



Estudo Experimental do Efeito da Argilosidade Sobre as Propriedades Físicas de Solos Experimental Study Effect of the Shaliness on Physical Properties of Soil

Maura Renata de Toledo Carvalho¹;
Gleide Alencar do Nascimento Dias² & José Agnelo Soares³

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia.

Av. Athos da Silveira Ramos, 274. Cidade Universitária, Ilha do Fundão, 21941-916, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia.

Av. Athos da Silveira Ramos, 274. Cidade Universitária, Ilha do Fundão, 21941-916, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

³Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia,

Laboratório de Petrofísica. R. Aprígio Veloso, 882. Bairro Universitário, 58429-900, Campina Grande, Paraíba, Brasil

E-mails: maurageol@gmail.com; gleide@geologia.ufrj.br; agnelo.soares@ufcg.edu.br

Recebido em: 21/10/2015 Aprovado em: 20/04/2016

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2016_2_108_115

Resumo

Neste trabalho foi avaliado o efeito da argilosidade sobre as propriedades físicas de solos argilosos, com ênfase na porosidade e na permeabilidade do meio. Para isto foi utilizado o equipamento permo-porosímetro a gás, baseado na variação de pressão em câmara confinante, com o intuito de obter valores de porosidade efetiva e permeabilidade absoluta em sedimentos inconsolidados (solos). No procedimento foram utilizadas amostras sintéticas, usando diferentes proporções de quantidades de esferas de vidro e caulinita (argila), com a intenção de criar um padrão granulométrico das amostras a serem analisadas. Isto incluiu a preparação do invólucro da amostra e estudos da determinação das pressões e fluxos de fluidos a serem aplicados nas amostras, fundamentados em publicações científicas. Os valores obtidos de permeabilidade e porosidade foram utilizados na estimativa de outro parâmetro físico dos sedimentos, a superfície específica dos grãos através da equação de Kozeny-Carman, cujo valor da constante recomendado por outros autores é igual a 5, para fluxo em meios porosos inconsolidados. Pode-se verificar nos resultados que o permo-porosímetro a gás, pode ser utilizado com sucesso na medição das propriedades físicas de solos tanto arenosos como argilosos.

Palavras-chave: argilosidade; permeabilidade; porosidade

Abstract

This final course work aimed to evaluate the effect of shaliness on the physical properties of clay soils, with emphasis on the properties of porous media. For this, we used a gas poropermeameter based on the pressure variation on confining chamber, in order to obtain values of absolute permeability and effective porosity on unconsolidated sediments (soils). The values for pore volume are obtained by Boyle Mariotte law, which relates the variation of pressure and volume of an ideal gas at constant temperature, while permeability values are obtained by Darcy's law. It is also emphasized the development of a method for analysis of unconsolidated sediments with the equipment since it was designed to consolidated sediments. This includes sample enveloping and studies for determination of ideal pressures and flows to be used. Measured values for permeability and porosity were used in estimating other physical parameter of the sediments, the specific surface of the grains, through the Kozeny-Carman equation, whose constant was considered equal to 5, since this is the value recommended for flow in porous unconsolidated sediments. Results show that this equipment can be used successfully for measurements of physical pore properties of soils if samples are properly prepared.

Keywords: shaliness; permeability; porosity

1 Introdução

Propriedades petrofísicas de solos como porosidade, permeabilidade, superfície específica, velocidades de ondas elásticas, entre outras, são reconhecidamente afetadas pela presença de argilo-minerais no solo. O índice de propriedades petrofísicas como porosidade e permeabilidade são parâmetros essenciais para a simulação de fluxo e conseqüente gerenciamento de reservatórios de petróleo, gás ou água subterrânea e estudos de caracterização geoambiental.

Cupertino (2005) desenvolveu um estudo de medição das propriedades do meio poroso (porosidade e permeabilidade) em um conjunto de amostras de solos arenosos, e observou que os resultados experimentais eram bastante interessantes sobre o impacto dos sedimentos finos. No entanto, não se compreendia bem a aplicação do equipamento (permo-porosímetro a gás) em solos de mais elevado índice de argilosidade. Neste estudo procurou-se contribuir no entendimento dessa aplicação.

