

APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS NA CARACTERIZAÇÃO DE MODELO DE CIRCULAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM AQUÍFEROS FRATURADOS E AVALIAÇÃO DE IMPACTOS HIDROGEOLÓGICOS DA CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS

Ana Maciel de Carvalho¹; José Luiz Albuquerque Filho²; Deborah Terrel³; Lauro Kasumi Dehira⁴;
Adalberto Aurélio Azevedo⁵

Resumo - O diagnóstico do potencial hidrogeológico de uma área em terrenos cristalinos requer a prévia caracterização estrutural das rochas que constituem o substrato geológico local. Essa investigação envolve, não só a caracterização geométrica detalhada dos sistemas presentes, como também uma análise cinemática para se definir as direções principais das deformações que os maciços sofreram em decorrência dos esforços de origem tectônica a que foram submetidos.

A análise integrada da densidade de lineamentos com a classe dos lineamentos permite inferir quais as regiões do maciço rochoso são mais propensas à maior circulação das águas subterrâneas e, por conseguinte, quais as possíveis interações e medidas a serem adotadas no caso da implantação de eventuais obras que elas atravessem (por exemplo, túneis ou outras escavações).

Apresenta-se proposta de aplicação de método de análise estrutural a partir de interpretação de imagens de satélite. Refere-se a método ainda experimental que requer aplicação integrada a todas as fases do projeto de obra, iniciando-se nas etapas de estudo de impactos ambientais, reavaliando-se e aferindo-se e apontando medidas preventivas, corretivas ou mitigadoras, na etapa de implantação das obras e se fazendo presente, como apoio ao monitoramento na etapa dos planos básicos ambientais que comumente são implantados após a conclusão das obras.

Abstract – The diagnostic of hydrogeological potential of an area in crystalline lands requires prior rock structural characterization that constitute the local geological substratum. This research involves not only the detailed geometric characterization of the present systems, as well as a kinematic analysis to define the main directions of the deformations that massive rock suffered as a result from efforts of tectonic origin that were submitted .

The integrated analysis about density of lineaments with class of lineaments allows to infer which regions of the rock mass are more prone to greater groundwater circulation and therefore what

¹ Geóloga, Ms. Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT, Av. Prof. Almeida Prado nº532, São Paulo, SP, CEP 05508-901. Tel.: (11) 37674936. E-mail: amaciel@ipt.br; ² Hidrogeólogo, Dr., Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT. E-mail: albuzeu@ipt.br.; ³ Geógrafa, Ma., Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT. E-mail: dterrel@ipt.br; Geólogo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT. E-mail: lkdehira@ipt.br; ⁵Geólogo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT, E-mail: azevedoa@ipt.br.

possible interactions and measures to be adopted in case of the implementation of any works they cross (eg , tunnels and other excavations).

This paper presents propost of method application of the structural analysis based on satellite images interpretation. Also, this refers a still experimental method that requires integrated application to all stages of the design work , beginning in the stages of study environmental impacts, is reassessing and gauging and pointing preventive , corrective or mitigating measures , in step implementation of the works and doing this , as support for the monitoring stage of basic environmental plans that are commonly deployed after completion.

Palavras-Chave – Geologia estrutural; Hidrogeologia; Túneis.

1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas ocorrem preenchendo e circulando nos espaços vazios existentes nos materiais de diferentes naturezas no subsolo, que constituem os solos (ou materiais inconsolidados em geral) ou rochas sedimentares e as rochas cristalinas (ígneas ou metamórficas). Os espaços vazios constituem a porosidade que é denominada de granular, para os dois primeiros casos ou de fratura (ou fissura ou fenda), para a segunda situação. Um caso particular diz respeito à porosidade cárstica ou de dissolução, típica de calcários sedimentares ou metamórficos.

