

# ESTUDO DA PLASTICIDADE DE MISTURAS DE BENTONITA-AREIA

## STUDY OF THE PLASTICITY OF BENTONITE-SAND MIXTURES

*Bicalho, Kátia Vanessa, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, E. S., Brasil, katia@npd.ufes.br*

*Castello, Reno Reine, UFES e Solo Fundações & Geotecnia, Vitória, E. S, Brasil, renocstl@terra.com.br*

*Collodetti, Giovana, UFES, Vitória, E.S., Brasil, gioenge@yahoo.com.br*

*Cavassani, Marita Raquel Paris, UFES e Ensino Superior Unificada do Centro Leste (UCL), Serra, E. S., Brasil, maritarpc@yahoo.com.br*

### RESUMO

Misturas de bentonita-areia são muito utilizadas para a construção de barreiras “impermeáveis” (liners) para a contenção de resíduos e vêm sendo estudadas na Engenharia Geotécnica há décadas. Este trabalho verifica experimentalmente, através de resultados de ensaios laboratoriais disponíveis na literatura e outros realizados pelos autores, as formulações teóricas propostas por Castello e Polido (1994) e Bicalho et al. (2002) para avaliar a influência de frações arenosas nos limites de Atterberg de misturas de bentonita-areia. Os resultados experimentais confirmam o modelo teórico e mostram que o índice de plasticidade de uma mistura de argila com areia varia linearmente com a quantidade de argila presente na mistura, desde que o volume de argila seja tal que não exista contato entre os grãos de areia da mistura argila-areia (geralmente em percentagens de argila maiores que 15%).

### ABSTRACT

In this study, experimental results on mixtures of soft bentonitic clay with varying proportions of fine sand are used to investigate the theory proposed by Castello e Polido (1994) e Bicalho et al. (2002) that analyses the influence of the non-clays constituents on the mechanical properties of clay soils. Results indicate that for clay content above about 15% it is the clay matrix alone that controls the mechanical behavior of the mixture.

### 1. INTRODUÇÃO

Materiais adequados para a construção de barreiras “impermeáveis” (*liners*) para a contenção de resíduos devem ter baixa condutividade hidráulica ( $< 10^{-9}$  m/s) e boa estabilidade mecânica (características de inchamento e retração controladas). As argilas bentoníticas atendem ao requisito de baixa condutividade hidráulica, mas são muito expansivas e têm expressivas variações de volume quando submetidas a variações de umidade. Para reduzir este efeito indesejável costuma-se misturar a bentonita com areia, de modo que a condutividade hidráulica ainda atenda às necessidades deste uso e a expansividade seja controlada (Montanez 2002).

Castello e Polido (1994) propõem formulações teóricas para investigar a influência da fração arenosa na compressão unidimensional de solos argilosos moles e em seus limites de Atterberg. Tal teoria permite extrapolar a plasticidade, os índices físicos e o comportamento de compressão unidimensional de misturas de argila e areia, a partir desses valores em uma determinada mistura dos mesmos componentes ou da mesma argila pura. As formulações propostas se restringem à condição de argila pouco arenosa, onde não existe contato entre os grãos de areia.

Bicalho et al. (2002) observaram experimentalmente através de ensaios de compressão odométrica e de limites de Atterberg em misturas de bentonita e areia que para percentagens superiores a aproximadamente 20% da bentonita ensaiada as equações propostas por Castello e Polido (1994) se mostram válidas.

O presente trabalho faz parte de uma pesquisa em desenvolvimento no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Espírito Santo (LAMES-UFES), que envolve a verificação experimental, através de resultados de ensaios laboratoriais, das formulações teóricas propostas por Castello e Polido (1994) e Bicalho et al. (2002) e da quantidade mínima de argila presente na mistura no qual a teoria proposta se mostra válida. Neste artigo utilizam-se resultados de ensaios de limites de Atterberg para misturas de bentonita-areia realizados no LAMES-UFES (Dantas et al. 1995 e Bicalho et al. 2002) e outros disponíveis na literatura (Sridharan et al. 1999 e Montanez 2002).

