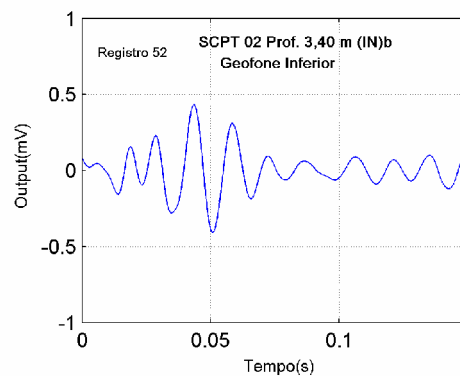
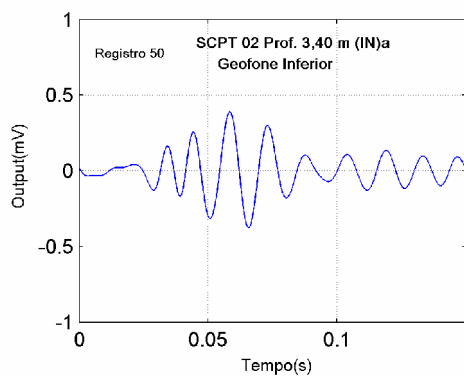
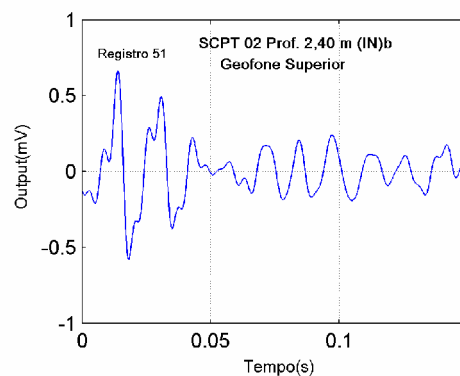
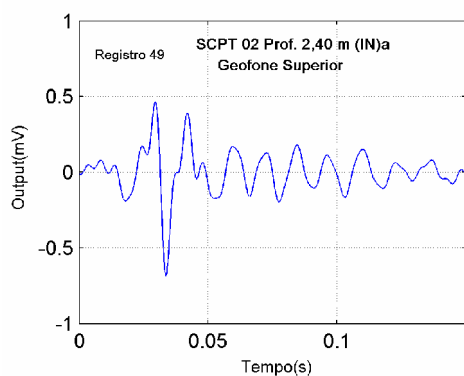


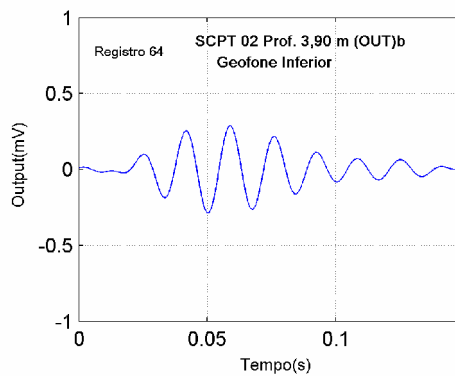
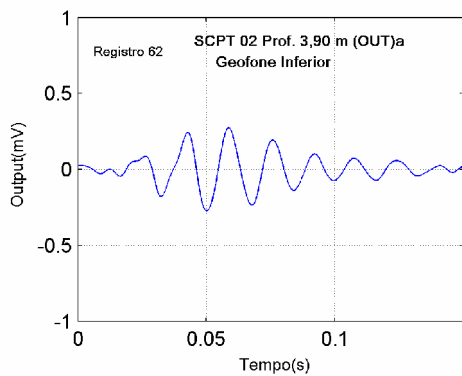
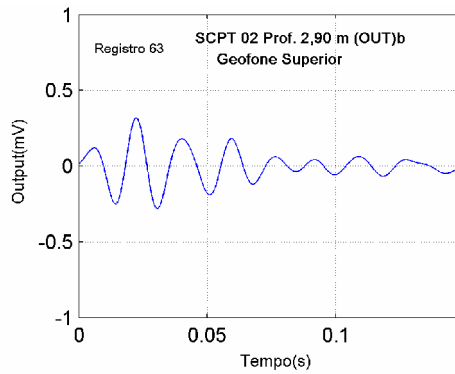
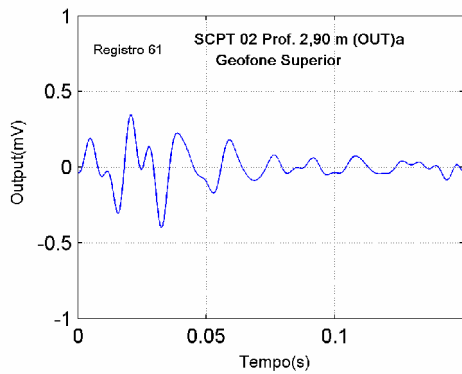
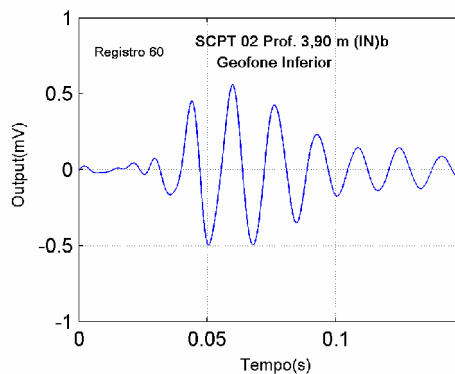
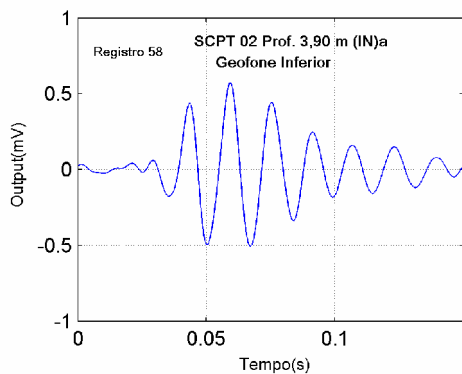
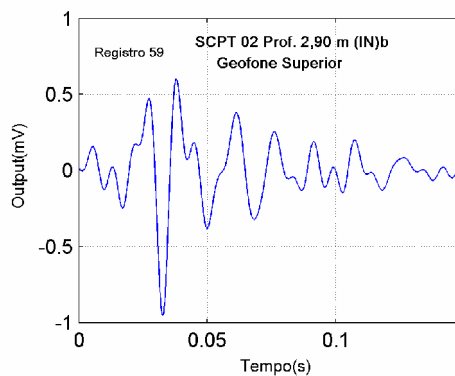