Diversos autores (Tosaya & Nur, 1982; Castagna *et al.*, 1985; Han *et al.*, 1986; Zahaf & Tiab, 2002) relatam o efeito da argilosidade sobre as propriedades físicas de sedimentos e de seus agregados, bem como o conseqüente impacto sobre as velocidades de propagação das ondas elásticas nesses materiais. Essas velocidades são fortemente dependentes da composição e da porosidade dos sedimentos. Por sua vez, a porosidade e a permeabilidade dos sedimentos são fortemente controladas pelo teor e distribuição e dos argilominerais contidos nesses materiais.

2 Fundamentação Teórica

A porosidade é uma propriedade petrofísica das rochas sedimentares e está relacionada com a capacidade de armazenamento de fluídos, expressando a fração do volume total de uma rocha que pode ser ocupada por fluido. Sendo assim, a porosidade de uma amostra de rocha é definida, em percentual, como a relação entre o volume de espaços vazios, V_v , e seu volume total, V_T , Eq 1. O volume total de uma rocha é constituído pela soma do volume dos poros e volume de material sólido, Eq 2.

$$\text{Eq 1} \quad \phi = \frac{V_v}{V_T} \quad \text{e} \quad \text{Eq 2} \quad V_T = V_v + V_s$$

A porosidade nas rochas pode ser classificada como total ou efetiva. A total representa a percentagem total de espaços vazios das rochas, e a efetiva, a que leva em conta somente os espaços porosos que estão interconectados. A porosidade pode ser classificada em relação a sua textura petrográfica, forma dos grãos (esfericidade e arredondamento), grau de seleção, compactação, dissolução, cimentação e grau de conexão entre os poros. A forma e o grau de conexão entre os poros não são facilmente classificados por possuírem uma geometria de espaços vazios muito complexos. A porosidade aumenta quanto maior a seleção, pois menor é o preenchimento dos espaços vazios por sedimentos mais finos.

A permeabilidade caracteriza a habilidade das rochas (ou solos) em permitir a circulação de fluídos contidos em seus poros. Em 1856 Darcy demonstrou que a vazão de escoamento da água (volume fluido por unidade de tempo) em um meio poroso, era diretamente proporcional à seção transversal do meio, à diferença de carga hidráulica entre dois pontos e, inversamente, à distância percorrida pelo fluido (Cupertino, 2005). A constante de proporcionalidade dessa relação foi denominada de condutividade hidráulica (k). Por sua vez, a condutividade hidráulica, depende de várias características, tanto do meio (permeabilidade intrínseca, porosidade, tamanho, forma e arranjo ou distribuição dos grãos) como do fluido usado (viscosidade e massa específica). A permeabilidade intrínseca (k), também denominada de permeabilidade absoluta, é uma função do tipo do material poroso, granulometria e disposição estrutural (Eq. de Darcy 3),

$$\text{Eq 3} \quad k = \frac{2000P_1\mu Q_1 L}{(P_1^2 - P_2^2)A}$$

Q_1 – Taxa de fluxo na pressão de injeção (cc/sec); A – Área transversal da amostra (cm²); k – Permeabilidade Absoluta (mD); μ – Viscosidade (cP); L – Comprimento da amostra (cm); P_1 e P_2 – Pressões de injeção e saída da amostra, respectivamente (psi).

A permeabilidade nas rochas pode ser classificada como absoluta ou relativa. A absoluta é a capacidade de fluxo de um fluido que satura 100% de seus poros interconectados e/ou fraturas e a relativa é a capacidade de fluxo de um fluido na presença de um outro qualquer. Em uma rocha contendo óleo, gás e/ou água, cada um desses fluidos flui de acordo com a quantidade dos demais. Os fatores que influenciam na porosidade efetiva afetam também o valor da permeabilidade absoluta.

A superfície específica reflete em valor a granulometria dos sedimentos inconsolidados, não influenciados por processos de litificação e diagênese. Considerando dois volumes iguais de sedimentos inconsolidados, aquele que apresenta maior superfície específica conseqüentemente apresenta granulometria mais fina, e o de menor superfície específica, granulometria mais grossa.

