



**Caracterização de Parâmetros Hidráulicos em
Depósitos Fluviais Paleogênicos na Bacia de Volta Redonda, RJ**
Characterization of Hydraulic Parameters in
Paleogenic Fluvial Deposits in the Volta Redonda Basin, R J

Ana Carolina Lisbôa Barboza¹; Gerson Cardoso da Silva Jr.¹ & Claudio Limeira Mello¹

*Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Av. Athos da Silveira Ramos, 274
- Cidade Universitária – Ilha do Fundão – RJ – 21941-916;*

E-mails: carolcarius@gmail.com; limeira@geologia.ufrj.br e gerson@acd.ufrj.br

Recebido em: 02/06/2007 Aprovado em: 27/08/2007

Resumo

O presente estudo tem por objetivo a caracterização de parâmetros hidráulicos dos depósitos fluviais paleogênicos da Bacia de Volta Redonda, através de ensaios de condutividade hidráulica e análises granulométricas. Com este estudo, busca-se produzir uma base de dados hidrogeológicos aplicáveis à caracterização de hidro fácies (corpos sedimentares interconectados com distintas propriedades hidráulicas) e à modelagem de fluxo das águas subterrâneas. A metodologia utilizada nesta pesquisa consistiu em ensaios de permeabilidade *in situ* (permeômetro de Guelph) e de laboratório (permeômetro de carga variável), além de análises granulométricas realizadas em cada fácies sedimentar existente na área de estudo, os quais pertencem às formações Resende e Pinheiral. Os resultados estimados da condutividade hidráulica apresentaram-se coerentes às características sedimentológicas. Os depósitos sedimentares da Formação Resende são constituídos por areia fina a média com presença de matriz argilosa e apresentaram condutividade hidráulica moderada a muito baixa, variando de 10^{-4} a 10^{-8} cm/s. Estes valores indicam um reservatório pobre. A Formação Pinheiral apresenta camadas arenosas com níveis conglomeráticos, limitadas por intervalos pelíticos pouco espessos. Esses pelitos possuem muito baixa permeabilidade, com condutividade hidráulica variando de 10^{-5} a 10^{-7} cm/s. O topo dessa formação teve a mais alta permeabilidade, em torno de 10^{-3} cm/s. A Formação Pinheiral apresenta, portanto características de reservatório e deve-se levar em consideração que seu topo funciona como recarga do aquífero. A partir dos resultados obtidos de condutividade hidráulica, que variaram de 10^{-8} a 10^{-3} cm/s, para as formações Resende e Pinheiral da área em estudo, concluiu-se que esses depósitos possuem de muito baixa a média condutividade hidráulica, predominando as permeabilidades mais baixas, o que explica a baixa produtividade do aquífero multicamadas de Volta Redonda.

Palavras-chave: Bacia de Volta Redonda; condutividade hidráulica; análises granulométricas

Abstract

The present study aims for the characterization of the hydrogeological parameters of the Paleogenic fluvial deposits of Volta Redonda Geological Basin, through hydraulic conductivity determinations and grain sized analyses. The overall goal was to produce a hydrogeological data base applicable to the characterization of hydrofacies (interconnected sedimentary bodies with distinct hydraulic properties) and the modeling groundwater flow. The used methods used consisted of *in situ* permeability determinations (Guelph permeameters) and laboratory tests (variable head permeameter), besides grain size analyses carried out in each sedimentary facies in the study area. These sedimentary facies were characterized by Marques (2006) and belong to the Resende and Pinheiral formations. The permeameter results were coherent to the sedimentological characteristics. The Resende Formation sedimentary deposits are constituted by medium to fine sand with presence of argillaceous matrix and present moderate to very low hydraulic conductivity, varying between 10^{-4} to 10^{-8} cm/s, which indicates a poor reservoir. The Pinheiral Formation presents sandy layers with conglomeratic lenses, limited by small thickness pelitic intervals, with a very low permeability, with a hydraulic conductivity varying between 10^{-5} to 10^{-7} cm/s. The upper layer has the maximum permeability, around 10^{-3} cm/s. This formation presents a medium reservoir characteristics and it must be taken into consideration that the upper layer has as role in recharge to the aquifer. From the results of hydraulic conductivity, that varies from 10^{-8} to 10^{-3} cm/s for the Resende and Pinheiral formations, it is concluded that these deposits a low to medium hydraulic conductivity, explaining the low productivity of the water-bearing multilayered aquifer of Volta Redonda Basin.

Keywords: Volta Redonda Basin; hydraulic conductivity; grain-size analysis

1 Introdução

O projeto “Modelagem Estratigráfica de Reservatórios Terrígenos: aplicação à avaliação do potencial hídrico da Bacia de Resende (MODESTHI)” desenvolveu uma metodologia integrando técnicas multidisciplinares para análise do potencial hidrogeológico em áreas sedimentares sob enfoque da geologia de reservatório, tomando-se como caso de estudo a Bacia Sedimentar de Resende, RJ (Bettini, 2004).

Através de pesquisas hidrogeológicas desenvolvidas nesse projeto, associadas a dados levantados por pesquisadores de diversas áreas ligadas à caracterização geológica e geofísica da Bacia de Resende, gerou-se um modelo hidrogeológico da área (Castro *et al.*, 2000). Embora tenham sido levantados muitos dados hidrogeológicos da região, no relatório final do projeto MODESTHI recomendou-se a continuidade dos estudos em várias frentes que carecem de maior detalhamento, que serão de grande importância para o aperfeiçoamento do conhecimento hidrogeológico e do modelo de funcionamento do sistema aquífero da Bacia de Resende ou de bacias semelhantes, como é o caso da Bacia de Volta Redonda, situada próximo à Bacia de Resende.

Neste contexto, a presente pesquisa teve como tema principal a caracterização de hidrofácies nos depósitos fluviais paleogênicos da Bacia de Volta Redonda, tomando como base estudos litofaciológicos já existentes (Sanson, 2006; Marques, 2006).

Hidrofácies são definidas como corpos sedimentares interconectados com propriedades hidráulicas similares, o que determina o fluxo em aquíferos sedimentares (Anderson *et al.*, 1990 *apud* Ezzy *et al.*, 2006). O entendimento das hidrofácies pode orientar o estudo do fluxo da água subterrânea e, principalmente, caracterizar a heterogeneidade do aquífero. Com isso, busca-se fornecer subsídios para o melhor entendimento dos principais reservatórios sedimentares da região, do tipo aquífero multicamadas.

O aquífero sedimentar multicamadas da bacia de Volta Redonda ocorre nas imediações

da cidade homônima, com espessura de até 30 m e possui baixa produtividade, inferior a 1000 L/h (Capucci *et al.*, 2003).

Ressalte-se que praticamente não há pesquisas abrangentes sobre a hidrogeologia da Bacia de Volta Redonda. A relevância sócio-econômica do projeto decorre do ritmo acelerado de industrialização da região, induzindo o crescimento demográfico e a conseqüente demanda pelo abastecimento de água, tanto para o uso industrial quanto doméstico.

2 Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo associar fácies sedimentares a parâmetros hidrogeológicos nos depósitos sedimentares paleogênicos que preenchem a Bacia Sedimentar de Volta Redonda, inserida no segmento central do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB), definindo hidrofácies.