A superfície dos continentes é formada, em sua grande parte, por rochas cristalinas. Essas rochas formam amplos cinturões pré-cambrianos em diferentes partes do mundo. De maneira mais restrita, apenas na porção mais superficial, constituída pelo solo ou outro material não consolidado, a água circula por entre os poros. A Figura 1, a seguir, mostra boco diagrama ilustrando o comportamento geral da circulação das águas subterrâneas em contexto de rochas cristalinas fissuradas.

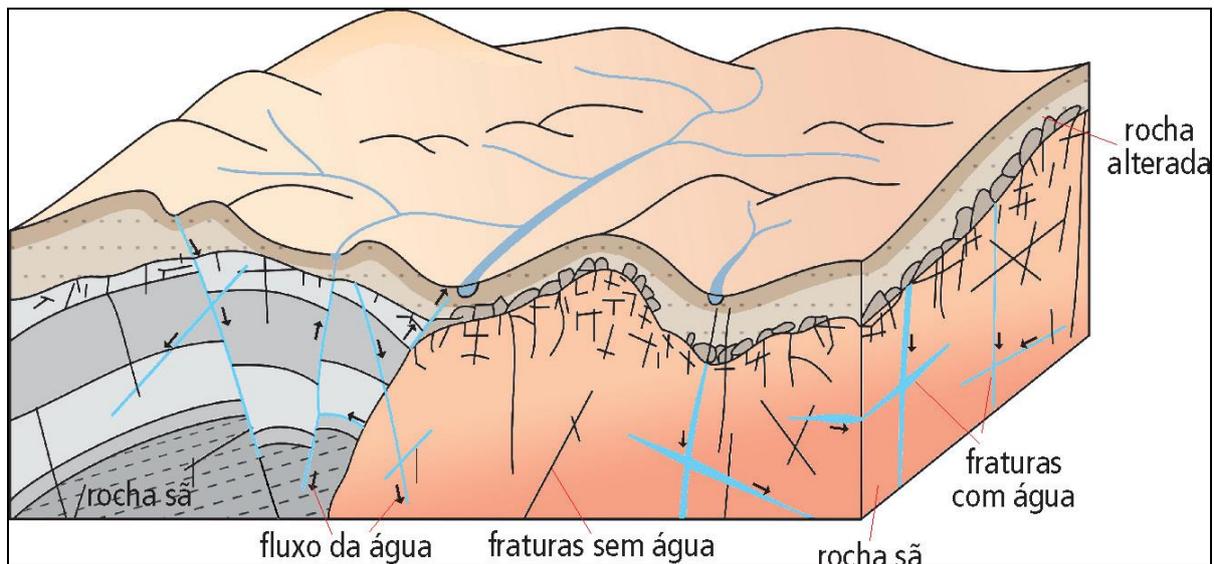


Figura 1 – Modelo hidrogeológico conceitual geral da circulação das águas em um sistema aquífero fraturado (Iritani & Ezaki, 2009).

No Brasil, as principais pesquisas em aquíferos fraturados são focadas em estudos voltados para a quantificação de reservas subterrâneas para atendimento de diferentes abastecimentos, ou seja, produção de poços com avaliação de vazão e capacidade específica utilizando-se fatores morfológicos e geológicos (Fernandes, 2008). A capacidade de produção dos poços é avaliada por meio da vazão (m^3/h), mas, principalmente, da capacidade específica ($m^3/h/m$), que significa a relação entre a vazão do poço (m^3/h) e o respectivo rebaixamento provocado no nível da água (m).

Entretanto, depreende-se de Neves (2005), que os estudos hidrogeológicos em rochas fraturadas são importantes, também, para atender a outras finalidades, quais sejam:

- Controle de migração de poluentes e contaminantes;
- Estimativas de quantidades de fluidos em fontes geotermiais naturais;
- Desenvolvimento de reservatórios de gás e petróleo;
- Construção de túneis e de cavidades subterrâneas; e
- Resolução de problemas geotécnicos, tais como estabilidade de taludes, estabilização de minas subterrâneas e desenvolvimento de sistemas de rebaixamento do nível d'água.

