



CARACTERIZAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA E DIRECIONAL EM XISTO POR MEIO DE ENSAIOS EM LABORATÓRIO

DIRECTIONAL SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY CHARACTERIZATION IN SCHIST USING LABORATORY TESTS

Elias Isler¹ ; Miguel Angel Alfaro Soto² ; Chang Hung Kiang³

Artigo recebido em: 04/02/2015 e aceito para publicação em: 15/03/2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v30i1.28235>

Resumo: Neste estudo verificou-se a condutividade hidráulica saturada e direcional em micaxisto alterado do Complexo Embu na região de Mauá/SP. Para tanto foram realizados ensaios em laboratório em amostras indeformadas utilizando-se permeâmetros de carga constante, com aplicação de pressão para sucessivos incrementos de gradiente hidráulico, além de análises de granulometria, determinação do grau de saturação, e teste de adsorção do azul de Metileno, para caracterização da rocha investigada. A rocha estudada é composta por cristais de tamanho que variam entre silte, argila e areia, com predomínio das frações silte e areia fina, com ausência de argilas expansivas. Os resultados da condutividade hidráulica, na ordem de 10^{-09} m/s, indicaram uma condição aparentemente isotrópica em uma rocha fortemente anisotrópica, pelo menos em gradientes hidráulicos mais altos. Entretanto, para gradientes hidráulicos mais baixos, verifica-se uma aparente anisotropia, visto que as respostas das amostras em diferentes direções dependeram diretamente do gradiente hidráulico aplicado. Os dados experimentais demonstram que as amostras com maior grau de saturação exigiram os menores gradientes hidráulicos para que o fluxo de água ocorresse através das amostras, e coincidem com o paralelismo existente entre o sentido do fluxo e a direção dos planos da foliação. Por outro lado, amostras com menor grau de saturação exigiram os maiores gradientes hidráulicos para ocorrência de fluxo contínuo, e coincidem com os maiores ângulos entre o sentido do fluxo e a direção dos planos da foliação.

Palavras-chave: Anisotropia. Permeâmetro de Carga Constante. Condutividade Hidráulica Direcional.

Abstract: In this study, the directional saturated hydraulic conductivity in weathered mica-schists from Embu Complex (Mauá/SP) was verified. Laboratory tests were performed in undisturbed rock samples using constant head permeameter under pressure to promote successive increments of hydraulic gradient, and analyses of grain size distribution, saturation degree and test of adsorption of Methylene Blue were carried out to characterize the investigated rock. Grain size distribution showed that the studied rock is composed by silt, clay and sand, with predominance of silt and sand fractions and absence of expansive clays. The results of hydraulic conductivity, 10^{-09} m/s, showed an apparent isotropic condition in a strongly anisotropic rock, at least in higher hydraulic gradients. However, in lower hydraulic gradients, an apparent anisotropic condition is observed, considering that the responses for the rock samples in different directions are directly dependent to the hydraulic gradient applied. The experimental data herein demonstrate that rock samples with a higher saturation degree require lower hydraulic gradients to promote water flow through rock samples, and coincide with the parallelism observed between the flow direction and the foliation planes. On the other hand, rock samples with a lower saturation degree require higher hydraulic gradients to promote water flow through rock samples, and coincide with the larger angles observed between the flow direction and the foliation planes.

Keywords: Anisotropy. Constant-Head Permeameter. Directional Hydraulic Conductivity.

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais tem sido observada grande preocupação dos órgãos públicos e

privados e da população quanto à quantidade disponível e qualidade da água para o abastecimento industrial e urbano.

Importante parcela de contribuição para

¹⁻³ UNESP/LEBAC - Laboratório de Estudo de Bacias. (eisler@rc.unesp.br ; alfaro@rc.unesp.br ; chang@rc.unesp.br)

o fornecimento de água subterrânea provém de aquíferos em áreas cristalinas, terrenos ígneos e metamórficos com baixo a alto grau de metamorfismo. Rochas de baixo grau metamórfico constituem-se em aquíferos de uma parcela significativa do volume de água subterrânea disponível para grandes áreas urbanas industrializadas no sudeste brasileiro.

As rochas que compõem os terrenos metamórficos comumente apresentam forte anisotropia estrutural em decorrência dos eventos e processos deformacionais impostos pelo tectonismo. Os principais fatores condicionantes dessa anisotropia estrutural são: diferentes fases de foliação, superimpostas ou não (S_0 , S_n , S_{n+1} , etc.), dobras, estruturas rúpteis (falhamento, fraturamento, etc.), basculamentos de blocos, entre outros.

Esses aquíferos anisotrópicos, ou muitas vezes aquíferos anisotrópicos, levam à intuição de que os processos atuantes no fluxo da água subterrânea também são anisotrópicos em todos os sentidos. Contudo, estudos têm demonstrado que nem sempre esse entendimento é verdadeiro. Schoeneberger e Amoozegar (1990) verificaram que não existe uma direção preferencial da condutividade hidráulica dentre cinco direções ensaiadas para avaliação da influência dos planos de foliação no perfil de alteração raso de uma rocha gnáissica a xistosa, concluindo que os planos da foliação não tiveram influência consistente na condutividade hidráulica direcional para a área de estudo.

Assim, foi escolhida uma área de estudo com ocorrência de xisto portador de anisotropia estrutural com espesso manto de alteração do Complexo Embu para avaliação da condutividade hidráulica em três direções segundo os eixos cartesianos XYZ, empregando testes em laboratório com permeâmetros de carga constante em amostras indeformadas.

Os objetivos principais deste trabalho é a avaliação da condutividade hidráulica saturada em três direções ortogonais segundo os eixos cartesianos XYZ, por meio da aplicação dos métodos com permeâmetros de carga constante e a verificação da relação da condutividade hidráulica com a anisotropia estrutural observada em xisto alterado, buscando identificar se a anisotropia estrutural gera anisotropia hidráulica.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no município de Mauá, estado de São Paulo, no polo petroquímico de Capuava, ocupando uma área de 564.905 m² (56,49 ha). O acesso para a área de estudo se dá pela Avenida Ayrton Senna, s/nº, a qual pode ser acessada pela Rodovia Jacu Pêssego (Figura 1). É constituído de afloramento de xisto alterado do Complexo Embu (Neoproterozoico), portador de forte anisotropia estrutural (intensa foliação).



Figura 1 - Localização da área de estudo
Figure 1 - Location of the site studied

2.1 Aspectos Fisiográficos

O clima da região estudada é do tipo Tropical de Altitude, segundo a classificação de Köppen-Geiger C_{Wa}, com média anual em torno de 25°C, invernos secos e frios (média de temperaturas 12°C a 14°C), e verões úmidos e quentes (média de temperaturas superior a 27°C). A precipitação média anual entre 2006 e 2013 foi de 1317 mm para a região de Mauá/SP. As maiores médias de índice pluviométrico ocorrem entre os meses de novembro e março (final da primavera até início do outono), com médias entre 100 mm e 330 mm, enquanto os meses de abril a outubro (outono a primavera) possuem as menores médias de precipitação (período de estiagem), abaixo de 100 mm (SÃO PAULO, 2014).

As unidades de relevo que predominam na região são colinas pequenas com espigões locais e morros com serras restritas (PONÇANO et al., 1981).

Para Oliveira (1999) e Nakazawa et al. (1994), os solos predominantes são os

Argissolos Vermelho-Amarelo distróficos, com textura argilosa, associados a Cambissolos Háplicos distróficos, com textura argilosa, ambos associados ao relevo supra-citado.

