

Obtenção de Parâmetros de Resistência e Deformação de um Solo de Fundação a partir de Ensaios de Laboratório e Campo com Ênfase no Pressiômetro de Ménard

Tadeu Henrique Oliveira de Castro
PUC Minas, Belo Horizonte, Brasil, tadeuhenrique@live.com

Luciene Oliveira Menezes
PUC Minas, Belo Horizonte, Brasil, cienemenezes@yahoo.com.br

Hérmon Almeida
PUC Minas, Belo Horizonte, Brasil, hermon.almeida@outlook.com

Ana Lúcia de Campos Cordeiro Penna
PUC Minas, Belo Horizonte, Brasil, anapenna@pucminas.br

Riad Chammas
Chammas Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, riad@chammasengenharia.com.br

RESUMO: Para a elaboração de um projeto de fundação é necessário conhecer as forças atuantes e também a resistência do solo que ficará sob a mesma, de forma a dimensionar a fundação atendendo aos fatores de segurança estipulados por normas específicas. As forças atuantes são geralmente obtidas com menor complexidade, porém, a resistência do solo de fundação possui incertezas intrínsecas ao material. As investigações geológico-geotécnicas por meio de ensaios de campo e laboratório visam minimizar as incertezas durante o estudo e execução de um projeto de fundação. Dentre os ensaios de campo realizados no Brasil pode-se destacar o ensaio pressiométrico, o qual utiliza o pressiômetro de Ménard que é projetado para aplicar uma pressão uniforme nas paredes de um furo de sondagem promovendo a consequente expansão de uma cavidade cilíndrica na massa de solo. Os resultados deste ensaio são os parâmetros de resistência e deformação do solo. Neste trabalho foi realizado um estudo de um terreno de fundação a partir de ensaios “Standard Penetration Test” (SPT), ensaio pressiométrico de Ménard (PMT) e ensaios de compressão triaxial CUsat. Os ensaios foram interpretados para se obter os parâmetros geotécnicos deste solo de fundação, e em seguida foram obtidas algumas correlações entre os ensaios pressiométricos de Ménard (PMT) e os ensaios SPT, e ainda foi realizada uma análise comparativa entre os parâmetros deste solo obtidos por ensaios de compressão triaxial e por ensaios pressiométricos. A partir dos resultados dos ensaios de campo pressiométricos de Ménard (PMT) e ensaios SPT foi estimada a capacidade de carga de elementos de fundação rasa (sapatas) hipotética a fim de comparar os fatores de segurança obtidos para diferentes métodos de obtenção dos parâmetros do solo.

PALAVRAS-CHAVE: Fundação. Pressiômetro de Ménard. SPT. Ensaio triaxial. Capacidade de carga.

1 INTRODUÇÃO

A campanha de ensaios geotécnicos de campo e laboratório é uma etapa fundamental para os

projetos de engenharia e tem como objetivo estudar o comportamento dos solos a partir de simulações representativas das suas condições “in situ”. Dentre os ensaios de campo realizados

no Brasil pode-se destacar o ensaio pressiométrico de Ménard, desenvolvido a partir da teoria de expansão de cavidade cilíndrica, onde uma fonte de gás nitrogênio comprimido aplica uma pressão numa membrana após ser introduzida num furo de sondagem. No equipamento, apresentado na Figura 1, são realizadas as aplicações de pressão e as correspondentes leituras de variação de volume provocadas pela reação do solo com a membrana expandida. Tem-se como resultado parâmetros de resistência como a pressão limite (p_l), e parâmetros de deformação do solo como o módulo de deformabilidade pressiométrico de Ménard (E_M).

Neste artigo são apresentados resultados de ensaios pressiométricos (PMT), ensaios SPT e ensaio triaxial $\overline{CU}_{sat}$, com o objetivo de comparar e correlacionar os parâmetros e índices de um solo residual silto-arenoso, e ainda verificar a segurança de elementos hipotéticos de fundação rasa (sapatas).



Figura 1. Foto do pressiômetro de Ménard, adaptado de Geomatech

2 METODOLOGIA

A partir de ensaios de campo pressiométrico de Ménard (PMT), Standard Penetration Test (SPT) e ensaios de laboratório, compressão triaxial $\overline{CU}_{sat}$, realizados em um solo residual silto-arenoso da região Nordeste de Belo Horizonte, foi analisado, comparado e correlacionado o comportamento geotécnico do terreno de fundação.