Estudos de IPT (2002), no Sistema Aquífero Cristalino da região da cidade de Campinas, SP, avaliaram a relação entre a produtividade dos poços e os diversos condicionantes geológico-estruturais, sendo fatores determinantes, a unidade geotectônica, o tipo litológico, a posição estratigráfica, a distância entre poços e lineamentos (os poços mais produtivos eram aqueles mais próximos de lineamentos) e, também, fatores condicionantes, como a posição morfoestrutural (as regiões de baixa e intermediária morfoestruturas relacionam-se com as maiores produtividades de poços), a densidade do fraturamento (as áreas de maior densidade são as regiões de maior potencial para locação de poços) e as direções de fraturamentos.

Para se diagnosticar o potencial hidrogeológico de uma área em terrenos cristalinos faz-se necessária a prévia caracterização estrutural das rochas que constituem o substrato geológico local. Essa investigação envolve, não só a caracterização geométrica detalhada dos sistemas presentes, como também uma análise cinemática para se definir as direções principais das deformações que os maciços sofreram em decorrência dos esforços de origem tectônica a que foram submetidos.

2. ANÁLISE ESTRUTURAL

Para conhecer o potencial hidrogeológico de aquíferos fraturados é essencial a caracterização das estruturas presentes nas rochas, tais como foliações e fraturas, sendo certamente as fraturas abertas os caminhos preferenciais de armazenamento e circulação de água nesse tipo de aquífero.

Uma das maneiras de se analisar as estruturas de modo espacializado é por meio da identificação, cartografia e análise dos lineamentos geológicos, que se referem a características do terreno em superfície e que representariam estruturas geológicas observáveis a partir de feições morfológicas (drenagens, mudanças bruscas no comportamento de relevos e arranjos espaciais de topos de morro) identificáveis em fotos aéreas ou imagens de satélite de sensores ópticos ou de radares.

A execução da análise estrutural é efetuada segundo quatro etapas distintas: 1) Extração de lineamentos; 2) Classificação de lineamentos; 3) Elaboração do mapa de densidade de lineamentos; e 4) Elaboração do mapa de Condicionamento Estrutural à Circulação de Água. Apresenta-se a seguir a descrição de atividades envolvidas em cada uma dessas etapas.

Extração de lineamentos

Inicialmente, os lineamentos são extraídos por meio de interpretação de imagem de satélite, utilizando-se o recurso de sombreamento de relevo, gerado a partir do Modelo Digital do Terreno (MDT).

Em seguida, utilizando-se dos recursos de geoprocessamento, são computadas a extensão total de cada lineamento e sua orientação (em Azimute Geográfico ou Verdadeiro), bem como são geradas rosáceas das orientações obtidas.

Classificação dos lineamentos

A classificação dos lineamentos refere-se ao potencial para a possibilidade de fluxos de águas subterrâneas no maciço rochoso fraturado, considerando-se a orientação e a extensão dos lineamentos.

Em relação à orientação, é importante pesquisar previamente acerca de estudos que identifiquem, em escala regional, a direção de tensão horizontal máxima, a partir da qual podem ser geradas estruturas paralelas que tenderiam a estar mais abertas, favorecendo o fluxo de água.

Dessa forma, podem ser consideradas três classes de direção de lineamentos, cujos pesos representam a favorabilidade das descontinuidades à condução de água, sendo o índice 1 correspondente à menor favorabilidade e o índice 3, maior favorabilidade.

Em relação à extensão, considera-se simplesmente que lineamentos mais longos representariam estruturas mais significativas e, portanto, teriam a maior propensão de conduzir a água com maior facilidade, pois, de certa forma, corresponderiam às maiores áreas de recarga, uma vez que, quase sempre, estão associados a baixos morfoestruturais. Assim sendo, podem ser criadas três classes de extensão que teriam representatividade estatística, frente ao universo de lineamentos.

Desse modo, as duas variáveis são combinadas em uma matriz, de maneira a se estabelecer cinco categorias, ou seja, de menor para maior significância em relação à circulação da água (Quadro 1).