Dentro deste estudo, pretende-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- estimar a condutividade hidráulica utilizando ensaios de permeabilidade em fácies sedimentares estudadas por Marques (2006);
- fornecer dados para uma futura caracterização de hidrofácies.

Busca-se, neste estudo, o maior conhecimento dos aquíferos multicamadas nas bacias sedimentares do RCSB, ainda pouco estudados, mas bastante explorados para fins de abastecimento urbano e industrial. Nesta pesquisa, pretende-se fornecer dados que subsidiem futuras modelagens de fluxo das águas subterrâneas nestes aquíferos.

3 Caracterização da área de estudo

3.1 Localização e Acessos

A Bacia de Volta Redonda localiza-se no trecho inferior do médio vale do rio Paraíba do Sul, entre as serras do Mar e da Mantiqueira, no sul do Estado do Rio de Janeiro (Figura 1). No gráben da Casa de Pedra, que se estende entre a localidade de Casa de Pedra, em Volta Redonda, e o município de Pinheiral, estão os principais afloramentos de rochas

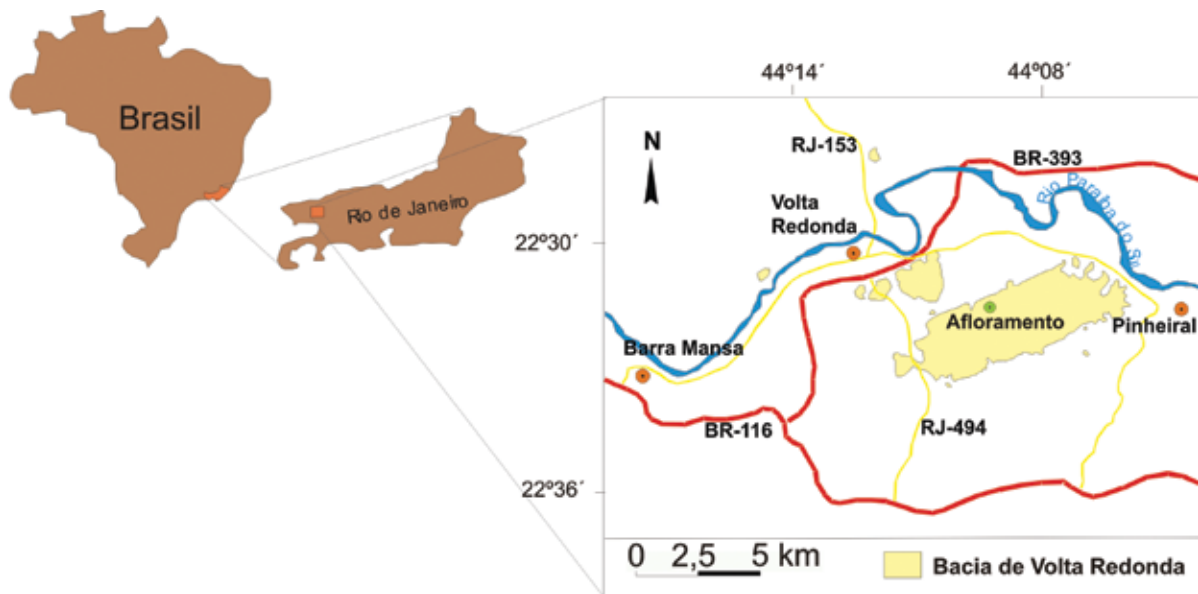


Figura 1 Mapa de localização da bacia de Volta Redonda, situada no Estado do Rio de Janeiro e suas principais vias de acesso.

sedimentares da bacia. Nesta região, destaca-se o afloramento da Rodovia do Contorno (interligando a BR-116 e a BR-393), descrito por Sanson (2006) e Marques (2006), local escolhido para realização deste estudo (Figura 1).

3.2 Contexto Geológico Regional

A Bacia de Volta Redonda, juntamente com as bacias de São Paulo, Taubaté e Resende, constituem um conjunto de bacias tafrogênicas continentais, denominado por Almeida (1976) como “Sistema de Rifts da Serra do Mar”. Atualmente, essa feição tectônica é conhecida como Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB), que corresponde a um complexo de vales tectônicos, serras e bacias sedimentares com orientação ENE-WSW, de idade Eoceno-Oligoceno, que se estende de Curitiba ao litoral norte do Rio de Janeiro (Riccomini, 1989) - Figura 2.

O RCSB está implantado sobre o segmento central da Faixa Móvel Ribeira, que constitui um complexo cinturão de dobramentos e empurrões gerados no Neoproterózoico/Cambriano, durante a Orogênese Brasileira (Heilbron *et al.*, 1995). As unidades do em-

basamento da Bacia de Volta Redonda foram caracterizadas por Heilbron *et al.* (2004) em: *Complexo Juiz de Fora* (ortogranulitos paleoproterozóicos), *Complexo Quirino* (composto por hornblenda-ortognaisse e granitóides), *Grupo Paraíba do Sul* (corresponde a uma sucessão metassedimentar) e *corpos granitóides sintectônicos brasileiros* (Figura 3).

Ocorrem três grandes corpos plutônicos compostos essencialmente por nefelina-sienitos, de idade mesozóica, na vizinhança das bacias de Resende e Volta Redonda, que correspondem aos maciços Itaitiaia, Passa Quatro e Morro Redondo (Figura 3).

Segundo Trouw *et al.* (2000), a Faixa Ribeira sofreu diversas fases orogênicas, gerando unidades geológicas complexas, individualizadas por descontinuidades tectônicas apresentando direção ENE-WSW.

O preenchimento sedimentar paleogênico desenvolvido nas bacias do segmento central do RCSB é associado a sistemas de leques aluviais e canais fluviais entrelaçados, representados por depósitos conglomeráticos a arenosos intercalados com depósitos lamíticos (Melo *et al.*, 1985).

3.3 Estratigrafia da Bacia de Volta Redonda

O primeiro trabalho sobre a estratigrafia da Bacia de Volta Redonda foi realizado por Amador & Castro (1976), que dividiram seus depósitos em duas unidades separadas: *Camadas terciárias pré-Formação Volta Redonda* (arenitos fluviais) e *Formação Volta Redonda* (conglomerados, arenitos feldspásticos e argilitos de origem fluvial).

Melo *et al.* (1983) e Riccomini (1989) consideraram não haver características que justificassem a subdivisão do registro sedimentar em duas unidades, como sugerido por Amador & Castro (1976), reunindo os depósitos em uma única unidade estratigráfica, correlacionada à Formação Resende, anteriormente descrita na bacia de Resende.

Riccomini *et al.* (1983) descreveram derrames de lavas ankaramíticas intercalados aos lamitos da Formação Resende presentes no Gráben de Casa de Pedra. Através de datações por K-Ar em rocha total, situaram estas lavas no Eoceno final (*ca.* 43 Ma). Lima *et al.* (1994 *apud* Riccomini *et al.*, 1996), através de estudos palinológicos em folhelhos da Formação Resende, presentes no *Gráben* de Casa de Pedra, em Volta Redonda (RJ) obtiveram idade Eoceno final. Riccomini *et al.* (2004) através do método Ar-Ar dataram as rochas ultrabásicas alcalinas entre os depósitos paleogênicos em $48,3 \pm 0,5$ e $47,6 \pm 0,7$ Ma.

