

MODELAGEM DOS FLUXOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NA REGIÃO METROPOLITANA DE JOÃO PESSOA (PB) UTILIZANDO FERRAMENTAS DE HIDROLOGIA EM SIG

FILIPE BIAGGIONI QUESSADA GIMENES
EESC/USP – São Carlos/SP - Brasil
fibiaggioni@gmail.com

OSWALDO AUGUSTO FILHO
EESC/USP – São Carlos/SP - Brasil
oafilho@sc.usp.br

WANESSA CARTAXO SOARES
EESC/USP – São Carlos/SP - Brasil
wanessacs@gmail.com

RESUMO ABSTRACT

Este trabalho mostra o resultado da aplicação de algumas ferramentas computacionais de hidrologia disponíveis em um programa de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Elas possibilitam a modelagem dos fluxos de água subterrânea, permitindo prever sua dinâmica e simular vazamentos de poluentes. Os estudos foram desenvolvidos na região metropolitana de João Pessoa (PB), utilizando mapa topográfico digital na escala de 1:10.000, com curvas de nível em intervalos de 5 metros e pontos cotados em metros. Os dados de profundidade de nível d'água subterrânea foram obtidos a partir de furos de sondagem à percussão. Os resultados obtidos permitiram avaliar preliminarmente o desempenho dessas ferramentas, que podem ser úteis em estudos e ações de gestão ambiental dos recursos hídricos subterrâneos.

Palavras-Chave: Fluxo hídrico subterrâneo, Sistema de Informações Geográficas – SIG, Ferramentas de Hidrologia.

This paper studies and applies some computer hydrology tools available in a Geographical Information System (GIS) software. They can be able modeling groundwater flow, allowing to predict its dynamics and to simulate the leakage of pollutants. The studies were developed in the metropolitan region of João Pessoa (PB), using digital topographic map at the scale of 1:10,000, with topographic contours in intervals of 5 meters and spot elevations rated in meters. The water level depth data were obtained from percussion boreholes. The obtained results provided to evaluate preliminarily the performance of these tools, which can be useful in studies and actions of environmental management of the groundwater resources.

Keywords: Groundwater Flow, Geographical Information System – GIS, Hydrology Tools.

1 INTRODUÇÃO

De maneira simplificada, toda água que ocupa vazios em formações rochosas ou no regolito é classificada como água subterrânea. A infiltração

é o processo de maior importância para a recarga de água no subsolo e o volume e velocidade em que ela ocorre depende de vários fatores. Unidades rochosas ou de sedimentos, porosas e permeáveis, que armazenam e transmitem volumes

significativos de água subterrânea passíveis de serem explorados pela sociedade são chamadas de aquíferos. O estudo dos aquíferos visando à exploração e proteção da água subterrânea constitui um dos objetivos mais importantes da hidrogeologia (Teixeira et al., 2003).

Os aquíferos são classificados em função da pressão das águas em suas superfícies limítrofes superior e inferior, e também em função da capacidade de transmissão de água destas camadas. O aquífero livre (ou freático) possui como limite superior uma superfície freática, na qual todos os pontos se encontram submetidos à pressão atmosférica (Feitosa & Manoel Filho, 2000).

O fluxo de água através de aquíferos, a maioria dos quais é um meio poroso natural, pode ser expresso pela conhecida Lei de Darcy, mostrada na equação (1) (Todd, 1959), desenvolvida pelo engenheiro francês Henry Darcy, em 1856. Seu experimento se baseou na medição da vazão de água Q com um cilindro preenchido por material arenoso, para diferentes gradientes hidráulicos. O fluxo de água pelo cilindro (definido como vazão específica - q) para cada gradiente foi calculado pela relação entre a vazão Q e a área A de seção do cilindro.

$$q = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

Darcy concluiu que a vazão de escoamento era proporcional à seção transversal do cilindro, à diferença de cargas hidráulicas entre os dois pontos de medição e inversamente proporcional a distâncias desses dois pontos (Feitosa & Manoel Filho, 2000).

O fluxo da água na zona saturada (poros totalmente preenchidos por água) depende do potencial hidráulico, e os contaminantes podem espalhar-se por grandes áreas, cobrindo longas distâncias, após períodos de tempo variável. Caracterizam-se assim as plumas de contaminação com concentrações variáveis, no espaço e no tempo, dependendo das condições hidrogeológicas locais (Tressoldi & Consoni, 1994). Os mecanismos que atuam no transporte de um poluente em um meio poroso são: fluxos advectivo, dispersivo e difusivo; interações entre sólido e soluto; reações químicas; e fenômenos de decaimento (Feitosa & Manoel Filho, 2000).

A pesquisa relacionada a este artigo envolveu a modelagem dos fluxos superficiais e subterrâneos em uma área de estudo contida na região metropolitana de João Pessoa (PB), perfazendo uma área total de 208,61 km² e 13 mapas topográficos na escala 1:10.000, com curvas de nível em intervalos de 5 metros, pontos cotados em metros e a rede de drenagem cartografada nestes mapas.

O trabalho apresentado neste artigo aplica e analisa quatro ferramentas de hidrogeologia subterrânea disponíveis no Sistema de Informação Geográfica - SIG ArcMap 9.1 (ESRI, 2010), são elas: 1) *Darcy Flow* (fluxo de Darcy); 2) *Darcy Velocity* (velocidade de Darcy); 3) *Particle Track* (traçado de partícula); 4) *Porous Puff* (meios porosos). As modelagens foram realizadas em uma bacia na área urbana, contida na área de estudo descrita, contendo 26 sondagens à percussão realizadas durante o período chuvoso da área de estudo, para que os valores de profundidade de nível d'água obtidos nestas sondagens refletissem a mesma condição pluviométrica, de forma a gerar uma superfície condizente com a realidade. Vale ressaltar que todas as modelagens aplicadas consideraram apenas o aquífero livre, em função das profundidades de nível d'água obtidas pelas sondagens a percussão.

Os resultados obtidos permitiram avaliar preliminarmente o desempenho destas ferramentas, que podem ser úteis em estudos e ações de gestão ambiental dos recursos hídricos subsuperficiais, especialmente em áreas contaminadas. Os estudos realizados fizeram parte de pesquisas de iniciação científica e de doutorado.

2 MÉTODO

2.1 Etapas de Trabalho

O método utilizado no presente trabalho consistiu basicamente nas seguintes etapas:

- Planejamento: nesta etapa foi feita a definição dos objetivos da pesquisa, bem como realizada uma pesquisa bibliográfica preliminar e foi estabelecido o método e as principais atividades a serem executadas;
- Revisão Bibliográfica: foi realizada a revisão bibliográfica sistemática sobre os temas técnico-científicos principais abordados pelo estudo (conceitos gerais sobre a dinâmica da

água de subsuperfície, ferramentas de análise desta dinâmica utilizando SIG) a fim de possibilitar embasamento teórico para aplicação das ferramentas;

- c) Levantamento de dados: foi feita a inserção das informações no banco de dados a fim de constituir-se a base topográfica. Essas informações são topográficas básicas (curvas de nível, pontos cotados e drenagens) e níveis de água subterrânea, obtidos a partir de 26 furos de sondagem. Além de dados levantados na literatura de espessura saturada, porosidade efetiva e transmissividade das formações existentes na área de estudo;
- d) Ensaio de aplicação das ferramentas: tendo os dados previamente levantados foi possível aplicar as ferramentas de dinâmica das águas de subterrânea, que estão disponíveis no software de SIG *ArcMap 9.1* (ESRI, 2010);
- e) Análise dos resultados: após aplicação das ferramentas de modelagem do SIG, os resultados obtidos puderam ser avaliados em função do que era esperado; e
- f) Conclusões: com os resultados avaliados foi possível elaborar as conclusões, evidenciando potenciais aplicações e possíveis limitações das principais ferramentas utilizadas.

O plano de informação básico para aplicação das ferramentas foi o da superfície freática, que foi obtido a partir dos dados dos furos de sondagem a percussão. Por esse motivo, é importante ressaltar que esses dados apresentam algumas limitações como a quantidade e distribuição das sondagens na área, além da possibilidade de algumas medições do nível d'água não refletirem a condição de estabilização deste nível.

2.2 Técnicas Aplicadas

As quatro ferramentas de hidrologia subterrânea (Tabela 1), anteriormente citadas, foram aplicadas gerando resultados que permitiram visualizar a dinâmica dos fluxos de água subterrânea (na zona saturada). A seguir será descrito o método de aplicação dessas ferramentas.

Primeiramente, foi necessário gerar um raster (arquivo matricial) contendo a superfície freática, um raster contendo valores da espessura saturada, um raster com valores de porosidade efetiva e outro com valores da transmissividade do aquífero (todos os rasters de entrada tinham o mesmo tamanho de célula). Estas são as entradas para utilização da primeira ferramenta *Darcy Flow*, que calcula o balanço do volume residual para cada célula. A ferramenta considera um fluxo constante dentro do aquífero a ser modelado.

Em seguida, aplicou-se a ferramenta *Darcy Velocity*, que utiliza as mesmas entradas da ferramenta descrita anteriormente e retorna os grids contendo a direção e magnitude do fluxo. Esses dois resultados foram combinados para gerar o campo de vetores de fluxo.

O passo seguinte foi inserir pontos de interesse na área para simular a trajetória que uma partícula saindo desses pontos descreveria. Para isso foi utilizada a ferramenta *Particle Track* que recebeu como entrada os rasters de magnitude e direção de fluxo gerados anteriormente, além das coordenadas espaciais do ponto de interesse, neste caso, foram inseridos dois pontos. O algoritmo da ferramenta utiliza um esquema previsor-corretor para prever a posição futura de uma partícula

Tabela 1 – Ferramentas de análise hidrológica disponíveis no SIG ArcMap9.1.

Ferramentas	Descrição
<i>Darcy Flow</i> (Fluxo de Darcy)	Calcula o balanço de volume residual de água subterrânea (diferença entre o fluxo que entra e o que sai) para o regime de fluxo constante em um aquífero.
<i>Darcy Velocity</i> (Velocidade de Darcy)	Calcula o vetor velocidade da água subterrânea para cada célula utilizando a Lei de Darcy.
<i>Particle Track</i> (Traçado de Partícula)	Calcula o caminho e o tempo de viagem de uma partícula através de um campo de velocidade para um dado local de início, determinando a sua localização futura. Esta ferramenta gera dados matriciais e vetoriais, pois gera uma série de segmentos de linhas (vetores) de uma malha de dados (matriz).
<i>Porous Puff</i> (Meios Porosos)	Calcula a dispersão bidimensional de um poluente em um meio poroso uniforme, para uma fonte de poluição instantânea. Utiliza-se da equação de advecção-dispersão (Bear, 1972; Freeze e Cherry, 1979; Marsily, 1986). Os resultados produzidos por essa ferramenta são altamente idealizados e são adequados para uma estimativa aproximada da direção e características do transporte do poluente.

Fonte: ESRI(2010)

baseado no campo local de velocidade de fluxo, interpolado do centro da célula mais próxima. Gerou-se também, um polígono contendo a trajetória descrita pela partícula. Para utilizar essa ferramenta foi necessário alocarem-se pontos de interesse, a partir dos quais foi determinado o caminho da partícula.

Finalmente, aplicou-se a ferramenta *Porous Puff* que recebe como entrada o arquivo gerado pela ferramenta *Particle Track*, bem como os rasters de porosidade efetiva e de espessura saturada, além da massa de contaminante introduzida. Essa ferramenta permite traçar a pluma do contaminante em diferentes intervalos de tempo.

3 RESULTADOS E ANÁLISE

3.1 Darcy Flow (Fluxo de Darcy)

Para gerar o arquivo matricial (raster) contendo informações da superfície freática foram utilizados os dados de nível de água subterrânea de furos de sondagem. A partir dos valores de nível d'água dos 26 furos de sondagem existentes na área de interesse, foi possível interpolar uma superfície d'água subterrânea utilizando a ferramenta

existente chamada *Topo To Raster*. O processo é semelhante ao da geração de um Modelo Digital de Elevação (MDE), a partir da interpolação de cotas topográficas conhecidas. O resultado obtido foi considerado dentro do esperado, com as cotas mais altas do nível freático coincidindo, aproximadamente, com as cotas mais altas do terreno.

Para verificar a consistência do resultado, além da análise visual também foi feita uma subtração entre o MDE e a superfície gerada, utilizando a ferramenta *Single Map Algebra*. Valores negativos representam pontos que o nível d'água encontra-se acima do terreno, isso só deveria ocorrer nas drenagens. De fato, o resultado, exibido na Figura 1 (recorte do mapa gerado), evidenciou que resultados negativos até valores próximos a um ocorrem nas proximidades das drenagens, indicando um resultado consistente com a realidade.

Para gerar os arquivos matriciais (rasters) contendo valores de espessura saturada, porosidade efetiva e transmissividade, foi necessário consultar a bibliografia para encontrar valores adequados para a formação que se encontra na área. São elas: a Formação Barreiras e a Formação de Depósitos Quaternários. Os valores adotados desses parâmetros foram sintetizados, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Valores máximos, médios e mínimos dos parâmetros de entrada.

Formação	Espessura Saturada (m)	Porosidade Efetiva %	Transmissividade (m ² /s)
Barreiras	84	5	0,0046
Barreiras	73	5	0,00396
Barreiras	62	5	0,0017
Depósitos Quaternários	80	10	0,0316
Depósitos Quaternários	50	10	0,007
Depósitos Quaternários	20	10	0,000019

*Adaptado de Monteiro (2002).

Nota-se que foram utilizados valores médios, mínimos e máximos encontrados na bibliografia a fim de permitir uma comparação entre os resultados obtidos para os diferentes valores. Foi também necessário admitir que esses valores são constantes ao longo de cada unidade geológica, ou seja, que não variam verticalmente ou horizontalmente dentro da mesma unidade. Esses valores

foram inseridos na tabela de atributos do tema já existente "unidades geológicas", e em seguida foi utilizada a ferramenta *Polygon To Raster* dentro de *Conversion Tools* para criar o arquivo matricial (raster) contendo os valores do parâmetro de interesse. Esse procedimento foi feito para todos os valores exibidos na Tabela 2. Criaram-se assim, os arquivos matriciais necessários para entrada.

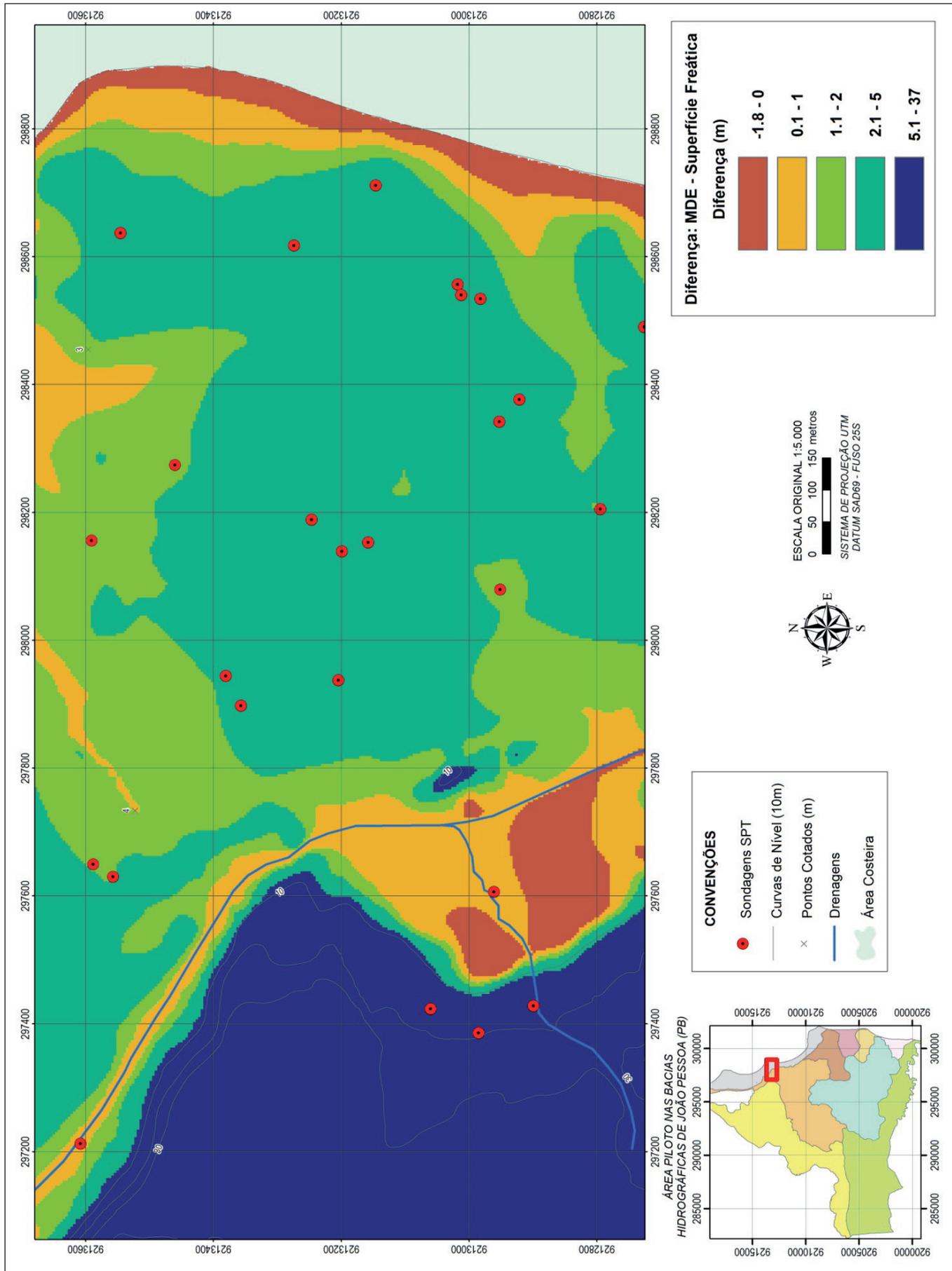


Figura 1 - Diferença entre o MDE e a superfície freática.

Finalmente, foi possível aplicar a ferramenta *Darcy Flow* que calculou o volume residual para cada célula do arquivo matricial (pixel). Como os cálculos são executados através de cada uma das quatro paredes da célula independentemente, é possível que mais ou menos água flua para dentro ou fora de uma célula, resultando em um valor positivo ou negativo de volume residual. Um raster de entrada consistente, sem poços de bombeamento, infiltrações ou vazamentos deve produzir pequenos residuais, próximos à zero. Altos valores residuais indicam que o raster da superfície freática não está adequado com o respectivo raster de transmissividade, porosidade e espessura saturada. Se isso ocorrer, os dados de

entrada são inconsistentes e produzem resultados sem significado.

Neste caso, o residual obtido foi na maior parte da área próximo a zero conforme ilustrado na Figura 2 (recorte do mapa gerado). Se comparados aos resultados obtidos por Oliveira & Augusto Filho (2008), os obtidos na presente pesquisa podem ser considerados mais consistentes, pois os valores foram mais uniformes em toda a área (e próximos de zero). Tal fato pode ser justificado pela existência de mais furos de sondagem na área modelada nesta pesquisa, que permitiram a obtenção de mais dados de nível d'água, resultando em uma interpolação mais condizente com a realidade.