2.2 Geologia, Tectônica e Hidrogeologia Regional

A área de estudo está inserida no contexto geológico regional do Complexo Embu (Neoproterozoico), limitado a norte pelo Sistema de Falhas de Taxaquara e Jaguari, e a sul pela Falha de Cubatão, e inserido no contexto geotectônico do Cinturão de Dobramentos Ribeira (HASUI et al, 1975), uma faixa móvel com direção predominantemente ENE-WSW. Este embasamento é constituído por gnaisses, migmatitos e rochas metamórficas de baixo a médio grau, além de corpos graníticos intrudidos tectonicamente nos terrenos metamórficos (Figura 2).

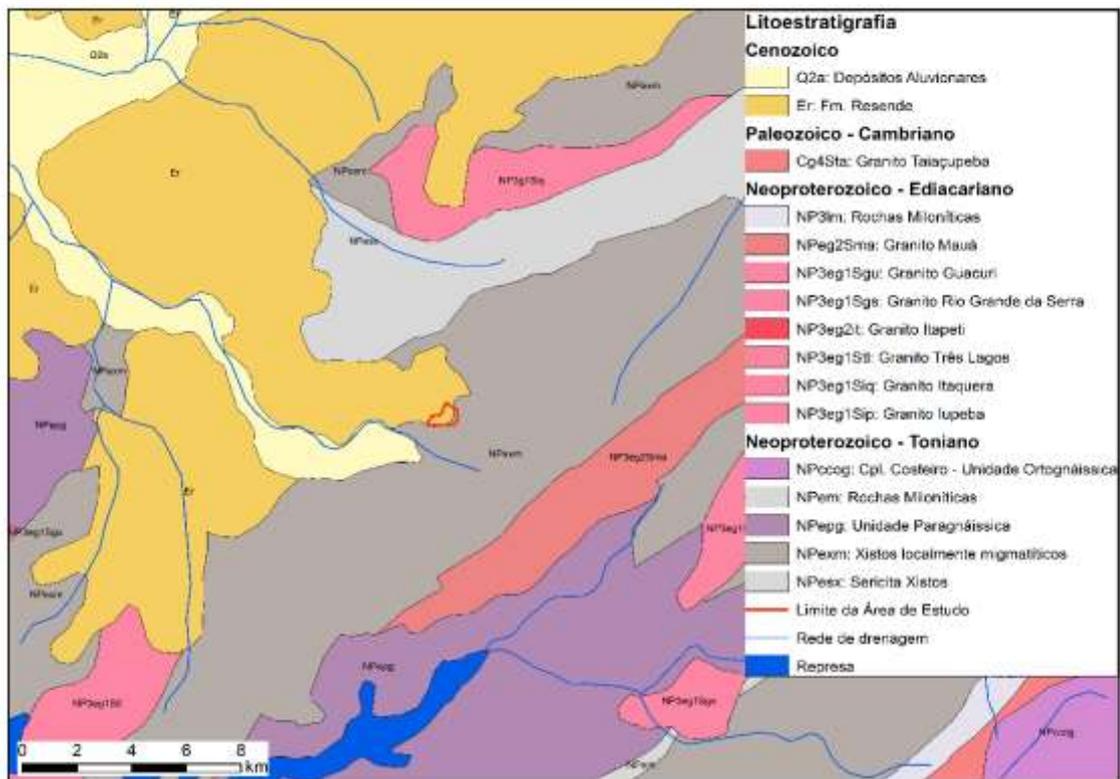


Figura 2 - Mapa Geológico Regional simplificado de Perrota et al. (2005)

Figure 2 - Regional Geological Map simplified from Perrota et al. (2005)

De acordo com Perrota et al. (2005), os xistos incluem moscovita-xistos, moscovita-biotita xistos, quartzo-moscovita xistos, quartzo-biotita-moscovita xistos e sillimanita-quartzo xistos. Esses xistos são finos, localmente microporfioblásticos com granada, sillimanita e estauroлита, com intercalações subordinadas de metarenitos finos, quartzitos, filitos e anfibolitos.

Recobrimo o embasamento cristalino tem-se a Bacia de São Paulo, representada na área pela Formação Resende, de idade eocênica-oligocênica (LIMA e AMADOR, 1985; LIMA et al., 1994; YAMAMOTO, 1995), integrante do Grupo Taubaté (RICCOMINI, 1989). A Formação São Paulo, na área de estudo, corresponde a depósitos de sistema fluvial meandrante, constituído por areias grossas a médias, com gradação para areias finas, silte e argila (SUGUIO et al., 1971).

De acordo com o Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2005), ocorrem dois tipos de aquífero na área de estudo, o sedimentar e o fissural.

O aquífero sedimentar é representado por sedimentos da Formação São Paulo (arenito a argilito intercalados) e coberturas coluvionares. Apresenta caráter descontínuo e com extensão regional limitada, tipo multicamada, semiconfinado a confinado e com transmissividade variável, de baixa a elevada. Ainda de acordo com São Paulo (2005), as vazões explotáveis não ultrapassam 20 m³/h para a região. O mesmo é alimentado por transferência de fluxo subterrâneo das águas infiltradas no manto de alteração e também alimentado pela infiltração direta natural das águas pluviais em toda a sua extensão não impermeabilizada pela ocupação urbana, tem também alimentação por recarga induzida, oriunda das fugas da rede pública de abastecimento de água e de coleta de esgoto.

O aquífero fissural compreende o substrato basal de rochas pré-cambrianas que compõem o embasamento da Bacia Sedimentar de São Paulo, sendo verificados contatos laterais entre os sedimentos da Bacia de São Paulo e as rochas do embasamento que facilitam a migração do fluxo subterrâneo de água entre estas unidades litológicas; ocorre

na região norte do município e apresenta baixas vazões. É um aquífero descontínuo, de extensão regional, com porosidade e permeabilidade associadas às fraturas. De acordo com São Paulo (2005), as vazões explotáveis variam entre 3 m³/h e 23 m³/h para a região.

2.3 Geologia e Hidrogeologia Local

A área de estudo consiste em um morro de topo arredondado, com solo exposto, rodeado por vegetação de pequeno porte, e poucos afloramentos de rocha. A rocha predominante é um xisto micáceo (micaxisto) muito alterado, fortemente foliado, com acamamento bem preservado e bastante fraturado; apresenta termos mais ou menos ricos em caulinita e quartzo; as fraturas são preenchidas por óxidos de ferro, de manganês e quartzo. Além desses minerais e óxidos citados, não se observam claramente outros minerais a olho nu. É marcante a presença de macroporosidade na rocha alterada, constituída principalmente por canais de raízes preenchidas tardiamente por sedimentos arenosos a argilosos.

A foliação principal e mais marcante, S_n, corresponde ao acamamento deposicional. Devido ao grau de alteração da rocha, não foi possível observar outras estruturas além da foliação S_n.

A atitude média da foliação medida no afloramento é N49E/60NW (319/60 pela notação Clar). Essa foliação de direção NE-SW é concordante com a estruturação regional cisalhante do Cinturão Ribeira, ou seja, essa atitude da foliação é notadamente marcante e repete-se por diversas áreas dos terrenos metamórficos dessa faixa móvel.

Na área de estudo também ocorre solo eluvionar (pouco transportado) ou solo residual, originado pela pedogênese do micaxisto.

Em poços rasos instalados no horizonte freático, o nível da água subterrânea varia entre 24,38 m (topo do morro – horizonte correspondente ao solo residual e micaxisto alterado) e 0,38 m (próximo ao córrego do Oratório – horizonte correspondente ao solo eluvionar e micaxisto alterado). Considerando a topografia, as cargas hidráulicas variam entre 836,98 m e 811,17 m. O padrão de fluxo da água subterrânea é radial, coincidindo com a topografia da área. Na área de estudo, o horizonte saturado deve ser considerado como um aquítarde, haja vista os valores de condutividade hidráulica obtidos em testes de *slug* realizados em trabalhos prévios entre 10⁻⁷ m/s e 10⁻⁸ m/s.