## 2. MÉTODO DE ANÁLISE

### 2.1. Formulações teóricas

Skempton (1953) observou que solos de mesma origem geológica, portanto com os mesmos minerais argílicos, possuem índice de plasticidade, IP, linearmente crescente com o teor de fração de argila, C. O índice de atividade de uma argila ( $A_t$ ) definido como a relação entre IP e C varia de aproximadamente 7.2 (montmorilonita sódica) a 0.38 (caolinita).

Seed et al. (1964) verificaram que a linearidade entre os limites de Atterberg (limites de liquidez e plasticidade) e o teor de fração de argila é válida somente para misturas de argila com areia, tal que os grãos de areia não estejam em contato, isto é, o volume da mistura de argila e água é maior que o volume dos vazios da areia. A percentagem mínima de argila para preencher o volume de vazios da areia nas misturas argila-areia,  $C_{fv}$ , foi definida como:

$$C_{fv} = \frac{x}{100+x} \times 100 \quad (1)$$

onde: x = peso seco em gramas de partículas de argila  $\left( \frac{100e_s}{G_{ss} \left( \frac{1}{G_{sc}} + \frac{LL_c}{100} \right)} \right)$ ;  $LL_c$  = limite de liquidez

da fração de argila (em percentagem);  $G_{sc}$  = densidade dos sólidos da fração de argila;  $G_{ss}$  = densidade dos sólidos da fração areia e  $e_s$  = índice de vazios máximo da areia.

Castello e Polido (1994) e Bicalho et al. (2002) sugerem uma normalização de parâmetros de compressão odométrica e de índices físicos que permite correlacionar esses valores de solos argilosos quando “puro” (sem areia) com este mesmo solo quando misturado com diferentes proporções de areia ou vice-versa. Os dados são os limites de Atterberg, densidade dos sólidos, granulometria, índice de vazios e dados de compressão odométrica. Considerando-se que os grãos de areia são incompressíveis e que se a fração de areia em pequenas proporções numa mistura com argila é inerte, e produziria o simples efeito de diminuir o volume relativo da matriz argilosa na mistura, Castello e Polido (1994) classificaram as misturas de argila e areia como misturas “com pouca areia”, “com areia” e “com muita areia”, conforme ilustra a Figura 1. Tal classificação baseia-se no comportamento dos grãos e da mistura durante a compressão. Segundo a classificação estudada, a matriz argilosa de uma mistura de argila e areia com “pouca areia” é comprimida uniformemente e não há alteração do arranjo formado pelos grãos de areia. A compressão da matriz argilosa de uma mistura “com areia” é desuniforme e cria concentrações de tensões entre os grãos de areia, mas o arranjo geral é mantido. Já em uma

mistura com “muita areia” a compressibilidade da amostra ocorre principalmente na fração arenosa, que apresenta alteração de seu arranjo durante o processo.

As correlações entre características da argila pura, denominadas normalizadas, e de uma mistura argila-areia são também propostas pelos autores. Essas propriedades são umidade,  $w_{nor}$ , índice de vazios,  $e_{nor}$ , altura (ou volume),  $H_{nor}$ , e índice de compressão,  $Cc_{nor}$ . Este artigo investiga a variação da umidade com a variação do teor de fração de argila (bentonita) da mistura, e assim a equação de normalização é:

$$w_{nor} = \frac{w \times 100}{P_{200}} \quad (2)$$

onde  $w_{nor}$  é a umidade normalizada (em porcentagem),  $w$  é a umidade de uma mistura qualquer (em porcentagem) e  $P_{200}$  é a porcentagem de material da mesma mistura que passa na peneira nº 200 (em porcentagem) que nas misturas de areia e argila é igual a concentração da fração de argila,  $C$ .

