

Estimativa dos parâmetros de resistência, deformabilidade e de pressão neutra de solos compactados de decomposição de rocha da Região Metropolitana de São Paulo

Beatriz Herter Pozzebon

Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, Brasil, e-mail: biaharter@hotmail.com

Maurício Hiromi Yamaji

Planservi Engenharia Ltda., São Paulo-SP, Brasil, e-mail: mauricio.yamaji@planservi.com.br

Faiçal Massad

Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, Brasil, e-mail: faical.massad@poli.usp.br

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo apresentar estimativas dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, de pressão neutra e de deformabilidade do material utilizado nos aterros do Trecho Norte do Rodoanel Mario Covas em São Paulo. Para isso, foram realizados ensaios triaxiais do tipo CU, UU e PN em amostras compactadas. O parâmetro B' de Skempton representa a variação de pressão neutra (Δu) quando se tem variação de tensões totais em condições não drenadas. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento têm grande importância na condição de estabilidade dos aterros, tanto em fase de construção, quanto em fase de operação, enquanto os parâmetros de deformabilidade são essenciais para estimativa de recalques, que, se ocorrem na fase operacional dos aterros, podem vir a provocar danos à obra. Os materiais estudados possuem diferentes origens litológicas, entre as quais pode-se citar solos de alteração de filitos, gnaisses, ultramilonitos e metabásicas. Por fim, é feito um confronto entre os parâmetros obtidos com os de materiais de mesma e de outras litologias, encontrados na literatura técnica.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio triaxial, parâmetros de resistência, deformabilidade, pressão neutra, solos residuais compactados.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a partir do século XX, cada vez mais o transporte rodoviário foi substituindo o ferroviário. Por conta disso, a demanda por obras de infraestrutura rodoviária é cada vez maior, tanto para transporte de pessoas, como, principalmente, de cargas. Outro fator que indica a maior demanda por obras de infraestrutura é o crescimento da economia e da população.

Com isso, cada vez mais rodovias estão sendo construídas em regiões de relevo ondulado a montanhoso, sendo portanto necessários serviços de terraplenagem, de corte e aterro, para atendimento aos requisitos geométrico do greide da pista projetada. Assim, existe uma crescente necessidade de

investigações geológica-geotécnicas para prever o comportamento dos materiais utilizados nestas obras de terraplenagem.

No caso de aterros compactados, necessita-se prever seu comportamento durante sua construção e ao seu final, a fim de garantir as condições de segurança exigíveis.

É o exemplo dos lotes 14 e 15 do Trecho Norte do Rodoanel Mario Covas, no qual foram projetados diversos aterros compactados, com alturas que chegam até 30 metros. A fim de prever a resistência ao cisalhamento, e determinar a deformabilidade e estimar o parâmetro de pressão neutra destes materiais, foram realizados ensaios triaxiais do tipo UU, CU e PN com amostras compactadas.

São feitas comparações entre os parâmetros obtidos e valores encontrados na literatura

técnica, apresentados principalmente por Cruz (1996) e Maiolino (1985). Tais estudos sempre podem ser complementados com materiais de outras regiões, devido à heterogeneidade dos solos residuais, podendo assim utilizar os resultados em outros trabalhos com materiais de mesmas características.

2. DESCRIÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA

A região de estudo é formada basicamente por solos residuais. Os ensaios foram realizados com solos resultantes da decomposição de rochas de filitos, granitos pouco milonitizados, metabásicas e ultramilonitos. A seguir, será apresentada uma descrição de cada litologia, baseada no livro de Teixeira et al (2009).

- Filitos – São rochas metamórficas muito foliadas, as vezes com evidente estratificação, caracterizadas pela xistosidade finamente espaçada e pela granulação muito fina.
- Granitos pouco milonitizados - Rochas granitóides que sofreram metamorfismo dinâmico, ao longo de zonas de cisalhamento, de baixa intensidade. Possuem baixa taxa de recristalização e deformação mineral, sendo possível reconhecer a textura ígnea reliquiar do protolito (rocha fonte).
- Ultramilonitos – São rochas coesivas com granulação fina e estrutura foliada provenientes de metamorfismo dinâmico, ao longo de zonas de cisalhamento, apresentando recristalização dos minerais.
- Metabásicas – São rochas geradas a partir do metamorfismo de ígneas básicas, tais como basalto e gabro.

Os ensaios de difratometria RX, realizados com os ultramilonitos e com os granitos pouco milonitizados, mostraram a presença predominante do mineral muscovita, aproximadamente 60%, seguida de quartzo, da ordem de 20%, e de caulinita.

