



## Caracterização Geotécnica da Areia do Porto do Açú

Daniel Pimenta Monteiro

Aluno de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Rio de Janeiro - Rio de Janeiro – Brasil, [dpm1982@gmail.com](mailto:dpm1982@gmail.com)

Bernadete Ragoni Danziger

Sub Chefe do Dep. de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Departamento de Estruturas e Fundações, Rio de Janeiro - Rio de Janeiro – Brasil, [bernadete.danziger@eng.uerj.br](mailto:bernadete.danziger@eng.uerj.br)

Bruno Teixeira Lima

Professor Adjunto, Universidade Federal Fluminense – UFF, Departamento Engenharia Civil, Niterói - Rio de Janeiro – Brasil

Professor Adjunto, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Departamento de Estruturas e Fundações, Rio de Janeiro - Rio de Janeiro – Brasil, [bruno.lima@eng.uerj.br](mailto:bruno.lima@eng.uerj.br)

**RESUMO:** Foi realizada uma campanha de caracterização das areias do Porto do Açú visando conhecer seu comportamento em relação a resistência ao cisalhamento, permeabilidade e compressibilidade. Realizaram-se ensaios de cisalhamento direto em amostras secas com quatro compacidades relativas (CR), muito fofa a compacta, sob tensões normais entre 50 kPa e 500 kPa, verificando-se as variações motivadas pelas mudanças de CR e de tensões normais, conhecendo-se sua influência sobre a resistência de pico e sobre a ocorrência de contração ou dilatação do corpo de prova. Foi determinado o ângulo de atrito a volume constante, de acordo com modelo teórico proposto por Taylor (1948) e aprimorado por Atkinson e Bransby (1978), obtendo-se valor entre 24° e 26°. Do estudo das variações do deslocamento vertical do *top cap*, foi determinada uma curva que relaciona índice de vazios crítico e tensão normal nominal crítica, análoga a linha de estado crítico de Lee e Seed (1967). O módulo edométrico ( $E_{edo}$ ) situou-se entre 6,17 MPa e 226 MPa (para tensões normais entre 12,5 kPa e 1600 kPa) e o coeficiente de permeabilidade (k) variou entre  $1,90 \times 10^{-3}$  cm/s e  $1,19 \times 10^{-3}$  cm/s (amostra fofa e compacta).

**PALAVRAS-CHAVE:** Resistência ao Cisalhamento. Permeabilidade. Módulo Edométrico. Areias. Ensaios de Laboratório.

**ABSTRACT:** A characterization campaign was carried out on the sands of Porto do Açú in order to know its behavior in relation to shear strength, permeability and compressibility. Direct shear tests were carried out on dry specimens, in four relative densities ( $D_r$ ), very loose to dense, under normal stresses between 50 kPa and 500 kPa, verifying the variations caused by changes in  $D_r$  and normal stresses, knowing their influence on the peak resistance and on the occurrence of specimen's contraction or expansion. The friction angle at constant volume was determined, according to the theoretical model proposed by Taylor (1948), and improved by Atkinson and Bransby (1978), obtaining a value between 24° and 26°. From the study of variations of top cap's vertical displacement, a curve that relates the critical void ratio and the critical nominal normal stress was determined, being analogous to the critical state line proposed by Lee and Seed (1967). The oedometric modulus ( $E_{oedo}$ ) was between 6,17 MPa and 226 MPa (normal stresses between 12,5 kPa and 1600 kPa) and the permeability coefficient (k) varied between  $1.90 \times 10^{-3}$  cm/s and  $1.19 \times 10^{-3}$  cm/s (soft and dense specimens).

**KEYWORDS:** Shear strength. Permeability. Oedometric Modulus. Sands. Laboratory Tests.

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



## 1. Introdução

A pesquisa se propôs a caracterizar, geotecnicamente, a areia do Porto do Açú (Figura 1), demonstrando seu comportamento e resistência no cisalhamento, permeabilidade e compressibilidade. A literatura técnica brasileira é carente de dados referentes aos solos arenosos de depósitos nacionais, sendo mais comum que se encontrem dados de areias internacionais. Este trabalho se enquadra num programa de pesquisa que tem por intuito apresentar a caracterização geotécnica de solos arenosos litorâneos fluminenses.

As amostras de areias empregadas neste trabalho são provenientes da região do Porto do Açú, situado no município de São João da Barra (Monteiro, 2023). O Porto do Açú, atualmente, é um dos maiores complexos de infraestrutura do país, possuindo o terceiro maior terminal de minério de ferro do Brasil, sendo responsável por 30% das exportações nacionais de petróleo, abrigando a maior base de apoio offshore do mundo (PRUMO, 2022).



Figura 1 - Localização do Porto do Açú (Google Earth).

