

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE GEOTECNIA

TÍTULO

INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE INSTALAÇÃO DA SONDA NOS
RESULTADOS DE ENSAIOS COM O PRESSIÔMETRO MÉNARD.

Por

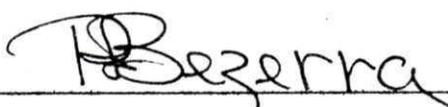
William de Paiva

Campina Grande

SETEMBRO – 2000

Esta dissertação será julgada para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia** e poderá ser aprovada em sua forma final pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba.

BANCA EXAMINADORA:



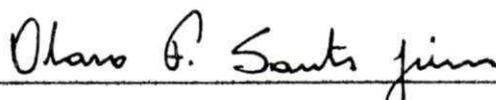
Raimundo Leidimar Bezerra, D.Sc.

(Orientador)



Francisco Chagas da Silva Filho, D.Sc.

(Examinador externo)



Olavo Francisco dos Santos JR, D.Sc.

(Examinador externo)

Campina Grande

Setembro de 2000

DIGITALIZAÇÃO:

SISTEMOTECA - UFCG

Dedicatória:

Esta dissertação é dedicada a minha família nas seguintes pessoas : José Benicio Sobrinho (Avô/Pai), Maria José Benicio (Tia/Irmã), Catarine Michele Benicio (Sobrinha/Afilhada), Maria de Fátima Silva (Esposa) , Laís Paiva (Filha) e a Deus por sua suprema colaboração em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço sinceramente a todos àqueles que de forma direta ou indireta contribuiriam para a realização desta dissertação:

A Deus, pela luz de sua companhia, dado-me: força, saúde e persistência durante a longa caminhada da minha vida.

Aos meus familiares pela compreensão e apoio moral e financeiro.

Ao meu orientador, Prof. Raimundo Leidimar Bezerra, pela valiosa compreensão e suporte técnico, sem os quais seria impossível a conclusão deste trabalho.

Ao amigo Erinaldo Hilário Cavalcante, pela atenção dispensada, tanto na parte prática, execução dos ensaios, como nas sugestões do texto.

Ao amigo Robson Ferreira Lima, pela colaboração na parte gráfica da dissertação.

Ao Prof. Wilson Conciani por ensinar-me o “A B C” do ensaio pressiométrico.

A todos os professores do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPB/ Campus II da Área de Geotecnia, por colocarem à minha disposição seus conhecimentos técnicos.

À ATECEL (Associação Técnica Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior), pelo apoio financeiro e material para as campanhas de ensaios.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo apoio financeiro fornecido para a realização do trabalho.

Aos funcionários da ATECEL, setor de sondagem, na pessoa de José Constante pelo apoio durante as campanhas de ensaios.

A todos os funcionários da área de geotecnia, em especial à Bibliotecária D. Mauriza Bezerra de Araújo, pela compreensão, carinho e ajuda dispensada pela mesma à minha pessoa e a todos os alunos da Pós-Graduação.

Aos colegas do curso de Pós-Graduação e a todos que colaboraram para que esta dissertação fosse concluída.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS DA PESQUISA	01
1.1 Objetivos	01
1.2 Seqüência dos Capítulos	02

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.1 Breve Histórico do Pressiômetro	04
2.2 Tipos de Pressiômetros	06
2.2.1 Pressiômetro: Tipo de Sonda e Parâmetros Controlados	07
2.2.1.1 O Pressiômetro Briaud	07
2.2.1.2 O Pressiômetro de Ménard	8
2.2.2 Classificação dos Pressiômetro quanto ao Tipo de Inserção da Sonda	10
2.2.2.1 Pressiômetro de Inserção em Pré-Furo (PBPMT)	10
2.2.2.2 Pressiômetro de Inserção Direta (cravação estática)	11
2.2.2.3 Pressiômetro de Inserção Direta (cravação dinâmica)	12
2.2.2.4 Vantagens e Desvantagens do Ensaio.....	13
2.3 Fundamentação Teórica	14
2.3.1 Estudo das Tensões, Deformações e Equilíbrio	15
2.4 Execução do Ensaio	22
2.4.1 Calibrações	23
2.4.1.1 Calibração para Perda de Pressão	23
2.4.1.2 Calibração para Perda de Volume	24
2.4.2 Execução do Furo	25
2.4.3 Correção da Curva Pressão x Volume	26
2.5 Parâmetros Obtidos com o Ensaio Pressiométrico	28

2.5.1 Módulo Pressiométrico (E_p)	28
2.5.2 Tensão Horizontal no Repouso (σ_{ho})	30
2.5.3 Coeficiente de Empuxo no Repouso (K_0)	32
2.5.4 Pressão Limite (P_L)	32
2.5.5 Pressão Limite Efetiva ($P_{L,*}$)	34
2.5.6 Pressão de Fluência (P_F)	34
2.5.7 Ângulo de Atrito Interno Efetivo (ϕ')	35
2.5.8 Resistência ao Cisalhamento não Drenado (S_u)	37
2.5.9 Identificação do Tipo de Solo por Intermédio de Dados Pressiométricos.....	38
2.6 Fatores que Influenciam nos Valores do Módulo Pressiométrico (E_p) e da Pressão Limite (P_L)	40
2.6.1 Geometria da Sonda	40
2.6.2 Tipo de Inserção da Sonda	40
2.6.2.1 Inserção em Pré-Furo	40
2.6.2.2 Inserção Direta (cravação dinâmica)	41
2.6.2.3 Inserção Direta (cravação estática)	43
2.7 Padronização do Ensaio Pressiométrico	44
2.8 Modelagem Numérica	45
2.8.1 Formulação Desenvolvida por Gibson e Anderson (1961)	46
2.8.2 Formulação Desenvolvida por Carter & Yeung (1985)	47
2.8.3 Formulação Desenvolvida por Yu & Houlsby (1991)	49
2.9 Correlações Entre os Ensaios PMT, SPT e PMT, CPT	50
2.9.1 Sugestão para Escolha do Tipo de Pressiômetro	52

CAPÍTULO 3

CAMPANHA DE ENSAIOS	56
3.1 Considerações Iniciais	56
3.2 Localização da Área Pesquisada	56
3.3 Geologia Local	56

3.4 Ensaio Realizados	59
3.4.1 O Ensaio Pressiômetro	61
3.4.1.1 O Pressiômetro Ménard Utilizado na Pesquisa	61
3.4.1.2 As Sondas Usadas	62
3.4.1.3 Calibrações	65
3.4.1.4 Inserção em Pré-Furo	66
3.4.1.5 Inserção Direta (cravação dinâmica)	66
3.4.1.6 Sistemática Geral	68
3.5 Parâmetros Calculados	68
3.5.1 Módulo Pressiométrico (E_p)	68
3.5.2 Pressão Limite	69
3.6 Dificuldades Encontradas Durante a Execução dos Ensaio	71
3.6.1 Ensaio Pressiométricos Realizados em Pré-furo	71
3.6.2 Ensaio Pressiométricos após Cravação Dinâmica da Sonda	71

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	74
4.1 Generalidades	74
4.2 Perfil do Depósito Estudado	74
4.3 Ensaio Pressiométricos	74
4.3.1 Ensaio Pressiométricos em Furo Prévio	77
4.3.2 Ensaio Pressiométricos com Inserção Direta (cravação dinâmica) ...	77
4.3.3 Parâmetros Geotécnicos	78
4.3.3.1 Módulo Pressiométrico	78
4.3.3.2 Pressão Limite	82
4.4 Influência da Compactação (cravação dinâmica) e do Amolgamento (pré-furo)	86
4.5 Comparação Entre $N_{SPT/15}$ e o Número de Golpes Medidos Para a Cravação dos Últimos 15cm do Sistema Sonda-haste, Para o Ensaio com Cravação Dinâmica	90

4.6 Modelagem Numérica	92
CAPÍTULO 5	
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA	95
5.1 Conclusões	95
5.2 Sugestões para a Continuidade da Pesquisa	96
CAPÍTULO 6	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
APÊNDICES	
APÊNDICE I	
CURVAS PRESSIOMÉTRICAS TÍPICAS DAS CAMADAS CARACTERÍSTICAS	105
APÊNDICE II	
APÊNDICE II.1	
PERFIS DE PRESSÃO LIMITE (PRÉ-FURO E CRAVAÇÃO DINÂMICA)	108
APÊNDICE II.2	
PERFIS DO MÓDULO PRESSIOMÉTRICO (PRÉ-FURO E CRAVAÇÃO DINÂMICA)	114

APÊNDICE III

SONDAGENS COM SPT E FOTOS DA CAMPANHA DE ENSAIO 118

APÊNDICE IV

**MODELAGEM NUMÉRICA DA CURVA PRESSIOMÉTRICA: MODELO DE
GIBSON & ANDERSON (1961) 124**

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Pressiômetro patenteado por Ménard (Baguelin et alii, 1978).....	5
Figura 2.2	Detalhe da sonda Briaud (Briaud,1992).....	7
Figura 2.3	Pressiômetro Pencil (Briaud,1992).....	8
Figura 2.4	Pressiômetro Ménard (Mántaras,1995).....	9
Figura 2.5	Pressiômetro Ménard, tipo CG (Cavalcante, 1997).....	9
Figura 2.6	Trados manuais mais utilizados na pesquisa.....	10
Figura 2.7	Penetração com trépano, usado para grandes profundidades, (Velloso e Lopes, 1996).....	11
Figura 2.8	Máquina de Cravação pertencente a UFCE.....	12
Figura 2.9	Equipamento de SPT adaptado para cravação dinâmica (adaptado de Velloso e Lopes, 1996).....	13
Figura 2.10	Expansão de uma cavidade cilíndrica (Baguelin et alii, 1978).....	16
Figura 2.11	Deformação inicial de um elemento quadrado (Baguelin et alii, 1978)..	17
Figura 2.12	Tensão em um elemento deformado (Baguelin et alii, 1978).....	18
Figura 2.13	Calibração para verificação da perda de pressão.....	24
Figura 2.14	Calibração para verificação da perda de volume.....	25
Figura 2.15	Característica das curvas em função do furo.....	26
Figura 2.16	Correção de volume e de pressão.....	27
Figura 2.17	Curva pressiométrica ideal.....	28
Figura 2.18	Método do gráfico de Brandt (1978).....	31
Figura 2.19	Estimativa da pressão limite segundo a norma americana (ASTM D 4719, 1978).....	33
Figura 2.20	Determinação da pressão de fluência.....	35
Figura 2.21	(a) : Sondas de inserção direta (cravação dinâmica); (a) Pré-Furo.....	40
Figura 2.22	Região amolgada pelo pré-furo.....	41
Figura 2.23	Região de influência da compactação (Meyerhor, 1959; citado por Poulos & Davis, 1980).....	42
Figura 2.24	Região de influência de uma cravação estática (Salgado et alii, 1997;	

	após Drucker et alii, 1951).....	43
Figura 2.25	Fases do ensaio Pressiométrico.....	45
Figura 2.26	Comparação entre o módulo pressiométrico, pressão limite e resistência de ponta do CPT (Nazaret, 1972).....	51
Figura 2.27	Correlações entre o N do SPT e a pressão limite (Cassan, 1968-1969; Hobbs & Dixon, 1969 e Waschkowski, 1976, citado por Baguelin et alii, 1978).....	52
Figura 3.1	Planta de situação da Área Pesquisada.....	57
Figura 3.2	Perfil de sondagem com SPT obtido no Furo 03.....	58
Figura 3.3	Classificação do solo da área estudada.....	59
Figura 3.4	Locação dos furos onde foram feitos os ensaios.....	60
Figura 3.5	Pressiômetro Ménard usado na pesquisa.....	61
Figura 3.6	Sonda Ménard com cobertura metálica utilizadas nos ensaios com pré-furo.....	63
Figura 3.7	Sonda Ménard com cobertura de borracha utilizadas nos ensaios com pré-furo.....	63
Figura 3.8	Sonda usada durante o ensaio de inserção direta.....	64
Figura 3.9	Revestimento da sonda (ponta e cabeça de bater) usado durante os ensaios feitos através da inserção direta (cravação dinâmica).....	64
Figura 3.10	Curvas de calibração para perdas de pressão e de volume da sonda utilizada em ensaios de inserção direta.....	65
Figura 3.11	Curvas de calibração por perda de pressão e volume para a sonda utilizada em ensaios com pré-furo.....	66
Figura 3.12	Equipamento de SPT adaptado para cravação dinâmica.....	67
Figura 3.13	Estimativa de P_L segundo sugestão de Briaud (1992), com dados do Furo 01, Ensaio 01.....	70
Figura 3.14	Estimativa de P_L segundo sugestão da Norma Americana ASTM D 4719 (1987), com dados do Furo 01, Ensaio 01.....	70
Figura 3.15	Estimativa de P_L segundo sugestão de Van Wambeek e D'Hericourt (1971), com os dados do Furo 01, Ensaio 01.....	71
Figura 3.16	Sonda de inserção direta rompida.....	73

Figura 3.17	Adaptação com a cabeça de bater do martelo de SPT.....	73
Figura 4.1	Gráfico pressão versus volume obtido a partir do Ensaio 02, Furo 01..	75
Figura 4.2	Gráfico pressão versus variação de raio a partir do Ensaio 02, Furo01..	76
Figura 4.3	Curva pressiométrica típica de um furo com diâmetro excessivamente maior que o da sonda em pré-furo, com dados do Furo 01, Ensaio 04, segundo Medeiros (1998).....	76
Figura 4.4	Curva Pressiométrica incompleta devido ao estouro da sonda de inserção direta (cravação dinâmica) antes de atingir-se a fase plástica do solo, com dados do Furo 01, Ensaio 06.....	77
Figura 4.5	Módulo pressiométrico (E_p) em função da profundidade, nos ensaios com sonda colocada em pré-furo e através de cravação dinâmica, usando a sugestão de Briaud, (1992).....	79
Figura 4.6	Comparação dos módulo pressiométrico, para o furo 01, segundo a sugestão de Briaud (1992), para ensaios em pré-furo e após cravação dinâmica.....	80
Figura 4.7	Módulo Pressiométrico em função da profundidade, nos ensaios com a sonda colocada em pré-furo e através de cravação dinâmica, para o furo 02, usando sugestão de Briaud (1992).....	80
Figura 4.8	Comparação dos módulos pressiométricos, para o furo 02, segundo a sugestão de Briaud (1992), para ensaios em pré-furo e após cravação dinâmica.....	81
Figura 4.9	Valores médios do módulo pressiométricos em função da profundidade, nos ensaios com a sonda colocada em pré-furo e através de cravação dinâmica, usando a sugestão de Briaud (1992).....	81
Figura 4.10	Comparação dos valores médios do módulo pressiométrico obtidos segundo a sugestão de Briaud (1992), para ensaios em pré-furo e após cravação dinâmica.....	82
Figura 4.11	Pressão Limite obtida através da sugestão de Van Wambecke & D'Henricourt (1971), para o furo 01, com os dados dos ensaios efetuados em pré-furo e após cravação dinâmica.....	83
Figura 4.12	Comparação entre a pressão limite, para o furo 01, obtido segundo	

	sugestão de Van Wambecke e D'Hericourt (1971), para o ensaio com o pré-furo e inserção direta.....	84
Figura 4.13	Pressão Limite obtida através da sugestão de Van Wambecke & D'Hericourt (1971), para o furo 02, com os dados dos ensaios efetuados em pré-furo e após cravação dinâmica.....	84
Figura 4.14	Comparação entre a pressão limite, para o furo 02, obtido segundo sugestão de Van Wambecke e D'Hericourt (1971), para o ensaio com o pré-furo e inserção direta.....	85
Figura 4.15	Valores médios da pressão limite obtidos através da sugestão de Van Wambecke e D'Hericourt (1971), com dados dos ensaios efetuados em pré-furo e após cravação dinâmica.....	85
Figura 4.16	Comparação dos valores médios da pressão limite obtidos segundo a sugestão de Van Wambecke & D'Hericourt (1971), para ensaios em pré-furo e após cravação dinâmica.....	86
Figura 4.17	Valores da pressão limite em função do número de golpes por 15cm de penetração da sonda no solo.....	89
Figura 4.18	Valores do módulo pressiométrico em função do número de golpes para 15 cm de penetração da sonda no solo.....	90
Figura 4.19	Correlação entre $N_{SPT/15cm}$ e $N_{PIPMT/15cm}$	91
Figura 4.20	Correlação entre $N_{SPT/15cm}$ e $N_{PIPMT/15cm}$	92
Figura 4.21	Modelagem numérica obtida para o Furo 01, Ensaio 10, em comparação com a curva real, para o ensaio com pré-furo.....	93
Figura 4.22	Modelagem numérica obtida para o Furo 01, Ensaio 10, em comparação com a curva real, para o ensaio com inserção dinâmica.....	94
Figura I.1	Curva Pressiométrica obtida a partir do método de Briaud (1992) no Furo 01, Ensaio 08, pelo processo de cravação dinâmica.....	105
Figura I.2	Curva pressiométrica, obtida a partir do método de Briaud (1992) com dados do Furo01, Ensaio 05, pelo processo de pré-furo.....	105
Figura I.3	Curva pressiométrica obtida a partir do método de Briaud (1992) com dados do Furo01 Ensaio 08, pelo processo de pré-furo.....	106

Figura I.4	Curva pressiométrica obtida a partir do método de Briaud (1992) com dados do Furo01, Ensaio 02, pelo processo de cravação.....	106
Figura I.5	Curva pressiométrica obtida a partir do método de Briaud (1992), com dados do Furo01, Ensaio 05, pelo processo de cravação.....	107
Figura I.6	Curva pressiométrica obtida a partir do método de Briaud (1992), com dados do Furo01, Ensaio 02, pelo processo de pré-furo.....	107
Figura II.1.1	Perfil de pressão limite obtido a partir do método de Briaud (1992) no Furo 01.....	109
Figura II.1.2	Perfil de pressão limite obtido a partir do método de Van Wambecke & D'Hericourt (1971) no Furo 01.....	109
Figura II.1.3	Perfil de pressão limite obtido a partir do método da Norma Americana ASTM D4719 (1987) no Furo 01.....	110
Figura II.1.4	Perfil de pressão limite obtido a partir do método de Briaud (1992) no Furo 02.....	110
Figura II.1.5	Perfil de pressão limite obtido a partir do método de Van Wambecke e D'Hericourt (1971) no Furo 02.....	111
Figura II.1.6	Perfil de pressão limite obtido a partir do método da Norma Americana ASTM D4719 (1987) no Furo 02.....	111
Figura II.1.7	Valores médios da pressão limite em função da profundidade, obtidos a partir do método de Briaud (1992).....	112
Figura II.1.8	Valores médios da pressão limite em função da profundidade, obtidos a partir do método de Van Wambecke e D'Henricourt (1971).....	112
Figura II.1.9	Valores médios da pressão limite em função da profundidade, obtidos a partir da Norma Americana ASTM D4719 (1987).....	113
Figura II.2.1	Perfil do módulo pressiométrico obtido a partir do método de Briaud (1992) no Furo 01.....	115
Figura II.2.2	Perfil do módulo pressiométrico obtido a partir do método da Norma Americana ASTM D4719 (1987) no Furo 01.....	115
Figura II.2.3	Perfil do módulo pressiométrico obtido a partir do método de Briaud (1992) no Furo 02.....	116
Figura II.2.4	Perfil do módulo pressiométrico obtido a partir do método da Norma	

	Americana ASTM D4719 (1987) no Furo 02.....	116
Figura II.2.5	Valores médios do Módulo Pressiométrico em função da profundidade, obtidos a partir do método de Briaud (1992).....	117
Figura II.2.6	Valores médios do módulo pressiométrico em função da profundidade, obtidos a partir da Norma Americana ASTM D4719 (1987).....	117
Figura III.1	Perfil de sondagem com o SPT obtido no Furo 01 da área estudada.....	119
Figura III.2	Perfil de sondagem com o SPT obtido no Furo 02 da área estudada.....	120
Figura III.3	Adaptação da cabeça de bater.....	121
Figura III.4	Válvula de alimentação com proteção metálica rompida.....	121
Figura III.5	Início da cravação do sistema sonda-haste.....	122
Figura III.6	Retirada das hastes com o saca-tubos do SPT.....	122
Figura III.7	Penetração com trado e uso da lama bentonítica.....	123
Figura III.8	Visão geral do equipamento no local do ensaio.....	123
Figura IV.1	Modelagem numérica obtida para o Furo 01, Ensaio 10, em comparação com a curva real, para o ensaio com inserção dinâmica.....	125
Figura IV.2	Modelagem numérica obtida para o Furo 01, Ensaio 10, em comparação com a curva real, para o ensaio com pré-furo.....	126
Figura IV.3	Modelagem numérica obtida para o Furo 02, Ensaio 05, em comparação com a curva real, para o ensaio com	127
Figura IV.4	Modelagem numérica obtida para o Furo 02, Ensaio 05, em comparação com a curva real, para o ensaio com pré-furo.....	128

LISTA DE TABELAS, QUADROS, ÁBACOS E FLUXOGRAMAS

Tabela 2.1	Evolução do pressiômetro (adaptado de Cavalcante, 1997).....	7
Tabela 2.2	Tabela para a estimativa da pressão limite (Briaud, 1992).....	22
Tabela 2.3	Fatores reológicos (Ménard, 1975).....	30
Tabela 2.4	Coefficiente de empuxo no repouso (Caputo, 1983).....	32
Tabela 2.5	Identificação do solo por meio da relação E_p/P_L (Cavalcante, 1997; após Briaud, 1992).....	39
Tabela 2.6	Identificação do solo por meio da relação E_p/P_L^* (Briaud, 1992).....	39
Tabela 4.1	Valores do módulo pressiométrico (E_p) calculados segundo sugestões da Norma Americana ASTM D4917 (1987) e de Briaud (1992).....	79
Tabela 4.2	Valores da pressão limite estimados segundo as sugestões de Briaud (1992), Van Wambeek e D'Hericourt (1971) e Norma Americana(1987).....	87
Tabela 4.3	Relação entre os parâmetros geotécnicos (E_p) e (P_L) para os ensaios com inserção direta e o pré-furo.....	88
Tabela 4.4	Valores do módulo pressiométrico e da pressão limite em função do número de golpes por 15cm de penetração da sonda no solo.....	89
Tabela IV.1	Valores em cada ponto da modelagem numérica, com os dados do Furo 01, Ensaio 10.....	125
Tabela IV.2	Valores em cada ponto da modelagem numérica, com os dados do Furo 01, Ensaio 10.....	126
Tabela IV.3	Valores em cada ponto da modelagem numérica, com os dados do Furo 02, Ensaio 05.....	127
Tabela IV.4	Valores em cada ponto da modelagem numérica, com os dados do Furo 02, Ensaio 05.....	128
Quadro 2.1	Vantagens e desvantagens do ensaio pressiométrico.....	14
Quadro 2.2	Sugestões de Briaud (Briaud et alii, 1992).....	44
Quadro IV.1	Parâmetros Geotécnicos, para o Furo 01, Ensaio 10.....	125
Quadro IV.3	Parâmetros Geotécnicos, para o Furo 01, Ensaio 10.....	126

Quadro IV.3	Parâmetros Geotécnicos, para o Furo 02, Ensaio 05.....	127
Quadro IV.4	Parâmetros Geotécnicos para o Furo 02, Ensaio 05 (pré-furo).....	128
Ábaco 2.1	Ábaco para determinação do ângulo de atrito pelo método de Calhoon (1970).....	54
Fluxograma 2.1	Tipos de execução do ensaio em função do parâmetro desejado (adaptado de Clarke, 1995).....	53
Fluxograma 2.2	Ensaio pressiométrico em rochas e solos pedregulhosos (adaptado de Clarke, 1995).....	53
Fluxograma 2.3	Sugestão do PMT de acordo com o tipo de fundação a ser executada (adaptado de Clarke, 1995).....	54
Fluxograma 2.4	Sugestões gerais para a escolha do tipo de pressiômetro (adaptado de Clarke, 1995).....	55

LISTA DE ABREVIACÕES

μ	Coefficiente de Poisson.
α	Fator reológico.
ϕ	Ângulo de atrito interno do solo.
ϕ'	Ângulo de atrito interno efetivo.
ϵ	Deformação específica circunferencial.
β	Fator que depende da relação G/S_u .
σ_{ho}	Tensão horizontal total no repouso do solo.
ΔP	Varição de pressão na sonda.
ΔV	Varição de volume da sonda.
$\Delta V/V_0$	Varição de volume sobre volume inicial.
$\Delta R/R_0$	Varição de raio sobre o volume inicial.
a	Coefficiente de compressibilidade do pressiômetro.
CPV	Unidade de controle de pressão e volume.
D	Diâmetro da sonda.
E	Módulo de elasticidade.
E_p	Módulo de elasticidade pressimétrico, obtido no trecho pseudo-elástico da curva pressiometrica.
G	Módulo de Cisalhamento.
ID	Inserção direta.
$N_{PIPMT/15}$	Número de golpes do martelo de SPT, para a penetração de 15cm do sistema de cravação dinâmico sonda-haste.
$N_{SPT/15}$	Número de golpes do martelo de SPT, para a penetração de 15cm do amostrador.
PF	Pré-furo.
P	Pressão aplicada ao solo.
P_c	Pressão obtida pelo processo de expansão da sonda ao ar livre.
P_c'	Perda de pressão.

P_2	Pressão no final da fase pseudo-elástica.
P_L	Pressão Limite.
P_L^*	Pressão limite efetiva.
P_F	Pressão de fluência.
PBPMT	Ensaio pressiométrico com equipamento em pré-furo
PIPMT	Ensaio pressiométrico com equipamento em injeção dinâmica
PMT	Pressuremeter Testing.
V_c	Volume devido às perdas.
V_r	Volume lido na unidade de controle.
V_c'	Perda de volume.
V	Volume injetado na sonda.
V_o	Volume inicial da sonda.
V_1	Volume no início da fase pseudo-elástica.
V_2	Volume no final da fase pseudo-elástica.
V_m	Volume médio da célula central.
V_{60}	Volume injetado na sonda após 60s da aplicação da pressão.
V_{30}	Volume injetado na sonda após 30s da aplicação da pressão.
V_L	Volume expandido para a sonda entrar em contato com as paredes do furo.
V_S	Volume da célula central de medida do pressômetro totalmente esvaziada.
SBPMT	Ensaio pressiométrico com equipamento auto-perfurante.
SPT	Standard Penetration Test.
u	Deslocamento radial.
v	Deslocamento circunferencial.
w	Deslocamento vertical.
r	Distância radial.
ρ	Incremento da distância radial.
ε_r	Deformação radial.
ε_θ	Deformação circunferencial
ε_z	Deformação vertical.
σ_x	Tensão radial.
σ_y	Tensão circunferencial.

ε_r	Deformação radial
ε_θ	Deformação circunferencial.
ε_z	Deformação vertical.
σ_x	Tensão circunferencial.
σ_r	Tensão radial principal.
σ_z	Tensão principal vertical.
$\Delta_{\sigma r}$	Incremento da tensão radial.
$\Delta_{\sigma \theta}$	Incremento da tensão circunferencial.
$\Delta_{\sigma z}$	Incremento da tensão vertical.
E.U.A.	Estados Unidos da América.
PDP	Pressiômetro de inserção em pré-furo.
p_0	Pressão inicial.
r_0	Raio inicial.
S_u	Resistência ao cisalhamento não drenado.
ASTM	American Socyety for Testing and Materials.
NF	Norme Française.
K_0	Coefficiente do empuxo no repouso.
SCT	Screw Plate Testing (placa helicoidal).

RESUMO

Por volta de 1996 iniciaram-se pesquisas na Universidade Federal da Paraíba (UFPB) com um pressiômetro do tipo Ménard, adquirido pela Área de Geotecnia, localizada em Campina Grande. Este novo equipamento trouxe uma possibilidade de inovação em termos de ensaios de campo, uma vez que, até então, o pressiômetro utilizado era o Briaud, o qual como se sabe, é potencialmente aplicado em estudos de pavimentações rodoviárias.

Um dos fatores de maior importância em um ensaio pressiométrico é o método usado para a colocação da sonda no solo. Dependendo do método empregado e dos cuidados tomados durante a instalação da sonda, o ensaio será de boa ou de má qualidade.

O atual trabalho aborda estes efeitos a partir de ensaios realizados com o pressiômetro Ménard, utilizando-se como técnicas de inserção da sonda o pré-furo e a inserção direta (cravação dinâmica).

Tomando-se como referência o ensaio em pré-furo, verificou-se que na inserção direta por processo dinâmico obteve-se valores superiores do módulo pressiométrico (E_p), provavelmente por causa da compactação ocorrida durante o processo de instalação, fazendo com que a região de influência de tensões ao redor da sonda fosse alterada, havendo conseqüentemente uma diminuição da compressibilidade. Com relação à pressão limite (P_L), a influência da compactação não foi significativa, o que era esperado pelo fato da ruptura do solo dá-se em um estágio além da fase elástica. Em um estudo anterior, William et alii (1999) verificou que a pressão limite é mais influenciada pela relação geométrica da sonda do que pelo método usado para instalá-la.

ABSTRACT

Since 1996, researches began studies at Federal University of Paraiba (UFPB) with a pressuremeter of the type Ménard belonging to the Geotechnical Research Group, located in Campina Grande. This new equipment brought a possibility innovation, in terms of field tests, as until then the pressuremeter used was the Briaud pressuremeter, which is applied potentially in studies of roads pavement.

One of the major factors in a field pressuremeter is the method used for the placement of the probe in the soil. Depending on the used method and the care taken during the installation of the probe, the field test results will be of good or not good quality.

The present investigation evaluates the quality of the results obtained, starting from field tests done by Ménard pressuremeter, using as techniques of insert of the probe, the preboring and the direct insert (percussion drilling).

Taken as reference the field test in preboring, it was obtained that the direct insert for dynamic process increased the values of the pressuremeter modulus (E_p). This is probably due to the fact that the compaction occurs during the installation process which, by its turn, causes alteration in the area of influence of tensions in the probe, consequently causing a compressibility decrease. Regarding to the limit pressure (P_L), as expected, the influence of the compaction was not significant. This was obtained by the fact that the rupture of the soil happened beyond the elastic phase. In a previous study done by William et alii (1999) it was verified that the limit pressure is more influenced by the geometric relationship of the probe than for the method used to install it.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS DA PESQUISA

1.1 - Objetivos

O crescente aumento da população urbana reflete-se numa maior demanda de projetos habitacionais. Nas cidades muito povoadas, mais que a necessidade de se construir, tem-se a necessidade do uso do solo de forma otimizada, do ponto de vista de seu comportamento, diante das cargas impostas por estruturas maiores e, às vezes, mais esbeltas. Dessa forma, a busca por uma melhor determinação das características do solo podem ser feitas através de ensaios de laboratório, onde o maior problema está na qualidade da amostra coletada. Por outro lado, alguns ensaios de campo podem preservar algumas características naturais do solo e, se bem executados, podem atingir resultados muito confiáveis.

O ensaio de campo mais utilizado em todo o Brasil, e em quase todo mundo, é o SPT (Standard Penetration Test). Entretanto, apesar da sua grande disseminação e uso em projetos os mais diversificados possíveis, ele é ainda muito criticado devido ao fato do mesmo não ter uma padronização total e por não ter uma base teórica consolidada, o que pode levar a projetos super ou sub-dimensionados.

Um outro fator determinante na sondagem de um solo, para fins de projeto de fundações, é o grau de dificuldade e o custo da execução do ensaio, pois ensaios como os de placa, prova de carga sobre estacas e ensaio de cone de penetração, necessitam de equipamentos pesados, caros e técnicos capacitados para obtenção de resultados nem sempre imediatos.

O ensaio pressiométrico, apesar de pouco difundido no meio geotécnico brasileiro, é relativamente simples, tal como o SPT e não necessita de máquinas tão robustas e caras para sua execução (o furo pode ser executado com o trado manual e utilizando-se o mesmo equipamento de percussão do SPT). Apenas na sua execução propriamente dita, necessita-se de, pelo menos, um técnico habilitado.

O pressiômetro utilizado nesta pesquisa foi o pressiômetro Menárd do tipo GC. É um instrumento operado sob tensão controlada e faz-se medida de volume. É formado por três células (uma central e duas de guarda) sendo a célula central expandida por pressão de água e as duas outras expandidas por pressão de gás nitrogênio (N_2).

O objetivo da presente pesquisa é analisar o efeito do método de inserção da sonda no solo, estudando possíveis alterações nos valores do módulo pressiométrico (E_p) e da pressão limite (P_L), tendo como base a maneira de instalação da sonda (pré-furo e inserção direta). O local escolhido foi um depósito de solo arenoso situado na praia de Intermares, município de Cabedelo nas proximidades de João Pessoa – PB.

1.2 – Seqüência dos Capítulo

Esta dissertação é composta de cinco capítulos e sua organização está descrita conforme apresentado a seguir:

No Presente Capítulo é apresentada a introdução e os objetivos da pesquisa, onde se tem uma visão geral sobre o ensaio pressiométrico (PMT), bem como a justificativa do desenvolvimento da atual pesquisa.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre o ensaio pressiométrico PMT, onde apresenta-se um histórico, sugestões, tipos de PMT, além da modelagem numérica do ensaio .

No Capítulo 3 são apresentados dados do local onde foram feitos os ensaios e dos equipamentos utilizados. São fornecidas informações tais como: localização do depósito estudado, locação dos ensaios, características geológicas, descrição dos equipamentos utilizados, sondagem de simples reconhecimento (SPT) e perfil geotécnico do solo, além de adaptações feitas no equipamento e dificuldades encontradas durante a execução dos ensaios.

No Capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios realizados, e são feitas comparações com outros dados disponíveis para o local, publicados em trabalhos anteriormente desenvolvidos, bem como é feito um pequeno comentário sobre a modelagem numérica empregada, cujos resultados encontram-se no Apêndice IV.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas. Neste mesmo capítulo são ainda enumeradas as principais sugestões para a continuidade da pesquisa.

No Capítulo 6 estão, listadas as referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento desta dissertação.

Por fim, são apresentados quatro apêndices, onde constam algumas curvas pressiométricas, perfil de módulo pressiométrico e pressão limite, algumas fotos do local da realização dos ensaios e a modelagem numérica de algumas curvas pressiométricas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Breve Histórico do Pressiômetro

Por volta de 1930, o Engenheiro alemão Kögler descreveu um equipamento desenvolvido por ele, no qual tentava relacionar a pressão aplicada a um torpedo cilíndrico à deformação lida em uma massa de solo (Baguelin et alii, 1978). O aparelho era composto por uma sonda com comprimento de 125cm e 10cm de diâmetro. Havia discos metálicos posicionados nas extremidades do torpedo, cuja função era a fixação da bainha da sonda. Entretanto, devido à dificuldades ligadas à variação de volume (injetado-se ar na sonda, não foi possível uma interpretação adequada dos dados) associada à incapacidade de se manter a deformação da cavidade na forma cilíndrica, a idéia foi naquela ocasião abandonada.

Em 1955, o francês Jean Louis Ménard desenvolveu um equipamento com o mesmo princípio teórico do de Kögler, sendo que a principal diferença era a divisão do corpo da sonda em três partes (Baguelin et alii, 1978). Ou seja, foram feitas três células independentes, duas nas extremidades da sonda (células de guarda) e uma no centro (célula central). Feito isso, Ménard teve condições de eliminar duas condições indesejáveis: a primeira era o estado de deformação não plano, e para isso a solução foi confinar a célula central entre duas células de guarda, garantindo que a expansão fosse totalmente radial, satisfazendo a condição de deformação axissimétrica; a segunda era o monitoramento da deformação e para isso a solução foi proporcionar a leitura do volume da célula central alimentada por água, o que foi possível pelo fato da água ser teoricamente um líquido incompressível, para o nível de tensões requisitados no PMT(ensaio pressiométrico). A Figura 2.1 mostra um protótipo do pressiômetro inicialmente desenvolvido e patenteado por Ménard.

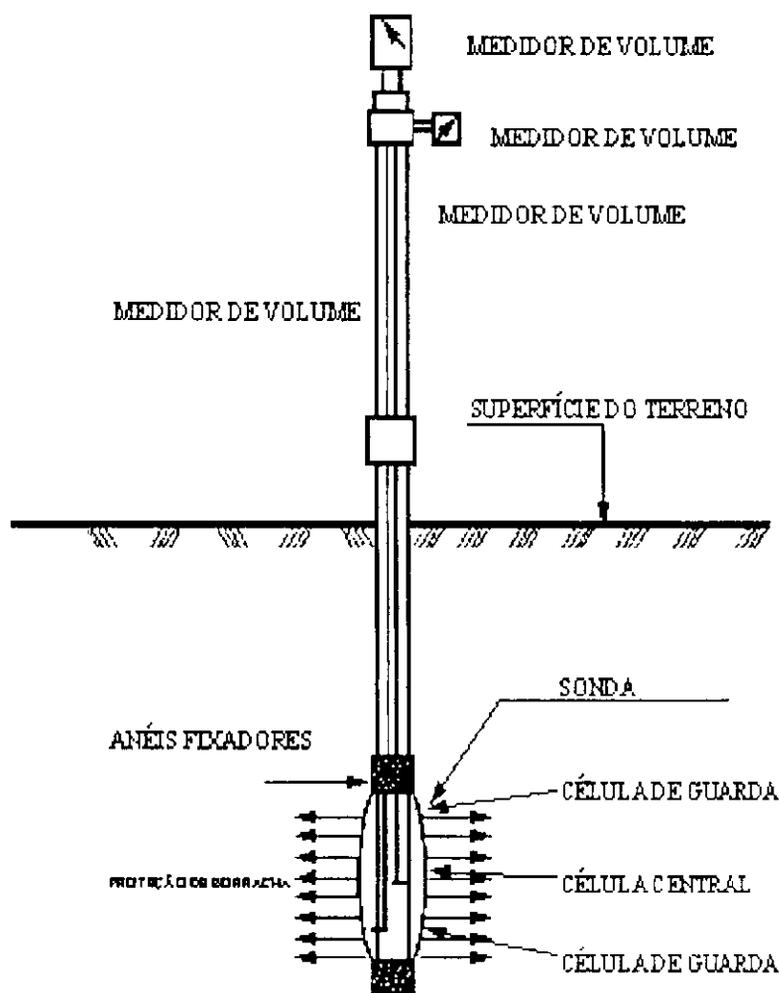


Figura 2.1 – Pressiômetro patentado por Ménard (Baguelin et alii., 1978).

Em 1957, na França, Menárd fundou a companhia “Les Pressiomètres Louis Ménard”, que era uma empresa que tanto fabricava como comercializava o pressiômetro por ele idealizado (Baguelin et alii, 1978). A partir desta empresa, o ensaio com tal equipamento tomou grande impulso e se espalhou rapidamente por toda a França. A partir desta época, tanto na comercialização quanto no uso do equipamento, surgiram vários estudos em todo o mundo com o propósito de melhorar as características do pressiômetro, no que diz respeito, principalmente, ao seu modo de inserção no solo, ponto de fundamental importância para se obter resultados confiáveis no ensaio pressiométrico. A Tabela 2.1 mostra, de maneira sucinta, a evolução do aparelho em todo o mundo.

Tabela 2.1 – Evolução do pressiômetro (adaptado de Cavalcante , 1997).

Ano/Autor	País	Versão Desenvolvida
1930 (Kögler)	Alemanha	Pressiômetro de Kögler
1957/ Ménard	França	Pressiômetro Ménard
1959/ Fukuoka	Japão	Pressiômetro de furo prévio para obtenção de valores de módulo lateral
1965/ Jézéquel	França	Pressiômetro auto – perfurante. (PAV)
1966/ Suyama	Japão	Pressiômetro de furo – prévio Elastômetro
1971/Wroth e Hughes	Inglaterra	Pressiômetro auto-perfurante CanKometro
1978/ Briaud e Shields	Canadá	Pressiômetro para projetos de Pavimentos Pencil
1978/ Instituto Russo de fundações e bases do subsolo (NIOSP)	União Soviética	Pressiômetro automático PA 108
1978/ Instituto de petróleo francês	França	Pressiômetro de investigações offshore (PAM)
1982/ Briaud et alii	Estados Unidos	Pressiômetro de furo prévio e auto perfurante (Texam)
1982/ Laboratório des Ponts et Chaussées	França	Pressio- penetrômetro para penetrações offshore rasas

2.2 - Tipos de Pressiômetros

Apesar de toda inovação e desenvolvimento tecnológico experimentado pelo pressiômetro desde sua invenção, basicamente três fatores funcionam como uma diferencial entre os aparelhos atuais. Estes fatores são: o tipo de sonda (se unicelular ou tricelular), o tipo de variável a controlar (se o volume ou a pressão) e, principalmente, a forma de

inserção da sonda no solo (inserção por pré-furo, inserção dinâmica, inserção estática, auto perfurante, etc).

2.2.1 - Pressiômetro: Tipo de Sonda e Parâmetros Controlados

2.2.1.1 - O Pressiômetro Briaud

O pressiômetro Briaud, também conhecido como pressiômetro de pavimentação, foi desenvolvido em 1978, no Canadá, pelo Engenheiro francês Jean Louis Briaud (Cavalcante, 1997).

O pressiômetro Briaud é um equipamento empregado para fazer medidas de rigidez do solo para a execução de pavimentos. Entretanto, também pode ser usado na determinação de parâmetros do solo para projetos de fundações superficiais. O equipamento é composto de uma sonda unicelular, uma unidade alimentadora e uma unidade de controle. Para o seu funcionamento, observa-se que utiliza o volume controlado, sendo a relação comprimento/diâmetro de sua sonda igual a 6,5. Desta forma, admite-se a expansão da sonda como de um cilindro de comprimento infinito, o que torna possível a aplicação dos conceitos da expansão de cavidade cilíndrica no citado aparelho. A Figura 2.2 mostra detalhes esquemáticos da sonda desenvolvida por Briaud. Na Figura 2.3 mostra-se uma foto do pressiômetro Briaud do tipo Pencell, pertencente a Área de Geotecnia da UFPB, em Campina Grande.