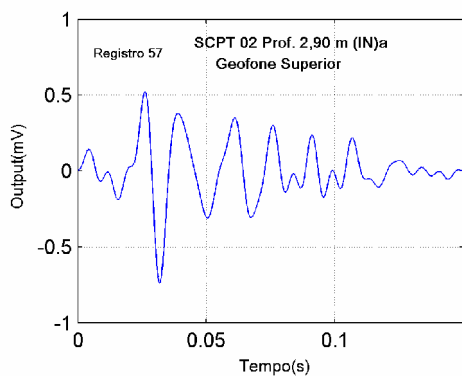


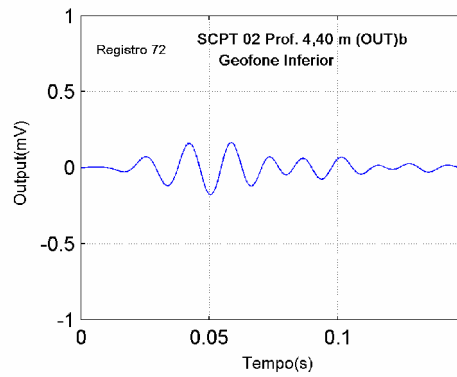
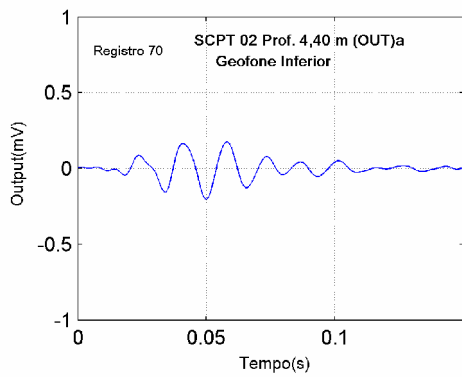
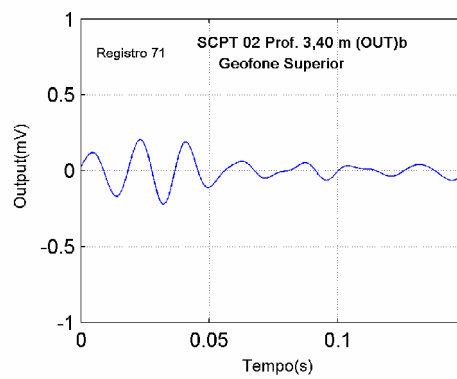
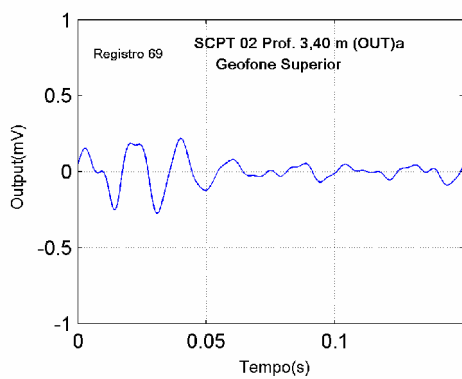
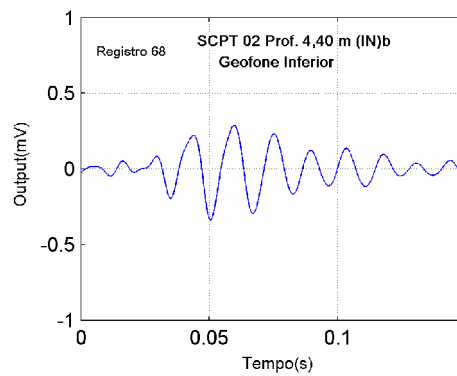
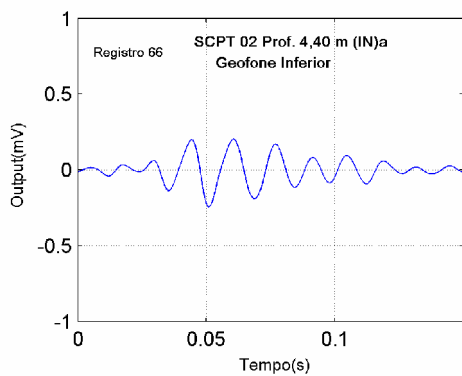
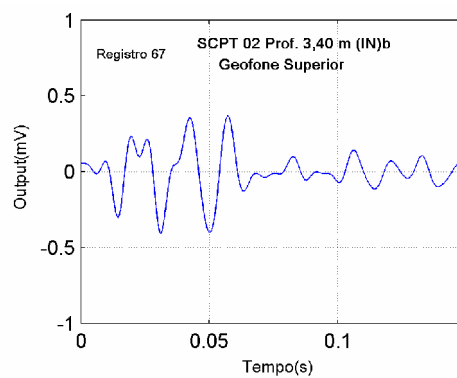
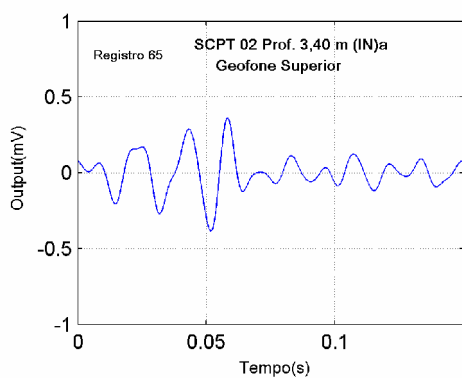
APÊNDICE B – RESULTADOS DO ENSAIO SCPT 02

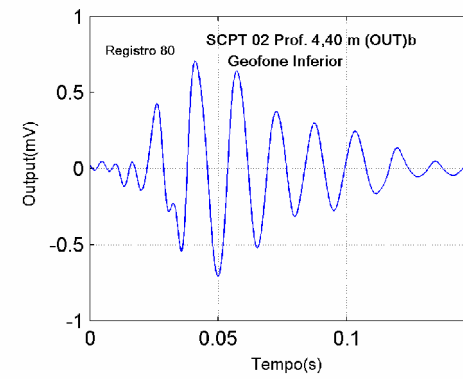