## 2. Caracterização Geotécnica

A partir da curva granulométrica da Areia do Porto do Açú (Figura 2) foram determinados os coeficientes de não uniformidade,  $CNU = 2,35$ , e curvatura,  $CC = 1,30$ . A areia do porto do Açú foi considerada como uniforme e sem descontinuidades granulométricas. Alguns dos diâmetros de grãos determinados foram  $D_{10} = 0,20$  mm,  $D_{30} = 0,35$  mm,  $D_{50} = 0,42$  mm e  $D_{60} = 0,47$ mm.

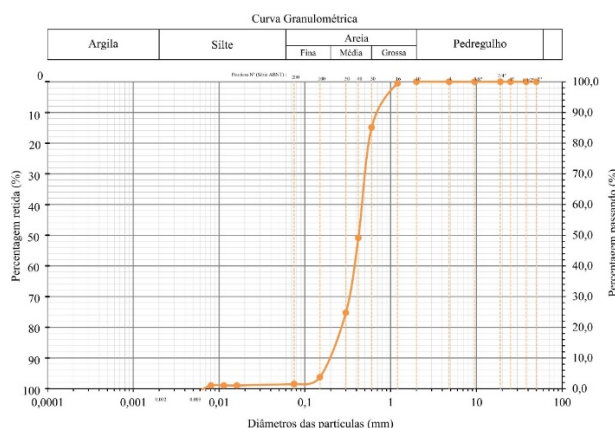


Figura 2 - Curva granulométrica das areias do Porto do Açú.

A areia do Porto do Açú pode ser classificada como Areia Média (85% passante na peneira #30 – 0,6 mm), com pequeno percentual na faixa de areia fina (10% de partículas com diâmetros inferiores a 0,2 mm). Por meio de inspeção visual com microscópio (Figura 3) foi possível constatar que a areia do Porto do Açú é composta, majoritariamente, por grãos de quartzo. Também foi possível observar partículas de feldspato e de minerais máficos (biotita ou anfibólio), não foi possível reconhecer visualmente a presença de fragmentos de conchas, impressão confirmada por

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





imersão em solução de ácido clorídrico, que não apresentou reação.



Figura 3 - Imagens da Areia do Porto do Açu, obtidas por microscópio eletrônico.

A partir das imagens apresentadas na Figura 3, foi identificado que a areia em pesquisa apresenta grãos, majoritariamente, subangulares e subarredondados, com base na classificação proposta por Pettijohn (1949). Para avaliação dos índices de esfericidade (S) e arredondamento (R) foi empregado o ábaco proposto por Krumbein e Sloss (1963), obtendo-se  $S = 0,7$  e  $R = 0,7$ . O material em estudo será tratado com a classificação areia média a fina, uniforme, e o formato dos grãos está classificado como subangular a subarredondado.

O valor da densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ) foi determinada pelo método do picnômetro sendo igual a 2,687, valor próximo da densidade relativa do quartzo, igual a 2,65 (LAMBE e WHITMAN, 1969).

O índice de vazios máximo foi obtido a partir das prescrições constantes na norma NBR 16840 (ABNT, 2020), que prevê dois métodos distintos, método A e método B. O índice de vazios máximo obtido pelo método A foi  $e = 0,756$  e para o método B foi  $e = 0,765$ .

O índice de vazios mínimo foi inicialmente obtido a partir das prescrições constantes na norma NBR 16843 (ABNT, 2020), empregando-se o método B.1, obtendo-se  $e = 0,581$ . Os índices de vazios obtidos por pluviação foram inferiores, com  $e = 0,512$  para um funil de abertura de 5 mm e altura de queda de 30 cm. Nos ensaios de cisalhamento direto, o índice de vazios verificado logo após a aplicação do carregamento foi ainda menor, atingindo  $e = 0,430$ , sendo este o valor considerado como mínimo.

### 3. Preparação das Amostras

Para a obtenção de corpos de prova com índices de vazios intermediários, entre o índice de vazios máximo e o mínimo, utilizou-se a pluviação sobre múltiplas peneiras, conforme idealizado por Miura e Toki (1982), que estudaram a areia de Toyoura, Japão. Foi empregado um total de 5 peneiras, na seguinte ordem: #4 (4,75mm), 3/8# (9,5 mm), 3/4" (19,0 mm), 3/4" (19,0 mm) e 3/8# (9,5 mm), com sete aberturas de funis (5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm e 70 mm). Os resultados foram plotados num gráfico Índice de Vazios Intermediários X Diâmetro de abertura do funil (Figura 4), obtendo-se uma curva em forma de "S".

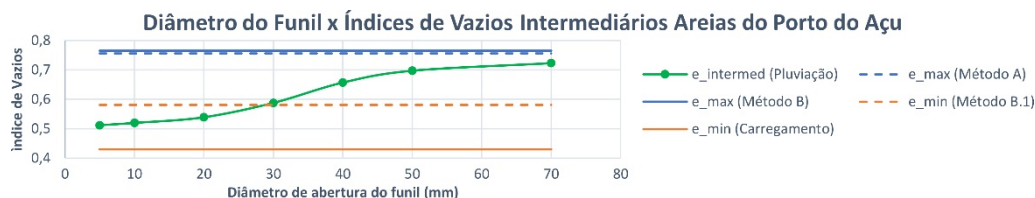


Figura 4 - Variação dos índices de vazios intermediários de acordo com a abertura do funil no ensaio de pluviação sobre peneiras.