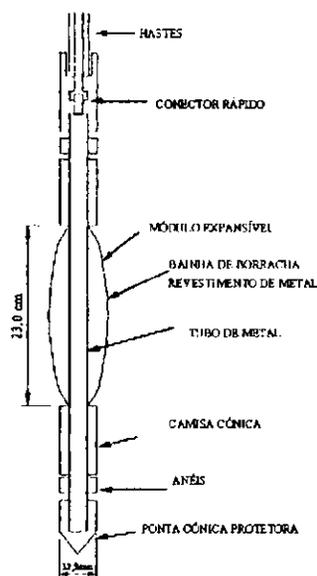


Figura 2.2 – Detalhes da sonda de Briaud (Briaud , 1992).

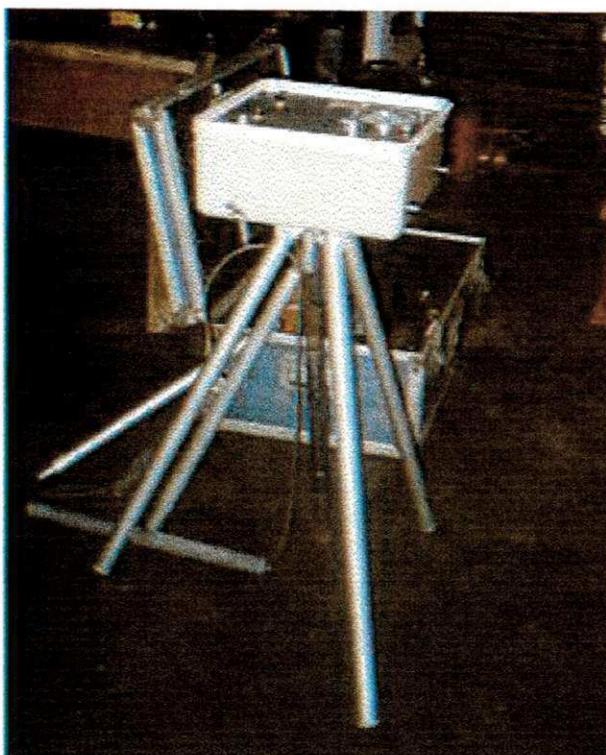


Figura 2.3 – Pressiômetro Pencil (Briaud ,1992).

2.2.1.2 - O Pressiômetro Ménard

O pressiômetro Ménard foi desenvolvido em 1955 pelo engenheiro francês Jean Louis Menárd (Baguelin et alii, 1978). Este equipamento é útil na determinação de parâmetros do solo em profundidades maiores que as do de Briaud. Sua sonda é composta de três células , sendo uma célula central e duas células de guarda. A célula central é pressurizada por água e as células-guarda são pressurizadas por gás nitrogênio (N_2). O equipamento citado é composto por uma unidade alimentadora, uma unidade de controle e uma sonda tricelular .

O ensaio é executado geralmente sob pressão controlada. A sonda tem um formato cilíndrico e a capacidade máxima de volume é 700cm^3 . A Figura 2.4 apresenta os detalhes das conexões do aparelho. Na Figura 2.5 mostra-se uma foto do equipamento completo que foi utilizado nesta pesquisa (pressiômetro Ménard do tipo GC).

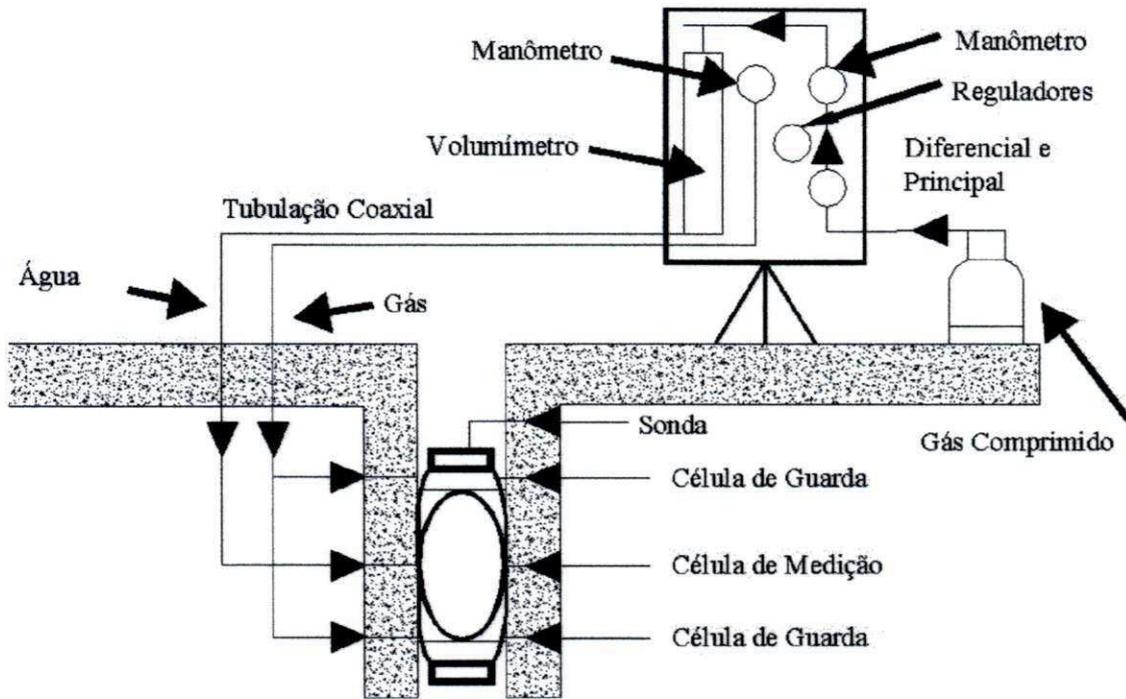


Figura 2.4 – Pressiômetro Ménard (Mántaras , 1995).

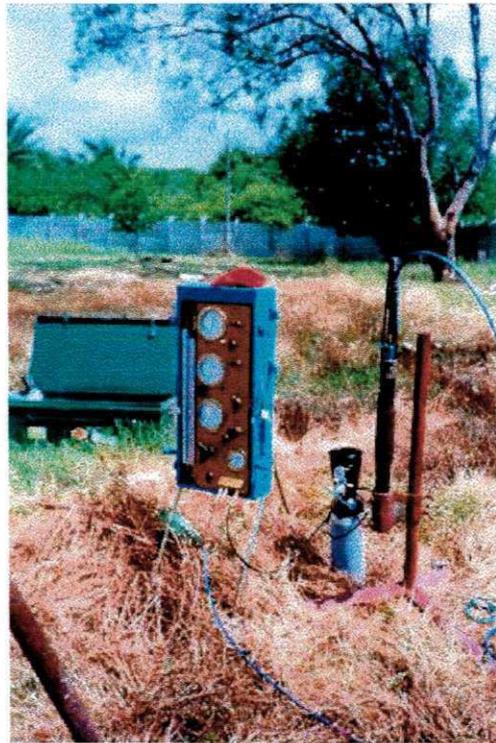


Figura 2.5 – Pressiômetro Ménard, tipo GC .

2.2.2 - Classificação dos Pressiômetros quanto ao Tipo de Inserção da Sonda

2.2.2.1 - Pressiômetro de Inserção em Pré-Furo (PBPMT)

Os pressiômetros de pré-furo são aqueles em que a sonda é introduzida no solo após um furo prévio ser escavado. O furo pode ser aberto por trados manuais ou mecânicos (perfuratrizes), ou ainda utilizando-se o equipamento de percussão de sondagem com SPT. A opção depende das condições locais do solo e das disponibilidades de equipamentos de perfuração.

Esse tipo de equipamento pode ser usado em qualquer tipo de solo e até em rochas brandas. Entretanto, a maior crítica que tal ensaio recebe é, sem dúvida, a execução do furo, pelo fato que até pequenas profundidades, pode-se controlar o diâmetro do furo executado, mas para grandes profundidades, pode-se ter grandes dificuldades. Em solos granulares saturados têm-se o agravante do desmoronamento das paredes do furo. Neste caso, usa-se a lama bentonítica como forma de evitar o desmoronamento das paredes do mesmo. Além de que, o pré-furo alivia as tensões horizontais e causa perturbações outras no solo, o que afeta sobremaneira o seu estado natural, podendo levar a resultados falseados. As Figuras 2.6 e 2.7 mostram detalhes de equipamentos que podem ser usados para abertura do furo que receberá a sonda.

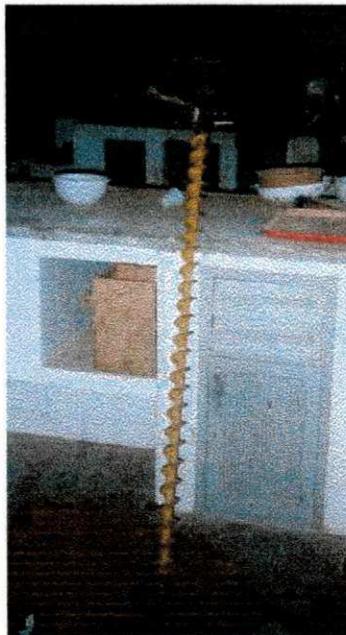


Figura 2.6 – Trados manual utilizado na pesquisa.

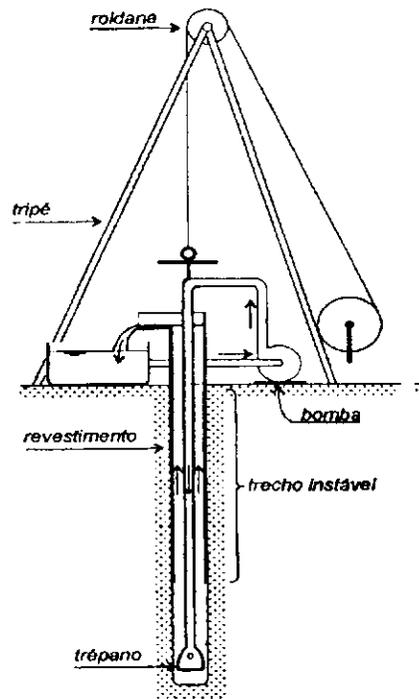


Figura 2.7 – Penetração com trépano, usado para grandes profundidades, (Velloso e Lopes, 1996) .

2.2.2.2 - Pressiômetro de Inserção Direta (cravação estática)

Trata-se de um processo de instalação da sonda diferenciado do anterior no que diz respeito à forma como a sonda é colocada no solo. Neste caso, pode-se fazer a inserção via máquina de cravação, que é um equipamento mecânico capaz de cisalhar o solo estaticamente, simplesmente empurrando a sonda solo abaixo.

Nesse processo, pode-se observar algumas vantagens e desvantagens. A principal desvantagem é o alto custo de execução do ensaio vinculado a dificuldade de locomoção do equipamento de cravação; outra dificuldade seria a necessidade de técnicos qualificados para a obtenção de ensaios de boa qualidade, além da compactação natural imposta ao maciço de terra que situa-se ao redor da sonda quando da penetração da mesma.

Todavia, as vantagens podem compensar, pois só o fato de não amolgar o solo tal qual o pré-furo e não ter problemas com desmoronamento ou alargamento do furo,

presume-se que se obtenham resultados mais confiáveis. O aumento da produtividade parece ser outro fator significativo, uma vez que torna-se desnecessária a retirada da composição de perfuração e colocação da sonda a cada metro perfurado. A Figura 2.8 mostra em detalhes uma máquina de cravação do tipo usado em ensaios de cone elétrico, que feitas adaptações, também pode ser usada para cravação estática da sonda pressiométrica.



Figura 2.8 – Máquina de cravação pertencente a UFCE.

2.2.2.3 - Pressiômetro de Inserção Direta (cravação dinâmica)

Esse processo de colocação da sonda no solo é baseado na conversão de energia potencial gravitacional em energia cinética, o que finalmente converte-se em energia de impacto empurrando as hastes para dentro do solo.

Esse tipo de inserção tem como diferença principal em relação ao pré-furo, o não alívio das tensões horizontais do solo e a despreocupação quanto ao diâmetro do furo. Todavia, causa a compactação do solo ao redor da sonda e daí a mudança de suas características naturais, pois toda a região afetada pela compactação dinâmica irá resultar

numa região, a princípio, com menor compressibilidade e uma resistência à ruptura provavelmente superior à natural.

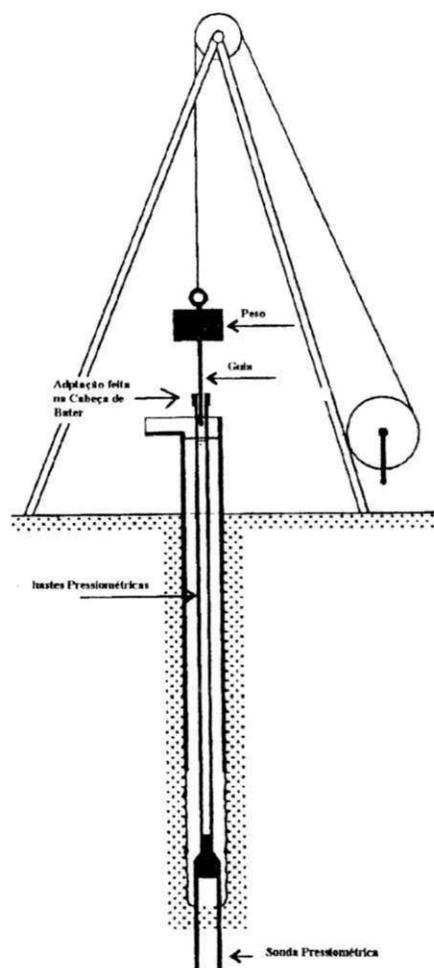


Figura 2.9 – Equipamento de SPT adaptado para cravação dinâmica (adaptado de Velloso e Lopes, 1996).

2.2.2.4 - Vantagens e Desvantagens do Ensaio

O ensaio pressiométrico é um dos poucos ensaios de campo que tem um forte embasamento teórico, respaldado por sólidos conceitos da teoria da elasticidade. Isto lhe

confere, com certas restrições, boas correlações entre valores previstos e valores medidos. As principais vantagens e desvantagens do ensaio estão apresentadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Vantagens e desvantagens do ensaio pressiométrico.

	Inserção por Pré- Furo	Inserção Dinâmica	Inserção Estática
VANTAGENS	<ul style="list-style-type: none"> • Embasamento teórico; • Facilidade de execução; • Tempo de resposta curto; • Coleta de amostras deformadas para exame tátil visual. 	<ul style="list-style-type: none"> • Embasamento teórico; • Rápido tempo de resposta; • Dispensa o uso de lama bentonítica em solos arenosos 	<ul style="list-style-type: none"> • Embasamento teórico • Rápido tempo de resposta ; • Dispensa lama bentonítica em solos arenosos.
DESvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Necessita de técnico especializado; • A influência dos parâmetros está ligado ao sucesso na execução do pré-furo; • Volume da sonda limitada à 700cm³; • Amolgamento do solo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependendo do tipo do solo, tem-se grandes dificuldades de cravação em solos muito resistentes. • Dificuldade de execução • Relação geométrica muito alta (L/D)=13,5. • Compactação do solo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependendo do tipo do solo, tem-se grandes dificuldades para cravar; • Alto custo; • Relação geométrica muito alta (L/D)=13,5; • Compactação do solo.

2.3 - Fundamentação Teórica

O pressiômetro é um dos equipamentos de campo que não depende apenas de experiências anteriores, pois tem uma fundamentação teórica bem consolidada, baseada na teoria da expansão de cavidades cilíndricas (Teoria da Elasticidade).

O ensaio pressiométrico consiste na expansão de uma cavidade cilíndrica, de comportamento elastoplástico, sendo que no início seu comportamento é essencialmente elástico. Na fase inicial (elástica) tem-se pequenas deformações e, na fase elasto-plástica plástica, tem-se grandes deformações.

Na prática, jamais pode-se ter uma sonda de tamanho infinito e expansão perfeitamente cilíndrica. Entretanto, o fato de se usar uma relação comprimento/diâmetro maior ou igual a 6,5 e o uso das células de guarda, tende a diminuir as deficiências causadas pela não obtenção de um cilindro infinito e a não obtenção de uma expansão perfeitamente cilíndrica.

Diminuídos os problemas acima citados, ao se efetuar o ensaio e ao aplicar-se a teoria da expansão de cavidades cilíndricas, deve-se levar em conta as hipóteses de que o maciço de terra é homogêneo e isotrópico, e que este não sofre perturbações excessivas. Estas simplificações podem se constituir em desvantagens do ensaio.

2.3.1 - Estudo das Tensões, Deformações e Equilíbrio

De acordo com a Figura 2.10, tem-se o valor da pressão inicial (p_0), aplicada à parede do furo que é igual à tensão horizontal "in situ" total, (σ_{ho}).

Considerando-se válida a teoria da elasticidade e admitindo-se a massa de solo homogênea, isotrópica e expansão perfeitamente cilíndrica, para o estudo das tensões atuantes usa-se o sistema de coordenadas cilíndricas.

Na direção vertical não tem surgimento de tensões (σ_z igual a zero) tendo-se apenas tensões radiais e circunferenciais (σ_x e σ_y , respectivamente). Ao se aplicar uma pressão " P " no furo e sendo $P > p_0$ (p_0 é pressão de repouso do solo), haverá uma expansão radial, onde o raio equivalente " r " terá um novo valor R , denotado por $R=r+u$, sendo u o deslocamento radial. A Figura 2.11 mostra com maiores detalhes o que foi abordado acima.

À deformação inicial irá ser somado um incremento igual a u . Para um aumento de pressão, a deformação será dada pela equação (2.2).

$$R=r+u \quad (2.2)$$

Como a deformação no eixo Z é nula ($\epsilon_z=0$), tem-se uma das direções principais eliminada do problema, logo:

$$\epsilon_\theta = u / r \tag{2.3}$$

$$\epsilon_r = du / dr \tag{2.4}$$

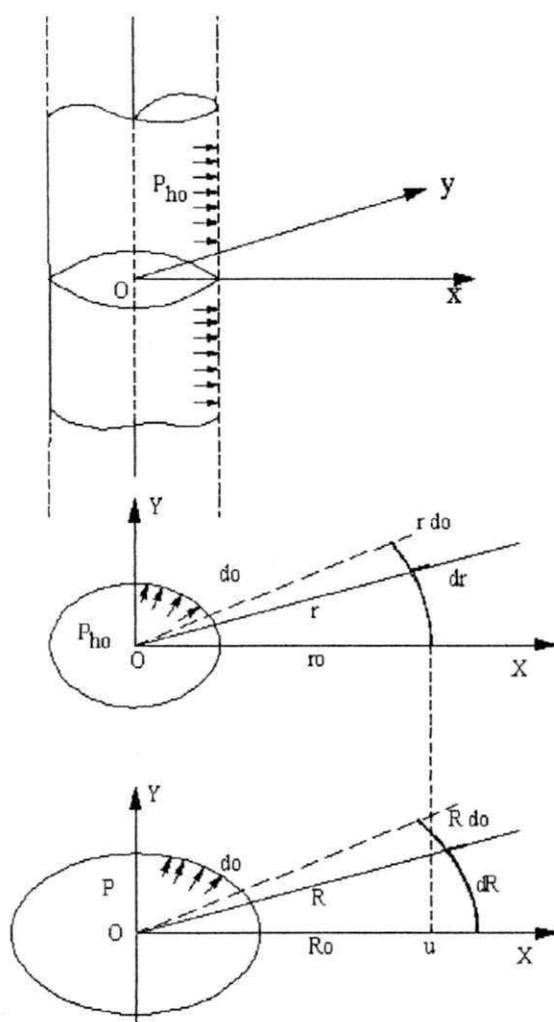


Figura 2.10 – Expansão de uma cavidade cilíndrica (Baguelin et alii, 1978).

Na Figura 2.12, mostra-se a deformação de um elemento inicialmente quadrado.

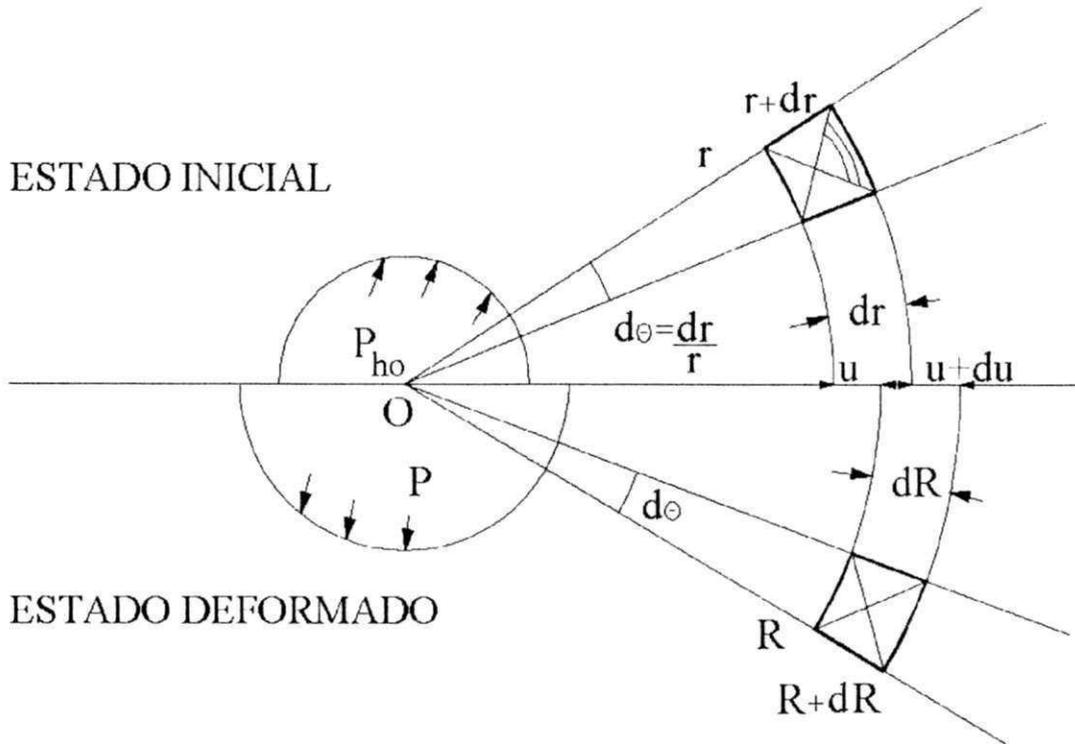


Figura 2.11 – Deformação inicial de um elemento quadrado (Baguelin et alii, 1978)

Segundo Baguelin et alii (1978), para grandes níveis de deformações, tem-se a seguinte equação:

$$\epsilon_{\theta} = \frac{1}{2} \left[\frac{(R^2 - r^2)}{r^2} \right] \tag{2.5}$$

Como as deformações na direção **Z** são nulas ($\epsilon_z=0$), as tensões nas direções **X** e **Y** (σ_x e σ_y), são tensões principais. A Figura 2.12 mostra as condições de equilíbrio na direção radial. Neste caso, onde admite-se pequenas deformações supõe-se que um ponto permanece na sua posição inicial durante a deformação da massa .

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{(\sigma_r - \sigma_{\theta})}{r} = 0 \tag{2.6}$$

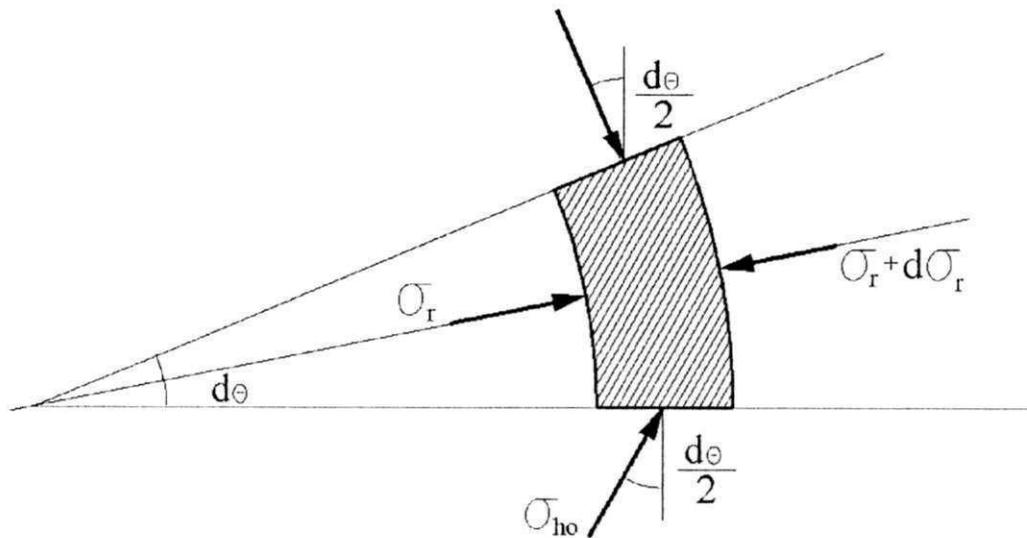


Figura 2.12 – Tensões em um elemento deformado (Baguelin et alii, 1978) .

Para pequenas deformações, as leis constitutivas (Lei de Hooke) para um material elástico linear são:

$$\varepsilon_r = \left(\frac{1}{E}\right) \cdot [\delta\sigma_r - \mu(\delta\sigma_\theta + \delta\sigma_z)] \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_\theta = \left(\frac{1}{E}\right) \cdot [\delta\sigma_\theta - \mu(\delta\sigma_r + \delta\sigma_z)] \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_z = \left(\frac{1}{E}\right) \cdot [\delta\sigma_z - \mu(\delta\sigma_r + \delta\sigma_\theta)] \quad (2.9)$$

Como $\varepsilon_z = 0$ (não existe deformação nesta direção), da Equação 2.9 tem-se:

$$\delta\sigma_z = \mu(\delta\sigma_r + \delta\sigma_\theta) \quad (2.10)$$

Usando-se a Equação 2.10 nas Equações 2.7 e 2.8 e eliminando $\delta\sigma_z$, tem-se:

$$\varepsilon_r = \left(\frac{1}{E}\right) \cdot [(1 - \mu^2)\delta\sigma_r - \mu(1 + \mu)\delta\sigma_\theta] \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_\theta = \left(\frac{1}{E}\right) \cdot [(1 - \mu^2)\delta\sigma_\theta - \mu(1 + \mu)\delta\sigma_r] \quad (2.12)$$

As equações 2.11 e 2.12 fornecem a descrição reológica da massa de solo considerada elástica linear. Utilizando-se as equações de compatibilidade 2.3 e 2.4, tem-se:

$$\left(\frac{1}{E}\right) \cdot [(1 - \mu)^2 \delta\sigma_r - \mu(1 + \mu)\delta\sigma_\theta] = -\frac{du}{dr} \quad (2.13)$$

$$\left(\frac{1}{E}\right) \cdot [(1 - \mu)^2 \delta\sigma_\theta - \mu(1 + \mu)\delta\sigma_r] = -\frac{u}{r} \quad (2.14)$$

Isolando-se o valor de $\delta\sigma_r$, nas Equações 2.13 e 2.14:

$$\delta\sigma_r = \frac{1}{(1 - \mu^2)} \left[-\frac{Edu}{dr} + \mu(1 + \mu)\delta\sigma_\theta \right] \quad (2.15)$$

$$\delta\sigma_r = -\frac{1}{\mu(1 + \mu)} \left[-\frac{Eu}{r} - (1 - \mu^2)\delta\sigma_\theta \right] \quad (2.16)$$

Igualando-se as Equações 2.15 e 2.16, tem-se;

$$\delta\sigma_\theta = -\frac{E}{(1 + \mu) \cdot (1 + 2\mu)} \cdot \left[\frac{\mu du}{dr} + \frac{u}{r(1 - \mu)} \right] \quad (2.17)$$

Da Equação 2.17, calculando o valor de $\delta\sigma_r$, a partir de $\delta\sigma_\theta$, tem-se:

$$\delta\sigma_{\theta} = -\frac{E}{(1+\mu)(1+2\mu)} \left[\frac{\mu du}{dr} + \frac{u}{r(1-\mu)} \right] \quad (2.18)$$

Utilizando-se as Equações 2.17 e 2.18 e substituindo-as na equação de equilíbrio 2.6, tem-se:

$$\frac{r^2 d^2 u}{dr^2} + \frac{r du}{dr} - u = 0 \quad (2.19)$$

Resolvendo-se a equação (2.19), o deslocamento u terá a forma :

$$u = Ar + \frac{B}{r} \quad (2.20)$$

Tomando-se as condições de contorno, tem-se:

$$\begin{aligned} u=0 & \quad \text{para } r=\infty & \text{então } A=0 \\ u=u_0 & \quad \text{para } r=R & \text{então } B=u_0 R \end{aligned}$$

Assim, as soluções para deslocamentos, tensões e deformações em qualquer posição da massa de solo será:

$$u = \frac{u_0 R}{r} = \frac{\varepsilon_c r_0 R}{r} \quad (2.21)$$

$$\varepsilon_r = \frac{u_0 R}{r^2} = \frac{\varepsilon_c r_0 R}{r^2} \quad (2.22)$$

$$\varepsilon_{\theta} = -\frac{u_0 R}{r^2} = -\frac{\varepsilon_c r_0 R}{r^2} \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_o = -\frac{u_0 R}{r^2} = -\frac{\varepsilon_c r_0 R}{r^2} \quad (2.24)$$

$$\delta\sigma_{\theta} = -\frac{Eu_0 R}{(1+\mu)r^2} = -\frac{E\varepsilon_c r_0 R}{(1+\mu)r^2} \quad (2.25)$$

Portanto, na parede do furo ($r=R$) a pressão radial total (σ_r) é a pressão P . A Equação 2.24, será;

$$P = P_{ho} + \frac{E\varepsilon_c r_o}{(1+\mu)R} \quad (2.26)$$

À medida que a pressão na cavidade do furo aumenta (acima de P_{ho}), pode-se determinar o módulo de deformação (E), partindo da expressão $2G=E/(1+\delta\alpha_f)$, ou seja:

$$E = \delta p R \frac{(1+\mu)}{\delta\varepsilon_c r_o} \quad (2.27)$$

$$2G = \frac{\delta PR}{\delta\varepsilon_c r_o} \quad (2.28)$$

Para pequenas expansões, o fator $\frac{R}{r_o}$ é igual a 1, então:

$$G = \frac{0.5\delta P}{\delta\varepsilon_c} \quad (2.29)$$

Para grandes deformações, tem-se:

$$P = P_{ho} + \frac{E}{(1+\mu)} \left[\frac{(R^2 - r^2)}{r^2} \right] \quad (2.30)$$

O solo apresenta um comportamento elástico no começo das solicitações; a partir de um ponto de escoamento, começa a deformar-se plasticamente. Assim, a teoria da elasticidade é utilizada para determinar as expressões que definem a pressão de fluência (P_F) e a pressão limite (P_L).

2.4.- Execução do Ensaio

De acordo com a classificação sugerida no Item 2.2, o pressiômetro é classificado quanto ao tipo de sonda, quanto ao modo de inserção da sonda e quanto ao tipo de variável a ser controlada no momento do ensaio (volume ou pressão). Quanto à última classificação, por exemplo, o pressiômetro de pavimentação (Briaud) tem o volume injetado na sonda de forma controlada, enquanto o pressiômetro Ménard tem como característica a pressão controlada. Todavia não se deve esquecer que a sonda tem volume finito, mas se deve trabalhar com o volume disponível da melhor forma a se aplicar pressões compatíveis com o sistema utilizado e dentro da capacidade de suporte (ruptura do solo) em estudo. O ensaio pressiométrico é geralmente executado de acordo com uma das duas normas, a ASTM D4719 (1987) e a NF P94 110 (1991).

Para uma estimativa inicial da pressão limite, Briaud (1992) faz sugestões conforme mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Tabela para a estimativa da pressão limite (Briaud, 1992).

SOLOS	P_L (kPa)	N_{SPT}	S_u (kPa)
Areia fofa	0-250	0-10	
Areia média	500-1000	10-30	
Areia muito compacta	1500-2000	30-50	
Areia pouco compacta	>2500	>50	
Argila mole	0-100		0-25
Argila média	200-300		25-50
Argila rija	400-800		50-100
Argila muito rija	800-1600		100-200
Argila dura	>1600		>200

2.4.1 – Calibrações

É comum à maioria dos equipamentos usados em investigações geotécnicas, in situ, procedimentos de calibração para levar em conta fatores intrínsecos a estes equipamentos.

No ensaio pressiométrico não é diferente, pois trabalha-se com duas variáveis pressão e volume e, como se sabe, parte da pressão aplicada ao solo é utilizada para expandir a sonda. Quanto ao volume de água injetado, alguma quantidade é utilizada durante a compressibilidade do equipamento, ou seja, com a compressibilidade da borracha da sonda e dos tubos de transmissão.

Ainda de acordo com as normas americana e francesa (ASTM D4719 (1987) e NF P94 110 (1991), respectivamente), as calibrações, tanto por perda de pressão como por perda de volume devem ser feitas antes, durante e depois da execução dos ensaios, para se garantir uma maior confiabilidade nessas calibrações.

2.4.1.1 - Calibração para Perda de Pressão

Na calibração para perda de pressão, o procedimento adotado segue indicações das normas citadas no Item 2.4.1, ou seja, a sonda é colocada ao ar livre, toda a tubulação é saturada e são aplicados dez estágios de pressão da ordem de 25kPa cada. Devem ser executadas pelo menos três calibrações para se ter um resultado mais confiável dos valores a ser descontados da pressão bruta aplicada. A Figura 2.13 mostra um gráfico típico da calibração para verificação de perdas de pressão em um pressiômetro Ménard.

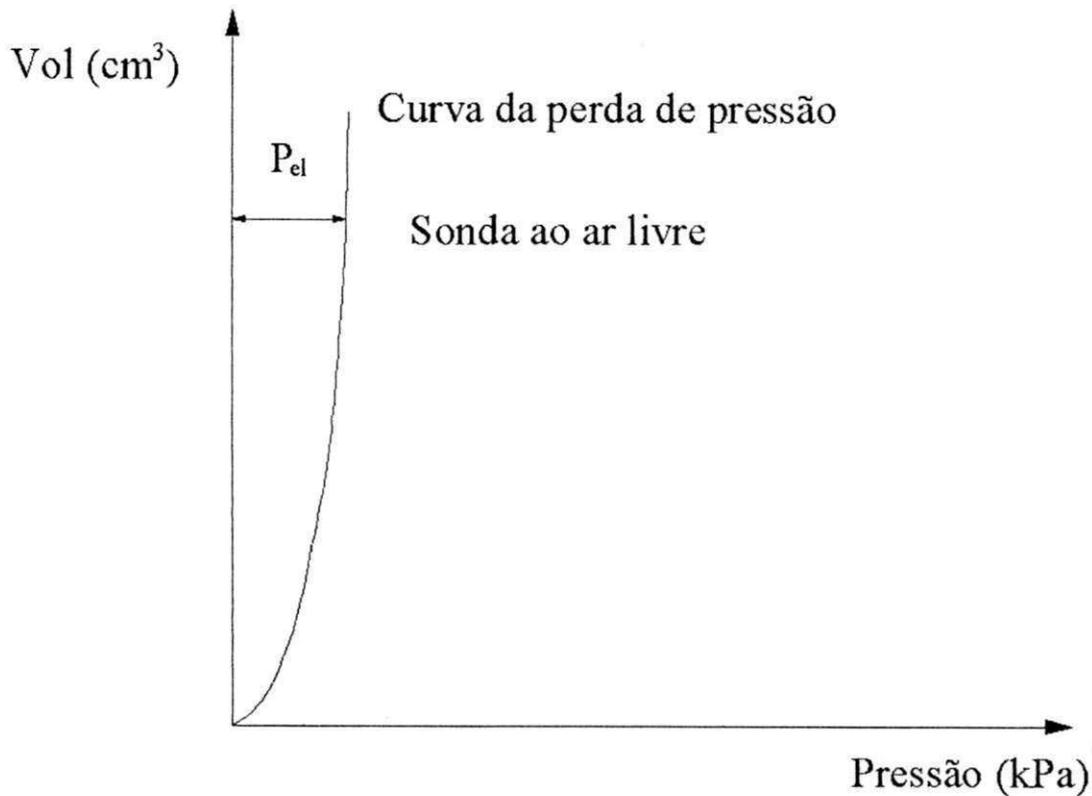


Figura 2.13 – Calibração para verificação da perda de pressão .

2.4.1.2 - Calibração para Perda de Volume

Na calibração para perda de volume, o procedimento adotado também segue indicações das normas citadas no Item 2.4.1, ou seja, a sonda é colocada dentro de um tubo de paredes espessas, toda a tubulação é saturada e são aplicados dez estágios de pressão da ordem de 250kPa cada. Devem ser executadas pelo menos três calibrações para se ter um resultado mais confiável dos valores a ser descontados do volume bruto medido. A Figura 2.14 mostra um gráfico típico da calibração para a perda de volume em um pressiômetro Ménard.

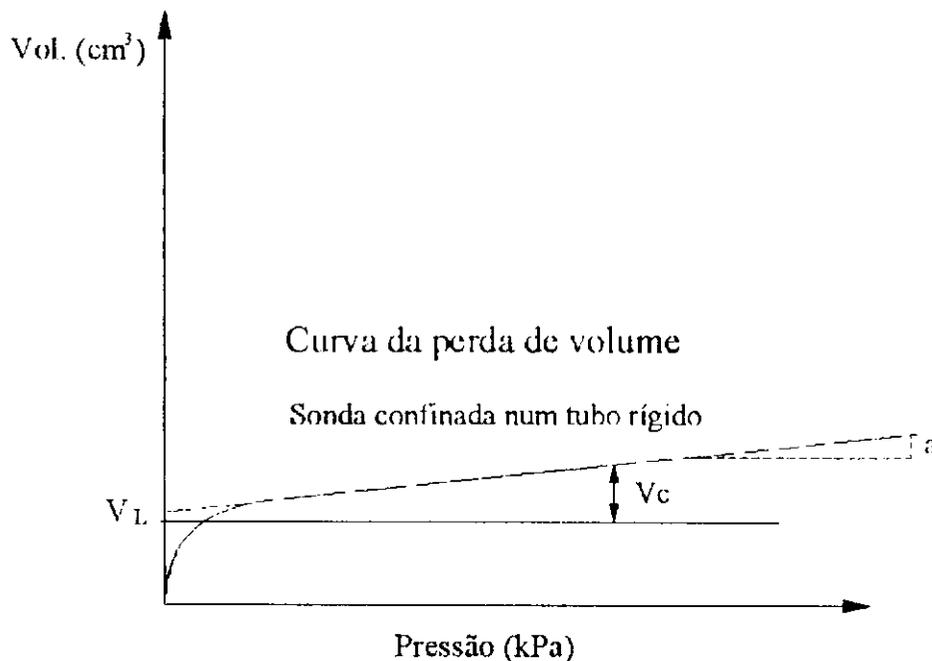


Figura 2.14 – Calibração para a verificação da perda de volume.

2.4.2 - Execução do Furo

A abertura do furo é um dos aspectos mais importantes na execução de um ensaio pressiométrico. O furo deve ser feito de tal forma que satisfaça à inequação do primeiro grau $1,03.D_{sonda} \leq D_{furo} \leq 1,20.D_{sonda}$, segundo a norma americana ASTM D4719 (1987). A Figura 2.15 mostra as características das curvas pressiométricas obtidas de acordo com a qualidade do furo que se executa na realização de um ensaio com escavação prévia.

Nos casos das inserções dinâmica e estática da sonda, a preocupação não é mais a preparação do furo, pois a sonda é inserida no solo dentro de um tubo contendo ranhuras laterais (laternée), o qual permite a expansão da sonda no momento da execução do ensaio. A preocupação agora é quanto a compactação do solo ao redor da mesma. Na inserção dinâmica tem-se o solo que fica abaixo e em torno da sonda sofrendo um processo de compactação dinâmica, podendo alterar as condições naturais do solo e, portanto, mascarar os parâmetros obtidos a partir de tal ensaio. Já na inserção estática, tem-se toda a tubulação de inserção cisalhando o solo, de tal forma a influenciar nos resultados obtidos pelo fato de

ter-se uma compressão estática do solo. Tais influências serão discutidas com maiores detalhes no Item 2.6, seguinte.

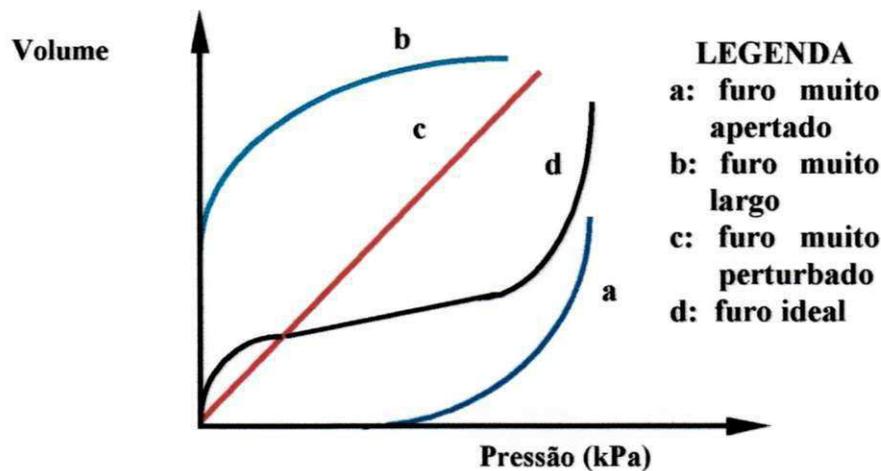


Figura – 2.15 – Características das curvas em função do furo

2.4.3 - Correção da Curva Pressão x Volume .

Obtidos os dados brutos em cada ensaio, devem ser usados os valores da calibração para perda de volume e de pressão para as devidas correções.