3 METODOLOGIA

A partir de seis amostras indeformadas (blocos indeformados) coletadas em um afloramento em forma de talude por meio de picareta e ponteira de aço, foram confeccionados corpos de prova para testes em permeômetros de carga constante. Devido às particularidades dos blocos indeformados, principalmente zonas de fraquezas, nem todos foram utilizados para retirada de corpos de provas, tornando-os inaptos para esse fim. Alíquotas de algumas dessas amostras indeformadas foram utilizadas para descrição litológica micro e macroscópica, caracterização das estruturas, bem como para ensaios complementares de caracterização da rocha. Considerando a atitude média da foliação medida em campo com rumo do mergulho de 319° e ângulo de mergulho de 60° e ajustando-a ao plano cartesiano XYZ, adotou-se orientar o mergulho do plano da foliação ao longo do eixo X, formando um ângulo de 0° entre este plano e o sentido de fluxo de água pelo permeômetro. Os eixos Y e Z formam respectivamente ângulos de 60° e 30° entre os planos de foliação e o sentido de fluxo (Figura 3).

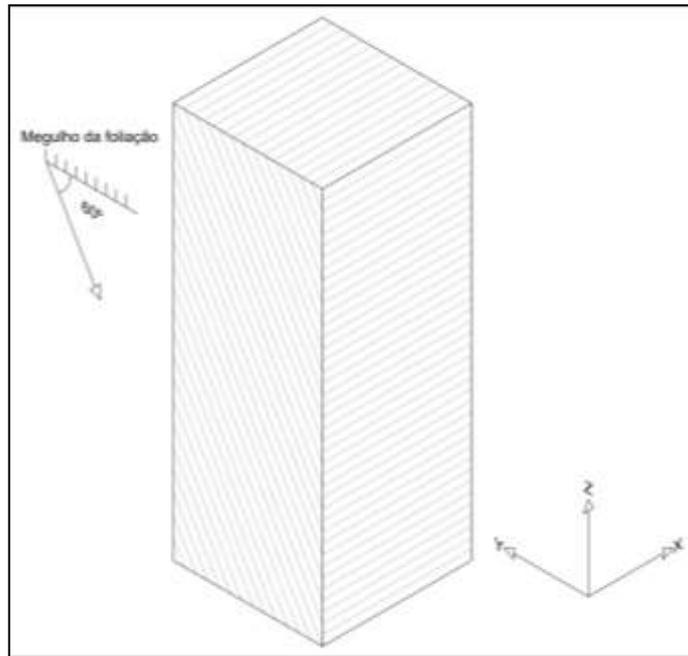


Figura 3 - Prisma esquemático das direções cartesianas adotadas em relação à atitude do plano da foliação. O ângulo de 60° é igual ao mergulho da foliação medido em campo

Figure 3 - Schematic prism of Cartesian directions assumed related to foliation plane. The angle of 60° is the same of foliation dip measured in the site

Ensaio complementares foram realizados para caracterização do micaxisto alterado: análise granulométrica completa por peneiramento e sedimentação após desagregação de alíquota de rocha, adsorção de Azul de Metileno e determinação do grau de saturação.

A determinação da condutividade hidráulica nas amostras foi realizada por meio de ensaios em permeâmetro de carga constante. Embora o permeâmetro de carga variável seja mais adequado para sedimentos coesos ou muito consolidados, com condutividades mais baixas, este não apresentou resposta em testes preliminares.

Desta forma, optou-se pela utilização de permeâmetro de carga constante com aplicação de pressão, de acordo com sistema proposto e modificado por Leite et al. (1998), Leite (2000), Basso (2003), Pereira (2006) e Basso (2010), diminuindo o tempo de ensaio e permitindo variar o gradiente hidráulico, uma vez que o micaxisto alterado apresenta baixa condutividade. Tal modificação consistiu basicamente na injeção de ar

comprimido em balões infláveis dispostos no interior de reservatórios, servindo de interface ar-água, impulsionando a água contida nos mesmos para dentro das câmaras dos permeâmetros (Figura 4).

Ao final da montagem do permeâmetro, o conjunto foi colocado para saturação em duas etapas. A primeira etapa consistiu na saturação por capilaridade, e a segunda etapa consistiu na saturação sob baixas pressões. Este procedimento potencializa a expulsão do ar contido dentro do permeâmetro. Para a saturação sob baixas pressões: para a direção X aplicou-se uma pressão de 10 kPa, justamente a primeira pressão de ensaio, até a água começar a fluir pelo permeâmetro, com duração média de três dias. Para a direção Z foi necessária a aplicação de não menos que 70 kPa, também com duração média de três dias, até que a água começasse a fluir pelo permeâmetro. Para a direção Y, para o mesmo tempo médio, foi necessária a aplicação de 110 kPa para a água passar continuamente pela amostra.



Figura 4 - Sistema do permeâmetro de carga constante. (a) painel de controle do ar comprimido; (b) sistema de distribuição de ar; (c) pares de reservatório com balão interno; (d) permeâmetro; (e) proveta graduada para coleta de água percolada; (f) termômetro.

Figure 4 - Constant-head permeameter system: (a) control panel of compressed air; (b) air distribution system; (c) pairs of reservoir with inner bladder; (d) permeameter; (e) graduated cylinder for collection of percolated water; (f) thermometer.

A partir do momento em que a água começa a sair do permeâmetro é iniciado o ensaio. O mesmo tipo de água utilizada para a saturação é utilizada para o ensaio. Em função da permeabilidade de cada amostra, segundo sua orientação, as pressões de início de teste foram diferentes, como anteriormente explicitadas.

Cada teste foi realizado em estágios sucessivos, e para cada estágio foi calculado um gradiente hidráulico, tendo a carga hidráulica total como a transformação da pressão aplicada de kPa para m (de coluna de água) somada à diferença de altura entre o centro do reservatório de água e o centro da amostra, dividida pela altura do corpo de prova:

$$i = \frac{P + H}{h} \quad (1)$$

Onde:

i = gradiente hidráulico (L/L = adimensional);

P = pressão aplicada no permeâmetro convertida em m (de coluna de água) (L);

H = altura entre o centro do reservatório e o centro da amostra (L);

h = altura do corpo de prova (L).

Em cada estágio foram realizadas três leituras da vazão de água percolada pela amostra. Tendo-se a vazão medida Q , o gradiente hidráulico i e a área da seção transversal da amostra A , é possível calcular a condutividade hidráulica pela Lei de Darcy. A condutividade hidráulica para cada gradiente hidráulico é a média harmônica das condutividades calculadas em cada uma das três leituras. Considerando as condições de temperatura variável ao longo de um dia, mesmo em sala climatizada, é necessário expressar a condutividade hidráulica à temperatura de 20°C, utilizando uma relação

entre a viscosidade da água na temperatura do ensaio e a viscosidade da água a 20°C, conforme norma ABNT NBR 13292/1995.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios complementares permitiram caracterizar a rocha estudada. Os ensaios de granulometria realizados em três alíquotas do micaxisto alterado classificaram o mesmo como silte

areno-argiloso a silte com areia fina (Tabela 1 e Figura 5). O resultado do ensaio com Azul de Metileno (Método da Mancha) realizado em uma alíquota indicou presença predominante de argilominerais do grupo da caulinita. Os argilominerais deste grupo presentes no micaxisto estudado não conferem expansibilidade à rocha. Assim, não é esperado fechamento de poros na matriz, o que restringiria a condutividade hidráulica segundo alguma das direções avaliadas.