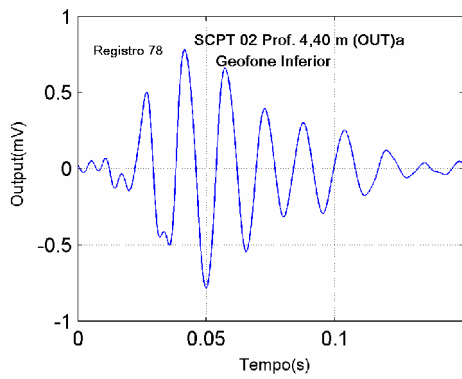
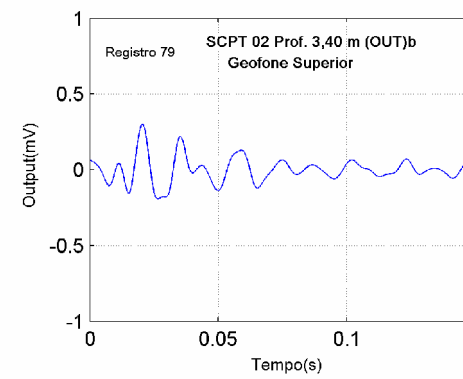
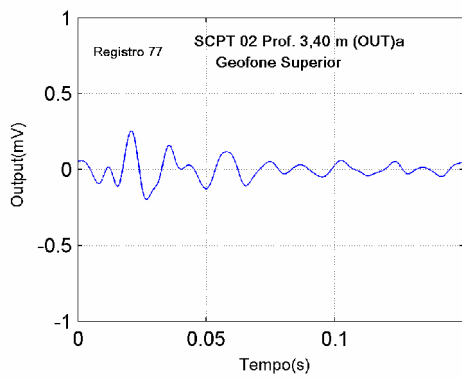
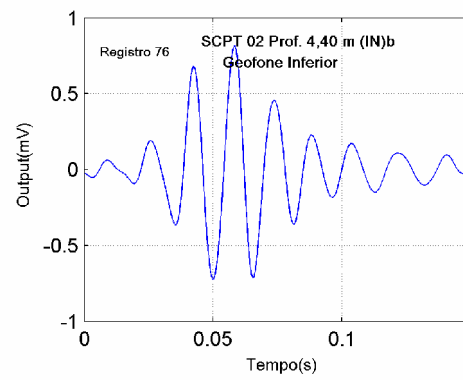
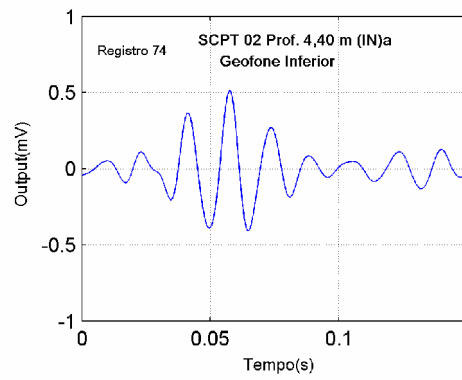
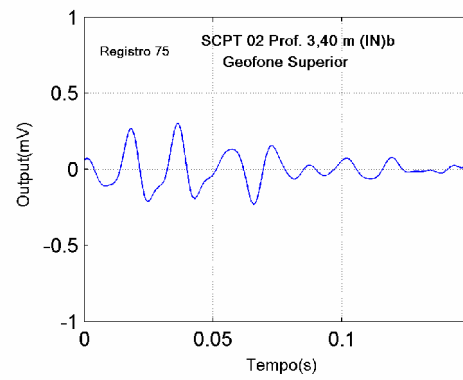
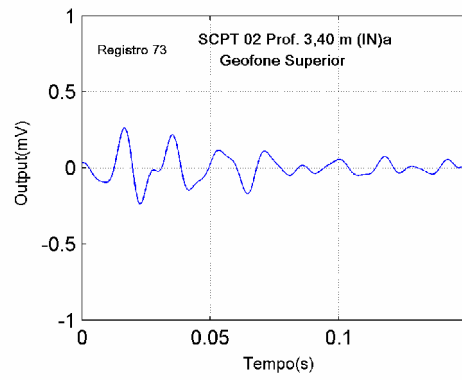


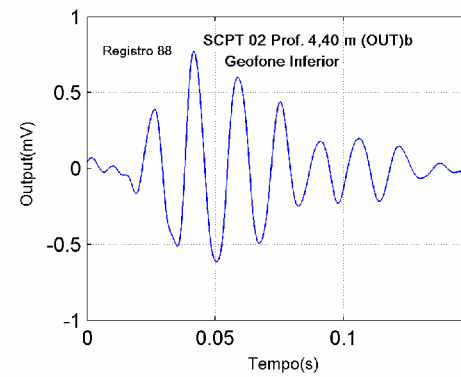
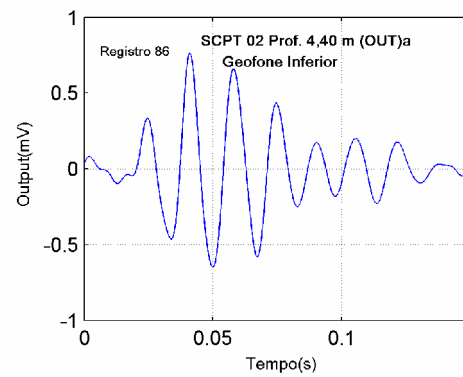
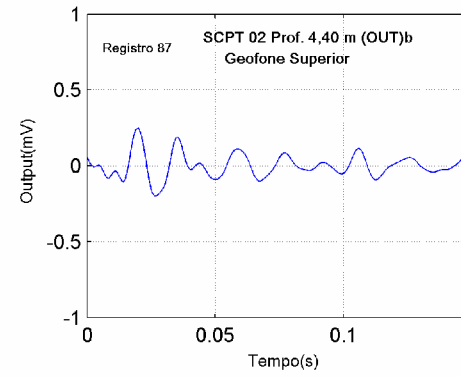
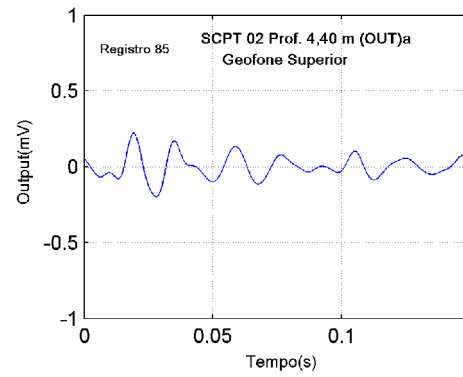