O volume corrigido e a pressão corrigida são obtidos segundo orientações das normas americanas e francesas. A Figura 2.16 ajuda a entender como obtém-se os valores líquidos de pressão e volume a partir dos valores brutos. Estas correções são expressas matematicamente pelas Equações 2.32 e 2.33 .

A pressão hidrostática é fator de fundamental importância, devido a diferença de nível entre o volumímetro , localizado geralmente na cota zero, e a sonda que se localiza na cota do ensaio. A pressão hidrostática é dada pela pressão de coluna d'água, entre volumímetro e sonda, expressa matematicamente pela Equação 2.31:

$$P_i = \gamma_w \cdot \Delta h \quad (2.31)$$

Sendo:

Δh = diferença de nível entre a sonda e o volumímetro;

γ_w = peso específico da água (10 kN/m³);

$$P = P_r + P_i - P_c; \quad (2.32)$$

Sendo:

P = pressão aplicada ao solo;

P_r = pressão lida na unidade de controle ;

P_i = pressão hidrostática (coluna de água entre a unidade de controle e a sonda) ;

P_c = pressão obtida pelo processo de expansão da sonda ao ar livre (calibração para perda de pressão).

$$V = V_r - V_c \quad (2.33)$$

Sendo:

V = volume realmente injetado na sonda ;

V_r = volume lido na unidade de controle;

V_c = volume devido às perdas com o sistema de compressibilidade.

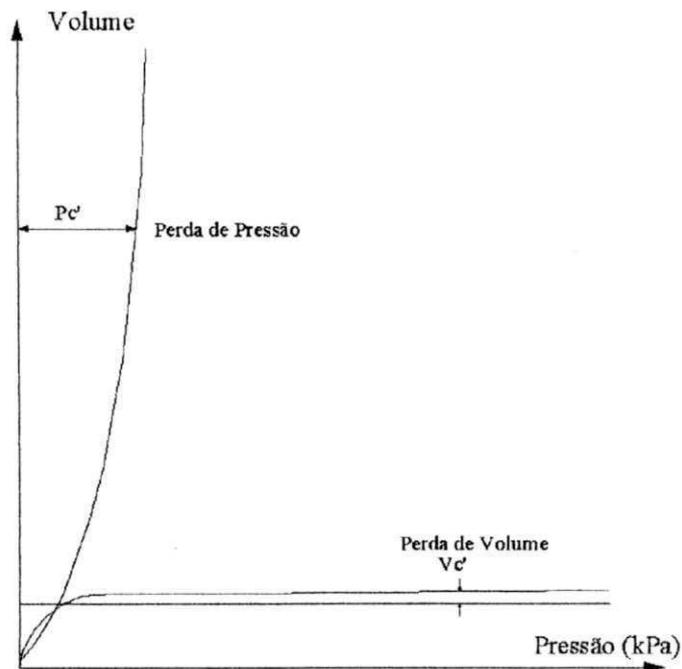


Figura 2.16 - Correção de volume e de pressão .

2.5 - Parâmetros Obtidos com o Ensaio Pressiométrico

2.5.1 - Módulo Pressiométrico (E_p)

O módulo pressiométrico é determinado no tramo pseudo-elástico (fase da curva pressiométrica onde ao retirar a pressão aplicada o solo volta ao seu estado de deformação inicial) da curva pressão versus volume, obtida e corrigida de acordo com as calibrações para perdas de volume e pressão. A Figura 2.17 mostra o tramo pseudo-elástico de uma curva pressiométrica ideal.

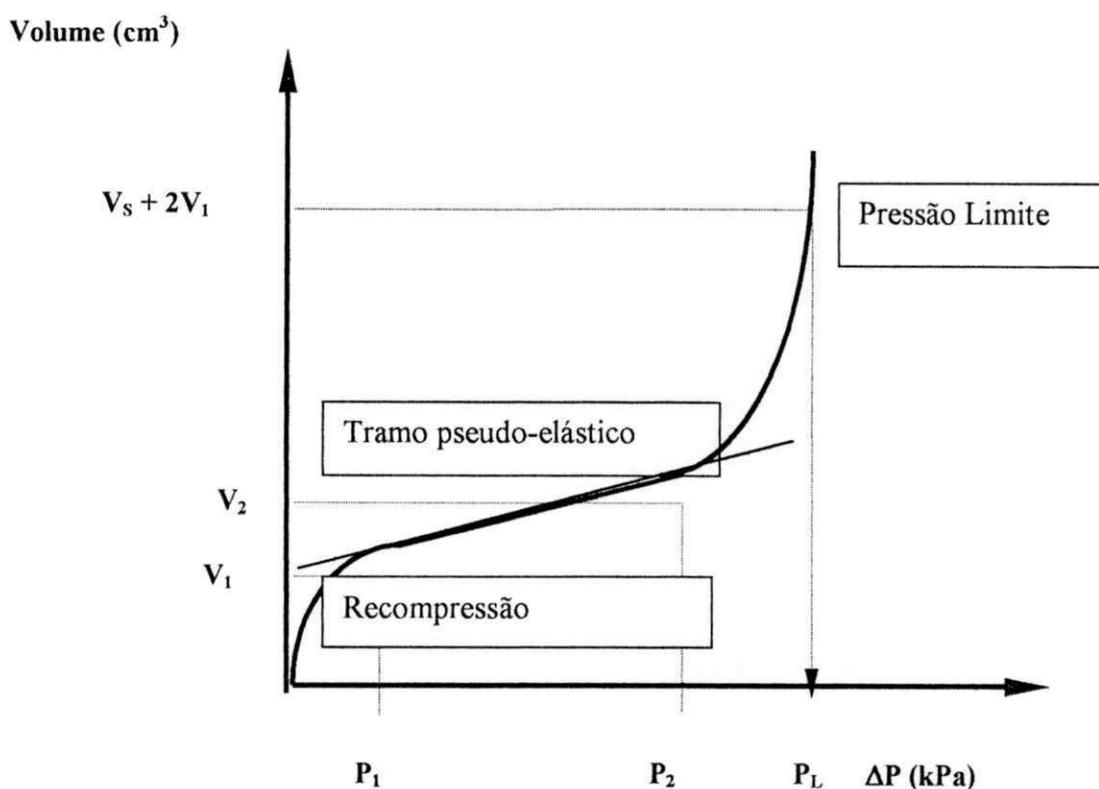


Figura 2.17 – Curva pressiométrica ideal .

O módulo pressiométrico de um solo é obtido por meio da teoria da expansão de cavidades cilíndricas e sua determinação é feita a partir do tramo pseudo-elástico da curva volume versus pressão, de acordo com a Equação 2.34.

$$E_p = 2(1 + \mu)V_m \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (2.34)$$

Sendo:

μ = coeficiente de Poisson;

V_m = volume médio da cavidade;

ΔP = variação de pressão do tramo pseudo-elástico;

ΔV = variação de volume do tramo pseudo-elástico;

Adotando-se o valor de 0,33 para o coeficiente de Poisson, conforme sugerem Ménard (1975) e a norma francesa, e o valor médio da sonda igual a $V_m = V_s + \frac{(V_1 + V_2)}{2}$,

tem-se:

$$E_p = 2,66 \left[V_s + \frac{(V_1 + V_2)}{2} \right] \left(\frac{P_2 - P_1}{V_2 - V_1} \right) \quad (2.35)$$

Vários pesquisadores tentaram relacionar o módulo pressiométrico (E_p) com o módulo de elasticidade do solo, dentre eles Ménard (1975), o qual considera que esta relação é função de um fator reológico (α). Este fator depende do tipo de solo e do seu grau de adensamento. Por meio da Equação 2.35, $\alpha = E/E_p$ e da Tabela 2.3, pode-se estimar essa relação.

Tabela 2.3 – Fatores reológicos (Ménard, 1975).

Tipo de solo	argila	silte	areia	Areia pedregulho
Pré-adensada	1,00	0,67	0,50	0,33
Normalmente adensada	0,67	0,50	0,33	0,25

2.5.2 - Tensão Horizontal no Repouso (σ_{ho})

A tensão horizontal no repouso (σ_{ho}) é a tensão correspondente ao ponto em que a sonda toca as paredes da cavidade do furo, logo após a fase de recompressão. O ponto de inflexão da curva pressiométrica corrigida é considerada uma boa estimativa da tensão horizontal (σ_{ho}). A Figura 2.18 mostra uma das maneiras para determinação de σ_{ho} .

A tensão horizontal no repouso deve ser estimada com bastante critério, pois se trata de um dos parâmetros que tem quantidade considerável de fatores intervenientes, a saber :

- i) o grau de amolgamento na parede do furo, o qual modifica sobremaneira a curva pressiométrica, principalmente o início da curva;
- ii) o diâmetro do furo para inserção da sonda, o qual pode ser muito maior ou muito justo, tendo-se neste caso uma modificação na determinação da pressão horizontal no repouso;
- iii) o alívio de tensões que ocorre após a execução do furo;

- iv) ensaio com pressão controlada, com pontos insuficientes antes da parte de recompressão do solo.

Quanto aos métodos de determinação da tensão horizontal no repouso (σ_{ho}), a literatura apresenta uma vasta quantidade. Todavia, a maioria deles são aplicados apenas ao pressiômetro auto-perfurante (Cavalcante, 1997). Dentre os que se prestam para aplicação com pressiômetro de pré-furo, destacam-se:

- i) método gráfico de Brandt (1978), o qual consiste em traçar retas que passem tangenciando trecho de recompressão e pelo trecho pseudo-elástico da curva pressiométrica corrigida. O ponto de interseção entre as mesmas. (a reta vertical que passa no ponto de encontro dessas duas tangentes) corresponde, no eixo das pressões, ao valor da tensão horizontal no repouso. A Figura 2.18 ilustra o método gráfico de Brandt (1978).
- ii) método de Briaud (1992). A partir da curva pressiométrica corrigida, determina-se o ponto de inflexão do trecho inicial dessa curva. Para acentuar mais este ponto, o gráfico é plotado em função das deformações relativas $\Delta R/R_0$ e suas correspondentes pressões.

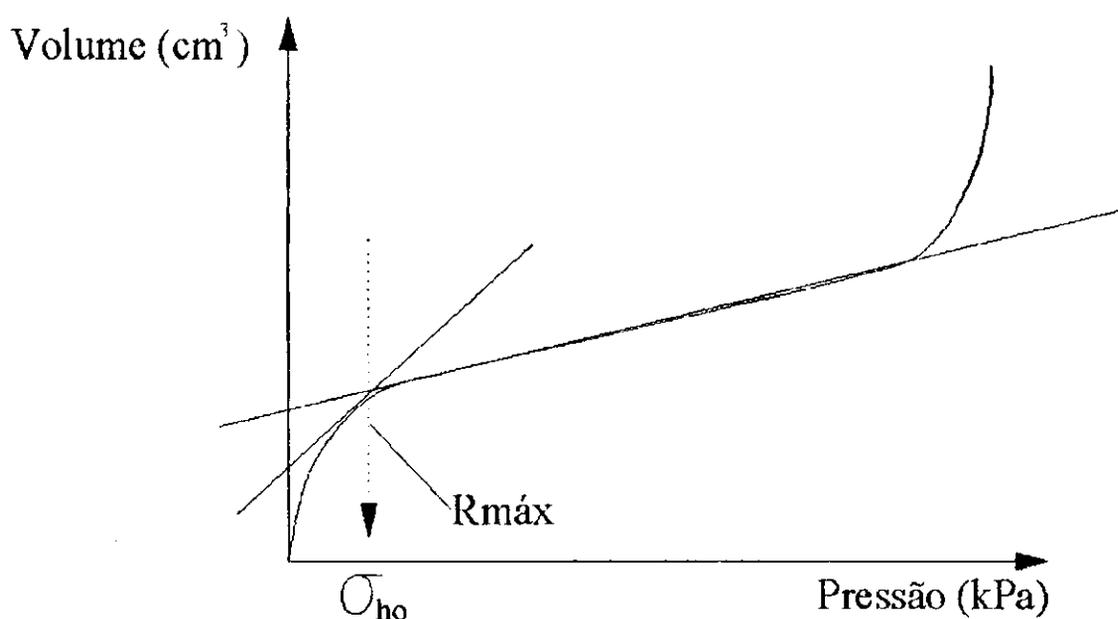


Figura 2.18 – Método gráfico de Brandt (1978).

2.5.3 - Coeficiente de Empuxo no Repouso (K_0)

A determinação do coeficiente de empuxo no repouso (K_0) é muito difícil, uma vez que sua determinação está diretamente ligada à deformação da tensão horizontal no repouso que, por sua vez, é influenciada por fatores como o amolgamento do solo, a boa definição do trecho de recompressão da curva pressiométrica corrigida, da poro pressão do solo, etc, além de fatores associados ao tipo do solo em estudo.

Segundo Caputo (1983) o coeficiente de empuxo no repouso (K_0) pode ser estimado de acordo com a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Coeficiente de empuxo no repouso (Caputo, 1983).

Solo	Coeficiente de empuxo no repouso (K_0)
Argila	0,7 - 0,75
Areia solta	0,45 - 0,50
Areia compacta	0,40 - 0,45

2.5.4 - Pressão Limite (P_L)

Após o trecho pseudo-elástico da curva pressiométrica corrigida, tem-se um tramo em que, mesmo com a manutenção do valor da pressão, tem-se um aumento contínuo do volume da sonda pressiométrica. Devido à limitação da sonda em termos de capacidade volumétrica, as normas francesa e americana respectivamente NF P 110 (1991) e ASTM D4719 (1987) convencionam o valor da pressão limite como sendo aquela necessária para que a sonda duplique seu volume inicial.

A pressão limite (P_L) é menos influenciada pelas perturbações sofridas pelo solo que o módulo pressiométrico (E_p). Entretanto, a relação entre o comprimento e diâmetro da sonda (L/D) afeta muito mais o valor da pressão limite (P_L) que o módulo pressiométrico (E_p), conforme análises de Ajaloyen & Yu (1996).

Existem vários métodos para se obter a pressão limite (P_L) do solo, muitos deles fazendo a extrapolação da fase plástica da curva, como por exemplo o de Baguelin et alii (1978) e Manassero (1989, citado por Nakahara, 1995).

Entretanto, a metodologia mais usada é a proposta pela norma americana ASTM D 4719 (1987), a qual propõe um gráfico onde no eixo das abscissas são colocados os valores das pressões e no eixo das ordenadas os valores do logaritmo na base 10, dos volumes dos três últimos pontos do ensaio. A resultante deste processo será uma reta ajustada. Deve-se então tomar como P_L o valor de pressão correspondente ao dobro do volume inicial da sonda. A Figura 2.19 mostra o método descrito acima.

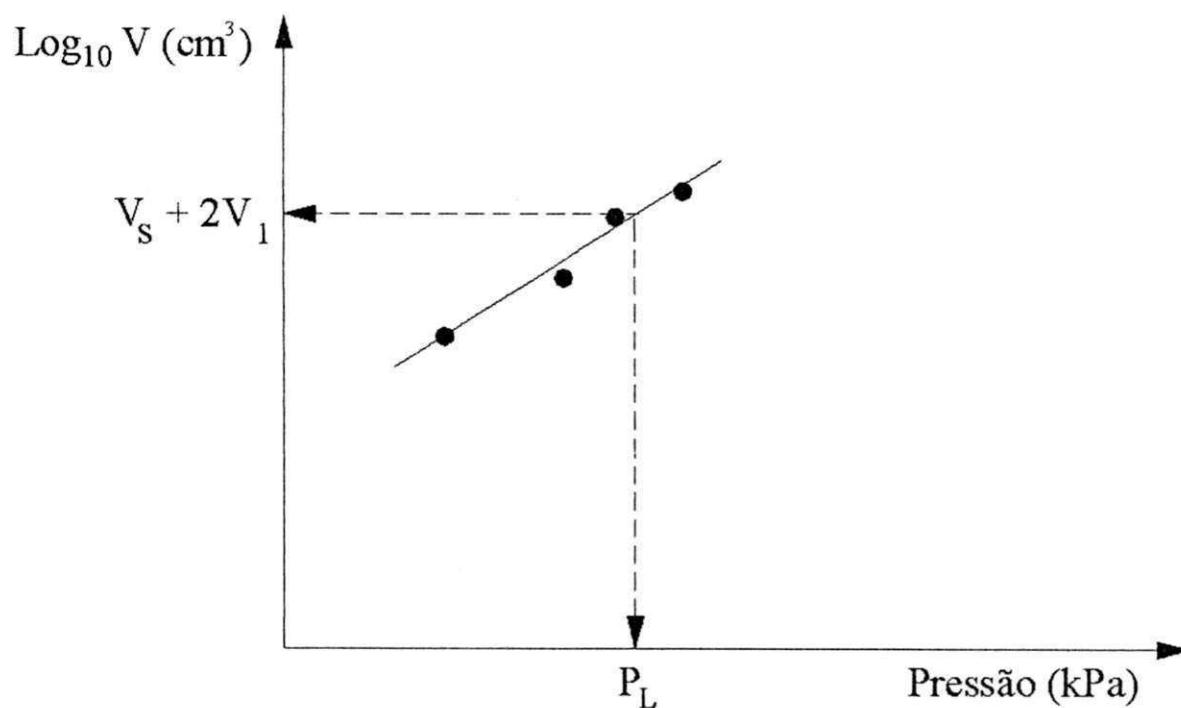


Figura 2.19 – Estimativa da pressão limite segundo a norma americana (ASTM D 4719, 1987).

2.5.5 - Pressão Limite Efetiva (P_L^*)

Este parâmetro é obtido matematicamente subtraindo-se da Pressão Limite (P_L) o valor da tensão horizontal estimada (σ_{ho}). A pressão limite efetiva é muito subjetiva, pois depende basicamente do grau de acurácia atribuído à tensão horizontal no repouso (σ_{ho}). A Equação 2.35 expressa matematicamente a pressão limite efetiva :

$$P_L^* = P_L - \sigma_{ho} \quad (2.36)$$

A pressão limite efetiva (P_L^*), representa uma pressão limite líquida, descontada a tensão horizontal. Este parâmetro é bastante usado no projeto de fundações, principalmente em solos arenosos, onde se considera o ensaio totalmente drenado. Tal parâmetro é muito afetado pela relação comprimento / diâmetro da sonda (L/D) do pressiômetro, chegando a variar até 20% do seu valor, quando a relação citada varia entre 5 e 10 (Briaud et alii 1992).

2.5.6 - Pressão de Fluência (P_F)

A pressão de fluência (P_F) é um parâmetro que pode auxiliar na avaliação da qualidade do ensaio pressiométrico, segundo Baguelin et alii (1978). É determinado no final da fase pseudo-elástica do ensaio pressiométrico. Este parâmetro é pouco usado em projetos de fundações e é determinado segundo a norma francesa, traçando-se em um gráfico nas ordenadas os valores correspondentes à variação de volume ($\Delta v = V_{60} - V_{30}$) e no eixo das abscissas, os valores das pressões correspondentes. Com isso, são geradas três retas que irão se cruzar em dois pontos, obtendo-se o ponto de tensão horizontal no repouso (σ_{ho}) e o ponto de pressão de fluência. A Figura 2.20 mostra como determinar a pressão de fluência.

Segundo Mántaras (1995), os pesquisadores Mori e Tajima (1964) publicaram uma comparação entre a pressão de fluência (P_F) e a tensão de sobre-adensamento para faixas de variações reduzidas de pressão.

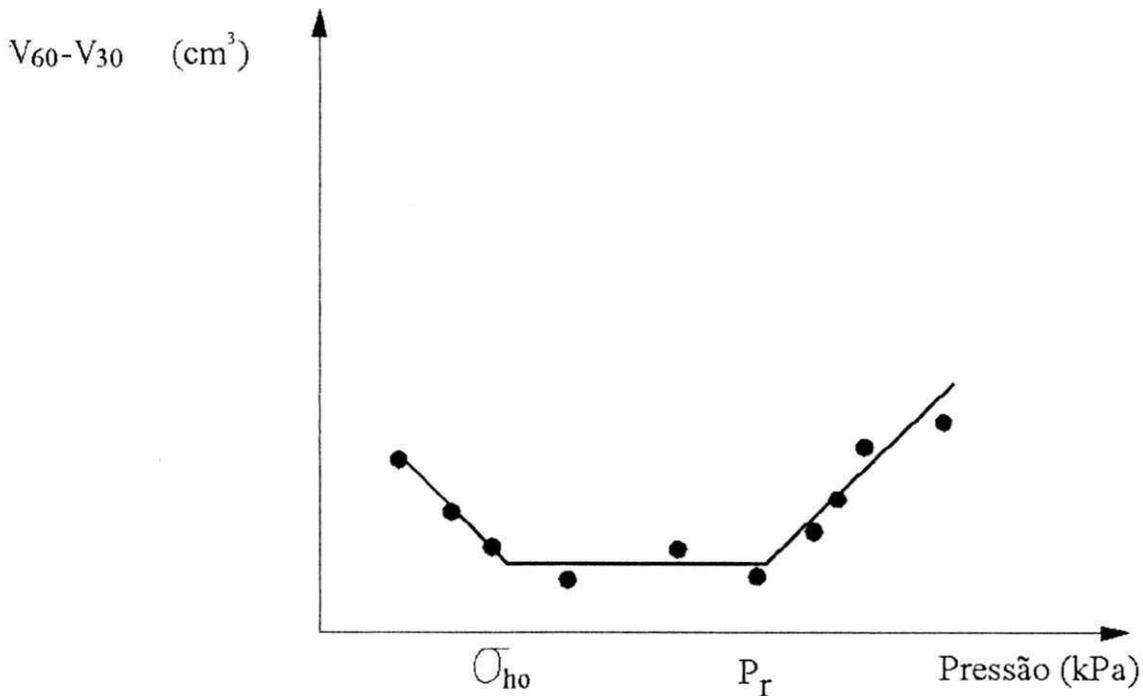


Figura 2.20 – Determinação da pressão de fluência .

2.5.7 - Ângulo de Atrito Interno Efetivo (ϕ')

Além da determinação do ângulo de atrito (ϕ') através de ensaios de cisalhamento direto ou triaxiais pode-se utilizar de correlações entre a pressão limite (P_L) e o ângulo de atrito efetivo (ϕ'). Dentre elas, pode-se citar:

i) Ménard (1970):

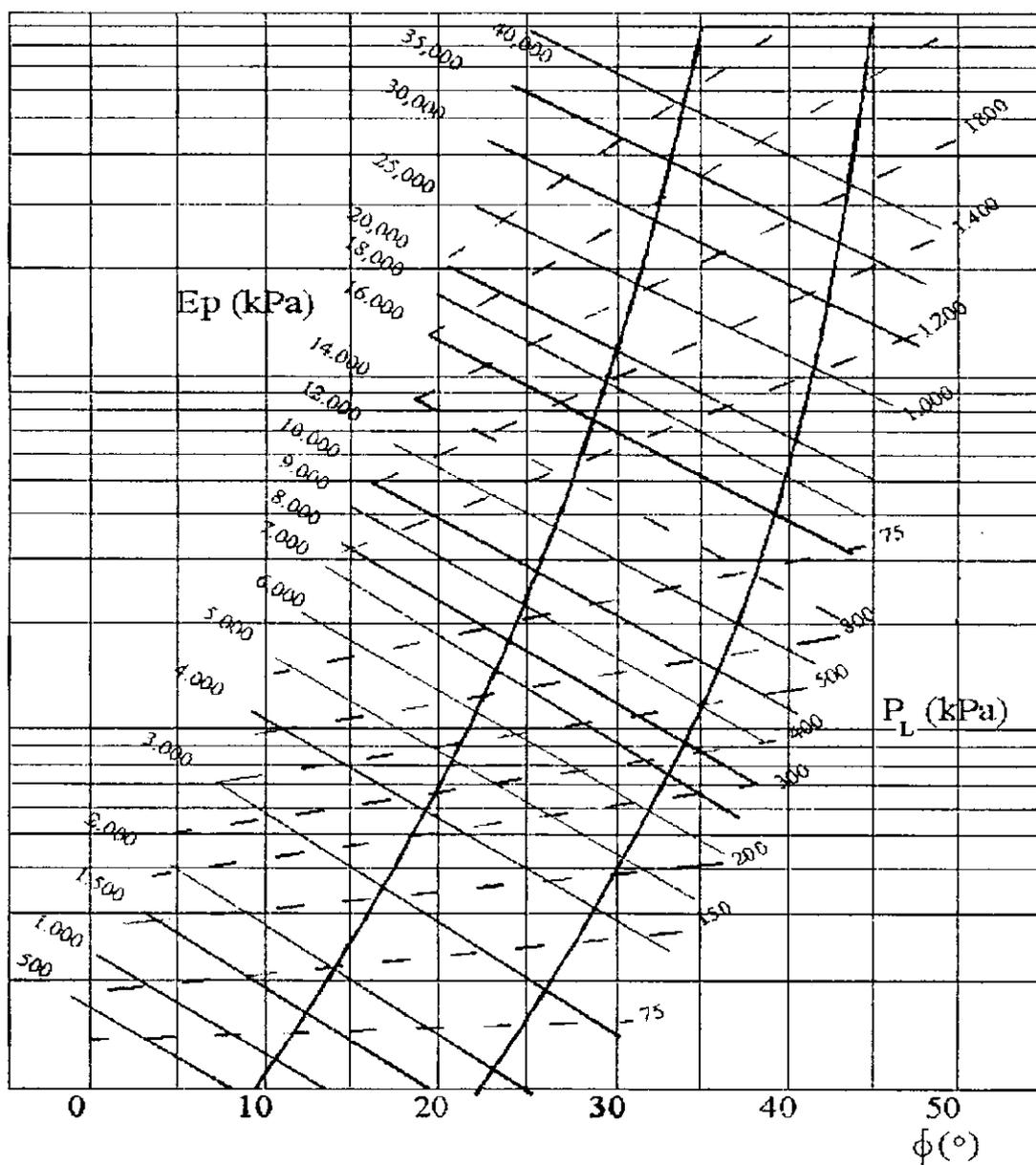
$$P_L^* = 2,5 \cdot 2^{\phi'} \quad (2.37)$$

sendo:

P_L = pressão limite;

$$Y = \frac{(\phi' - 2,4)}{4}$$

- i) Para a estimativa do ângulo de atrito interno efetivo (ϕ'), é necessário que entre com a Pressão Limite (P_L) e Módulo Pressiométrico (E_p) no Ábaco 2.1., segundo Calhoon (1970).



Ábaco 2.1 – Ábaco para determinação do ângulo de atrito pelo método de Calhoon (1970).

2.5.8 - Resistência ao Cisalhamento não Drenada (S_u)

Em argilas moles, devido ao pequeno período de tempo que dura a aplicação da pressão na sonda (cerca de 1min por estágio de pressão), o ensaio é considerado não drenado, visto que não existe tempo suficiente para que toda a poro-pressão seja dissipada na região do solo influenciada pela expansão cilíndrica. Tendo em vista tal aspecto, vários pesquisadores desenvolveram correlações para a estimativa da resistência não drenada do solo (S_u) via ensaio pressiométrico. Dentre elas pode-se citar:

$$i) \quad S_u = \frac{P_L^*}{\beta} \quad (2.38)$$

Sendo:

S_u = resistência ao cisalhamento não drenada;

P_L^* = pressão limite efetiva;

β = varia entre 5,5 e 6,5 (Briaud et alii, 1986).

Amar e Jezequel (1972) propõem β igual a 5,5, desde que P_L^* seja menor que 300kPa; caso contrário, ou seja P_L^* maior ou igual a 300kPa, deve-se usar a Equação (2.39).

$$S_u = \left(\frac{P_L^*}{10}\right) + 25 \quad (2.39)$$

Estudando uma vasta base de dados, Baguelin et alii (1978) propuseram a seguinte correlação empírica entre a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) e a pressão limite efetiva (P_L^*).

$$S_u = 0,67(P_L^*)^{0,75} \quad (2.40)$$

Entretanto, muitas outras correlações foram pesquisadas, todas trazendo valores aproximados da resistência não drenada do solo.

Vale salientar que estas correlações surgiram da solução fechada apresentada na Equação 2.41, segundo Baguelin et alii (1978).

$$P_L = \sigma_{ho} + S_u \left[1 + \ln\left(\frac{G}{S_u}\right) \right] \quad (2.41)$$

sendo:

P_L = pressão limite;

S_u = resistência ao cisalhamento não drenada;

G = módulo de elasticidade cisalhante;

σ_{ho} = tensão horizontal do solo.

2.5.9 -Identificação do Tipo de Solo por Intermédio de Dados Pressiométricos

Além da determinação dos parâmetros do solo mais ligados a projetos de fundações ver Clarke (1995), o ensaio pressiométrico também pode ser útil na identificação do tipo de solo ensaiado.

As relações E_p/P_L^* e E_p/P_L , em conjunto com outras características, como por exemplo, a identificação tátil-visual no momento da execução do furo (em caso de pré-furo) podem dar uma indicação do tipo de solo (Ménard, 1975; Briaud, 1992; Briaud et alii, 1983; Mehta, 1989 e Clarke, 1995).

Ménard (1975) sugere que a identificação seja acompanhada de um exame tátil-visual do material extraído quando do pré-furo. Briaud (1992) comenta que a forma da curva pressiométrica pode indicar se o solo se trata de uma argila ou de uma areia, uma vez que nas argilas se tem uma ruptura bem definida, enquanto que em areias isto não acontece. As Tabelas 2.5 e 2.6 apresentam correlações entre o módulo pressiométrico e a pressão limite, associadas ao tipo de solo.

Tabela 2.5 – Identificação do solo por meio da relação E_p/P_L (Briaud, 1992).

Tipo de Solo	E_p (kPa)	P_L (kPa)	E_p/ P_L
Lama ou turfa	200 – 1500	20 – 155	10
Argila mole	500 – 3000	50 – 300	10
Argila média	3000 – 9000	300 – 800	10
Argila rija	9000 – 40000	600 – 2000	13 – 20
Argila muito rija	50000 – 60000	600 – 4000	8 – 15
Areia siltosa e fofa	500 – 2000	100 – 500	5 – 4
Silte puro	2000 – 10000	200 – 1500	10 – 6,7
Areia e pedregulho	8000 – 40000	1200 – 5000	6,7 – 8
Areias sedimentares	7500 – 40000	1000 – 5000	7,5 – 8
Pedra calcária	80000 – 2000000	3000 - > 10000	26,7 - > 2000
Aterros jovens	500 – 5000	50 – 300	10 – 16,7
Aterros velhos	4000 - 15000	400 - 1000	10 - 15

Tabela 2.6 – Identificação do solo por meio da relação E_p/P_L^* (Briaud, 1992).

ARGILA					
Tipo	Mole	Média	Rija	Muito Rija	Dura
P_L^* (kPa)	0 - 200	200 - 400	400 - 800	800 - 1600	>1600
E_p (kPa)	0 - 2500	2500 - 5000	5000 - 12000	12000 - 25000	>25000
AREIA					
Tipo	Fofa	Compacta	Densa	Muito Densa	
P_L^* (kPa)	0 - 500	500 - 1500	1500 - 2500	>2500	
E_p (kPa)	0 - 3500	3500 - 12000	12000 - 22500	>22500	

2.6 - Fatores que Influenciam os Valores do Módulo Pressiométrico (E_p) e da Pressão Limite (P_L)

2.6.1 - Geometria da Sonda

A geometria da sonda tem uma grande influência na pressão limite (P_L), conforme observado por Ajoloyan & YU (1998) e, como já citado por outros autores, constata-se um aumento de tal parâmetro com a diminuição da relação L/D . Em relação ao módulo pressiométrico (E_p), a geometria não tem uma grande influência. Na Figura 2.21 estão representadas as sondas utilizadas na campanha de ensaios.

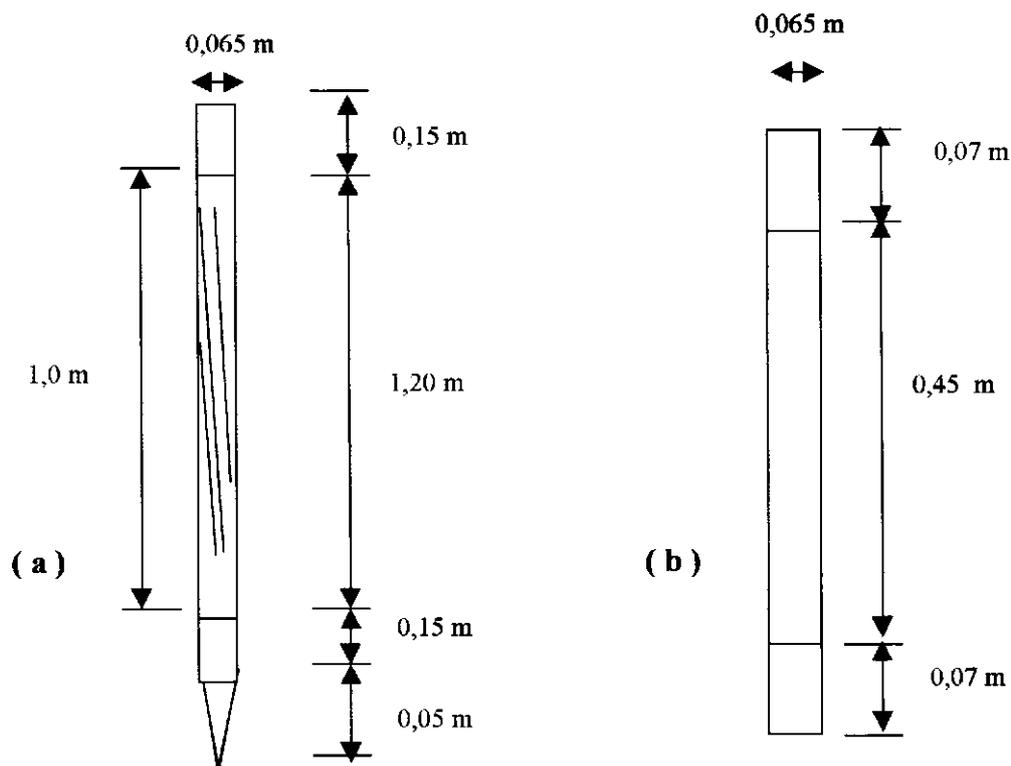


Figura 2.21 – (a) : Sondas de inserção direta (cravação dinâmica); (b): Pré-Furo

2.6.2 - Tipo de Inserção da Sonda

2.6.2.1 - Inserção em Pré – Furo

Na inserção em pré-furo, por maior cuidado que se possa ter, ao abrir-se o furo, para a posterior introdução da sonda pressiométrica, haverão dois fatores que poderão

comprometer indesejavelmente a qualidade dos parâmetros geotécnicos obtidos: o amolgamento provocado pelo furo e o alívio de tensões horizontais que irá sofrer toda a região ao redor da sonda. Na inserção em pré-furo, não há como evitar totalmente esses danos ao estado natural do solo. Entretanto, pode-se com muito cuidado amenizar os seus efeitos.

A Figura 2.22 apresenta a região ao redor da sonda supostamente amolgada. Tem-se nesta região toda uma massa de solo sujeita a um alívio de tensões horizontais e, supostamente, haverá um aumento no índice de vazios deste solo, com uma conseqüente diminuição da pressão limite (P_L) e aumento no módulo pressiométrico (E_p).

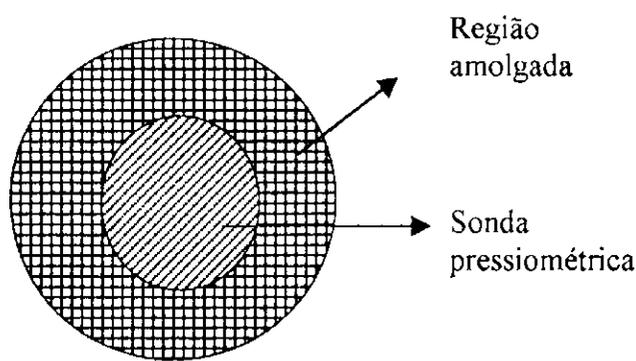


Figura 2.22 Região amolgada pelo pré-furo.

2.6.2.2 - Inserção Direta (cravação dinâmica)

Quando a sonda é colocada de maneira dinâmica, são provocadas vibrações em torno da região do furo influenciada pela penetração e o deslocamento de algumas partículas que se encontram em torno dessa região. Com isto, a região afetada sofrerá uma compactação (Poulos & Davis, 1980) e, conseqüentemente, apresentará uma diminuição na compressibilidade e, valores estimados de E_p maiores do que os estimados no pré-furo. Em relação à pressão limite (P_L), a modificação do estado natural (compactação), provavelmente não irá modificar significativamente este parâmetro, visto que a ruptura do solo ocorre em estado posterior ao estado elástico.

Segundo Meyerhof (1964), o efeito da compactação em solos arenosos é intensificado na ponta do elemento penetrante, sendo tal efeito diminuído partir da mesma no sentido descendente, como mostra a Figura 2.23.

Ainda segundo o estudo citado acima, a região de influência da compactação é a seguinte:

Areias fofas (densidade em torno de 17%)

- 3,0 a 4,0 vezes o diâmetro abaixo da ponta do elemento penetrante;
- 2,5 a 3,5 vezes o diâmetro no sentido lateral do elemento penetrante;

Areias compactas (densidade em torno de 34%)

- 3,0 a 4,5 vezes o diâmetro abaixo da ponta do elemento penetrante;
- 4,5 a 5,5 vezes o diâmetro no sentido lateral do elemento penetrante.

Os quadros ilustrados na figura contém os valores do ângulo de atrito em função da faixa de localização.

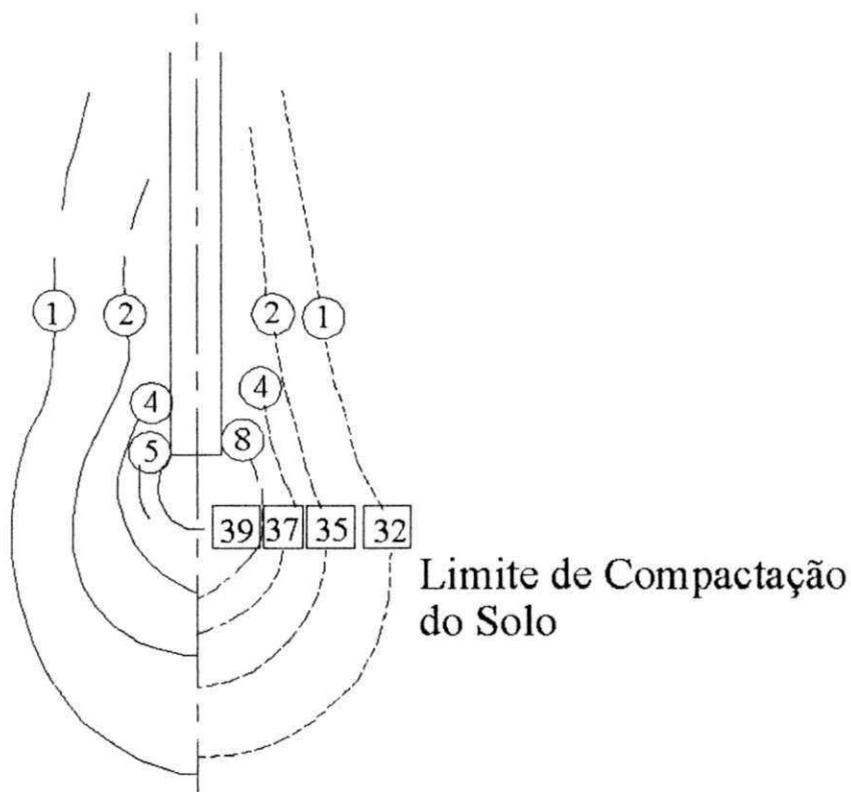


Figura 2.23- Região de influência da compactação (Meyerhof, 1959; citado por Poulos & Davis, 1980).

2.6.2.3 - Inserção Direta (cravação estática)

Quando a sonda é colocada estaticamente, haverá uma compressão da área de influência e o solo será cisalhado. Entretanto, a compacidade do solo não é muito afetada como na dinâmica, visto que, espera-se que o rearranjo na estrutura do solo afetado seja pequeno. Portanto, espera-se que o valor estimado do módulo pressiométrico (E_p) e da pressão limite (P_L) estejam um pouco acima dos valores encontrados com o pré-furo e um pouco abaixo dos valores da inserção dinâmica. Ao inserir-se uma sonda no solo, são formadas regiões influenciadas pelo processo de inserção. Segundo Drucker et alii (1951) a perturbação provocada na cavidade do solo em inserção estática é iniciada no ponto de raio zero e se estende para as zonas A e B, como mostrado na Figura 2.24.

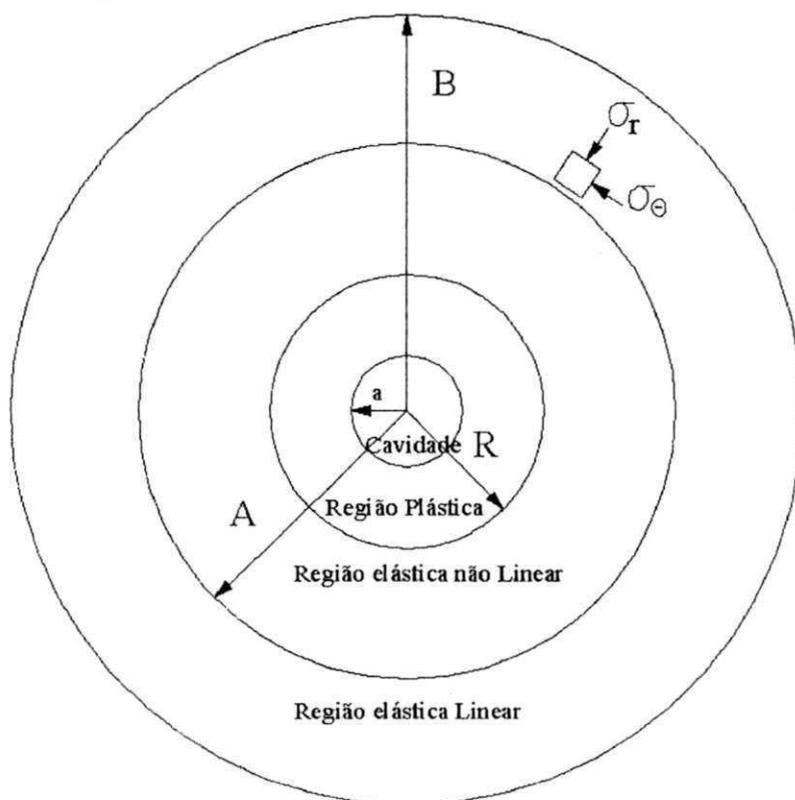


Figura 2.24 – Região de influência de uma cravação estática (Drucker, 1959; citado por Salgado et alii, 1997).