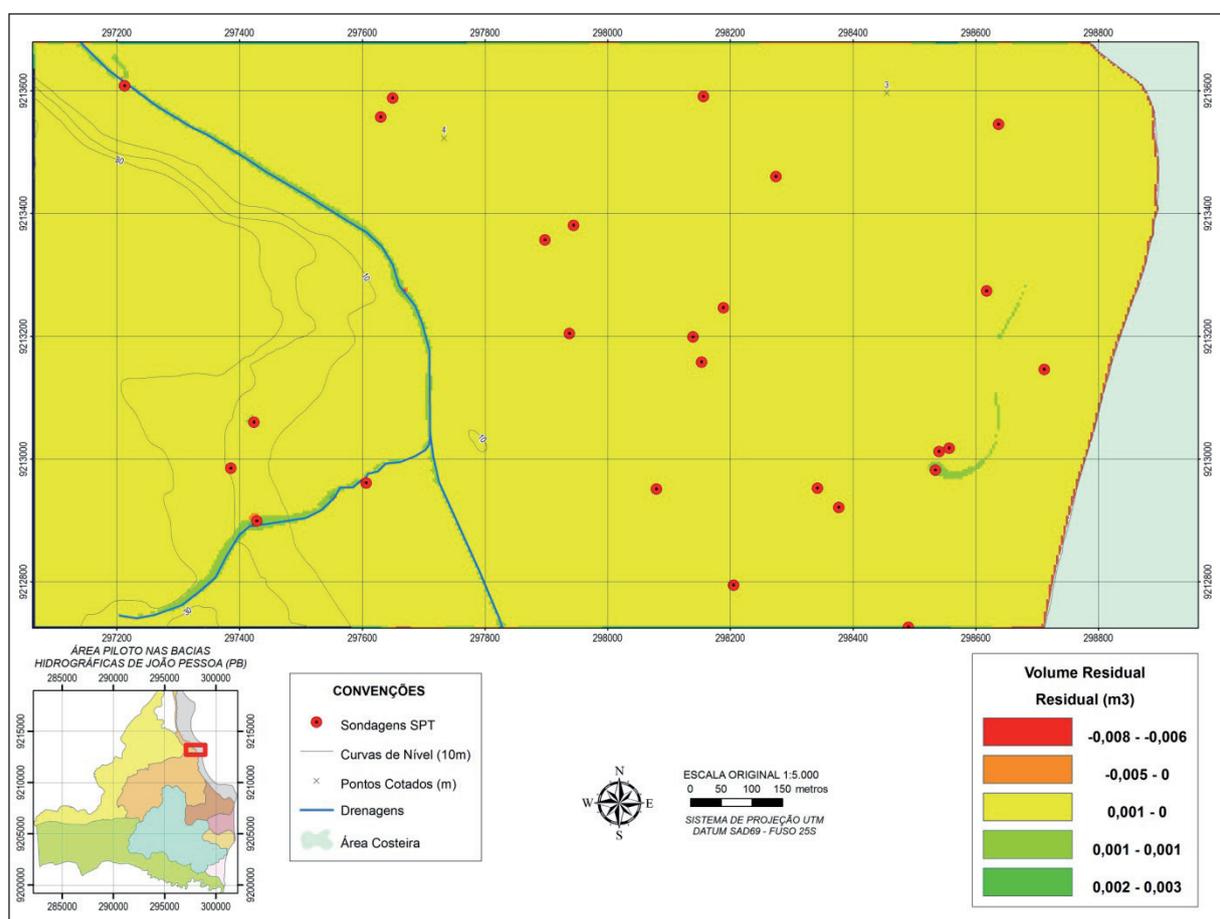


Figura 2 – Valores de volumes residuais.

Para analisar qualitativamente os resultados de residual obtidos, foi feita uma comparação entre os valores de residual com o valor da vazão que sai de cada pixel, que pode ser obtida através do raster de magnitude de fluxo que foi gerado na ferramenta que será descrita no próximo item. Para

obter a vazão que sai de cada pixel, basta multiplicar o arquivo com valores de magnitude pela área de cada pixel (no caso 16 m²) utilizando para isso a ferramenta *Single Map Algebra*. Utilizando essa mesma ferramenta calculou-se a porcentagem do residual em relação à vazão que sai de cada pixel.

Para facilitar a visualização do resultado, foi utilizada a ferramenta *Calculate Areas* de modo a obter-se a porcentagem em área de cada faixa de erro. Observou-se que predominam valores de erro entre 1 e 5%, e em segundo lugar valores de erro até 1%, sendo que essas duas faixas principais somadas ocupam, aproximadamente 70% da área total, conforme apresentado na Figura 3. Como o fluxo de água subterrânea não é contínuo e constante, pois existem pontos de vazamentos e infiltrações, torna-se impossível obterem-se residuais nulos em 100% da área. Tal fato justifica as regiões onde o residual foi superior a 5% da vazão de saída.

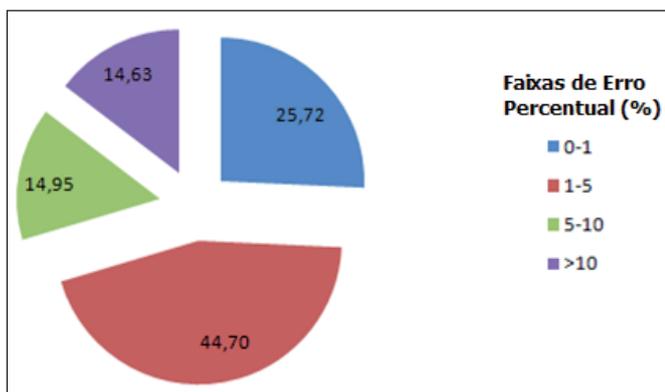


Figura 3 - Faixas de erro percentual comparadas por área.

Em pontos de divisores, são formadas áreas de recarga do aquífero, nesses pontos a infiltração é favorecida, e quando não chove o balanço residual será negativo, com mais água saindo do que entrando. Já em pontos de drenagens, são constituídas áreas de descarga do aquífero, nas quais o aquífero supre as linhas de drenagem, e, conseqüentemente, o balanço será positivo, com mais água entrando do que saindo. Nesses dois casos o valor de residual deverá ser elevado pela própria característica hidrológica, e não por um caso de inconsistência de dados de entrada. Esse resultado mostra que o erro foi baixo, e portanto, o resultado pode ser considerado consistente, confirmando o que havia sido suposto em função dos valores de residual serem próximos à zero.

Esta ferramenta permite indicar o balanço hídrico da água subterrânea e com isso permite identificar se está ocorrendo acúmulo ou retirada de água em determinada região. Se isso for verificado, pode ser um indício de que algum evento

pode estar causando um desequilíbrio no balanço hídrico do local e serve como base para que estudos mais detalhados possam ser realizados.

3.2 Darcy Velocity (Velocidade de Darcy)

O fluxo de velocidades é representado por dois rasters, um de magnitude e outro de direção. Estes dois rasters são os resultados desta ferramenta. A fim de melhorar a visualização dos resultados, os rasters de magnitude, que pode ser entendida como vazão específica (em $m^3/s.m^2$), e de direção (de 0 a 360°) foram combinados, gerando um campo de vetores onde o tamanho do vetor indica a magnitude e sua inclinação indica a direção de escoamento. Para isso, foi criado um tema de pontos ao longo de toda a área, e para este tema foram extraídos os valores da direção e magnitude. Dessa forma, foi possível reclassificar a legenda de forma a obter o resultado mostrado na Figura 4, que também apresenta a superfície freática.

Os valores de entrada que produziram melhor resultado foram os valores médios, apresentados na Tabela 2. De fato, analisando-se a Figura 4 (representando os resultados obtidos utilizando os valores médios), verifica-se que este resultado é adequado para a área, pois os fluxos estão se dirigindo dos divisores (áreas de recarga) para as drenagens (áreas de descarga). Apresentando maior magnitude em áreas de maior declividade, que possuem maior gradiente hidráulico, conforme o esperado.

Novamente, comparando-se estes resultados com os de Oliveira & Augusto Filho (2008), nesta pesquisa foram obtidos valores na faixa de 0,01 a 10 m/dia enquanto que na outra os valores encontraram-se na faixa de 0,001 a 0,1 m/dia. Isso ocorre, pois o material (por qual percola a água subterrânea) desta pesquisa é muito mais arenoso do que o da outra pesquisa, e por isso, apresenta valores muito maiores de transmissividade e porosidade, o que favorece o fluxo de água subterrânea.

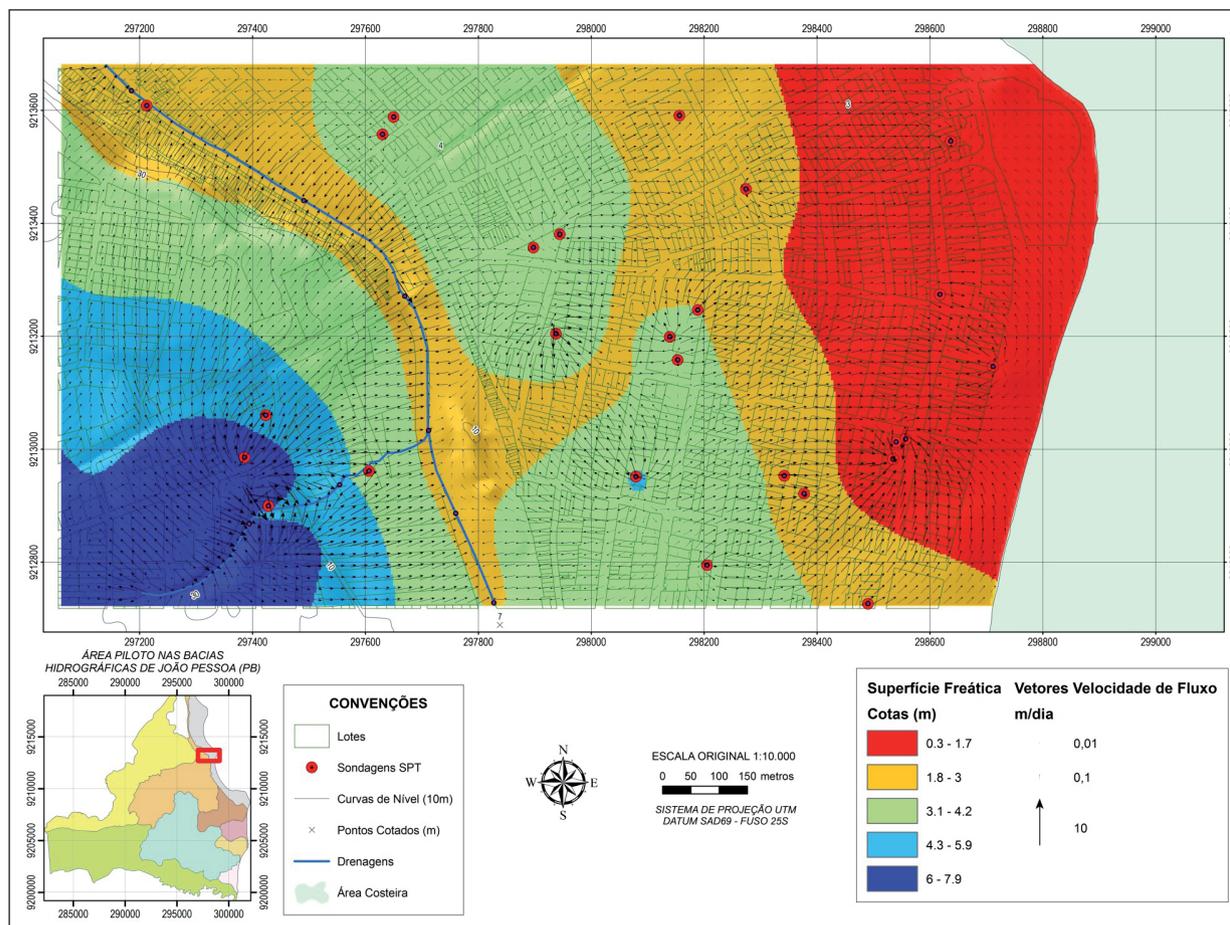


Figura 4 – Vetores Velocidade de Fluxo e Superfície Freática.

Esta ferramenta pode ser aplicada em estudos hidrológicos preliminares, pois permite que se obtenha uma noção da dinâmica da água subterrânea identificando o fluxo da água e serve como base para aplicação das próximas ferramentas que detalham melhor essa dinâmica.

3.3 Particle Track (Traçado de Partícula)

A ferramenta retornou um arquivo texto com a posição da partícula em diferentes intervalos de tempo. Foi também gerado o traçado mostrando o caminho de cada partícula de forma a facilitar a visualização. Esse traçado é exibido na Figura 5.

Pode-se observar que o caminho descrito pelas partículas segue tendência do campo de fluxo, sendo que uma das partículas caminha até atingir a drenagem (ponto 1), enquanto a outra descreve um caminho maior (ponto 2) até chegar a um ponto onde os valores de magnitude de fluxo são muito pequenos. Os tempos de percurso total de

cada partícula são, aproximadamente, 2,8 e 17,7 anos para as partículas 1 e 2, respectivamente.

Estes podem ser considerados valores baixos, que se justificam pelo fato do aquífero apresentar valores altos de magnitude de fluxo de água. Tal fato pode resultar, no caso de um vazamento de um poluente, que o mesmo se desloque rapidamente, contaminando grandes áreas em pouco tempo. Este fenômeno foi mais bem avaliado pela próxima ferramenta.

3.4 Porous Puff (Meios Porosos)

Para realizar uma simulação de contaminação por vazamento foram considerados os pontos 1 e 2 (utilizados na ferramenta Particle Track) como pontos de vazamento. A ferramenta Porous Puff permite calcular a dispersão em massa de um soluto introduzido no aquífero, assume que o aquífero é misturado verticalmente, ou seja, a concentração é a mesma pela seção vertical. O que permite a aplicação do modelo matemático de dispersão.

Os parâmetros de entrada dessa ferramenta são: porosidade do meio, espessura saturada e caminho da partícula (obtidas anteriormente); quantidade do poluente derramado instantaneamente (foi considerado um valor de contaminante dissolvido igual a 1000 kg); e tempo de dispersão (deve ser menor ou igual ao máximo tempo da trajetória da partícula, foram feitas três simulações, uma com 1 mês, outra com 6 meses e outra com 2 anos, para o ponto 1; e uma com 6 meses, outra com 2,5 anos e outra com 15 anos, para o ponto 2). Outros parâmetros opcionais como dispersividade longitudinal, razão de dispersividade, fator de retardamento e coeficiente de decaimento, foram considerados os valores padrões indicados pela própria ferramenta.

O resultado dessa simulação pode ser visto na Figura 5, por terem sido utilizados três tempos de dispersão, a visualização do deslocamento da pluma ficou facilitada. Verificou-se que as plumas se deslocam rapidamente pelo aquífero, principalmente na área de Depósitos Quaternários pela característica do meio ter elevada porosidade. As plumas apresentam forma elíptica com eixo centrado na trajetória da partícula.

Isso justifica o fato da pluma mudar de sentido de dispersão nos locais onde havia mudança de sentido da trajetória. A pluma gerada no ponto 1 percorre um caminho menor, pois o gradiente hidráulico é maior na região em que se encontra, além de existir a drenagem relativamente próxima ao ponto. Já a pluma que se desloca a partir do ponto 2, percorre um caminho maior e, conseqüentemente, demora um maior tempo para atingir seu ponto final.

Esse tipo de simulação é importante, pois permite prever o comportamento de uma pluma de contaminantes na área, permitindo que no caso de um vazamento, ações mitigadoras sejam tomadas para evitar-se ao máximo a dispersão do contaminante.

As duas últimas ferramentas descritas podem servir de grande auxílio nas áreas de recuperação de áreas degradadas e remediação de áreas contaminadas, pois os dados podem ser trabalhados de forma que resultados de interesse sejam obtidos para decidir se é necessário ou não intervir em uma área de estudo e qual a emergência dessa intervenção, no caso de deslocamento rápido de contaminantes.

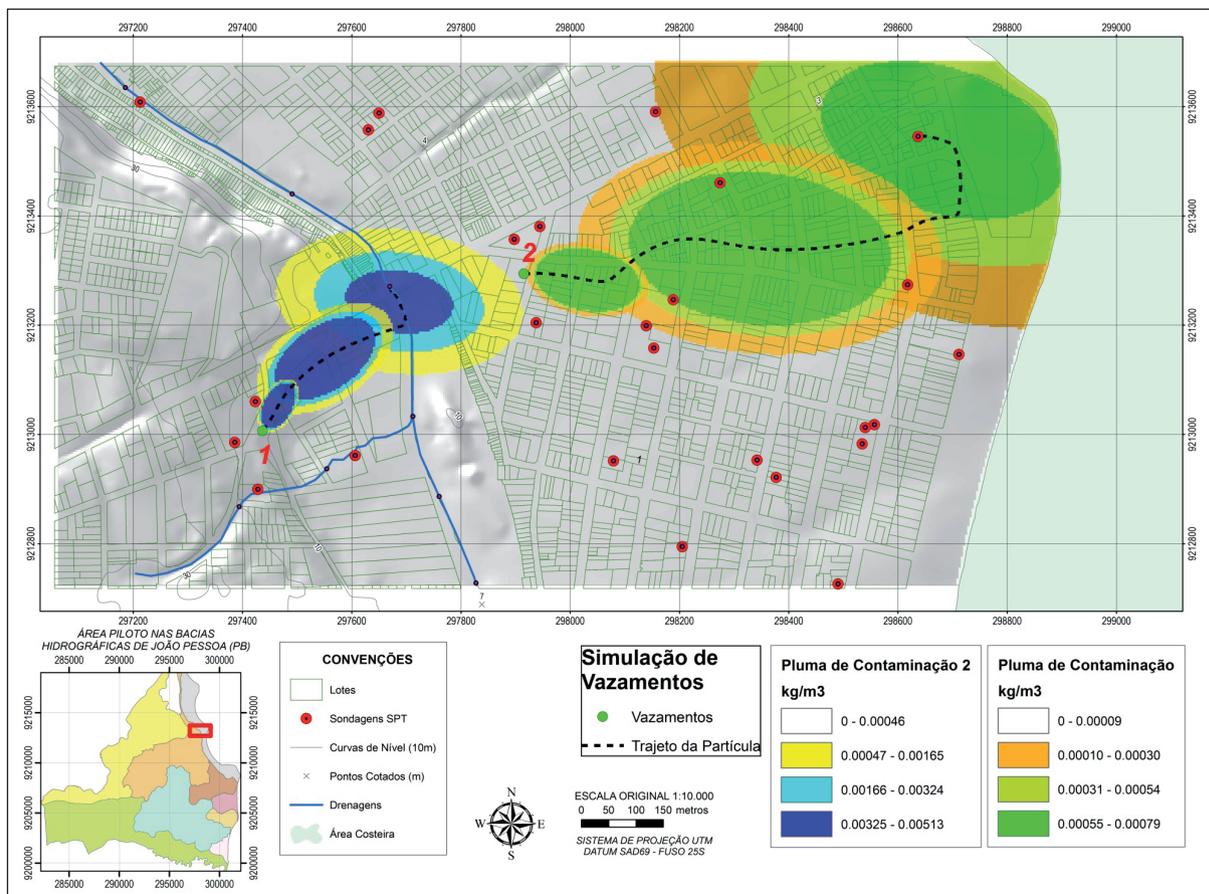


Figura 5 - Plumras de Contaminação e Trajetória das partículas.

4 CONCLUSÕES

Conclui-se que as ferramentas *Darcy Flow*, *Darcy Velocity*, *Particle Track* e *Porous Puff* se mostraram bastante úteis para a modelagem da dinâmica da água subterrânea.

A interpolação do nível freático se mostrou bastante válida, pois foi feita utilizando a ferramenta *Topo To Raster*, que é uma ferramenta ideal para gerar MDEs hidrológicamente corretos, e, portanto também pode ser considerada válida para este tipo de interpolação que é similar. O balanço de volume residual gerado também se mostrou bastante adequado para a área uma vez que gerou valores, para a maior parte da área, próximos de zero, evidenciando que o balanço de água está correto.

Os rasters que combinados descrevem o campo de fluxo da água subterrânea mostraram-se adequados também, pois o resultado evidencia vetores direcionados partindo de regiões mais elevadas para regiões mais baixas, além de possuir maior magnitude em locais com maior gradiente hidráulico. Como foi realizado um estudo em aquífero livre a carga piezométrica pode ser desprezada e, portanto a carga hidráulica total será devida apenas a cota altimétrica, ou seja, a carga hidráulica total tende a acompanhar a topografia do terreno.