### 4. Resistência e comportamento na ruptura

Os ensaios de cisalhamento foram realizados em quatro domínios de compactação relativa (CR), muito fofa, fofa, medianamente compacta e compacta. Para cada domínio, foram realizados

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



ensaios com quatro valores de tensões normais verticais: 50 kPa, 150 kPa, 300 kPa e 500 kPa, totalizando 16 amostras. A velocidade de deslocamento da caixa de cisalhamento foi de 0,13 mm/min.

Os valores médios obtidos logo após a pluviação ( $e_{0,médio}$  e  $CR_{0,médio}$ ) e logo após a aplicação das cargas ( $e_{a,médio}$  e  $CR_{a,médio}$ ) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores médios obtidos para os índices de vazios e CR dos corpos de prova cisalhados.

Índice de Vazios Médio e Média da Compacidade Relativa				
Domínio de CR	$e_{0,médio}$	$CR_{0,médio}$	$e_{a,médio}$	$CR_{a,médio}$
Muito Fofa	0,717	14,19%	0,630	40,37%
Fofa	0,674	27,22%	0,579	55,42%
Medianamente Compacta	0,568	58,74%	0,496	80,39%
Muito Compacta	0,519	73,37%	0,447	95,06%

Em todos os corpos de prova cisalhados no domínio de compacidade relativa muito fofa (Figura 5) houve comportamento contrátil (Figura 5b), denotado pela movimentação descendente do *top cap*. O deslocamento horizontal na ruptura variou entre 7,49 mm e 10,95 mm, aumentando à medida em que se aumenta a tensão normal nominal aplicada. o ângulo de atrito interno se manteve aproximadamente constante para as tensões de 50 kPa, 150 kPa e 300 kPa, entre 27,4° e 28,1°, para a tensão de 500 kPa obteve-se de 24,0°. A envoltória de ruptura apontou  $\phi' = 25,4^\circ$  para as amostras no domínio de compacidade relativa Muito Fofa (Figura 5c).

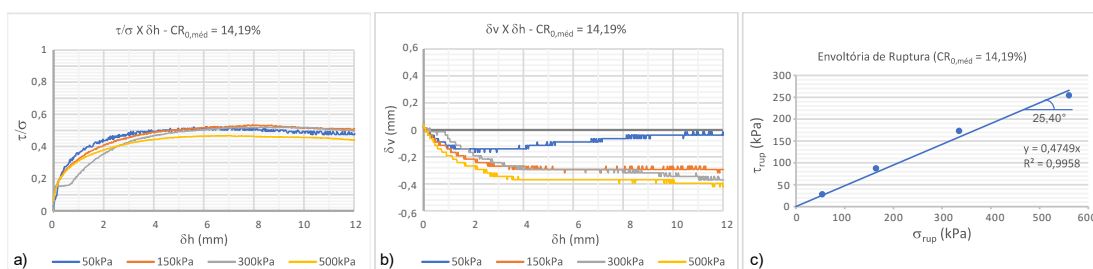


Figura 5 – Ruptura de amostra no domínio de compacidade relativa muito fofa.

No domínio de compacidade relativa fofa (Figura 6), houve comportamento contrátil (Figura 6b), denotado pela movimentação descendente do *top cap*. O deslocamento horizontal na ruptura variou entre 7,97 mm e 11,28 mm, aumentando com o aumento da tensão normal nominal (exceto para a tensão de 500 kPa, que registrou deslocamento de 9,57 mm). O ângulo de atrito interno apresentou uma maior variação, entre 26,4° e 30,9°. A envoltória de ruptura apontou  $\phi' = 26,8^\circ$  para as amostras com CR Fofa (Figura 6c).

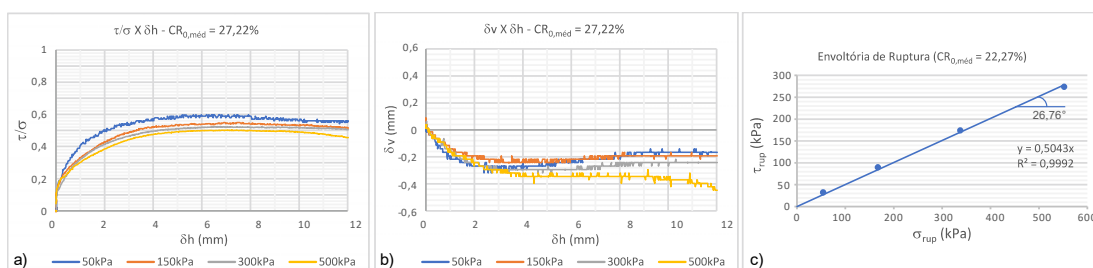


Figura 6 - Ruptura de amostra no domínio de compacidade relativa fofa.