Com os resultados dos ensaios de campo

PMT e SPT também foi estimada a capacidade de carga de elementos hipotéticos de fundação rasa (sapatas), a fim de verificar a segurança dessas estruturas com base em ensaios distintos.

As análises comparativas entre os ensaios de compressão triaxial e ensaios pressiométricos para o solo estudado, foram realizadas entre parâmetros de resistência (ϕ) e parâmetros de deformabilidade (E) determinados nos ensaios triaxiais a partir da envoltória de resistência e das curvas tensão x deformação axial.

O estudo comparativo e as correlações entre os ensaios Standard Penetration Test (SPT) e ensaio PMT, foi realizado tanto em relação aos parâmetros de deformabilidade e resistência, quanto à classificação do solo. As correlações foram realizadas entre os parâmetros de resistência e deformabilidade obtidos do ensaio PMT e o índice de resistência à penetração N_{SPT} do ensaio SPT.

Para a classificação do solo utilizou-se tabelas empíricas com valores utilizados como parâmetro para o tipo de solo ensaiado. Para o ensaio PMT de acordo com Rezende (2000), Ménard utiliza uma faixa de parâmetros pressiométricos apresentados na Tabela 1 para a identificação do solo a partir dos resultados de E_M , p_l e E_M/p_l , recomendando também a classificação expedita durante a perfuração. Para os ensaios SPT utilizou-se a classificação táctil visual de campo e a proposta pela ABNT, NBR-7250:1982 que possibilita a classificação do material, objeto do ensaio, quanto a sua consistência ou compactidade.

O ângulo de atrito do solo (ϕ) foi estimado a partir do ensaio SPT supondo condições não drenadas em função da velocidade de execução do ensaio. Desta forma, de acordo com Cintra et al. (2011), pode-se estimar o ângulo de atrito do solo por duas correlações empíricas (Equações 1 e 2), em função do índice de resistência a penetração N_{SPT} .

➤ Para Godoy (1983):

$$\phi = 28^\circ + 0,4 \times N_{SPT} \quad (1)$$

➤ Para Teixeira (1996):

$$\phi = \sqrt{20 \times N_{SPT}} \quad (2)$$

Tabela 1. Valores típicos de E_M , p_l e E_M/p_l para vários tipos de solos, Ménard, 1975 apud Rezende, 2000

Tipos de Solos	E_M (kPa)	p_l (kPa)	E_M/p_l
Turfa	200-1500	20-150	10
Argila mole	500-3000	50-300	10
Argila média	3000-8000	300-800	10
Argila rija	8000-40000	600-2000	13-20
Areia siltosa fôfa	500-2000	100-500	8-15
Silte	2000-10000	200-1500	5-4
Areias e pedregulhos	8000-40000	1200-5000	10-6,7
Areias sedimentares	7500-40000	1000-5000	6,7-8
Calcário	80000	3000-10000	7,5-8
Aterros jovens	500	50-300	10-17
Aterros antigos	4000	400-1000	10-15

Além da estimativa de parâmetros de resistência, também foi possível determinar parâmetros de deformabilidade do solo (Equações 3 e 4). Para tal, utilizaram-se correlações com a resistência de ponta do cone (q_c) do ensaio CPT/CPTU, estimada pelo índice de resistência à penetração N_{SPT} , um coeficiente de correlação K e fator de correção α (Tabela 2).

$$E = \alpha q_c \quad (3)$$

$$E = \alpha K N \quad (4)$$

Tabela 2. Fator α de correlação de E com q_c e coeficiente K de correlação entre q_c e N_{SPT} , Teixeira e Godoy, 1996 apud Cintra et al., 2011

Solo	K (MPa)	α
Areia com pedregulos	1,10	-
Areia	0,90	3
Areia siltosa	0,70	-
Areia argilosa	0,55	-
Silte arenoso	0,45	5
Silte	0,35	-
Argila arenosa	0,30	7
Silte argiloso	0,25	-
Argila siltosa	0,20	-