Para medir a superfície específica foi utilizado o método indireto que consiste na utilização de fórmulas relacionando taxas de fluxo de fluidos (permeabilidade) através de meios porosos com suas áreas de superfície específica. Segundo Cupertino (2005) a equação de Kozeny-Carman (Eq 4) foi concebida apenas para fluxos em meios porosos inconsolidados, mas pode ser aplicada, também, em meios porosos consolidados, desde que sejam feitas as correções necessárias, a equação é dada por:

$$\text{Eq 4} \quad k = \frac{\phi^3}{CS_0^2(1-\phi)^2},$$

ϕ – Porosidade efetiva; C – Constante de Kozeny-Carman (para solos = 5); k – Permeabilidade absoluta; S_0 – Superfície específica.

A superfície específica por volume sólido está intimamente relacionada ao tamanho do grão: quanto mais fino o tamanho do grão, maior o valor de S_0 . A equação de Kozeny-Carman mostra a dependência da permeabilidade com a porosidade efetiva, especialmente em areias inconsolidadas. Ela é útil para explicar porque areias finas ou siltes com porosidade efetiva idêntica a areias grossas apresentam permeabilidades menores: com o decréscimo da granulometria, a superfície específica cresce e conseqüentemente, crescerá a resistência ao fluxo. Embora a equação de Kozeny-Carman

funcione bem para a descrição da permeabilidade em areias uniformemente gradadas e alguns siltes, consideráveis discrepâncias são encontradas em argilas. O fator principal do insucesso da equação em solos extremamente finos é que a trama destes materiais não contém tamanhos de poros uniformes. As partículas são agrupadas em agregados ou flocos que resultam em pequenos poros inter-agregados e grandes poros intra-agregados.

A Figura 1 explica porque há o aumento da porosidade da amostra quando se substitui um grão grande, de quartzo, por exemplo, cuja porosidade é nula, por igual volume composto por grãos muito finos, de argila, cuja porosidade é considerável.

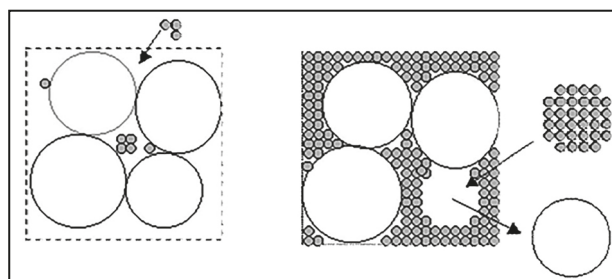


Figura 1 Arranjo esquemático do aumento de porosidade pela substituição de partículas maiores (representada pelos círculos em branco) por finas partículas de argila (representada pelos círculos em cinza), (Cupertino, 2005).

3 Procedimentos Experimentais

Para a obtenção dos valores de porosidade efetiva e permeabilidade absoluta, foram empregados métodos de medição desses parâmetros por variação de pressão em câmara confinante, utilizando o equipamento permo-porosímetro a gás modelo Ultra-Poro-Perm 500® da Core Laboratories Inc (Figura 2). Este equipamento é composto por uma câmara de confinamento para as amostras,

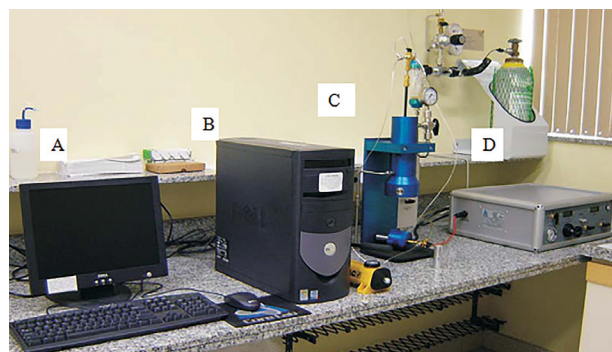


Figura 2 Fotografia do permo-porosímetro (UltraPoroPerm 500®): A. Tela de leitura de dados; B. Computador; C. Câmara de confinamento; D. Cilindro de gás.

um console de medição e controle, e um micro-computador acoplado que é dedicado à aquisição, processamento e armazenamento dos dados.