3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Foram realizados ensaios de caracterização das amostras. Entre os ensaios realizados estão a determinação dos limites de Atterberg, distribuição granulométrica, densidade real dos

grãos, umidade natural, densidade seca máxima e análise mineralógica. As Tabela 1 e

Tabela 2 apresentam os resultados dos ensaios de caracterização das amostras, de acordo com a litologia do solo ensaiado.

Observa-se a predominância da fração de silte em todas as amostras, seguida pela fração de argila.

O limite de liquidez variou de 35% a 55% e o de plasticidade de 10% a 22%. A umidade ótima média variou de 18% a 23% e a densidade seca máxima variou de 13,7 a 16,7 kN/m³.

Tabela 1 – Análise granulométrica das amostras.

Litologia	Análise granulométrica %				
	Argila	Silte	Areia		
			Fina	Média	Grossa
1. Filito/ Metabásica	2	76	16	3	3
2. Filito	6	82	10	1	1
3. Filito	6	82	10	1	1
4. Ultramilonito	10	17	13	2	1
5. Metabásica	13	64	19	3	1
6. Ultramilonito	7	79	12	1	1
7. Granito pouco milonitizado	17	62	10	10	1

Tabela 2 – Limites de Atterberg, densidade dos grãos, umidade ótima e densidade aparente seca máxima.

4. ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

Litologia	h _{ótima} (%)	Limites de Atterberg %			Densidade de dos grãos (kN/m ³)	Densidade de seca máxima (kN/m ³)
		LL	LP	IP		
1. Filito/ Metabásica	-	37	21	16	27,7	15,0
2. Filito	18,1	38	25	13	28,0	16,7
3. Filito	18,8	35	25	10	27,8	16,7
4. Ultramilonito	18,9	45	28	17	28,5	15,4
5. Metabásica	22	55	33	22	29,6	14,4
6. Ultramilonito	23,2	38	28	11	28,0	15,6
7. Granito pouco milonitizado	23,2	52	38	14	27,4	13,7

O ensaio de compressão triaxial consiste na aplicação de um estado hidrostático de tensões e

de um carregamento axial sobre um corpo de prova cilíndrico do solo. O corpo de prova é colocado numa câmara de ensaio e envolto por uma membrana de borracha. A câmara, por sua vez, é cheia de água, para a aplicação de uma pressão confinante. O carregamento axial é feito por um pistão que penetra na câmara. Durante o carregamento, medem-se o acréscimo de tensão axial e a deformação no corpo de prova. A Figura 1 mostra o esquema da câmara do ensaio triaxial.

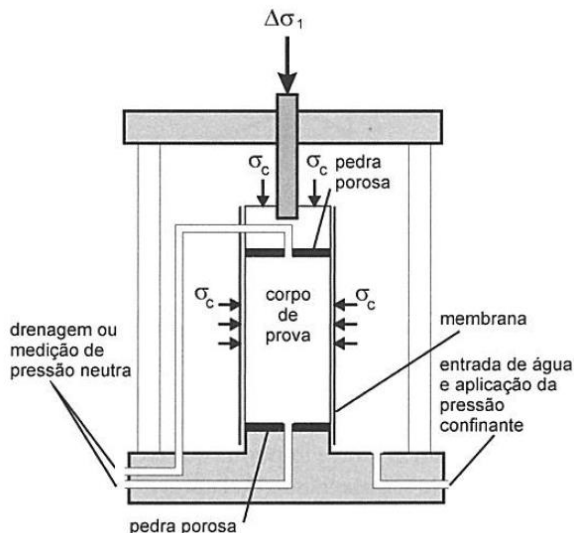


Figura 1 – Esquema da câmara do ensaio triaxial – Pinto (2006).

No ensaio triaxial adensado rápido, CU, inicialmente, o corpo de prova é submetido à uma pressão confinante, σ_3 , e sob ela é adensado. Ao final deste procedimento, a tensão efetiva é igual à pressão confinante aplicada e a pressão neutra é nula.

No ensaio triaxial do tipo UU não há qualquer tipo de drenagem, o que faz com que quando se aplica uma tensão confinante, surge uma pressão neutra.

O ensaio triaxial PN consiste em solicitar um corpo de prova por acréscimos de tensões confinante e axial de tal forma que a relação entre elas é mantida constante. Esse ensaio procura simular, de uma forma simples, as tensões a que um aterro será submetido com o seu alteamento.