2.7 - Padronização do Ensaio Pressiométrico

A padronização do ensaio pressiométrico obedece basicamente a dois requisitos: a preparação e colocação no solo, e a execução do ensaio. Em relação ao primeiro item, não há uma regra geral. No caso do pré-furo deve ser executado com cuidado para evitar o alargamento e o amolgamento excessivos, e também a execução de um furo com diâmetro menor que o da sonda. Entretanto, existem algumas sugestões práticas como as de Briaud e Gambin (1984), conforme apresentado no Quadro 2.2.

Quanto à técnica de execução do ensaio, grande parte dos procedimentos tem sido relativos ao pressiómetro Ménard, mas existem outras técnicas para os outros tipos de pressiómetros. Briaud et alii (1986) publicaram várias recomendações visando padronizar a execução de ensaios pressiométricos.

A norma americana ASTM D 4719 (1987) foi publicada em setembro de 1987. A publicação refere-se apenas ao pressiómetro tipo Ménard.

A norma francesa NF P94 110 (1991) foi publicada em dezembro de 1989 para ensaios realizados com sondas tricululares e pressão controlada.

Quadro 2.2 – Sugestões de Briaud (Briaud et alii, 1986).

Sugestões Gerais de Briaud et alii (1992) para Execução do Ensaio Pressiométrico

1. Recomenda-se uma relação geométrica (L/D) de 6,5 devido a influência da mesma na pressão limite (P_L) e módulo cisalhante (G);
2. O ensaio deve ser executado até a duplicação do volume inicial da sonda em 10 minutos : 10 incrementos de pressão de 1 minuto (tensão controlada), ou 40 incrementos de 15 segundos(volume controlado);
3. Para a correção de perda de volume , a sonda deve ser colocada dentro de um tubo de aço de diâmetro $1.005 D$, sendo D o diâmetro da sonda, e calibrá-la em 10 incrementos de pressão de 1 minuto cada. O volume zero da sonda será definido como o volume que torne possível deslizá-la para fora do tubo com as mãos . O furo de sondagem é então calibrado pelo volume do tubo e não pelo volume da sonda;
4. Os resultados devem ser plotados com “pressão nas paredes da cavidade versus aumento relativo no raio da sonda”, pois este processo permite comparar qualquer dado pressiométrico e calcular parâmetros sem qualquer informação adicional sobre a sonda.

2.8 - Modelagem Numérica

O comportamento do solo exibido através de uma curva pressiométrica possui três etapas: no final da etapa de recompressão, tem-se a tensão horizontal no repouso (σ_{ho}); na fase elástica (linearidade pressão-volume), quem predomina é o módulo pressiométrico (E_p) e na fase plástica, o parâmetro de importância destacada é a pressão limite (P_L). Na Figura 2.27 apresentam-se todas as fases comentadas de um ensaio pressiométrico.

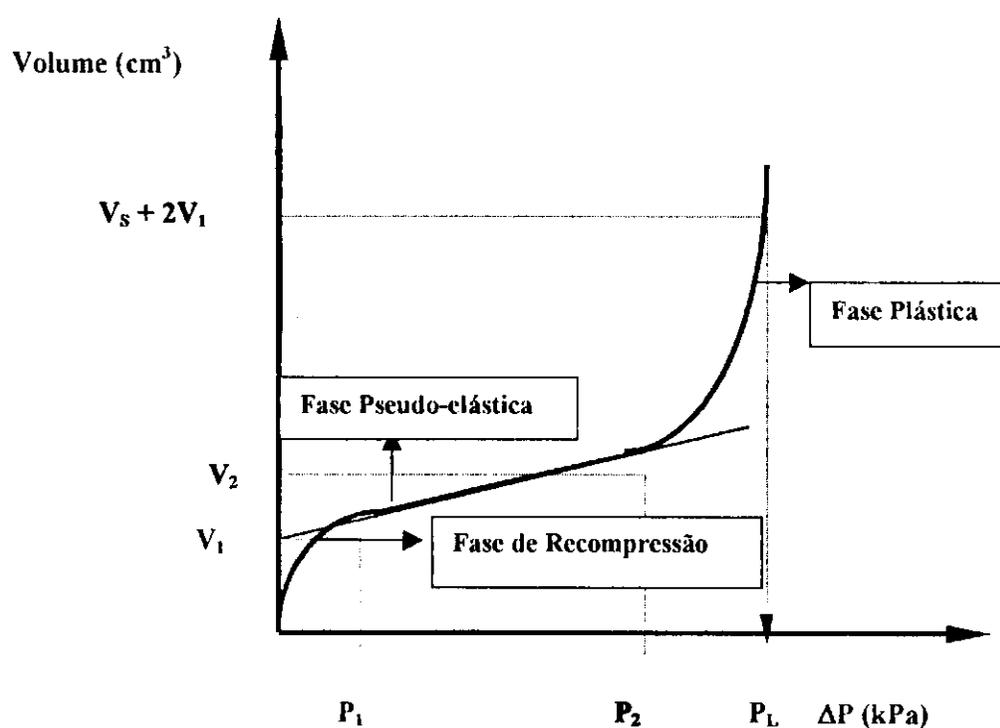


Figura 2.25 – Fases do ensaio Pressiométrico .

Vários pesquisadores relacionaram a expansão da sonda pressiométrica com a expansão de uma cavidade cilíndrica de comprimento infinito dentro de uma massa de solo ou rocha. Com isto foi possível a modelagem matemática da curva pressão versus expansão e, desta forma, a obtenção das propriedades do solo. Os principais modelos desenvolvidos

foram Gibson e Anderson, 1961; Palmer, 1972; Carter et alii, 1986; Jefferies, 1988; Yu e Houlsby, 1991.

Entre os modelos citados, o de Carter & Yeung (1985) leva em consideração as grandes deformações em solos dilatantes, mediante o emprego de métodos numéricos. Ainda em relação às grandes deformações em solos dilatantes, Yu & Houlsby (1991) desenvolveram formulações analíticas fechadas.

As hipóteses adotadas pelas duas formulações citadas acima (Carter & Yeung, 1985 e Yu & Houlsby, 1991) foram as seguintes:

- a cavidade se expande em um meio infinito, homogêneo e isotrópico;
- a expansão tem características de axissimetria (estado de deformação apenas radial e circunferencial);
- o solo encontra-se inicialmente no estado hidrostático de tensões: $(\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P_0)$, sendo: σ_1, σ_2 e σ_3 as componentes das tensões principais;
- solo coesivo-friccional, onde a resistência ao cisalhamento é função dos parâmetros (c) e (ϕ) , simultaneamente;
- a fase elástica obedece à lei de Hooke;
- ruptura segundo o critério de Mohr-Coulomb;
- na fase plástica o material pode ter comportamento dilatante, seguindo uma lei constante, representada pelo ângulo de dilatância (ψ) ;
- atingida a plastificação, existe uma interface a partir da qual o material continua em estado elástico.

No presente trabalho serão apresentadas as seguintes formulações: Gibson & Anderson (1961), Carter & Yeung (1985) e Yu & Houlsby (1991). No Apêndice 4 serão apresentadas curvas pressiométricas obtidas experimentalmente e previstas pelo modelo de Gibson & Anderson (1961).

2.8.1 - Formulação Desenvolvida por Gibson & Anderson (1961)

A presente formulação foi desenvolvida para ensaios pressiométricos em solos arenosos e considerando o comportamento perfeitamente elástico até a ruptura, com volume constante. Este modelo adequa-se a carregamentos onde são aplicadas tensões

efetivas e ocorrem deformações volumétricas. A Equação 2.42 representa o modelo proposto.

$$\sigma'_{ra} = \left(\frac{2\sigma'_{ro}}{1+N} \right) \left[\frac{E}{2\sigma'_{ro}(1+\mu) \cdot \left(\frac{1+N}{1-N} \right) \cdot \left(\frac{\Delta V}{V} \right)} \right]^{\frac{(1-N)}{2}} \quad (2.42)$$

sendo:

- σ'_{ra} = tensão efetiva aplicada (ensaio considerado drenado);
- σ'_{ro} = tensão horizontal no repouso (σ_{ho});
- N = inverso de $N\phi$ ($N = \frac{(1 - \text{sen}(\phi'))}{(1 + \text{sen}(\phi'))}$)
- E = módulo de deformação do solo;
- μ = coeficiente de Poisson;
- $\frac{\Delta V}{V}$ = variação volumétrica.

2.8.2 - Formulação Desenvolvida por Carter & Yeung (1985)

A solução obtida por Carter & Yeung (1985), para grandes deformações, foi possível com o emprego de equações diferenciais, utilizando o método dos elementos finitos. Eles concluíram que, para grandes deformações, as parcelas elásticas na zona plástica podem ser significativas.

O modelo desenvolvido pode ser aplicado tanto para materiais puramente friccionais ($c=0$ e $\phi \neq 0$), quanto para materiais coesivo-friccionais ($c \neq 0$ e $\phi \neq 0$). Devido à dificuldade do isolamento da pressão limite (P_L), os autores propuseram gráficos que

relacionam $\frac{G}{(P_o + c \cdot \cos(\phi))}$ com $\frac{(P_L + c \cdot \cos(\phi))}{(\sigma_R + c \cdot \cos(\phi))}$. A Equação 2.43 expressa

matematicamente o modelo proposto por Carter & Yeung (1985):

$$\frac{2G}{(P_o + c \cdot \cot(\phi))} = \left(\frac{N+1}{N-1}\right) \left[T \left(\frac{(P_L + c \cdot \cot(\phi))}{\sigma_R} + c \cdot \cot(\phi) \right)^\gamma - Z \left(\frac{P_L + c \cdot \cot(\phi)}{\sigma_R + c \cdot \cot(\phi)} \right) \right] \quad (2.43)$$

sendo:

- P_L = pressão limite;
- G = módulo elástico de cisalhamento;
- c = coesão;
- P_o = tensão horizontal no repouso;
- ϕ = ângulo de atrito;
- ψ = ângulo de dilatância;
- μ = coeficiente de Poisson;
- $N = \frac{1 + \text{sen}(\phi)}{1 - \text{sen}(\phi)}$;
- $M = \frac{1 + \text{sen}(\psi)}{1 - \text{sen}(\psi)}$;
- $\alpha = \frac{1}{M}$;
- $\beta = \frac{1}{N}$;
- $\gamma = \frac{(1 + \alpha)}{(1 - \beta)}$;
- $\chi = \frac{(1 - \mu - \mu \cdot (M + N) + (1 - \mu) \cdot M \cdot N)}{M \cdot N}$;
- $Z = \frac{(2 + \chi)}{(\alpha + \beta)}$;

- $T = 2 \left[\frac{(1 + \chi)}{(\alpha + \beta)} \right];$
- $\sigma_R + c \cdot \cot(\phi) = \frac{2N}{(N + 1) \cdot (P_o c \cdot \cot(\phi))} = \text{Critério de ruptura de Mohr-Coulomb.}$

2.8.3 - Formulação Desenvolvida por Yu & Houlsby (1991)

Em 1991 os pesquisadores Yu & Houlsby desenvolveram uma formulação matemática fechada para representar a relação pressão-expansão, sem restrições quanto à magnitude das deformações. No desenvolvimento matemático foi feita a integração das equações constitutivas utilizando a solução de uma série matemática. A abordagem foi dividida em duas partes: uma análise elástica e outra elasto-plástica. As tensões e as deformações produzidas nas duas zonas (elástica e plástica) são consideradas separadamente. A Equação 2.44 descreve o comportamento pressão-expansão do modelo estudado:

$$\frac{a}{a_o} = \left\{ \frac{R^{-\gamma}}{(1 - \delta)^{\frac{(\beta+1)}{\beta}} - \left(\frac{\gamma}{\eta}\right) \wedge 1(R, \zeta)} \right\}^{\frac{\beta}{(\beta+1)}} \quad (2.44)$$

sendo:

- E= módulo de elasticidade;
- c= coesão;
- ϕ = ângulo de atrito;
- P_o = tensão horizontal no repouso;
- μ = coeficiente de Poisson;
- ψ = ângulo de dilatância;

- $R = \frac{(1+\alpha)[Y+(\alpha-1).P]}{2\alpha.[Y+(\alpha-1).P_o]}$;
- $\gamma = \frac{2.c.\cos(\phi)}{1-\text{sen}(\phi)}$;
- $\alpha = \frac{1+\text{sen}(\phi)}{1-\text{sen}(\phi)}$;
- $\beta = \frac{1+\text{sen}(\psi)}{1-\text{sen}(\psi)}$;
- $\gamma = \frac{\alpha.(\beta+1)}{\beta.(\alpha-1)}$;
- $\delta = \frac{Y+(\alpha-1).P_o}{2.(1+\alpha).G}$;
- $\eta = \exp\left\{\frac{(\beta+1).(1-2\mu).[Y+(\alpha-1).P_o][1+\mu]}{E.(\alpha-1)\beta}\right\}$;
- $\zeta = \left[\frac{(1-\mu^2).2.\delta}{(1+\mu).(\alpha-1).\beta}\right] \left[\frac{\alpha.\beta+(1-2\mu)+2\mu-(\mu.(\alpha+\beta))}{(1-\mu)}\right]$

2.9 - Correlações Entre os Ensaios PMT, SPT e PMT, CPT.

As prospeções geotécnicas mais frequentemente utilizadas no Brasil são o SPT (Standard Penetration Test), o PMT (Pressuremeter Test) e o CPT (Cone Penetration Test). O ideal, em termos de conhecimento de capacidade de carga e perfil geotécnico, seria que em toda a obra a ser executada, fosse possível a execução dos ensaios citados acima. Entretanto, a realização dos mesmos inviabilizaria a obra, face aos altos custos introduzidos ou ainda por questões de prazo de entrega da obra.

Devido às limitações citadas no parágrafo anterior, alguns autores desenvolveram pesquisas em determinadas regiões e obtiveram algumas correlações entre os ensaios mencionados. É conveniente ressaltar que, na utilização de tais correlações, o projetista deve ser cuidadoso e extremamente criterioso, pois tais pesquisas são restritas a determinadas regiões, cabendo aos profissionais da área geotécnica desenvolver estudos nas suas regiões de atuação. A Figura 2.26 mostra tentativas de pesquisadores de correlacionar

o módulo pressiométrico (E_p) e a pressão limite (P_L), com a resistência de ponta do cone elétrico, em um depósito de solo arenoso.

Já a Figura 2.27 mostra a tentativa correlação entre o número de golpes do SPT e a pressão limite (P_L).

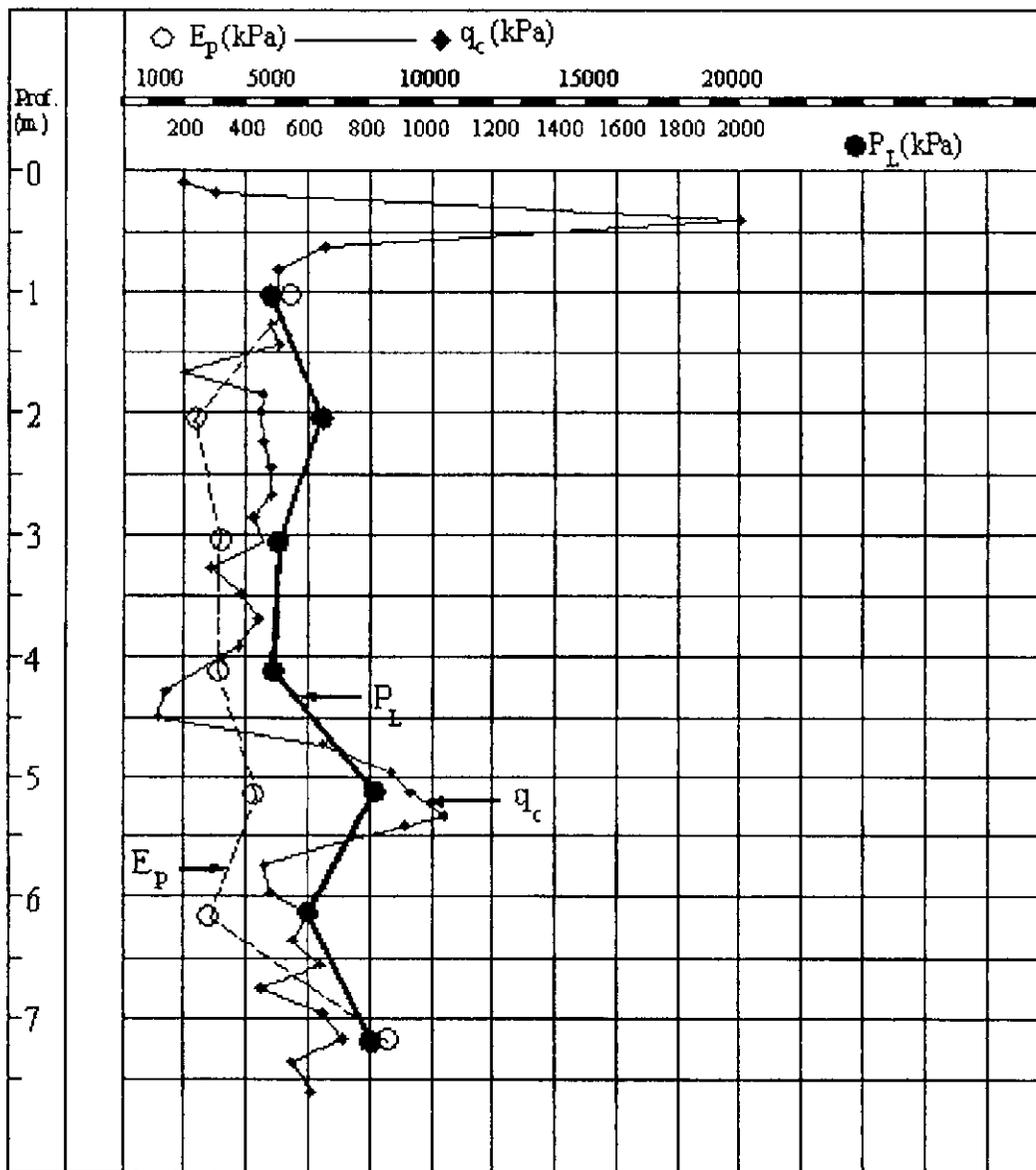


Figura 2.26 –Comparação entre o módulo pressiométrico, pressão limite e a resistência de ponta do CPT (Nazaret, 1972).

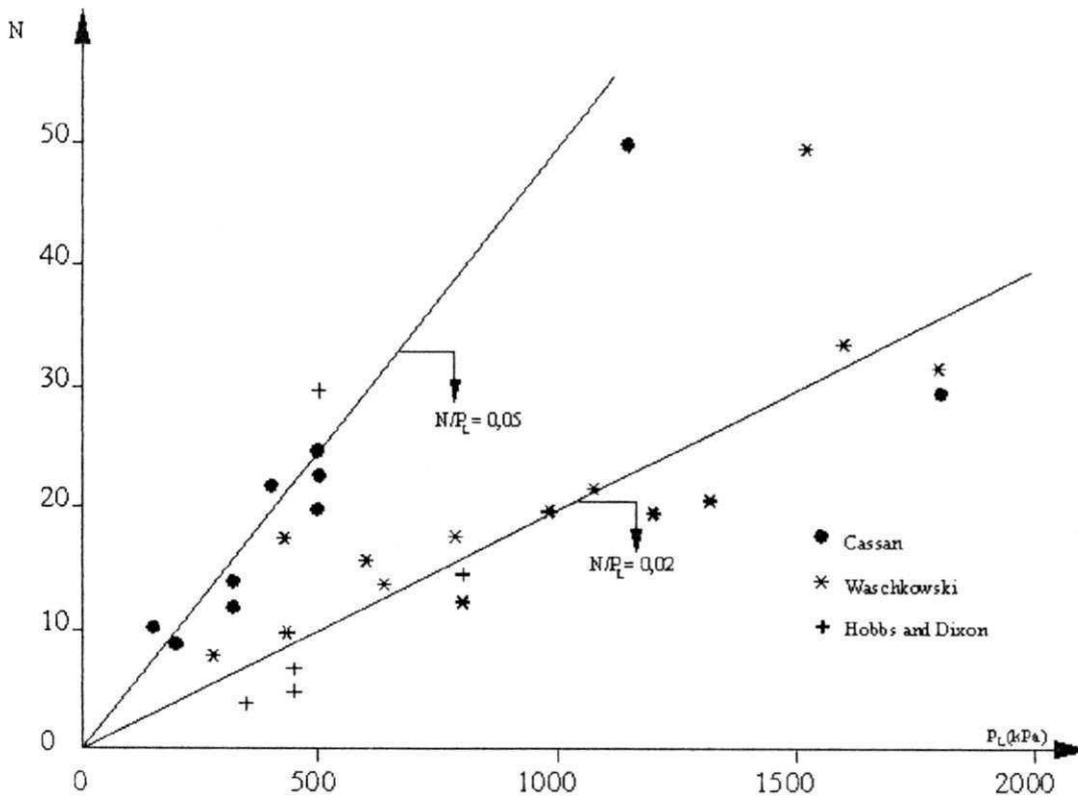


Figura 2.27 –Correlações entre o N do SPT e a pressão limite (Cassan, 1969-1968; Hobbs & Dixon, 1969 e Waschkowski, 1976, citados por Baguelin et alii, 1978).

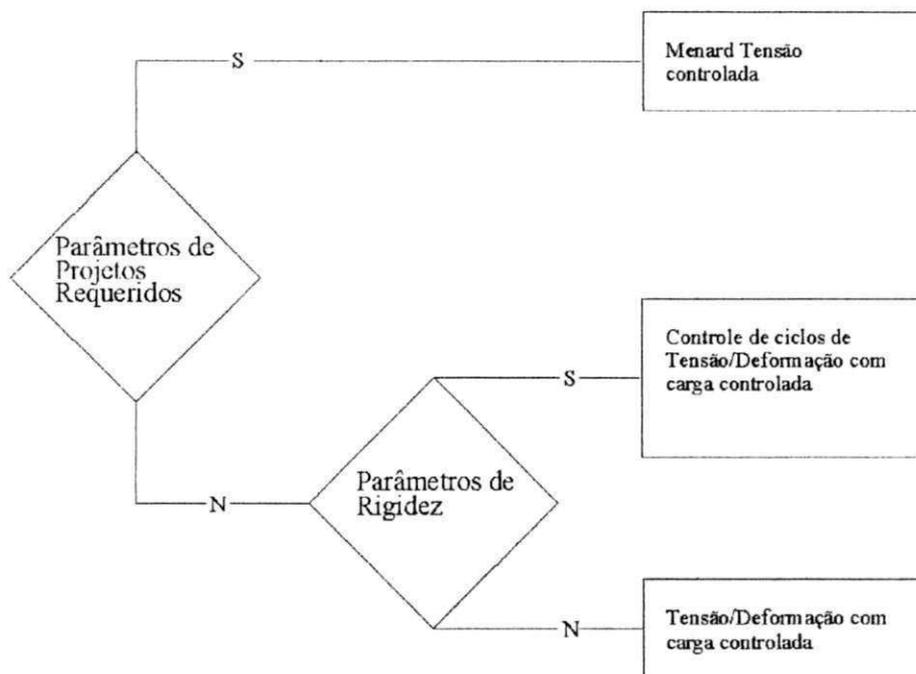
2.9.1- Sugestão para Escolha do Tipo de Pressiômetro

Para a escolha do tipo de pressiômetro a ser usado em um projeto, inicialmente é necessário saber quais os pressiômetros disponíveis no mercado e suas características, bem como relacionar as características dos mesmos com o tipo de solo a ser investigado.

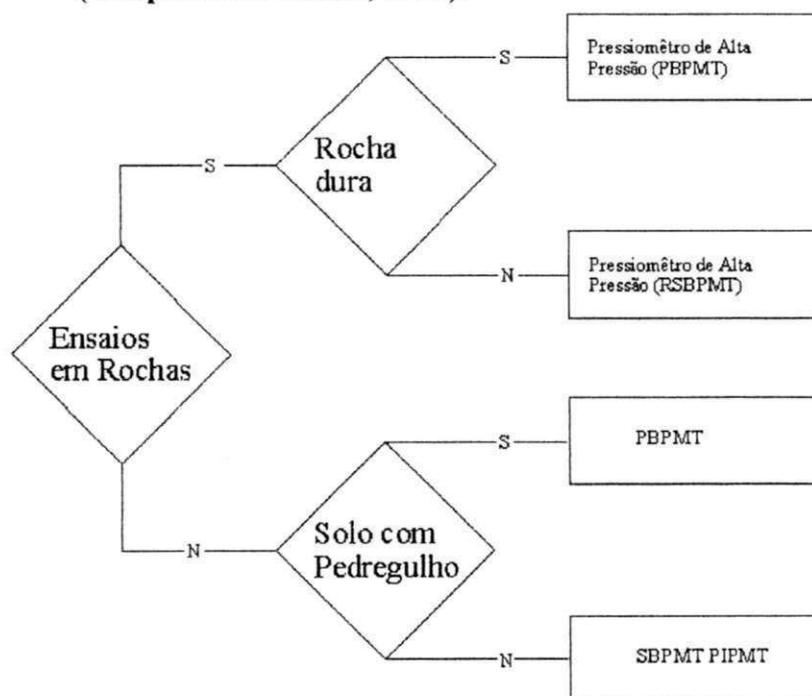
Pode-se enumerar algumas características importantes a ser observadas durante a escolha do pressiômetro :

- qual é capacidade de pressão requerida pelo solo;
- quais os parâmetros que se deseja com maior acurácia;
- quais as propriedades do solo;
- experiência da equipe de sondagem neste tipo de ensaio.

Os Fluxogramas 2.1 , 2.2 e 2.3 , orientam para o tipo de aparelho a ser usado, de acordo com a necessidade do ensaio. O Fluxograma 2.4 dá uma visão geral dos aparelhos disponíveis no mercado e suas principais características.

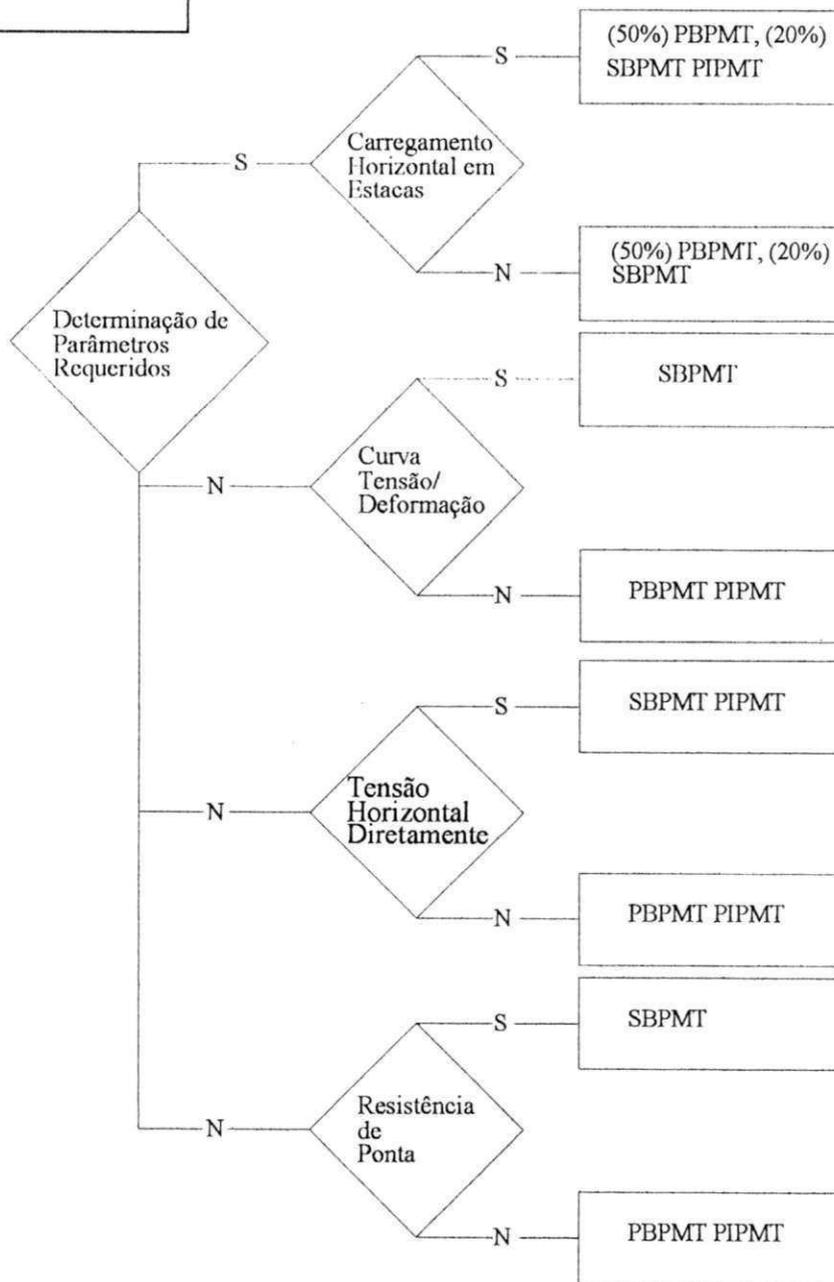


Fluxograma 2.1 – Tipos de execução do ensaio em função do parâmetro desejado (adaptado de Clarke, 1995).

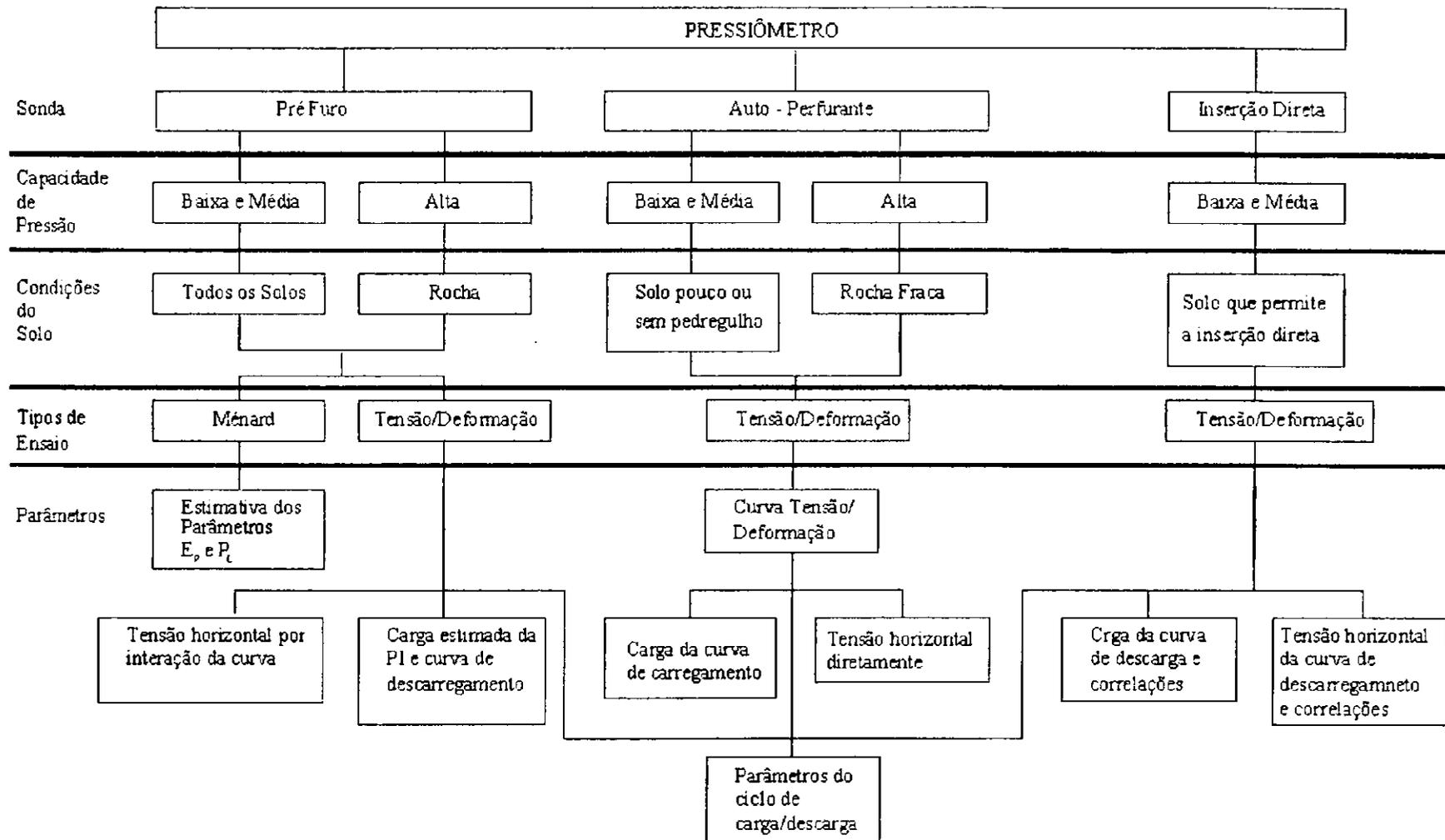


Fluxograma 2.2 – Ensaio Pressiométrico em rochas e solos pedregulhosos (adaptado de Clarke, 1995).

LEGENDA
 SBPMT = Auto Perfurante
 PBPMT = Pré-furo
 PIPMT = Inserção Direta



Fluxograma 2.3 – Sugestão do tipo de PMT de acordo com o tipo de fundação a ser executada (adaptado de Clarke,1995).



Fluxograma 2.4 – Sugestões gerais para a escolha do tipo de pressiômetro (adaptado de Clarke, 1995).

CAPÍTULO 3

CAMPANHA DE ENSAIOS

3.1 – Considerações Iniciais

O presente capítulo apresenta dados da área onde se realizou a pesquisa, tais como localização, locação dos furos e planta de situação do campo experimental. Também são abordados aspectos relativos à formação geológica e período de formação da citada área, repassando as informações básicas para a análise.

3.2 - Localização da Área Pesquisada.

A área pesquisada situa-se em um terreno na praia de Intermares, município de Cabedelo. A área de Geotecnia da UFPB Campus II utiliza este terreno como campo experimental, onde já foram realizados vários ensaios, tais como prova de carga sobre placa helicoidal (SCT), ensaio de penetração dinâmica (SPT) e ensaio pressiométrico (PMT).

O campo experimental, designado por ATC-01 (Medeiros, 1998), situa-se no cruzamento das ruas N° 2 e Mar Cáspio, distando da Av. Litorânea aproximadamente 100m (ver Figura 3.1).

3.3 – Pedologia e Clima

A área litorânea de João Pessoa e do município de Cabedelo é composta por sedimentos recentes do período holoceno da era quaternária, que compreende as praias, restingas, manguesais e aluviões. Estes sedimentos se caracterizam por materiais inconsolidados constituídos por areia argilosa e depósitos marinhos sobrepostos (Medeiros, 1998).

Conforme classificação pedológica para essa região litorânea, os sedimentos que dão origem aos solos são: areias quartzosas marinhas distróficas, solos muito profundos,

de baixa fertilidade e excessivamente drenados. Em toda a faixa litorânea, o clima dominante é o AS' de Koppem, quente e úmido, com chuvas de outono a inverno. A planta de situação do terreno onde se realizou a pesquisa, é mostrada na figura 3.1. A sondagem SPT apresentada na Figura 3.2 refere-se ao furo 03. Os demais furos (01 e 02) encontram-se no Apêndice 3. A Figura 3.3 mostra a classificação do perfil do solo com base nas três sondagens com SPT.

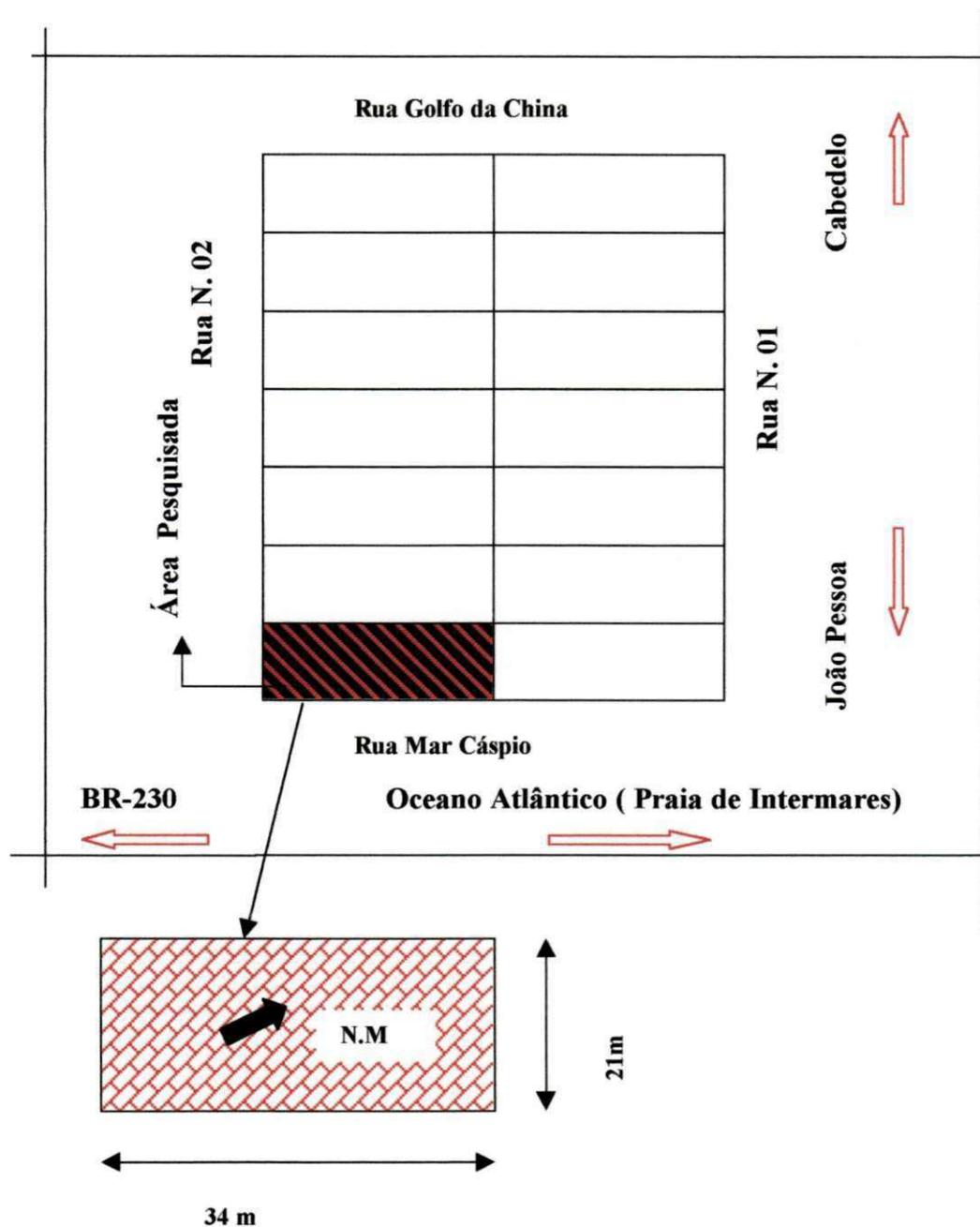


Figura 3.1 – Planta de situação da Área Pesquisada.

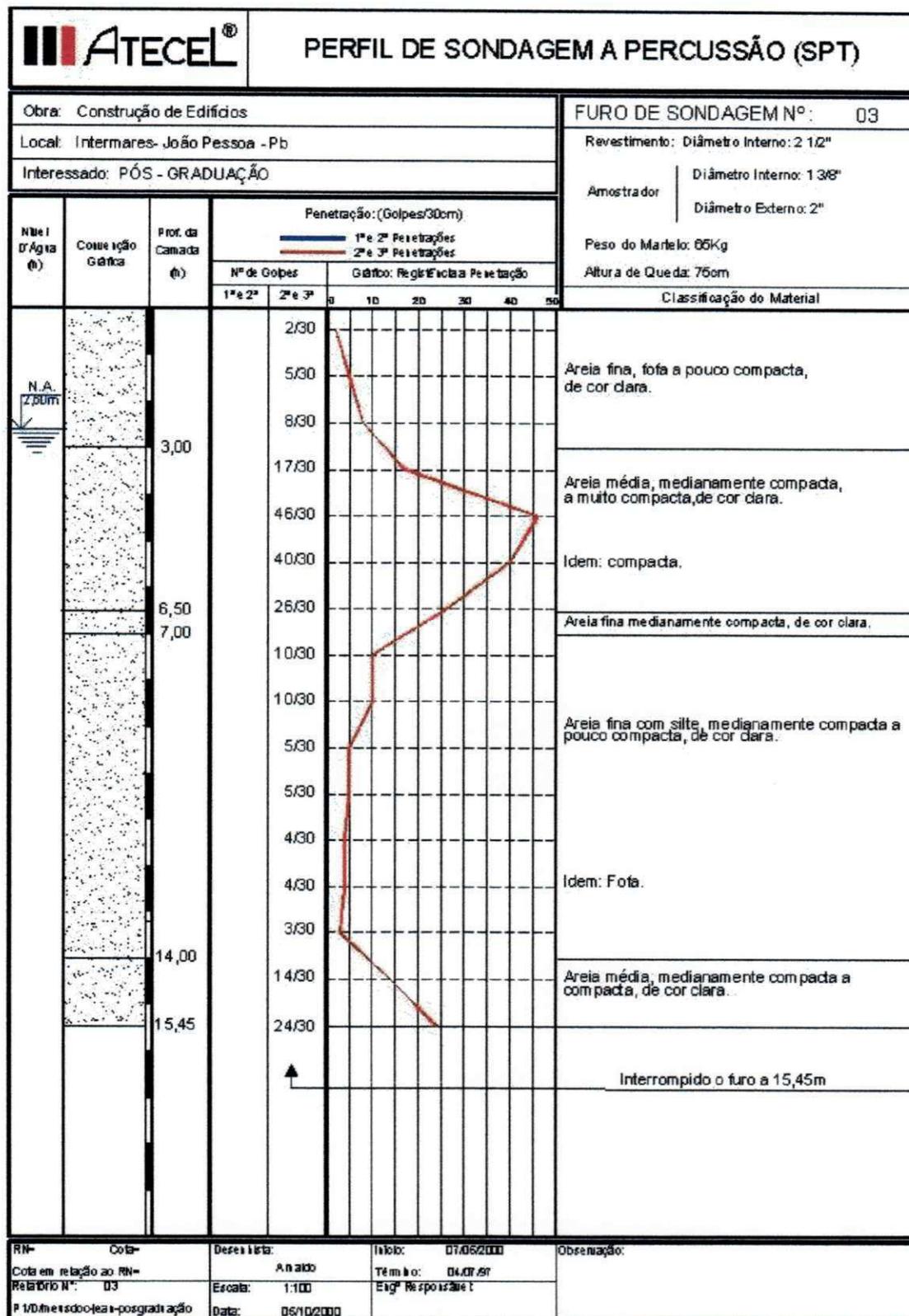


Figura 3.2 – Perfil de sondagem com SPT obtido no Furo 03 .