Para CR medianamente compacto houve dilatação (Figura 7b). O deslocamento horizontal na ruptura variou entre 3,39 mm e 5,22 mm. O ângulo de atrito interno apresenta maior variação, entre 27,8° e 36,2°, a envoltória de ruptura apontou  $\phi' = 28,4^\circ$  (Figura 7c).

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





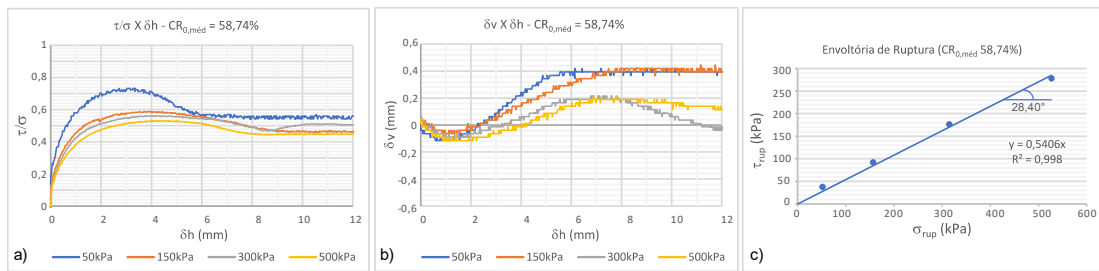


Figura 7 - Ruptura de amostra no domínio compacidade relativa Medianamente Compacta.

Para os corpos de prova em CR compacta houve comportamento dilatante (Figura 8b). O deslocamento horizontal na ruptura variou entre 3,34 mm e 4,38 mm. O ângulo de atrito interno apresenta uma maior variação entre os valores obtidos nos ensaios com tensão normal nominal de 50 kPa e 500 kPa, entre  $39,3^\circ$  e  $31,5^\circ$ , respectivamente. A envoltória de ruptura determinou  $\phi' = 32,1^\circ$  (Figura 8c).

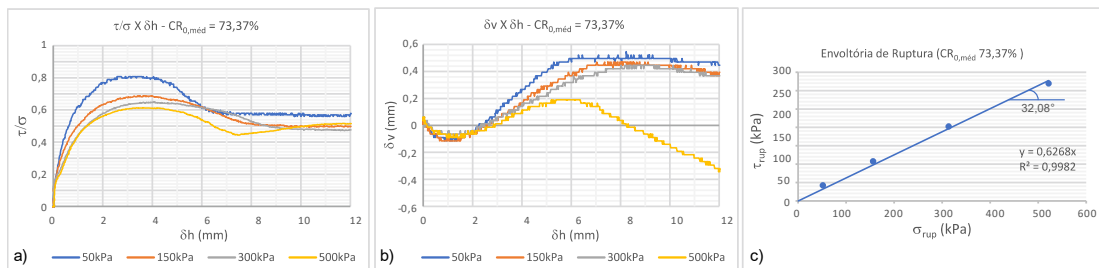


Figura 8 - Ruptura de amostra no domínio de compacidade relativa compacta.

A seguir, são apresentados gráficos que resumem, de forma comparativa os resultados obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto (Figura 9a e 9b).

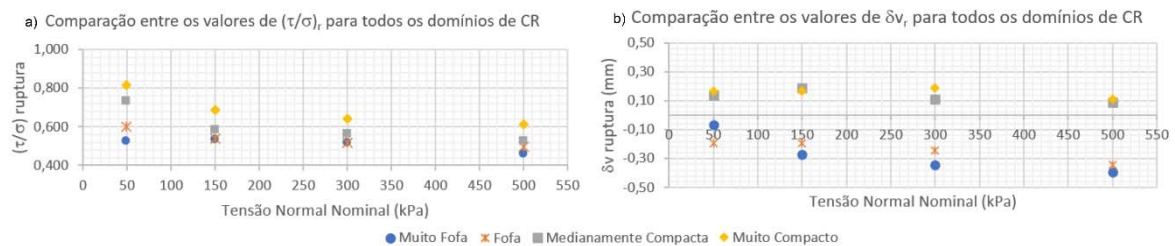


Figura 9 – Agrupamento dos resultados obtidos.

Da Figura 9a depreende-se que, para uma mesma compacidade relativa, há uma tendência de diminuição da razão  $(\tau/\sigma)_{ruptura}$  e, conseqüentemente, do ângulo de atrito efetivo com o aumento da tensão normal nominal. Isto está associado a uma diminuição da dilatância (ou aumento da contração) do corpo de prova com o aumento de  $\sigma_n$ , como pode ser visto nas curvas “ $\delta v_r \times \sigma_n$ ” (Figura 9b).

Quando se analisam essas mesmas curvas, agora sob uma mesma tensão normal nominal, percebe-se que a razão  $(\tau/\sigma)_r$  e  $\phi'$  serão tão maiores quanto menor for o índice de vazios da amostra. Isso ocorre graças a tendência de uma maior dilatância (ou menor contração) em amostras com maior CR, como também pode ser visto nas curvas “ $\delta v_r \times \sigma_n$ ”.