Os resultados das ferramentas *Particle Track* e *Porous Puff* mostraram-se bastante úteis para assistir decisões de medidas de tratamento de contaminantes no caso de um acidente com dispersão de algum poluente no meio, pois a delimitação das plumas em diferentes tempos permite prever seu comportamento, bem como sua área de influência. Neste caso, após 3 anos, uma faixa de, aproximadamente, 430 m seria ocupada pela pluma que sai do ponto 1, a uma distância de 350 m entre o ponto 1 e o centro da pluma. Com essas informações, associadas a outras informações de interesse é possível optar dentre as diversas opções para tratamento do poluente como barreiras reativas permeáveis ou bombeamento para tratamento *ex situ*, por exemplo.

Com base no conhecimento adquirido sobre o funcionamento dessas ferramentas será possível desenvolver e aplicar modelos para subsidiar a análise de processos da dinâmica subterrânea de

grande importância ambiental, como movimentação de água e dispersão de poluentes. Tal resultado pode servir como base para estudos de gestão da área de interesse.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP pelo suporte financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Bear, J. *Dynamics of fluids in porous media*. New York: Dover Publications, 1972, 764 p.
- ESRI (Environmental Systems Resource Institute). *ArcMap 9.1*. Redlands, California. 2010.
- Feitosa, F. A. C. & MANOEL FILHO, J. *Hidrogeologia Conceitos e Aplicações*. 2ª Edição. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000. 391p.
- Freeze, R.A. & Cherry, J.A. *Groundwater*. Englewood Cliffs, NJ. Prentice-Hall, Inc., 1979, 604 p.
- Marsily, G. *Quantitative Hydrogeology*. Academic Press. 1986.
- Monteiro, A. B. et al. *Hidrogeologia e Gestão do Aquífero Barreiras nos Bairros de Ibura e Jordão - Recife - Pernambuco*. Trabalho apresentado ao XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Florianópolis, 2002.
- Teixeira, W.; Toledo, M.C.M.; Fairchild, T. R.; Taioli, F. *Decifrando a Terra*. São Paulo. Oficina de Textos, 2003. 557p.
- Todd, D.K. *Groundwater hydrology*. Nova York: Wiley, 1959. 336p.
- Tressoldi, M. & Consoni, A.J. Disposição de resíduos. In: Antônio Manoel dos Santos Oliveira e Sérgio Nertan Alves de Brito (Org.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo. 1994. P. 361-380.

ANÁLISE FRACTAL PARA O CÁLCULO DA DENSIDADE DE DRENAGEM



MATEO ARENAS-RÍOS

NEWTON MOREIRA DE SOUZA

UnB – Universidade de Brasília, Pós-graduação em Geotecnia,
Faculdade de Tecnologia –FT; Localização dos Autores:
Universidade de Brasília, Bloco SG 12, Brasília – DF, Brasil;
E-mail: marenasr@gmail.com, nmsouza@unb.br

RESUMO ABSTRACT

Este trabalho explora o potencial da geometria fractal para a elaboração de mapas do meio físico, visando encontrar relações entre os padrões de drenagem e feições do substrato geológico superficial do Distrito Federal do Brasil (DF). A estimativa da dimensão fractal (D_f) foi realizada localmente mediante o método da contagem de células em imagens binárias da rede de drenagem do DF numa escala 1:10.000. Estimando a D_f localmente em todos os pontos da rede de drenagem, conseguiu-se detectar relação com as unidades pedológicas, assim como segmentar o terreno em termos da densidade de drenagem. Estes primeiros resultados mostram que a análise fractal de redes de drenagem é de utilidade como método indireto para mapear o meio físico.

Palavras Chave: Geometria Fractal; Cartografia; Densidade de drenagem; Distrito Federal do Brasil.

This paper explores the potential of fractal geometry to produce maps of physical environment expected to find relationships between drainage patterns and features of geological substrate of the Brazil's Federal District (DF). The estimation of the fractal dimension (D_f) was performed locally using the method of box-counting in binary images of the drainage network of the DF scale 1:10,000.

Estimating D_f locally at all points of the drainage network, it was possible to detect the relationship with soil units, as well as segment the ground in terms of drainage density. These initial results show that fractal analysis of drainage networks is useful as an indirect method for mapping the physical environment

Key Words: Fractal Geometry; Cartography; Drainage Density; Brazil's Federal District.

1 INTRODUÇÃO

Conjuntos de dados de campo e laboratório são analisados para aproximar as características do substrato geológico de uma zona de projeto de engenharia. Quanto maior é a área, maior será a quantidade de amostras necessárias para garantir qualidade na caracterização da zona de trabalho.

Em escalas de trabalho regionais, estaduais e municipais, é inviável executar uma campanha de ensaios de campo, amostragens e ensaios de laboratório de alta resolução devido aos custos e à quantidade de trabalho que implicaria. Isso desafia o engenheiro para explorar técnicas de medição indireta que permitam extrair informação

de grandes conjuntos de dados secundários para inferir a informação de interesse. As bases cartográficas são fontes de dados de relevância para projetos de engenharia, o potencial dos conjuntos de informações disponíveis é ainda mais aproveitado mediante o uso de técnicas de geoprocessamento.

É fato conhecido que os padrões de drenagem refletem o conteúdo do substrato geológico superficial (Soares & Pio Fiori, 1978; Zãvoianu, 1978), por exemplo, a densidade de drenagem (entendida como o comprimento dos elementos de drenagem por unidade de área) é baixa em bacias com alta

permeabilidade e apresenta valores altos em regiões de maior escoamento superficial onde os canais são altamente carregados com material suspenso; também o mapa de densidade de drenagem será similar a um mapa mostrando a fragmentação horizontal do substrato numa região.

Buscando aprimorar as metodologias para caracterizar o meio físico, tentativas de índices para expressar a densidade de drenagem são feitas desde finais do século XIX (Penck, 1894; citado por Zãvoianu, 1978), ainda tendo propostas contemporâneas que aplicam técnicas de geoprocessamento (Tucker *et al*, 2001; Shahzad & Gloaguen, 2011a), mas ainda não há conformidade na comunidade científica sobre o método que melhor representa a densidade de drenagem. Neste campo pouco há feito quantitativamente mediante a utilização dos fractais (Gaudio *et al*, 2006; Shahzad *et al*, 2010), objeto deste artigo.

Este trabalho aborda a análise fractal para obter a densidade de drenagem como apoio a cartografia do substrato geológico superficial do Distrito Federal do Brasil (DF). Os itens seguintes abrangerão noções básicas da geometria fractal necessárias para a compreensão do trabalho, e será introduzido o estudo de caso com os resultados e conclusões conseqüentes.

2 NOÇÕES BÁSICAS SOBRE GEOMETRIA FRACTAL

Os contornos geográficos são tão ricos em detalhe, que seus comprimentos por vezes podem ser considerados infinitos ou até indeterminados a depender da escala de observação. Muitos são estatisticamente auto-similares, ou seja, cada porção pode ser considerada como uma imagem em escala reduzida do todo. Os canais de drenagem naturais possuem uma estrutura tortuosa que não encaixa no conceito de “linha reta” nem é o suficientemente intrincado para encher o plano bidimensional; cada pedaço de uma rede de drenagem se parece ao conjunto inteiro, como se a rede estivesse composta de redes menores, e cada subdivisão estivesse composta de redes menores, e assim por diante. A geometria fractal basicamente propõe uma descrição quantitativa dos padrões geométricos gerados pela maioria dos fenômenos naturais, sendo que os conjuntos fractais possuem três características gerais:

- Muito irregulares para ser descritas em termos geométricos tradicionais;
- Possuem detalhe em múltiplas escalas de observação;
- São auto-similares, quer dizer, as partes se parecem com o todo em diferentes níveis de detalhe.

Os conceitos gerais da geometria fractal estão amplamente divulgados na literatura (Mandelbrot, 1982; Takayasu, 1990; Rodríguez-Iturbe & Rinaldo 2001; Schuller *et al*, 2001). Os três axiomas anteriores são ilustrados na Fig.1 onde se apresenta um modelo de elevação do terreno de uma porção do DF, na qual pode-se perceber a rede de drenagem em vários níveis de observação (Fig.1a, Fig.1b e Fig.1c); observe que para cada nível de detalhamento, as partes se parecem ao conjunto inteiro.

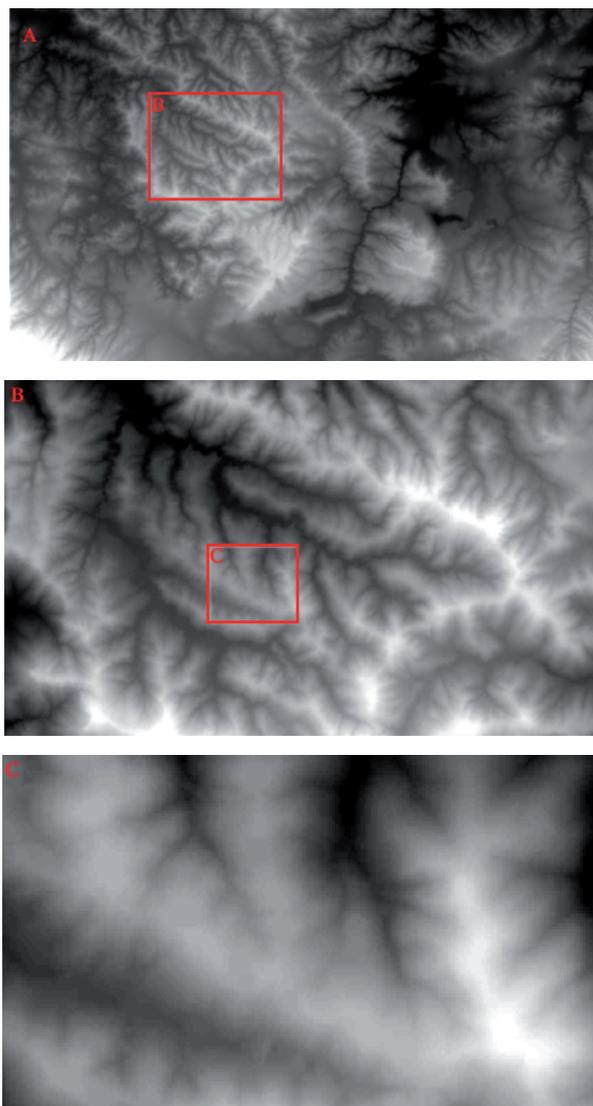


Figura 1 - Detalhamento de uma porção da rede de drenagem do DF em diferentes níveis de observação

Um dos conceitos mais importantes a se entender é o da dimensão fractal (D_f), o qual é um valor estatístico que quantifica a percepção subjetiva da densidade com que um fractal ocupa o seu

espaço euclidiano subjacente. Na Fig.2 são ilustrados vários exemplos de conjuntos fractais com a sua respectiva dimensão fractal.

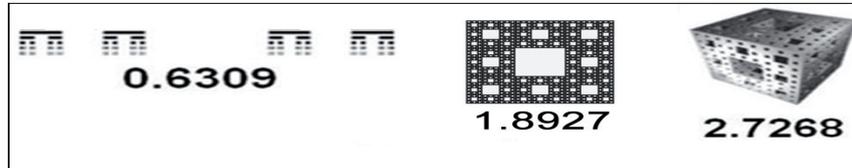


Figura 2 – Alguns conjuntos fractais clássicos com a respectiva dimensão fractal: Poeira de Cantor (esquerda), Triângulo de sierpinsky (meio) e Esponja de Menger (direita).

Nessa ordem de idéias, os padrões de drenagem podem ser interpretados como entidades fractais com dimensão fracionada entre um e dois; quando se trata de sistemas de lagoas, é possível até conceber dimensões fractais entre zero e um.

Quanto mais perto de dois é a D_f , mais sinuoso o canal em questão ou mais denso será o sistema de drenagem. Algumas estimativas da D_f em porções de redes de drenagem do DF são ilustradas na Fig. 3.

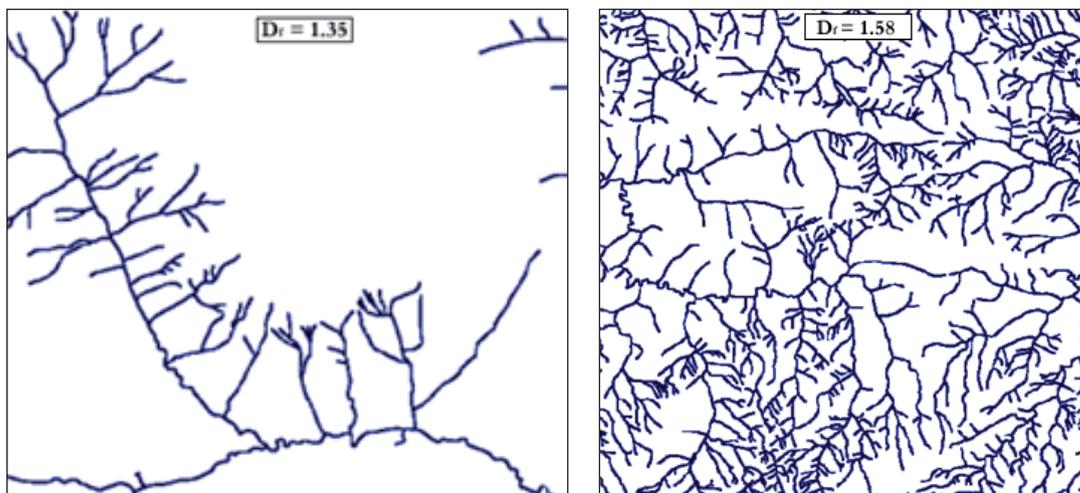


Figura 3 – Padrões de drenagem extraídos do DF, cujas D_f são 1.35 e 1.58 respectivamente.

A importância da D_f consiste em que pode ser definida uma relação com dados do mundo real e existem diversos métodos para calculá-la (Mandelbrot, 1982; Veltri *et al*, 1996; Schuller *et al*, 2001; Rodríguez-Iturbe & Rinaldo, 2001). O método numérico mais citado na literatura é o método da contagem de células (*box-counting* em inglês), o qual consiste em superpor um objeto fractal com uma grelha igualmente espaçada (tamanho de célula ϵ) e contar as células necessárias para cobrir o fractal ($N(\epsilon)$). O procedimento se repete com uma grelha cada vez mais fina, plotando a nuvem de pontos $\log(1/\epsilon)$ vs $\log(N(\epsilon))$.

A D_f é estimada como a pendente da linha de tendência da nuvem de pontos (Eq.1), comprovada uma relação exponencial entre a resolução da medida (ϵ) e a quantidade de detalhe obtido para cada nível de resolução ($N(\epsilon)$) tem-se a dimensão fractal.

$$D_f = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log(1/\epsilon)} \quad (1)$$

Um exemplo do método da contagem de células é apresentado na Fig.4 para calcular a D_f num rio genérico.

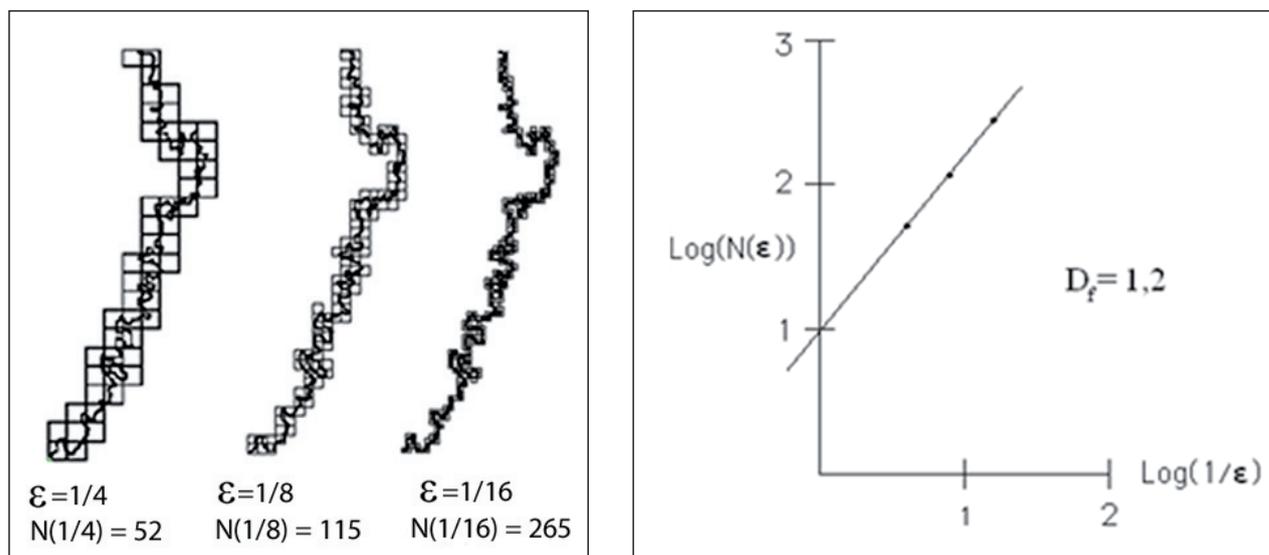


Figura 4 - Exemplo do método da contagem de células.

3 DESCRIÇÃO DA ZONA DE ESTUDO

O DF encontra-se localizado na região central do Brasil (Fig.5) abrange a Capital do País (Brasília) e as suas cidades satélites, onde moram aproximadamente 2,5 milhões de habitantes.

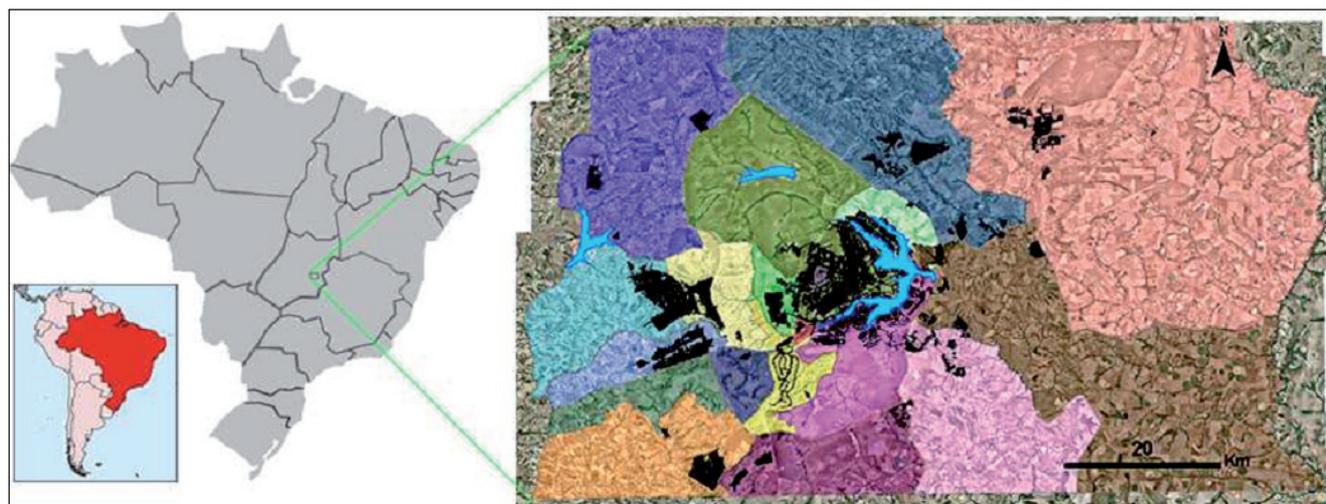


Figura 5 - Distrito Federal do Brasil destaca-se as 19 regiões administrativas, as zonas urbanizadas e os dois principais lagos.

Quanto à hidrografia destaca-se a presença do lago Paranoá (Fig. 6) e vários padrões de drenagens descritos na literatura clássica da

morfometria de drenagens (Schumm, 1978; Zãvoianu, 1978), tais como os padrões dendríticos, em treliça e paralelos.