Levantamentos audiomagnetotélúricos realizados na Bacia de Volta Redonda por Padilha & Vitorello (1992 *apud* Sanson, 2006) indicaram que as maiores espessuras de acumulação sedimentar estariam nas proximidades da borda norte da bacia, alcançando cerca de 112 m de profundidade.

A partir da caracterização de associações litológicas e de suas relações de contato, Sanson (2006) redefiniu a estratigrafia da bacia de Volta Redonda (Figuras 4 e 5), designando as seguintes unidades:

Formação Ribeirão dos Quatis: depósitos predominantemente conglomeráticos. Na Bacia de Volta Redonda, esta formação ocorre de maneira descontínua em meio a rochas do embasamento, em afloramentos isolados concentrados na região ao norte do rio Paraíba do Sul. A espessura máxima desta unidade pode alcançar de 6 a 8 m aproximadamente. A Formação Ribeirão dos Quatis representa um sistema fluvial entrelaçado conglomerático.

Formação Resende: representa a maior parte dos depósitos paleogênicos da Bacia de Volta Redonda, sendo caracterizada por arenitos maciços e arenitos lamosos, depositados em planície de inundação, com desenvolvimento incipiente de paleossolos aluviais (Marques, 2006), intercalados a sedimentos arenosos estratificados ricos em feldspato, produzidos por fluxos trativos vigorosos, com rápido soterramento. Essa unidade representa um sistema fluvial de alta energia, com episódios de inundação significativos.

Basanita Casa de Pedra: rochas ultrabásicas alcalinas identificados no gráben da Casa de Pedra, Riccomini *et al.* (2004), obtiveram idades Ar - Ar em torno de $48,3 \pm 0,5$ e $47,6 \pm 0,7$ Ma, situando-as no Eoceno médio.

Formação Pinheiral: arenitos estratificados com geometria lenticular estendida, limitados por intervalos predominantemente pelíticos. Esta formação é interpretada como um sistema fluvial de baixa sinuosidade, arenoso, com freqüentes reativações e avulsões dos canais fluviais, sendo os intervalos pelíticos associados ao preenchimento de canais abandonados.

Sedimentos neogênicos: depósitos areno-argilosos, com coloração castanho-amarelado, que recobrem colinas de conformação suave.

Sedimentos quaternários: depósitos coluviais e aluviais preservados nos vales fluviais e cabeceiras de drenagem. Os depósitos aluviais são representados por camadas tabulares de areias finas a grossas, estratificadas, intercaladas a camadas silto-argilas, que preenchem fundo de vales e cabeceiras de drenagem entulhadas. Esses depósitos podem alcançar cerca de 8 m de espessura. Já os depósitos coluviais alcançam aproximadamente 1 m de espessura, e são caracterizados por sedimentos areno-argilosos muito mal selecionados, com grânulos e seixos de quartzo dispersos, e limitados por linhas de seixos na base.

3.7 Fácies Sedimentares do Afloramento Estudado

As fácies sedimentares investigadas neste estudo foram caracterizadas por Marques (2006),

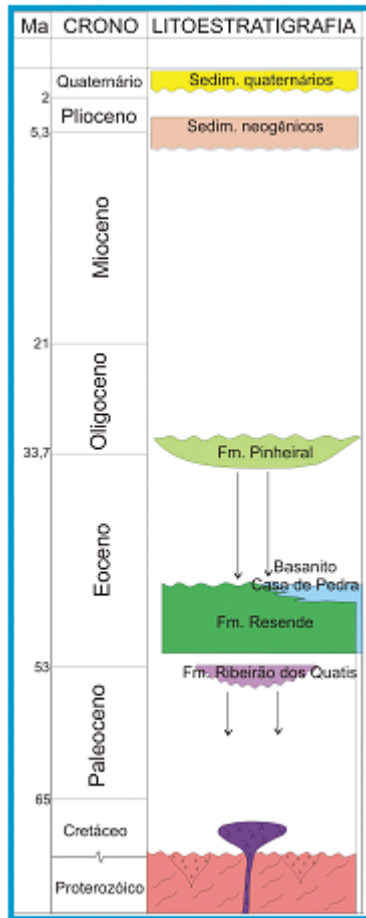


Figura 4 Coluna estratigráfica da Bacia de Volta Redonda e eventos tectônicos cenozóicos reconhecidos (Sanson, 2006).

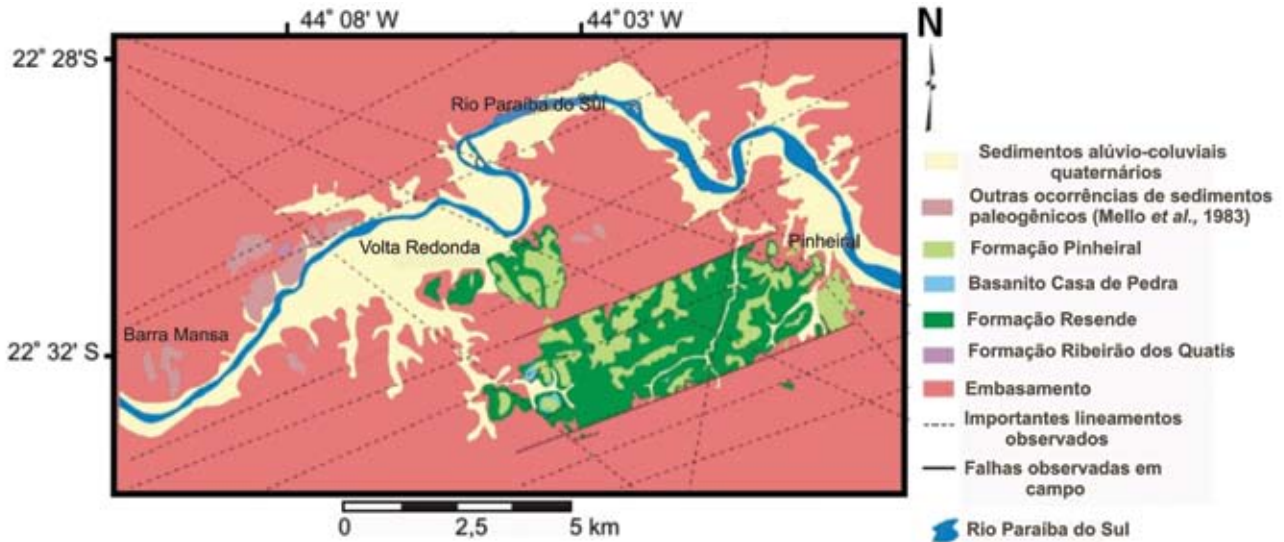


Figura 5 Mapa geológico da Bacia de Volta Redonda (Sanson, 2006).

que utilizou os seguintes atributos para classificá-las: textura, composição mineralógica e estruturas sedimentares. Foi adotado um código alfanumérico para identificá-las, com objetivo de representá-las de forma simplificada. Esse código assemelha-se à proposta de Miall (1985): a primeira letra, sempre em maiúscula, representa a litologia dominante; a segunda e a terceira letras aparecem em minúsculo e representam as estruturas sedimentares e características diagnósticas presentes (por exemplo: Alm – Arenito lamoso maciço).