3.1 Medição da Porosidade Efetiva e Permeabilidade Absoluta

Os dados de porosidade calculados por medidas de laboratório são baseados na lei de Boyle-Mariotte, que relaciona a variação de volume e pressão de um gás ideal em temperatura constante. Foi utilizado um porosímetro (UltraPorPerm 500[®]) que possui uma câmara de gás de volume constante V_1 (câmara de volume de referência), onde o gás nitrogênio é injetado e armazenado a uma pressão P_1 . Esta câmara de gás está ligada à câmara de compressão da amostra de volume V . Quando a câmara de compressão da amostra contém um volume de amostra V_A , ela não pode conter mais do que $V - V_A$ de volume de gás. Então, no momento em que a válvula de ligação da câmara de gás com a câmara de compressão é aberta, e o gás nitrogênio é liberado isotermicamente para penetrar na amostra, ocorre uma variação de volume (ΔV) e uma nova pressão P_2 é medida.

$$\text{Eq 5} \quad P_1 V_1 = P_2 (V - V_A + \Delta V),$$

$\Delta V = V - V_A$, ou seja, ΔV é o volume de gás na amostra, ou em outras palavras, o volume de espaços porosos na amostra em cm^3 (Cupertino, 2005). A Figura 3A apresenta o arranjo esquemático de funcionamento do porosímetro.

O permeâmetro usa a equação de Darcy, para calcular a permeabilidade a partir da taxa de fluxo e das pressões medidas, utilizando a Eq 3. O permeâmetro a gás de nitrogênio funciona com uma taxa de fluxo constante regulada conforme o tipo de amostra a ser analisada, a fim de manter um fluxo laminar. Para se efetuar a medição de permeabilidade, é necessário que o operador forneça ao programa do UltraPor-Perm 500[®] o comprimento e o diâmetro da amostra.

O equipamento usa uma pressão de injeção de 0 a 1,7 atm (0 a 25 psi), sendo que pressões abaixo de 0,034 atm (0,5 psi) não são recomendadas devido a desfavorável razão sinal/ruído. As pressões de injeção e saída da amostra são medidas e a diferença

entre elas é calculada, fornecendo uma pressão diferencial que deve variar de no mínimo 0,0136 atm (0,2 psi) a no máximo 0,17 atm (2,5 psi). Os dois medidores de fluxo de massa têm limites de 0,5 cm^3 a 50 cm^3 por minuto para a unidade de taxa de fluxo baixo e, limites de 5 cm^3 a 500 cm^3 por minuto para a unidade de taxa de fluxo alta. Estas taxas de fluxo podem ser reguladas por uma válvula que permite aumentar ou diminuir o fluxo antes de chegar ao medidor.

Como os sedimentos inconsolidados possuem, em geral, elevados valores de permeabilidade, todas as amostras medidas neste trabalho necessitaram de fluxos da ordem de 300 cm^3 por min, aproximadamente, e pressões de injeção de 2,5 psi, para o estabelecimento de um fluxo darciano na amostra e uma pressão diferencial mensurável. Portanto, foi usado sempre o medidor de taxa de fluxo alta. A Figura 3B apresenta o arranjo esquemático de funcionamento do permeâmetro.

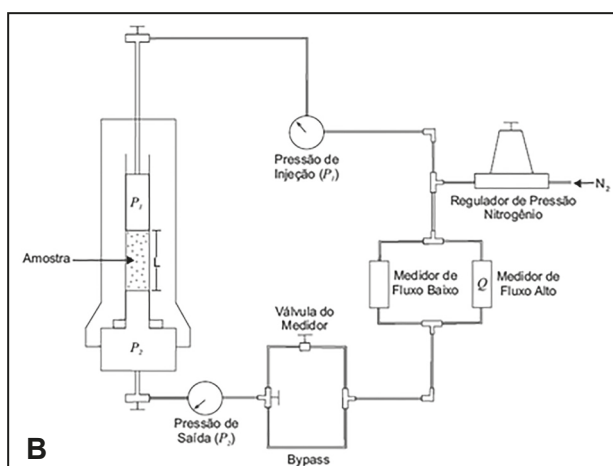
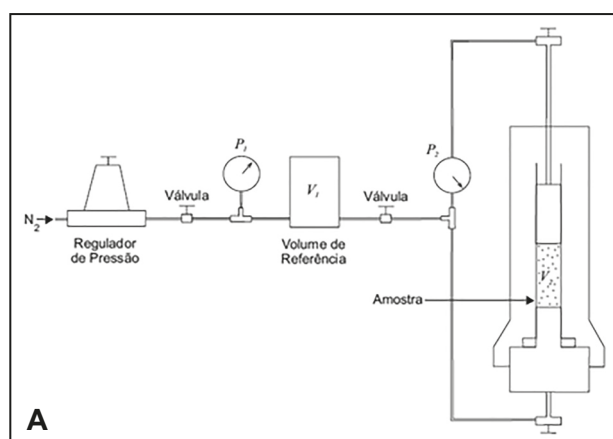