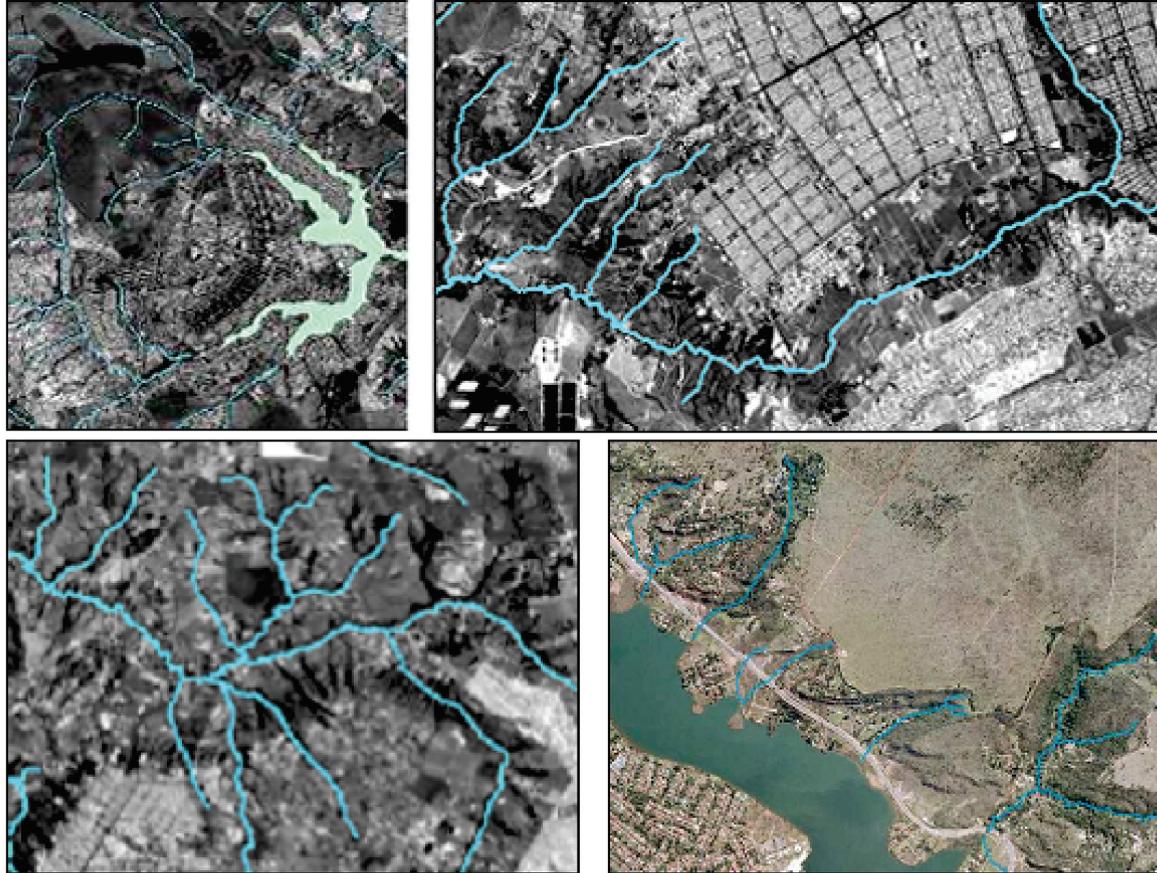


Figura 6 – Aspectos hidrográficos do DF. Destaca-se o Lago Paranoá (superior esquerda) e a presença de padrões de drenagem em treliça (superior direita), dendríticos (inferior esquerda) e paralelos (inferior direita).

De maneira geral, a geologia do DF se destaca pela presença de materiais formados inicialmente em um ambiente sedimentar e metamorfizados por tectonismo, o qual propiciou a presença de dobras e uma forte interferência estrutural ao longo da região. O relevo natural caracteriza-se pela presença de planaltos e domos sintetizados numa topografia ondulada.

A região possui três classes de solos principais, denominados de latossolo vermelho-amarelo (lv), latossolo vermelho-escuro (le) e cambissolo (cd), os quais em conjunto correspondem a 85% do território do DF (Arcaya 2007). As classes restantes correspondem a podzólicos (pv e pe), solos hidromórficos (hi), terra roxa equivalente (tre) e areias quartzosas (aq)

4 METODOLOGIA

Obteve-se uma imagem binária da rede hidrográfica do DF com resolução espacial de

10x10m por pixel; criou-se uma janela móvel (Hengl & Reuter, 2009) de 128x128 pixels a qual foi deslocada por toda a rede de drenagem calculando a D_f de maneira local em cada passo do deslocamento mediante o método da contagem de células (Fig. 7).

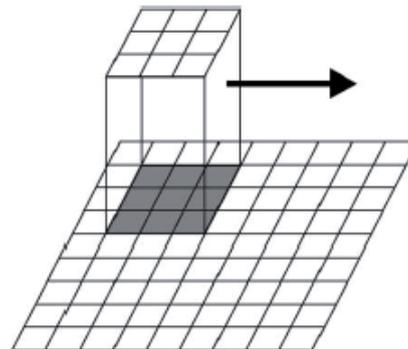


Figura 7 – Estimação da D_f local mediante janela móvel.

Conseguiu-se correspondência espacial bi-nívoca entre as células de entrada (hidrografia)

e as células de saída (D_f), obtendo um mapa de D_f como indicador da densidade de drenagem; quanto mais perto de dois é a D_f , maior é a densidade de drenagem, e vice-versa. A Fig.8 mostra o

mapa hipsométrico de uma região, para essa mesma região estimou-se a densidade de drenagem mediante a D_f local (Fig.9), e o resultado pode ser comparado com o mapa pedológico (Fig. 10).

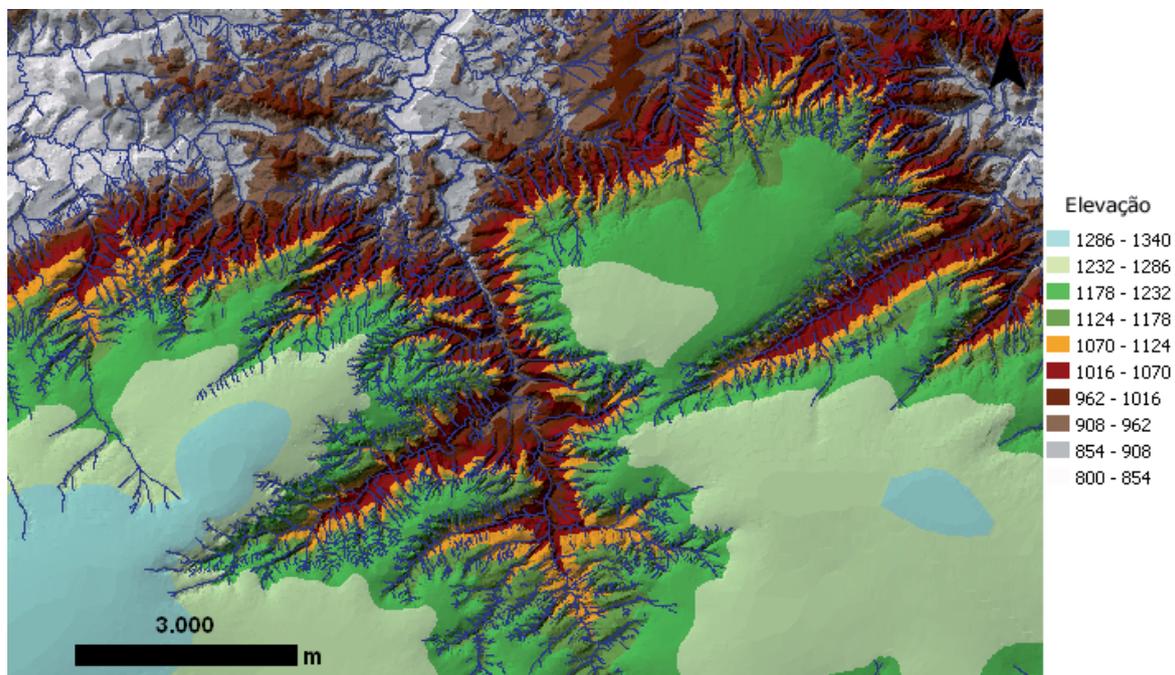


Figura 8 - Mapa hipsométrico de uma porção do DF (unidades em metros)

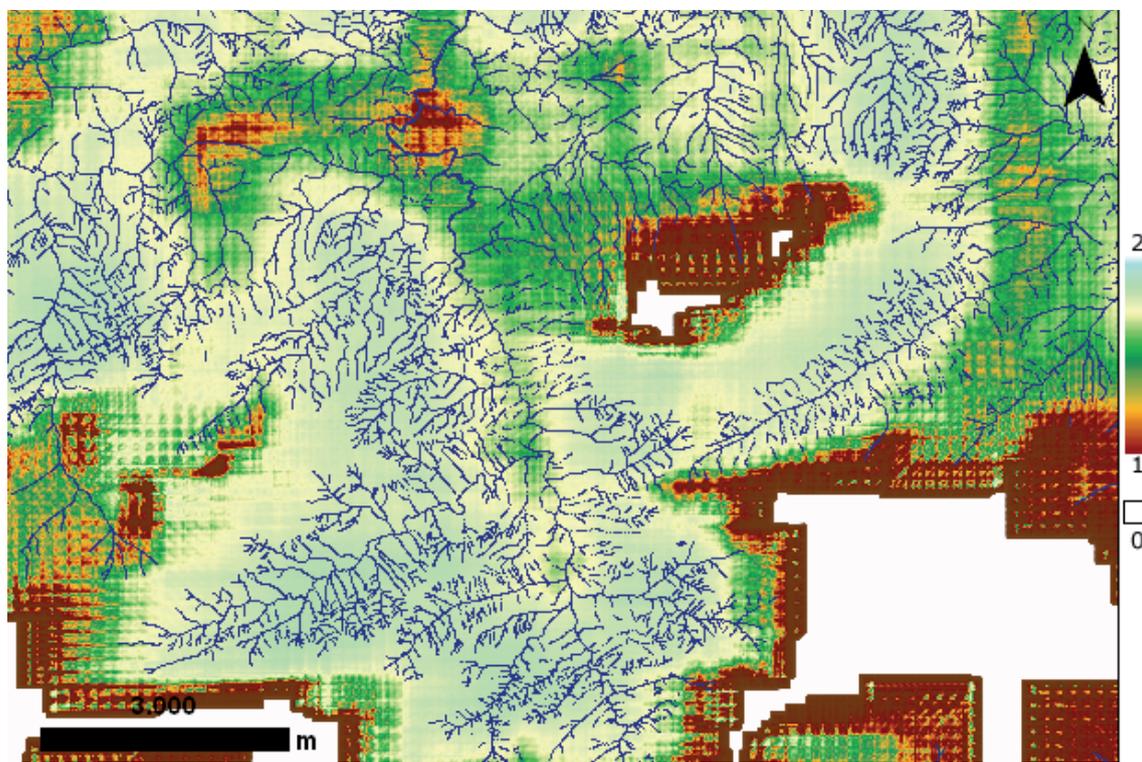


Figura 9 - Mapa de densidade de drenagem baseado na dimensão fractal. D_f mais perto de 2 representa maior densidade de drenagem.

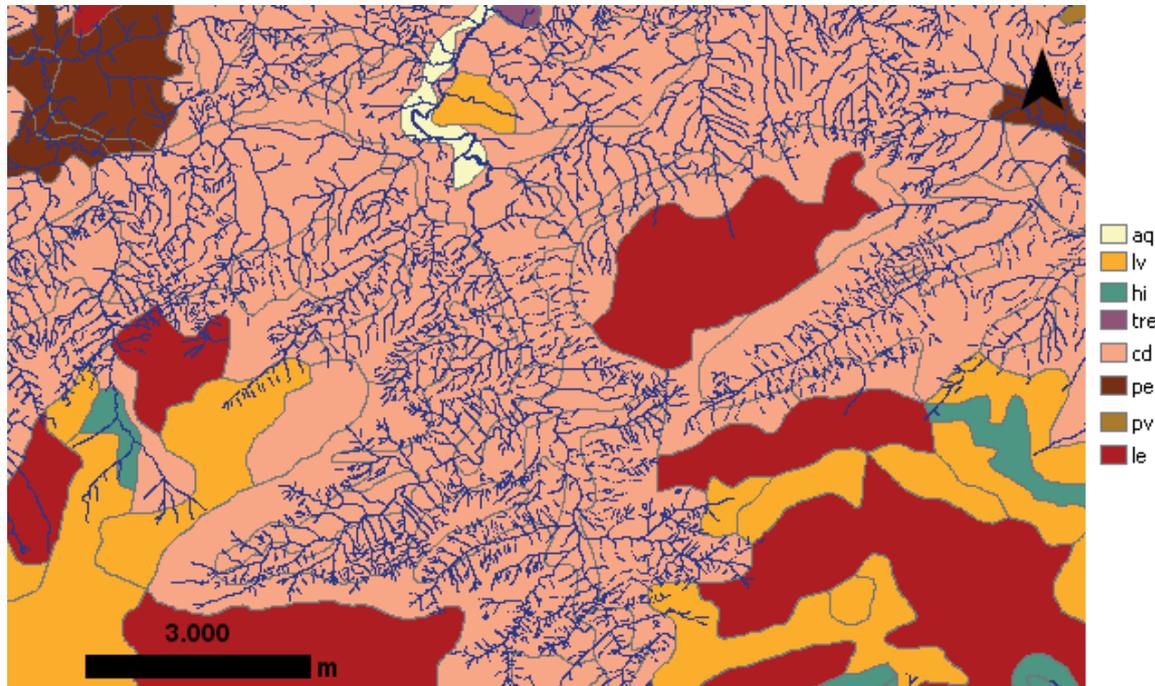


Figura 10 – Mapa pedológico: aq: Areias quartzosas; lv: Latossolos vermelho-amarelo; hi: Solos hidromórficos; tre: Terra roxa equivalente; cd: Cambissolos; pe: Podzólicos vermelho-escuros; pv: Podzólicos vermelho-amarelo; lv: Latossolos vermelho-escuro. Observe-se a semelhança com o mapa de densidade de drenagem da Fig. 9

5 COMENTÁRIOS FINAIS

O meio físico pode ser descrito mediante medições indiretas, isto se faz mais necessário na medida em que aumenta o tamanho da área de estudo e se deseja uma resolução espacial refinada. A densidade de drenagem é um indicador que permite aproximar qualidades do substrato geológico de maneira indireta, existem diversas formas de estimá-la e neste trabalho se propôs uma abordagem da densidade de drenagem baseada no paradigma da geometria fractal.

Esta abordagem não foi comparada com outros métodos tradicionais, mas os resultados foram satisfatórios quanto ao seu objetivo, sendo isto evidenciado nas semelhanças entre o mapa pedológico (Fig. 10) e o mapa de D_f (Fig. 9), os quais demonstram coerência qualitativa. Dado que esta é uma aproximação inicial, os resultados não permitem afirmar relações diretas em termos quantitativos.

Os resultados serão melhorados na medida em que seja melhorada a resolução espacial, o qual sugere o uso de capacidades de computação cada vez mais robustas, permitindo resolver em poucos segundos o que ainda pode requerer

horas para processar. É de interesse na continuidade dos trabalhos de pesquisa analisar o mapa de densidade de drenagem obtido com outras informações morfométricas, tais como a declividade, a curvatura e a rugosidade, com o intuito de obter informações do meio físico de relevância para a zona de estudo.

Espera-se que este tipo de análise suporte a gestão do território, como complemento às informações necessárias para a adequada caracterização do meio físico; sendo uma vantagem desta técnica, o fato de prover informação de medições indiretas (partindo de bases matemáticas / algorítmicas), o qual reduz os custos de obtenção da informação que se busca.

REFERENCIAS

ARCAAYA, S. G. CH. (2007). Avaliação dos fatores condicionantes dos processos erosivos no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-156/07, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 189 p.

GAUDIO, R., DE BARTOLO, S. G., PRIMAVERA, L., GABRIELE, S. & VELTRI, M. (2006). Lithologic

- control on the multifractal spectrum of river networks. *Journal of Hydrology*, Vol. 327, p. 365–375.
- HENGL, T. & REUTER, H.I. (2009). *Geomorphometry: Concepts, software and applications*. Elsevier, Amsterdam, Holanda, 775 p.
- MANDELBROT, B. (1982). *The fractal geometry of nature*. W. H. Freeman, New York, NY, USA, 480 p.
- RODRÍGUEZ-ITURBE, I. & RINALDO, A. (2001). *Fractal river basins: Chance and self-organization*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 561 p.
- SCHULLER D.J., RAO, A.R., & JEONG, J.R. (2001). Fractal characteristics of dense stream networks. *Journal of Hydrology*. Vol. 243, p. 1–16.
- SCHUMM, S. (1978). *Drainage basin morphology*. Academic Press, New York, NY, USA, 349 p.
- SCHUMM, S. (1972). *River morphology*. Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, Pa, USA, 421p.
- SHAHZAD, F. & GLOAGUEN, R. (2011a). TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 1: Drainage network preprocessing and stream profile analysis. *Computers & Geosciences*, Vol. 37, p. 250–260.
- SHAHZAD, F., MAHMOOD, S. A. & GLOAGUEN, R. (2010). Nonlinear analysis of drainage systems to examine surface deformation: an example from Potwar Plateau (Northern Pakistan). *Nonlinear Processes in Geophysics*, Vol. 17, p. 137–147.
- SOARES, P.C & PIO FIORI, A. (1978). Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Boletim geográfico*, Vol. 258/259, p. 35-59.
- TAKAYASU, H. (1990). *Fractals in the Physical Sciences*. Manchester University Press, Manchester, UK, 170p.
- VELTRI, M., VELTRI, P. & MAIOLO, M. (1996). On the fractal description of natural channel networks. *Journal of Hydrology*, Vol. 187, p. 137-144.
- ZĂVOIANU, I. (1978). *Morphometry of drainage basins*. Elsevier, Amsterdam, Holanda, segunda edição, 251p.

UTILIZAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL PARA DEFINIÇÃO DE CLASSES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO E DERIVADOS EM ÁREAS CONTINENTAIS

MÁRCIA SAYURI MORINAGA

*Ecóloga, UNESP, Av 24A, nº1515, Rio Claro, SP,
(19)3526-9430, sayurimorinaga@gmail.com*

BRUNO BAPTISTELLA

*Graduando em Geologia, UNESP, Av 24A, nº1515, Rio Claro, SP,
(19)3526-9430, bruno.baptistella@bol.com.br*

CAMILA MASSARO

*Graduanda em Geologia, UNESP, Av 24A, nº1515, Rio Claro, SP,
(19)3526-9430, ca.massaro@yahoo.com.br*

AMANDA DE ÁVILA OLIVEIRA

*Graduanda em Ecologia, UNESP, Av 24A, nº1515, Rio Claro, SP,
(19)3526-9430, avilavf@gmail.com*

LUIZ HENRIQUE PEREIRA

*Dr. Geógrafo, UNESP, Av 24A, nº1515, Rio Claro, SP,
(19)3526-9430, e_luizh@yahoo.com.br*

JAIRO ROBERTO JIMÉNEZ-RUEDA

*Prof. Dr. Agrólogo, UNESP, Av 24A, nº1515, Rio Claro, SP,
(19)3526-9430, jairorjr@rc.unesp.br*

JUÉRCIO TAVARES DE MATTOS

*Prof. Dr. Geólogo, UNESP, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha,
nº 333, Guaratinguetá, SP, (12)3123-2827, jttmm@hotmail.com*

SÉRGIO DOS ANJOS FERREIRA PINTO

*Prof. Dr. Geógrafo, UNESP, Av 24A, nº1515, Rio Claro, SP,
(19)3526-9341, sanjos@rc.unesp.br*

SERGIO LUIS ANTONELLO

*Prof. Dr. Analista de sistemas, UNESP, Av 24A, nº1515,
Rio Claro, SP, (19)3526-9430, sergio@rc.unesp.br*

RESUMO ABSTRACT

Obras lineares tipo multidutos e estradas são instaladas em áreas com diversidade de relevos, variação litológica e processos pedogenéticos com estágios de alteração intempérica distintos. Somado a estas características, áreas de grandes extensões sofrem processos tectônicos com deformações dúcteis e rúpteis e evidenciam forte cataclase. Neste cenário, desenvolveu-se uma sistemática lógica e codificada para se obter classes de fragilidade ambiental a derramamento de petróleo e derivados para ambientes continentais. A metodologia parte da definição de critérios de análise de relevo e drenagem traduzidos pela textura de imagem de satélite obtendo-se, assim, limites entre zonas homólogas que são classificadas de acordo com suas propriedades físicas (Tropia, Permeabilidade, Plasticidade x Ruptibilidade, Alterabilidade e Assimetria). Uma equivalência entre estas permite obter as Unidades Geoambientais

Linear constructions such as multiple pipes and roads are installed in areas with a variety of reliefs, lithological variation and pedogenic processes with different stages of weathering. In addition to these features, large areas suffer tectonic processes with ductile and brittle deformation and they demonstrate strong cataclasis. In this scenario, it was developed a logic and codified systematic to obtain environmental fragility classes for oil spill and derivatives for continental environments. The methodology starts from the definition of relief and drainage analysis criteria translated by the satellite image texture obtaining, thus, boundaries between homologous zones that are classified according to their physical properties (Tropy, Permeability, Plasticity x Rupture, Alterability and Asymmetry). An equivalence between these allows to obtain the Geoenvironmental Units

que representam espacialmente diferenças do meio físico. A análise de imagem de satélite também possibilita obter informações da tectônica dúctil da área, caracterizada por altos e baixos estruturais, e da tectônica rúptil, evidenciada por feições de fraturamento (juntas e falhamentos) das quais derivam em zonas de variação de máximos 1 e 2. As informações citadas foram mapeadas e cartografadas em documentos distintos e integradas em um mapa síntese de classes de fragilidade ambiental a derramamentos de petróleo em uma área de duto preestabelecida.