3 RESULTADOS

3.1 Resultados dos ensaios SPT

O ensaio SPT possibilita a obtenção dos índices de resistência N_{SPT} a cada metro. Neste estudo os resultados foram analisados até os 15 m, profundidade que também corresponde ao trecho ensaiado com o pressômetro de Ménard. Os resultados dos ensaios SPT são apresentados da Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros do solo obtidos a partir do ensaio SPT no Furo SM-313

FURO SM- 313					
Prof. (m)	Classificação	N_{SPT}	E (*) (kPa)	ϕ (°)	
				Godoy (1983)	Teixeira (1996)
0	Silte argilo-arenoso rosa	13	23400	33	31
1		7	12600	31	27
2		8	14400	31	28
3		10	18000	32	29
4	Silte arenoso amarelo branco	13	23400	33	31
5		14	25200	34	32
6		10	18000	32	29
7		14	25200	34	32
8		16	28800	34	33
9		15	27000	34	32
10		17	30600	35	33
11		15	27000	34	32
12		15	27000	34	32
13		20	36000	36	35
14		23/10	-	-	-
15		24/15	-	-	-

(*) Nota: O módulo de deformabilidade foi estimado segundo as correlações propostas por Teixeira e Godoy, (1996, *apud* Cintra et al., 2011) com $E = \alpha K N$. Para o solo ensaiado adotou-se $\alpha = 4$ e $K = 0,45$ (interpolado).

3.2 Resultado dos ensaios triaxiais

Os ensaios de compressão triaxial $\bar{C}\bar{U}_{sat}$ (Tabela 4) foram executados em amostras indeformadas de blocos coletados nas proximidades dos ensaios de campo PMT e SPT a uma profundidade de aproximadamente 14m em relação ao topo do furo desses ensaios.

Tabela 4. Resultados dos ensaios $\overline{CU}_{sat}$ para a amostra indeformada

σ_3 (kPa)	Δu (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	E_0 (MPa)
50	-4	140,6	27
100	36	202,4	37
150	66	263,5	49
200	98	282,1	21

3.3 Resultado dos ensaios pressiométricos

Na Tabela 5 foram organizados os resultados obtidos de pressões limites (p_l), pressões de fluência (p_f) e ainda os módulos de deformabilidade pressiométricos de Ménard (E_M) mensurados a cada metro de profundidade até 15,0m.

Tabela 5. Parâmetros do solo obtidos nos ensaios pressiométricos para o Furo PMT-313

FURO PMT – 313								
Prof (m)	E_M (kPa)	$E=E_M/0,50(*)$	p_l (kPa)	p_f (kPa)	E_M/p_l	p_l^* (kPa)	E_M/p_l^*	ϕ_M (°)
1	3170	6340	302	133	10,5	290	10,9	24
2	6590	13180	395	232	16,7	380	17,3	25
3	15000	30000	959	804	15,6	930	16,1	28
4	12900	25800	694	598	18,6	660	19,5	27
5	17300	34600	1240	957	14	1200	14,4	29
6	8150	16300	879	351	9,3	820	9,9	27
7	12800	25600	1060	797	12,1	990	12,9	28
8	10800	21600	1270	943	8,5	1200	9	29
9	11100	22200	1430	747	7,8	1350	8,2	29
10	10400	20800	990	741	10,5	900	11,6	28
11	13100	26200	1550	1200	8,5	1450	9	29
12	12500	25000	1260	938	9,9	1150	10,9	28
13	17500	35000	1850	1050	9,5	1740	10,1	30
14	26300	52600	1960	1480	13,4	1830	14,4	30
15	27100	54200	1520	878	17,8	1390	19,5	29

Nota: (*) Valores em kPa. Adotou-se o coeficiente reológico (α) igual a 0,50 para siltes normalmente adensados.

3.4 Correlações e comparações entre os ensaios PMT e SPT

De acordo com Baguelin et al. (1978, *apud* Araújo, 2001), muitos pesquisadores obtiveram resultados comparativos em correlações com o índice de resistência (N_{SPT}) e a pressão limite

(p_l), encontrando-se uma grande dispersão dos valores da relação p_l/N_{SPT} que varia num intervalo de 20 a 50 (kPa). Já nos estudos de Rezende (2000), a relação p_l/N_{SPT} varia em uma faixa de 50 a 80 kPa para um solo aluvionar silto-arenoso medianamente compacto.