5. EQUAÇÕES DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A partir do ensaio triaxial, pode-se determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Segundo Mello (1977), a envoltória de resistência para solos residuais e colúvios compactados pode ser dividida em três trechos, como mostra a Figura 2.

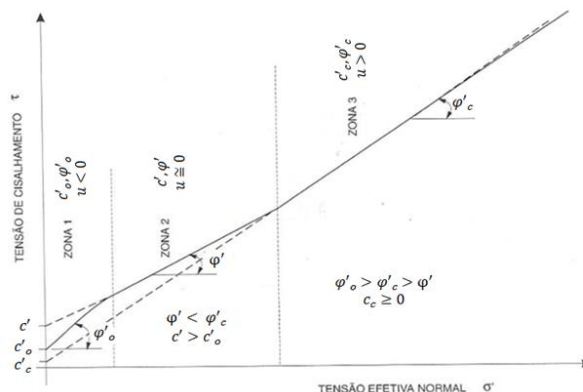


Figura 2 – Envoltória de resistência com três trechos para solos compactados. (adaptado de Mello, 1977).

Na primeira zona, o valor da coesão (c'_0) se aproxima de zero e a curvatura é mais acentuada, ou seja, maior ângulo de atrito (ϕ'_0). Na segunda zona, existe um ganho de resistência, devido ao efeito da compactação e da tensão de sucção, e os parâmetros de resistência são c' e ϕ' . Na terceira zona, observa-se que a envoltória é praticamente uma reta, os efeitos da compactação praticamente desaparecem e a pressão neutra é positiva, os parâmetros de resistência são c'_c e ϕ'_c .

6. DEFORMABILIDADE

A determinação do parâmetro de deformabilidade é essencial na estimativa de recalques na fase operacional dos aterros, uma vez que o estado limite de serviço pode ser alcançado antes do estado limite último (ruptura). Neste caso, o módulo de deformabilidade, E , foi determinado a partir de ensaios triaxiais do tipo PN em amostras compactadas em laboratório com grau de compactação (GC) de 95% e desvios de umidade (Δh) e 0 a +5% em relação à ótima.

7. PARÂMETRO DE PRESSÃO NEUTRA

Segundo Cruz (1996), solos compactados com umidades próximas à ótima e à densidade seca máxima podem conter ar sob a forma contínua ou sob a forma de ar ocluso, fato que pode afetar o desenvolvimento de pressão da água quando submetidos a tensões de cisalhamento.

O parâmetro que mede mudanças na pressão neutra é o B' e é medido em ensaios não drenados. Seu cálculo é dado pela Expressão 1.

$$B' = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_v} \quad (1)$$

sendo:

$\Delta \sigma_v$: variação de tensão vertical total em um ponto; e

Δu : variação de pressão neutra, obtida no ensaio ou medida no campo.

O rápido aumento da pressão da água, quando o solo é compactado pouco acima da umidade ótima, pode representar uma mudança de ar livre para ar ocluso.

8. RESULTADOS E ANÁLISES

Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos ensaios triaxiais tipo UU. Na Tabela 4 são apresentados os resultados dos ensaios triaxiais tipo CU.

Os valores obtidos foram comparados com os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos por Cruz (1996) e Maiolino (1985) para solos residuais compactados de Gnaiss, Filito e

de Quartzito-Xisto. A Tabela 5 mostra estes valores.

Tabela 3 - Parâmetros de resistência de ensaios triaxiais UU em amostras compactadas em várias condições de $\Delta h = h - h_{ótima}$ e $GC = 95\%$.

Litologia	$h_{ótima}$ (%)	$h_{ótima}$		$h_{ótima} + 2\%$		$h_{ótima} + 4\%$	
		c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
1. Filito/ Metabásica	-	58	29	60	27	52	29
2. Filito	18,1	49	28	43	28	21	31
3. Filito	18,8	49	30	41	30	31	29
4. Ultramilonito	18,9	64	23	68	22	64	22
5. Metabásica	22	130	25	110	25	129	20
6. Ultramilonito	23,2	54	25	40	25	21	28
7. Granito pouco milonitizado	23,2	59	26	52	26	49	27

Tabela 4 - - Parâmetros de resistência de ensaios triaxiais CU em amostras compactadas em várias condições de $\Delta h = h - h_{ótima}$ e $GC = 95\%$.