Palavras chave: sensoriamento remoto; mapeamentos geoambientais; fragilidade ambiental

1 INTRODUÇÃO

As atividades antrópicas, desde os primórdios até o atual estágio de desenvolvimento, são direta ou indiretamente responsáveis pela maioria das tragédias ambientais observadas. A simples ocupação rural, urbana e industrial, práticas agropastoris e construções de grandes obras civis, dentre outras intervenções, alteram o equilíbrio dinâmico dos ambientes naturais.

Pode-se dizer que a fragilidade ambiental é o condicionamento do meio físico às inserções humanas, em função das características genéticas de cada localidade. O conhecimento dos aspectos físicos possibilita a compreensão da dinâmica de funcionamento do ambiente natural, tão importante para o planejamento territorial tanto para a prevenção de acidentes quanto ao aproveitamento das potencialidades (ROSS, 1994).

Explorações de recursos naturais também têm registrado casos de acidentes de grande impacto ambiental. Em especial os derramamentos de petróleo causam sérios problemas ambientais, sociais e econômicos, o que levou o governo a adotar medidas mais rígidas de segurança operacional nas plataformas marítimas. Houve também a criação de um método de levantamento de dados ambientais com a finalidade de tornar mais eficiente o planejamento das ações de contingência em caso de acidente e para o conhecimento das consequências aos ecossistemas, conhecido como Carta SAO (GUILHERME et al., 2009).

which represent spatially differences in the physical environment. The analysis of the satellite image also enables to obtain information from the ductile tectonic of the area, characterized by structural highs and lows, and from the brittle tectonic, evidenced by fracturing features (joints and faults) from which can be derived in maximums of 1 and 2 variation zones. All those information mentioned were mapped and charted in different documents which were integrated in a synthesis map presenting geoenvironmental fragility classes to oil spills in a predetermined pipe area.

Em áreas continentais também são registradas várias formas de derramamentos de petróleo e seus produtos derivados. Assim, o conhecimento do meio físico, como a geologia e suas relações com o relevo e manto de alteração intempérica, e da fragilidade a estes eventos tornam-se úteis para um melhor planejamento de ocupação e tomada de decisões em casos de acidente.

Para Ross (1994), a fragilidade é dada principalmente pela dinâmica em superfície, considerando características como a declividade ou índice de dissecação, solo, uso da terra e cobertura vegetal. Para Crepani et al. (1996) a análise envolve a geologia, geomorfologia, solos, vegetação e clima. No entanto, sabe-se que muitos problemas ambientais de origem antrópica possuem forte relação com o sistema em subsuperfície, como no caso de derramamentos de petróleo e derivados em que há grande importância da dinâmica de permeabilidade e percolabilidade do material, levando a contaminação do solo e das águas subterrâneas.

Dessa maneira, há uma necessidade de se desenvolver uma metodologia para o mapeamento e representação cartográfica da fragilidade do meio físico em áreas continentais. Este artigo tem como objetivo desenvolver uma sistemática de trabalho, a partir da interpretação de produtos de sensoriamento remoto, para o reconhecimento de diversos aspectos do meio físico sob o enfoque para o derramamento de petróleo e seus derivados.

A área piloto para realização do estudo foi um segmento do Oleoduto Curitiba-Paranaguá (OLAPA), devido à importância deste para o

abastecimento de hidrocarbonetos na região metropolitana de Curitiba, e pela ocorrência de acidentes (vazamentos) de médio e pequeno porte que causaram impactos ambientais negativos, prejuízos sócio-econômicos para a população e, consequentemente, para o Estado.

2 ASPECTOS GERAIS DA ÁREA

A área escolhida para o desenvolvimento da metodologia situa-se na porção leste do Estado do Paraná entre os Meridianos 48°56'51"W e 49°12'48"W e Paralelos 25°28'46"S e 25°42'47"S

(Figura 1). Compreende porções de cinco municípios: São José dos Pinhais, Curitiba, Piraquara e Morretes.

Em relação à geologia são encontrados próximo à cidade de São José dos Pinhais (a noroeste da área de estudo), sedimentos colúvio-aluviais quaternários, denominados Formação Guabirotuba. Na porção leste da área predominam riolitos e andesitos aflorantes da Formação Guaratubinha. Afloram também corpos intrusivos de granitos subalcalinos e alcalinos e migmatitos e granitos de anatexia que sustentam os espigões locais e cristas da Serra do Mar.

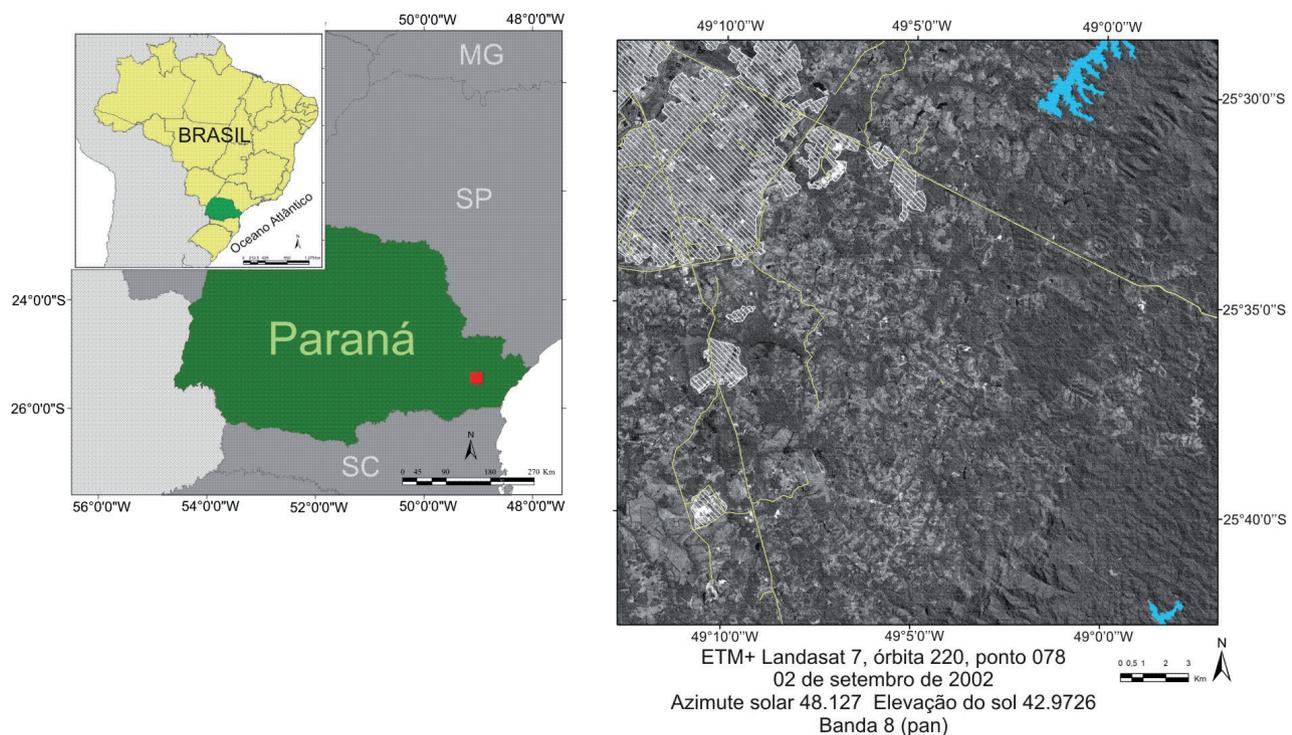


Figura 1 - Localização da área de estudo.

Quanto ao clima da região, segundo a classificação de Köppen, seguindo o sentido oeste-leste, ocorre predomínio do tipo Cfb e associações dos tipos Cfa/Cfb e Cfb/Cfa. Por Cfb, entende-se clima temperado com verão fresco, apresentando temperatura média do mês mais frio entre 18 e -3°C e, no mês mais quente abaixo de 22°C, sem estação seca definida, com chuva em todos os meses sendo a precipitação média do mês mais seco superior a 60 mm. Já a classe Cfa difere da Cfb na temperatura média do mês mais quente que é superior a 22°C (IAPAR, 2009).

A área está inserida em duas Bacias Hidrográficas: Bacia do Rio Iguaçu e Bacia Litorânea. Os principais canais fluviais são os rios Iguaçu, Barigui, do Maurício, do Despique e Passauna. Nas porções mais elevadas do relevo, a rede de drenagem apresenta predomínio dos padrões dendrítico e sub-dendrítico. Muitos canais fluviais apresentam-se alterados pela ação antrópica (retificação, represamentos, entre outros).

A área estudada, em sua maioria, encontra-se na unidade geomorfológica do Primeiro Planalto Paranaense, que está dividida nas subunidades do

Planalto de Curitiba, Planalto do Alto Iguaçu, Blocos Soerguidos e Planícies Fluviais (OKA-FIORI e SANTOS, 2006). Ocorre também na área, a unidade da Serra do Mar que apresenta como única subunidade morfoescultural, os Blocos Soerguidos da Serra do Mar, com modelado de topos alongados em cristas.

Solos do tipo Latossolos Vermelho e Argissolos Vermelho-Amarelo são predominantes nas unidades geomorfológicas dos planaltos. Contudo, nessas unidades também ocorrem Cambissolos Háplicos e Latossolos Brunos. Nas áreas dominadas por planícies aluviais predominam os solos do tipo Gleissolos Melânicos e, subordinadamente, Organossolos Mésicos. Afloramentos de rocha ocorrem nas áreas dos Blocos Soerguidos (EMBRAPA, 1981).

3 MAPEAMENTO GEOAMBIENTAL

O mapeamento geoambiental envolve uma série de procedimentos fotointerpretativos com a finalidade de compartimentar uma determinada região em áreas que apresentam internamente propriedades distintas das áreas adjacentes.

Tais informações fornecem subsídio para diversos objetivos de pesquisas geoambientais (MATTOS et al., 2002a). Segundo Soares e Fiori (1976), a fotointerpretação com base nas propriedades do meio físico pode ser aplicada em mapeamentos geológicos, no planejamento de obras de engenharia, na localização de áreas de captação de recursos hídricos, além de processos geomorfológicos, como movimentos de massa, assoreamento de vales, erosão acelerada e áreas sujeitas a inundações periódicas.

Neste trabalho foi utilizada a imagem ETM+ Landsat 7, banda 8 (pancromático), órbita 220, ponto 078, de 02 de setembro de 2002; azimuth solar de 48,127; elevação do sol de 42,9726, com a resolução espacial de 15 metros, em escala de 1:50.000, com contraste linear. A escolha desta banda deve-se a sua resolução espacial. Tanto a banda quanto a escala de trabalho escolhidas permitiram uma observação e identificação mais eficiente dos elementos de análise.

3.1 Interpretação das imagens de satélite

A interpretação das imagens de satélite para caracterização do meio físico é baseada na análise

dos elementos de relevo e de drenagem, das formas resultantes e de suas propriedades. Estes elementos são analisados por suas características espectrais e radiométricas, refletidas pelo arranjo dos elementos tonais na forma de diferentes texturas.

O princípio metodológico de fotointerpretação usado nesta etapa do trabalho foi proposto por Guy (1966), adaptado por Soares e Fiori (1976) e sistematizado por Veneziani e Anjos (1982). A sistemática lógica envolve três etapas: a fotoleitura, em que são reconhecidos e identificados os elementos presentes na imagem com os objetos e repartição; a fotoanálise, em que se reconhecem as leis e a complexidade de organização dos elementos para a caracterização das formas de interesse; e fotointerpretação, que é o estabelecimento das relações entre a função e o objeto e/ou suas feições, ou seja, é o estabelecimento de uma correlação entre a imagem produzida pelo sensor e o modelo do fenômeno natural, dando um significado geoambiental.

Assim, a sequência lógica de extração de dados por meio de um método sistemático permite analisar na imagem, as características de textura, estrutura e forma do elemento do terreno, e atribuir um significado de acordo com o objetivo das análises.

3.2 Zonas homólogas

Na fase de fotoanálise, o relevo e a drenagem são os objetos que dão a partida para todo o mapeamento, pois suas feições definem os elementos texturais, a partir dos quais se processam todas as análises posteriores.

O elemento textural é o elemento primário de análise na fotointerpretação e foi definido por Guy (1966) como “o menor elemento identificável na imagem, contínuo, homogêneo e passível de repetição”. Esta última característica gera uma densidade textural de imagem e, ao identificar suas variações, é possível estabelecer uma ordenação dos elementos de textura para definir as estruturas, que podem ser em função da intensidade de organização (grau de estruturação) e da complexidade de organização (ordem de estruturação) como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização das propriedades texturais de imagens orbitais

Propriedade Textural	Caracterização
Elemento Textural	Tipos dos elementos texturais para serem analisados (topografia, drenagem, forma).
Densidade Textural	Quantidade de elementos texturais por unidade de área da imagem (qualitativa).
Distribuição Textural	Disposição dos elementos texturais no espaço, de acordo com um arranjo padrão (retangular, circular).
Grau de Estruturação	Evidência de organização espacial dos elementos texturais de acordo com sua disposição.
Organização da Estruturação	Complexa organização dos elementos texturais. É dada em termos de estruturas sobrepostas.

Na área de estudo, foram definidas as classes de densidade textural (DT), a partir dos seguintes critérios:

- Muito alta (maDT): Repetição muito frequente dos elementos texturais, sendo muito pequenas suas superfícies;
- Alta (aDT): Repetição dos elementos texturais, sendo a sua superfície pequena;
- Moderada (moDT): Moderada repetição dos elementos texturais, sendo a sua superfície média.
- Baixa (bDT): Baixa repetição dos elementos texturais, sendo a sua superfície grande.

As diferentes densidades texturais e a sua lei de organização permitiram traçar limites que distinguem tais variações. Esta compartimentação define os padrões de relevo e drenagem a serem analisados para a interpretação de suas propriedades.

Assim, iniciou-se a fase de fotointerpretação onde cada território subdividido foi classificado de acordo com as propriedades do meio físico: Tropia, Permeabilidade, Plasticidade x Ruptibilidade, Alterabilidade e Assimetria. As propriedades foram interpretadas de acordo com os dois grandes compartimentos fisiográficos: aquelas com características correspondentes ao Primeiro Planalto Paranaense, com a presença de material sedimentar e vertentes festonadas; e aquelas correspondentes a Serra do Mar, com a presença de material tipicamente cristalino, vertentes retilíneas e cristas alongadas. Esta diferenciação foi necessária, pois tais características alteram alguns critérios interpretativos.

A interpretação das propriedades do meio físico ocorreu por correlação com a textura das imagens, segundo proposta de Mattos et al. (2002a), descritos a seguir:

Tropia (O) – corresponde à orientação ou não das formas de relevo e drenagem. Materiais ígneos são isotrópicos por natureza, não apresentando, assim, orientação das formas de relevo e drenagem. Os materiais metamórficos são anisotrópicos, devido a sua foliação, gnaissificação ou xistosidade e apresentam relevo e drenagens alinhados. A anisotropia das formas pode também ser resultado de intenso fraturamento. Esta propriedade permite compreender a forma e distribuição dos elementos texturais analisados, possibilitando fazer algumas inferências quanto à litologia e estruturas deformacionais presentes em uma determinada área. As classes e os critérios adotados para determinação da tropia foram:

- Muito Orientada (mO): Relevo e drenagem unidirecionais, com cristas alongadas e contínuas;
- Orientada (O): Drenagem unidirecional e relevos variando em uma ou duas direções. Podem ocorrer cristas interrompidas por fraturas em uma segunda direção preferencial;
- Pouco Orientada (pO): Drenagem bidirecional, relevo sem cristas e morros alinhados em uma ou duas direções;
- Não Orientada (nO): Relevo e/ou drenagem alinhados em mais de duas direções

Permeabilidade (P) – relaciona-se com a capacidade de infiltração das águas das chuvas no terreno. Em materiais sedimentares, esta propriedade deve-se principalmente à porosidade primária (intergranular). Já em materiais metamorfizados ou ígneos, à porosidade secundária (fraturas). Segundo Rivereau (1970), em produtos de sensoriamento remoto, a informação sobre a permeabilidade das rochas é obtida a partir da densidade da rede de drenagem e do grau de dissecação do

relevo. Ambos são inversamente proporcionais à permeabilidade quando em terrenos sedimentares e diretamente proporcionais em terrenos de rochas cristalinas. Esta propriedade é de relevante interesse para estudos geoambientais, já que indica o risco de problemas como inundação e erosão fluvial, além da possibilidade de inferir sobre a dinâmica de fluxo de água em subsuperfície e do grau de intemperismo. As classes estabelecidas para esta propriedade e seus critérios interpretativos foram:

- Muito Permeável (mP): Ausência de feições de drenagem;
- Permeável (P): Poucas feições de drenagem;
- Pouco Permeável (pP): Presença moderada de feições de drenagem;
- Não Permeável (nP): Forte presença de feições de drenagem ou áreas com canais abandonados e/ou alagáveis

Plasticidade X Ruptibilidade (F) - os materiais, ao sofrerem um esforço compressivo, deformam-se de forma rúptil ou dúctil. Os materiais rúpteis aliviam tais forças ao desenvolver fraturas (falhas e/ou juntas). Já os materiais dúcteis, por meio do desenvolvimento de dobramentos isoclinais geram foliações e reorganização dos minerais ou simplesmente dobras flexurais sem foliação aparente. As rochas com diferentes ruptibilidades se comportam de maneiras distintas quando submetidas a esforços de tração e compressão, que refletirá em maior ou menor grau de fraturamento. Isto permite indicar áreas com maior percolabilidade e possibilita inferir o grau de intemperismo e o comando do maior ou menor circulação de fluidos em subsuperfície. As classes estabelecidas e seus critérios foram:

- Muito Fraturado (mF): Mais de 60% da área com traços de juntas, ausência de foliações e material altamente rúptil;
- Fraturado (F): De 30 a 60% da área com traços de juntas, pouca presença de foliações e material rúptil;
- Pouco Fraturado (pF): Menos de 30% da área com traços de juntas ou com grande presença de foliações e comportamento entre rúptil e dúctil;
- Não Fraturado (nF): Ausência de traços de juntas ou excesso de foliações, material com comportamento dúctil

Alterabilidade (R) - é o potencial de alteração química e física do maciço quando se encontra sob a ação de agentes intempéricos. A classificação da Alterabilidade correlaciona-se à erosão, ou seja, áreas em que predomina a Alterabilidade alta possuem uma baixa resistência à erosão, formando um espesso manto de alteração intempérica. De forma contrária, áreas onde a Alterabilidade é baixa, predomina uma alta resistência à erosão e quase não existe material inconsolidado de cobertura, com exceção dos solos rasos (litossolos). Além de fornecer informações sobre a estabilidade dos terrenos quanto a colapsos e erosões esta propriedade indica o potencial a permeabilidade de fluidos de acordo com a espessura do manto de alteração intempérica. As classes estabelecidas e os critérios foram:

- Muito Resistente (mR): Cristas alongadas, interrompidas ou não, com vertentes côncavas e simétricas;
- Resistente (R): Encostas com vertentes côncavo-retilíneas e topos levemente convexos;
- Pouco Resistente (pR): Encostas com topos convexos e parte inferior côncava;
- Não Resistente (nR): Sucessão de formas convexas rebaixadas

Assimetria (A) - considera-se um relevo assimétrico quando as quebras negativas e positivas separam duas zonas, uma com maior e outra com menor declividade, ou com propriedades de relevo diferentes alternadamente. A assimetria de drenagem é determinada pela diferença de densidade, extensão e angularidade entre os dois lados de um alinhamento negativo e que para ele convirjam. Esta propriedade permite uma avaliação rápida da estrutura geológica, podendo definir classes de mergulho de camadas. Pelo exame da imagem, pode-se definir diferentes graus de assimetria e simetria, classificados de acordo com os seguintes critérios:

- Muito Alta Assimetria (maA): Mergulho menor que 3°, camadas subhorizontais e rede de drenagem apresentando forma bidirecional com angularidade média, elementos curvos e retilíneos;
- Alta Assimetria (aA): Mergulho de 3 a 10°, camadas pouco inclinadas e rede de drenagem unidirecional, com angularidade baixa, ou bidirecional assimétrica;

- Moderada Assimetria (moA): Mergulho de 10 a 30°, camadas medianamente inclinadas e drenagem assimétrica;
- Baixa Assimetria (bA): Mergulho de 30 a 60°, camadas fortemente inclinadas a subverticais e rede de drenagem unidirecional, com angularidade média e a direção dominante desenvolve-se paralelamente à direção das camadas.