No afloramento em estudo, Marques identificou oito fácies sedimentares (Figura 6), sendo duas rudíticas, cinco areníticas e uma lutítica (Marques, 2006). Essas fácies e suas respectivas interpretações são mostradas na Tabela 1.

Segundo Marques (2006), há duas associações de fácies distintas, associadas às formações Resende e Pinheiral, respectivamente (Figura 6). A Formação Resende é caracterizada por arenitos maciços intercalados a arenitos lamosos, em camadas de geometria tabular, espessuras decimétricas e larguras de poucas dezenas de metros, limitadas por contatos gradacionais. Já a Formação Pinheiral é caracterizada por uma superposição de camadas arenosas com níveis conglomeráticos, limitadas por intervalos pelíticos pouco espessos.

4 Metodologia

A condutividade hidráulica exprime a maior ou menor facilidade com que a água percola em um

Fácies	Diagnose	Interpretação
Ccm	Conglomerado sustentado pelos clastos, maciço	Fluxos trativos unidirecionais subaquosos; modificações pós-deposicionais
Cch	Conglomerado sustentado pelos clastos, com estratificação horizontal	Fluxos trativos unidirecionais subaquosos, intensos e rápidos
Ac	Arenito com estratificação cruzada	Correntes trativas unidirecionais em meio aquoso
Al	Arenito laminado	Fluxos trativos subaquosos de baixa energia.
Am1	Arenito maciço, com matriz argilosa	Fluxos não confinados durante enchentes; modificações pós-deposicionais
Am2	Arenito maciço	Fluxos trativos unidirecionais subaquosos; modificações pós-deposicionais
Alm	Arenito lamoso maciço	Paleossolos aluviais (?)
PI	Pelito arenoso, maciço a laminado	Decantação de sedimentos finos em planície de inundação

Tabela 1 Fácies sedimentares identificadas e suas interpretações (Marques, 2006).

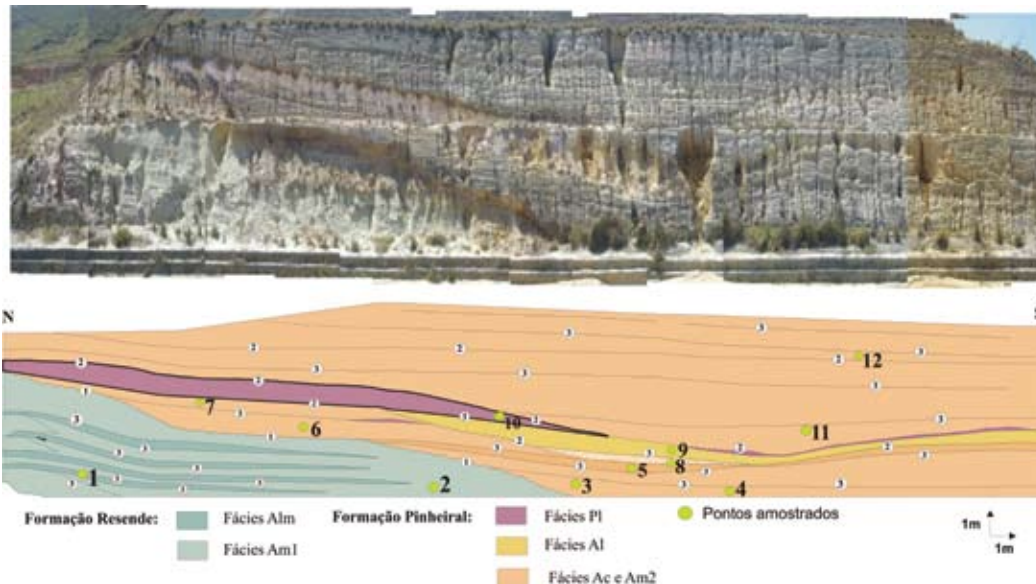


Figura 6 Fotomosaico e seção geológica do afloramento estudado, mostrando os locais onde foram realizados a amostragem e os ensaios com o permeâmetro de Guelph (Marques, 2006).

meio poroso, e é função das características do meio, como porosidade, tamanho, forma e arranjo dos grãos, conexões entre os poros, e das características do fluido percolante, como densidade e viscosidade.

A metodologia adequada para a caracterização dos parâmetros hidráulicos para esta pesquisa é baseada principalmente na comparação dos valores de condutividade hidráulica obtidos através de medições *in situ* e em laboratório, realizadas em pontos definidos segundo a geometria dos estratos e sua importância relativa ao fluxo de fluidos. Para se obter a condutividade hidráulica neste estudo, utilizou-se o permeômetro de Guelph Modificado (método aplicado *in situ*), além do permeômetro de carga e o método empírico de Hazen (Fetter, 1994), que se enquadram nos métodos laboratoriais.

4.1 Permeômetro de Guelph Modificado

A medição da permeabilidade *in situ* foi realizada com uso de Permeômetro de Guelph Modificado (Figura 8), em cada litofácies identificada no afloramento, totalizando 12 ensaios. Esse equipamento foi elaborado pelo Instituto Agrônomo de Campinas – IAC/ SP (Vieira, 1998), com a finalidade de medir a condutividade hidráulica saturada de campo acima do lençol freático.

O permeômetro de Guelph modificado (Figura 7) é composto por: uma garrafa de Mariotte, que controla a carga constante de água dentro do furo; um tubo de acrílico com uma régua graduada, onde a água é introduzida; um tripé, que permite adaptar o aparelho em terrenos irregulares; e ponteiras de variados tamanhos.

O procedimento deste ensaio requer, após a seleção da área e os locais a serem amostrados, a realização de furos a trado, devendo-se obter furos com fundo horizontal plano, onde é introduzida uma carga constante de água até que se atinja um estado de regime permanente. Esse fluxo permanente produz um “bulbo” de saturação adjacente à sondagem, cercado de um volume exterior úmido, porém não saturado (Philip, 1985; Elrick *et al.*, 1989), como pode ser observado na Figura 7.