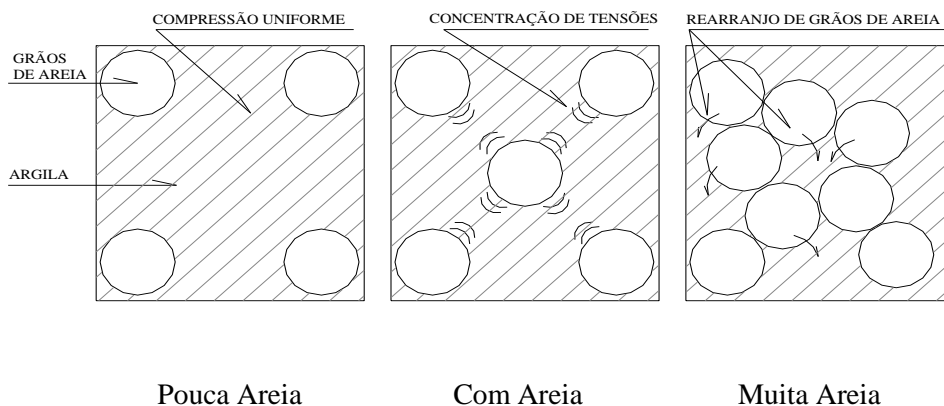


Figura 1- Misturas de argila com areia e os respectivos comportamentos de seus grãos durante a compressão (Castello e Polido 1994).

## 2.2. Investigação experimental

Para verificação experimental da teoria apresentada foram analisados resultados publicados na literatura de ensaios de limites de Atterberg (LL e LP) de misturas de bentonita e areia em várias proporções. Dois grupos de misturas foram estudados.

O primeiro grupo, cujos resultados experimentais foram apresentados por Bicalho et al. (2002), é composto por argila bentonítica, com densidade dos sólidos,  $G_{SC}$ , igual a 2,624 e areia natural, quartzosa, branca, uniforme, com grãos angulares que passaram na peneira de malha 0,42 mm e densidade de sólidos,  $G_{SS}$ , igual a 2,645. A porcentagem mínima e máxima da fração de argila necessária para preencher os vazios da areia, definida pela Equação 1, varia de 9 a 10%. Por isso as amostras foram preparadas com proporções de argila variando de 10% a 60%, em massa, na mistura argila-areia. Também foi estudado o comportamento da bentonita pura.

No segundo grupo, cujos resultados experimentais foram apresentados por Montanez (2002), analisam-se os resultados de misturas de uma bentonita sódica com densidade dos sólidos,  $G_{SC}$ , igual a 2,6877, e uma areia bem graduada, com grãos angulares e densidade dos sólidos,  $G_{SS}$ , igual a 2,6553. A porcentagem mínima da fração de argila necessária para preencher os vazios da areia, definida pela Equação 1, é de 8%. Os ensaios foram feitos em amostras contendo 13, 22, 30 e 75% de bentonita.

### 3. RESULTADOS OBTIDOS

Os Quadros 1 e 2 apresentam os resultados de caracterização (limites de Atterberg) convencionais e normalizados conforme Equação 2, dos ensaios feitos por Bicalho et al. (2002). Os Quadros 3 e 4 exibem tais resultados para os ensaios realizados por Montanez (2002).

Os Quadros 2 e 4 mostram que as misturas com fração de bentonita de 10% para Bicalho et al. (2002) e 13% para Montanez (2002) apresentaram uma disparidade em seus dados normalizados, em comparação com os outros percentuais do mesmo grupo. Isso pode ser explicado pela baixa concentração de argila nas misturas, que podem ser classificadas como “com areia”, visto que são percentagens muito próximas às mínimas necessárias para preencher os vazios das respectivas areias, conforme se pode calcular com a Equação 1, e não se pode, neste caso, dizer que não há contato entre os grãos de areia, nem que eles não se reorganizarão se a amostra fosse submetida à compressão. Portanto a proposta estudada não se aplica às misturas com as concentrações de bentonita citadas.