Tabela 1 - Resultados dos percentuais das diferentes frações granulométricas em três amostras analisadas (valores em porcentagem - %)

Table 1 - Results of the percentages of different size fractions in three samples analyzed (values in percentage - %)

Amostra	Fração Areia			Silte	Argila	Classificação
	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina			
Amostra 01	1,7	3,3	21,5	58,5	15,0	<i>Silte areno-argiloso</i>
Amostra 01A	2,2	7,8	22,0	53,0	15,0	<i>Silte areno-argiloso</i>
Amostra 01B	3,6	8,4	25,0	55,0	8,0	<i>Silte com areia fina</i>

Os ensaios para determinação do grau de saturação de cinco amostras, sendo três submetidas aos ensaios de condutividade hidráulica e duas amostras de controle, revelaram que nenhuma amostra alcançou saturação completa (Tabela 2). Os resultados indicam que as duas amostras de controle saturadas somente por capilaridade sob pressão atmosférica apresentam menores graus de saturação quando comparadas com as três amostras ensaiadas e saturadas inicialmente por capilaridade seguida de aplicação de pressões mais elevadas dentro dos permeâmetros.

As amostras de controle M3-A4-X e M3-A2-Y atingiram saturação máxima de 89,66% e 79,61% respectivamente, indicando conteúdo de ar aprisionado nos corpos de prova de 10,34% e 20,39%. Como se pode observar, a amostra na direção Y, maior ângulo formado entre o plano da foliação e o

sentido de fluxo (60°), apresentou menor grau de saturação que a amostra na direção X (plano da foliação paralelo ao sentido de fluxo). As amostras M3-A3-X, M3-A1-Y e M3-A1-Z apresentaram, respectivamente, saturação de 94,43%, 91,30% e 92,54% ao final dos ensaios. É possível observar que uma pressão de água induzida nas amostras, bem como o tempo decorrido de cada ensaio, aumentou o grau de saturação de tais amostras.

Outro ponto importante, é possível verificar que as duas amostras na direção X apresentaram os maiores graus de saturação, enquanto que as duas amostras na direção Y apresentaram os menores valores. Por esta constatação, é possível inferir a existência de uma relação entre o ângulo formado entre plano da foliação e sentido de fluxo com o grau de saturação.

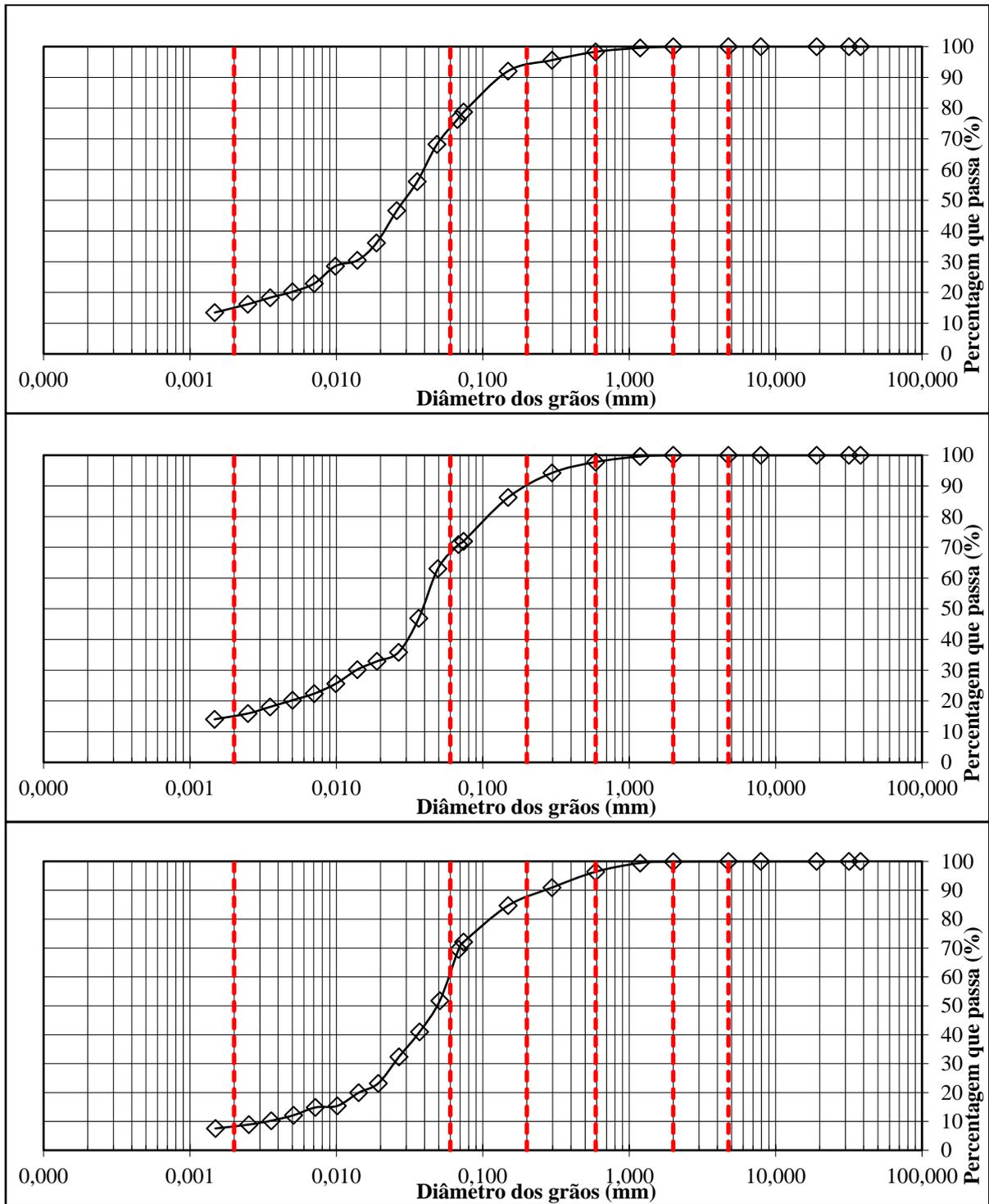


Figura 5 - Resultados dos ensaios de granulometria. De cima para baixo: Amostra 01, Amostra 01A e Amostra 01B

Figure 5 - Results of grain size distribution analyses. From top to bottom: Sample 01, Sample 01A and Sample 01B

Tabela 2 - Índices físicos das amostras ensaiadas e de controle
Table 2 - Physical indices of the test samples and control sample

Amostra	Teor de umidade gravimétrica w (%)	Massa específica dos sólidos ρ_s (g/cm ³)	Massa específica do solo seco ρ_d (g/cm ³)	Porosidade total n (%)	Grau de Saturação Sr (%)
M3-A3-X	18,99	2,946	1,85	37,2	94,43
M3-A1-Y	18,36	2,946	1,85	37,2	91,30
M3-A1-Z	18,61	2,946	1,85	37,2	92,54
M3-A4-X*	18,03	2,946	1,85	37,2	89,66
M3-A2-Y*	16,01	2,946	1,85	37,2	79,61

* amostras de controle

4.1 Condutividade Hidráulica Direcional

Os resultados de condutividade hidráulica em diferentes gradientes para

quatro amostras ensaiadas, duas na direção X, uma na direção Y e uma na direção Z estão expressos na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de Condutividade Hidráulica K corrigido para temperatura de 20°C, e coeficientes de determinação R^2 para as quatro amostras analisadas
Table 3 - Values of Hydraulic Conductivity K corrected to 20°C, and determination coefficient R^2 for four samples analyzed

Direção	Amostra	K_{20} (m/s)	R^2
X	M3-A1-X (teste 1)	4×10^{-09}	0,141
X	M3-A1-X (teste 2)	6×10^{-09}	0,990
X	M3-A3-X	3×10^{-09}	0,951
Y	M3-A1-Y	$3,3 \times 10^{-09}$	nc
Z	M3-A1-Z	3×10^{-09}	0,788

nc: não calculado, leitura somente em um gradiente hidráulico.