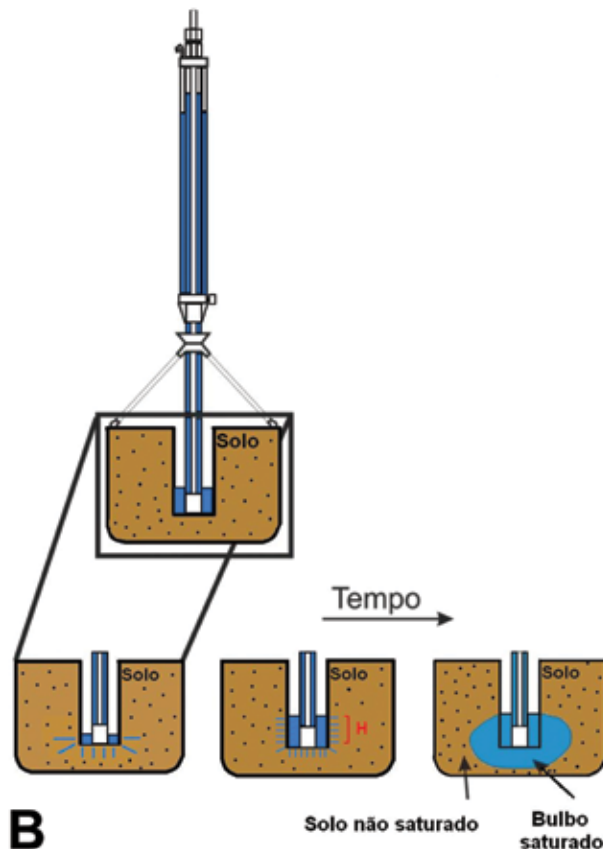
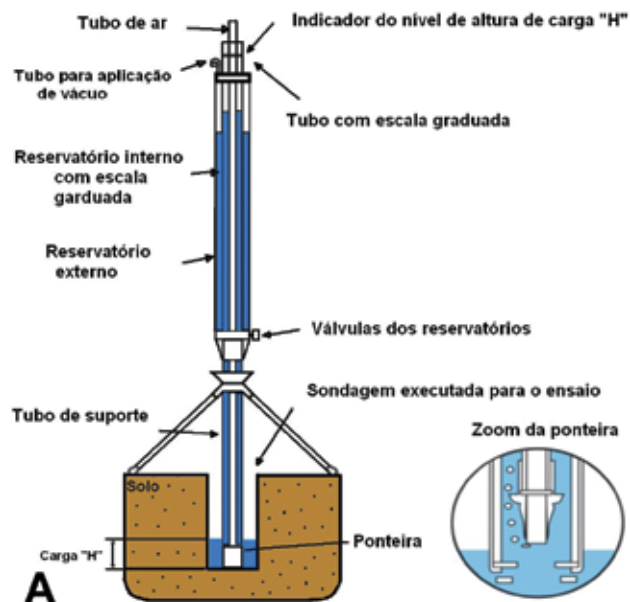


Figura 7 (A) Esquema do permeômetro Guelph (Soto, 1999 *apud* Bielschowsky, 2005). (B) Obtenção do fluxo em regime permanente (Soto, 1999 *apud* Bielschowsky, 2005), a imagem do equipamento aparece, em destaque, no canto direito.

4.2 Permeâmetro de Laboratório

Para estimar a condutividade hidráulica em laboratório, utilizou-se o permeâmetro de carga do Laboratório de Hidrogeologia do Departamento de Geologia da UFRJ. Este permeâmetro permite dois tipos de ensaios, conhecidos como ensaio de carga constante e de carga variável (Figura 8).

O permeâmetro de carga variável é indicado para a medição da condutividade hidráulica de solos com permeabilidades intermediárias a baixas, como silte e argila; o ensaio de carga constante é mais usado em solos arenosos. Quando o coeficiente de permeabilidade é muito baixo, a determinação pelo permeâmetro de carga constante é pouco precisa. Por este motivo, o permeâmetro de carga variável é considerado mais vantajoso que o anterior, sendo preferencialmente usado para sedimentos finos (Pinto, 2002).

A coleta de amostra no campo deve ser realizada sob condições controladas, com amostra semideformada, que pode ser submetida a ensaios de carga constante ou variável. Em ambos os casos, a amostra é coletada em um cilindro de comprimento L e área transversal A (Figura 9), e fechada entre duas placas porosas (Aguiar, 2001).

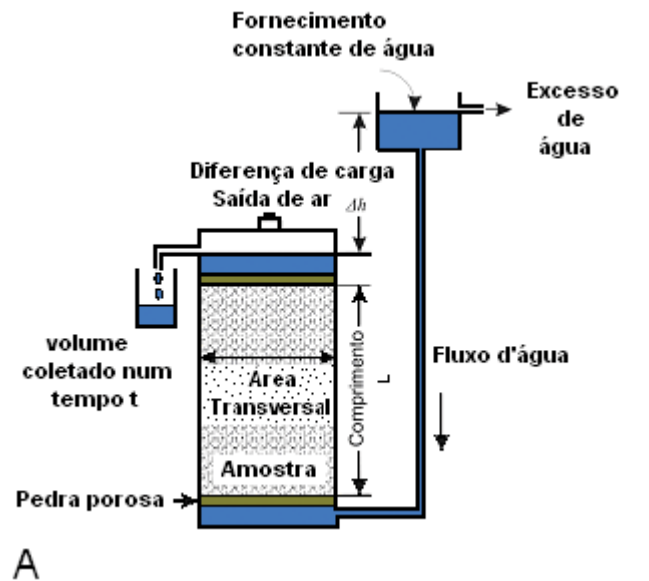
Para a coleta de amostra semideformada, devem-se seguir algumas regras:

1. retirá-la com trado amostrador ou com o auxílio de uma tábua para permitir o encaixe da amostra de maneira homogênea. Neste caso, não se deve enroscar o cilindro e nem causar grandes perturbações;

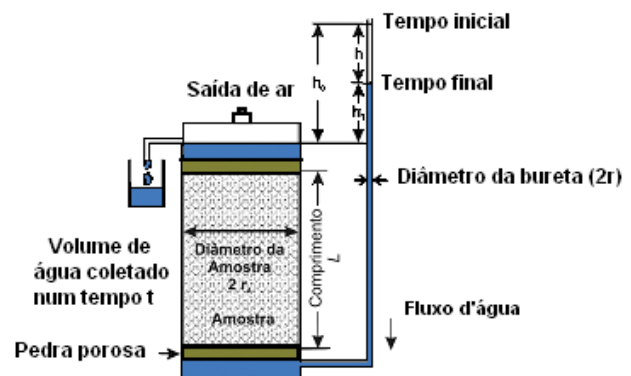
2. retirada a amostra, deve-se envolvê-la em filme PVC ou papel alumínio e, em seguida, colocá-la em um isopor, de modo que sua umidade seja mantida inalterada;

3. no laboratório, deve-se envolver uma de suas faces em morim, para evitar perda da amostra, e posteriormente colocá-la para saturar em uma bandeja, com água a $2/3$ da altura do cilindro.

Para a realização destes ensaios, as amostras semideformadas foram coletadas sob condições controladas citadas acima, mas mesmo assim essas amostras podem apresentar perturbações. Para este estudo, as amostras semideformadas foram coletadas ao lado das sondagens realizadas para os ensaios com o permeâmetro de Guelph (Figura 10), com a finalidade de obter a condutividade hidráulica de laboratório e compará-las. Foram coletadas 11



A



B

Figura 8 Esquema de um permeâmetro: (A) de carga constante e (B) de carga variável (adaptado de Kresic, 1997 apud Salgueiro, 2005).

amostras verticais para obter-se a condutividade hidráulica vertical e 4 amostras horizontais para a determinação da condutividade hidráulica horizontal. A localização dos pontos amostrados pode ser observada na Figura 6.



Figura 9 Coleta de amostra semideformada, em destaque o corpo de prova sendo coletado em um cilindro com 5 cm de comprimento e 20,4 cm² de área transversal.



Figura 10 Amostra semideformada coletada ao lado da sondagem realizada para o ensaio de Guelph.