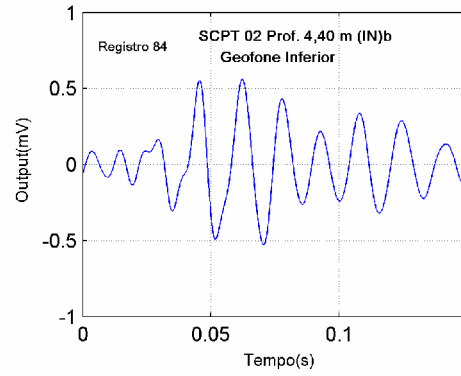
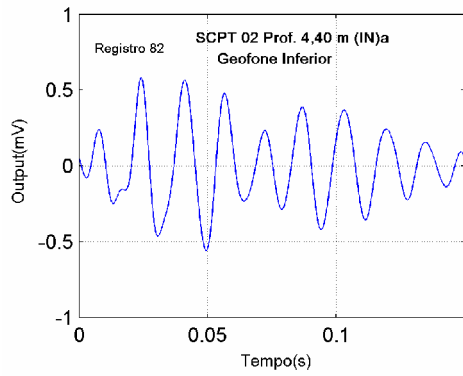
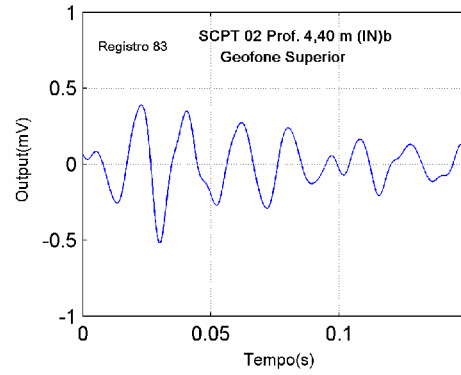
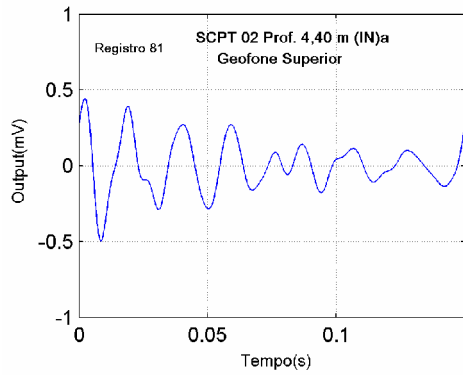


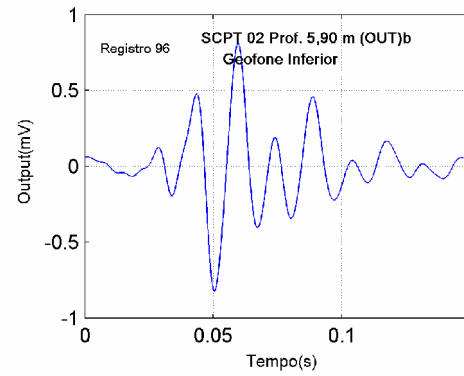
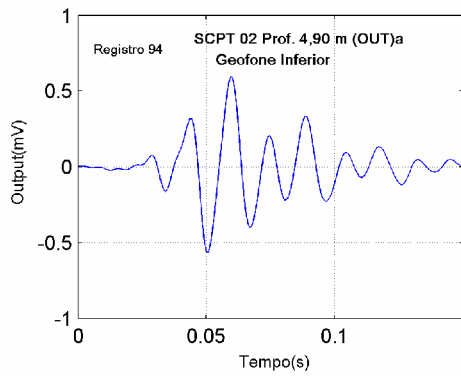
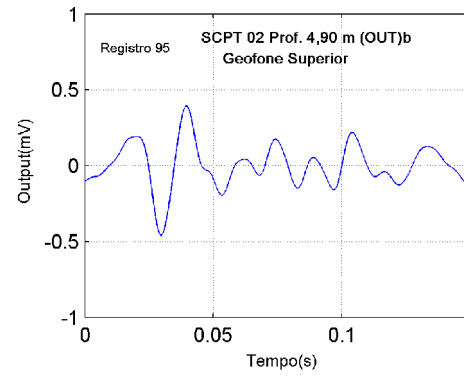
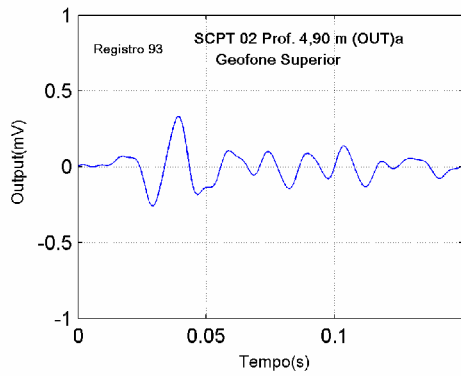
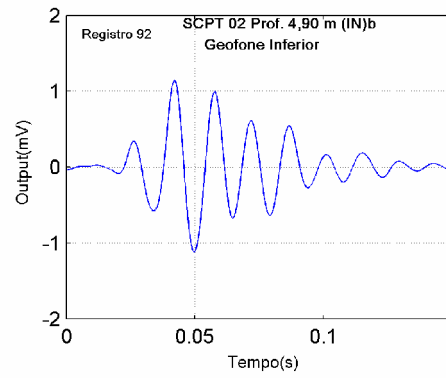
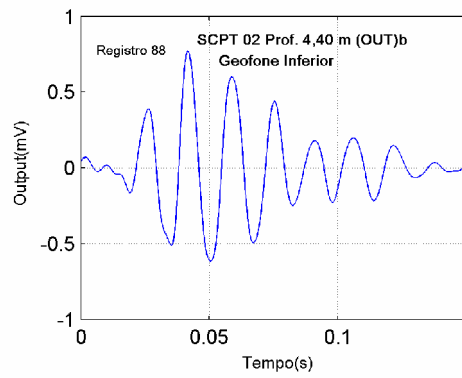