Para a amostra M3-A1-X (Figuras 6 e 7) foi aplicada pressão na faixa entre 10 kPa e 120 kPa, gerando um gradiente hidráulico entre 22,56 e 169,76 (abscissa). Para a amostra M3-A3-X (Figura 8) foi aplicada pressão na faixa entre 10 kPa e 110 kPa, gerando um gradiente hidráulico entre 22,25 e 148,33 (abscissa). Para a amostra M3-A1-Z (Figura 9) foi aplicada pressão na faixa entre 70 kPa e 120 kPa, gerando um gradiente hidráulico entre 98,10 e 162,90 (abscissa).

A condutividade hidráulica foi obtida a partir dos ângulos das retas de tendência linear (coeficientes angulares) ajustadas aos dados

de descarga específica versus gradiente hidráulico, exceção feita para a amostra M3-A1-Y, cuja medição em apenas um gradiente hidráulico, devido às características da amostra nessa direção, impossibilitou a construção do gráfico.

De forma geral, os valores de condutividade hidráulica aqui obtidos para as três direções não apresentaram diferenças significativas nos cinco testes aplicados. Isso demonstra que mesmo sendo o micaxisto uma rocha anisotrópica em termos estruturais, nas condições experimentais adotadas neste estudo, a condutividade hidráulica nesse meio

poroso, pelo menos em escala da matriz, tende a se comportar como uma propriedade aparentemente isotrópica para gradientes hidráulicos mais altos, o que vem corroborar os resultados obtidos por Schoeneberger e Amoozegar (1990). Entretanto, observando os gráficos apresentados nas Figuras 6 a 9 e o

comportamento da amostra M3-A1-Y, identifica-se que, em gradientes mais baixos, há uma aparente anisotropia, visto que abaixo do gradiente de 98 a amostra M3-A1-Z não apresentou resposta, o mesmo para a amostra M3-A1-Y abaixo do gradiente de 174 (Figura 10).

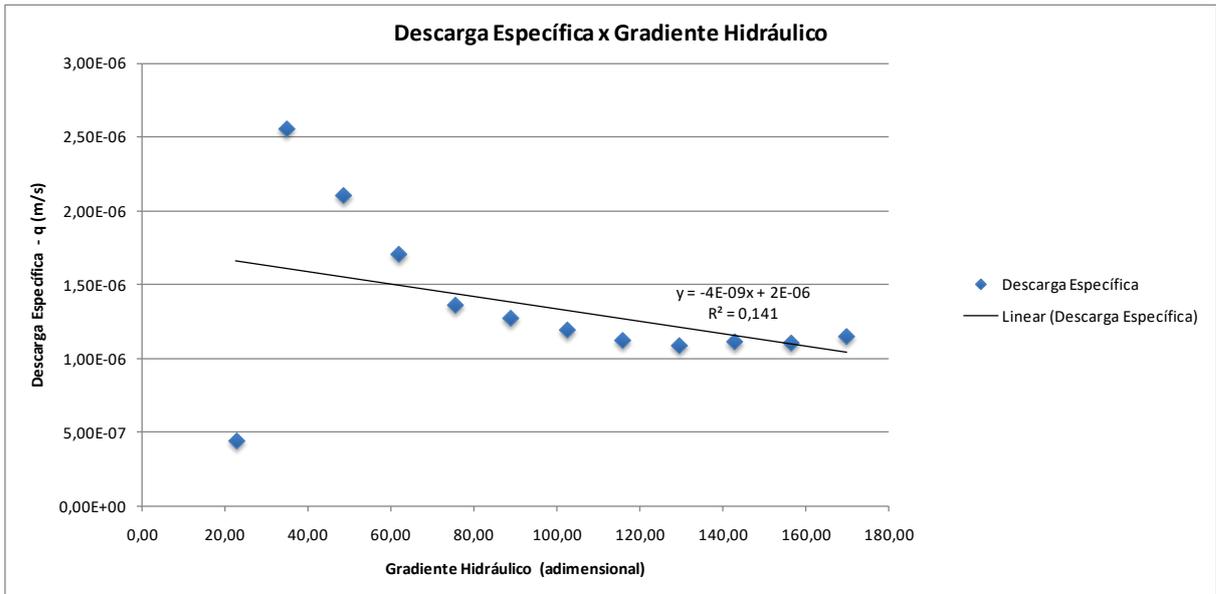


Figura 6 - Gráfico de Descarga Específica q versus Gradiente Hidráulico i para a amostra M3-A1-X (Ensaio 1)
Figure 6 - Graphic of Specific Discharge q versus Hydraulic Gradient i for sample M3-A1-X (Test 1)

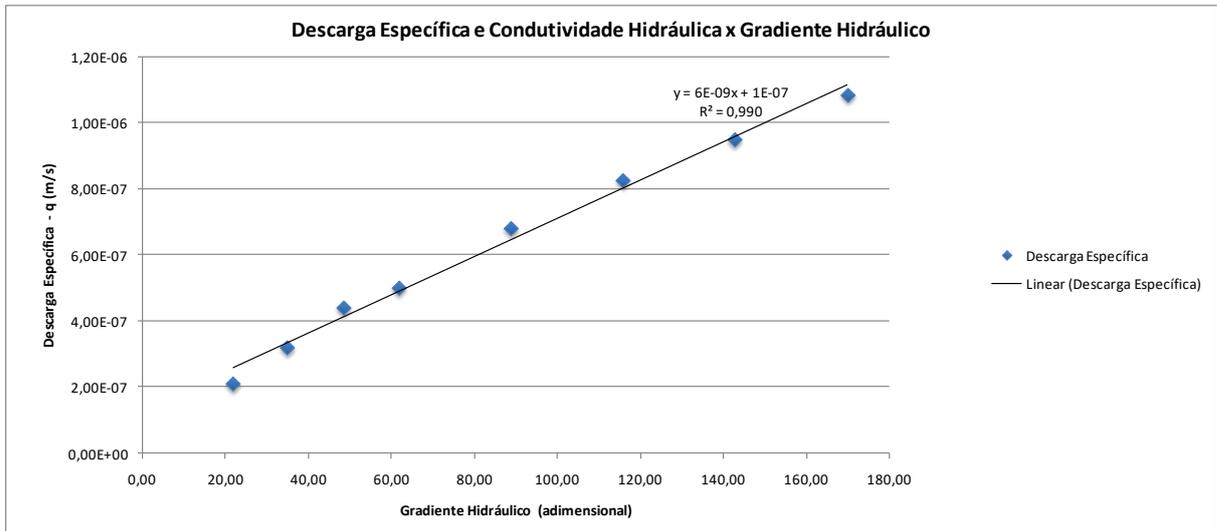


Figura 7 - Gráfico de Descarga Específica q versus Gradiente Hidráulico i para a amostra M3-A1-X (Ensaio 2)
Figure 7 - Graphic of Specific Discharge q versus Hydraulic Gradient i for sample M3-A1-X (Test 2)