Segundo Aguiar (2001), o permeâmetro de carga variável utiliza-se da diferença entre as cargas em um determinado intervalo de tempo. Nesse ensaio, a vazão (Q) é medida em uma bureta graduada de seção a , verificando-se o tempo (t) que a água leva para baixar de uma altura inicial (h_0) até uma altura final (h_f).

Nesta pesquisa optou-se pelo ensaio de carga variável, devido a grande concentração de sedimentos finos existente nos depósitos fluviais estudados.

4.3 Análise granulométrica

Além desses ensaios, a condutividade hidráulica também foi determinada por meio da curva granulométrica dos sedimentos paleogênicos da bacia de Volta Redonda, através do método de Hazen (1911 *apud* Fetter, 1994) – Equação 1.

As análises granulométricas foram baseadas na Norma Técnica de Folk (1980) e realizadas no Laboratório de Sedimentologia do Setor de Paleontologia e Estratigrafia do Departamento de Geologia da UFRJ. Como foram executadas sondagens para os ensaios de Guelph, foi possível dispor de amostras de cada litofácies do afloramento analisado.

O método de Hazen é aplicado a areias que contenham o d_{10} variando de 0,1 a 3,0 mm e a fórmula que se aplica a este método é:

$$(1) K = C (d_{10})^2$$

Onde: K = condutividade hidráulica [L / T]

d_{10} = diâmetro efetivo [L]

C = é um coeficiente baseado na tabela 2.

Uma restrição que se impõe para a utilização dessa fórmula é a de que o coeficiente de não uniformidade (CNU) seja menor que 5 (Fetter, 1994).

Foram construídos histogramas para apresentar a frequência granulométrica dos sedimentos e determinar a classe mais abundante da amostra, conhecida como classe modal. O histograma é uma ferramenta estatística usado para representar frequências de distribuição, estes diagramas esclarecem com rapidez as diferenças e semelhanças entre as amostras, facilitando a compreensão destas (Suguio, 1973). Para este propósito os resultados das análises foram compilados em tabelas de frequência, que mostram os intervalos de classes em mm e a porcentagem do peso total de cada classe.

MATERIAL	C
Areia muito fina, pobremente selecionada	40-80
Areia fina argilosa ou siltosa	40-80
Areia média, bem selecionada	80-120
Areia grossa, pobremente selecionada	80-120
Areia grossa, bem sortida, limpa	120-150

Tabela 2 Valor do coeficiente C de acordo com o material (Fetter, 1994).

5 Resultados

5.2 Ensaios Granulométricos

As características granulométricas revelaram que a maioria das litofácies são arenosas, apresentando elevado teor de sedimentos finos, variando de 8% a 25%, com exceção das amostras 5 e 10, sendo que a primeira é basicamente conglomerática e a última é predominantemente composta por sedimentos finos, apresentando 65% de argila. O afloramento estudado está exposto à erosão, consequentemente o feldspato (mineral abundante na área) apresenta alteração, esse pode ser o motivo do teor elevado de argila. Mas, em subsuperfície, este fato provavelmente não ocorrer, por não estar exposto diretamente aos efeitos intempéricos.

O método de Hazen não pôde ser aplicado neste estudo para estimar a condutividade hidráulica, pois através das curvas granulométricas foi possível verificar que nenhuma amostra possui diâmetro efetivo dos grãos (d_{10}) entre 0,1 e 3,0 mm (Tabela 3).

Na próxima tabela encontra-se o resultado da classe mais abundante de cada amostra, esta foi adquirida através de histogramas confeccionados com o resultado da análise granulométrica.

AMOSTRA	CLASSE MODAL	SELEÇÃO	DIÂMETRO EFETIVO (d_{10})
1	AM	Mal selecionado	0,0017
2	AF-AM	Mal selecionado	0,006
3	AG	Mal selecionado	0,001
4	AM-AF	Mal selecionado	< 0,001
5	Gr	Bem selecionado	0,002
6	AM-AG	Mal selecionado	< 0,001
7	AG-AM-Arg	Mal selecionado	< 0,001
8	AG-Arg	Mal selecionado	< 0,001
9	Arg	Moderadamente selecionado	< 0,001
10	Arg	Muito bem selecionado	< 0,001
11	AG	Moderadamente selecionado	< 0,001
12	AG-AM	Mal selecionado	< 0,001

Tabela 3 Resultados da classe modal, mediana, seleção e diâmetro efetivo referente a cada litofácies.

5.3 Ensaios de condutividade hidráulica obtidos *in situ* e em laboratório

A tabela 4 apresenta a comparação entre os resultados obtidos pelo Guelph e em laboratório (amostras verticais e horizontais).

Os valores de permeabilidade medidos em laboratório apresentaram de maneira geral, uma

ordem de magnitude menor que os determinados *in situ* (Permeâmetro de Guelph), conforme o esperado. Entretanto, alguns pontos obtiveram valores *in situ* próximos aos determinados em laboratório, ora na amostra vertical (ex.: ponto 2), ora na amostra horizontal (ex.: 3): nos pontos 3, 8 e 11, a condutividade hidráulica determinada em laboratório, através das amostras verticais, apresentou-se inclusive maior do que a obtida *in situ*. Isso pode estar associado ao efeito de impermeabilização da parede do furo durante a tradagem, intensificada pelos elevados teores de argila (variando de 12% a 19% aproximadamente) verificados nas três amostras.

No ponto 10, a condutividade hidráulica *in situ* (10^{-5} cm/s) apresentou-se duas ordens de magnitude maior que a obtida em laboratório (10^{-7} cm/s). Este resultado pode ser explicado pela quantidade de descontinuidades encontradas nesta litofácies Pl em campo.

Os valores da condutividade hidráulica saturada em laboratório podem ter sido subestimados em função da amostragem pouco representativa que pode conter uma porcentagem menor de macro e microporos conectados do que o solo dentro do contexto geral.

Os ensaios de condutividade hidráulica utilizando o permeâmetro de laboratório com amostras horizontais apresentaram de maneira geral duas ordens de magnitude menor que os ensaios realizados com amostras verticais. Não foi possível chegar a uma conclusão sobre este resultado, devido ao pouco número de amostras horizontais coletadas.

5.3.1 Relações entre a condutividade hidráulica e as fácies sedimentares

A tabela 4 apresenta os resultados calculados de condutividade hidráulica comparados às propriedades físicas para cada fácies sedimentar.

Fácies Alm: composta por areia média a fina, sua condutividade hidráulica variou entre 10^{-4} a 10^{-5} cm/s, podendo se considerada moderada a baixa.

Fácies Am_f: de acordo com a análise granulométrica, esta fácies é formada por areia fina a média, apresentando elevado teor de sedimentos

finos (aproximadamente 16%). Provavelmente esta argila é proveniente da alteração do feldspato. Segundo Marques (2006), ocorre rara porosidade intergranular sendo preenchida pela matriz argilosa. Isso explica os valores de permeabilidade encontrados variando de 10^{-4} a 10^{-8} cm/s, sendo considerada moderada a baixa.

Fácies Ac: constituída principalmente por areia média a muito grossa com matriz argilosa. A condutividade hidráulica desta fácies variou de 10^{-6} a 10^{-3} cm/s, e os baixos valores podem ser explicados pela presença da matriz argilosa; os valores elevados devido a elevada porosidade e conectividade alta a moderada entre os poros existentes em alguns pontos do afloramento.