Para as amostras de menor compacidade relativa, os valores de contração na ruptura são significativamente menores para a tensão de 50 kPa, de forma que se pode entender que para tensões normais ainda menores, mesmo para índices de vazios bastante elevados, haveria dilatação do corpo de prova na ruptura. De forma análoga, com uma tendência menos explícita, os corpos de prova de maior compacidade relativa, quando cisalhados sob tensão normal elevada (500 kPa) ocorre

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



dilatação de menor magnitude, entendendo-se que para tensões normais ainda maiores ocorrerá contração, mesmo em amostras com índices de vazios bastante reduzidos.

Para o traçado da curva crítica, que relaciona “ $e_{cr}$  versus  $\sigma_{n,cr}$ ”, análoga a linha de estado crítico de Lee e Seed (1967), foi aplicada a metodologia apontada por Pinto (2006), adaptada aos ensaios de cisalhamento direto.

A metodologia foi aplicada ao gráfico “ $\delta v_r$  versus  $e_a$ ” (Figuras 10). Para cada conjunto de pontos foi interpolada uma reta por regressão linear de modo que, no ponto correspondente a intersecção do eixo horizontal, seja definido o índice de vazios para o qual ocorre variação nula no volume do corpo de prova. Os pares  $\sigma_n \times e_{cr}$  obtidos por esse processo são as coordenadas da curva “ $e_{cr}$  versus  $\sigma_{n,cr}$ ” (Figura 11).

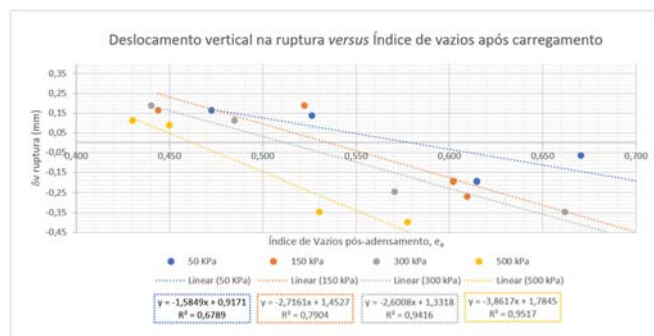


Figura 10 – Retas interpolada para diversas tensões nominais.

Na Figura 11 foi traçada uma curva por interpolação logarítmica, constituindo a curva “índice de vazios crítico versus tensão normal nominal crítica” da areia do Porto do Açú (Figura 11a). Com a utilização de uma escala horizontal logarítmica podemos expressar a curva que divide comportamento contrátil e dilatante como uma reta (Figura 11b).

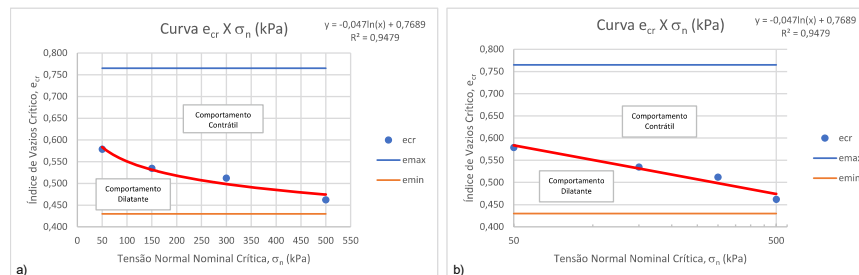


Figura 11 - Curva “índice de vazios crítico x tensão normal nominal crítica” das areias do Porto do Açú: a) em escala natural; b) em escala semi-log.

A curva traçada divide o espaço de plotagem referente ao “índice de vazios após aplicação das cargas ( $e_a$ ) - tensão normal nominal ( $\sigma_n$ )” em duas regiões. Quando uma amostra de areia sofre cisalhamento com uma combinação ( $e_a; \sigma_n$ ) situada acima da curva ocorrerá comportamento contrátil ( $\delta v_r < 0$ ); quando o cisalhamento ocorrer com uma combinação ( $e_a; \sigma_n$ ) situada abaixo da curva teremos comportamento dilatante ( $\delta v_r > 0$ ).

Taylor (1948) associa o fenômeno de dilatância em um ensaio de cisalhamento direto ao trabalho (energia) adicional demandado à força cisalhante no plano de ruptura para que as partículas se movam de forma ascendente, contra o sentido de ação da força normal. A tensão cisalhante de ruptura ( $\tau_{rup}$ ) em um corpo de prova de comportamento dilatante pode ser dividida em uma parcela necessária para romper o corpo de prova a volume constante ( $\tau_{cv}$ ) e uma parcela referente a dilatância ( $\tau_e$ ). O modelo de Taylor (1948), aprimorado por Atkinson e Bransby (1978), está ilustrado na Figura 12, adaptada de Simões (2015).