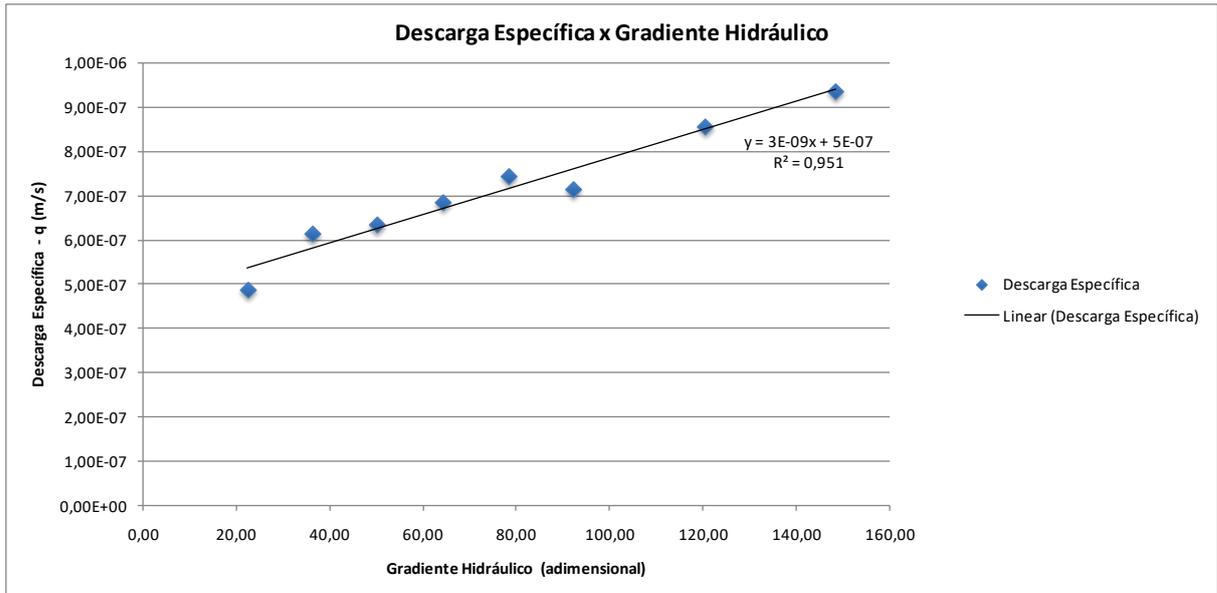


Figura 8 - Gráfico de Descarga Específica q versus Gradiente Hidráulico i para a amostra M3-A3-X
Figure 8 - Graphic of Specific Discharge q versus Hydraulic Gradient i for sample M3-A3-X

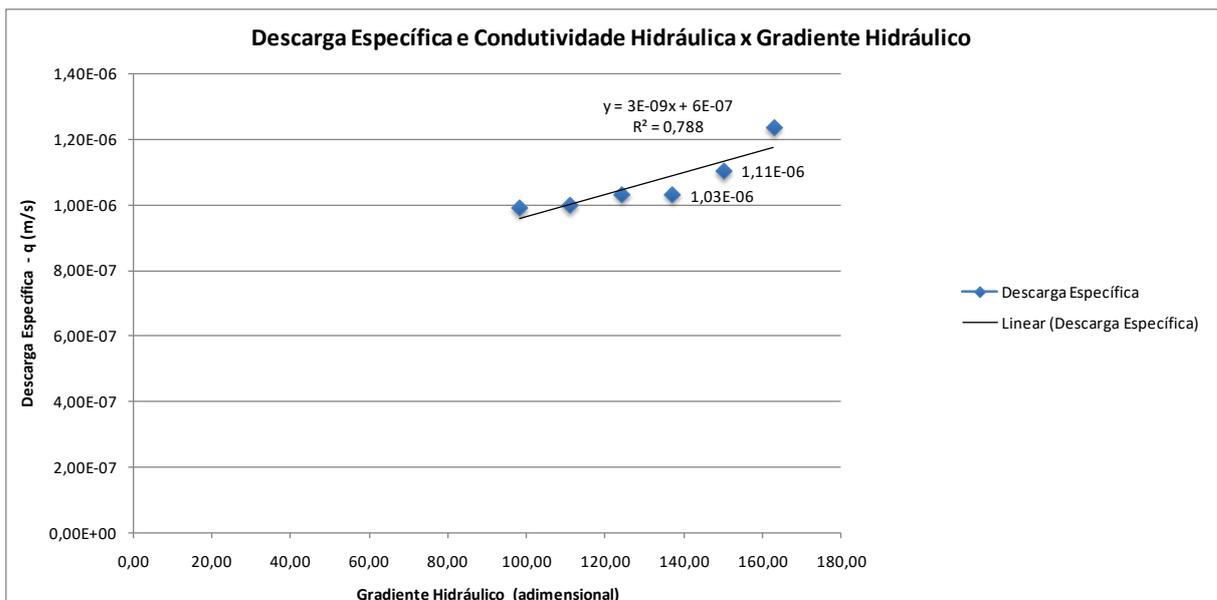


Figura 9 - Gráfico de Descarga Específica q versus Gradiente Hidráulico i para a amostra M3-A1-Z
Figure 9 - Graphic of Specific Discharge q versus Hydraulic Gradient i for sample M3-A1-Z

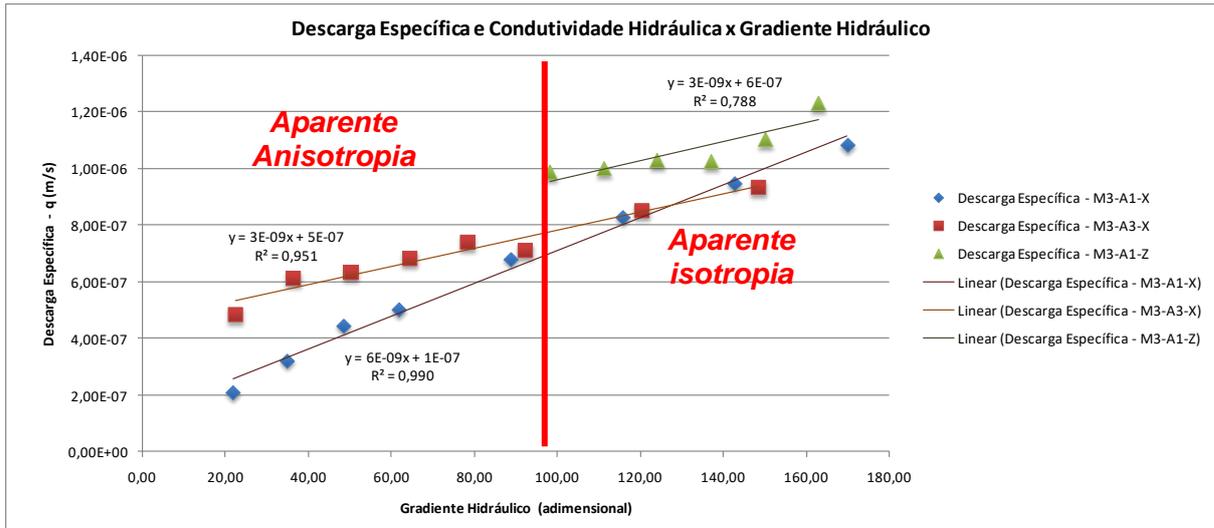


Figura 10 - Gráfico de Descarga Específica q versus Gradiente Hidráulico i para as amostras M3-A1-X, M3-A3-X e M3-A1-Z, indicando os intervalos de aparente isotropia e aparente anisotropia

Figure 10 - Graphic of Specific Discharge q versus Hydraulic Gradient i for samples M3-A1-X, M3-A3-X e M3-A1-Z, with intervals of apparent isotropy and apparent anisotropy indicated

Durante o primeiro teste, a amostra M3-A1-X (Figura 6) apresentou comportamento diferente das outras duas amostras (exceto amostra M3-A1-Y). A descarga específica aumentou com o incremento do gradiente hidráulico, alcançando valor máximo de $2,55 \times 10^{-6}$ m/s no gradiente de 34,58, para então apresentar diminuição com o aumento do gradiente hidráulico, tendendo a estabilizar próximo a $1,10 \times 10^{-6}$ m/s. Esse comportamento pode estar associado ao grau de saturação inicial da amostra. Pressupondo que a amostra não estava completamente saturada no início do ensaio, os incrementos na pressão da água sobre a amostra promoveu a saturação da mesma com o decorrer do ensaio, em um cenário não estacionário (*unsteady state*). A saturação pode ter se dado a partir do gradiente 72,20, indicado pela suavização da parte final da curva.