A Figura 2 relaciona os valores de LL e C a partir dos resultados do Quadro 1 juntamente com dados exibidos por Dantas et al. (1995), obtidos com estudos de misturas da mesma bentonita e areia. Os resultados de ensaios realizados por Montanez (2002) também são apresentados na Figura 2. A reta  $LL = 2,915C$  apresentou-se como bom ajuste para os resultados de Dantas et al. (1995) e Bicalho et al. (2002). O mesmo ocorreu para a reta  $LL = 4,598C$  e os dados de Montanez (2002). Tais ajustes apresentam coeficientes de correlação ( $R^2$ ) iguais a 0,974 e 0,992, respectivamente. Isso indica linearidade nas relações entre LL e C para misturas de mesmas argila e areia. Observe-se que os dados correspondem a misturas com fração de argila superiores à mínima calculada com a Equação 1.

Não foi possível obter resultados conclusivos para os valores dos limites de plasticidade das misturas de bentonita e areia, determinados segundo o procedimento padrão, no qual rola-se um filete de solo com diâmetro de 3mm até esfarelar e então mede-se sua umidade (NBR 7180, Associação Brasileira de Normas Técnicas 1984). Isso pode ser justificado devido ao maior grau de subjetividade associado ao ensaio de determinação do LP (Bicalho et al. 2002). O ensaio convencional para determinação do LP apresenta resultados pouco consistentes, uma vez que a tensão aplicada durante o rolamento do filete de solo é difícil de ser controlada (Whyte 1982, Feng 2000).

Quadro 1- Resultados convencionais dos ensaios de caracterização (Bicalho et al. 2002)

C (%)	100	60	50	40	30	20	10
LL	290	156	128	99	71	47	34
LP	28	18	18	20	20	24	-
IP	262	138	110	79	51	23	-

Quadro 2 - Resultados normalizados dos ensaios de caracterização (Bicalho et al. 2002)

C (%)	100	60	50	40	30	20	10
LL <sub>nor</sub>	290	260	256	248	237	235	340
LP <sub>nor</sub>	28	30	36	50	67	120	-
IP <sub>nor</sub>	262	230	220	198	170	115	-

Quadro 3 - Resultados convencionais dos ensaios de caracterização Montanez (2002)

C (%)	75	30	22	13
LL	337	150	110	69
LP	51	28	22	23
IP	286	122	88	46

Quadro 4 - Resultados normalizados dos ensaios de caracterização Montanez (2002)

C (%)	75	30	22	13
LL <sub>nor</sub>	449	494	490	548
LP <sub>nor</sub>	68	92	98	183
IP <sub>nor</sub>	381	402	392	365

A Figura 3 apresenta a clássica representação entre os valores de IP e LL (gráfico de Casagrande) para as misturas de areia e bentonita ensaiadas por Sridharan et al. (1999), Bicalho et al. (2002) e Montanez (2002) e a reta empírica,  $IP = 0,9416 (LL - 20,61)$  proposta por Padian e Nagaraj (1990) obtida a partir de um total de 103 dados experimentais apresentados por Skempton (1953) e Seed et al. (1964). Observa-se que os resultados experimentais analisados neste estudo são consistentes e confirmam a linearidade entre LL e IP. A equação empírica proposta por Padian e Nagaraj (1995) se ajusta bem aos resultados experimentais analisados.