Fácies Cch: de acordo com o histograma, esta litofácies é composta essencialmente por grânulos. Esta fácies apresentou condutividade hidráulica em torno de $7,95 \times 10^{-4}$ cm/s, valor menor do que o esperado. Isto pode ser explicado pela presença de sedimentos finos preenchendo os espaços vazios deixados pelos maiores.

Fácies Am₂: apresenta condutividade hidráulica baixa a moderada, variando de 10^{-5} a 10^{-3} cm/s. Esses valores podem ser explicados pela granulometria desta fácies que é composta por areia grossa a muito grossa, apresentando pouca matriz argilosa, e segundo Marques (2006) essa fácies possui porosidade elevada e conectividade moderada entre os poros.

Fácies Al: esse depósito apresentou condutividade hidráulica moderada a muito baixa, variando de 10^{-4} a 10^{-6} cm/s. Esses valores apresentam-se coerentes com o material que compõe esta fácies, formada basicamente por areia média a fina, apresentando matriz argilosa.

Fácies Pl: composta basicamente por silte e argila. Através do observado na literatura consultada, este material deveria apresentar condutividade hidráulica extremamente baixa, mas a permeabilidade encontrada variou de 10^{-5} a 10^{-7} cm/s, sendo considerá-la baixa a muito baixa. O valor 10^{-5} cm/s estimado no ensaio de Guelph, pode ser considerado elevado para este material, o que pode ser explicado pela quantidade de descontinuidades existentes nessa unidade.

Com base nas propriedades granulométricas e nos resultados de condutividade hidráulica, estimaram-se as possíveis hidrofácies existentes nos sedimentos paleogênicos da bacia de Volta Redonda (Figura 11).

6 Conclusões

Os ensaios de determinação da condutividade hidráulica apresentaram resultados satisfatórios e coerentes com as características do material que compõe as fácies sedimentares da área analisada. Não foi possível, contudo, realizar estimativas pelo método de Hazen, devido à baixa granulometria do material.

As análises granulométricas foram de fundamental importância para o entendimento da variação da condutividade hidráulica entre as fácies estudadas.

A Formação Pinheiral apresenta uma camada considerada de muito baixa permeabilidade, variando de 10^{-7} a 10^{-5} cm/s, mas sua base apresentou valores moderados a altos (10^{-4} a 10^{-3} cm/s). O topo da formação obteve o maior valor de condutividade hidráulica, em torno de 10^{-3} cm/s. Esta formação apresenta boas características para reservatório e deve-se levar em consideração a alta permeabilidade existente no topo da formação que funciona como meio de recarga do aquífero. Já a Formação Resende apresentou valores de condutividade hidráulica moderados a muito baixos, podendo considerá-la um reservatório pobre.

A partir dos resultados de condutividade hidráulica obtidos para as Formações Resende e Pinheiral, que variaram de 10^{-8} a 10^{-3} cm/s, pode-se concluir que os sedimentos paleogênicos que formam o afloramento analisado são aquíferos em geral pobres, com pequeno potencial hídrico, mormente considerando-se sua reduzida espessura. A exploração, particularmente em conjunto com o aquífero fraturado, pode apresentar localmente um bom prospecto.

Os resultados da condutividade hidráulica desta pesquisa foram obtidos em exposições aflorantes, esses resultados devem ser considerados como uma estimativa do que ocorre na subsuperfície,

uma vez que esta não deve apresentar alterações em seus materiais. Para obtermos resultados de permeabilidade da subsuperfície, recomenda-se a realização de ensaios do tipo *slug-test* nos poços encontrados próximos a área de estudo.

Recomenda-se a realização de estudos sobre hidrofácies, com a finalidade de caracterizar hidrogeologicamente os materiais sedimentares que compõem a Bacia de Volta Redonda, de modo a avançar no conhecimento do comportamento destas rochas como aquíferos.

AMOSTRAS	LITOFÁCIES	MODA	SELEÇÃO	PERMEABILIDADE DE GUELPH (cm/s)	PERMEABILIDADE DE LABORATÓRIO	
					VERTICAL (cm/s)	HORIZONTAL (cm/s)
1	Alm	AM	Mal selecionado	$1,64 \times 10^{-4}$	$1,44 \times 10^{-5}$	
2	Am1	AF-AM	Mal selecionado	$2,76 \times 10^{-4}$	$1,63 \times 10^{-4}$	$1,43 \times 10^{-8}$
3	Ac	AG	Mal selecionado	$7,34 \times 10^{-4}$	$1,75 \times 10^{-3}$	$1,22 \times 10^{-4}$
4	Ac	AM-AF	Mal selecionado	$2,06 \times 10^{-4}$	$1,89 \times 10^{-4}$	$1,92 \times 10^{-6}$
5	Cch	Gr	Bem selecionado	$7,95 \times 10^{-4}$	-----	-----
6	Ac	AM-AG	Mal selecionado	1×10^{-3}	$2,45 \times 10^{-4}$	-----
7	Am2	AG-AM-Arg	Mal selecionado	$9,26 \times 10^{-4}$	$2,91 \times 10^{-5}$	-----
8	Am2	AG-Arg	Mal selecionado	$4,23 \times 10^{-4}$	$1,30 \times 10^{-3}$	-----
9	Al	Arg	Moderadamente selecionado	$3,81 \times 10^{-4}$	$4,65 \times 10^{-5}$	$3,40 \times 10^{-6}$
10	PI	Arg	Muito bem selecionado	$5,4 \times 10^{-5}$	$2,27 \times 10^{-7}$	-----
11	Ac	AG	Moderadamente selecionado	$9,05 \times 10^{-5}$	$2,41 \times 10^{-3}$	-----
12	Am2	AG-AM	Mal selecionado	$3,33 \times 10^{-3}$	-----	-----

Tabela 4 Resultados calculados da condutividade hidráulica através de ensaios de Guelph e de laboratório relacionados às propriedades físicas.

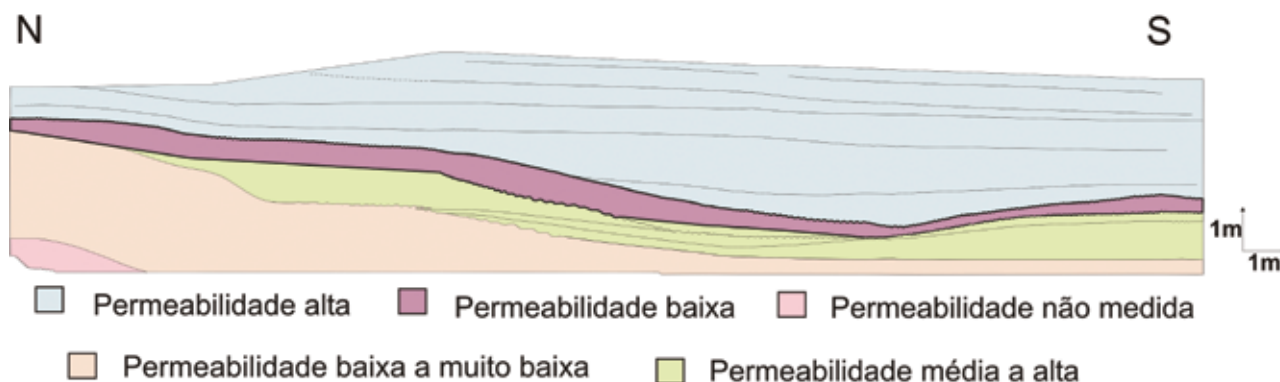


Figura 11 Estimativa das possíveis hidrofácies dos sedimentos fluviais paleogênicos da Bacia de Volta Redonda.