Figura 3 A. Esquema de funcionamento do porosímetro e B. Esquema de funcionamento do permeâmetro (Cupertino, 2005).

3.2 Medição da Massa Específica

A massa específica é a relação da massa de uma substância pelo seu volume numa dada temperatura. É sinônimo de massa volumar e, em inglês, é chamada de *density*. Neste trabalho a massa específica foi calculada a partir da massa da amostra seca medida em balança digital e do volume das cápsulas utilizadas para cada amostra, onde se mediu o comprimento e diâmetro das cápsulas com paquímetro digital. A unidade utilizada para a massa específica foi o grama por centímetro cúbico (g/cm^3). O valor de massa específica é referente ao valor da massa específica total (*bulk density* - ρ_b), ou seja, é o somatório da massa específica da matriz (*matrix density* - ρ_m) mais a massa específica do fluido nos poros (*fluid density* - ρ_f), ponderadas pela porosidade, conforme a Eq 6:

$$\text{Eq 6} \quad \rho_b = \rho_m(1 - \phi) + \rho_f$$

3.3 Superfície Específica

A superfície específica foi calculada com base nos resultados de porosidade e permeabilidade obtidos, utilizando a equação de Kozeny-Carman (Eq 4).

3.4 Preparação das Amostras

Foram usadas micro-esferas de vidro com 0,6 a 0,8 mm de diâmetro e caulinita com diâmetro de $< 0,0039$ mm passante na peneira de 200 mesh. Para os ensaios de porosidade e permeabilidade com análise do efeito da argilosidade foram preparadas 22 amostras sintéticas compostas por micro-esferas de vidro e caulinita, em diversas proporções, com mesmo volume. A primeira amostra foi elaborada com 100% de caulinita para 0% de micro-esfera de vidro, a segunda amostra foi elaborada com 95% de caulinita para 5% de micro-esfera de vidro, e a terceira amostra foi elaborada com 90% de caulinita para 10% de micro-esfera de vidro, e assim sucessivamente, diminuindo-se as proporções de caulinita e aumentando-se a de micro-esfera de vidro até chegar a 0% de caulinita para 100% de micro-esfera de vidro.

O porosímetro possui diâmetro interno de 2,54 cm (1") e 10,16 cm (4") de comprimento e como o

material era inconsolidado foi necessário encapsular as amostras a fim de se obter amostras cilíndricas com paredes laterais compostas por uma folha de alumínio e com faces, nas extremidades superior e inferior, formadas por telas de aço inoxidável com abertura de 200 mesh. As telas foram reforçadas externamente por telas aço inoxidável de abertura de 60 mesh. Após a preparação dos invólucros, estes foram preenchidos com os materiais (micro-esfera e caulinita), finalizando as amostras (Figura 4).

A densidade das amostras foi obtida simplesmente pela razão entre massa e volume. Para a medição dos volumes das amostras foi usado um paquímetro digital com precisão de centésimo de milímetro e para a medição da massa foi utilizada uma balança digital com precisão de décimo de grama.