Neste caso, verificou-se que a relação p_l/N_{SPT} varia em um intervalo de 50 a 95 kPa para o solo residual silto-arenoso medianamente compacto em estudo (Figura 2).

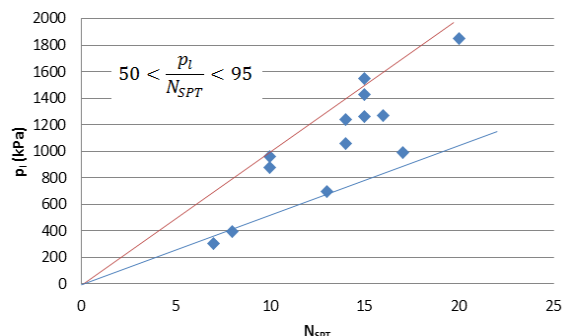


Figura 2. Correlação entre os valores de p_l versus N_{SPT} para os ensaios realizados

Na Figura 3 estão apresentados os resultados das correlações entre o módulo pressiométrico de Ménard E_M versus N_{SPT} , tomados respectivamente dos furos PMT-313 e SM-313 até os 13m de profundidade.

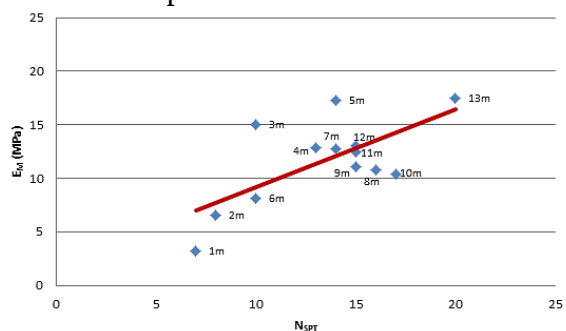


Figura 3. Correlação entre os valores de E_M versus N_{SPT} para os ensaios realizados

A correlação entre E_M e N_{SPT} apresentou considerável aleatoriedade, entretanto, quando se analisa tanto para os valores de E_M e E (Tabela 3 e 5) quanto para ϕ_M e ϕ , verifica-se boa proporcionalidade, principalmente no trecho silto-arenoso entre 4 e 13m.

Também foram realizadas correlações entre a pressão de fluência p_f obtida do ensaio pressiométrico de Ménard e o N_{SPT} . A análise está apresentada na Figura 4.

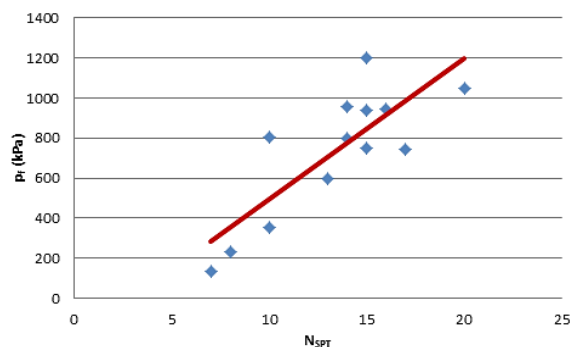


Figura 4. Correlação entre os valores de p_f versus N_{SPT} para os ensaios realizados

Para a correlação entre p_f versus N_{SPT} verificou-se o melhor ajuste entre esses parâmetros para o solo estudado podendo ser representada pela Equação 5 para valores de N_{SPT} variando de 3 a 20.

$$p_f = 70 \times N_{SPT} - 210 \text{ (kPa)} \quad (5)$$

A classificação expedita de campo indicou que o terreno ensaiado se trata de um solo silte argilo-arenoso até os 3,60m e silte arenoso dos 3,60m aos 14,91m. Os resultados do N_{SPT} , de acordo com a Tabela 3, indicam que os dois horizontes apresentam, respectivamente, consistência e compacidade média. Ao analisar os resultados obtidos do ensaio pressiométrico, Tabela 5, verifica-se que o solo ensaiado apresenta um comportamento equivalente ao silte em termos dos parâmetros E_M e p_l . Já quando se analisa a relação E_M/p_l , o comportamento do solo ensaiado é coerente com o comportamento da areia siltosa fofa.

3.5 Comparações entre os ensaios PMT e $\overline{C\bar{U}}_{sat}$

A amostra indeformada destinada à execução dos ensaios de laboratório foi coletada em aproximadamente 14m em relação ao topo do furo PMT-313, portanto, qualquer análise comparativa entre esses ensaios é considerada pontual.