O conjunto de compartimentos e suas propriedades interpretadas definem o mapa de zonas homólogas por textura de imagem. Nota-se que não foram definidas as zonas homólogas em áreas urbanas devido à dificuldade de interpretação dos elementos texturais ocasionada pela alteração do relevo e drenagem.

Uma etapa de campo permitiu a constatação das propriedades interpretadas, assim como das

feições de relevo e espessuras de manto de alteração intempérica.

3.3 Unidades Geoambientais

As Unidades Geoambientais foram elaboradas a partir das zonas homólogas, onde se realiza a equivalência entre as mesmas, utilizando relações de ordem (zonas homólogas com mesmas propriedades que recebem a mesma denominação) ou simetria (zonas homólogas adjacentes com as mesmas propriedades que tornam-se somente uma unidade geoambiental por aglutinação), constituindo, assim, Unidades Geoambientais. A partir de sua cartografia, é possível estabelecer classes de potencialidade e limitações do meio físico, para diferentes usos, por meio das propriedades observadas. O mapa de Unidades Geoambientais é apresentado na Figura 2, a seguir.

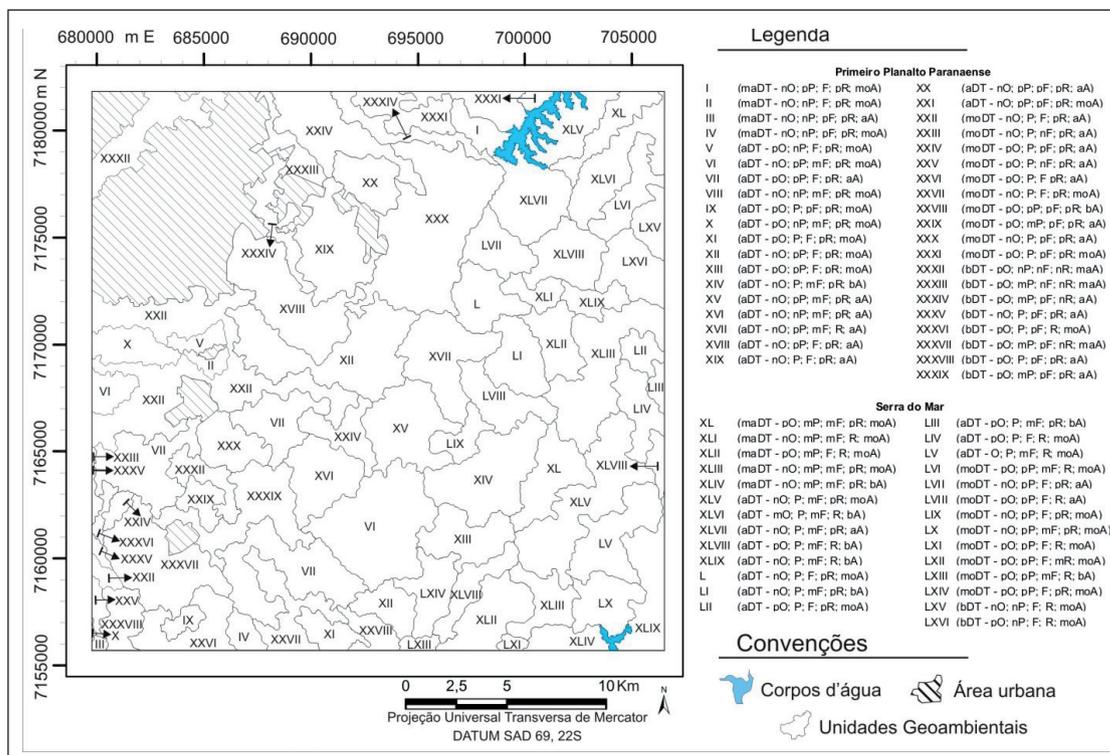


Figura 2 - Mapa de Unidades Geoambientais da região de São José dos Pinhais (PR).

4 MAPEAMENTO MORFOESTRUTURAL

A sistemática da análise morfoestrutural parte do pressuposto de que muitas estruturas geológicas podem ser refletidas em superfície e que tal reflexo é passível de identificação por meio da análise de padrões específicos como anomalias da

rede de drenagem e de feições de relevo. Os materiais utilizados são produtos de sensoriamento e/ou cartográficos que auxiliam no reconhecimento e delimitação dessas anomalias e feições.

Esse método utiliza-se dos elementos de drenagem e de relevo, sua associação e classificação de acordo com o caráter homólogo ou não dos

mesmos. Este mapeamento procura ainda interpretar o significado geológico para as diferentes formas ou associações dos elementos de drenagem e relevo, admitindo que estes sejam condicionados por fatores estruturais ou litológicos, através dos processos morfogenéticos atuando sobre o substrato (SOARES et al., 1982; MATTOS et al., 2002b).

4.1 Extração da Rede de Drenagem

A extração da rede de drenagem foi realizada sobre cartas topográficas nas escalas 1:50.000 e 1:25.000 e da mesma imagem do satélite Landsat utilizada no Mapeamento Geoambiental, nas bandas 8 e 4. A banda 8 (pancromática) permitiu uma melhor definição das formas e padrões de drenagem, devido a sua resolução espacial. Já a banda 4 (infra-vermelho próximo) é um material auxiliar, pois emite melhor resposta espectral para relevo e corpos d'água no entanto compromete na resolução espacial.

O traçado da rede de drenagem foi obtido a partir da extração dos canais representados nas cartas topográficas, complementados por meio da disposição da curvas de nível e revisados com as imagens de satélite, procurando-se representar com precisão a sua geometria.

4.2 Análise da Rede de Drenagem

A análise da rede de drenagem tem como objetivo a busca por evidências que possibilitem a interpretação estrutural e/ou litológica. O controle estrutural é definido pela presença das descontinuidades, tanto devido ao acamamento ou foliação como às fraturas. O seu arranjo espacial controla a disposição dos elementos de drenagem.

Para a compreensão do arcabouço estrutural e tipos de controle foram utilizadas as seguintes análises:

- Análise e delimitação de Trends estruturais (ou zonas homólogas de drenagem unidirecional fortemente estruturado). São definidos a partir da análise da rede de drenagem, onde os elementos de 1ª e 2ª ordem de drenagem encontravam-se alinhados anormalmente segundo duas direções preferenciais. Esses feixes (Trends) são interpretados como sendo

o reflexo em superfície de falhas de grande rejeito (centenas de metros) no embasamento (SOARES et al., 1982).

- Análise das formas anômalas de drenagem (anelares, radiais, assimetrias e lineamentos estruturais). As formas anelares representam o reflexo na superfície de camadas flexuradas, geralmente se estabelecendo sobre estruturas dômicas ou depressões estruturais, concordantes com o acamamento ou com o fraturamento anelar. As drenagens radiais também podem ser o reflexo do controle estrutural e indicam o sentido geral do mergulho das camadas, mas podem ser de expressão puramente topográfica. Assim, para constatar os altos e baixos estruturais com maior precisão, recomenda-se que essas formas sempre sejam analisadas em conjunto com as formas de assimetria de drenagem, que fornecem indicações de mergulho convergentes ou divergentes do acamamento. Por fim, os lineamentos estruturais são interpretados como descontinuidades da crosta que podem representar discordâncias estratigráficas e/ou estruturais e geralmente representam os grandes falhamentos da área.
- Determinação dos altos e baixos estruturais por meio das linhas de contorno estrutural não-cotadas. Resultam da interpretação das feições anômalas da drenagem, dos padrões assimétricos da rede de drenagem e de Trends e lineamentos estruturais. As linhas de forma correspondem à disposição geométrica do acamamento/foliação, assumindo um significado aproximado de contorno estrutural não-cotado.
- Análise e cartografia dos traços de juntas, seus máximos 1 e 2 e delimitação das zonas de variação de máximos 1 e 2. A partir da extração de elementos de drenagem de 1ª e 2ª ordem retilíneos e fortemente estruturados são obtidos traços de juntas. As duas direções preferenciais ocorridas em uma área são denominadas de máximo 1 e máximo 2 de traços de juntas. As zonas de variação de máximos 1 e 2 são obtidas pela identificação das áreas com intersecção entre duas ou mais direções dos máximos.

Algumas destas análises ficam comprometidas na área urbana devido a modificações realizadas na drenagem, como canalização, retificação

e represamento. A determinação de linhas de contorno estrutural não-cotadas foi possível por se tratar de linhas de tendência.

Uma análise de campo foi realizada, o que permitiu a constatação da presença de feições

mapeadas, além de tomada de medidas estruturais das descontinuidades.

Após análise e mapeamento de todas as feições descritas anteriormente, obtiveram-se como resultados os mapas apresentados na Figura 3, a seguir:

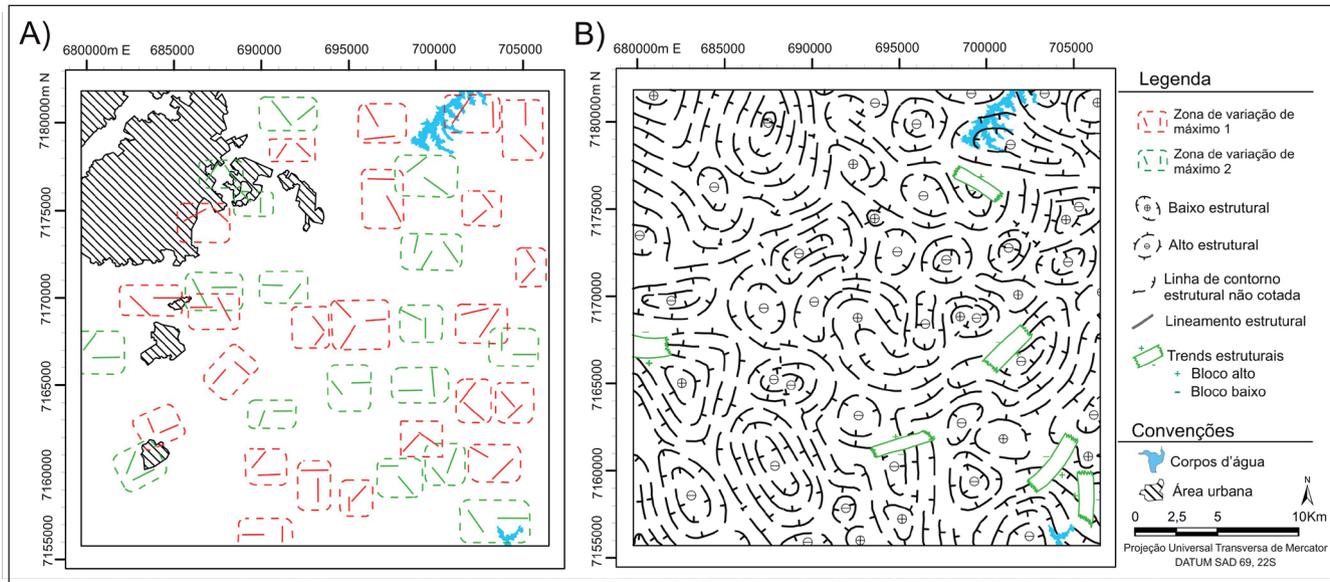


Figura 3 – Resultados do Mapeamento Morfoestrutural. Em A), o mapa de zonas de variação de máximos e em B) o mapa de altos e baixos estruturais da região de São José dos Pinhais (PR).

Segundo Mattos et al. (2002b), áreas de ocorrência somente de zona de variação de máximo 1 apresentam alta erodibilidade. Já nas de zona de variação de máximo 2, os processos de erodibilidade estão apenas potencializados e não instalados, pois as formas de relevo estão em equilíbrio dinâmico quando não passam por modificações antrópicas, se desestabilizando ao início de qualquer intervenção humana. Quando se sobrepõem zonas de variação de máximos 1 e 2, tais áreas possuem processos erosivos já instalados, caracterizando-as como de muito alta erodibilidade. Na área de estudo, pode-se observar a maior frequência de zonas de variação de máximos na porção leste, o que demanda mais atenção com relação à instabilidade do terreno.

O mapa de linhas de forma ou de contorno estrutural não-cotado demonstra que na área os altos e baixos estruturais apresentam-se muito perturbados por descontinuidades e Trends, modificando suas configurações e, em alguns casos, colocando em contato camadas com o sentido do mergulho inverso. Tais feições reforçam a hipótese da área ter passado por diferentes

processos deformacionais pós-ciclo brasileiro. Essas diferentes retomadas dos processos deformacionais atuam, em geral, sobre antigas zonas de fraqueza (descontinuidades), reativando-as. A presença das descontinuidades e Trends é mais marcante na porção leste da área de estudo, local este de domínio de relevo característico do compartimento fisiográfico Serra do Mar.

5 MAPA DE FRAGILIDADE DO MEIO FÍSICO A DERRAMAMENTO DE ÓLEO E DERIVADOS

Com os materiais obtidos dos mapeamentos descritos anteriormente, desenvolveu-se um mapa de fragilidade do meio físico ao derramamento de petróleo e derivados para a região estudada. O mapa de fragilidade do meio físico é um mapa síntese gerado da integração dos diferentes documentos obtidos no mapeamento geoambiental e morfoestrutural.

A maior problemática de derramamento de petróleo e seus derivados em ambientes continentais

é o seu aprisionamento subsuperficial, já que contaminam o solo, a água subterrânea, e são de difícil remoção. Assim, o conhecimento das localidades com características mais agravantes, auxilia no planejamento da ocupação e gestão de território, além de controlar e prevenir vazamentos.

Por meio do mapeamento geoambiental foram estabelecidas classes de fragilidade, de acordo com o seu potencial percolativo, estabelecendo-se valores para as classes das propriedades mais relevantes (Alterabilidade, Permeabilidade e Plasticidade X Ruptibilidade), como podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores estabelecidos para cada classe das propriedades: Alterabilidade (Resistência à Erosão), Permeabilidade e Plasticidade x Ruptibilidade para a determinação das Classes de Fragilidade.

Alterabilidade		Permeabilidade		Plasticidade X Ruptibilidade	
Classe	valor	Classe	valor	Classe	valor
Muito resistente (mR)	3	Muito permeável (mP)	8	Muito fraturado (mF)	4
Resistente (R)	6	Permeável (P)	6	Fraturado (F)	3
Pouco resistente (pR)	9	Pouco permeável (pP)	4	Pouco fraturado (pF)	2
Não resistente (nR)	12	Não permeável (nP)	2	Não fraturado (nF)	1

A Alterabilidade é a propriedade que recebeu maior importância, pois por meio de sua interpretação pode-se apontar localidades onde o manto de alteração intempérica é mais espesso (não resistente - nR), e portanto, são estes os locais com a maior quantidade material inconsolidado que pode ficar saturado pelos fluidos derramados em acidentes. Ao contrário, em locais muito resistentes, onde podem ocorrer solos rasos, a pouca profundidade em que se encontra o maciço rochoso diminui a quantidade de material inconsolidado contaminado.

A Permeabilidade, muito importante para a análise desta temática ambiental, indica de forma direta as localidades com maior facilidade de entrada de fluidos no sistema subsuperficial. Foi considerada uma propriedade de importância intermediária quanto aos critérios de fragilidade, pois é dependente da espessura do manto de alteração.

A Plasticidade x Ruptibilidade também é uma propriedade muito importante para esta problemática ambiental, pois possibilita identificar áreas com maior possibilidade de percolação de material. Como a percolabilidade depende do espaço vazio existente, ou não, na descontinuidade, esta propriedade recebeu menor peso para a análise em caso de acidentes de derramamento de petróleo e seus derivados.

A soma dos valores correspondentes às classes de cada propriedade gerou classes de fragilidade, quais sejam: *Muito frágil* (soma dos valores entre 21 e 24, em vermelho); *Frágil* (soma entre 16 e 20, em laranja); *Moderadamente frágil* (soma entre 11 e 15, em amarelo) e *Pouco frágil* (soma entre 6 e 10, em verde).

Sobrepostas às classes de fragilidade, apresentam-se algumas das feições obtidas no mapeamento morfoestrutural, considerados somente aqueles casos de maior gravidade quanto ao controle do material derramado.

Foram escolhidas, para tanto, áreas com altos estruturais (por representarem armadilhas a petróleo e derivados, além do caráter dispersivo), Trends estruturais e lineamentos estruturais que interceptam a primeira linha do contorno de altos estruturais e sobreposição de zonas de variação de máximos (casos que agravam a percolação do material devido ao alto grau de fraturamento e falhamento do terreno, contribuindo também para a dispersão de fluidos).

O resultado deste procedimento deu origem ao mapa síntese de fragilidade ambiental do meio físico a derramamento de petróleo e derivados, apresentado na Figura 4.