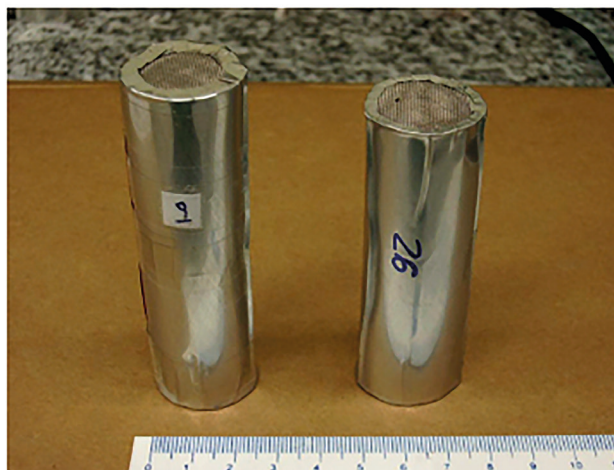


Figura 4 Amostras inconsolidadas encapsuladas (escala: cm)

4 Resultados e Discussões

As figuras abaixo apresentam os resultados obtidos nas 22 amostras (representado por pequenos pontos em azul) de padrão sintético de sedimentos siliciclásticos com teores crescentes de areia e decrescente de argilosidade. Nas figuras a linha em preto corresponde a curva de ajuste linear, quanto mais próximo os pontos da curva melhor o ajuste (R^2).

Na Figura 5 é mostrado claramente um comportamento parabólico dos valores de porosidade (ϕ) em função do aumento do teor de areia, ou seja, a porosidade é alta tanto para amostras com muita argila como para amostras com pouca quantidade

de argila, e a porosidade é baixa para amostras medianamente argilosas. O aumento de porosidade, do lado esquerdo está associado a alta porosidade da própria argila e do lado direito ao aumento do grau de seleção do material. Na parte central da Figura 5, em torno de 35% a 70 % é observada uma diminuição da porosidade pelo aumento da fração de material arenoso, existindo uma quantidade insuficiente de caulinita (argila) para preencher completamente os espaços vazios entre as micro-esferas de vidro. Essa diminuição de porosidade se deve a diminuição do grau de seleção da amostra. Vale lembrar que nesse caso trata-se de um padrão sintético com grãos de excelente seleção.

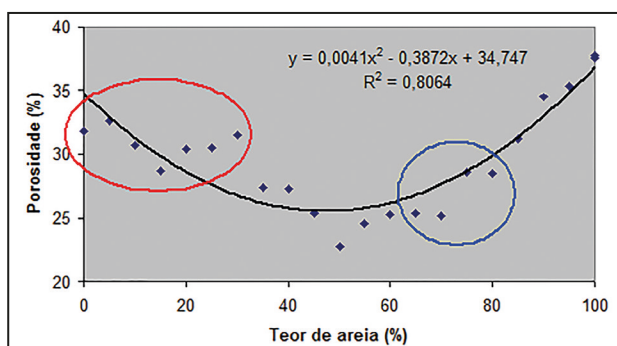


Figura 5 Relação do teor de areia com a porosidade (ϕ)

Na Figura 6 nota-se um decaimento exponencial dos valores da permeabilidade (k) com o aumento da quantidade de caulinita. Amostras com maiores quantidades de argila, superiores a 40% apresentam praticamente os mesmos valores de permeabilidade, indicando que nesse intervalo os valores de permeabilidade não sofrem variações significativas. Por outro lado, com a diminuição da quantidade de argila abaixo de 40% são apresentados altos valores de permeabilidade, os quais se tornam fortemente dependentes da menor proporção de argila. As amostras com argilosidade inferiores a 20% (80% de teor de areia) não puderam ter suas permeabilidades medidas no permoporosímetro a gás. Nestas amostras o fluxo de gás se torna mais intenso, impedindo assim o registro da permeabilidade pelo equipamento. Devido ao aumento de velocidade de propagação do gás de nitrogênio na amostra (fluxo não linear) se perde a condição de fluxo uniforme, condição necessária para o uso da equação de Darcy e conseqüente estimativa dos valores de permeabilidade.