A análise entre os ensaios triaxiais e pressiométricos se mostraram coerentes com relação à classificação do material quanto ao seu comportamento, pois para o ensaio pressiométrico, baseando-se nas tabelas empíricas de Ménard (1975, apud Rezende, 2000) e Clarck (1995, apud Araújo, 2001), identificou-se que o solo estudado apresenta um

comportamento equivalente aos solos silto-arenosos normalmente adensados. Para o ensaio triaxial, analisando as curvas tensão versus deformação e os parâmetros efetivos obtidos, o material também apresentou um comportamento típico de solos arenosos normalmente adensados.

Quanto aos parâmetros de resistência, os resultados dos ensaios pressiométricos para os valores estimados para o ângulo de atrito de Ménard (ϕ_M) foram intermediários em relação aos parâmetros total e efetivo do ensaio triaxial, obtido para as profundidades de 13m, 14m e 15m. Entende-se que os ensaios pressiométricos foram realizados em solos não saturados e em condições de drenagem diferentes daquelas impostas durante o ensaio triaxial. Portanto é razoável considerar que estes valores expressam condições parcialmente drenadas, sendo assim é coerente que os parâmetros obtidos a partir dos ensaios PMT sejam intermediários.

Os parâmetros de deformabilidade para os ensaios PMT o valor médio da deformabilidade de Ménard, dos ensaios realizados aos 13, 14 e 15m, é 35 MPa. Já para o ensaio triaxial a deformabilidade tangente inicial médio do solo (E_0) obtido das curvas tensão versus deformação axial foi de 34 MPa. A coerência entre esses valores indica claramente a boa aplicabilidade de ambos os ensaios para a determinação deste parâmetro de deformabilidade do solo em estudo.

3.6 Verificação da segurança de uma fundação rasa por meio de parâmetros obtidos pelo SPT e pelo PMT

Neste estudo foi realizado o dimensionamento de sapatas de fundação de um futuro reservatório de água de uma loja de veículos, com base nas tensões admissíveis recomendadas pela norma NBR-6122:2010 e a análise da segurança deste elemento quanto às tensões verticais e propriedades do terreno de fundação obtidas através dos ensaios pressiométricos de Ménard (PMT), realizados no furo PMT-313 e ensaios SPT no furo SM-313.

Após um pré-dimensionamento das sapatas admitindo uma tensão admissível de 100 kPa, conforme comentado pela NBR-6122:2010, e

posteriormente a partir dos resultados do ensaio SPT e aplicando o estudo de Meyerhof, obteve-se fator de segurança de 17,68. Para os ensaios PMT segundo o método de Ménard (1963, apud, Araújo, 2001) obteve-se fator de segurança de 16,65.

Neste caso, a fim de otimizar os elementos de fundação e revalidar os fatores de segurança para os ensaios SPT e PMT a partir da estimativa da tensão última do solo, considerou-se uma sapata retangular de 100 x 150 cm com embutimento de 1m.

Para se determinar a capacidade de carga pelo ensaio SPT foi determinado o SPT médio, em função da cota de assentamento e da geometria da sapata. Logo, tem-se que:

$$N_{SPT,m\acute{e}dio} = \frac{7+8+10+13}{4} = 9,5 \quad (6)$$

A tensão última do solo para o ensaio SPT será de:

$$q_u = 32 \times 9,5 \times (1,0 + 1,0) = 608 \text{ kPa} \quad (7)$$

Aplicando o coeficiente de segurança conforme a NBR 6122:2010, tem-se a tensão admissível de:

$$q_{adm} = \frac{608}{3} = 202,7 \text{ kPa} \quad (8)$$

E a tensão aplicada no solo na base da sapata será de:

$$\sigma_{ap} = \frac{80 \text{ kN}}{1,00 \text{ m} \times 1,50 \text{ m}} = 53,3 \text{ kPa} \quad (9)$$

Portanto obtém-se através do ensaio SPT, o seguinte fator de segurança:

$$FS = \frac{202,7}{53,3} = 3,8 \quad (10)$$

Para o ensaio PMT obteve-se a pressão limite equivalente à cota de assentamento e dimensões da sapata. Logo, verifica-se a seguinte pressão limite equivalente:

$$(p_l - \sigma_{h0}) = [290 \times 380]^{\frac{1}{2}} = 331,9 \text{ kPa} \quad (11)$$