Holtz e Kovacs (1981) verificaram experimentalmente que a mineralogia das argilas pode ser estimada usando o gráfico de Casagrande e os resultados dos limites de Atterberg (ou seja, a relação entre LL e IP das montmorilonitas tendem a convergir para a reta U definida como  $IP = 0.9 (LL - 8)$  e das ilitas e caulinitas tendem a convergir para a reta A definida como  $IP = 0.73 (LL - 20)$  no ábaco de Casagrande). Os resultados apresentados na Figura 3 sugerem que a relação entre LL e IP das misturas de bentonita e areia se aproxima da reta U com o aumento do teor de bentonita e correspondente valor de LL. A Figura 3 mostra também que a relação entre LL e IP de misturas de caulinita e bentonita (Sridharan et al. 1999) situa-se entre as retas A e U no ábaco de Casagrande e convergem para uma posição próxima a reta U com o aumento do teor de montmorilonita da mistura.

A variação de IP com C, para diferentes misturas de argila e areia é apresentada na Figura 4. Os resultados confirmam a linearidade da relação entre IP e C com coeficientes de correlação ( $R^2$ ) maiores que 0,95 para as misturas de bentonita e areia e igual 0,93 para a argila arenosa natural (Castello e Polido 1994). A inclinação das retas,  $A_t$ , varia com a origem geológica e composição mineralógica das argilas. O valor de  $A_t$  para as argilas bentoníticas estudadas (classificadas como argilas muito ativas,  $A_t > 1.25$  (Matos Fernandes 2006)) variou de 2.38 (Bicalho et al. 2002) a 3.841 (Montanez 2002).

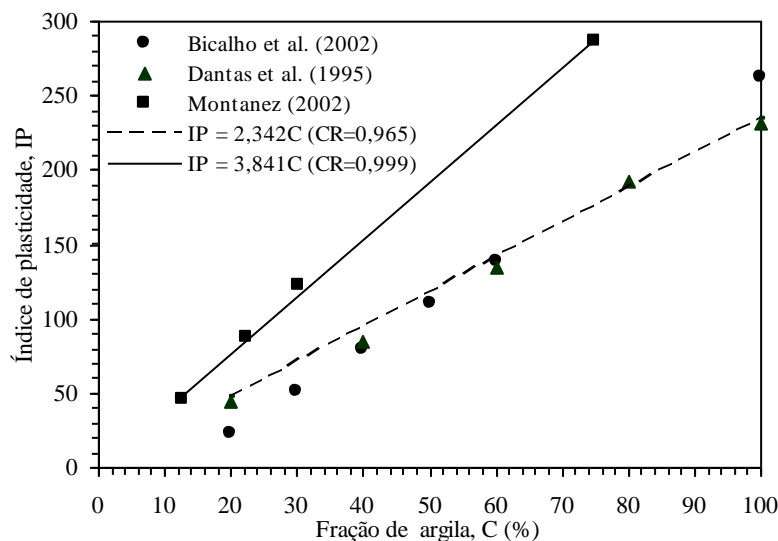


Figura 2 - Variação de LL com C para as misturas de Bentonita-areia estudadas.