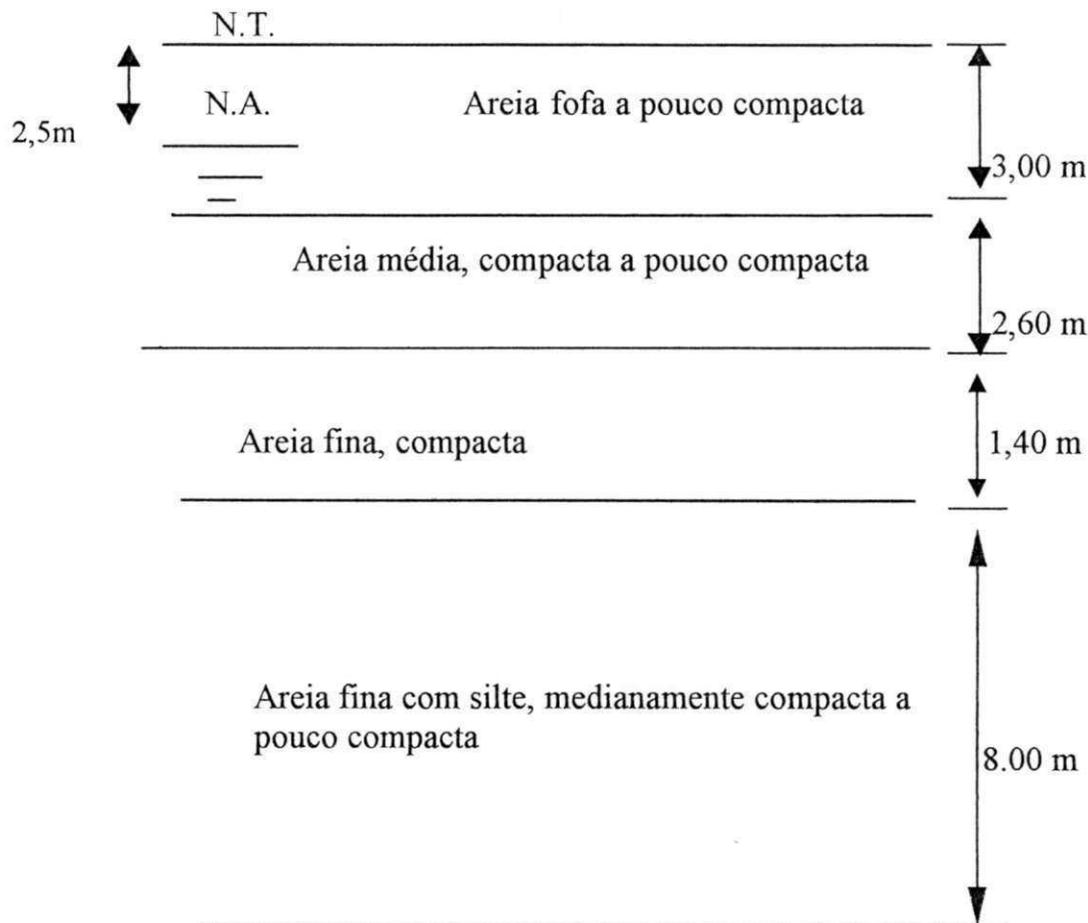


Figura 3.3 – Classificação do solo da área estudada .

3.4 - Ensaios Realizados

Foram utilizadas duas técnicas diferentes durante a realização da campanha de ensaios pressiométricos: técnica de pré-furo, realizada para a confecção da dissertação de mestrado de Medeiros (1998) e técnica de inserção direta (cravação dinâmica), para o desenvolvimento da atual pesquisa. Para a primeira técnica realizou-se três furos de sondagem e para a segunda dois furos foram realizados.

A técnica de cravação direta por inserção estática não foi realizada por limitações financeiras que impossibilitaram a disponibilidade da máquina de cravação do sistema sonda-haste.

A execução dos ensaios pressiométricos foram realizados seguindo as recomendações da norma americana ASTM D 4719 (1987). A Figura 3.4 mostra a localização dos ensaios realizados dentro da área pesquisada.

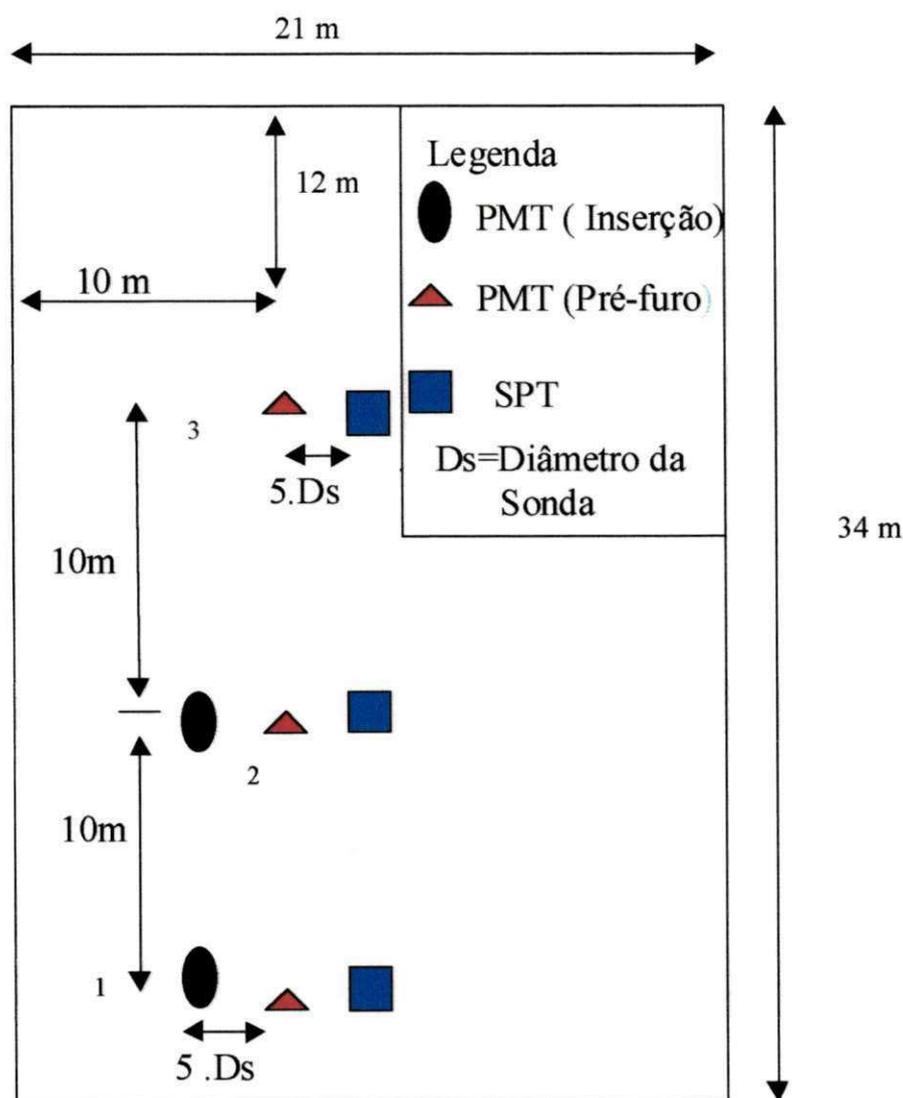


Figura 3.4 – Localização dos furos onde foram feitos os ensaios .

3.4.1 – O Ensaio Pressiométrico

O ensaio pressiométrico é um ensaio “in situ” que dá a resposta tensão versus deformação da massa de solo em estudo. A partir dessa relação, obtém-se parâmetros tanto de compressibilidade quanto de resistência do solo, os quais são indispensáveis na concepção de um projeto de fundações.

3.4.1.1 - O Pressiômetro Ménard Utilizado na Pesquisa.

O equipamento utilizado foi um Pressiômetro Ménard do tipo GC, o qual é composto das seguintes partes: sonda pressiométrica, unidade de controle de pressão e de volume (CPV), unidade alimentadora, tubulações e conexões (ver Figura 3.5).

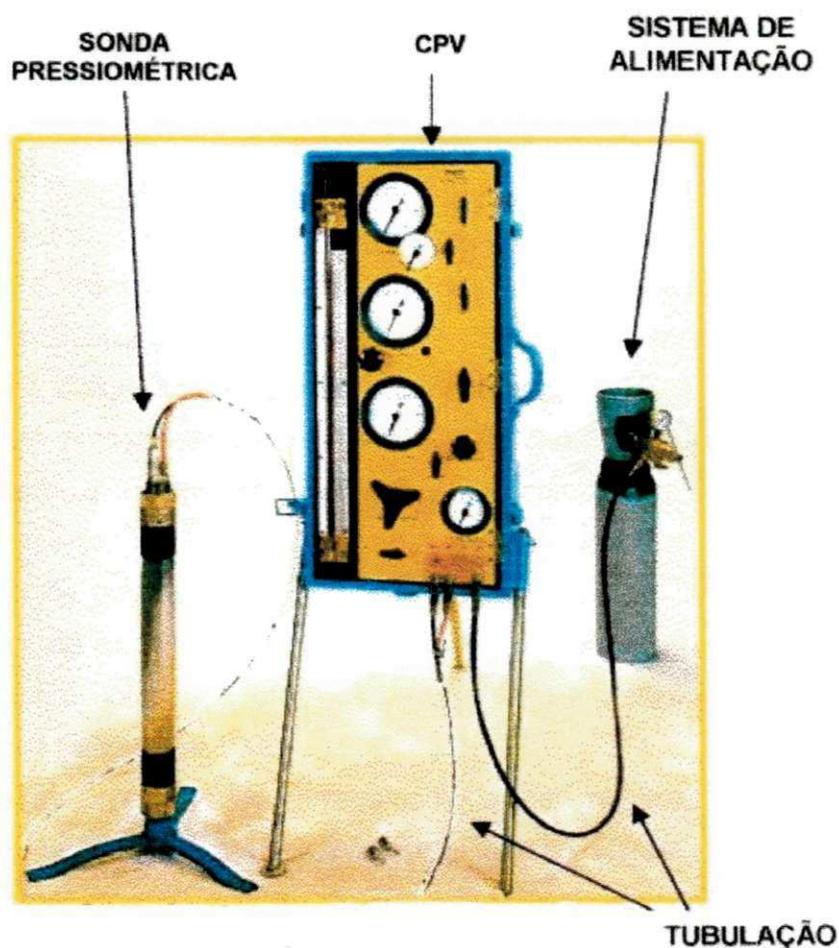


Figura 3.5 - Pressiômetro Ménard usado na pesquisa .

A unidade de alimentação é um cilindro de aço pequeno, com capacidade de suportar uma pressão de até 200kgf/cm² de gás Nitrogênio (N₂).

A unidade de controle é composta basicamente de um conjunto de manômetros e um volumímetro. Ela tem a função de monitorar a pressão que atua na sonda e a correspondente variação de volume.

As tubulações e as conexões são os acessórios responsáveis pela ligação entre o cilindro, a CPV e a sonda.

A sonda pressiométrica é composta de três células, sendo uma central e duas de guarda. A célula central é inflada com água destilada e desaerada, sendo nela onde se registra a variação de volume. As células de guarda são infladas com o gás Nitrogênio, (N₂) tendo como função permitir que a sonda se expanda na forma cilíndrica.

3.4.1.2 – As Sondas Usadas

Na atual pesquisa foram utilizados três tipos de sondas: com revestimento metálico; sem revestimento metálico (Medeiros, 1998) e uma terceira utilizada de forma confinada em uma haste protetora dotada de fendas laterais (cravação dinâmica).

Para os ensaios realizados no Furo 01 (pré-furo) utilizou-se a sonda com cobertura de borracha (tipo BX), com diâmetro externo de 5,87cm e comprimento de 45cm. O volume da célula de medição equivale a 1,2Vs, ou seja, 622,45cm³.

Para os ensaios nos Furos 02 e 03 (pré-furo), a sonda com cobertura de borracha foi substituída por outra com uma proteção metálica, uma vez que foi observado o desgaste excessivo da borracha (furos) durante a execução dos ensaios. A sonda com cobertura metálica usada tem diâmetro interno igual a 5,69cm e comprimento igual a 45cm. O volume da sonda equivalente a 1,2Vs é igual a 886,66cm³.

Para os ensaios através de inserção por cravação dinâmica, utilizou-se uma sonda de borracha do tipo BX, com diâmetro externo igual a 5,90 cm e comprimento de 61cm. O volume da célula central de medição equivalente a 1,2 Vs é igual a 576cm³.

As Figuras 3.6 , 3.7 , 3.8 e 3.9 mostram detalhes das sondas utilizadas nos ensaios com pré-furo e com cravação dinâmica.

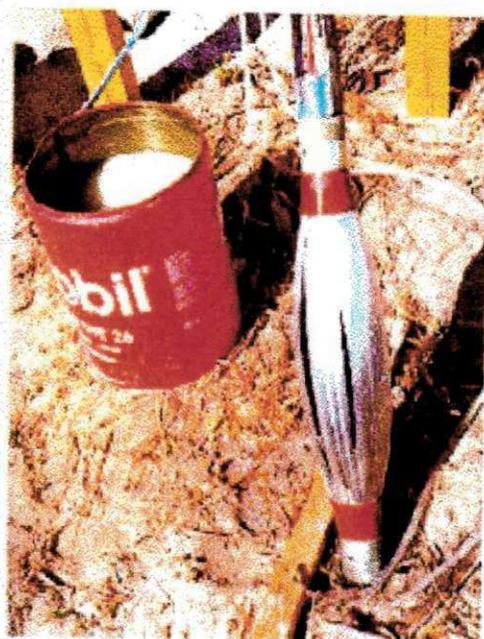


Figura 3.6 – Sonda Ménard com cobertura metálica utilizadas nos ensaios com pré-furo .

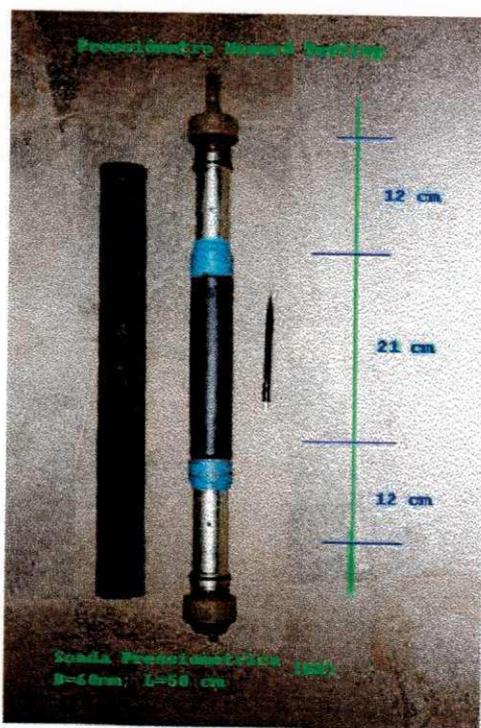


Figura 3.7 – Sonda Ménard com cobertura de borracha utilizadas nos ensaios com pré-furo.

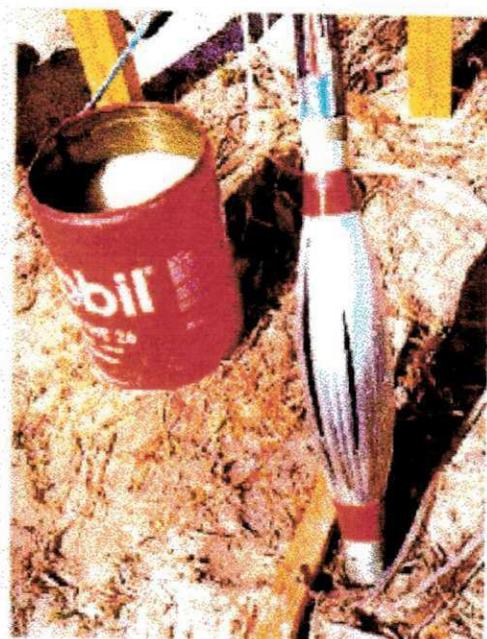


Figura 3.6 – Sonda Ménard com cobertura metálica utilizadas nos ensaios com pré-furo .

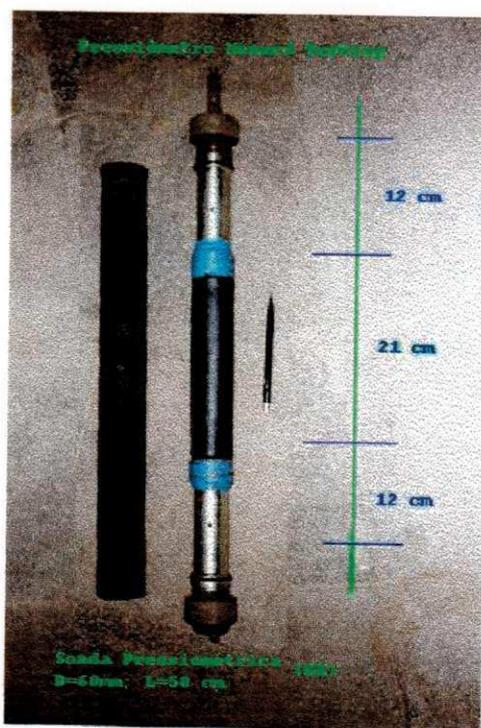


Figura 3.7 – Sonda Ménard com cobertura de borracha utilizadas nos ensaios com pré-furo.



Figura 3.8 – Sonda usada durante os ensaios de inserção direta.



Figura 3.9 – Revestimento da sonda (ponta e cabeça de bater) usado durante os ensaios feitos através da inserção direta (cravação dinâmica).

3.4.1.3 - Calibrações

Antes, durante e após toda campanha de ensaios pressiométricos são necessários procedimentos de calibração do equipamento, conforme recomendações das normas americana e francesa, respectivamente, ASTM D4719 (1987) e NF P94 110 (1991).

A calibração do equipamento tem como função encontrar os valores líquidos de pressões aplicadas na cavidade cilíndrica do solo e o volume real de expansão da sonda. A calibração justifica-se quando se observa que para inflar a sonda ao ar livre gasta-se um certo valor de pressão (perda de pressão) só com a resistência da membrana. Dependendo dos valores das pressões em cada ensaio, a tubulação irá se dilatar e haverá perda de volume, consumindo parte do volume medido na unidade de controle. As Figuras 3.10 e 3.11 mostram as curvas de calibrações típicas obtidas durante a realização dos ensaios.

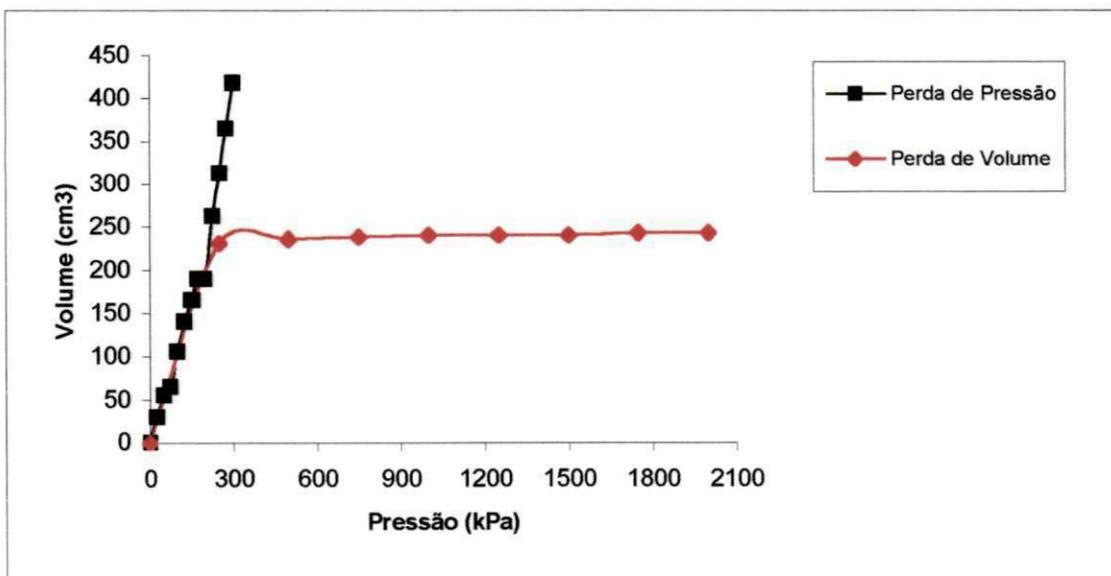


Figura 3.10 – Curvas de calibrações para perdas de pressão e de volume da sonda utilizada em ensaios com inserção direta.

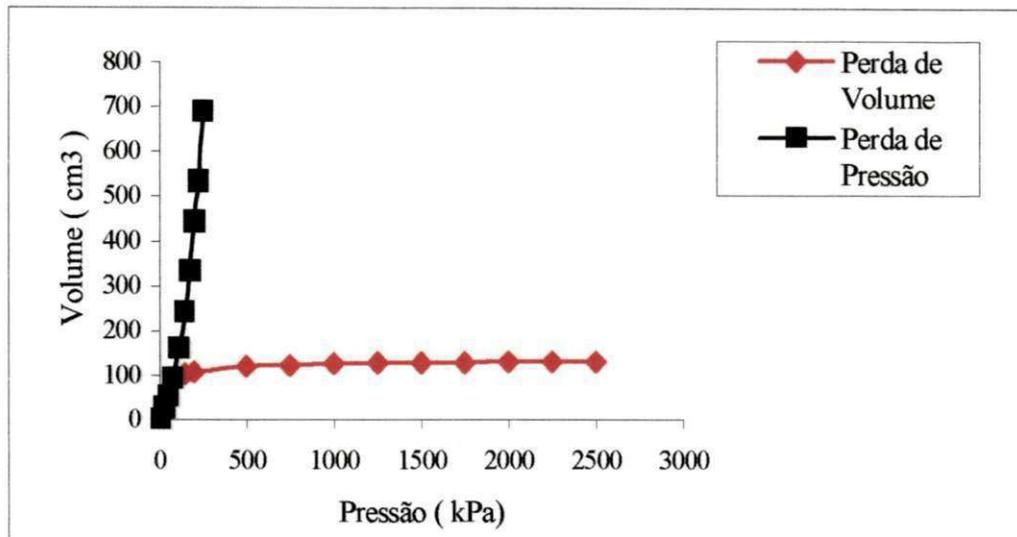


Figura 3.11 – Curvas de calibrações para perdas de pressão e de volume da sonda utilizada em ensaios com pré-furo.

3.4.1.4 - Inserção em Pré-Furo

No ensaio onde a sonda é colocada em pré-furo, a abertura do solo para a posterior colocação da sonda foi executada com o trépano de sondagem do ensaio SPT, tomando-se todo o cuidado necessário para não amolgar em demasia o solo, de acordo com o Capítulo 2, Item 2.4.2 .

Até a profundidade de 2,0m, a abertura deu-se com o auxílio do trado manual do tipo helicoidal. A partir do nível do leçol freático foi necessário o emprego da técnica de lavagem com o trépano e utilização de lama bentonítica para evitar o desmoronamento das paredes do furo.

3.4.1.5 - Inserção Direta (cravação dinâmica)

A instalação da sonda por sistema de cravação dinâmica foi realizada com a utilização do equipamento de SPT. A queda do martelo do SPT garantiu uma conversão de

energia potencial gravitacional em energia de impacto, possibilitando o avanço do sistema haste - sonda. A cada metro de avanço do sistema, foi realizado um ensaio pressiométrico, seguindo-se as recomendações da norma americana.

O tripé utilizado na penetração do trépano, bem como o martelo e a cabeça de bater foram adaptadas às hastes do PMT, tornando-se assim possível a penetração do sistema sonda-haste. A energia de penetração não foi controlada, bem como o número de golpes por penetração, apenas foi controlada a penetração de todo o sistema. Vale salientar que foram feitas algumas medidas da quantidade de golpes para cravar o sistema haste – sonda, conforme discutido no Capítulo 4.

A Figura 3.12 mostra detalhes de tal adaptação. Para a retirada do sistema sonda – haste foi utilizado o saca-tubos, também utilizado para sacar o amostrador SPT.



Figura 3.12 – Equipamento de SPT adaptado para a cravação dinâmica.

3.4.1.6 - Sistemática Geral

Os ensaios pressiométricos em pré-furo foram realizados segundo a norma americana ASTM D 4719 (1987). Quanto ao acréscimo de pressão, seguiu-se a sugestão de Briaud (1992). As medidas de variação de volume foram anotadas a cada 1min após a aplicação de cada estágio de pressão.

3.5 - Parâmetros Calculados

3.5.1 - Módulo Pressiométrico (E_p)

O módulo pressiométrico (E_p) foi estimado pelo gráfico pressão versus variação do raio da sonda, seguindo a sugestão de Briaud (1992). Este procedimento diminui os efeitos da geometria da sonda nos resultados. Entretanto, o módulo também foi estimado levando-se em conta a curva pressão versus volume. As Equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 expressam matematicamente os parâmetros calculados.

$$E_p = (1 + \mu) \cdot (P_2 - P_1) \cdot \left[\frac{(1 + (\frac{\Delta R}{R_o})_2)^2 + (1 + (\frac{\Delta R}{R_o})_1)^2}{(1 + (\frac{\Delta R}{R_o})_2)^2 - (1 + (\frac{\Delta R}{R_o})_1)^2} \right] \quad (3.1)$$

$$E_p = 2 \cdot (1 + \mu) \cdot V_m \left(\frac{\Delta P}{\Delta V} \right) \quad (3.2)$$

sendo:

μ = coeficiente de Poisson;

$(P_2-P_1) = \Delta P$ = diferença de pressão no trecho pseudo-elástico;

ΔV = diferença de volume no trecho pseudo-elástico;

$(\frac{\Delta R}{R_o})_1$ = variação do raio em função do valor inicial, para o início do trecho pseudo-elástico;

$(\frac{\Delta R}{R_o})_2$ =variação do raio em função do raio inicial, para o fim do trecho pseudo-elástico;

$$\frac{\Delta R}{R_o} = \sqrt{\frac{(V_o + V_c)}{V_o}} - 1 \quad (3.3)$$

$$V_m = \frac{V_o + (V_1 + V_2)}{2} \quad (3.4)$$

sendo:

V_o = Volume inicial da sonda;

V_c = Acréscimo de volume a cada estágio.

V_1 = Volume do início do trecho pseudo-elástico;

V_2 = Volume do final do trecho pseudo-elástico;

3.5.2 - Pressão Limite

A pressão limite foi estimada de acordo com três métodos, a saber: obtenção diretamente do gráfico de pressão em função da variação do raio sobre raio em função do raio inicial (Briaud ,1992); a sugestão da norma americana ASTM D4719 (1987), e o método sugerido por Van Wambecke & D'Henricourt (1971). As Figuras 3.13, 3.14 e 3.15 mostram detalhes sistemáticos da estimativa da pressão limite (P_L) , executada no primeiro

ensaio do Furo 01, após a sonda ter sido cravada dinamicamente até a profundidade de 13m.

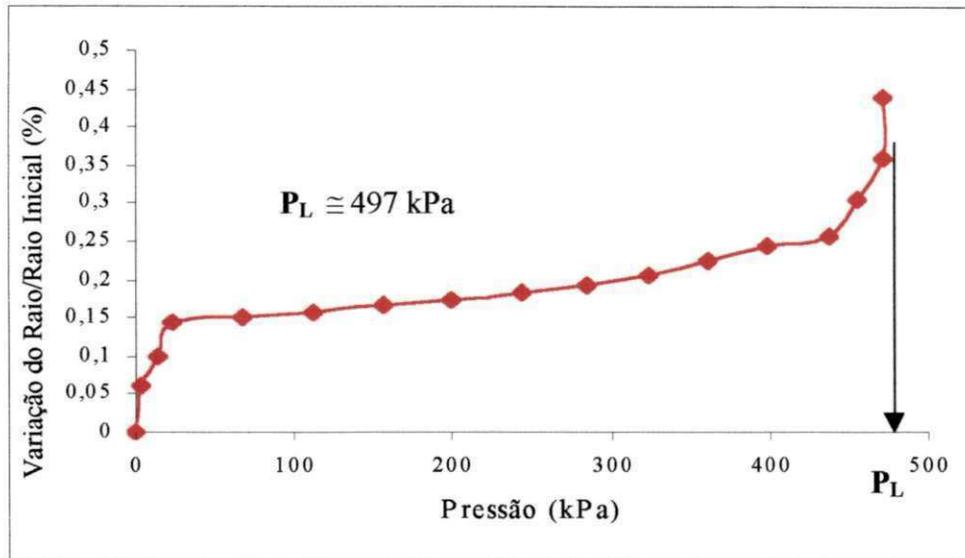


Figura 3.13- Estimativa de P_L segundo sugestão de Briaud (1992), com dados do Furo 01, Ensaio 01.

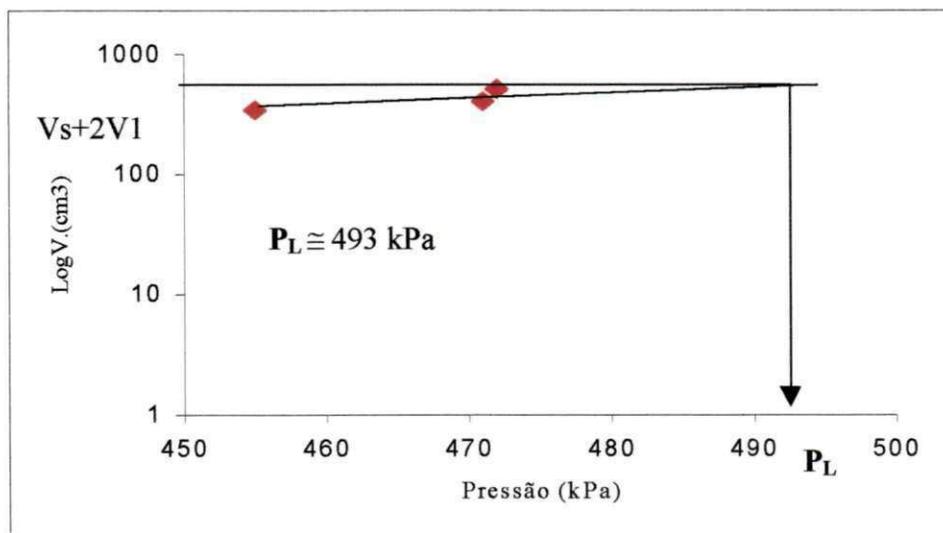


Figura 3.14- Estimativa de P_L segundo sugestão da Norma Americana ASTM D 4719 (1987), com dados do Furo 01, Ensaio 01.

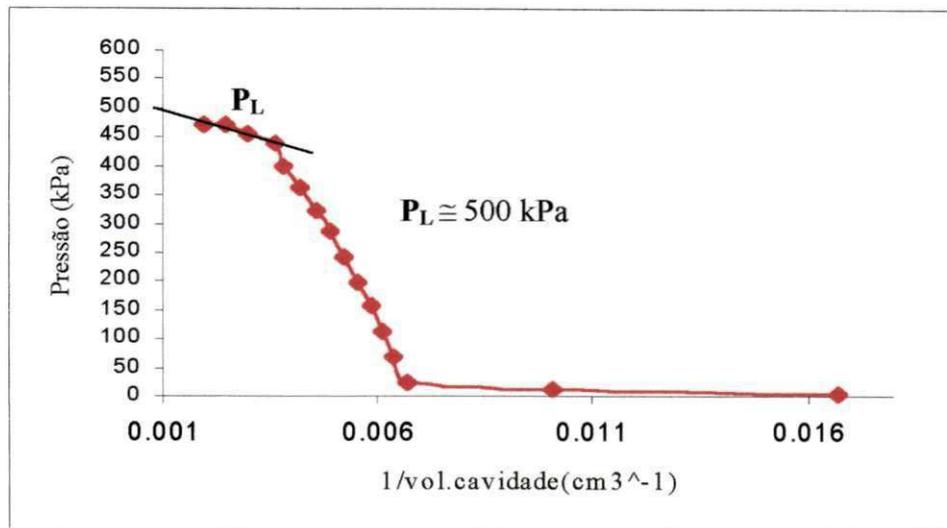


Figura 3.15- Estimativa de P_L segundo sugestão de Van Wambeke e D’Henricourt (1971), com os dados do Furo 01, Ensaio 01.

3.6 - Dificuldades Encontradas Durante a Execução dos Ensaios

3.6.1 - Ensaios Pressiométricos Realizados em Pré-furo

Durante a realização dos ensaios em pré-furo no solo arenoso em estudo, observou-se os seguintes problemas:

- desmoronamento das paredes do furo;
- rompimento da borracha que reveste a sonda ;
- dificuldades na realização do ensaio sem causar amolgamento do solo.

3.6.2 - Ensaios Pressiométricos Após Cravação Dinâmica da Sonda

Durante a realização dos ensaios, após cravação dinâmica da sonda, foram notados alguns aspectos que certamente dificultaram a realização da campanha; a saber:

-
- dificuldade de penetração da sonda em solo de alta compactidade. Por exemplo, entre as cotas 4m e 6m (areia compacta) foram necessários aproximadamente 70golpes para a penetração de apenas 15 cm da sonda;
 - no trecho citado acima, devido a alta resistência do solo, houve por duas vezes, em cada uma das inserções diretas, o rompimento da borracha da sonda, resultando na paralisação momentânea do ensaio e retirada das hastes para a troca da sonda (ver Figura 3.16) ;
 - o elevado número de golpes para atravessar a camada de areia compacta, fez com que a haste do SPT posicionada imediatamente acima da cabeça de bater fosse danificada por diversas vezes. Portanto, sugere-se nestes casos a utilização de hastes mais robustas . A Figura 3.17 mostra detalhes da adaptação feita;
 - devido às ranhuras da haste protetora e da haste de ponta, a borracha da sonda se desgasta rapidamente, sugerindo a utilização de um material com maior resistência em substituição ao atualmente utilizado;
 - grandes dificuldades durante a retirada da composição de hastes devido ao elevado atrito lateral entre o solo e a haste de cravação. A incorporação de um elemento curto e de diâmetro maior que o das hastes em posições estratégicas da composição de cravação poderá reduzir consideravelmente os efeitos do atrito solo-haste durante a cravação da sonda.



Figura 3.16 - Sonda de inserção direta rompida .



Figura 3.17- Adaptação com a cabeça de bater do martelo de SPT.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 – Generalidades

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios pressiométricos realizados, utilizando-se as técnicas de pré-furo e de inserção direta por cravação dinâmica para instalação da sonda no solo.

4.2 – Perfil do Depósito Estudado

Para o reconhecimento do solo foram realizados três furos com sondagens SPT, cujo perfil do solo foi traçado a partir das mesmas. A sondagem SPT realizada no Furo 03 está apresentada na Figura 3.2 (Capítulo 3) As demais sondagens se encontram no Apêndice III.

A partir do exame tátil-visual, nota-se que o material de cada camada apresenta-se bastante uniforme, embora as sondagens mostrem um perfil estratificado, típico de ocorrência em praias. De acordo com a NBR 6484 (1980) e NBR 7250 (1980), o depósito arenoso pode ser assim identificado: uma camada superficial de areia fina, fofa a pouco compacta, de cor cinza clara com aproximadamente 3,0m de espessura; uma segunda camada de aproximadamente 2,6m de espessura, constituída de areia média compacta a muito compacta de cor cinza clara; uma terceira camada de areia medianamente compacta de cor clara, com espessura aproximada de 0,5m; por fim, uma quarta camada, composta de um silte fofo a pouco compacto, de cor cinza clara, com espessura de aproximadamente 8,0m.

4.3 - Ensaio Pressiométricos

Os ensaios pressiométricos foram realizados com o pressiômetro Ménard. Neste tipo de ensaio, aplicando-se um certo estágio de pressão tem-se a resposta sob forma de acréscimo de volume da célula central da sonda, conforme sugerido pela norma americana

ASTM D 4719 (1987). Com os valores de pressão e de volume lidos, e devidamente corrigidos, obtém-se gráficos pressão versus volume, conforme mostra-se na Figura 4.1.

O presente trabalho tem como principal objetivo a comparação entre os resultados dos ensaios realizados utilizando-se o processo de colocação da sonda em pré-furo e por inserção direta (cravação dinâmica). Como as sondas usadas no pré-furo têm relação comprimento/diâmetro diferente da usada na inserção direta, Briaud (1992) sugere para a diminuição da influência nos valores do módulo pressiométrico (E_p) e da pressão limite (P_L), que sejam traçados gráficos onde se tenha nos eixos cartesianos a razão entre a variação do raio da sonda em relação ao raio inicial versus a pressão aplicada (ver Figura 4.2).

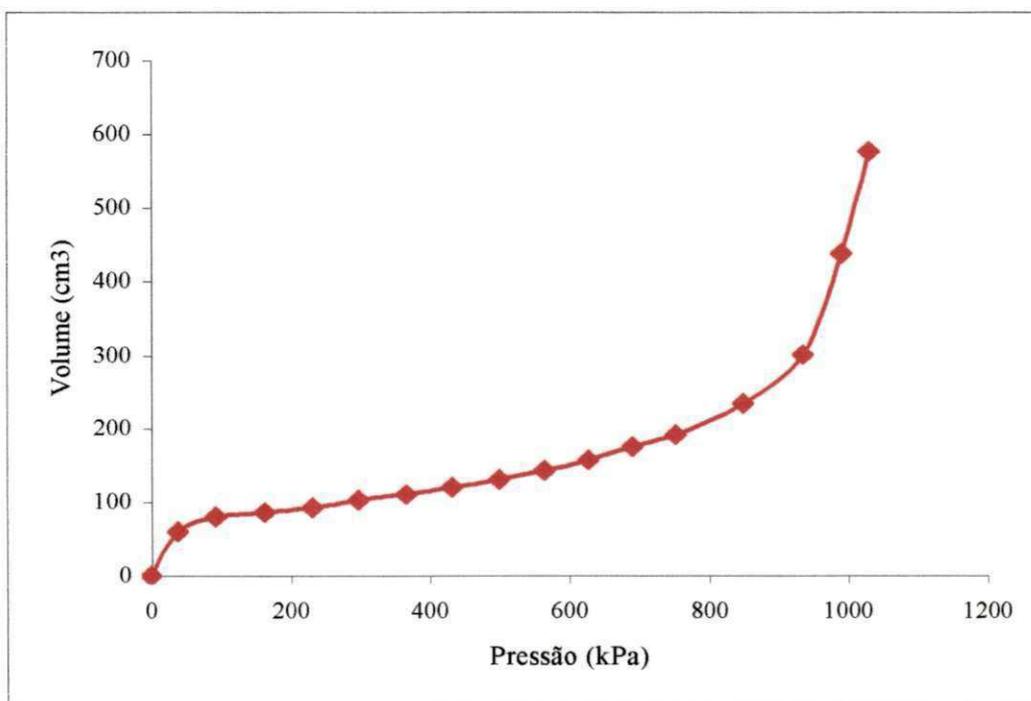


Figura 4.1 – Gráfico pressão versus volume a partir do Ensaio 02, Furo 01.

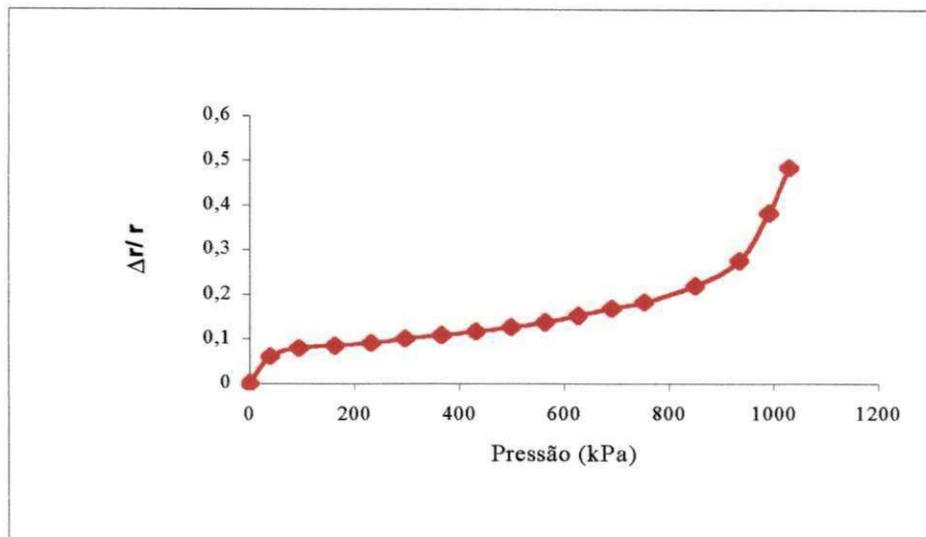


Figura 4.2 – Gráfico pressão versus variação de raio a partir do Ensaio 02 do Furo 01.