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





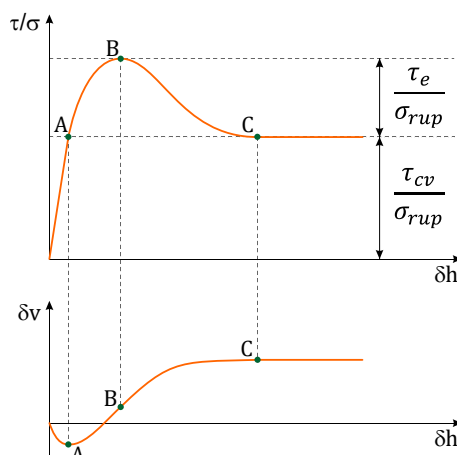


Figura 12 - Fenômeno da dilatação associada ao trabalho realizado para expandir o corpo de prova de areia em um ensaio de cisalhamento direto (adaptada de Simões, 2015).

Foi verificada uma correspondência entre as curvas obtidas nesta pesquisa e o modelo apresentado na Figura 12. Esta correspondência só não ocorre para os trechos finais das curvas  $\delta h$  x  $\delta v$  (após o ponto C indicado na Figura 12), onde não se forma o patamar estável e horizontalizado em todas as curvas, ocorrendo diminuição de  $\delta v$  com aumento de  $\delta h$ . O procedimento foi aplicado aos gráficos obtidos na pesquisa, para os resultados das amostras nos domínios de CR Medianamente Compacto e Compacto, aplicando-se as Equações 1 e 2

$$\left(\frac{\tau}{\sigma}\right)_A = \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)_C = \tan \phi_{cv} \quad (1)$$

$$\tan \phi = \left(\frac{d\delta_v}{d\delta_h}\right)_B + \tan \phi_{cv} \quad (2)$$

Os valores obtidos para os corpos de prova rompidos sob tensão de 50 kPa apresentaram valores de  $\phi'_{cv}$  significativamente superiores aos demais (da ordem de  $29^\circ$  a  $33^\circ$ ) para todos os outros casos houve boa convergência de modo que, desprezando os resultados obtidos sob aquela tensão, o ângulo de atrito à volume constante ( $\phi'_{cv}$ ) das Areias do Porto do Açú está situado na faixa entre  $24^\circ$  e  $26^\circ$ .

## 5. Permeabilidade

Foram conduzidos quatro ensaios de permeabilidade fazendo uso de permeâmetro de carga constante. Os quatro ensaios foram realizados com amostras em diferentes índices de vazios, obtidas com a utilização de um funil simples acoplado a uma mangueira e por meio de pluviação, obtendo-se índices de vazios de 0,763, 0,590, 0,658 e 0,518. Em cada um dos corpos de prova foram realizadas 9 verificações, utilizando uma proveta graduada, e então calculado o coeficiente de permeabilidade (k) tomando-se nota das temperaturas para posterior conversão para a temperatura padrão de  $20^\circ\text{C}$ , obtendo-se  $k_{20^\circ}$ .

Os ensaios registraram pouca variação de permeabilidade, com resultados ligeiramente superiores para as amostras de menor compactidade relativa, como esperado (Tabela 2).

Tabela 2 - Coeficiente de Permeabilidade da Areia do Porto do Açú

e	CR (%)	Classificação da Amostra	$e^3/(1+e)$	$k_{20^\circ\text{C}}$ (cm/s)
0,518	73,65%	Compacta	0,092	$1,19 \times 10^{-03}$
0,590	52,11%	Medianamente Compacta	0,129	$1,36 \times 10^{-03}$
0,657	31,97%	Medianamente Compacta	0,172	$1,50 \times 10^{-03}$

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



0,762 0,74% Muito Fofa 0,252  $1,90 \times 10^{-3}$

Para a verificação aplicabilidade da expressão proposta por Taylor (1948) na areia do Porto do Açú, correspondente a Equação 3, a mesma deve ser rearrumada, obtendo-se a Equação 4.

$$k = D_s^2 \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{e^3}{(1+e)} \cdot C \quad (3)$$

$$k = \left( D_s^2 \cdot C \cdot \frac{\gamma}{\mu} \right) \frac{e^3}{(1+e)} \quad (4)$$

Onde:

k: coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica;

$D_s$ : diâmetro da esfera com mesma razão média entre o volume e a área superficial dos grãos do solo;

$\gamma$ : peso específico do fluido percolante;

$\mu$ : coeficiente de viscosidade dinâmica do fluido percolante;

e: índice de vazios do solo;

C: fator de forma, que depende da forma e do arranjo dos poros do solo.

Segundo a proposição de Taylor (1948), a relação entre k e o parâmetro  $e^3/(1+e)$  é uma reta que passa pela origem. Na Figura 13 os resultados de k estão plotados em relação ao parâmetro  $e^3/(1+e)$  juntamente com uma linha de tendência obtida pelo Software Microsoft Excel por interpolação linear. A Figura 13a a linha de tendência busca o melhor ajuste matemático, na Figura 13b, a plotagem é repetida forçando a linha de tendência a interceptar a origem, obtendo-se ajuste bastante aceitável, com  $R^2 = 0,968$ .