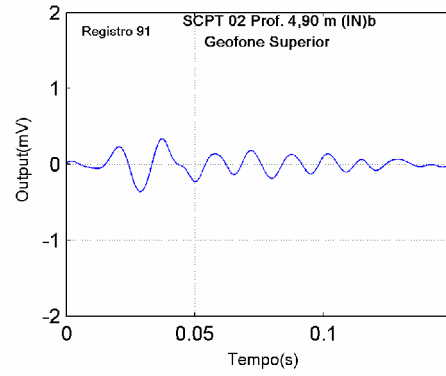
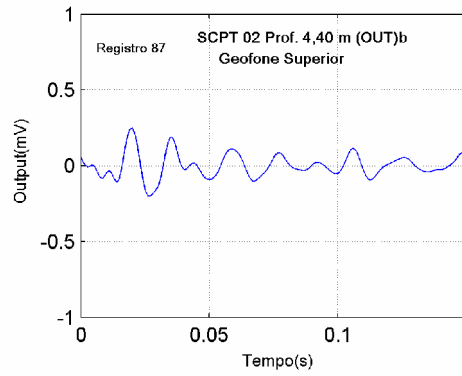


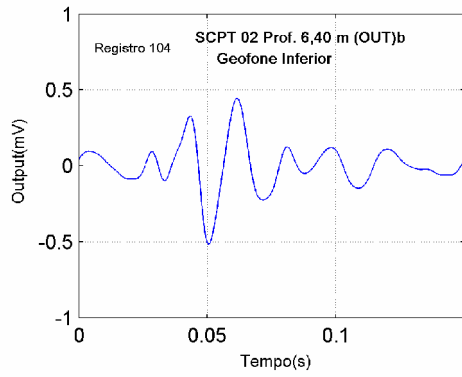
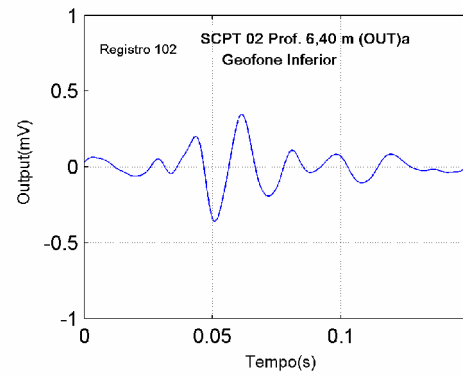
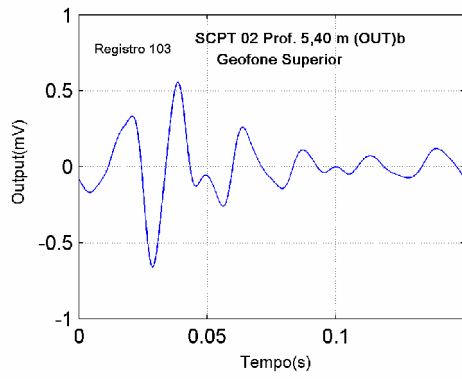
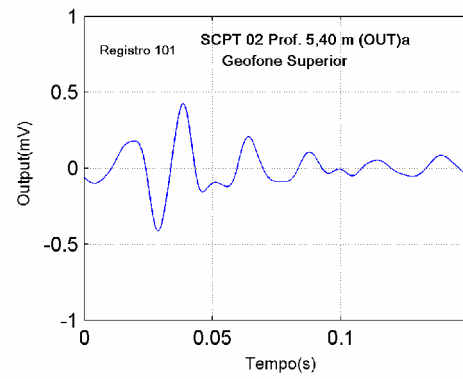
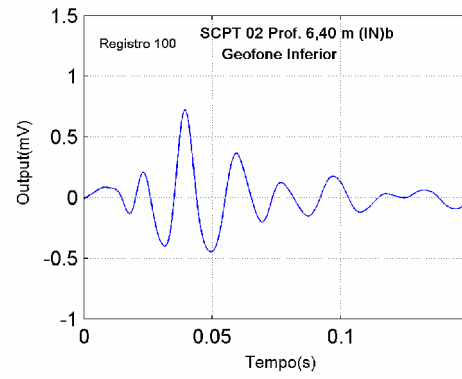
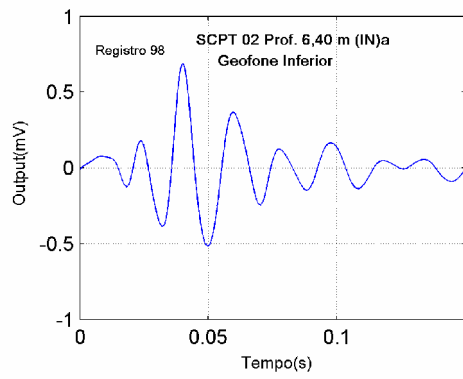
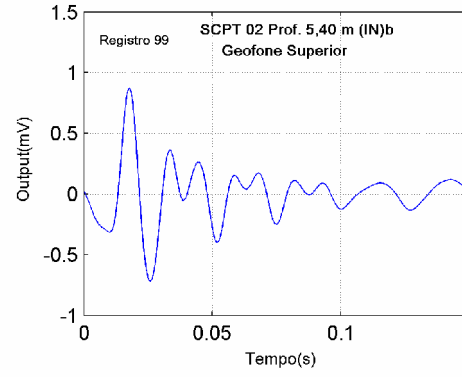
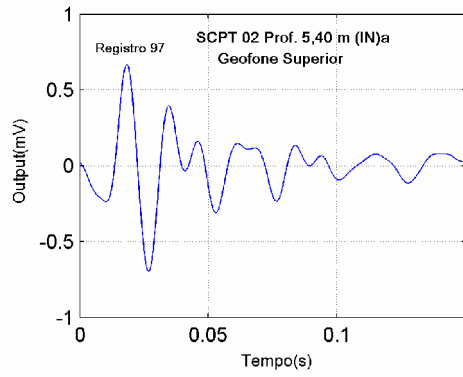


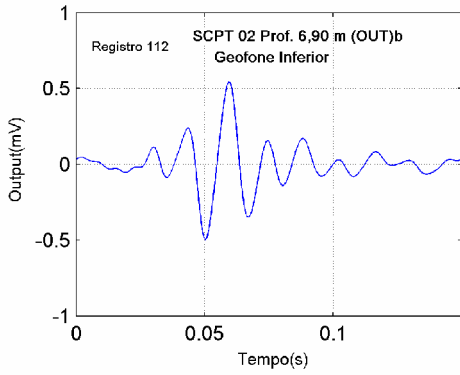