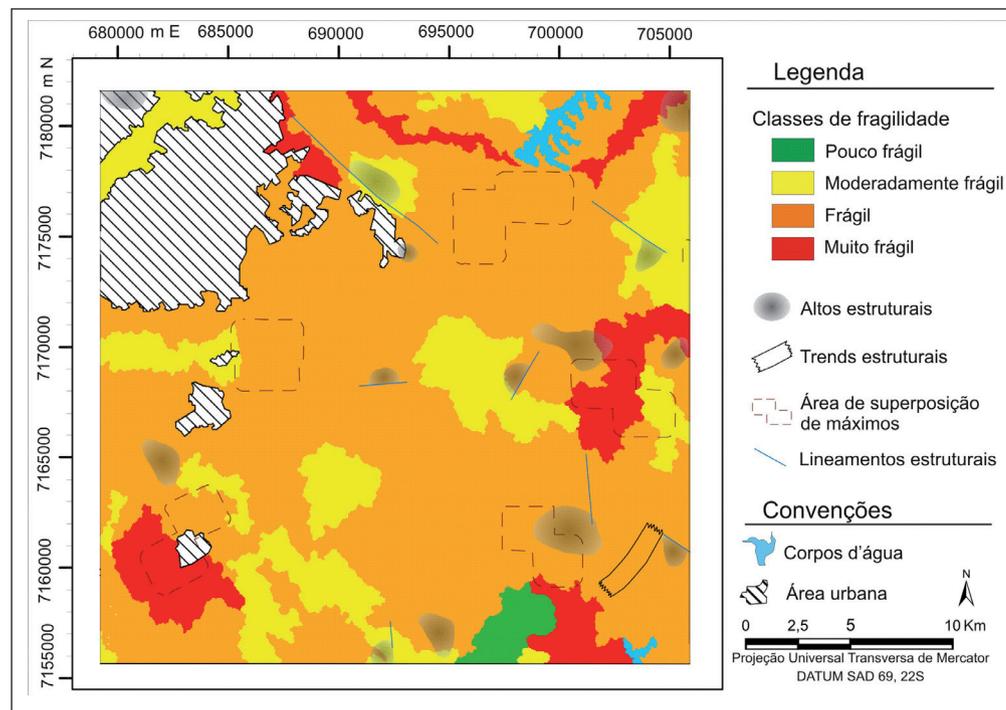


Figura 4 – Mapa Síntese de Fragilidade ambiental do meio físico a derramamento de petróleo e derivados da região de São José dos Pinhais (PR).

A integração das informações citadas anteriormente possibilitou desenvolver um mapa síntese, posto que a representação de todas as feições dificultaria a interpretação por excesso de informação.

6 CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida torna-se interessante à medida que proporcionou a representação em área das classes de fragilidade e feições agravantes. No entanto, é importante destacar que estas últimas representam uma área de tendência dos respectivos sistemas, e que não se deve considerar o limite mapeado como exato e abrupto.

A presença de uma unidade classificada como muito frágil, de uma superposição de zonas de variação de máximos, um alto estrutural e lineamento estrutural próximas à região metropolitana é preocupante. No aglomerado urbano há uma grande ocorrência de acidentes de trânsito que podem ocasionar em tombamento de caminhões que transportam derivados de petróleo, além da grande concentração de postos de abastecimento de combustíveis, que nem sempre estão dentro das normas ambientais. Estes tipos de derramamento,

temporalmente pontuais ou contínuos, podem representar um grande problema, pois a contaminação pode ocorrer em diferentes intensidades, levando a prejuízos ambientais, sociais e econômicos de diferentes graus.

É importante ressaltar que não se recomenda utilizar somente o mapa síntese para a resolução de problemas oriundos do derramamento de petróleo e seus derivados, pois a interpretação de todas as informações obtidas no Mapeamento Morfoestrutural, inclusive aqueles não cartografados no mapa síntese de fragilidade ambiental, contribuem para um melhor conhecimento das dinâmicas do meio físico, e conseqüentemente, para uma melhor tomada de decisão.

AGRADECIMENTOS

Sinceros agradecimentos à PETROBRAS pelo financiamento do projeto “Mapeamento do meio físico para elaboração de mapas de sensibilidade ambiental a derramamento de petróleo e derivados em ambientes continentais” e ao CEAPLA (Centro de Análise e Planejamento Ambiental - Unesp Rio Claro), pelo auxílio técnico e estrutural, sem os quais o presente trabalho não seria possível.

REFERÊNCIAS

- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; AZEVEDO, L. G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T. *Curso de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico*. São José dos Campos: INPE, 1996.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná - escala 1:600.000*. 1981.
- GUILHERME, I. R.; FAITA, R.; RIEDEL, P. S.; SEMENSATTO, D. L.; MARQUES, C. M. SISAQ: Sistema de Informação para Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental. In: WORKSHOP DE COMPUTAÇÃO APLICADA À GESTÃO DO MEIO AMBIENTE, 1, 2009, Bento Gonçalves. *Anais do...*, 2009, v. 1, p. 1299 - 1307.
- GUY, M. Quelques principes e quelques experiences sur la methodologie de la photo-interpretation. In: II Symposium International de Photo-Interpretation, 2, 1966, Paris. *II Symposium International de Photo-Interpretation: Acte*, 1966, v.1, p.21-41.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR). *Cartas climáticas do Paraná*. Disponível em: <<http://www.iapar.br/>>. Acesso em: 18 ago. 2009.
- MATTOS, J. T. de; SANTANA, M. A; OHARA, T. Imagens do satélite TM-Landsat para compartimentação do meio físico, visando planejamento regional: critérios interpretativos. In: SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, n. 10, 2002, Cochabamba. *Anais do X Simposio Latinoamericano de Percepción Remota - CD-ROM*, Cochabamba: SELPER, 2002a.
- MATTOS, J. T. de; JIMÉNEZ-RUEDA, J. R.; OHARA, T.; MENDES, M. L. de B.; SANTANA, M. A. Critérios para mapeamento de classes de risco a erosão de solos em imagem TM-Landsat. In: SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, n. 10, 2002, Cochabamba. *Anais do X Simposio Latinoamericano de Percepción Remota - CD-ROM*, Cochabamba: SELPER, 2002b.
- OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C. (Coord.) *Atlas geomorfológico do Estado do Paraná*. Escala 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000/ Minerais do Paraná; Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006. 63p
- RIVEREAU, J. C. *Curso de fotointerpretação: notas de aula*. Série Didática, Brasília Departamento de Geociências - UnB, n. 4, 1970, 128p.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. *Revista do Departamento de Geografia - USP*. São Paulo, v. 8, 1994, p. 63 - 74.
- SOARES, P. C.; FIORI, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícias Geomorfológicas*. Campinas, v. 6, n.32, 1976, p.71-104.
- SOARES P. C., LUZ M. E. R., REDAELLIR., GUERRA S. M. S. Análise morfoestrutural em fotos aéreas: aplicação na prospecção de hidrocarbonetos na bacia do Paraná. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2, 1982, Brasília. *Anais...* v. 1, p.157-168.
- VENEZIANI, P.; ANJOS, C. E. *Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia*. São José dos Campos, INPE, 1982, 54p.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA GEOLOGIA DE ENGENHARIA NO CONTROLE PREVENTIVO E CORRETIVO DOS PROCESSOS EROSIVOS

FERNANDO XIMENES DE TAVARES SALOMÃO

Prof. Dr. do Departamento de Geologia Geral da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT)

KÁTIA CANIL

Pesq. Dr^a. do Laboratório de Riscos Ambientais do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT)

SAMANTHA PAULO RODRIGUES

Mestre em Recursos Hídricos

RESUMO ABSTRACT

O diagnóstico, prognóstico e controle dos processos erosivos exige o envolvimento de profissionais de diferentes áreas do conhecimento, contemplados pela Geologia de Engenharia, transferindo a esta importante papel na solução de problemas envolvendo a minimização dos impactos ambientais e recuperação do ambiente. Neste artigo, dois estudos de caso foram apresentados, enfatizando o necessário conhecimento do funcionamento hídrico voltado ao estudo da erosão, exemplificando abordagens próprias da Geologia de Engenharia, que visam o controle preventivo em bacia hidrográfica e o controle corretivo de boçorocas em área urbana. Na bacia hidrográfica do Rio São Francisco, importante contribuinte do Pantanal Matogrossense, foi aplicada a abordagem morfopedológica, permitindo a compartimentação cartográfica de áreas relativamente homogêneas do meio físico, que foram interpretadas em relação ao funcionamento hídrico e aplicados critérios técnicos voltados à determinação da suscetibilidade a erosão laminar e linear. Para a área urbana e periurbana do município de Franca (SP) foram identificadas e caracterizadas trinta e duas feições erosivas de grande porte, tendo em vista a interpretação da dinâmica e evolução dos processos erosivos lineares, com objetivo de subsidiar a proposição de diretrizes voltadas à concepção de projetos e de obras de contenção.

Palavras Chave: controle preventivo e corretivo da erosão, erosão em bacia hidrográfica, erosão em área urbana.

The diagnosis, prognosis and control of erosion requires the involvement of professionals from different areas of knowledge contemplated by the Engineering Geology, transferring to it an important role in the solution of problems relating to minimizing environmental impacts and environmental restoration. In this article, two case studies were presented, emphasizing the necessary knowledge of the hydric focused to the study of erosion, exemplifying their own approaches of Engineering Geology, for the preventive control in watershed and corrective control of gullies in urban areas. In the basin of the São Francisco River, a major contributor to the Pantanal, morphopedological characteristics approach was applied, allowing the partitioning of the relatively homogeneous mapping of the physical environment, which were interpreted in relation to hydric functioning and applied technical criteria aimed at determining the susceptibility to erosion laminar and linear. To the urban area of Franca municipality in the state of São Paulo, it was identified and characterized thirty-two gullies, with a view to interpreting the dynamics and evolution of linear erosion, to serve as input to the proposition of guidelines focused on project conception and contention works.

Key Words: preventive and corrective erosion control, erosion in watershed, erosion in urban area.

1 INTRODUÇÃO

Na natureza, os elementos que compõem o meio físico (rocha, relevo e solo) interagem mutuamente com o clima e a vegetação, originando processos do meio físico, ou exógenos. Desde que não haja intervenção da ação humana, tais processos atuam de maneira equilibrada recompondo as condições naturais. Caso contrário, com a ação antrópica, a intensificação dos fenômenos envolvidos altera o funcionamento equilibrado do ambiente natural podendo provocar impactos em prejuízo do próprio homem.

A Geologia de Engenharia, “especialização que enfoca as relações biunívocas entre o homem e o meio físico geológico” (RUIZ; GUIDICINI, 1998), pode e deve cumprir importante papel voltado à minimização dos impactos ambientais e à recuperação do ambiente, agregando as diferentes áreas do conhecimento que respondem pela solução de problemas de engenharia e meio ambiente.

Por outro lado, em regiões tropicais de clima quente e úmido, como boa parte de nosso território, os processos do meio físico manifestam-se sob influência decisiva do comportamento das águas, não fugindo à regra a erosão pluvial. Isso provavelmente tenha levado diversos autores a diferenciar ou mesmo conceituar os tipos de processos erosivos com base na forma de escoamento superficial e subterrâneo das águas de chuva: erosão laminar ou em lençol, condicionada ao escoamento difuso; erosão em sulco, por concentração das linhas de fluxo superficial, resultando em pequenas incisões na superfície do terreno, que podem evoluir por aprofundamento a ravinas; e erosão em boçoroca ou voçoroca, que se desenvolve por influência não somente das águas superficiais, mas também dos fluxos de água subsuperficial, onde se inclui o aquífero freático, com desenvolvimento de fenômeno de piping.

Assim, o diagnóstico, prognóstico, e adoção de medidas efetivas de controle preventivo e corretivo dos processos erosivos, devem ser realizados com base no entendimento dos mecanismos relacionados com a dinâmica do funcionamento hídrico no terreno.

Diversos procedimentos e técnicas vêm sendo adotados de maneira a permitir esse entendimento, dependendo do campo de atuação dos profissionais envolvidos e objeto de trabalho.

Neste artigo, serão apresentados dois estudos de caso enfatizando o necessário conhecimento do funcionamento hídrico voltado ao estudo da erosão, procurando exemplificar abordagens próprias da Geologia de Engenharia visando o controle erosivo em bacia hidrográfica e em área urbana. Pretende-se valorizar os procedimentos metodológicos e critérios técnicos apropriados à Geologia de Engenharia visando a determinação da suscetibilidade à erosão laminar e linear, o controle corretivo de boçoroca e a representação cartográfica voltada às ações preventivas.

2 CONTROLE EROSIVO EM BACIA HIDROGRÁFICA

Segundo Ghezzi (2003) as bacias hidrográficas constituem um instrumento de grande interesse científico, em virtude da riqueza de informações que delas podem ser extraídas. Pesquisadores diversos como Lombardi Neto et al (1995), Resende et al (1995) e Botelho (1996) chamam a atenção para a bacia hidrográfica como unidade natural onde é possível reconhecer e estudar as relações existentes entre os diversos elementos da paisagem, e os processos que atuam na sua formação e evolução. Por meio de estudos realizados nessas unidades podem ser observados diversos aspectos indicadores de conservação, degradação, possibilidades de exploração pelo homem, tornando assim uma unidade ideal para gestão e planejamento do uso e conservação das terras.

Várias metodologias vêm sendo utilizadas para o melhor entendimento do processo erosivo, em bacias hidrográficas e áreas urbanas, pautando na suscetibilidade à instalação da erosão, tendo como base a interrelação dos elementos do meio físico (LOHMANN, 2005). Dentre elas, a abordagem morfopedológica permite a análise integrada da paisagem e a delimitação de compartimentos homogêneos em relação à dinâmica do meio físico e configuração do funcionamento hídrico de vertentes, conduzindo à interpretação da suscetibilidade a erosão (CASTRO; SALOMÃO, 2000; LOHMANN; SANTOS, 2009).

Com base nesse pressuposto, a bacia hidrográfica do Rio São Francisco foi selecionada para a aplicação da abordagem morfopedológica com vistas à determinação da suscetibilidade à

descrições de perfis de solo expostos no terreno e em trincheiras, permitindo identificar as coberturas pedológicas em relação às características morfológicas relacionadas ao comportamento hídrico. Tais características morfológicas constituem atributos do solo, observáveis em campo, que condicionam o movimento da água, destacando-se a textura, estrutura, porosidade, e determinadas feições pedológicas, tais como plintita, concreção ferruginosa e gleização.

Foi possível, assim, deduzir para cada compartimento morfopedológico as possibilidades de infiltração e escoamento superficial e subterrâneo das águas. A análise integrada dos elementos que compõe o meio físico e interpretação do funcionamento hídrico constituíram, portanto, a chave para a compreensão do comportamento dos compartimentos morfopedológicos em relação ao desenvolvimento dos processos erosivos, que foram interpretados quanto à suscetibilidade a erosão laminar e linear com base em critérios apresentados por IPT (1989) e por Salomão (1994; 2007).

Antecedendo as campanhas de campo, foram previamente escolhidos locais a serem identificados e interpretados, com base na análise de imagens de alta resolução. Essas coordenadas geográficas foram lançadas no GPS, auxiliando os trabalhos de campo.

Todas as informações apuradas foram utilizadas, elaborando-se o mapa morfopedológico final em escala de 1:50.000, onde cada compartimento

contempla vertentes relativamente homogêneas em relação à configuração topográfica e seqüência de solos constituindo, assim, sistema pedológico com determinado comportamento das águas infiltradas e escoadas em superfície e em subsuperfície. O mapa morfopedológico apresentado na Figura 2 destaca a existência de nove compartimentos, na bacia hidrográfica do Rio São Francisco, com denominações que permitam facilitar suas identificações em campo: MP-1 Planície e Terraços Aluviais; MP-2 Morros Alongados; MP-3 Morrotes e Colinas Médias em Rochas Básicas; MP-4 Colinas Amplas com Latossolos; MP-5 Colinas Amplas e Médias com Argissolo; MP-6 Colinas Amplas e Médias com Topo Plano e Solos Rasos; MP-7 Colinas Amplas com Neossolo Quartzarênico; MP-8 Escarpas; MP-9 Rampas com Latossolo.

A suscetibilidade à erosão linear dos compartimentos morfopedológicos foi interpretada com base na compreensão do comportamento das águas de chuvas e do aquífero freático ao longo da vertente em sua totalidade, conhecendo-se os diferentes materiais que a constituem, suas características diretas e indiretas relacionadas à circulação da água, e predisposição aos processos erosivos frente às formas de uso do solo.

Com base em DAEE/IPT (1989) e Salomão (2007) foram destacadas cinco classes de suscetibilidade à erosão linear, definidas com base nos critérios apresentados no Quadro 1.

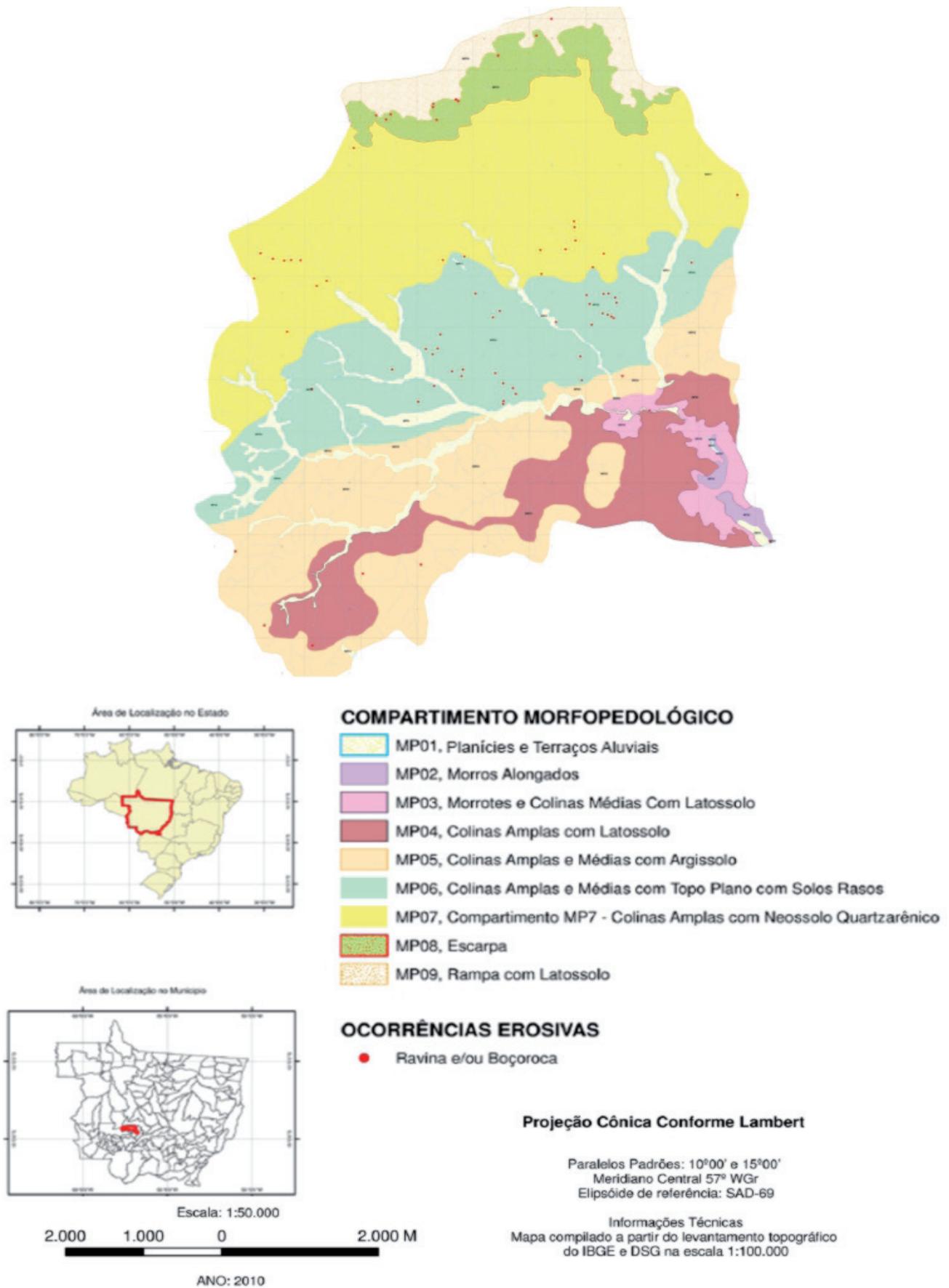


Figura 2 - Mapa morfo-pedológico da bacia hidrográfica do Rio São Francisco.

Quadro 1 - Critérios para a definição das classes de suscetibilidade à erosão linear.