Com a geometria e o embutimento da sapata, verifica-se a seguinte tensão última do solo obtida pelos parâmetros do ensaio PMT através do método proposto por Ménard (1963, apud Araujo, 2001).

$$q_u - 50,7 = 1,94 \times 331,9 \quad (12)$$

$$q_u = 694,7 \text{ kPa} \quad (13)$$

Conforme a NBR-6122:2010, para métodos semi-empíricos deve-se aplicar um coeficiente de segurança igual a 3, logo a tensão admissível obtida será 537 kPa, e o coeficiente de segurança verificado para o ensaio PMT será de:

$$FS = \frac{694,7}{53,3} = 4,34 \quad (14)$$

4 CONCLUSÕES

O ensaio pressiométrico de Ménard se mostrou eficiente para a determinação das características de deformabilidade e resistência do solo residual silto-arenoso normalmente adensado, possibilitando conhecer de forma versátil, e ainda coerente com relação aos ensaios de campo SPT e ensaio de laboratório tipo compressão triaxial $\overline{CU}_{sat}$, o comportamento do terreno de fundação.

Os ensaios de campo PMT e os ensaios SPT foram coerentes na classificação do solo como silto-arenoso, baseando-se nas tabelas empíricas propostas por Ménard (1975, apud Rezende, 2000) e Clarck (1995, apud Araújo, 2001) para os ensaios pressiométricos, e na tabela proposta pela ABNT NBR 6484 (2001) para os ensaios SPT. Esses ensaios também se mostraram coerentes para a estimativa da capacidade de carga do solo.

As correlações entre os resultados obtidos por esses ensaios indicaram uma aleatoriedade razoável. Entretanto, a aplicação destas correlações é restrita ao tipo de solo estudado e não substitui as investigações necessárias.

A análise dos parâmetros de deformabilidade obtidos a partir dos ensaios de campo PMT e ensaios de laboratório $\overline{CU}_{sat}$, indicaram boa aplicabilidade destas práticas para a estimativa

do módulo de deformação do maciço.

Com base na verificação da segurança das sapatas estudadas, verificou-se que os valores da tensão admissível recomendada pela NBR-6122:2010 para um silte médio (mediamente compacto), é subestimado em relação aos valores obtidos a partir dos ensaios de campo PMT e SPT indicando as vantagens das investigações de campo na rotina de projetos geotécnicos, possibilitando soluções econômicas e dentro dos limites de segurança.

Os fatores de segurança encontrados para as sapatas foram $FS = 3,8$ a partir da tensão admissível estimada pelo ensaio SPT e $FS = 4,3$ para tensão admissível estimada pelo ensaio PMT. Valores próximos, que mostram boa aproximação entre os dois métodos. Porém, o ensaio PMT apresenta fator de segurança ligeiramente maior que o obtido pelo SPT, o que sugere a possibilidade de maior otimização da fundação por este método, bem como a obtenção de parâmetros de deformabilidade que não podem ser obtidos diretamente pelo ensaio SPT.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6484: *Solo - Sondagens de simples reconhecimentos com SPT - Método de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 17p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6122: *Projeto e execução de fundações*. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. xii, 91 p. ISBN 9788507022718
- Araújo, S.P.M. *O Ensaio Pressiométrico de Ménard e sua Utilização na Estimativa da Capacidade de Carga e Recalque de Fundações Assentes em Solo Residual de Gnaisse*. Tese de Mestrado, Dep. de Engenharia Civil da UFOP. Ouro Preto. 156p, 2001.
- Cintra, José Carlos A; AOKI, Nelson; ALBIERO, Jose Henrique. *Fundações diretas: projeto geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 104 p. ISBN 9788579750359.
- Los essais pressiométriques, Disponível em: <http://www.geomatech.net>, Acessado em: 12 de outubro de 2014.
- Rezende, C.H. *Estudo do Comportamento Geotécnico do Material de Assoreamento em Cava Exaurida de Mineração Através de Ensaio Pressiométricos*. Tese de Mestrado, Dep. de Engenharia Civil da UFOP. Ouro Preto. 141p, 2000.