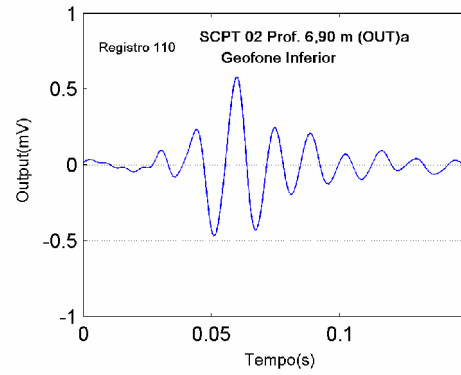
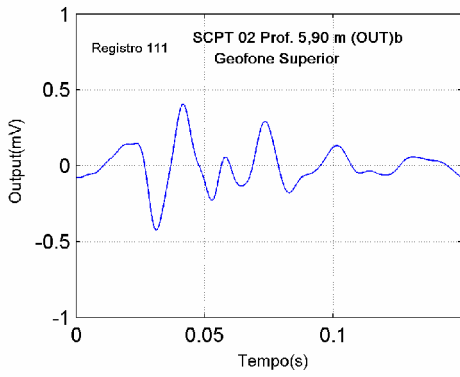
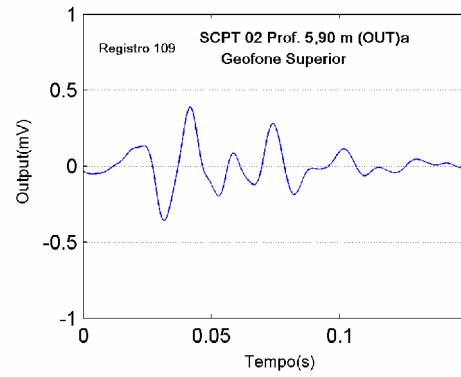
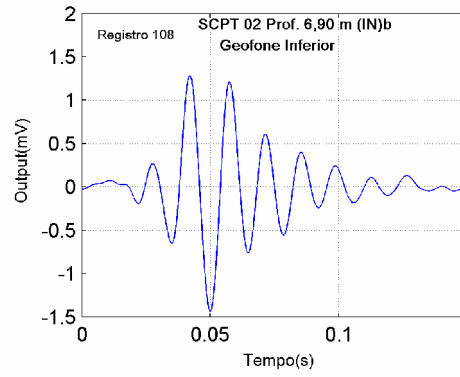
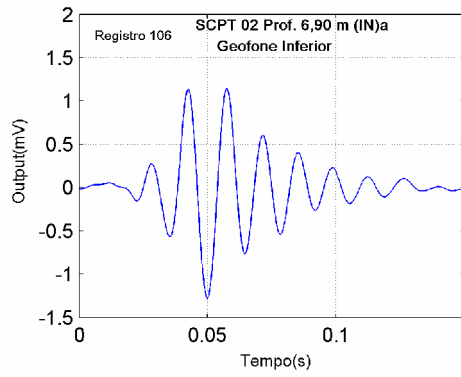
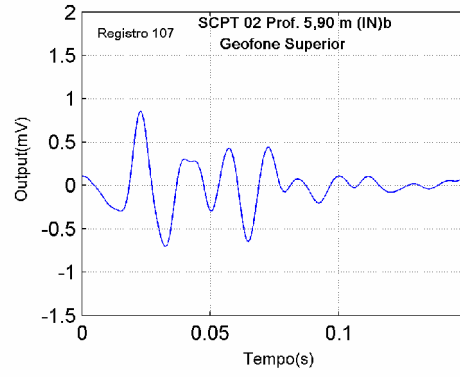
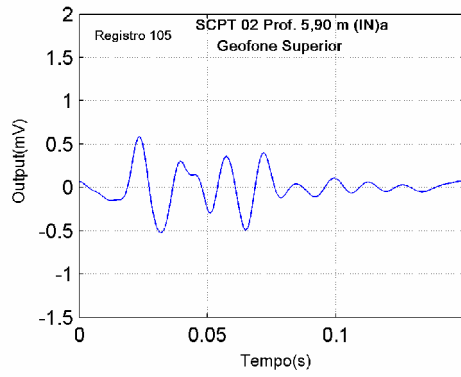


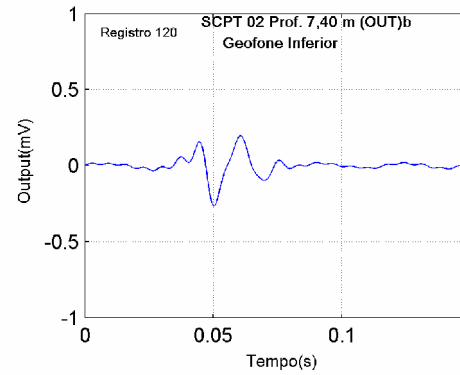
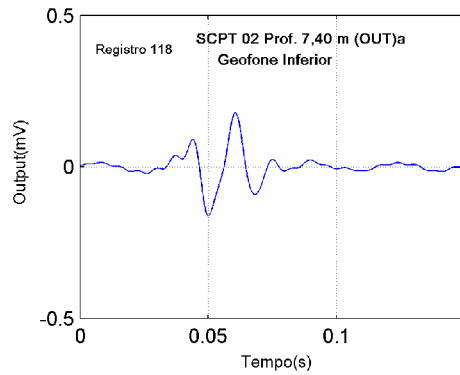
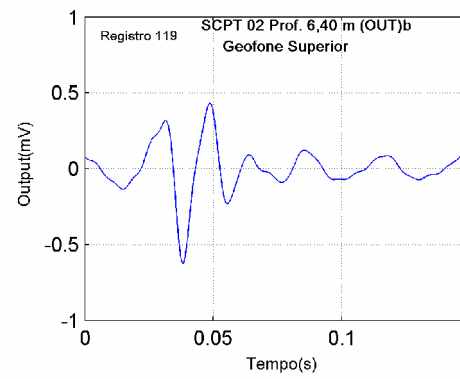
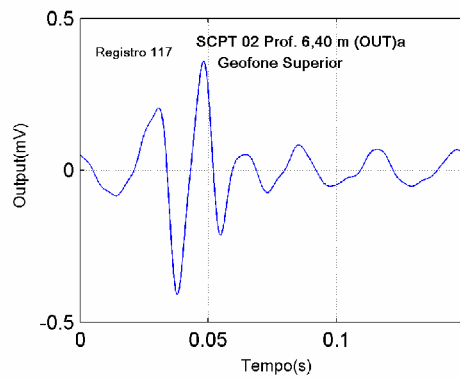