Durante a execução dos ensaios pressiométricos, tanto em pré-furo quanto após inserção direta (cravação dinâmica), alguns problemas inviabilizaram uma melhor estimativa da pressão limite (P_L) e do módulo pressiométrico (E_p). Pode-se citar dentre esses problemas, os seguintes: estouro da sonda, amolgamento excessivo do solo, limitação da célula central em relação à variação de volume, etc. As Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 mostram alguns desses ensaios problemáticos.

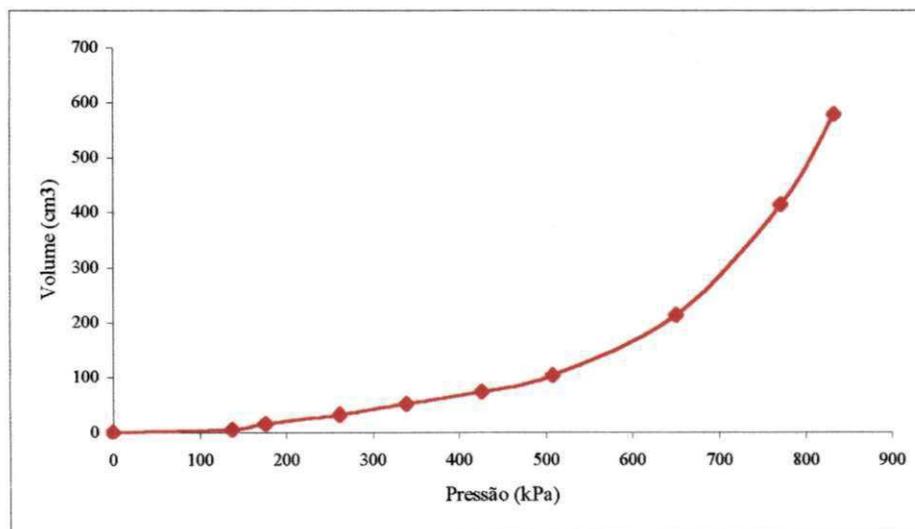


Figura 4.3 – Curva pressiométrica típica de um furo com diâmetro excessivamente maior que o da sonda usada em pré-furo, com dados do Furo 01, Ensaio 04, segundo Medeiros (1998).

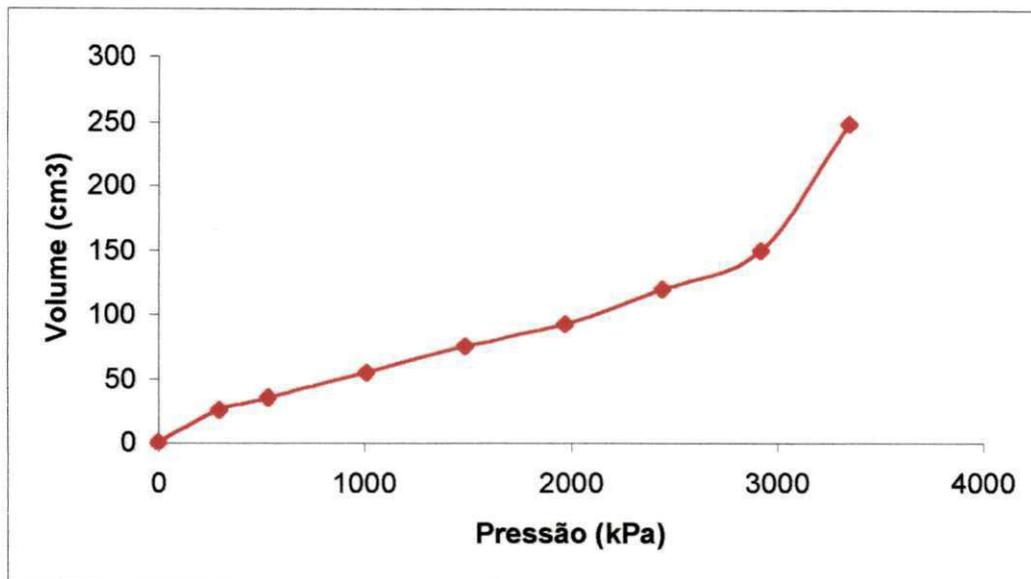


Figura 4.4 – Curva pressiométrica incompleta devido ao estouro da sonda de inserção direta (cravação dinâmica) antes de atingir-se a fase plástica do solo, com dados do Furo 01, Ensaio 06.

4.3.1 – Ensaio Pressiométrico em Furo Prévio.

Os ensaios pressiométricos com a sonda colocada em pré-furo realizou-se conforme descrito no Capítulo 3 (Item 3.4.1.4).

4.3.2 – Ensaio Pressiométrico com Inserção Direta (cravação dinâmica).

Os ensaios pressiométricos realizados após a cravação dinâmica da sonda, seguiram a sistemática descrita no Capítulo 3 (Item 3.4.1.5).

4.3.3 – Parâmetros Geotécnicos

4.3.3.1 – Módulo Pressiométrico

O Módulo Pressiométrico (E_p) foi estimado de acordo com as Equações 3.2 e 3.3, apresentadas no Capítulo 3. A Tabela 4.1 apresenta os valores dos módulos elásticos obtidos em cada profundidade. A terceira coluna da Tabela 4.1 mostra a média dos valores de E_p dos três pré-furos, e dois de inserção direta. Na Tabela 4.1 as colunas rotuladas de E_{p1} apresentam os valores do módulo estimado de acordo com a Equação 3.2. A coluna rotulada por E_{p2} apresenta os valores do módulo estimado de acordo com a Equação 3.3 (sugestão da Norma Americana).

Das Figuras 4.5 a 4.10 são mostrados os valores dos módulos pressiométricos em função da profundidade. Verifica-se de maneira bastante nítida, a influência do processo de colocação da sonda nos valores dos módulos (E_p) estimados. Com relação à influência da compactação, verifica-se que os valores médios do módulo pressiométrico obtidos em ensaios com inserção direta por cravação dinâmica são 67,8% maiores que os obtidos em ensaios feitos em pré-furo. Isto se dá nas camadas situadas entre 1m e 3m e 8m e 13m de profundidade, as quais correspondem a areias fofas e siltes pouco compactos, respectivamente.

Na faixa de 4m à 7m, correspondente à areia medianamente a muito compacta, o aumento médio foi da ordem de 290%.

A diferença notada deve-se provavelmente aos efeitos do processo de compactação, visto ser este bem mais intenso na camada de areia compacta, já que o número de golpes é muito superior nessa camada em relação às demais camadas.

Tabela 4.1 – Valores do módulo pressiométrico (E_p) calculados segundo as sugestões da Norma Americana ASTM D4917 (1987) e Briaud (1992).

m	FURO 01				FURO 02				Médias			
	Pré-Furo		Inserção		Pré-furo		Inserção		Pré-Furo		Inserção	
	E_{P1} (kPa)	E_{P2} (kPa)										
1.0	2699	2534	6685	6996	2367	2384	6664	7532	2650	2602	6675	7264
2.0	3314	3543	8634	9118	2390	4686	7274	9576	3259	3972	7954	9347
3.0	1505	1591	12603	12406	4571	4473	10191	11210	4106	3960	11397	11808
4.0	15950	16673	72979	64021	22084	25116	5455	5324	17319	18453	39217	34672
5.0	16206	17188	47544	47442	13931	15233	33972	33864	16340	17165	40758	40653
6.0	12520	13087	32303	33517	19588	19588	61534	62684	16318	16404	46918	48101
7.0	3422	3497	11931	11337	8435	7766	82848	62215	6036	5943	47389	36776
8.0	5687	5547	7202	7318	4879	5350	9338	8982	4729	5043	8270	8150
9.0	7340	7447	6186	6937	3871	4009	8889	7889	5630	5672	7538	7413
10.0	5593	5988	7679	6790	5183	5639	6283	5861	5387	5809	6981	6325
11.0	6788	6989	3261	3314	5759	5676	4508	4137	5628	5687	3885	3725
12.0	5372	5826	7328	7182	5383	5385	10719	10100	4914	4990	9023	8641
13.0	4019	4502	6451	6765	2261	4690	9094	8806	2093	3064	7772	7786

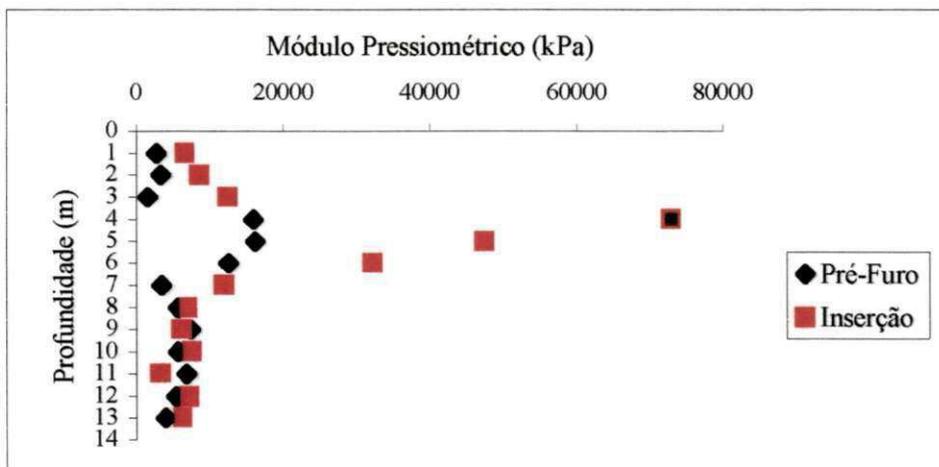


Figura 4.5 – Módulo Pressiométrico (E_p) em função da profundidade, nos ensaios com a sonda colocada em pré-furo e através de cravação dinâmica, para o furo 01, usando a sugestão de Briaud (1992).

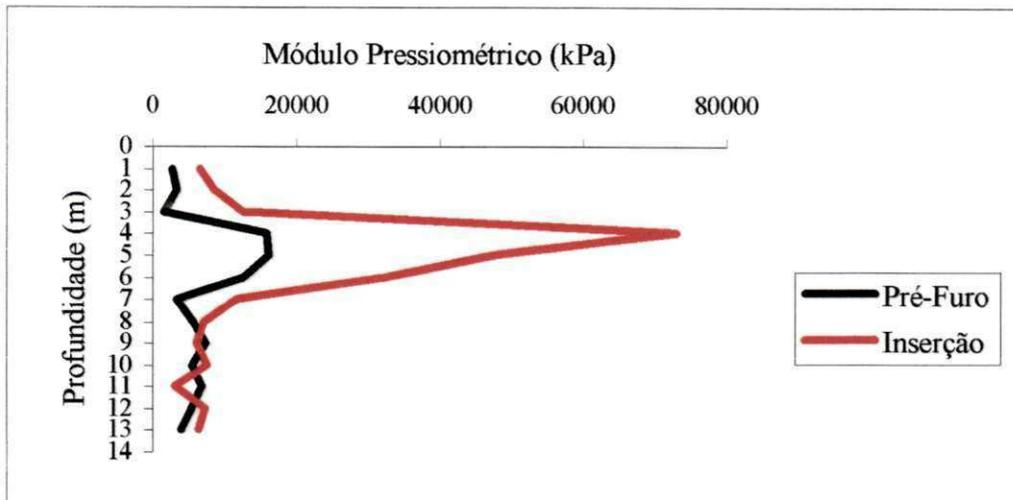


Figura 4.6 – Comparação dos módulos pressiométricos, para o furo 01, segundo a sugestão de Briaud (1992), para ensaios em pré-furo e após cravação dinâmica.

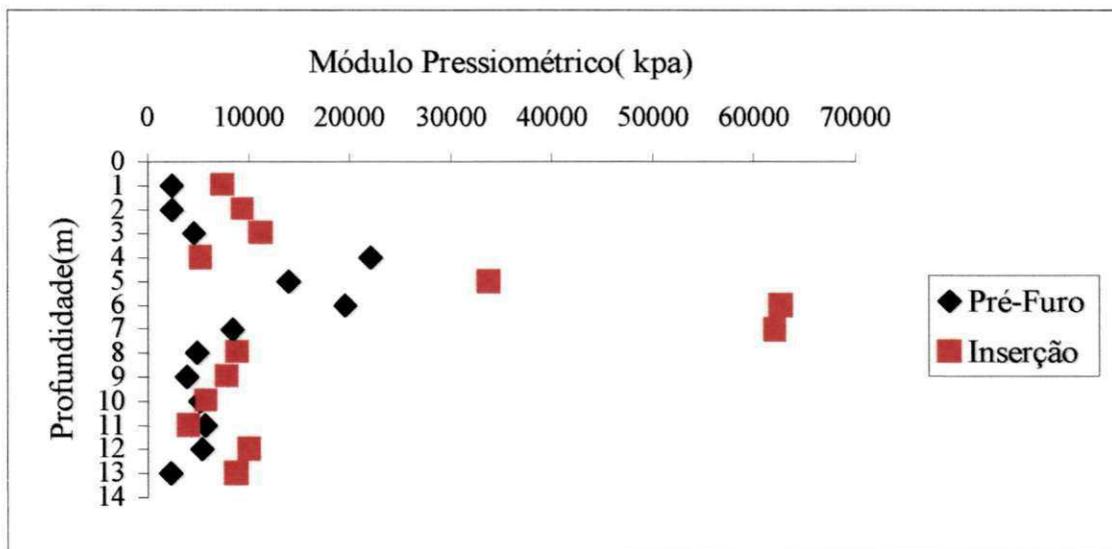


Figura 4.7 – Módulo Pressiométrico (E_p) em função da profundidade, nos ensaios com a sonda colocada em pré-furo e através de cravação dinâmica, para o furo 02, usando a sugestão de Briaud (1992).

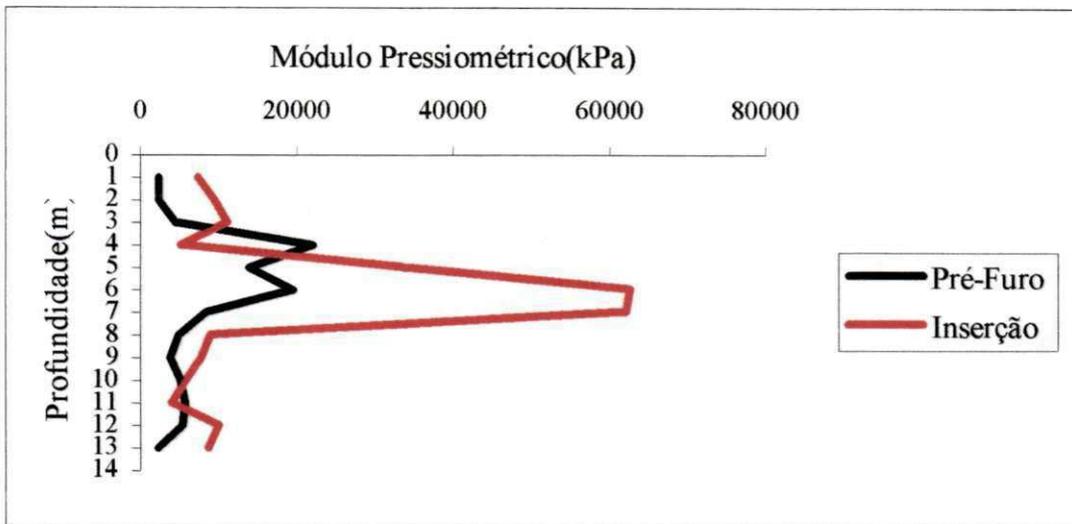


Figura 4.8 – Comparação dos módulos pressiométricos, para o furo 02, segundo a sugestão de Briaud (1992), para ensaios em pré-furo e após cravação dinâmica.

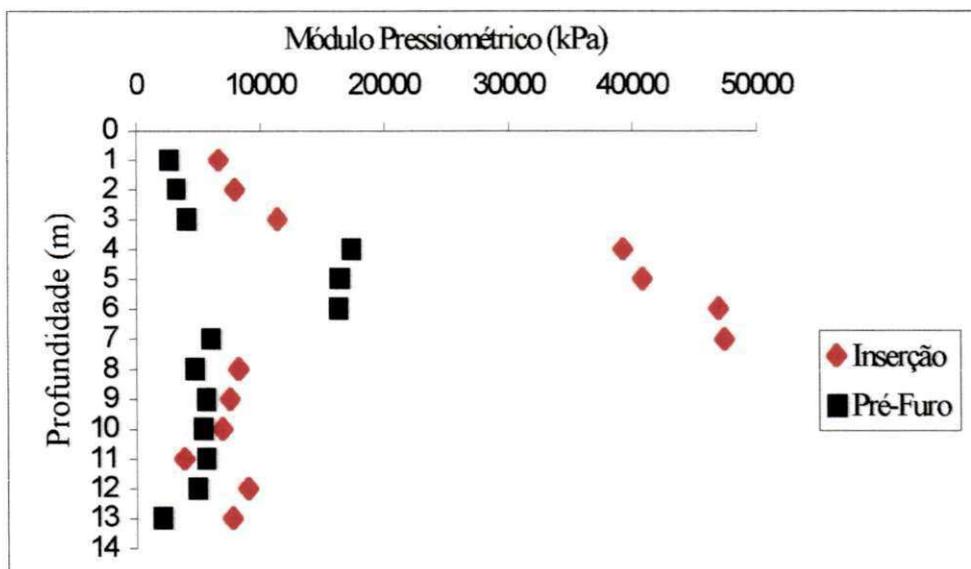


Figura 4.9 – Valores médios do módulo pressiométrico (E_p) em função da profundidade, nos ensaios com a sonda colocada em pré-furo e através de cravação dinâmica, usando a sugestão de Briaud (1992).

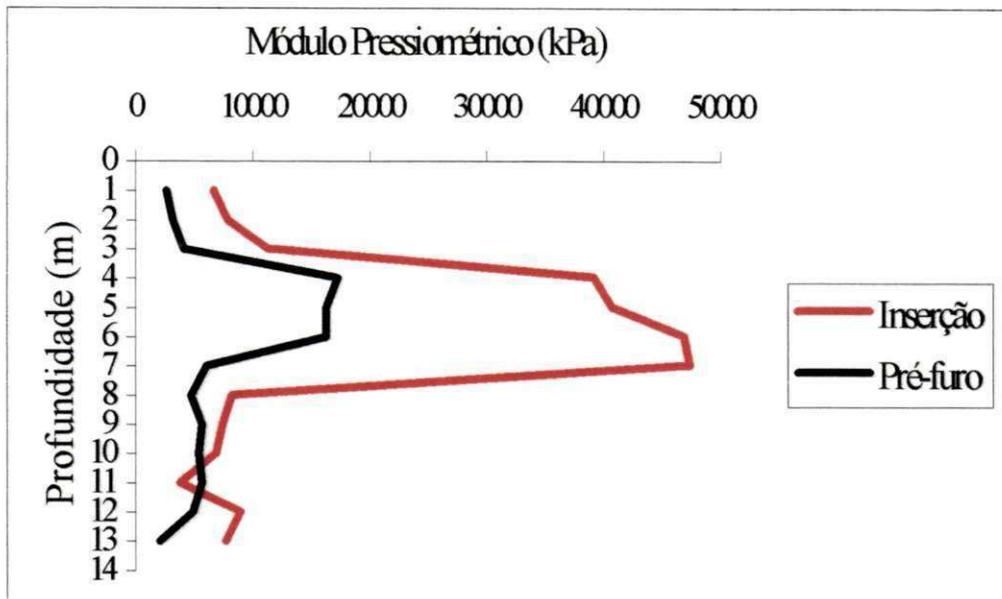


Figura 4.10 – Comparação dos valores médios do módulo pressiométrico obtidos segundo a sugestão de Briaud (1992), para ensaios em pré-furo e após cravação dinâmica.

4.3.3.2 – Pressão Limite

A Pressão Limite foi estimada de acordo com os métodos sugeridos pela Norma americana, Briaud (1992) e pelo critério de Van Wambecke e D'Herincourt (1971).

A Tabela 4.2 mostra os valores obtidos na atual campanha de ensaios. Das Figuras 4.11 a 4.16 são apresentados os valores de P_L em função da profundidade, de acordo com o método Van Wambecke e D'Henricout (1971), a partir dos ensaios efetuados em pré-furo e em inserção direta. No Apêndice III, são apresentadas as figuras que relacionam a pressão limite com a profundidade, segundo as metodologias recomendadas por Briaud (1992) e pela Norma Americana ASTM D 4719 (1987).

Observa-se que, ao contrário da influência observada no Módulo Pressiométrico, a pressão limite não sofreu grandes modificações nos trechos correspondentes devido ao amolgamento ou compactação durante a colocação da sonda. De acordo com estudos desenvolvidos por Yu et alii (1991), a influência maior na pressão limite é causada pela

geometria da sonda, visto que a ruptura do solo ocorre num estágio posterior à fase elástica, conforme comentado no Capítulo 2.

No presente trabalho, os trechos de menor efeito da compactação, indicados pelos valores do módulo (entre 1m e 3m, e 8m e 13m), foi verificado (em média) um aumento médio de aproximadamente 33% nos valores das pressões limites. No trecho de intensa compactação (de 4m a 7m), foi notado um aumento médio de apenas 37,5% nos valores da pressão limite em relação ao pré-furo. Isso mostra a pouca influência do grau de compactação nos valores da pressão limite.

Segundo Paiva et alii (1999), com o aumento da relação L/D, há um aumento nos valores de P_L , o que vem a se confirmar nos resultados obtidos na atual pesquisa.

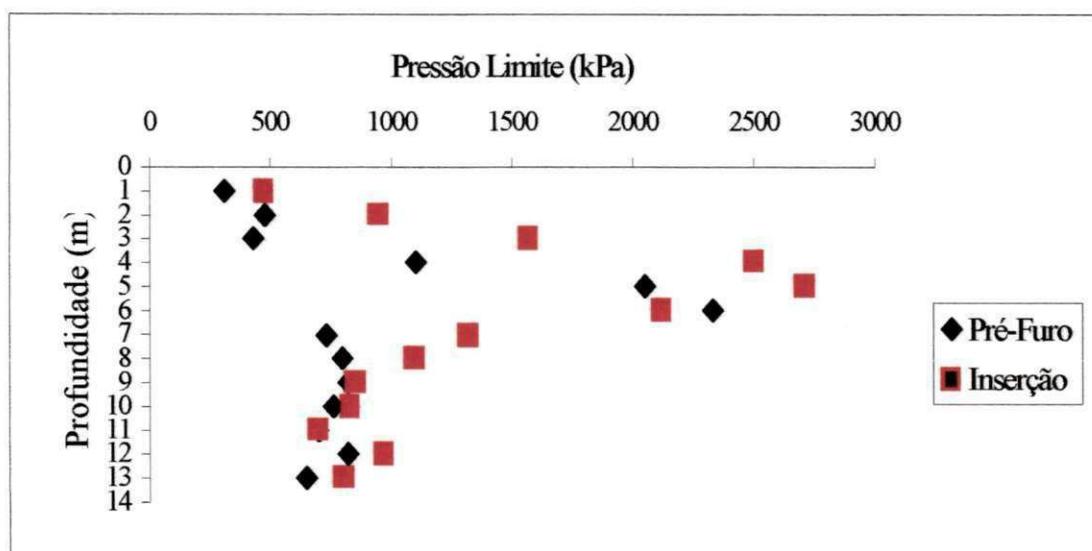


Figura 4.11 – Pressão Limite (P_L) obtida através da sugestão de Van Wambecke & D’Hericourt (1971), para o furo 01, com dados dos ensaios efetuados em pré-furo e após cravação dinâmica.

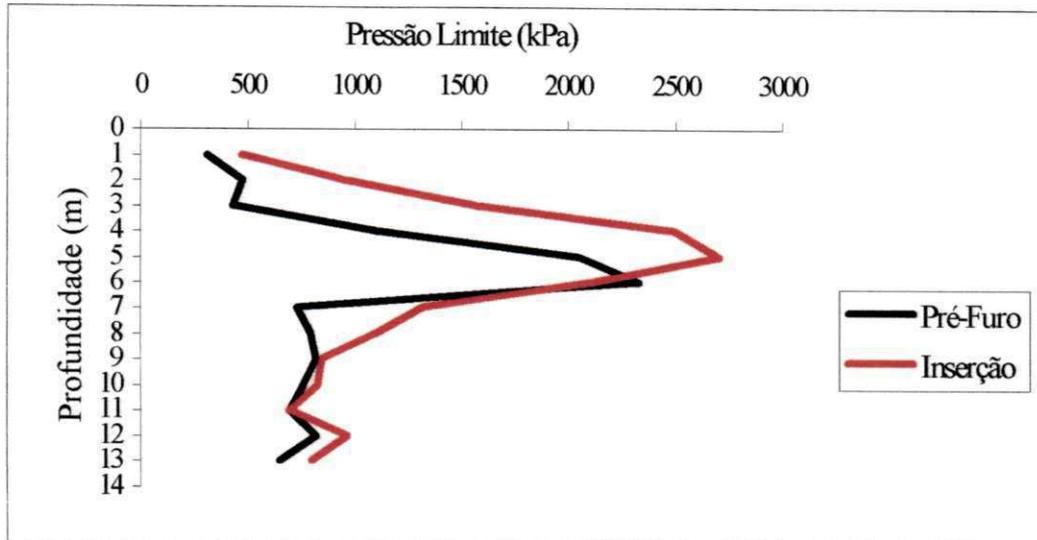


Figura 4.12 – Comparação entre a Pressão Limite (P_L), para o furo 01, obtidos segundo sugestão de Van Wambecke e D’Henricourt (1971), para o ensaio com pré-furo e inserção direta.

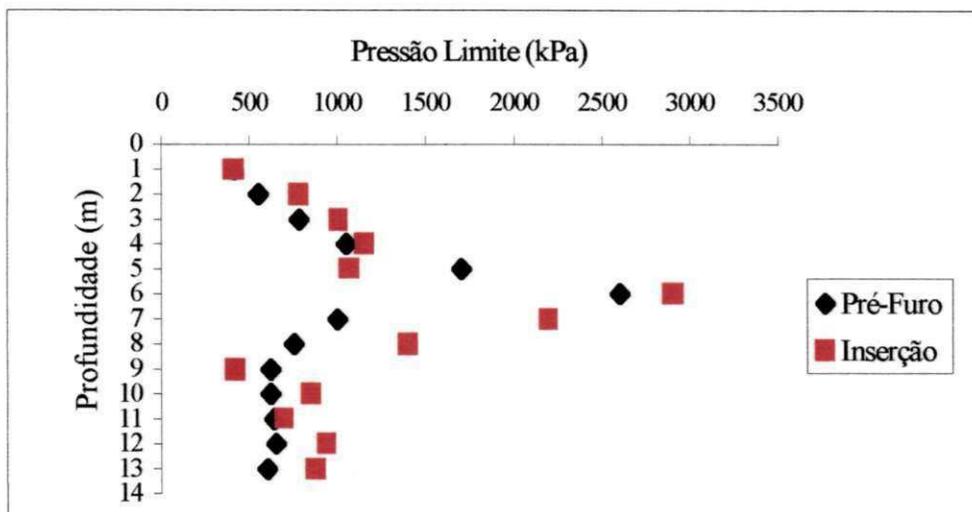


Figura 4.13 – Pressão Limite (P_L) obtida através da sugestão de Van Wambecke & D’Hericourt (1971), para o furo 02, com dados dos ensaios efetuados em pré-furo e após cravação dinâmica.

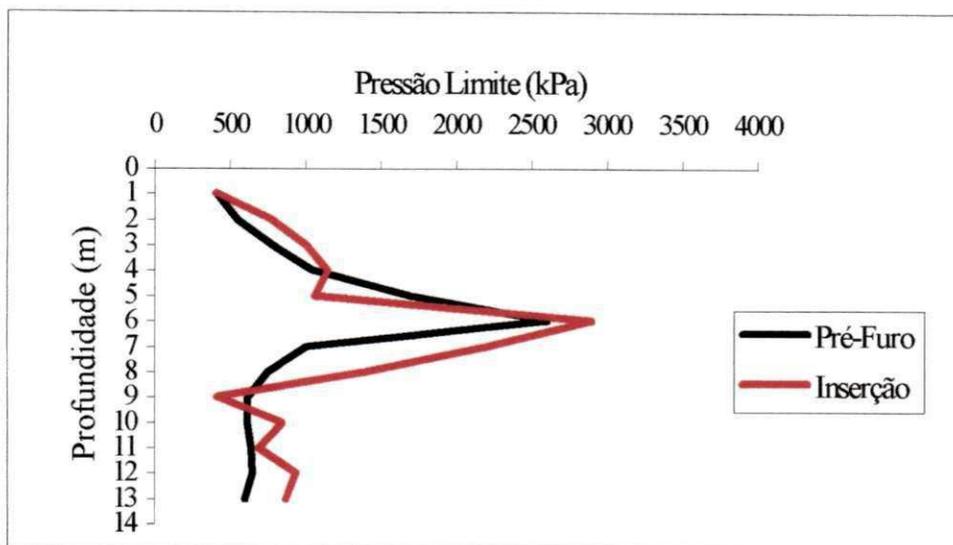


Figura 4.14 – Comparação entre a Pressão Limite (P_L), para o furo 02, obtidos segundo sugestão de Van Wambecke e D’Henricourt (1971), para o ensaio com pré-furo e inserção direta.

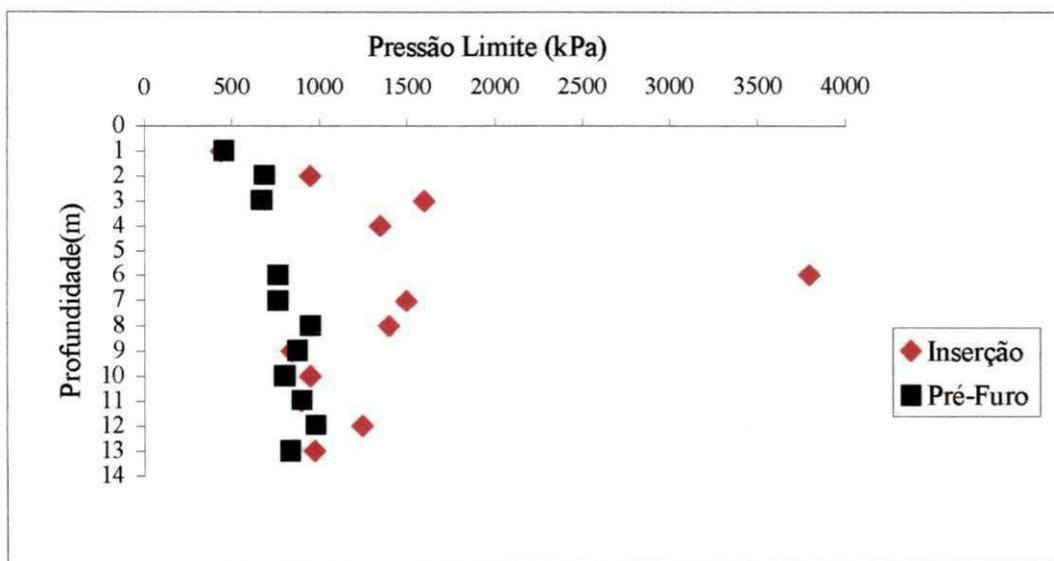


Figura 4.15 – Valores médios da pressão limite obtidos através da sugestão de Van Wambecke e D’Henricourt (1971), com dados dos ensaios efetuados em pré-furo e após cravação dinâmica.

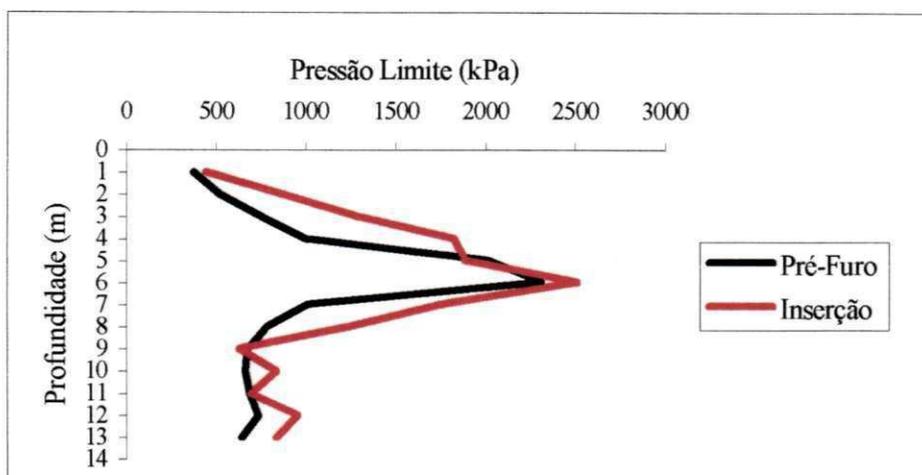


Figura 4.16-Comparação dos valores médios da pressão limite obtidos segundo a sugestão de Van Wambecke e D’Henricourt (1971), para ensaios em pré-furo e após cravação dinâmica.

4.4 – Influência da Compactação (cravação dinâmica) e do Amolgamento (pré-furo)

A Tabela 4.3 mostra a relação entre os valores de E_p e P_L obtidos por inserção direta e por pré-furo. Na Tabela 4.3 as colunas rotuladas por ID, representam os valores estimados pela Norma Americana do ensaio de inserção direta e as colunas rotuladas por PF representam os valores estimados seguindo a sugestão da Norma Americana do ensaio por pré-furo. A Tabela 4.4 mostra os valores do módulo pressiométrico, pressão limite e número de golpes do martelo do SPT em cada cota ensaiada.

Observa-se na Tabela 4.3 que a camada de areia compacta (situada entre 4m e 7m) sofreu uma compactação muito mais intensa que as demais, alterando consideravelmente sua compressibilidade. Entretanto, em relação à resistência à ruptura não se pode afirmar o mesmo, visto que a diferença foi muito pequena.

Verifica-se no gráfico da Figura 4.17, que o grau de compactação do solo não foi fator determinante para o aumento da pressão limite (P_L), visto que entre os 4m e 7m (trecho de maior compactação) a diferença nos valores da Pressão Limite da ID para PF foi muito pequena, em comparação com o aumento ocorrido nos outros trechos, sendo esta diferença da ordem de 4,5% apenas.

Tabela 4.2 - Valores da pressão limite estimados segundo as sugestões de Briaud (1992), Van Wambecke & D'Herincourt (1971) e da Norma Americana (1987).

Cota m	FURO 01						FURO 02						MÉDIA DOS FUROS					
	Pré-Furo			Inserção			Pré-Furo			Inserção			Pré-Furo			Inserção		
	PL1	PL2	PL3	PL1	PL2	PL3	PL1	PL2	PL3									
1	300	380	310	450	500	475	400	450	410	400	390	410	233	277	240	425	445	443
2	490	620	475	1100	1000	950	680	750	550	800	900	780	390	457	342	950	950	865
3	420	510	430	1750	2000	1570			780	1000	1200	1010	210	255	403	1375	1600	1290
4			1100			2502			1050	1250	1350	1150			717	1350	1350	1826
5			2050			2710			1700			1064			1250			1887
6	2200	2300	2330	3200	3800	2120			2600			2902	2200	2300	1643	3200	380	2511
7	820	950	730	1200	1500	1318	1200	1350	1000			2198	1010	1150	577	1200	1500	1758
8	850	900	799	1000	1100	1096	800	950	750	1470	1700	1400	550	617	516	1235	1400	1248
9	800	1100	820	900	1200	850	700	820	620	410	490	420	500	640	480	655	845	635
10	720	750	760	750	1000	830	650	850	620	700	900	850	457	533	460	725	950	840
11	720	900	700	700	900	700	650	900	640	700	900	690	457	600	447	700	900	695
12	850	1000	820	950	1300	970	740	1000	650	900	1200	940	530	667	490	925	1250	955
13	700	800	650	800	1000	800	700	850	600	890	950	875	467	550	417	845	975	838

Tabela 4.3 – Relação entre os parâmetros geotécnicos (E_p) e (P_L) para os ensaios com inserção direta e pré-furo.

Prof. (m)		E_p (kPa)		P_L (kPa)		Relações		Aumento E_p		Aumento P_L	
		P.F	I.D	P.F	LD	E_p (ID/PF)	P_L (ID/PF)	Menor %	Maior %	Menor %	Maior %
1	0,12	2650	6675	373	443	2,5	1,2	150		20	
2	0,22	3259	7954	520	865	2,4	1,7	140		70	
3	0,30	4106	11397	753	1290	2,8	1,7	180		70	
4	0,50	17319	39217	1000	1826	2,3	1,8		130		80
5	0,88	16340	40758	2017	1887	2,5	0,9		150		-10
6	0,36	16318	46918	2310	2511	2,9	1,1		190		10
7	0,14	6036	47389	1010	1758	7,9	1,7		690		70
8	0,29	4729	8270	783	1248	1,7	1,6	60		60	
9	0,36	5630	7538	677	635	1,3	0,9	-10		-10	
10	0,25	5387	6981	667	840	1,3	1,3	30		30	
11	0,18	5628	3885	687	695	0,7	1,0	0		0	
12	0,17	4914	9023	737	955	1,8	1,3	30		30	
13	0,17	2093	7772	640	838	3,7	1,3	30		30	
						Médias	Médias	Relação	Relação	Relação	Relação
								67,8	290	33	37,5

Tabela 4.4 - Valores do módulo pressiométrico e da pressão limite em função do número de golpes por 15 cm de penetração da sonda do solo.

Prof.(m)	N. Golpes/15cm	Módulo Pressimétrico(kPa)		Pressão Limite (kPa)	
		Pré-furo	Inserção	Pré-furo	Inserção
1	10	2650	6675	373	443
2	12	3259	7954	520	865
3	14	4106	11397	753	1290
4	20	17319	39217	1000	1826
5	23	16340	40758	2017	1887
6	64	16318	46918	2310	2511
7	60	6036	47389	1010	1758
8	16	4729	8270	783	1248
9	13	5630	7538	677	635
10	12	5387	6981	667	840
11	12	5628	3885	687	695
12	13	4914	9023	737	955
13	13	2093	7772	640	838

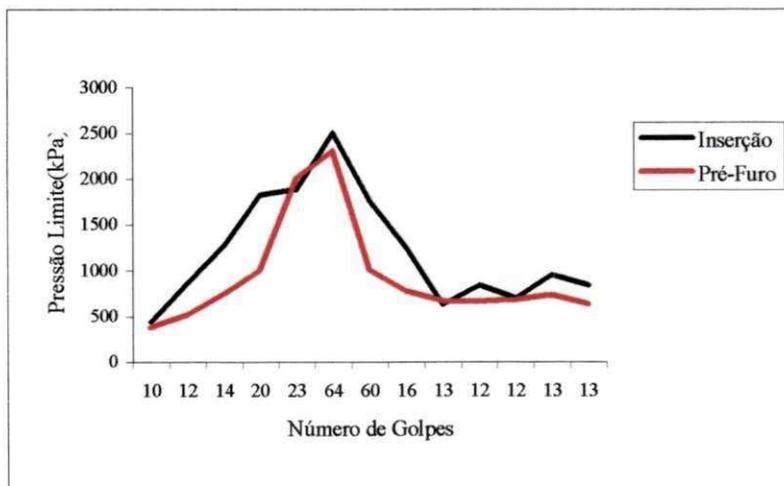


Figura 4.17 – Valores da pressão limite em função do número de golpes por 15cm de penetração da sonda no solo.

Na Figura 4.18 verifica-se que as camadas de maior número de golpes e, conseqüentemente, maior grau de compactidade, tiveram os valores do módulo pressiométrico sensivelmente aumentados, ratificando a grande influência da compactação dinâmica no comportamento elástico do solo.

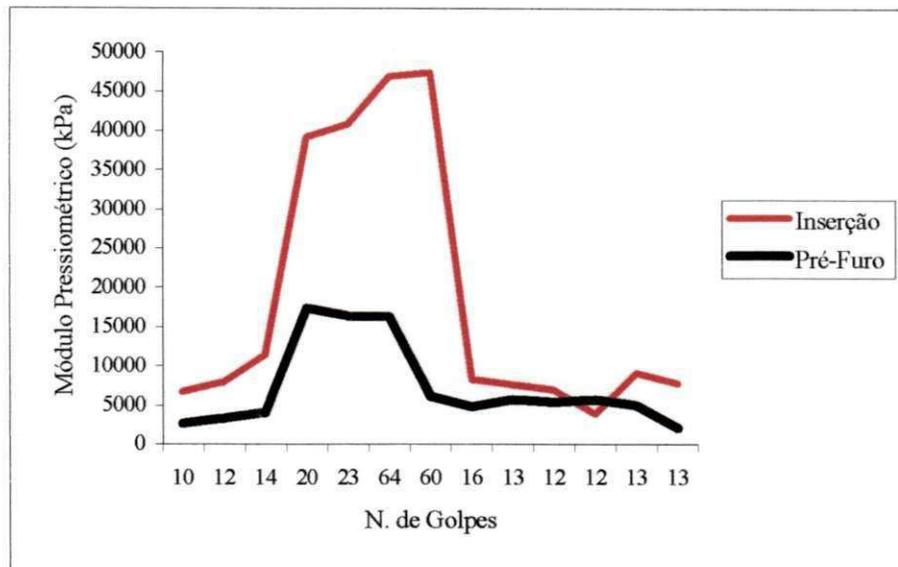


Figura 4.18 – Valores do módulo pressiométrico em função do número de golpes para 15 cm de penetração da sonda no solo.