Embora os valores de condutividade hidráulica tenham sido semelhantes nas três direções, o gradiente hidráulico necessário para que a água percolasse por cada direção X, Y e Z foi diferente. Na direção X, a água percolou a amostra pelo permeâmetro sob baixos gradientes hidráulicos. Na direção Z, com sentido de fluxo formando um ângulo de 30° com a foliação, foi necessário aplicar uma pressão de ar de 70 kPa, gerando um gradiente de 98,10, enquanto que na direção Y, com

sentido de fluxo formando um ângulo de 60° com a foliação, foi necessário aplicar uma pressão de 110 kPa, gerando um gradiente hidráulico de 160,5. Desta forma, observa-se uma provável correlação entre o gradiente hidráulico e o ângulo formado entre sentido de fluxo e plano da foliação. Quanto menor o ângulo, menor é o gradiente hidráulico necessário para promover fluxo (Figura 11). Conforme aumento deste ângulo, maior deverá ser o gradiente hidráulico para promover o fluxo. A Figura 12 apresenta um gráfico de dispersão dos dados entre gradiente hidráulico e o ângulo formado entre o sentido de fluxo e o plano da foliação. Como pode-se observar, existe uma relação linear entre esses parâmetros, com R^2 de 0,997, indicando forte correlação entre os dados. Uma explicação possível para o fenômeno observado pode estar relacionada ao gradiente hidráulico limite necessário para que o fluxo seja iniciado no micaxisto estudado (FREEZE e CHERRY, 1979). A foliação é dada pela estruturação planar e orientada dos grãos minerais micáceos presentes na rocha, além de cristais de quartzo alongados. Maiores ângulos significam condições de maior perpendicularidade entre o sentido do fluxo e a orientação planar dos minerais, atingindo condição máxima a 90° . Esta estruturação pode ser responsável pela criação de uma

resistência ao fluxo (atrito), exigindo uma maior energia potencial para ultrapassar a barreira imposta que, uma vez ultrapassada, resulta em um fluxo, permitindo o cálculo da condutividade hidráulica. Essa estruturação

também pode aumentar a tortuosidade do meio poroso na direção oblíqua e/ou perpendicular à superfície dos minerais micáceos, acarretando aumento de energia para iniciar o fluxo.

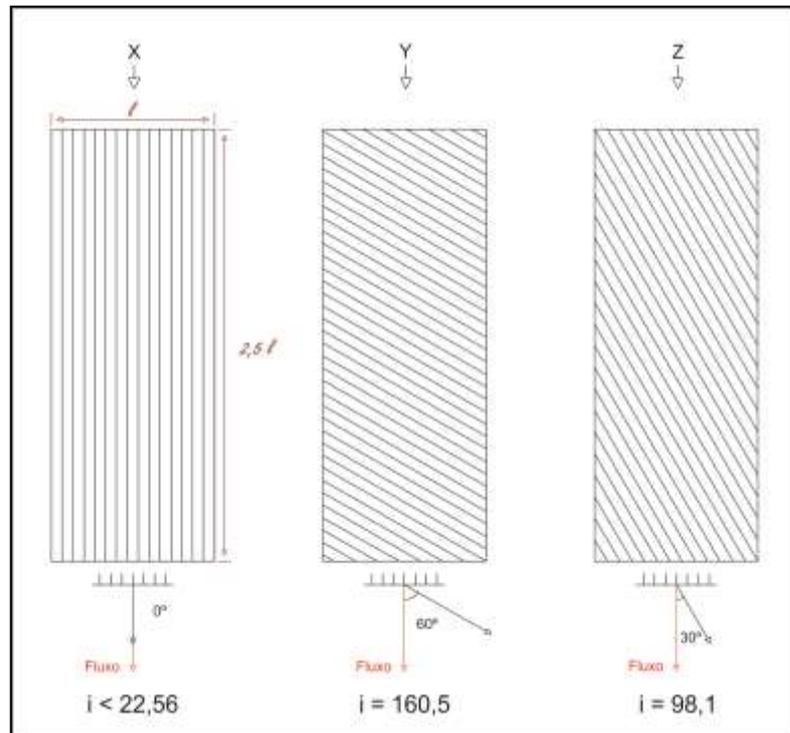


Figura 11 - Valores de gradientes hidráulicos obtidos nos ensaios e o ângulo formado entre o sentido de fluxo e o plano da foliação

Figure 11 - Values of hydraulic gradients observed in the tests and the angle formed between the flow direction and foliation planes

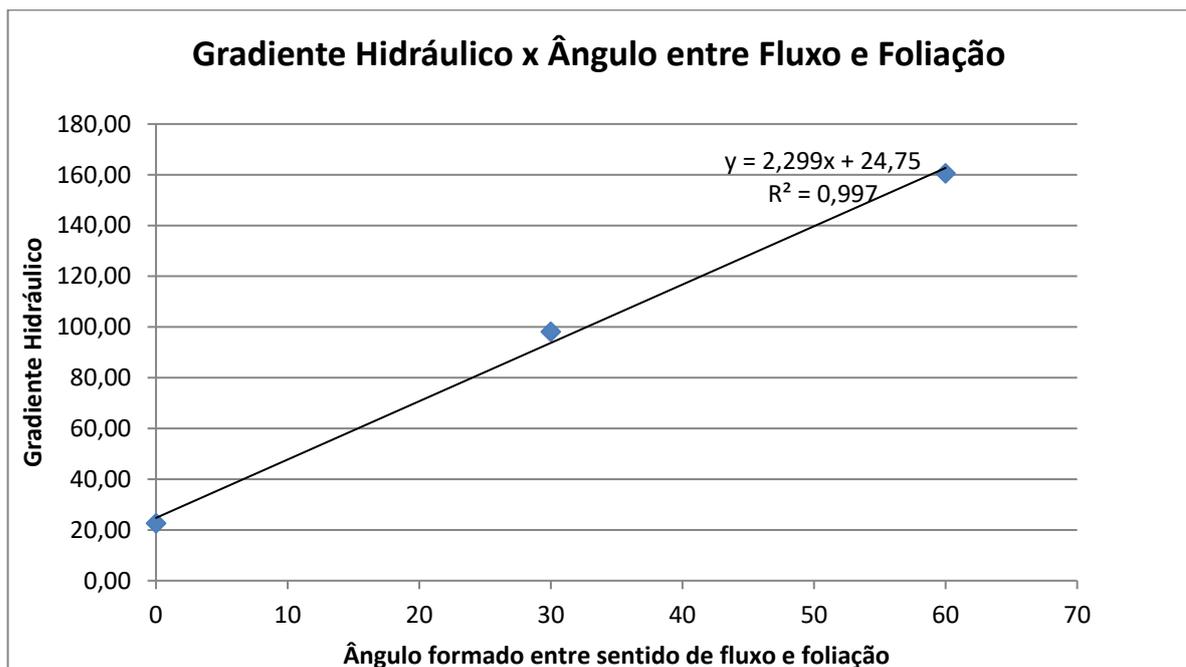


Figura 12 - Gráfico de Gradiente Hidráulico i versus ângulo formado entre direção de fluxo e plano da foliação

Figure 12 - Graphic of Hydraulic Gradient i versus angle formed between the flow direction and foliation planes

Além disso, o grau de saturação das amostras não atingiu a saturação máxima, indicando a existência de ar aprisionado na matriz da amostra. As bolhas de ar também conferem resistência à passagem da água pelo corpo de prova. As amostras com maior grau de saturação foram aquelas que exigiram os menores gradientes hidráulicos para que o fluxo de água ocorresse através das amostras no intervalo de tempo dos ensaios, e coincidem com o paralelismo existente entre o sentido do fluxo e a direção dos planos da foliação. Opostamente, as amostras com menor grau de saturação foram aquelas que exigiram os maiores gradientes hidráulicos para ocorrência de fluxo contínuo, e coincidem com os maiores ângulos entre o sentido do fluxo e a direção dos planos da foliação.