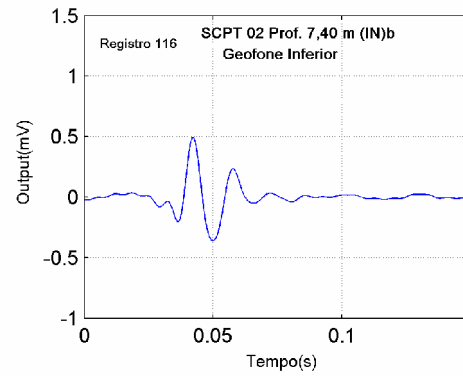
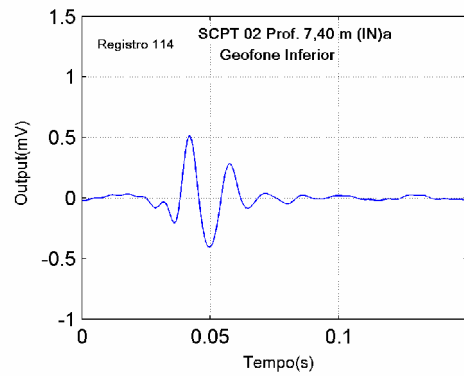
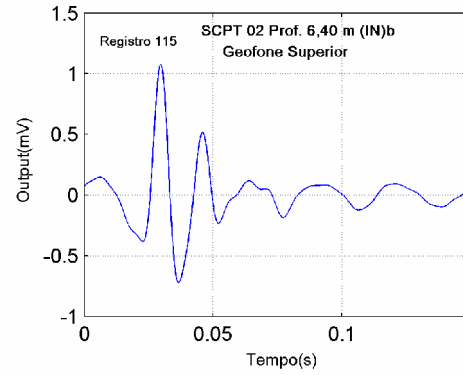
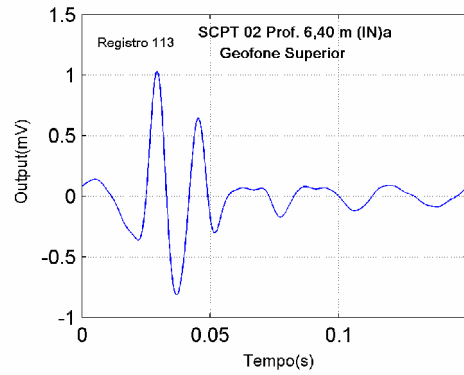


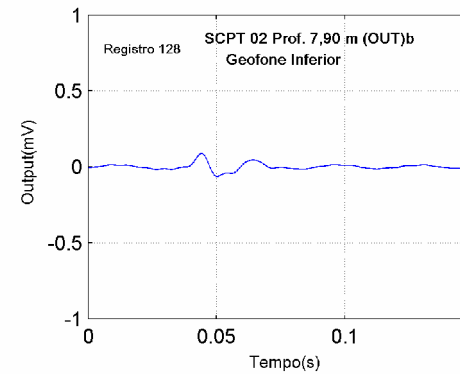
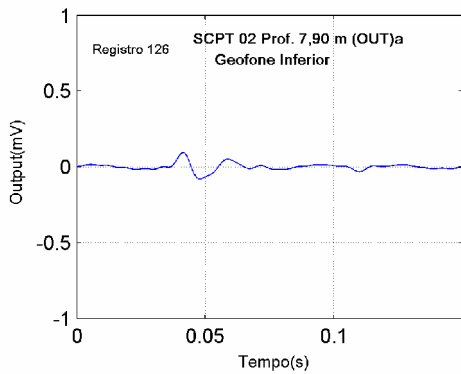
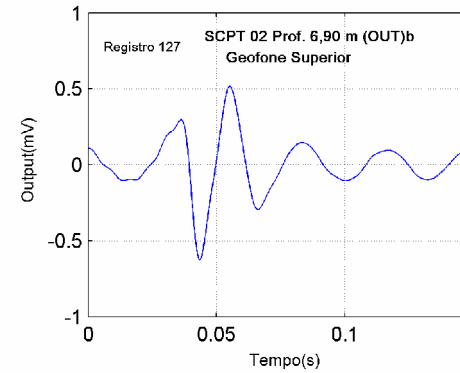
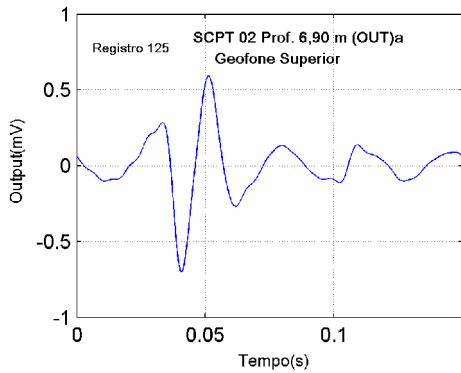
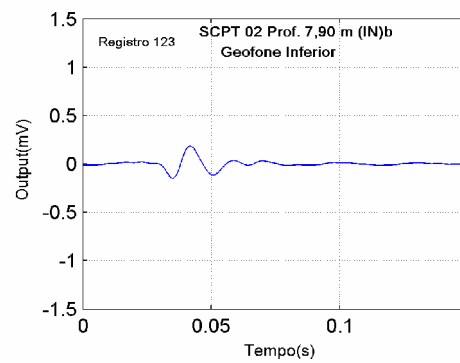
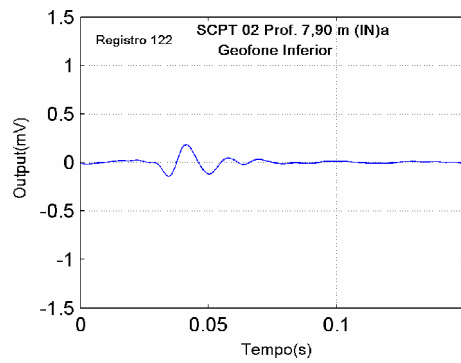
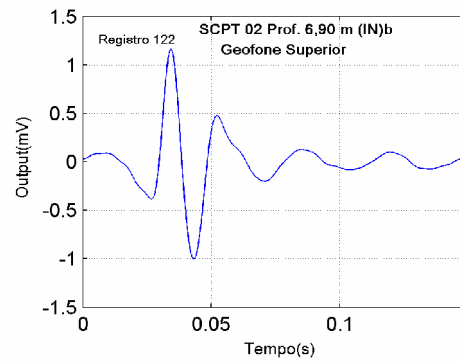