4.5 – Comparação entre $N_{SPT/15}$ e o Número de Golpes Medidos Para a Cravação dos Últimos 15 cm do Sistema Sonda-haste, Para o Ensaio com Cravação Dinâmica.

A tentativa de obtenção de uma correlação entre o SPT e a cravação da sonda usada no PIPMT tem suas justas razões, uma vez que sendo encontrada uma relação satisfatória e confiável, torna-se possível a utilização do PIPMT para a estimativa tanto dos parâmetros estáticos do solo pertinentes ao próprio PMT (E_p , P_L , etc), quanto do parâmetro dinâmico medido com o SPT, que é a resistência à penetração $N_{SPT/15}$.

Naturalmente, em comparações deste tipo há que se ter a consciência exata das limitações associadas a cada um dos ensaios (SPT e PIPMT), inclusive no que diz respeito ao nível de energia de cravação usado nos dois.

Sendo assim, a medida da resistência à penetração do solo através do PIPMT poderá dar ao projetista de fundações mais recursos para suas análises.

Na figura 4.19 apresenta-se a correlação entre o $N_{SPT/15}$ do SPT para 15cm finais de penetração do amostrador e o N medido durante a cravação da sonda do PIPMT para os 15 cm finais de penetração. Como pode-se observar, a correlação não é satisfatória ($R^2= 0,49$). Porém, procedendo-se a retirada de dois valores que mais se afastaram da tendência geral (causando grande dispersão), os resultados são bem melhores ($R^2=0,88$). Isso é mostrado na Figura 4.20.

É possível que o controle da energia de cravação em ambos os ensaios possa melhorar a correlação entre os dois métodos de obtenção de N. Vale lembrar ainda que durante a cravação da sonda do PIPMT, todo o conjunto de hastes está em contato com o solo, portanto sofrendo influência do atrito lateral. Enquanto que no SPT o atrito lateral só ocorre ao longo do amostrador. Neste caso mesmo que seja controlada a altura de queda do martelo, a energia transmitida à ponta da sonda do PIPMT será diferente da energia que atinge o amostrador do SPT, visto que o atrito lateral altera a transmissão de energia ao longo da haste.

A colocação de luvas de atrito poderá de alguma forma aliviar o efeito do atrito lateral, entretanto, também afetará a energia transferida em função do aumento localizado da impedância.

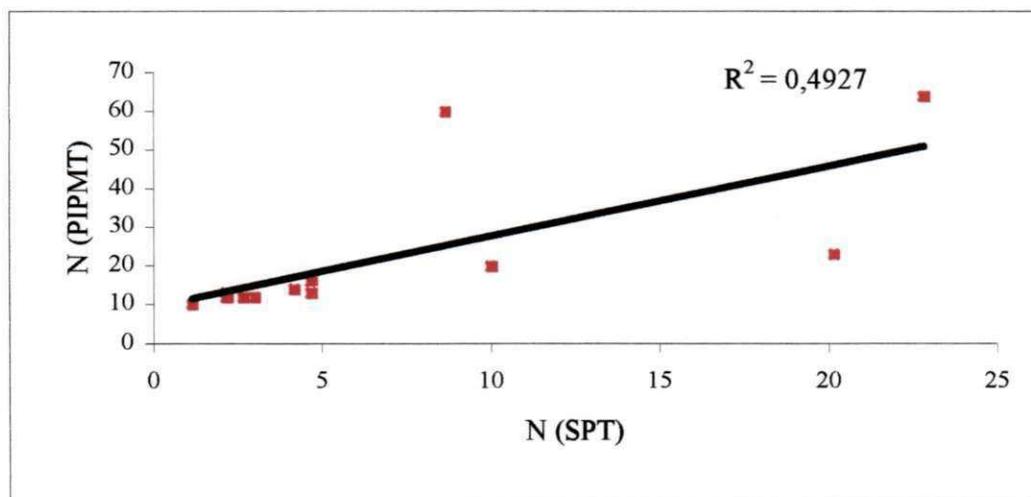


Figura 4.19 – Correlação entre $N_{SPT/15cm}$ e $N_{PIPMT/15cm}$.

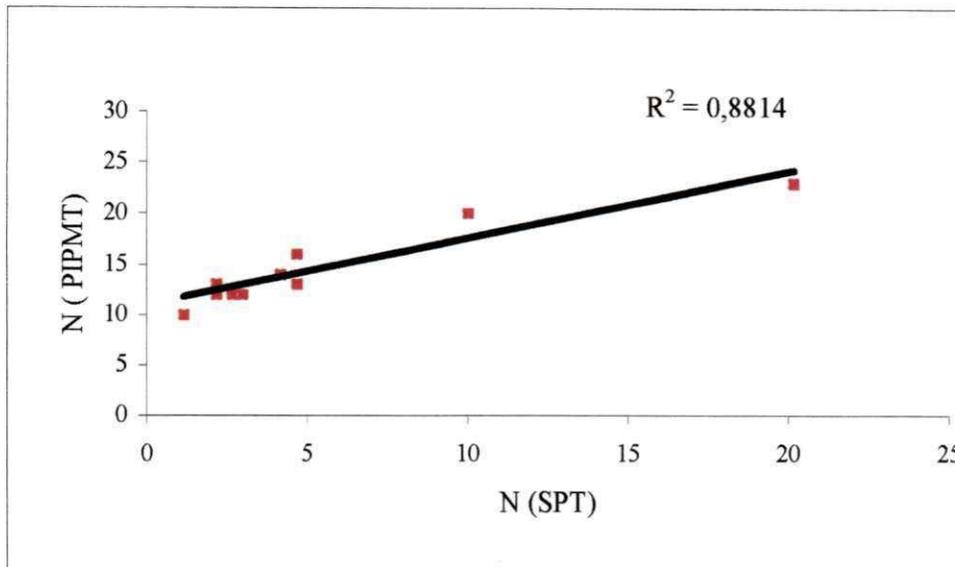


Figura 4.20 – Correlação entre $N_{SPT/15cm}$ e $N_{PIPMT/15cm}$.

4.6 – Modelagem Numérica

O modelo numérico utilizado foi o de Gibson & Anderson (1961), o qual adota as seguintes hipóteses: solo com comportamento elástico até à ruptura, deformação a volume constante e expansão de um cilindro perfeito e infinito.

Nas Figuras 4.21 e 4.22 são apresentadas as modelagens obtidas de acordo com o modelo de Gibson e Anderson (1961).

Na Figura 4.21 (a sonda em pré-furo), observa-se na curva experimental (linha vermelha) o comportamento típico de ensaios em pré-furo, uma vez que existe no início o trecho de recompressão bem característico de furo alargado. Por outro lado, a curva obtida através da simulação numérica que mais se ajusta aos dados de campo, diverge significativamente da curva experimental, principalmente no trecho inicial. Além disso, por causa do alargamento excessivo do pré-furo, não foi possível alcançar a fase de plastificação do solo e conseqüentemente a ruptura devido à limitação de expansão da sonda.

Vale lembrar que o modelo de Gibson & Anderson (1961) foi desenvolvido para ensaios auto-perfurantes. Talvez seja este mais um fator que contribui para a divergência observada na Figura 4.21.

Na Figura 4.22 (a sonda em cravação dinâmica), observa-se na curva experimental (linha vermelha), a fase inicial se ajusta perfeitamente ao modelo. Entretanto no modelo estudado a ruptura ocorre na fase elástica, pois considera-se que a deformação ocorre a volume constante, não reconhecendo assim a fase plástica do solo. Daí, as divergências entre a curva real e o modelo verificadas nessa dissertação.

Para a escolha de um modelo matemático que represente de forma mais coerente o ensaio PIPMT, deve-se fazer comparação entre outros modelos com tal ensaio.

Tais comparações não foram realizadas no atual trabalho em função de algumas limitações enfrentadas durante o desenvolvimento desta dissertação.

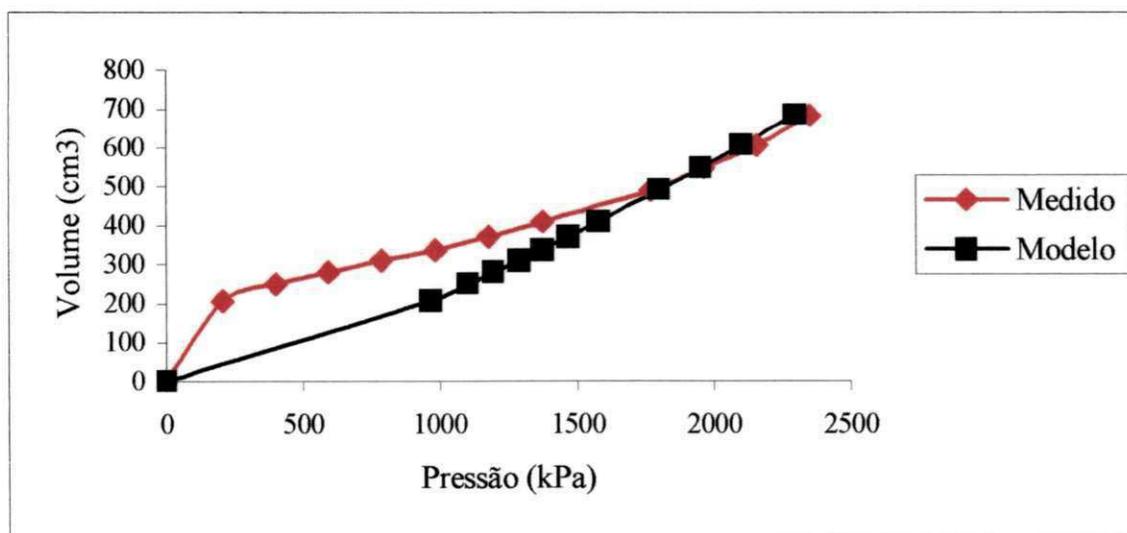


Figura 4.21 – Modelagem numérica obtida para o Furo 01, Ensaio 10, em comparação com a curva real, para o ensaio com pré-furo.

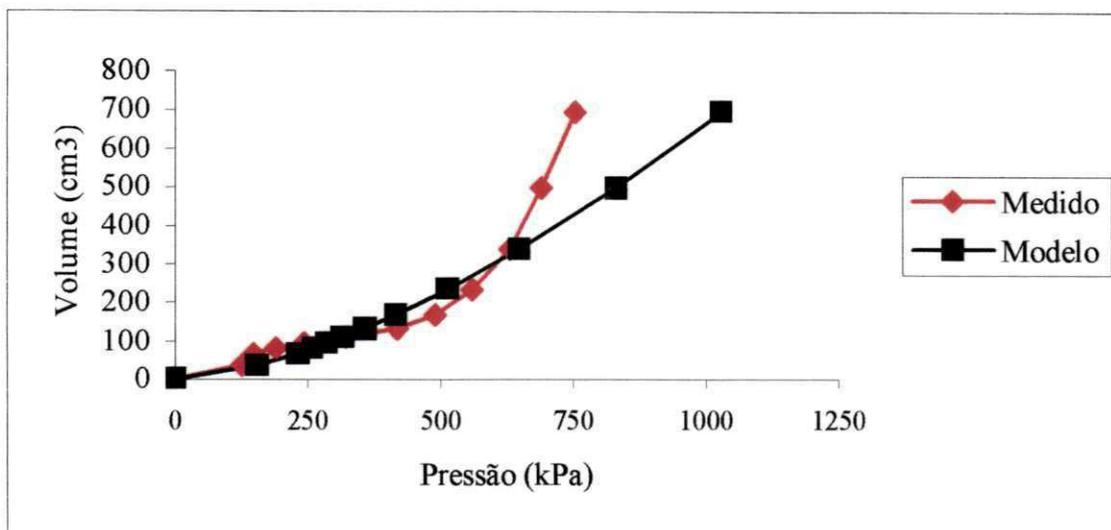


Figura 4.22 – Modelagem numérica obtida para o Furo 01, Ensaio 10, em comparação com a curva real, para o ensaio com inserção dinâmica.

CAPÍTULO 5

Conclusões e Sugestões para Continuidade da Pesquisa

5.1 – Conclusões

Após as realizações das campanhas de ensaios, estimativa dos parâmetros pressiométrico, confecções de gráficos e inferências estatísticas, chegou-se as seguintes conclusões:

1. Para uma padronização do ensaio de inserção direta (cravação dinâmica), necessita-se de alguns aperfeiçoamentos na aparelhagem, como por exemplo, a criação de um sistema de redução do atrito lateral entre o sistema sonda-haste e o solo ou um macaco hidráulico que facilite a retirada do sistema sonda-haste do solo, principalmente em se tratando de ensaios realizados em areias compactas.
2. Evidenciou-se a necessidade de utilização de uma borracha de proteção mais resistente para a sonda de inserção direta. Isso evitaria o desgaste excessivo verificado na borracha das sondas atuais. Observou-se que as ranhuras da haste metálica de proteção desgastam muito a sonda de borracha interna.
3. Quanto ao Módulo Pressiométrico (E_p), observou-se que o grau de perturbação no solo (compactação ou alívio de tensões) influencia na grandeza dos seus valores. Houve um notável acréscimo nos valores devido ao processo de compactação, principalmente nas camadas de maior compacidade (nos trechos entre 4m e 7m houve um aumento muito significativo). Assim, concluí-se que a ordem de grandeza do módulo pressiométrico está diretamente relacionado com o grau de compacidade do solo.
4. Quanto à Pressão Limite (P_L), observou-se que o grau de amolgamento do solo causado pelo processo dinâmico de cravação (compactação ou alívio de tensões) não tem

significativa influência na ordem de grandeza dos seus valores. Paiva et alii (1999), confirmando relatos de Briaud (1992) e Clarke (1995), entre outros, já haviam indicado que a pressão limite sofre maior influência da geometria da sonda (relação comprimento/diâmetro) que propriamente do amolgamento sofrido pelo solo quando da colocação da sonda no furo. Quanto maior a relação geométrica da sonda, menor será o valor da pressão limite (P_L) estimada.

5. Verificou-se uma relação direta entre o número de golpes para penetração dos 15cm da sonda no solo e o módulo pressiométrico. O mesmo aconteceu em relação à pressão limite (P_L). Assim, quanto maior a dificuldade de penetração do sistema sonda-haste maiores os valores dos parâmetros E_P e P_L .

6. A pesquisa atual indica a possibilidade de se poder correlacionar o número de golpes do amostrador padrão e número de golpes do sistema haste-sonda para uma mesma quantidade de penetração e para uma mesma altura de queda do martelo.

7. Com relação a modelagem numérica realizada, verifica-se que o modelo desenvolvido por Gibson & Anderson (1961), melhor se ajusta ao ensaio por inserção direta (cravação dinâmica).

5.2 – Sugestões para a Continuidade da Pesquisa

As sugestões para continuidade desta pesquisa são:

1. Realizar o ensaio com inserção dinâmica e energia potencial de cravação controlada, de forma que seja permitido relacionar o número de golpes à penetração, mais consistentemente.

2. Comparar resultados de ensaios em pré-furo, de cravações dinâmicas e estáticas, para quantificar os valores do módulo pressiométricos (E_P) e da pressão limite (P_L) em função do método de instalação da sonda empregado.

3. Tentar realizar o mesmo ensaio após cravação estática e se possível, usar também o pressiômetro auto-perfurante, para comparar a influência de ambos os processos na estimativa dos parâmetros geotécnicos.

4. Verificar qual a modelagem numérica que melhor se ajusta a cada um dos três processos de inserção da sonda (pré-furo, cravação dinâmica e cravação estática) para futuramente fazer uso da mesma na determinação de curvas pressiométricas em solos de mesmas características e, a partir daí, determinar os parâmetros geotécnicos .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1980)**, Execução de Sondagem de Simples Reconhecimento dos Solos (6484-80).
- AJOLLOIEN, R. & YU, H.S. (1998)**, Chamber studies of the effects of Pressuremeter Geometry on Test Results in Sands, *Géotechnique* 48, No. 5, pg 621 – 636.
- ALCANTARA, P.B (1992)**, Avaliação da Capacidade de Carga de Fundações Rasas em Solos Argilosos Através do SPT, da Prova de Carga Sobre Placas e do Ensaio Pressiométrico, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba – Campina Grande.
- AMAR, S., JEZEQUEL, F. (1972)**, Essais en Place et en Laboratoire sur sols cohérents comparaisos des résultats, *Bulletin de Liaison de LCPC*, Paris, n. 58, pp. 97 – 107.
- ASTM D 4719 (1987)**, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS, Standart Test Method for Pressuremeter Testing in Soil, *Annual Book of Standart*, v.04.08, New York.
- BAGUELIN, F., JEZEQUEL, J.F & SHIELDS, D.H. (1978)**, The Pressuremeter and Foundations Engineering, 1ª Ed . Clausthal, Germany, Tech Publication, 617p.
- BRANDT, J.R.T. (1978)**, Utilização de um novo pressiômetro para a determinação do comportamento elástico de solos residuais e gnáissicos jovens e de estratos do terciário paulista, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC, Rio de Janeiro.
- BRIAUD, J.L., TAND, K, E., FUNEGARD, E.G.G (1986)**, Pressuremeter and Shallow Foundations on Stiff Clay, Spread Foundations, *Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington (citados por Briaud, 1992).

BRIAUD, J.L. (1992), The Presurremeter, Trans Tech Publications, A.A Balkema, Roterdã, 322, p.

BRIAUD, J.L., TUCKER, L., FÉLIO, G. (1983), Pressuremeter, CPT and Foundation Design, Vol. I, Carleton University, Ottawa, Canadá.

BRIAUD, J.L. & GAMBIN, M. (1984). Sugested Practice for Drilling Boreholes for Pressuremeter Testing, Vol.7, N. 01, pp.36 – 40.

CALHOON, M. (1970), “ Field testing with pressuremeter”, Lecture given at the University of Kansas. U.S.A (unpublished).

CAVALCANTE, E.H. (1997), Uma Contribuição ao Estudo do Comportamento Tensão – Deformação de um Depósito de Argila Mole da Cidade do Recife, Através da Utilização do Pressiômetro Ménard, Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande – PB, 170p.

CARTER, J.P., BOOKER, J.R., YEUNG,S.K. (1986), Cavity expansion in cohesive frictional soils. Géotechnique, London, v.36, n.3, p.349 – 358.

CARTER, J.P., YEUNG, S.K. (1985), Analysis of cylindrical cavity expansion in strain weakening material. Computation geotechnical, v.1, p. 161 –180.

CASSAN, M. (1968-1969), Les essais in situ en mécanique des sols – Contruction. N. 10, October 68, pp. 337-347; N.5, Mai 69. Pp.178-187. N. 7-8, Jullet- Aout 69, pp.244-256.

CLARKE, B.G. (1995), Pressuremeter in Geotechnical Design, Chapman & Hall, Cambridge, Grã – Bretanha, 326p.

CAPUTO, P.H., (1983), Mecânica dos Solos e suas Aplicações, Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 2ª. Edição.

DRUCKER, D.C., Greenberg, H.J., and Prager, W.(1951). "The safety factor of on elastic-plastic body in plane strain." *J. Appl. Mech.*, 18, 371-378.

FURTADO, K, F. (1998), Avaliação de Parâmetros de Resistência e Deformabilidade em Subsolos Arenosos da Cidade de João Pessoa, Através do Pressiômetro de Ménard, Dissertação da Mestrado, UFPB, Campina Grande – PB, 171p.

GIBSON, R.E. & ANDERSON, W.F. (1961) In situ Measurement of Soil Properties with pressuremeter, *Civil Engineering and Public Works Review*, London , 56 No. 658, May.

HOBBS. N. B. & DIXON. J.C., (1969), In Situ Testing for Bridge Foudations in the Devonain Marl – Proceedings of the conference on In Situ Investigations in Soils and Rocks, British Geotechnical Society, London, May 13-15. Pp. 31-38

JEFFERIES, M.G., (1988), Determination of horizontal geostatic stress in clay with self-bored pressuremeter. *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, v. 25, p. 559-573

MÁNTARAS , F.M. (1995), Análise Numérica do Ensaio Pressiométrico Aplicada a Previsão do Comportamento de Fundações Superficiais em solos não Saturados, Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 150p.

MANASSERO, M. (1989), Stress-Strain Relationships from Drained Self-borings Pressuremeter Test in Sands, *Geotechnique*, 39 (2), pp. 239 – 307. (citado por NAKAHARA, 1995a)

MEDEIROS, J.L.G. (1998), Estudo do Comportamento Tensão-Deformação de um Depósito Arenoso da Cidade de João Pessoa Através do Pressiômetro Ménard, Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande – PB, 74p.

MÉNARD, L. (1975), The Ménard Pressuremeter, Interpretation and Application of Pressuremeter Test Results to Foundation Design, Soils-Soils, n.26.

MÉNARD, L. (1970), Détermination de la poussée par sol sur une paroi de soutènement: Paris (Publication D/38).

MÉNARD PRESSUREMETER. (1994), Manual of Instructions, APAGEO/SEGELM.

MEHTA, B.G.(1989), Evaluation of Subsoil Properties by Pressuremeter Test, XII ICSMFE, Vol. I, Rio de Janeiro, pp.295 – 298.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA (1972), Levantamento Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba, Bol. 15 Nº 08, Rio de Janeiro.

MORI, H.; TAJIMA, S (1964) The application of pressuremeter method to the design of deep foundations. Soils and Foundations, Tokyo, v.4, n.2, p.34-44.

NAZARET, M., (1972), “Influence du mode de mise en oeuvre de la sonde pressiométrique” Rapport de Recherche du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d’Angers, F.A.E.R. 1.05.11.1, Mars, Not Published.

NAKAHARA, S.M., (1995), Determinação de Propriedades de um Solo não Saturado Através de Ensaios Pressiométricos e de Laboratório, Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 143p.

NF P94 100 (1991), Norme Française, Essai Pressiométrique Ménard, Paris.

- PAIVA, W., CONCIANI, W e BEZERRA, R, L.(1999)** Estudo Comparativo Entre os Parâmetros Mecânicos com Pressiômetro de Sondas Briaud e Ménard, I Encontro de Pós- Graduandos da UFPB, João Pessoa – PB, p. 14.
- PAIVA, W; CONCIANI,W ; BEZERRA,R,L e CAVALCANTE, E,H. (2000),** Comparação Entre Resultados de Ensaios com os Pressiômetro Briaud e Ménard, Seminário Brasileiro de Investigações de Campo SEFE. São Paulo – SP, pp. 337 – 342.
- PALMER, A.C. (1972),** Undrained Plane-Strain Expansion of a Cylindrical Cavity in Clay: a Simple Interpretation of the Pressuremeter Test, *Géotechnique*, v.22,n.3, pp.451-457.
- POULOS, H,G. & DAVIS,E.H. (1980),** *Pile Foundation Analysis and Design*, 1ª Ed. Copyright. 397p.
- ROBINSKY, E, I. & MORRISON, C, E. (1964),** “Sand Displacement and Compaction Around Model Friction Piles.” *Can. Geot. Jul.*, vol. 1, n. 2:81.
- SALGADO, R., MITCHELL, J.K & JAMIOLKOWSKI, M. (1997),** Cavity Expansion and Penetration Resistance in Sand, *Journal of Geotechnical and Engineering*, ASCE, pp. 344 – 354, v.123, N° 04.
- VAN WAMBECKE, A., D’HERICOURT, J. (1971),** *Courbes pressiométriques inverses. Méthode d’interprétation de l’essai pressiométrique.* Bruxelles, Royal Military School Publications.
- VELLOSO, D, A. e LOPES, F,R., (1996),** *Fundações*, COPPE, 2ª edição, Rio de Janeiro –RJ.

WASCHKOWSKI, E., (1976), “Comparaisons entre les résultats des essais pressiométriques et le SPT”- Rapport de Recherche du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois, F.A.E.R. 1.05.23.5, Juin, Not Published.

YU, H.S. and G.T. HOULSBY., (1991), Finite Cavity Expansion in Dilatant Soils: Loading Analysis, *Geotechnique*, v.41,n.2, pp. 173-183.

YU, H.S. (1996), Interpretation of Pressuremeter Unloading Test in Sands, *Geotechnique*, v. 47, n5, pp. 1096 – 1071.

APÊNDICE I

**CURVAS PRESSIOMÉTRICAS TÍPICAS DAS CAMADAS
CARACTERÍSTICAS: Areia fofa a pouco compacta (Ensaio 02), areia
mediamente compacto (Ensaio 05), silte pouco compacta (Ensaio 08).**

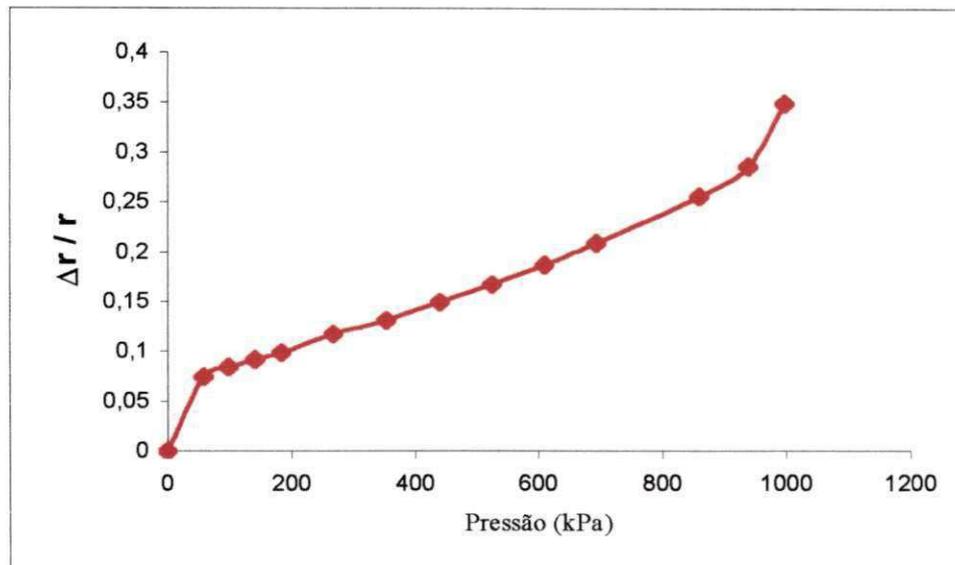


Figura I.1 - Curva pressiométrica obtida a partir do método de Briaud (1992) no Furo 01, Ensaio 08, pelo processo de cravação dinâmica.

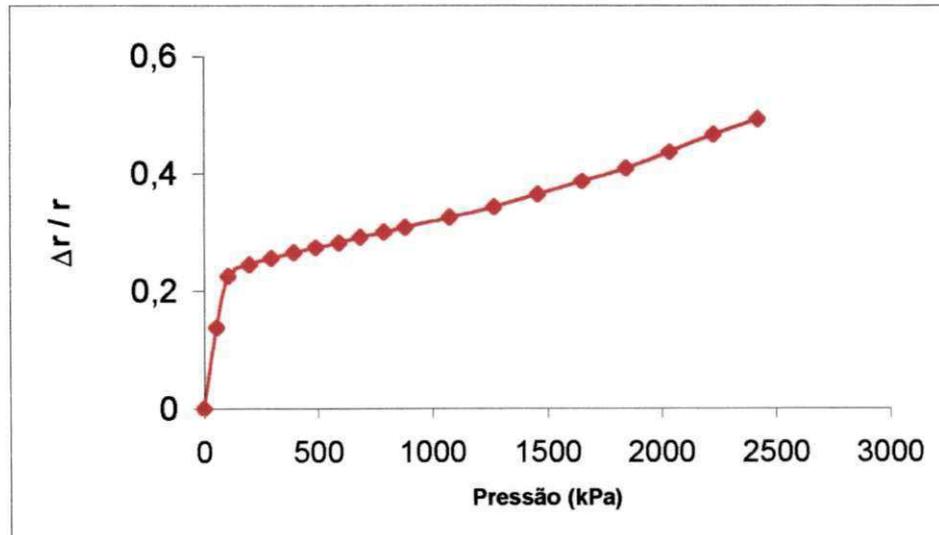


Figura I.2 - Curva pressiométrica obtida a partir do método de Briaud (1992) no Furo 01, Ensaio 05, pelo processo de pré-furo.

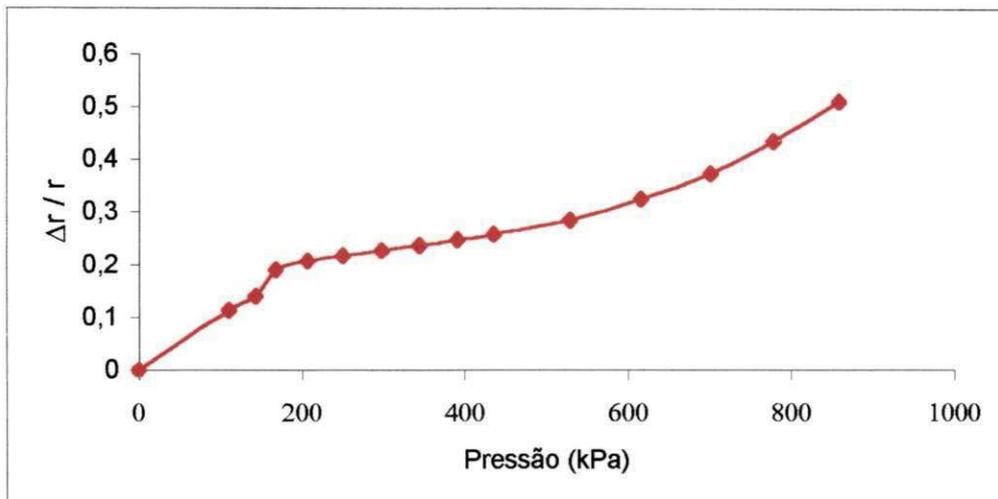


Figura I.3 - Curva pressiométrica obtida a partir do método de Briaud (1992) com dados do Furo 01, Ensaio 08, pelo processo de pré-furo.

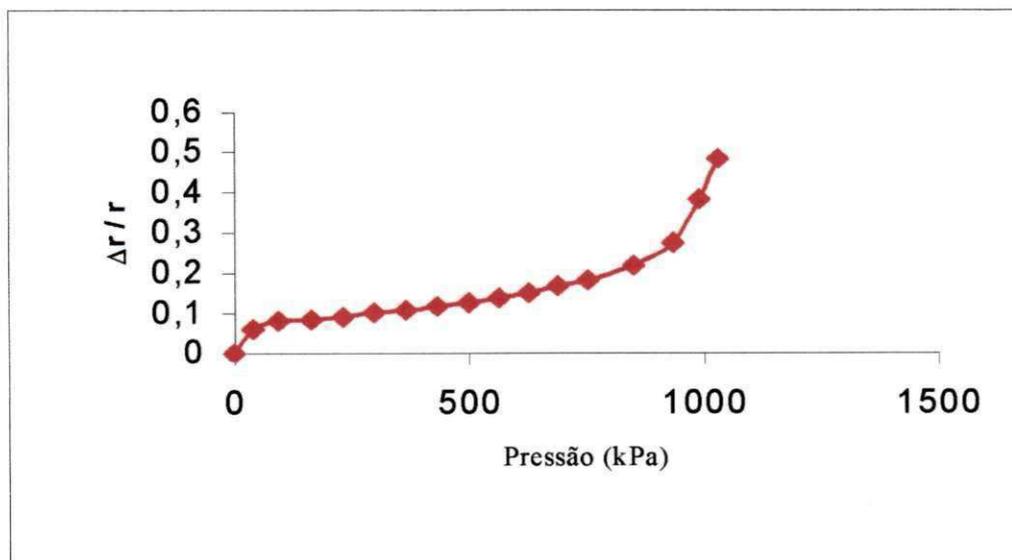


Figura I.4 - Curva pressiométrica obtida a partir do método de Briaud (1992) com dados do Furo 01, Ensaio 02, pelo processo de cravação.

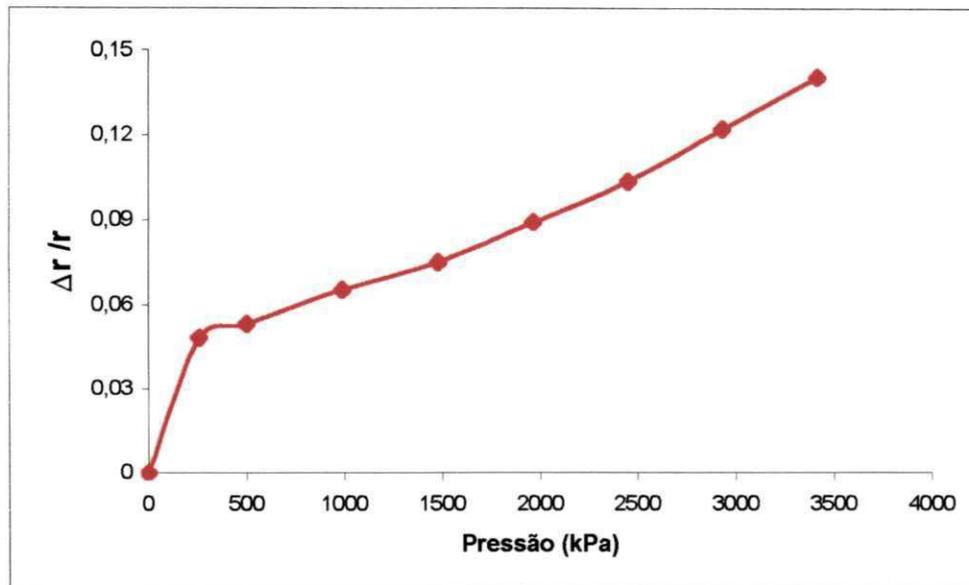


Figura I.5 - Curva pressiométrica obtida a partir do método de Briaud (1992), com dados do Furo 01, Ensaio 05, pelo processo de cravação.

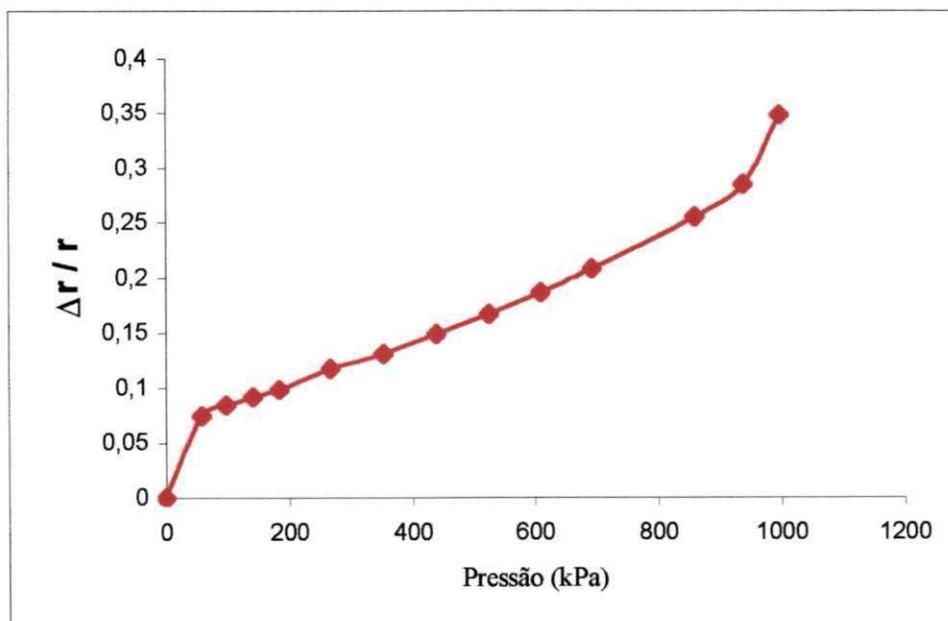


Figura I.6 - Curva pressiométrica obtida a partir do método de Briaud (1992), com dados do Furo 01, Ensaio 02, pelo processo de pré-furo.

APÊNDICE II

II.1 - PERFIS DE PRESSÃO LIMITE (PRÉ-FURO E CRAVAÇÃO DINÂMICA).

**ESTIMATIVA: Briaud(1992), Norma Americana(1987) e Van
Wambecke & D'Hericourt(1971)**

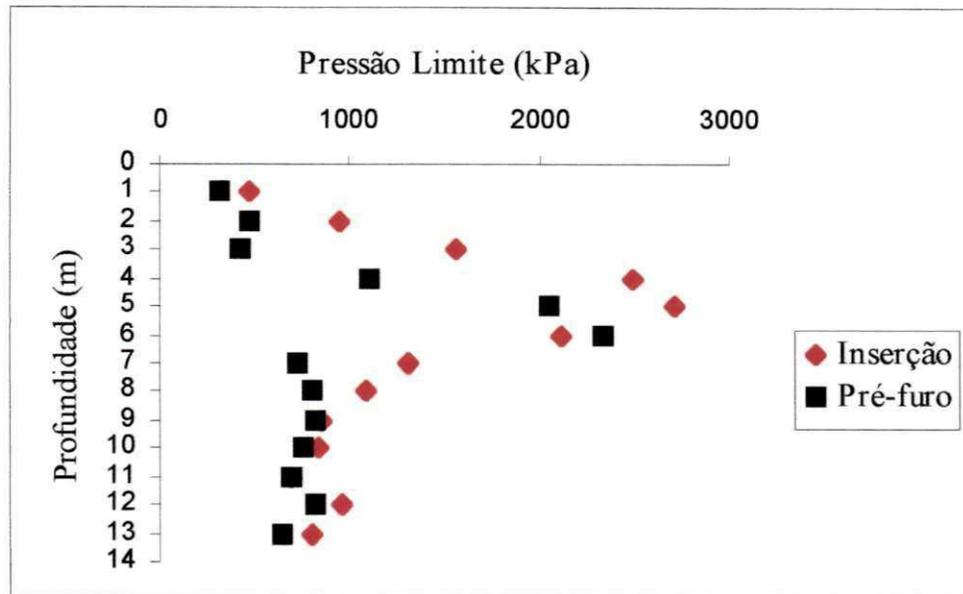


Figura II.1.1 - Perfil de pressão limite obtido a partir do método de Briaud (1992) no Furo 01.

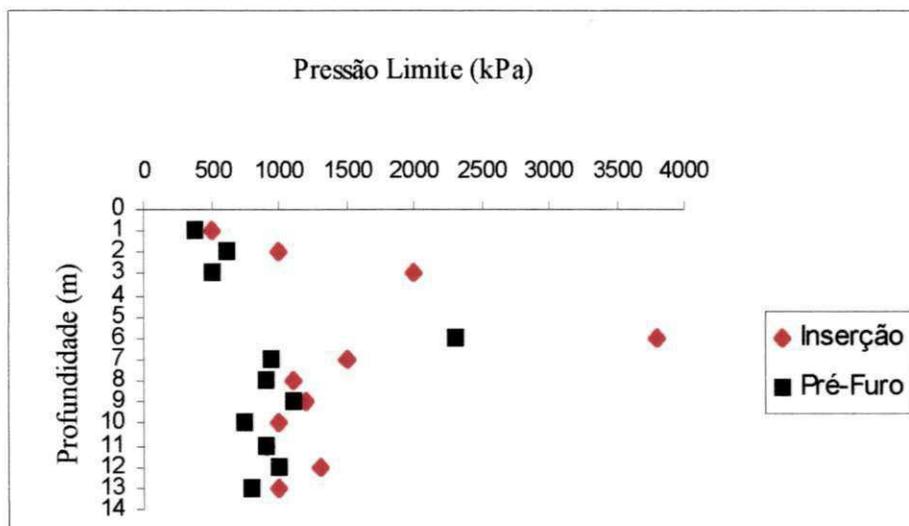


Figura II.1.2 - Perfil de pressão limite obtido a partir do método de Van Wambecke e D'Henricourt (1971) no Furo 01.

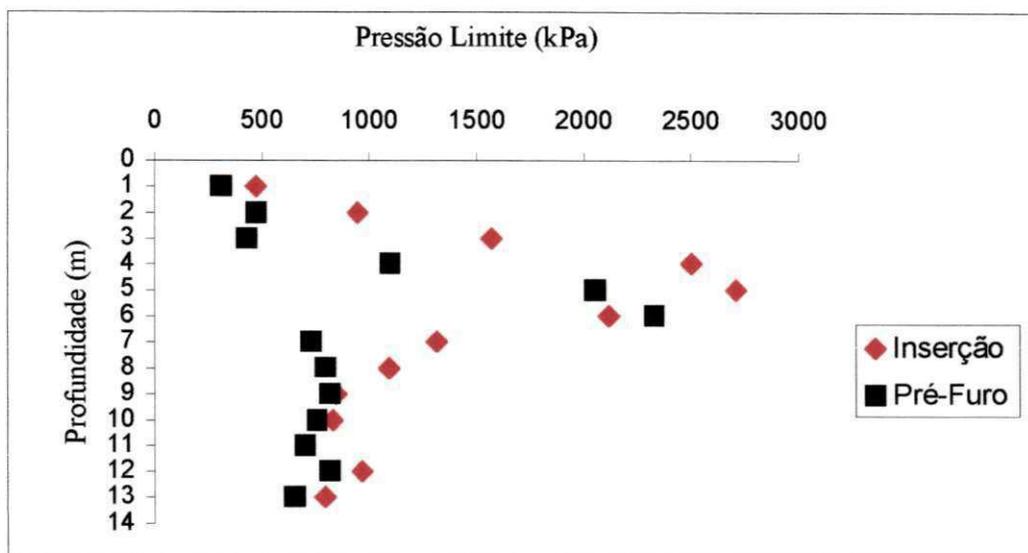


Figura II.1.3 - Perfil de pressão limite obtido a partir do método da Norma Americana ASTM D4719 (1987) no Furo 01.