Na Figura 7 observa-se que há um crescimento aproximadamente linear dos valores da

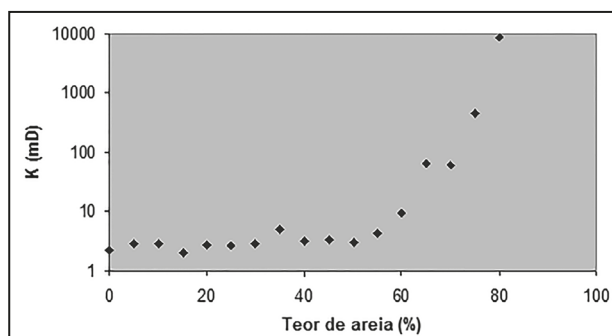


Figura 6 Relação do teor de areia com a permeabilidade (k).

superfície específica com o aumento da argilosidade das amostras. Não foram expressos os valores correspondentes da superfície específica acima de 80% do teor de areia, pois estes dependem dos valores de permeabilidade. Os pontos de menores valores da figura de superfície específica representam as amostras mais arenosas nas quais se conseguiu medir a permeabilidade. Já as amostras mais argilosas (no início da figura) apresentam elevados valores de superfície específica. Esse comportamento está de acordo com o esperado, pois há uma relação inversamente proporcional entre superfície específica e tamanho de grão.

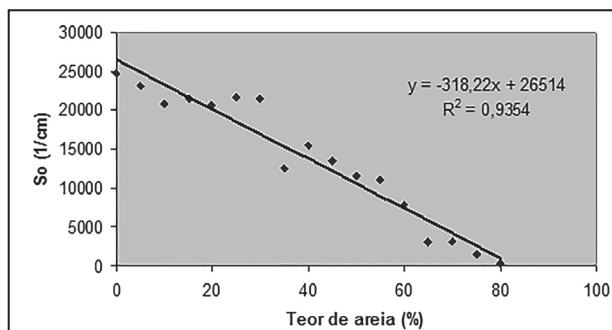


Figura 7 Relação do teor de areia com a superfície específica (S_o).

Na Figura 8 observa-se que não há uma relação evidente dos valores da densidade com os da porosidade.

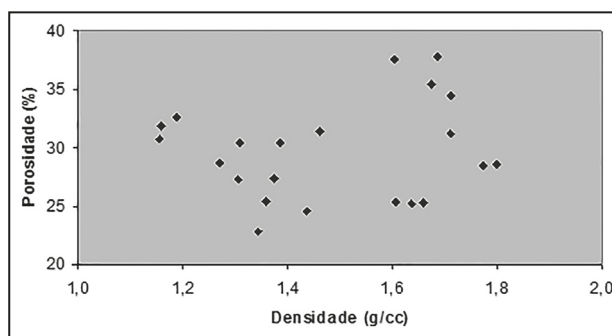


Figura 8 Relação da densidade com a porosidade.

Na Figura 9 a densidade diminui linearmente com o aumento da quantidade de caulinita (argila), as amostras com maior teor de argila (microporo) apresentam menor densidade do que as amostras com maior teor de areia (macroporo).

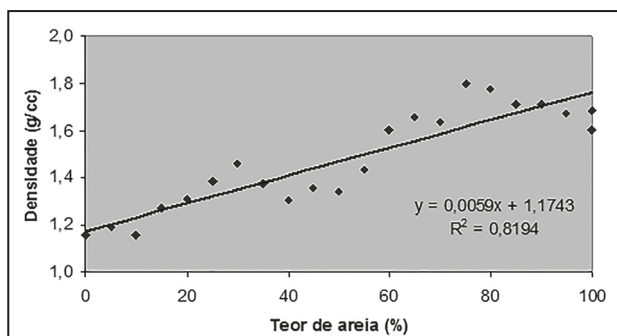


Figura 9 Relação de densidade e o teor de areia.

Na Figura 10 é observado que há uma diminuição exponencial dos valores de permeabilidade em função da diminuição dos valores da densidade, uma vez que amostras de menor densidade correspondem àquelas mais argilosas.

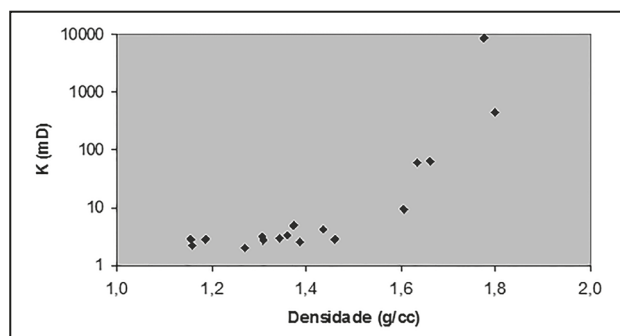


Figura 10 Relação entre a permeabilidade absoluta e a densidade

Na Figura 11 os valores da superfície específica diminuem linearmente com aumento dos valores de densidade, pois a caulinita apresenta menor fração granulométrica que a micro-esfera de vidro. Como esperado, verifica-se que a superfície específica é maior para as amostras com maiores quantidades de caulinita e, conseqüentemente com valores menores de densidade.