7 Agradecimentos

A Cláudio Cesar Souza Marques, Ghislaine Medeiros, Lucas Costa, André Negrão e Renato Ramos pelo apoio nas atividades de campo. Esse trabalho contou com o apoio da FUJB.

8 Referências

- Aguiar, B.A. 2001. *O emprego do permeâmetro de Guelph na determinação da permeabilidade do solo, de camadas de lixo e sua cobertura*. Programa de Pós-graduação da COPPE em Engenharia Civil COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, XVII, 90 p.
- Almeida, F.F.M. 1976. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 48: 15-26.
- Amador, E.S. & Castro, M.I.B. 1976. Depósitos neocenozóicos da bacia de Volta Redonda, RJ. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29. Ouro Preto, Sociedade Brasileira de Geologia, *Anais*, v.1, p.307-327.
- Bettini, C. (Coord). 2004. *Modelagem estratigráfica de reservatórios terrígenos: aplicação à avaliação do potencial hídrico da bacia de Resende (RJ)*. Relatório, UFRJ / CPRM / ON, Rio de Janeiro, 266 p.
- Bielschowsky, C. 2005. *Aplicação e comparação de métodos de campo para estimativa da condutividade hidráulica do solo*. Programa de Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Monografia, 82p.
- Cappuci, B.E.; Martins, M.A.; Mansur, L.K. & Monsores M.L.A. 2003. *Poços tubulares e outras captções de águas subterrâneas*. Niterói, Departamento de Recursos Minerais do Governo do Estado do Rio de Janeiro. 70p.
- Castro, F.G. ; Silva Jr., G.C. ; Pizani, T.C. & Silva, D.B. 2000. Caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica preliminar da bacia sedimentar de Resende - RJ. In: CONGRESSO MUNDIAL INTEGRADO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, I, 2000, Fortaleza - CE. *Anais do I Congresso Mundial Integrado de Águas Subterrâneas*, v. 1, p. 1-20.
- Ezzy, T.R.; Cox, M.E; Rourke, A.J. & Huftile, G.J. 2006. Groundwater flow modeling within a coastal alluvial plain setting using a high-resolution hydrofacies approach; Bells Creek plain, Australia. *Hydrogeology Journal*, 14: 675-688.
- Elrick, D. E.; Reynolds, W. D. & Tan, K. A. 1989. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analysis. *Groundwater Monitoring Review*, 9, 184-193.
- Fetter, C.W. 1994. *Applied hydrogeology*. New Jersey, Prentice Hall. 691p.
- Folk, R.L. 1980. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Texas, Hemphill. 170 p.
- Heilbron, M.; Valeriano, M.C.; Valladares, S.C. & Machado, N. 1995. A orogênese Brasileira no segmento central da Faixa Ribeira, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 25 (4): 249-266.
- Heilbron. M.; Pedrosa-Soares, A.C.; Campos Neto, M.C.; Silva, L.C.; Trouw, R.A.J. & Janasi, V.A. 2004. Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO; BARTORELLI, A.; DAL RÉ CARNEIRO, C. & BRITO NEVES, B.B. (ORGS.) *Geologia do Continente Sul-Americano – Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, p. 203-235.
- Marques, S.C.C. 2006. *Análise multiescalar de atributos sedimentares em depósitos fluviais paleogênicos na bacia de Volta Redonda, RJ*. Programa de Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Monografia, 37p.
- Melo, M.S.; Riccomini, C.; Campanha, G.A.C.; Miotto, J.A. ; Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Ponçano, W.L. & Gimenez, A.F. 1983. *Estudos geológico-tectônicos na Bacia de Resende (RJ) e sedimentos terciários de Volta Redonda (RJ) e Bacia de Taubaté (área de Cruzeiro-SP)*. Relatório 17.737, IPT, São Paulo, 124 p.
- Melo, M.S.; Riccomini, C.; Hasui, Y.; Almeida, F.F.M. & Coimbra, A.M. 1985. Geologia e evolução do sistema de bacias tafrogênicas continentais do sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 15 (3): 193-201.
- Melo, M.S.; Riccomini, C.; Almeida, F.F.M. & Hasui, Y. 1985. Sedimentação e tectônica da bacia de Resende – RJ. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 57 (4): 467-479.
- Miall, A.D. 1985. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Science Review*, 22: 261-308.
- Philip, J.R. 1985. Approximate analysis of the borehole permeameter in unsaturated soil. *Water*

- Resources Research*, 21 (7): 1025-1033.
- Pinto, S.C. 2002. *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*. São Paulo, Oficina de Textos. 355 p.
- Riccomini, C. 1989. *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 256 p.
- Riccomini, C.; Coimbra, M.A.; Sant'Anna, G.L.; Neto, B.M. & Valarelli, V.J. 1996. Argilominerais do paleolago Tremembé e sistemas deposicionais relacionados (paleógeno, Rift Continental do Sudeste do Brasil). *Revista Brasileira de Geociências*, 26 (3): 167-180.
- Riccomini, C.; Melo, M.S.; Carneiro, C.D.R.; Almeida, F.F.M.; Mioto, J.A. & Hasui, Y. 1983. Sobre a ocorrência de um derrame de ankaramito na Bacia de Volta Redonda (RJ) e sua importância na datação das bacias tafrogênicas continentais do sudeste brasileiro. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 4, LOCAL, 1983. *Boletim de Resumos*, Sociedade Brasileira de Geologia, 1: 23-24.
- Riccomini, C.; Sant'Anna, L.G. & Ferrari, A.L. 2004. Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; DAL RÉ CARNEIRO, C. & BRITO NEVES, B.B. (orgs.) *Geologia do Continente Sul-Americano – Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, p. 383-405.
- Salgueiro, S.R. 2005. *Aplicação e avaliação de metodologias laboratoriais e empíricas para a determinação da condutividade hidráulica de sedimentos*. Programa de Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Monografia, xi, 68 p.
- Sanson, M.S.R. 2006. *Sistemas Depositionais Aluviais e Tectônica Rúptil Cenozóica na Região de Volta Redonda (RJ) – Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, xvi, 142 p.
- Suguio, K. 1973. *Introdução à sedimentologia*. São Paulo, Edgard Blücher. 317 p.
- Trouw, R.A.J.; Heilbron, M.; Ribeiro, A.; Paciullo, F.V.P.; Valeriano, C.M.; Almeida, J.C.H.; Tupinambá, M. & Andreis, R.R. 2000. The central segment of the Ribeira belt, In: CORDANI, U.G.; MILANI, E.J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D.A. *Tectonic Evolution of South America*. 31st International Geological Congress, p. 287-310.
- Vieira, S. R. 1998. Permeâmetro: Novo aliado na avaliação de manejo do solo. *O Agrônomo*, 50: 32-33.