		Comprimento dos Lineamentos (m)		
		A	B	C
Direção dos Lineamentos (Azimutes)	a	1	2	3
	b	2	3	4
	c	3	4	5

Quadro 1 – Matriz de classificação de lineamentos

Em seguida, para cada lineamento, deve ser gerado um *buffer* de 20 m (uma área de influência a partir da linha central), pois tais lineamentos não se configuram apenas como uma estrutura de um único elemento, mas correspondem, quase sempre, a um feixe de fraturas paralelas ao lineamento e, desse modo é possível se configurar com maior representatividade a realidade estrutural local.

Densidade de lineamentos

A terceira etapa da análise compreende a avaliação da densidade de lineamentos, cuja importância reside no fato de que regiões com maior densidade de lineamentos devem corresponder a regiões onde o maciço rochoso deve apresentar fraturamento mais intenso. Sendo assim, áreas com maior densidade de lineamentos representam locais do maciço rochoso onde há maior probabilidade de fluxos mais intensos de águas subterrâneas.

Do ponto de vista geológico-geotécnico, áreas com maior densidade de lineamentos podem ser interpretadas como zonas de maciço mais fraturado e, portanto, com características geomecânicas mais pobres.

Adicionando-se a essa informação a classificação de lineamentos, é possível identificar áreas mais alteradas do maciço rochoso, uma vez que zonas fraturadas associadas a estruturas com maior

favorabilidade aos fluxos de água tendem a se alterar com maior intensidade, gerando condições geomecânicas ainda mais pobres.

Inicialmente, a região estudada pode ser subdividida em células com determinada área e, para cada célula, deve ser calculada a densidade de lineamentos, sendo expressa pela extensão total de lineamentos/área, em cada célula da malha constituída.

Em seguida, os valores das densidades de lineamentos são atribuídos em relação ao centro de cada célula e interpolados pelo método da krigagem, gerando-se o mapa de densidade de lineamentos.

3. RESULTADOS

A análise integrada da densidade de lineamentos com a classe dos lineamentos permite inferir quais as regiões do maciço rochoso são mais propensas à maior circulação das águas subterrâneas e, por conseguinte, quais as possíveis interações e medidas a serem adotadas no caso da implantação de eventuais obras que elas atravessem (por exemplo, túneis ou outras escavações).

A geração desse mapa baseia-se no fato de que, quanto mais elevada for a densidade de lineamentos, maior a probabilidade do maciço rochoso se apresentar mais fraturado. Se nessas regiões ocorrerem lineamentos que representam maior favorabilidade à circulação da água, são reunidos indícios que sugerem quais as regiões do maciço rochoso cujas características estruturais condicionariam maior fluxo d'água subterrânea ou, senão, as regiões com maior probabilidade de circulação de água, configurando assim, um condicionamento estrutural à circulação das águas subterrâneas.

Desse modo, a partir da integração dessas informações, o maciço rochoso é subdividido em cinco classes de *Condicionamento Estrutural à Circulação de Água*, sendo a Classe 1 definida como *Condicionamento Estrutural à Circulação de Água Insignificante* e a Classe 5 como *Condicionamento Estrutural à Circulação de Água Muito Alto*, sendo as classes intermediárias, 2, 3 e 4, classificadas como *Baixo, Médio e Alto Condicionamento Estrutural à Circulação da Água*, respectivamente. Sendo assim, é possível analisar as interferências e impactos das obras em túneis.

A Figura 2, a seguir, se refere a uma área situada na região da cidade de São Paulo, cujo arcabouço geológico corresponde a terrenos cristalinos e na qual estava projetada a construção de um túnel rodoviário. O local de exemplo corresponde a uma área de cabeceiras de drenagem, com a descarga de base do aquífero cristalino condicionando o escoamento superficial a partir de nascentes, mostrando-se com tendência potencial de sofrer influências com a implantação das escavações do túnel e seus emboques.