Litologia	$h_{ótima}$ (%)	$h_{ótima}$		$h_{ótima} + 2\%$		$h_{ótima} + 4\%$	
		c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
2. Filito	18,1	-	-	18	31	18	32
3. Filito	18,8	14	35	14	34	21	34
6. Ultramilonito	23,2	17	31	17	29	21	29
7. Granito pouco milonitizado	23,2	18	34	26	32	17	34

De maneira geral, observa-se que os valores de coesão obtidos a partir dos ensaios UU, para todas as litologias, são superiores em relação aos encontrados na bibliografia para solos

Tabela 5 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos residuais de diversas litologias, obtidos através de ensaios CU e UU – adaptado de Cruz (1996) e Maiolino (1985)

Litologia	Não saturados						Saturados			
	Tensões baixas		Tensões intermediárias		Tensões elevadas		Tensões baixas		Tensões intermediárias	
	c'_o (kPa)	ϕ'_o (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c'_c (kPa)	ϕ'_c (°)	c'_o (kPa)	ϕ'_o (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Gnaiss	26 a 36	28 a 41	20 a 50	26 a 29	0 a 20	29 a 34	27	32	27	32
Gnaiss Barragem	-	-	-	-	46	28,5	-	-	-	-
Euclides da Cunha (MT)	-	-	-	-	53	31,5	-	-	-	-
Filito	-	-	-	-	23	30,5	-	-	-	-
Barragem Manso (SP)	-	-	-	-	-	-	-	-	12	31,5
Quartzito- Xisto	-	-	15	33	15	35	-	-	-	-

residuais de Gnaiss, Quartzo-Xisto e Filito. Para os ensaios CU observa-se que os valores de coesão obtidos são menores que os valores encontrados na bibliografia, exceto para um dos gnaisses, em que há boa aderência. Já os valores de ângulo de atrito obtidos nos ensaios UU são, em geral, ligeiramente inferiores aos valores da bibliografia, para solos compactados e ensaiados com tensões elevadas, enquanto os valores obtidos para os ensaios CU são ligeiramente maiores, também quando comparados com solos compactados e ensaiados com tensões elevadas. As tensões baixas, intermediárias e elevadas são referentes as três zonas, apresentadas na Figura 2, respectivamente.

A Tabela 6 mostra os valores dos módulos de deformabilidade secantes iniciais, calculados a partir dos ensaios triaxiais PN, variando a umidade a partir da ótima ($\Delta h = h - h_{ótima}$). Como era de se esperar, numa mesma unidade litológica, os módulos tendem a decrescer com aumentos do desvio de umidade. Além disso, as maiores cifras foram obtidas para os filitos e a rocha metabásica, entre 14.000 e 16.000 kPa. Os menores valores estão associados ao granito pouco milonitizado, no intervalo entre 4.800 e 6.900 kPa.

Tabela 6 – Valores do módulo de deformabilidade (módulos tangentes iniciais) - Ensaios triaxiais PN, GC=95%.

Litologia	$h_{ótima}$ (%)	E (kPa)			
		0	2	4	5
1. Filito/ Metabásica	-	14.255	15.825	14.328	
2. Filito	18,1	14.018	9.086	7.362	
4. Ultramilonito	18,9	10.437	9.086	7.362	
5. Metabásica	22,0	15.792	16.261	14.317	
6. Ultramilonito	23,2	8.660	5.339	6.847	4.523
7. Granito pouco milonitizado	23,2	6.883	4.633	4.860	5.185

Na literatura técnica há um registro feito por Massad et al. (1978) que permite alguma comparação. Trata-se de aterro úmido compactado no núcleo da Barragem do Rio Verde, próxima a Curitiba, com grau de

compactação médio de 95% e teores de umidade variando entre 0 e +6%; os solos eram argilas siltosas ou silte argilosos, de decomposição de gnaiss migmatizado. Módulos de deformabilidade secantes, estimados com base em deformações medidas entre placas de medidores de recalques telescópicos tipo IPT, variam na faixa de 6.500 a 13.000 kPa, portanto compatíveis com os valores indicados na Tabela 5. Em contraposição, quando a compactação se dá em torno do ponto ótimo, os módulos são mais elevados, podendo atingir valores entre 30.000 e 60.000 kPa ou mais (conf. Massad et al., 1978 e Silveira, 2006).

Segundo Silveira (2006), ao utilizar o módulo de deformabilidade calculado através do ensaio triaxial PN para cálculo de recalques em aterros compactados obtém-se valores de recalques mais próximos aos reais do que os valores de módulo de deformabilidade obtidos com ensaios triaxiais UU. Por isso, os módulos de deformabilidade, E, de laboratório devem ser usados com critério.