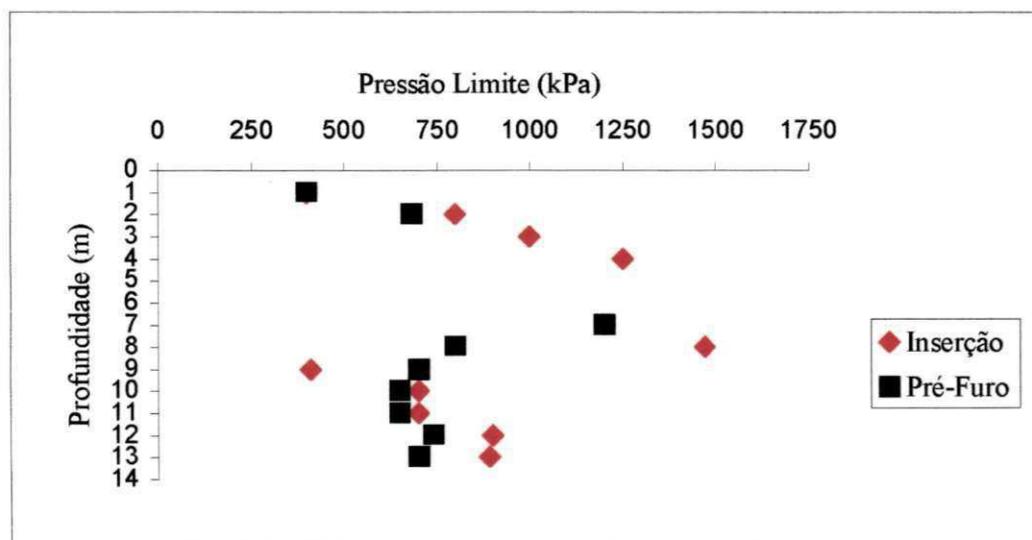


Figura II.1.4 - Perfil de pressão limite obtido a partir do método de Briaud (1992) no Furo 02.

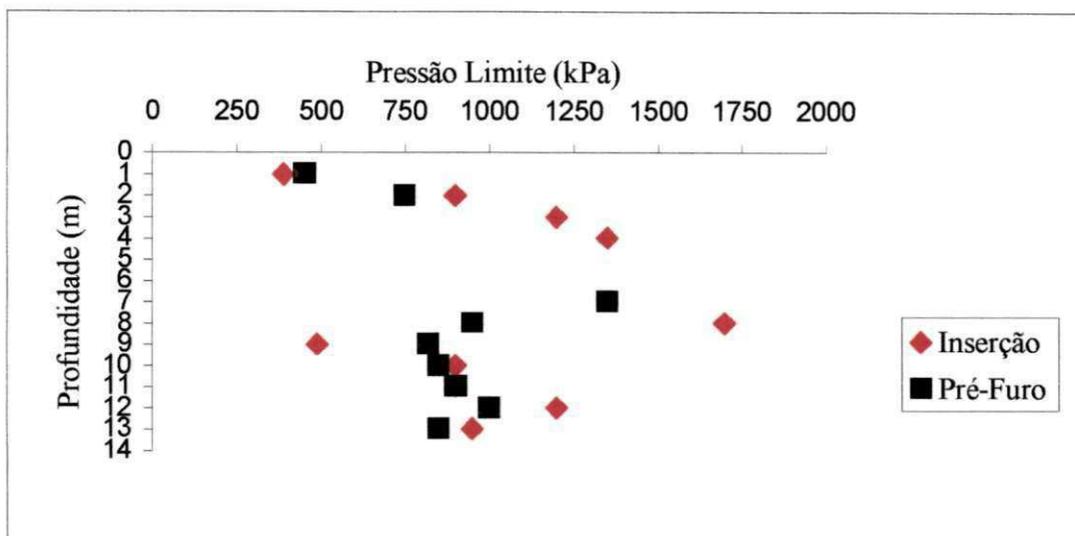


Figura II.1.5 - Perfil de pressão limite obtido a partir do método de Van Wambeke e D'Henricourt (1972) no Furo 02.

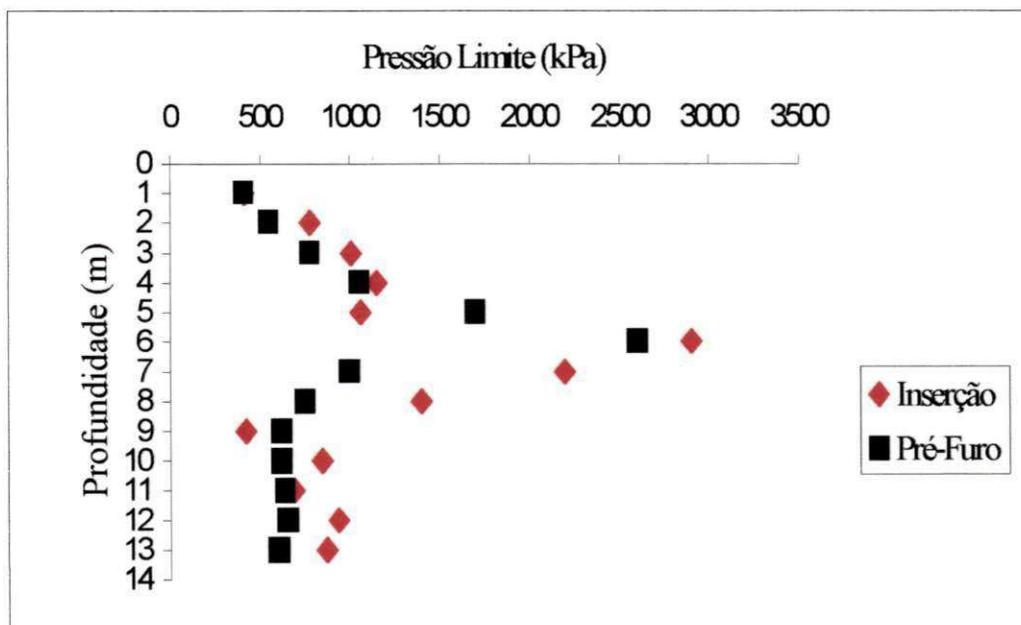


Figura II.1.6 - Perfil de pressão limite obtido a partir do método de Norma Americana ASTM D4719 (1987) no Furo 02.

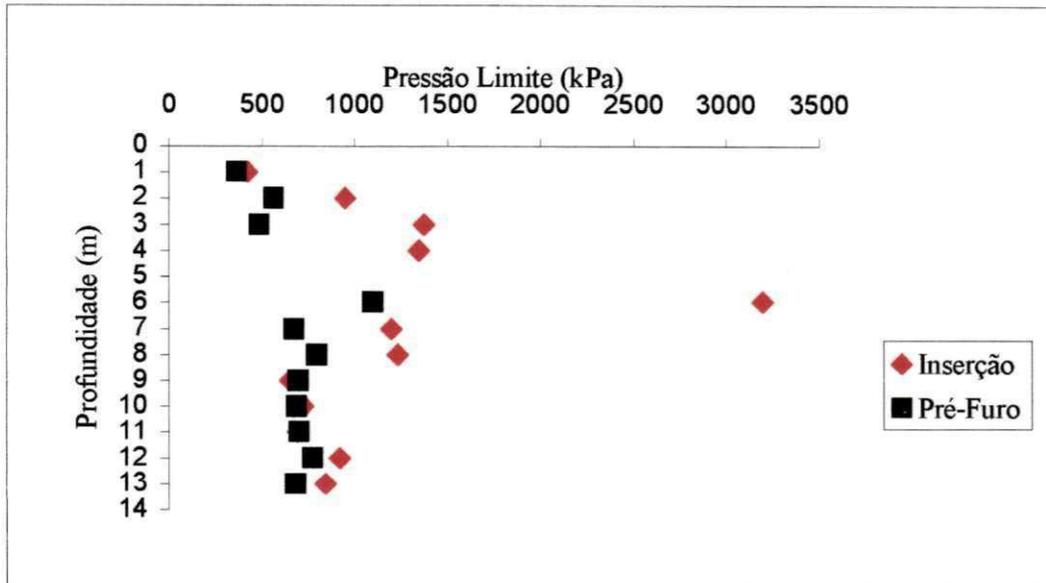


Figura II.1.7 - Valores médios da pressão limite, em função da profundidade, obtidos a partir do método de Briaud (1992).

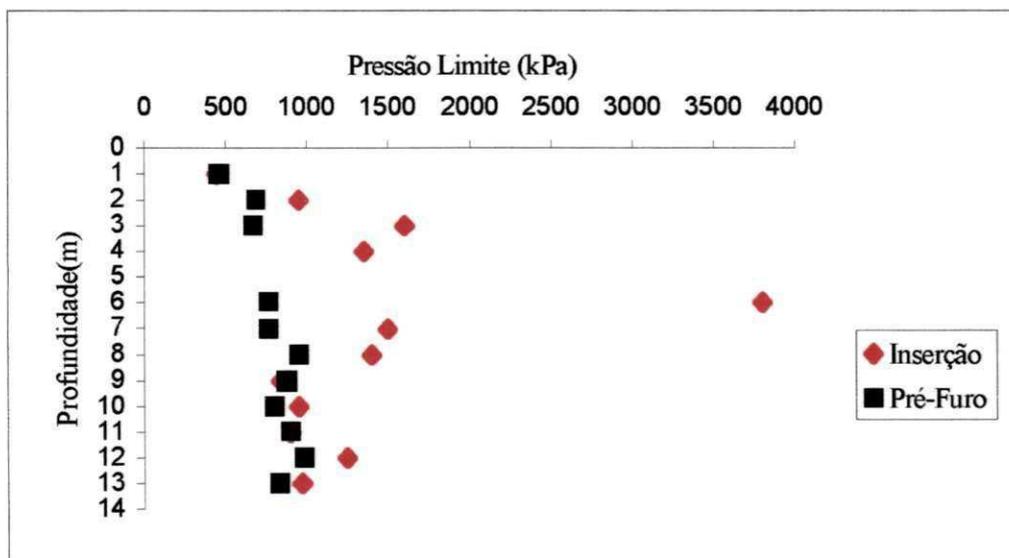


Figura II.1.8 - Valores médios da pressão limite, em função da profundidade, obtidos a partir do método de Van Wambecke e D'Henricourt (1971).

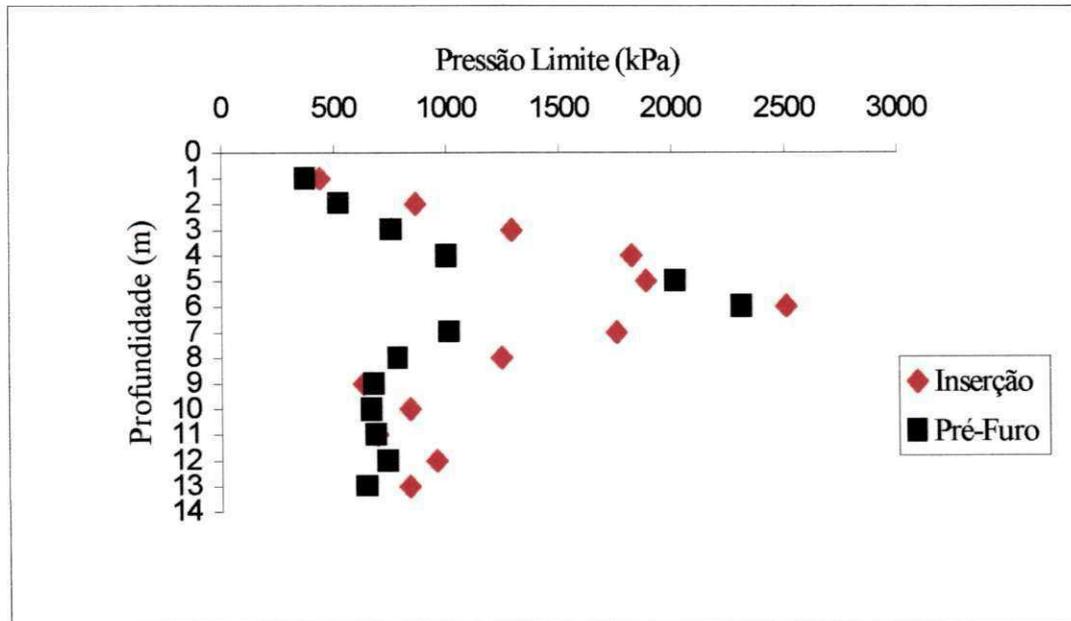


Figura II.1.9 - Valores médios da pressão limite, em função da profundidade, obtidos a partir da Norma Americana ASTM D4719 (1987).

APÊNDICE II

II.2 - PERFIS DO MÓDULO PRESSIOMÉTRICO (PRÉ-FURO E CRAVAÇÃO DINÂMICA

**ESTIMATIVA: Briaud(1992) e Norma Americana ASTM D 4719
(1987).**

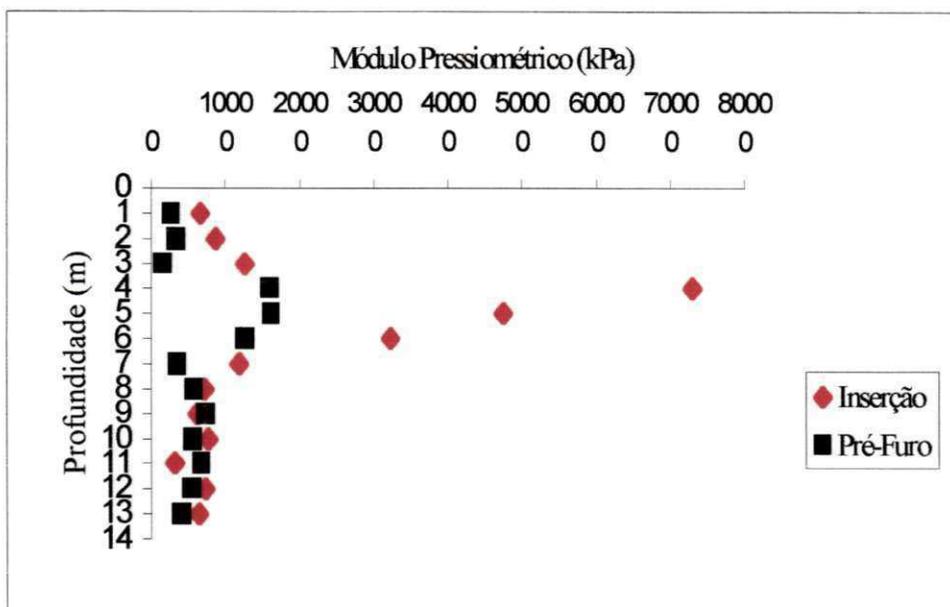


Figura II.2.1 - Perfil do módulo pressiométrico obtido a partir do método de Briaud (1992) no Furo 01.

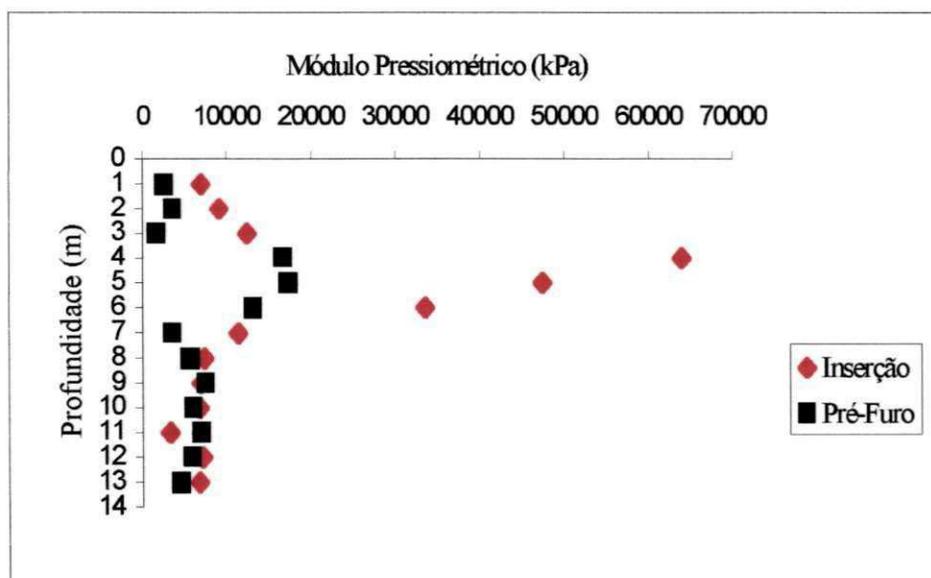


Figura II.2.2 - Perfil de módulo pressiométrico obtido a partir do método da Norma Americana ASTM D4719 (1987) no Furo 01.

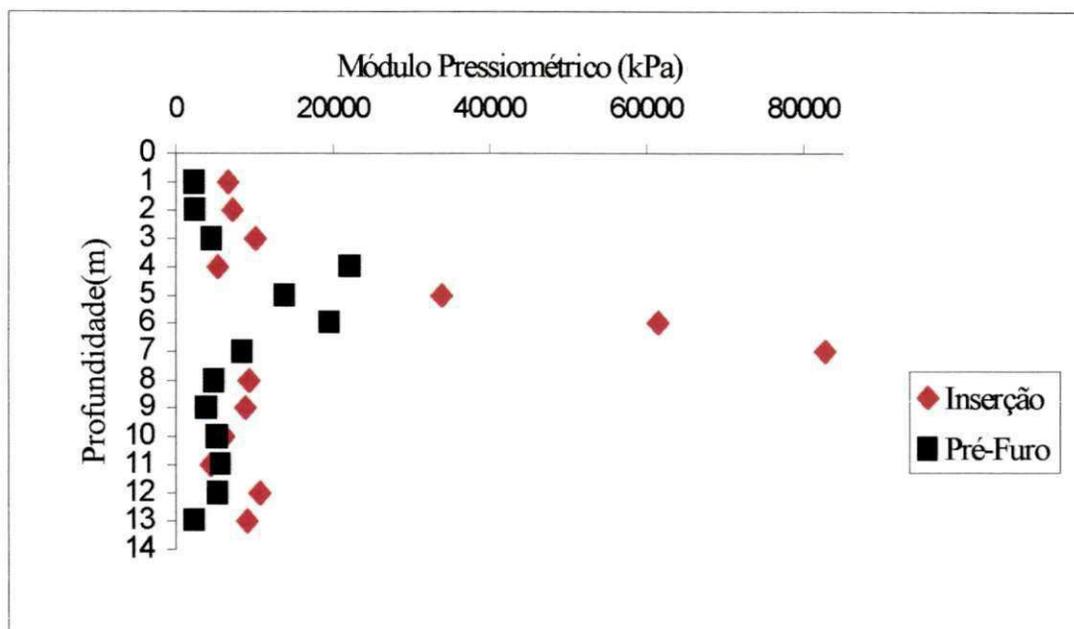


Figura II.2.3 Perfil do módulo pressiométrico obtido a partir do método de Briaud (1992) no Furo 02.

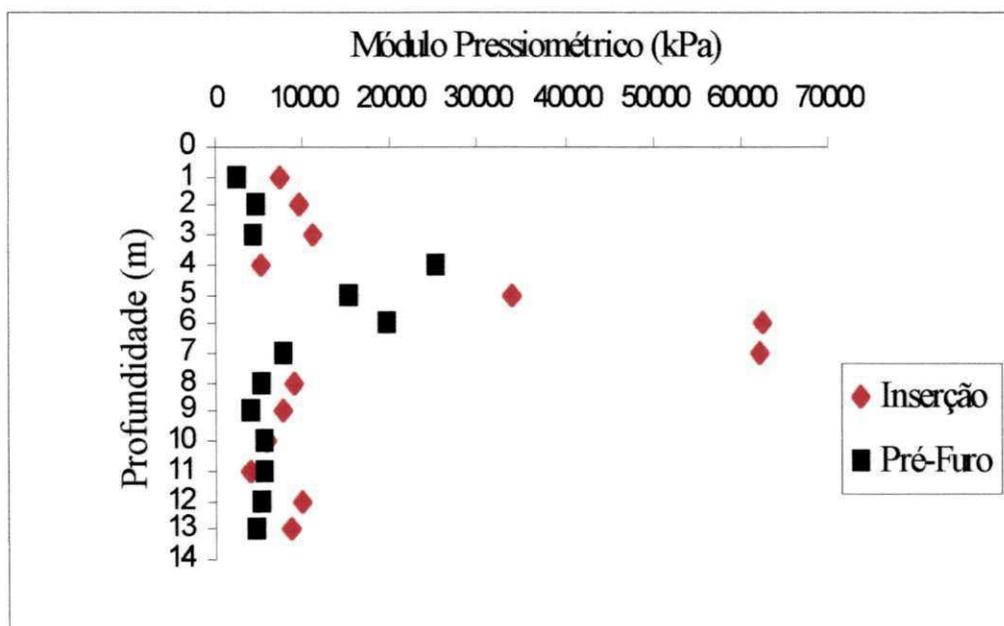


Figura II.2.4 Perfil de módulo pressiométrico obtido a partir do método da Norma Americana ASTM D4719 (1987) no Furo 02.

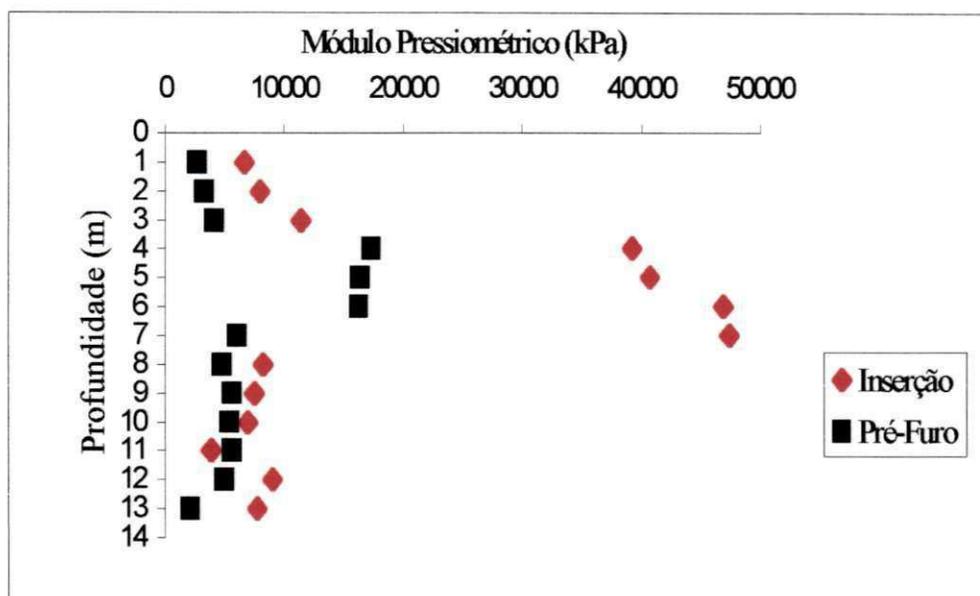


Figura II.2.5 – Valores médios do módulo pressiométrico, em função da profundidade, obtidos a partir do método de Briaud (1992).

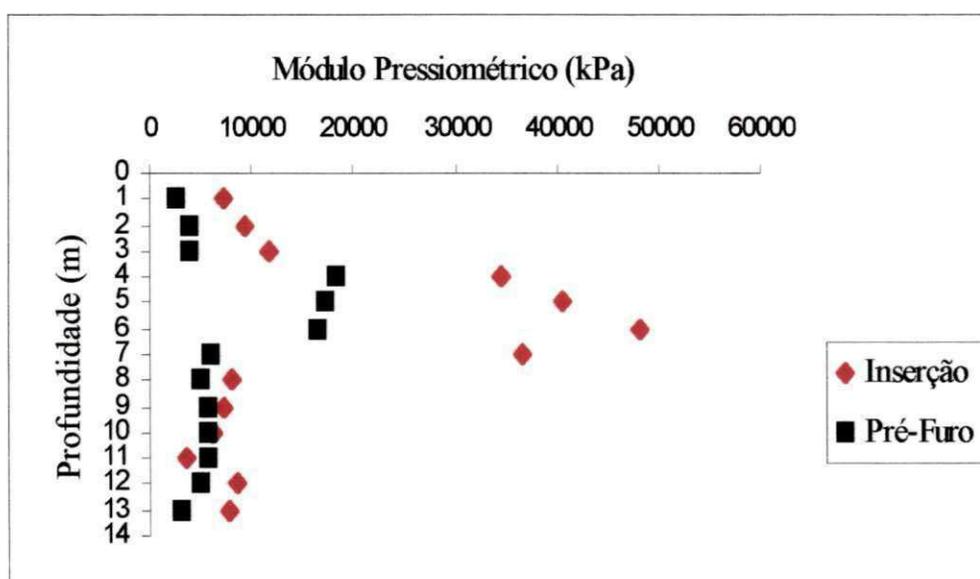


Figura II.2.6 – Valores médios do módulo pressiométrico, em função da profundidade, obtidos a partir da Norma Americana ASTM D4719 (1987).

APÊNDICE III

SONDAGENS COM SPT E FOTOS DA CAMPANHA DE ENSAIOS

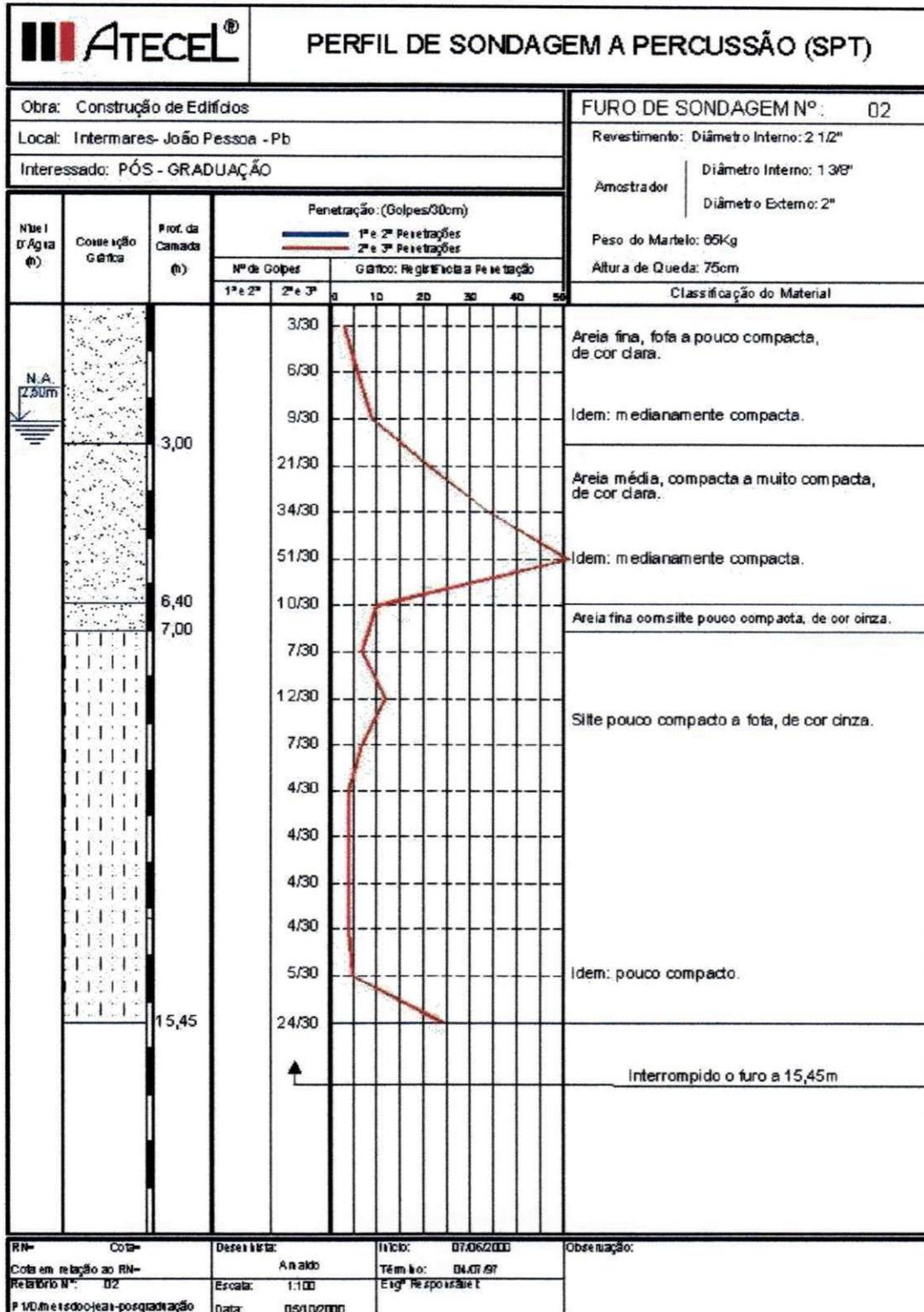


Figura III.2 – Perfil de sondagem SPT obtido no Furo 02 da área estudada.

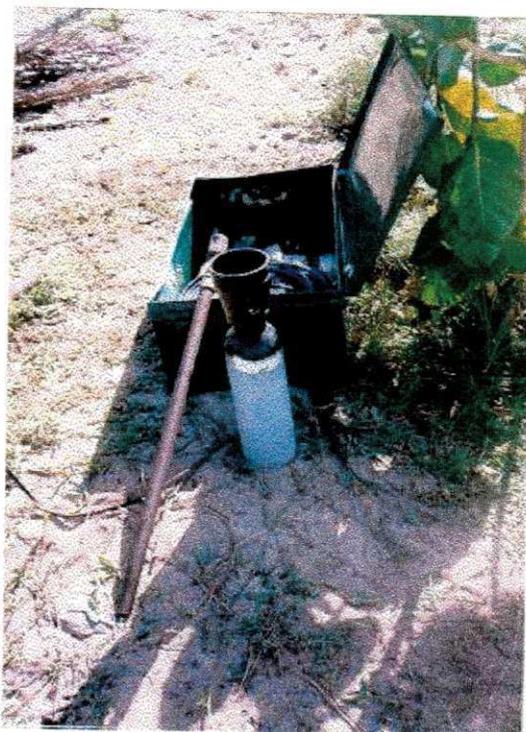


Figura III.3 - Adaptação da cabeça de bater.



Figura III.4 - Válvula de alimentação com proteção metálica rompida.



Figura III.5 - Início da cravação do sistema sonda – haste.

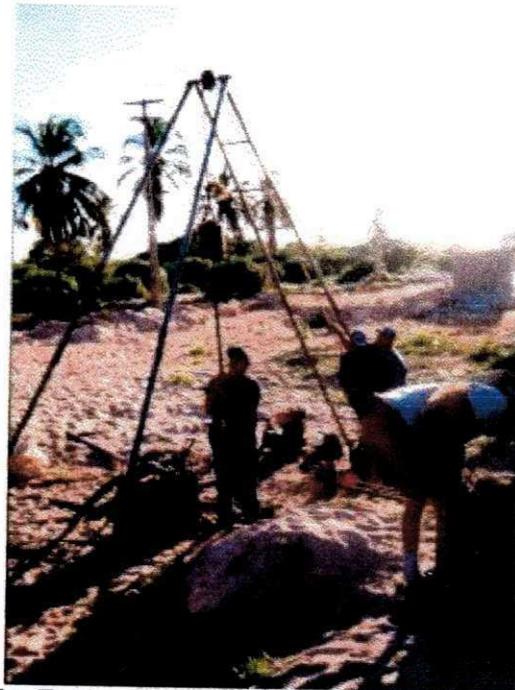


Figura III.6 – Retirada das hastas com o saca-tubos do SPT.

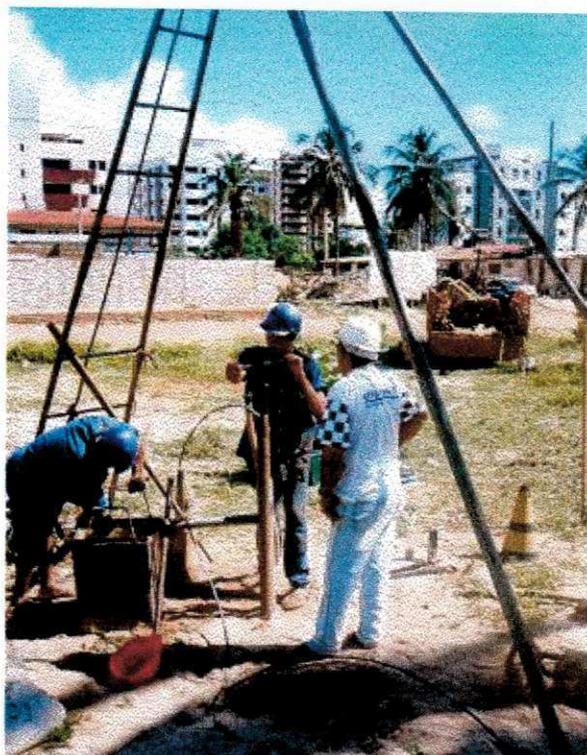


Figura III.7 - Penetração com trado e com uso da lama bentonítica.



Figura III.8 - Visão geral do equipamento no local do ensaio.

APÊNDICE IV

MODELAGEM NUMÉRICA DA CURVA PRESSIOMÉTRICA

MODELO: Gibson and Anderson (1961)

**HIPÓTESES: Solo Arenoso, Perfeitamente Elástico até a Ruptura,
Volume Constante, Expansão de um Cilindro Infinito.**

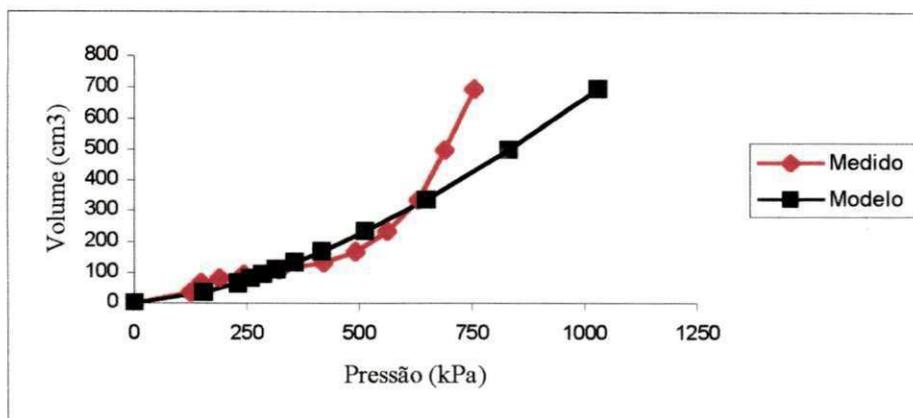


Figura IV.1 - Modelagem numérica obtida para o Furo 01, Ensaio 10, em comparação com a curva real, para o ensaio com inserção dinâmica.

Quadro IV.1 – Parâmetros Geotécnicos, para o Furo 01, Ensaio 10

Módulo de Elasticidade (kPa)	Tensão Horizontal (kPa)	Ângulo de Atrito	Coefficiente de Poisson
8000	100	28°	0,33

Tabela IV.1 – Valores em cada ponto da modelagem numérica, com os dados do Furo 01, Ensaio 10.

Pressão Corrigida (kPa)	Volume Corrigido (cm ³)	Modelagem Matemática (kPa)
0	0	0
82	72	316
116	87	359
161	92	372
204	100	394
247	107	412
289	117	437
374	134	478
457	157	532
541	179	580
620	209	643
695	249	723
770	291	802
832	363	929
850	428	1037

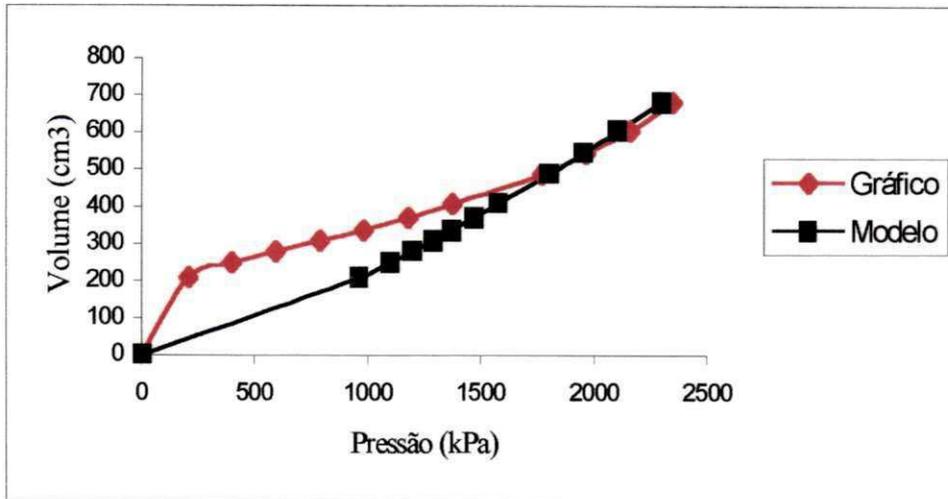


Figura IV.2 - Modelagem numérica obtida para o Furo 01, Ensaio 10, em comparação com a curva real, para o ensaio com pré-furo.

Quadro IV.2 – Parâmetros Geotécnicos, para o Furo 01, Ensaio 10

Módulo de Elásticidade (kPa)	Tensão Horizontal (kPa)	Ângulo de Atrito	Coefficiente de Poisson
6000	100	28°	0,33

Tabela IV.2 – Valores em cada ponto da modelagem numérica, com os dados do Furo 01, Ensaio 10.

Pressão Corrigida (kPa)	Volume Corrigido (cm ³)	Modelagem Matemática (kPa)
0	0	0
127	36	155
149	67	230
191	80	260
243	93	285
323	109	315
420	133	357
491	168	416
561	234	513
632	337	649
691	498	832
756	697	1031

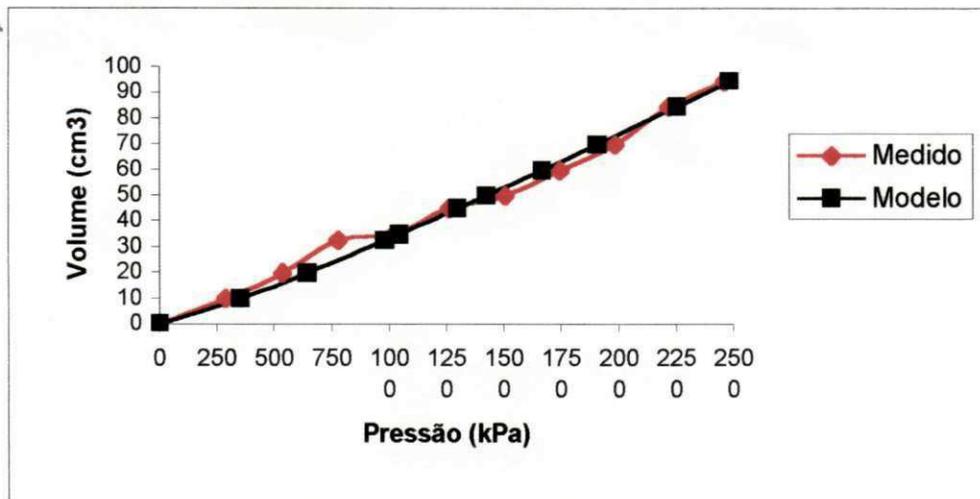


Figura IV.3 - Modelagem numérica obtida para o Furo 02, Ensaio 05, em comparação com a curva real, para o ensaio com inserção dinâmica.

Quadro IV.3 – Parâmetros Geotécnicos, para o Furo 02, Ensaio 05.

Módulo de Elasticidade (kPa)	Tensão Horizontal (kPa)	Ângulo de Atrito	Coefficiente de Poisson
40000	350	50°	0,33

Tabela IV.3 – Valores em cada ponto da modelagem numérica, com os dados do Furo 02, Ensaio 05.

Pressão Corrigida (kPa)	Volume Corrigido (cm ³)	Modelagem Matemática (kPa)
0	0	0
290	10	352
536	20	643
779	32	979
1026	35	1044
1263	45	1298
1507	50	1423
1746	60	1666
1985	70	1905
2220	85	2254
2461	95	2482

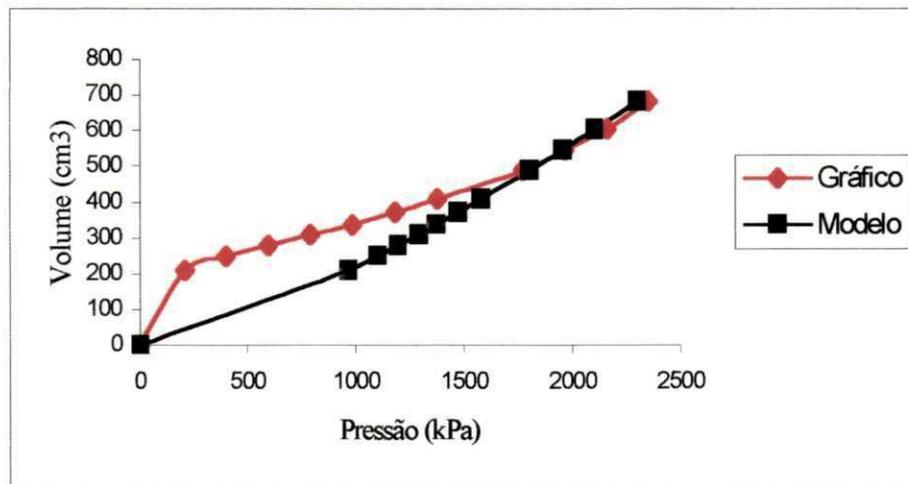


Figura IV.4 - Modelagem numérica obtida para o Furo 02, Ensaio 05, em comparação com a curva real, para o ensaio com pré-furo.

Quadro IV.4 – Parâmetros Geotécnicos, para o Furo 02, Ensaio 05.

Módulo de Elasticidade (kPa)	Tensão Horizontal (kPa)	Ângulo de Atrito	Coefficiente de Poisson
14000	70	35°	0,33

Tabela IV.4 – Valores em cada ponto da modelagem numérica, com os dados do Furo 02, Ensaio 05.

Pressão Corrigida (kPa)	Volume Corrigido (cm ³)	Modelagem Matemática (kPa)
0	0	0
208	208	966
401	249	1101
594	279	1197
788	309	1289
983	337	1371
1180	371	1471
1376	408	1577
1769	489	1800
1963	547	1953
2158	605	2102
2352	683	2297