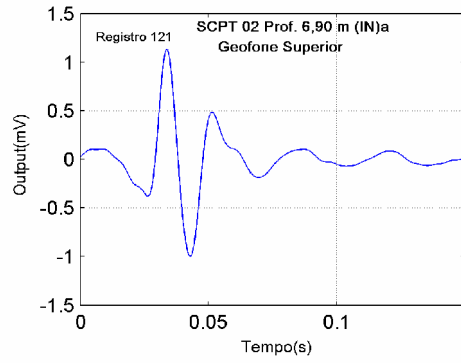


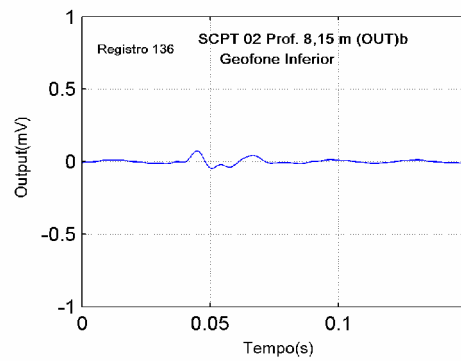
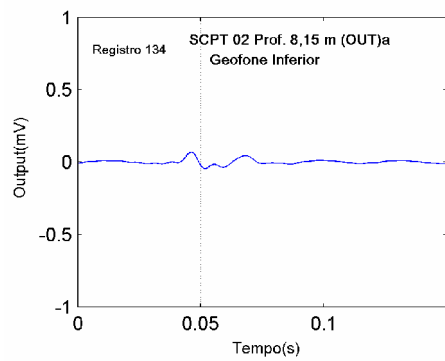
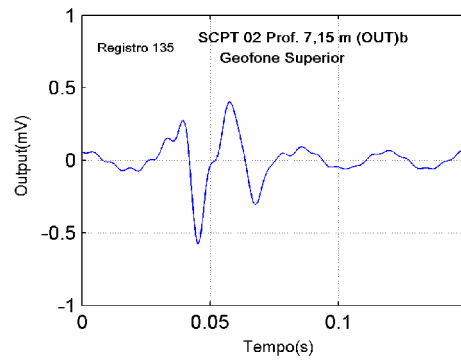
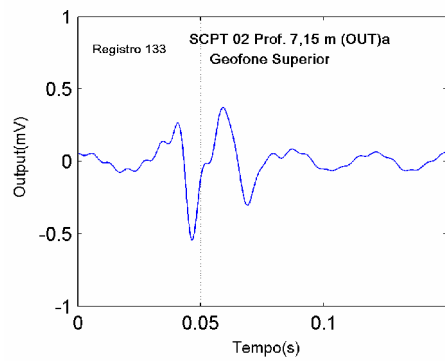
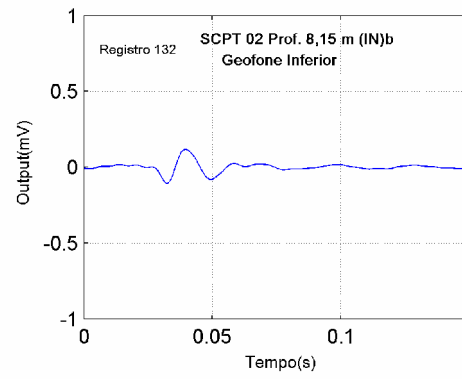
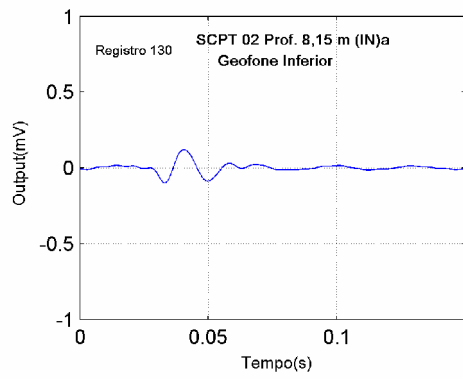
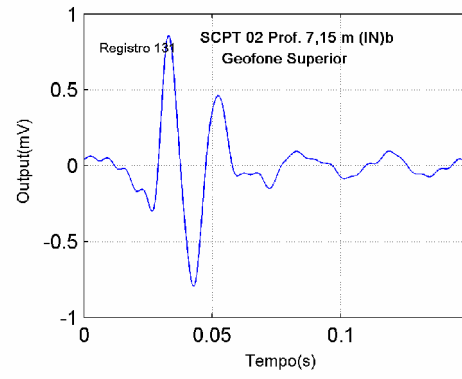
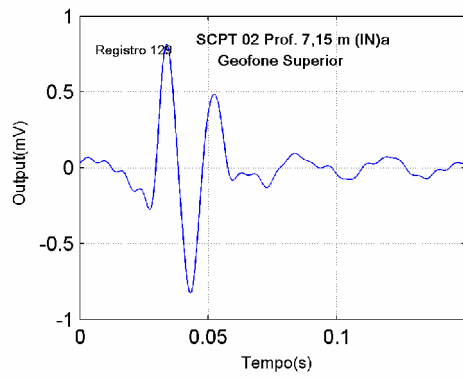












This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.