A Tabela 7 mostra os parâmetros de pressão neutra B' calculados a partir do ensaio triaxial PN, para $\sigma_1=600$ kPa, em função do desvio de umidade. Os ensaios foram realizados com uma razão entre tensões principais igual a $\sigma_3/\sigma_1=0,5$.

Tabela 7 – Parâmetro de pressão neutra B', para $\sigma_1=600$ kPa

Litologia	$h_{ótima}$ (%)	Δh (%)			
		0	2	4	5
1. Filito/ Metabásica	-	4,5%	5,1%	5,5%	
2. Filito	18,1	3,7%	6,2%	8,3%	11,6%
4. Ultramilonito	18,9	3,0%	4,1%	5,0%	
5. Metabásica	22,0	1,7%	2,0%	3,3%	
6. Ultramilonito	23,2	6,5%	8,6%	14,0%	20,7%
7. Granito pouco milonitizado	23,2	6,7%	8,4%	9,2%	13,1%

A Figura 3 mostra o gráfico do parâmetro de pressão neutra, B', em função da variação de umidade, Δh ($\Delta h = h - h_{ótima}$), para $\sigma_1=600$ kPa, que corresponde a aterros de 30 m de altura.

Segundo Cruz (1996), análises numéricas realizadas mostram que no alteamento de uma barragem hipotética de argila até a metade da

altura do núcleo, os valores de σ_3/σ_1 se mantiveram entre 0,50 e 0,60. Assim, o ensaio simula as variações de pressões neutras no maciço durante o alteamento do aterro.

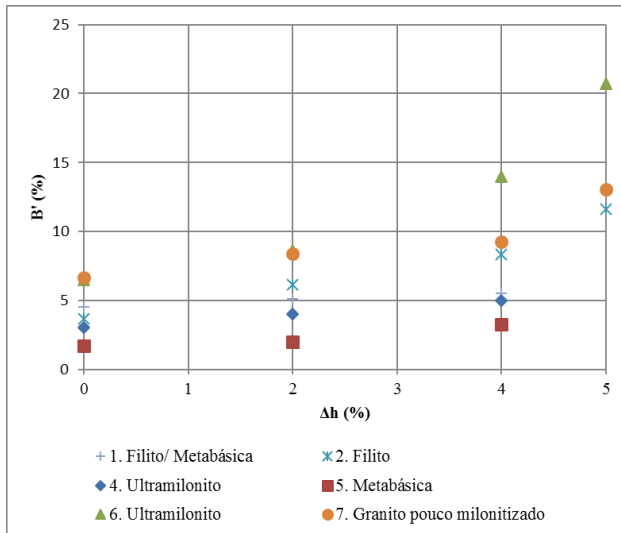


Figura 3 – Parâmetro de pressão neutra, B' , em função da variação de umidade, Δh .

A Figura 4 mostra a comparação dos parâmetros B' obtidos com valores extraídos do livro de Cruz (1996) para solos gnáissicos.

Assim, observa-se que os valores dos parâmetros B' obtidos, apresentam variações de acordo com a litologia do solo ensaiado. O valor máximo obtido foi para ultramilonitos, sendo aproximadamente 21% para desvios de umidade de +5%, enquanto o menor valor foi de cerca de 2% para a metabásica na umidade

ótima. Quando comparados com valores de solos gnáissicos, extraídos da bibliografia, verifica-se que são bem inferiores.

9. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo apresentar os parâmetros de resistência, deformabilidade e pressão neutra, obtidos a partir de ensaios triaxiais com amostras compactadas de solos residuais da Região Metropolitana de São Paulo, os quais possuem diferentes litologias: filitos, granitos, metabásicas e ultramilonitos. Além disso, os resultados foram comparados com valores encontrados na bibliografia.

Com relação aos parâmetros de resistência calculados, pode-se observar que o maior valor de coesão foi da metabásica obtido no ensaio UU. Além disso, todos os valores de coesão obtidos nos ensaios UU foram maiores que os valores da bibliografia, enquanto os valores obtidos no ensaio CU são menores. Com relação ao ângulo de atrito, observou-se que os valores obtidos nos ensaios UU, para todas as litologias, ficaram no intervalo definido para amostras não saturadas compactadas com tensão elevada. Já os valores do ângulo de atrito para os ensaios CU são ligeiramente maiores, também quando comparados com solos compactados e ensaiados com tensões elevadas.