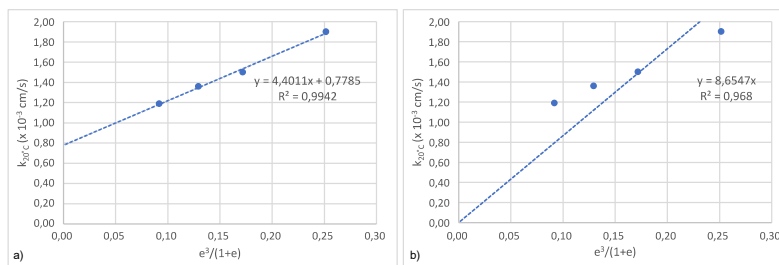


Figura 13 - Relação entre k e  $e^3/(1+e)$ : a) com interpolação linear no melhor ajuste matemático; b) com interpolação linear forçada para passar pela origem.

Considerando a equação de reta obtida na interpolação da Figura 13b, tem-se que o coeficiente angular é igual a  $8,647 \times 10^{-3} \text{ cm/s} = 0,008647 \text{ cm/s}$ , obtendo-se a Equação 5.

$$k = 0,008647 [\text{cm/s}] \times \frac{e^3}{(1+e)} \quad (5)$$

Portanto, obtemos:

$$\left( D_s^2 \cdot C \cdot \frac{\gamma}{\mu} \right) = 8,647 \times 10^{-5} \text{ m/s} \quad (6)$$

Tomando-se  $\gamma_{w,20^\circ\text{C}} = 9,789 \text{ kN/m}^3$  (peso específico da água a  $20^\circ \text{C}$ ) e  $\mu_{w,20^\circ\text{C}} = 1,002 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$  (viscosidade da água a  $20^\circ \text{C}$ ), e considerando  $D_s$  próximo de  $D_{50}$  ( $0,42 \times 10^{-3} \text{ m}$ ), obtemos o valor do fator de forma C na expressão de (TAYLOR, 1948):

$$\left( D_s^2 \cdot C \cdot \frac{9,789 \times 10^3 \text{ N/m}^3}{1,002 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2} \right) = 8,647 \times 10^{-5} \text{ m/s} \rightarrow C = 6,13 \times 10^{-5} \quad (7)$$

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





## 6. Compressibilidade

Foram realizados três ensaios de compressão unidimensional, com uso de prensa de adensamento, em amostras moldadas por pluviação e lançamento com funil simples, em um anel de ensaios de adensamento, com 7 cm de diâmetro e altura de 20 mm. Os corpos de prova apresentavam os seguintes índices de vazios: 0,682 (CR = 25,20% - Fofa), 0,580 (CR = 55,27% - Médio) e 0,523 (CR = 72,39% - Compacto). A sequência de carregamento empregado foi de 3,12 kPa, 6,25 kPa, 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa e 1600 kPa com posterior descarregamento. O tempo de espera entre cada etapa foi de 1 min.

A partir dos três ensaios de compressão confinada foi possível a obtenção das curvas Tensão-Deformação para cada uma das amostras, revelando comportamento não elástico (Figura 14).

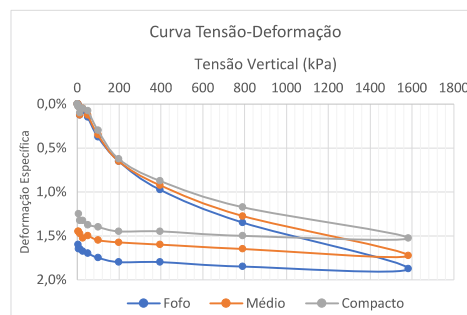


Figura 14 - Curvas tensão deformação referentes aos ensaios uniaxiais.

A partir da etapa de carregamento de 200 kPa a divergência entre as curvas fica bastante evidente. Na amostra mais compacta a deformação específica máxima foi de 1,52%, para a amostra medianamente compacta foi de 1,72% e na amostra fofa atingiu 1,87%. A partir dos resultados foi possível determinar o módulo edométrico, variando entre 6,17 MPa e 226 MPa para tensões entre 12,5 kPa e 1600 kPa, a variação dos módulos pode ser aproximada por interpolação linear (Figura 15). Os resultados abaixo de 12,5 kPa foram afetados pela resolução da escala do relógio comparador utilizado e não estão sendo considerados.

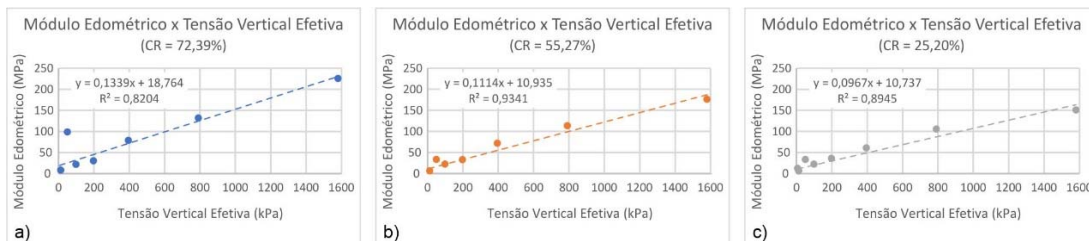


Figura 15 - Variação do Módulo Edométrico com a Tensão Vertical Efetiva em amostras de diferentes compacidades.