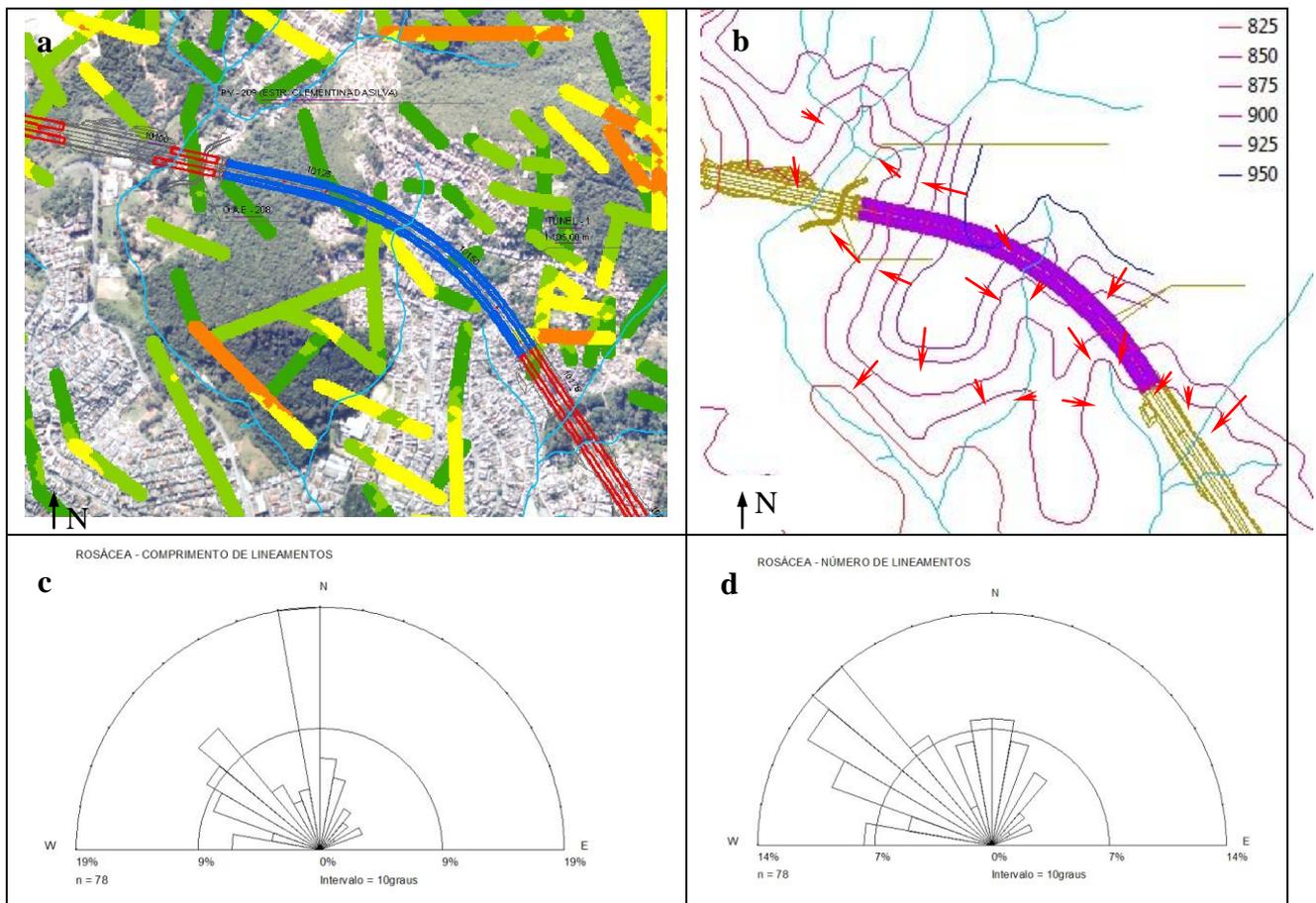


Figura 2 – Lineamentos e potenciometria na região de um túnel rodoviário na região da cidade de São Paulo. a) Mapa de Condicionamento Estrutural à Circulação da Água; b) Mapa potenciométrico (as setas vermelhas representam as direções principais dos fluxos subterrâneos); c) Rosácea do comprimento de lineamentos; e d) Rosácea do número de lineamentos.