Com relação aos parâmetros de

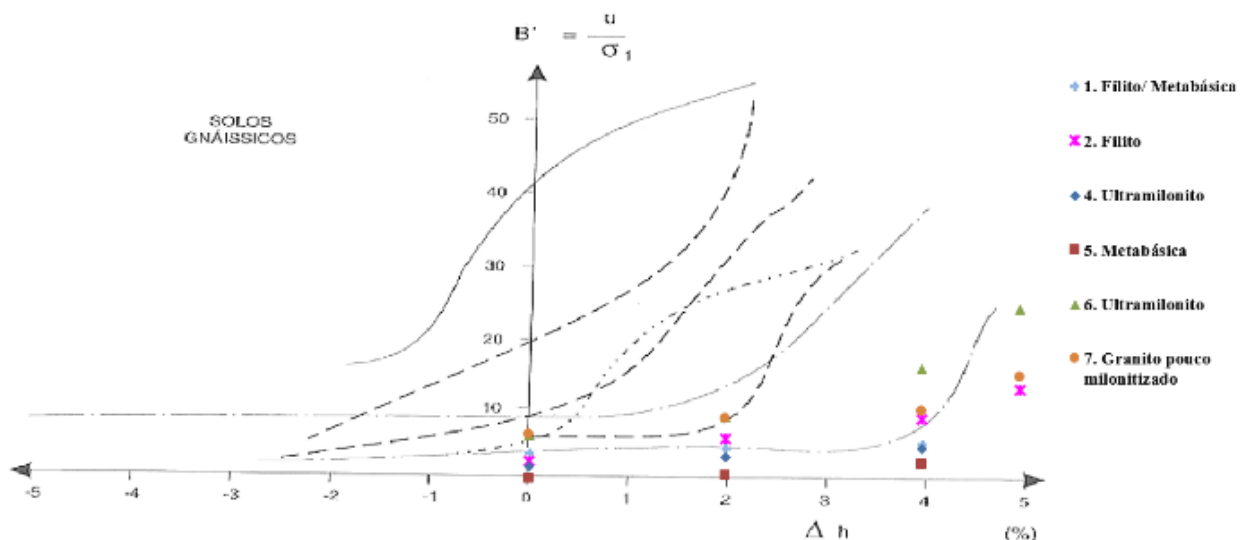


Figura 4 – Comparação entre parâmetro de pressão neutra, B' , obtidos a partir de ensaios com valores extraídos do livro de Cruz (1996).

deformabilidade obtidos através de ensaios triaxiais PN, o maior valor foi para a Metabásica, que ficou entre 14.000 a 16.000 kPa, enquanto o menor valor foi do Granito pouco milonitizado, entre 4.800 e 6.900 kPa. A ordem de magnitude dessas cifras se justifica pelo baixo valor do GC, de 95% e pelos desvios de umidade, que variaram de 0 a 5%.

Os parâmetros de pressão neutra, B' , obtidos nos ensaios apresentaram sempre valores inferiores aos indicados na bibliografia. O maior valor obtido foi para os ultramilonitos, sendo igual a aproximadamente 21%, enquanto o menor valor foi de 1,75% para a metabásica

AGRADECIMENTOS

Ao presidente da DERSA (Desenvolvimento Rodoviário S/A), a qual é detentora dos dados analisados, Laurence Casagrande Lourenço, pela autorização da utilização e publicação dos resultados; e à Planservi Engenharia e à EPUSP pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Cruz, P. T. *100 Barragens Brasileiras: Casos históricos, materiais de construção, projeto*. 1996
- Maiolino, A. L. G. *Resistência ao cisalhamento de solos compactados: uma proposta de tipificação*. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1985
- Massad, F., Massad, E., Yassuda, A. J. (1978). Análise do Comportamento da Barragem do Rio Verde através de Instrumentos de Auscultação. In: XII Seminário Nacional de Grandes Barragens, S. Paulo, v.1. p.63 - 84.
- Mello, V. F. (1977). *Reflections on Design Decisions of Practical Significance to Embankment Dams*. . In: *Géotechnique* (p. 17th Rankine Lecture).
- Pinto, C.S. *Curso básico de mecânica dos solos* – Em 16 aulas. São Paulo: Oficina de Textos, 2006
- Silveira, J. F. A. *Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento*. São Paulo, Oficina de Textos, 2006.
- Teixera, W.; Fairchild, T. T.; Toledo, M. C. M.; Taioli, F. *Decifrando a Terra*. Companhia Editora Nacional. São Paulo, 2009.