5 Conclusões

O permo-porosímetro a gás pode ser utilizado com sucesso na medição das propriedades físicas de solos arenosos e argilosos. Foi possível observar

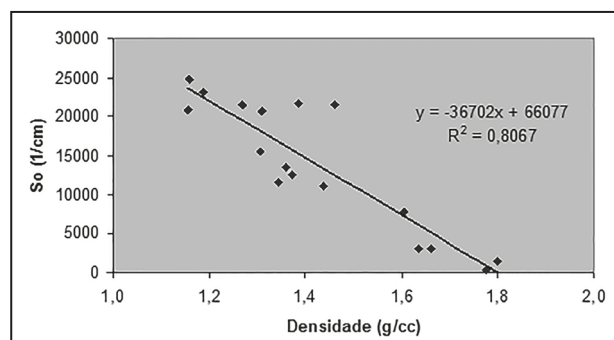


Figura 11 Relação entre superfície específica e a densidade

através de experimentos que a porosidade é elevada tanto nas amostras sintéticas com grande com pouca quantidade de argila.

A equação de Kozeny-Carman se mostrou adequada para estimar os valores de superfície específica das 22 amostras sintéticas.

A permeabilidade decresce exponencialmente com o aumento da argilosidade, enquanto que a superfície específica aumenta linearmente com a argilosidade.

A densidade diminui linearmente com argilosidade, enquanto que a permeabilidade decresce exponencialmente com a diminuição da densidade.

A superfície específica diminui linearmente com o aumento da densidade, embora o erro experimental (R^2) seja maior na medida de densidade do que nas medidas de porosidade e permeabilidade.

Os resultados obtidos em laboratório indicam uma forte relação entre os parâmetros do meio poroso com os teores de argilominerais.

A comparação dos teores de areia e argila com a permeabilidade mostrou que valores mais elevados de superfície específica coincidem com granulometrias mais finas, ou menos permeáveis, como esperado. Não foram observadas relações lineares entre a porosidade e a densidade.

Através desse estudo foram verificadas as relações das propriedades físicas em amostras sintéticas de solos, com variações percentuais de argila, uma vez que a terra é composta de diferentes tipos de solos com diferentes variações granulométricas.

6 Referências

- Castagna, J.P.; Batzle, M.L. & Eastwood, R.L. 1985. Relationships between compressional-wave and shear wave velocities in clastic silicate rocks. *Geophysics*,

- 50: 571-581.
- Cupertino, D.F. 2005. *Caracterização de propriedades do meio poroso em solo arenoso através de Pemo-Porosímetro a gás*. Monografia submetida ao curso de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 61 p.
- Han, D-H., Nur, A. & Morgan, D. 1986. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophysics*, 51: 2093-2107.
- Mitchell, J.K. 1976. *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons Inc, New York, 422 p.
- Pettijohn F.J.; Potter P.E. & Siever R. 1987. *Sand and Sandstone*. Springer-Verlag Inc, New York, 533 p.
- Tosaya, C. & Nur, A. 1982. Effects of diagenesis and clays on compressional velocities in rocks. *Geophysical Research Letters*, 9: 5-8.
- Scheidegger. A.E. 1974. *The physics of flow porous media*. University of Toronto Press. 3rd edition. 353 p.
- Zahaf, K. & Tiab, D. 2002. Vertical permeability from in situ horizontal measurements in shaly-sand reservoirs. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 41(8): 43-50.
- Wyllie, M.R.J. & Gregory, A.R. 1955. Fluid flow through unconsolidated porous aggregates: effects of porosity and particle shape on Kozeny-Carman constants. *Industry and Engineering Chemistry*, 47(7): 1379-1388.