O método de trabalho ora proposto foi aplicado, a partir do desenvolvimento das atividades necessárias para a caracterização da geologia estrutural e os resultados são descritos na legenda da Figura 2. O Quadro 2, por sua vez, apresenta análise dos possíveis impactos hidrológicos e hidrogeológicos decorrentes da construção das obras.

<p>Análise da Hidrografia Local</p>	<p>O túnel está localizado na bacia de um rio de expressão regional. Próximo ao emboque leste há uma cabeceira de drenagem e duas drenagens perenes. Na porção central do túnel é observado uma drenagem intermitente de direção NNE e no emboque oeste há uma drenagem perene de direção NE.</p>
<p>Análise Hidrogeológica Local</p>	<p>De modo geral a região do túnel apresenta Baixo Condicionamento Estrutural à Circulação de Água. Em trecho do túnel onde ocorre morfologia superficial de uma sela topográfica, se refere, também, a região que corresponde ao divisor de água local e área de recarga local do aquífero e é observada estrutura de Médio Condicionamento Estrutural e no emboque leste, uma estrutura de Médio a Alto Condicionamento Estrutural. Os emboques leste e oeste estão localizados em área de descarga natural do aquífero.</p>
<p>Análise Preliminar dos Impactos</p>	<p>No emboque oeste a cota potenciométrica é de 850 m, próxima a cota do túnel (aproximadamente 835 m). No emboque leste é Médio a Alto Condicionamento Estrutural à Circulação da Água próximo à cabeceira de drenagem. No trecho há possibilidade de redução de vazões de nascentes e recalques no terreno podem ser induzidos pelo rebaixamento do lençol freático.</p>

Quadro 2 – Avaliação preliminar dos impactos hidrogeológicos no entorno do túnel mostrado na Figura 2.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método ora proposto mostra boas potencialidades como ferramenta que se utiliza de dados e informações sobre maneira indiretas, tanto para a caracterização do comportamento da circulação das águas subterrâneas em aquíferos fraturados, como para avaliação de possíveis impactos decorrentes de escavações subterrâneas nesses aquíferos. E, por conseguinte, indicar medidas a serem adotadas no projeto executivo da obra, que possibilitem prevenir, corrigir ou mitigar eventuais impactos previstos.

A análise integrada da densidade de lineamentos com a classe dos lineamentos permite inferir quais as regiões do maciço rochoso são mais propensas à maior circulação das águas subterrâneas e, por conseguinte, quais as possíveis interações e medidas a serem adotadas no caso da implantação de eventuais obras que elas atravessem (por exemplo, túneis ou outras escavações).

Ressalta-se que se refere a método ainda experimental que requer aplicação integrada a todas as fases do projeto de obra, iniciando-se nas etapas de estudo de impactos ambientais, reavaliando-se e aferindo-se e apontando medidas preventivas, corretivas ou mitigadoras, na etapa de implantação e se fazendo presente, como apoio ao monitoramento na etapa dos planos básicos ambientais que são implementados comumente após a conclusão das obras.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

NEVES, M. A. O estudo integrado aplicada à exploração de água subterrânea na serra do Rio undi aí - SP. Tese de doutoramento Instituto de Geociências e Ciências exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 200 p.

IRITANI, M.A.; EZAKI,

Sobre a utilização integrada da geologia e da hidrogeologia na exploração de água subterrânea: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. Revista do Instituto Geológico, 29(1): 49-72.

Uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. Revista do Instituto Geológico, 29(1): 49-72.

uma revisão dos condicionantes geológicos

e dos métodos de investigação. Revista do Instituto Geológico, 29(1): 49-72.