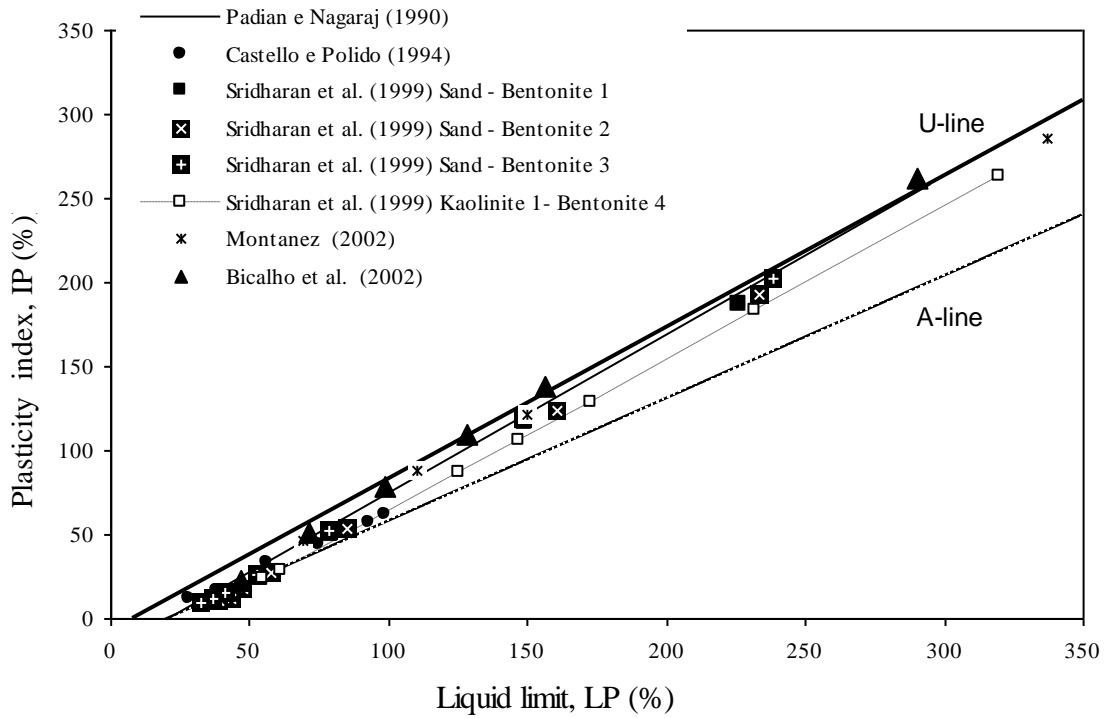


Figura 3 - Resultados experimentais e teóricos do IP em função de LL.

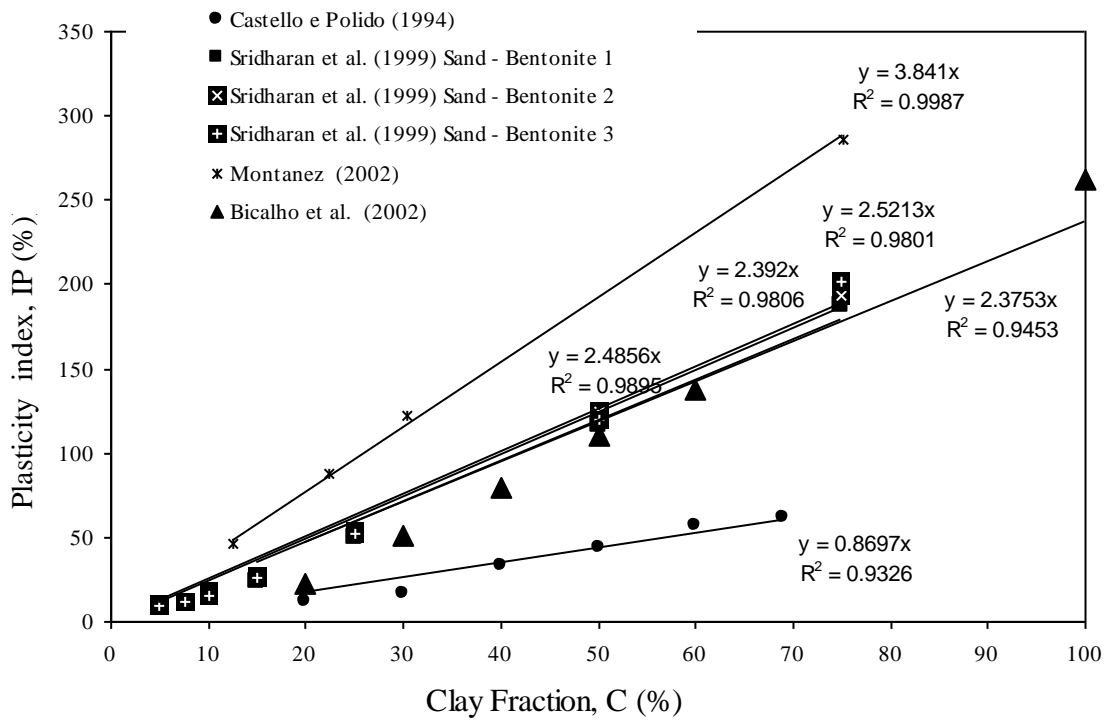


Figura 4 - Variação de IP com C para diferentes misturas de argila e areia.