5 CONCLUSÕES

As amostras de micaxisto alterado, com granulometria silto areno-argiloso a silto arenoso fino, não alcançaram, nos cenários experimentados, grau de saturação máximo. As três amostras ensaiadas para condutividade hidráulica sob elevadas pressões obtiveram maiores graus de saturação quando comparadas às duas amostras de controle, saturadas somente por capilaridade. As amostras na direção X (ensaio e controle), cujo plano de foliação é paralelo ao sentido de fluxo, alcançaram os maiores graus de saturação experimental, enquanto que as amostras na direção Y (ensaio e controle), cujo plano de foliação forma ângulo de 60° com o sentido de fluxo, alcançaram os menores graus de saturação; a amostra na direção Z, com plano de foliação em ângulo de 30° com o sentido de fluxo, alcançou valor intermediário entre as situações X e Y. Por estas constatações, pode-se observar uma influência direta entre do ângulo formado entre plano de foliação e sentido de fluxo com o grau de saturação.

Os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica sob pressão revelaram dois comportamentos distintos: 1)

em gradientes hidráulicos mais elevados, nas condições experimentais adotadas neste estudo, a condutividade hidráulica nesse meio poroso, pelo menos em escala da matriz, tende a se comportar como uma propriedade aparentemente isotrópica, mesmo sendo o micaxisto uma rocha anisotrópica em termos estruturais; 2) em gradientes hidráulicos mais baixos, como encontrado no meio natural principalmente em aquíferos freáticos, observa-se uma aparente anisotropia da condutividade hidráulica, uma vez que a amostra na direção Z transmitiu água somente em gradientes superiores a 98, e na direção Y transmitiu água somente em gradiente superior a 174.

Uma possibilidade para o comportamento isotrópico da condutividade hidráulica no micaxisto alterado em gradientes hidráulicos maiores pode residir no pequeno espaçamento entre os planos da foliação. Os planos da foliação conferem claramente uma condição anisotrópica para a rocha. Contudo, o pequeno espaçamento entre esses planos pode não ser suficiente para ocasionar uma variação significativa entre a condutividade hidráulica ao longo dos planos da foliação e perpendicular a esta, caracterizando o comportamento isotrópico da condutividade hidráulica verificado pelos resultados dos ensaios. Esse comportamento observado difere do comportamento anisotrópico da condutividade hidráulica verificado em diferentes camadas empilhadas, denominada por Freeze e Cherry (1979) como *layered heterogeneity*. Nesse modelo, cada camada, de determinada faixa granulométrica e com espessura considerável, contribui individualmente com condutividades hidráulica horizontal e vertical, tendo como resultante de todas as camadas uma condutividade hidráulica anisotrópica. Entretanto, enquanto as espessuras de cada camada tendem a diminuir, como planos de uma foliação, os resultados dos ensaios realizados tendem a demonstrar que as diferenças entre as condutividades horizontais e verticais, ou genericamente perpendiculares entre si, tendem a ser desprezíveis,

acarretando uma condição aparentemente isotrópica.

Pelos resultados obtidos e discussões realizadas, a condutividade hidráulica, nas condições experimentais e de campo, é uma propriedade anisotrópica e dependente da anisotropia estrutural da rocha/saprólito. Em um aquífero freático e raso, tal como observado na área de estudo, não é real a existência de um gradiente hidráulico elevado para proporcionar uma condição isotrópica para a condutividade hidráulica, tal como observado em condições extremas geradas em laboratório.

Outro ponto importante: estas condições geológicas e estruturais identificadas na área de estudo observadas em profundidades rasas podem se repetir em maiores profundidades. É importante ponderar sobre a paleogeografia, o Complexo Embu, do Neoproterozoico, é coberto parcialmente pela Bacia de São Paulo, de idade cenozoica, isto reflete em um intervalo de tempo de aproximadamente 500 Ma na área de estudo, tempo este sem registro estratigráfico, mas período este em que os

micaxistos permaneceram sobre forte intemperismo, gerando rochas alteradas em grandes profundidades.

Estes resultados têm implicações importantes para situações hidrogeológicas diversas. Em áreas com características similares, é importante o conhecimento desta anisotropia para atividades diversas, por exemplo, gerenciamento ambiental de áreas contaminadas: investigação e detalhamento de plumas de contaminação; modelamento matemático de fluxo e transporte de contaminantes; elaboração de projetos conceituais e implantação de sistemas de remediação in situ; entre outros.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Estudo de Bacias e de Remediação de Áreas Impactadas por Hidrocarbonetos – LEBAC-RAIH – pelo suporte técnico, ao CNPq e à FUNDUNESP pelo auxílio no desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995. 8 p.

BASSO J.B. **Transporte e retenção de K⁺, Cu²⁺, e Cl⁻ em uma mistura compactada de solos lateríticos para uso em barreiras selantes**: procedimentos de homogeneização e adaptações em equipamento de percolação. 2003. 168 f. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

BASSO J.B. **Migração de K⁺, Cu²⁺ e Cl⁻ em solos do subgrupo Itararé no Estado de São Paulo**: ensaios sorcivos, percolação em colunas e simulações geoquímicas. 2010. 189 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2010.

FREEZE, R.; CHERRY, J. **Groundwater**. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1979. 604 p.

HASUI Y. et al. The Ribeira Folded Belt. **Revista Brasileira de Geociências**, 5, p. 257-266. 1975.

LEITE J.C. **Estudos laboratoriais de percolação em colunas de misturas de solos lateríticos compactadas**: equipamento e ensaios. 2000. 223 f. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

LEITE, J. C. et al. An equipment for percolation test in soil columns. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 4th, 1998. Lisboa, Portugal, **Anais**, v. 1, 1998, p.211-215.

LIMA, M.R.; AMADOR, E.S. Análise palinológica de sedimentos da Formação Resende. Terciário do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. In: **Coletânea de trabalhos paleontológicos**, 1985. Brasília: DNPM, 1995, p. 371-378.

LIMA, M.R.; RICCOMINI, C.; SOUZA, P.A. Palinologia de folhelhos do Gráben de Casa de Pedra, Terciário do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Acta Geológica Leopoldensia**. v.27, p. 485-504. 1994.

NAKASAWA, V.A. et al. **Carta Geotécnica do Estado de São Paulo**. Escala 1:500000. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2 v., 1994.

- OLIVEIRA, J.B. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 64 p + 4 mapas, 1999.
- PEREIRA, E. M. **Interação solo/solução aquosa através de ensaios de percolação em colunas**. 2006. 80 f. Relatório de Atividades CNPq – Pós Doutorado - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.
- PERROTA, M.M. et al. **Mapa Geológico de São Paulo**. Escala 1:750.000, SIG. São Paulo, (Convênio CPRM/Secretaria de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento do Estado de São Paulo). 2005.
- PONÇANO, W.L. et al. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 1981. 94 p.
- RICCOMINI, C. **O Rift Continental do Sudeste do Brasil**. 1989. 256 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.
- SÃO PAULO. **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo em 1:1.000.000**. Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo - DAEE, Instituto Geológico –IG-SMA/SP, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo- IPT, Serviço Geológico do Brasil- CPRM. 2005. Nota Explicativa e Mapa.
- SÃO PAULO. **Banco de Dados Pluviométricos do Estado de São Paulo**. Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (SigRH), Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/bdhm.exe/plu>>. Acesso em: 21 fev 2014.
- SCHOENEBERGER, P.; AMOOZEGAR, A. Directional saturated hydraulic conductivity and macropore morphology of a soil-saprolite sequence. **Geoderma**, 46, p, 31-49. 1990.
- SUGUIO, K.; et al. Novos dados sedimentológicos dos aluviões antigos do rio Pinheiros (São Paulo) e seus significados na interpretação do ambiente deposicional. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 25. 1971. São Paulo, **Anais...** São Paulo, SBG. v.2, 1971. p.219-225.
- Yamamoto, L. T. **Palinologia das bacias do sudeste (bacias de Taubaté, São Paulo e Resende): análise bioestratigráfica integrada e interpretação paleoambiental**. 1995. 217 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1995.