## 7. Conclusões

Nos ensaios de cisalhamento direto em amostras de compacidade relativa Muito Fofa e Fofa, não foi observado pico de resistência, mas o oposto ocorreu nos ensaios de compacidade relativa Medianamente Compacta e Muito Compacta, onde houve um pico de resistência bem definido. Nos corpos de prova com compacidade relativa muito fofa e fofa, o comportamento foi contrátil, com discreta retomada no deslocamento vertical após a ruptura. Por outro lado, nos corpos de prova com compacidade relativa medianamente compacta e compacta, houve uma fase de contração inicial seguida de dilatação até pouco depois de atingida a resistência de pico, seguida por um comportamento descendente. Para uma mesma tensão normal nominal, observou-se que quanto menor o índice de vazios após a aplicação das cargas e maior a compacidade relativa, menor foi o

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



deslocamento horizontal relativo na ruptura.

O intervalo de variação do ângulo de atrito interno, numa mesma compacidade relativa, para tensão normal nominal entre 50kPa e 500 kPa situa-se, respectivamente, nos seguintes intervalos: muito fofo, 27,57° e 24,43°; fofo, 30,89° e 26,39°; medianamente compacta, 36,19° e 27,82°; compacta: 39,26° e 31,49°. O ângulo de atrito a volume constante, variou entre 28,84° e 26,77° para as amostras compactas e entre 25,12° e 24,12° nas amostras medianamente compactas, para ensaios em tensões de 150 MPa a 500 MPa, respectivamente. Os ensaios realizados a 50 kPa foram bastante divergentes, com valores mais elevados (33,19° para amostra compacta e 30,19° para a mostra medianamente compacta).

Obteve-se a curva que relaciona o "índice de vazios crítico" com a "tensão normal crítica" para a Areia do Porto do Açú, obtendo-se a divisão entre o comportamento contráctil e dilatante.

Em relação a permeabilidade, para corpos de prova de diferentes compacidades relativas foi registrada pouca variação, com resultados ligeiramente superiores para as amostras de menor compacidade relativa, como esperado. Os valores encontrados estão na faixa de  $10^{-3}$  cm/s ( $10^{-5}$  m/s), considerada no limiar entre alta e baixa.

Nos ensaios de compressão uniaxial, as amostras de diferentes compacidades tiveram deformações específicas máximas de 1,52% para a compacta, 1,72% para a medianamente compacta e 1,87% para a fofo. O Módulo Edométrico da areia do Porto do Açú foi determinado e variou entre 6,17 MPa e 226 MPa para tensões entre 12,5 kPa e 1600 kPa.

## 8. Bibliografia

ABNT. **NBR 16840 - Solo — Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos.** ABNT. [S.l.]. 2020.

ABNT. **NBR 16843 - Solo — Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos.** ABNT. [S.l.]. 2020.

ATKINSON, J. H.; BRANSBY, P. L. **The Mechanics of Soils. An Introduction to Critical State Soil Mechanics.** University séries in civil engineering. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, 1978.

CHO, G.; DODDS, J.; SANTAMARINA, J. C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 132, May 2006.

KRUMBEIN, W. C.; SLOSS, L. L. **Stratigraphy and Sedimentation.** 2ª. ed. San Francisco: Freeman and Company, 1963.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics.** New York: John Wiley and Sons, Inc., 1969.

LEE, K. L.; SEED, H. B. **Drained Strength Characteristics of Sands.** Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 93, No. SM6. [S.l.], p. 117-141. 1967.

MIURA, ; TOKI, S. **A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation – strength properties of sand.** Soils and Foundations, Vol. 22, No 1. [S.l.], p. 1-17. 1982.

MONTEIRO, D. P. **Caracterização Geotécnica das Areias do Porto do Açú.** Dissertação (a ser defendida - Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia). Universidade do Estado do Rio de Janeiro - PGECIV, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, p. 222. 2023.

PETTIJOHN, F. J. **Sedimentary Rocks.** New York: Harper and Brothers, 1949.

PINTO, C. D. S. **Curso Básico de Mecânica do Solos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PRUMO, L. G. Sobre o porto. **Porto do Açú**, 2022. Disponível em: <<https://portodoacu.com.br/sobre-o-porto/porto-do-acu/>>. Acesso em: 19 Novembro 2022.

SIMÕES, F. B. **Caracterização Geotécnica da Areia da Praia de Ipanema.** Trabalho de conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 138. 2015.

TAYLOR, D. W. **Fundamental of Soil Mechanics.** New York: John Wiley & Sons, Inc., 1948.

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.