#### 4. CONCLUSÕES

As misturas de bentonita e areia podem ter suas plasticidades previstas a partir dos valores de LL e o IP da bentonita e quantidade de areia presente na mistura desde que a quantidade de areia não interfira de modo significativo no rearranjo geral das partículas da matriz argilosa. A percentagem de areia na mistura não pode ser superior à que a define como “com pouca areia”, conforme a proposição feita por Castello e Polido (1994) e Bicalho et al.(2002).

Resultados de ensaios de limites de Atterberg analisados neste trabalho confirmaram a linearidade da relação entre LL e C e entre IP e C em misturas de bentonita e areia em diferentes proporções, com concentrações de argila tais que não há contato entre os grãos de areia. Verifica-se que a relação entre LL e IP das misturas de bentonita e areia se aproxima da reta U ( $IP = 0.9 (LL - 8)$ ) com o aumento de C e correspondente LL. Os resultados de ensaios mostram que para percentagens superiores a 15% de bentonita a teoria se mostra válida. Estes valores são pouco superiores ao mínimo necessário para que a bentonita preencha os vazios da areia das misturas estudadas (8-10%). Entretanto, recomenda-se maiores estudos para investigar o que vem a ser argila “pouco arenosa”, ou seja, a quantidade mínima de argila presente na mistura de bentonita e areia no qual a formulação proposta se mostra válida.

#### AGRADECIMENTOS

Ao técnico do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFES, Miguel Rubens Caxias, pela dedicação e colaboração na realização dos ensaios.

#### REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). *Determinação do limite de plasticidade: NBR 7180*. Rio de Janeiro.
- Bicalho, K. V., Cavassani, M. R. P. e Castello, R. R. (2002). “Características de Compressibilidade de Argilas Arenosas Moles.” *8 Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, 1*, 303-312.
- Castello, R.R. e Polido, U.F. (1994). “Influência da fração arenosa em argilas no adensamento.” In: *X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. Foz do Iguaçu, 2, 491-498.
- Dantas, B., Bicalho, K. V.; Castello, R. R. e Polido, U. F. (1995). “Verificação de argilas arenosas para adensamento.” In: *SIPUFES, Vitória, XIII Seminário Interno de Pesquisa e Extensão da UFES*, vol. XIII.
- Feng, T.W. (2000). “Fall-cone penetration and water content relationship of clays.” *Geotechnique*, 50, 2,181-187.
- Holtz, R. D. e Kovacs, W. D. (1981). *An introduction to Geotechnical Engineering*, Practice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Matos Fernandes, M. (2006). *Mecânica dos Solos, Conceitos e Princípios Fundamentais*, FEUP edições.
- Montanez, J. E. C. (2002). “Suction and volume changes of compacted Sand-Bentonite mixtures.” *Ph. D. dissertation*, University of London (Imperial College of Science, Technology and Medicine), London, UK.
- Padian, N.S.; Nagaraj, T.S. (1990). “Critical reappraisal of colloidal activity of clays.” *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 116, 2, 285-296.
- Seed, H.B.; Woodward, R.J.; Lundgren, R. (1964). “Fundamental aspects of the Atterberg limits.” *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 90*, SM6, 75-105.
- Sridharan A., Nagaraj H. B., Prakash K. (1999). Determination of the plasticity index from flow index, *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, Vol. 22, No. 2, pp. 169-175.

- Skempton, A.W. (1953). "*The colloidal activity of clays.*" Proc., *III International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1*, 57-61.
- Whyte, I.L. (1982). "Soil plasticity and strength – a new approach using extrusion." *Ground Engineering, 15*, 1,16-24.