Classes de Suscetibilidade		Comportamento Hídrico do Terreno	Comportamento Erosivo em Relação às Formas de Uso e Ocupação
Classe I	Extremamente suscetíveis a ravinas e boçorocas	Aquífero freático situado a pequena profundidade ou aflorante, apresentando elevado gradiente hidráulico em solos hidromórficos e/ou com erodibilidade muito alta, situados, em geral, em áreas de nascentes, fundos de vales, e de cabeceira de cursos d'água.	Áreas muito favoráveis à instalação de fenômenos de piping, onde as boçorocas se desenvolvem logo após a destruição da cobertura vegetal natural, independente das formas de ocupação.
Classe II	Muito suscetíveis a ravinas e pouco suscetíveis a boçorocas	Áreas favoráveis à concentração de fluxos de água por escoamento superficial e subsuperficial, em geral situadas em terrenos com certa declividade, associados à solos muito erodíveis, apresentando alto gradiente textural, como observado nos Argissolos.	Os processos de ravinamento se desenvolvem em função da ocupação do solo a partir de pequena concentração das águas de escoamento superficial; fenômenos de piping que condicionam a formação de boçorocas somente se manifestam quando as ravinas se aprofundam, interceptando o nível freático.
Classe III	Moderadamente suscetíveis a ravinas e pouco suscetíveis a boçorocas	Áreas de dissipação dos fluxos de água, bem drenadas e com elevadas permeabilidades até grandes profundidades, facilitando rápida infiltração da água de chuva; entretanto a cobertura pedológica constituída por solos pouco coesos permite fácil remoção das partículas por escoamento das águas superficiais.	Processos erosivos por ravinamento ocorrem condicionados a grandes concentrações das águas de escoamento superficial, devido a determinadas formas de ocupação que favorece os caminhos preferenciais das águas, como exemplo, estradas, arruamentos, caminhos de serviços, trilhas de gado e cercas; fenômenos de piping desenvolvendo boçorocas somente ocorrem quando o aprofundamento da ravina interceptar o nível freático. Em geral, são áreas com declividades suficientes para permitir o escoamento das águas superficiais, constituído por solos de textura arenosa ou textura média, como o Neossolo Quartzarênico e Latossolo de textura média.
Classe IV	Suscetíveis a ravinas e não suscetíveis a boçorocas	Áreas favoráveis à concentração dos fluxos de água por escoamento superficial, entretanto a cobertura pedológica apresenta pequena profundidade e com ausência de lençol freático.	Ravinamentos ocorrem condicionados à declividade das encostas, e a determinada forma de ocupação, que favorece a concentração das águas de escoamento superficial.
Classe V	Não suscetíveis a ravinas e boçorocas	Áreas com ausência de escoamento das águas superficiais e com ausência de aquífero freático, ou apresentando aquífero freático com gradiente subterrâneo muito baixo, incapazes de gerar fenômenos de piping.	Áreas aplainadas e/ou de agradação impossibilitando o escoamento das águas superficiais, mesmo quando submetidas a determinadas formas de ocupação.

A suscetibilidade à erosão laminar dos compartimentos morfopedológicos, foi determinada com base nas relações entre a erodibilidade e declividade, conforme proposta apresentada por IPT (1989) e por Salomão (1999; 2007).

A declividade das vertentes apresentada para os compartimentos morfopedológicos foi determinada em campo por meio de levantamento topográfico em vertentes representativas com GPS Geodésico L1 e L2, a projeção UTM South America

Zone 21, e o Datum Samer 69 Brasil. O marco usado foi implantado pelo IBGE, Satélite 91202, INTERMAT/PNUD E SEPLAN/PODEAGRO.

Os solos existentes na área objeto foram categorizados em classes de erodibilidade, adaptadas de Salomão (2007), conforme mostra o Quadro 2, permitindo por meio do cruzamento matricial com quatro classes de declividade determinar as classes de suscetibilidade à erosão laminar, apresentado no Quadro 3.

Quadro 2 - Classes de erodibilidade, adaptado de Salomão (2007).

Classes de Erodibilidade	Unidades Pedológicas
1 - Muito Alta	Cambissolo, Neossolo Litólico, Neossolo Quartzarênico.
2 - Alta	Argissolo.
3 - Média	Nitossolo.
4 - Baixa	Latossolo Vermelho.
5 - Não Erodível	Gleissolo, Neossolo Quartzarênico Hidromórfico, Organossolo, Neossolo Flúvico em relevo Plano.

Quadro 3 - Critério adotado na definição das classes de suscetibilidade à erosão laminar.

Erodibilidade	Declividade (%)			
	I (> 20)	II (12 a 20)	III (6 a 12)	IV (< 6)
1 - Muito Alta	I	I	II	II
2 - Alta	I	II	II	III
3 - Média	II	III	III	IV
4 - Baixa	III	IV	IV	V
5 - Não Erodível	Não existe	Não existe	Não existe	V

A integração de dados de erodibilidade e declividade, conforme mostrado no Quadro 2, permitiu a determinação de cinco classes de suscetibilidade à erosão laminar, compatibilizadas às classes de capacidade de uso da terra, conforme explicitado no Quadro 4.

Quadro 4 - Compatibilização entre classes de suscetibilidade à erosão laminar e classes de capacidade de uso da terra, adaptado de Lepsh (1983) e Salomão (2007).

Classes de Suscetibilidade à Erosão Laminar		Classes de Capacidade de Uso das Terras	Características dos terrenos e Potencialidades e Limitações ao Uso do Solo
I	Extremamente suscetível	VII e VIII	Terras impróprias ao cultivo, indicadas para a preservação ou para reflorestamento.
II	Muito suscetível	VI	Terras com problemas complexos de conservação, parcialmente favoráveis à pastagem, sendo mais indicadas a reflorestamento.
III	Moderadamente suscetível	IV	Terras com problemas complexos de conservação, indicadas a pastagem, culturas perenes e semi-perenes, e a reflorestamento.
IV	Pouco suscetível	III	Terras com problemas complexos de conservação, mais indicadas à pastagem, culturas perenes e semi-perenes, reflorestamento, e eventualmente a culturas anuais, porém exigindo práticas intensivas mecanizadas de controle da erosão.
V	Pouco a não suscetível	I, II e V	Terras com problemas simples de conservação, podendo ser utilizadas com qualquer tipo de cultura, exigindo práticas não mecanizadas de controle da erosão.

A seguir no Quadro 5 encontram-se apresentados os compartimentos morfopedológicos suas características principais envolvendo os tipos de solos, as formas de relevo e declividade média das

vertentes, o funcionamento hídrico das coberturas pedológicas, e a suscetibilidade a erosão laminar e linear.

Quadro 5 - Resumo explicativo da suscetibilidade à erosão de cada compartimento morfopedológico.

Compartimento morfopedológico		Solo	Relevo e declividade	Funcionamento hídrico	Suscetibilidade a erosão
MP-1	Terraços e Planícies aluviais	Neossolo Flúvico	Terraço e Planície < 3%	A água de chuva infiltra com relativa facilidade, sendo retida no aquífero freático aflorante e subaflorante, que escoam em direção ao fundo de vale.	Baixa suscetibilidade à erosão laminar e extremamente suscetível a ravinas e boçorocas.
MP-2	Morros Alongados	Neossolo Litólico e Cambissolo	Morros > 20%	A água de chuva infiltra parcialmente no horizonte superficial, sendo retida pelo substrato rochoso a pequena profundidade, escoando-se em superfície.	Extremamente suscetível à erosão laminar, suscetível a sulcos e ravinas, e não suscetível a boçorocas.
MP-3	Morrotes e Colinas Médias Em Rochas Básicas	Cambissolo (porção superior da vertente)	Morrotes e	Na porção superior da vertente, a água de chuva tem baixa capacidade de infiltração, tendendo ao escoamento superficial concentrado.	A porção superior é muito suscetível à erosão laminar, e suscetível a sulcos e ravinas, e não suscetível a boçorocas.
		Latossolo (porção média da vertente)	Colinas médias	Na porção média da vertente a água de chuva infiltra com relativa facilidade até profundidade elevada.	A porção média é pouco suscetível à erosão laminar, moderadamente suscetível a ravinas, e pouco suscetível a boçoroca.
		Nitossolo (porção inferior da vertente)	6 % a 12%	Na porção inferior a água de chuva infiltra com facilidade no horizonte superficial, sendo retida quando encontra o horizonte B nítico, escoando-se em subsuperfície.	A porção inferior é pouco a não suscetível a erosão laminar, muito suscetível a ravinas e pouco suscetível a boçoroca.
MP-4	Colinas Amplas com Latossolo	Latossolo Vermelho (porção superior e média da vertente)	Colinas Amplas < 6%	A porção média e superior da vertente tem alta taxa de infiltração da água de chuva. Nível freático profundo.	A vertente como um todo é pouco a não suscetível à erosão laminar.
MP-4	Colinas Amplas com Latossolo	Neossolo Quartzarênico Hidromórfico (porção inferior da vertente)	Colinas Amplas < 6%	Na porção inferior, o aquífero freático ocorre à pequena profundidade impedindo a infiltração da água de chuva e favorecendo o escoamento subsuperficial concentrado.	A porção média e superior são moderadamente suscetíveis a sulcos e ravinas e pouco suscetíveis a boçorocas. A porção inferior é extremamente suscetível a ravinas e boçorocas.
MP-5	Colinas Amplas e Médias com Argissolo	Argissolo (porção superior e média da vertente)	Colinas Amplas e Médias	Na porção superior e média a água de chuva infiltra nos horizontes superiores de textura arenosa, mas a permeabilidade diminui bruscamente quando a água encontra o horizonte rico em argila, escoando assim subsuperficialmente e superficialmente.	A porção superior e média são moderadamente suscetíveis à erosão laminar, muito suscetíveis a sulcos e ravinas e pouco suscetíveis a boçorocas.
		Gleissolo (porção inferior da vertente)	< 6%	Na porção inferior o aquífero freático encontra-se a pequena profundidade, dificultando a infiltração da água de chuva.	A porção inferior é pouco a não suscetível a erosão laminar e extremamente suscetível a ravinas e boçorocas.
MP-6	Colinas Amplas e Médias com Topo Plano e Solos Rasos	Neossolo Litólico (porção superior da vertente) Neossolo Quartzarênico (porção média e inferior vertente)	Colinas Amplas e médias com Topo Plano < 6%	A porção superior tem relativa facilidade de infiltração da água de chuva pela textura arenosa e cascalhenta.	A porção superior e média são muito suscetíveis à erosão laminar.
				Na porção média o solo arenoso e poroso garante alta taxa de infiltração da água de chuva.	A porção inferior é pouco a não suscetível a erosão laminar.
				Na porção inferior ocorrem aquíferos suspensos e surgências da água. A água de chuva infiltra com relativa facilidade no horizonte superficial, sendo retida ao encontrar o aquífero freático a pequena profundidade.	A porção superior é suscetível a ravinas e não suscetível a boçorocas. A porção média e muito suscetível a ravinas e pouco suscetível a boçorocas. A porção inferior é extremamente suscetível a ravinas e boçorocas.

(Continua)

Compartimento morfopedológico		Solo	Relevo e declividade	Funcionamento hídrico	Suscetibilidade a erosão
MP-7	Colinas Amplas com Neossolo Quartzarênico	Neossolo Quartzarênico (porção superior e média da vertente) Neossolo Quartzarênico Hidromórfico e Organossolos (porção inferior da vertente)	Colinas Amplas e superfície em Rampa < 3%	A porção superior e média tem alta taxa de infiltração, estando o nível freático profundo. A porção inferior tem dificuldade de drenagem das águas de chuva, estando o nível freático aflorante.	A porção superior e média são muito suscetíveis à erosão laminar; muito suscetíveis a sulcos e ravinas e pouco suscetíveis a boçorocas. A porção inferior é pouco a não suscetível a erosão laminar, e extremamente suscetível a ravinas e boçorocas.
MP-8	Escarpas	Neossolo Litólico	Escarpa > 45%	A água de chuva infiltra parcialmente, tendo alta taxa de escoamento superficial, e ausência de aquífero freático.	Extremamente suscetível à erosão laminar, suscetível a sulcos e ravinas e não suscetível a boçorocas.
MP-9	Rampa com Latossolo	Latossolo Vermelho	Rampas em Rampa < 6%	A água de chuva infiltra facilmente, tendo baixo escoamento superficial, e nível freático profundo.	Pouco a não suscetível à erosão laminar e moderadamente suscetível a sulcos e ravinas e pouco suscetível a boçorocas.

3 CONTROLE EROSIVO EM ÁREA URBANA: O EXEMPLO DA CIDADE DE FRANCA (SP)

O acelerado processo de urbanização e o crescimento das cidades, resultantes da migração intensa da população rural para áreas urbanas, principalmente nos últimos quarenta anos, mudaram severamente a fisiologia da paisagem, marcada por diferentes processos do meio físico, gerando vários cenários de degradação ambiental. A ausência de planejamento, infraestrutura adequada e crescimento populacional levaram à ocupação irrestrita e desordenada do uso e ocupação do solo urbano. Feições erosivas, decorrentes da má gestão do uso do solo e da falta de planejamento urbano, provocam degradação ambiental, pela produção de sedimentos que vão assorear os cursos d'água e, conseqüentemente, levar a ocorrência de enchentes, em períodos chuvosos. Quando evoluem rapidamente comprometem a infra-estrutura urbana, atingindo moradias, obstruindo ruas, avenidas e rodovias. Situações como essas são comuns nas cidades do interior paulista. Segundo IPT (1995) o cadastro

de erosões do Estado de São Paulo registrou 670 feições erosivas lineares de grande porte somente em áreas urbanas. A lista de municípios que apresentam sérios problemas de erosão em sua área urbana é vasta; podem-se destacar municípios das diversas províncias geomorfológicas do estado de São Paulo, mas o predomínio dos processos erosivos é maior na região do Planalto Ocidental Paulista. Inserido neste contexto, o município de Franca, embora situado entre a província geomorfológica da Depressão Periférica e Cuestas Basálticas foi selecionado para estudos de prevenção e controle de erosão, por ser um dos mais críticos do Estado de São Paulo (IPT, 1995). Os processos erosivos, manifestados sob a forma de feições erosivas lineares de grande porte, é um dos principais problemas ambientais de sua área urbana. Os custos de recuperação de áreas atingidas por erosões são significativamente superiores aos investimentos que deveriam ser feitos no planejamento da ocupação. De qualquer forma, conhecer a dinâmica dos processos é fundamental para propor medidas e diretrizes para controle e prevenção da erosão (Figura 3).

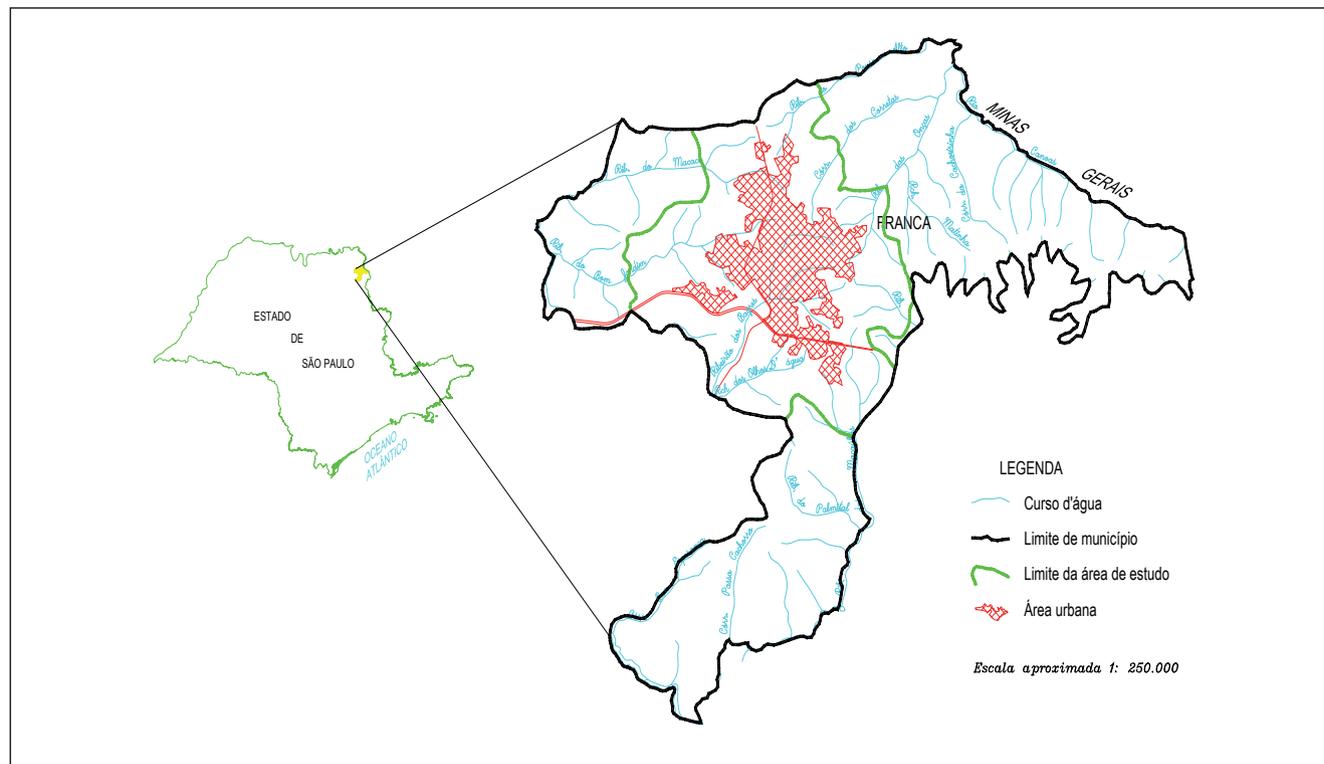


Figura 3 - Mapa de localização do município de Franca, SP.

A fisiografia da paisagem de cada região leva à formação de processos erosivos com formas e comportamento diferenciados. Existe uma série de mecanismos que atuam na formação dos processos erosivos, sobretudo das boçorocas, uma vez que constituem feições de maior magnitude e de impacto ambiental. Os mecanismos variam conforme os condicionantes naturais e também de sua interação com o papel da ação antrópica.

Em 1989, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT realizou um cadastro de catorze erosões de grande porte na área urbana de Franca, fazendo uma descrição da fenomenologia, avaliação da dinâmica e das condições de evolução, além da proposição de medidas de controle para tais erosões (IPT, 1989). O mapeamento geotécnico da região de Franca, elaborado por Zuquette (1995), também consistiu em importante subsídio na análise dos processos erosivos do município, bem como o trabalho de IPT (1998) que apresentou um plano de prevenção e controle dos processos erosivos na área urbana do município.

Canil (2000), apresentou um estudo sobre a tipologia das feições erosivas baseado na análise dos condicionantes do tipo de substrato e solo,

posição da feição erosiva em relação à vertente e a dinâmica do processo, servindo de referencial para a elaboração deste artigo, que tem por objetivo caracterizar as ocorrências erosivas existentes no perímetro urbano de Franca (SP), tendo em vista a interpretação da dinâmica e evolução dos processos erosivos, de maneira a servir de subsídio à concepção de projeto e obras de contenção.

O diagnóstico dos processos erosivos da área urbana e periurbana do município de Franca foi elaborado com base no reconhecimento das feições erosivas de grande porte, a partir de fotografias aéreas e trabalhos de campo.

A identificação das feições de erosão observados na área de estudo (sulcos, ravinas, boçorocas e solapamento de margens fluviais) foi realizada a partir da análise de fotografias aéreas dos anos de 1972 (produzidas pelo IBC) e 1995 (produzidas pela BASE), com ambos os levantamentos realizados na escala 1:25.000.

Os anos selecionados para a identificação das feições erosivas caracterizam dois períodos importantes do estágio de desenvolvimento desses processos. Nos primeiros anos da década de 70 têm-se um importante incremento no processo de

urbanização. Já nos anos 90, esse processo consolidado revela os problemas ambientais decorrentes de uma ocupação rápida e desordenada, como por exemplo, a observação dos fenômenos em momentos distintos permitindo a análise comparativa da evolução e/ou estabilização de tais processos.

Após esta identificação, seguiu-se para o trabalho de campo, com o objetivo de levantar dados necessários para a caracterização dos processos erosivos, principalmente para classificá-los quanto ao seu estado de estabilidade/ instabilidade e risco que oferece à área urbana. Este trabalho foi baseado no roteiro metodológico de ficha de cadastro de erosão (IPT, 1989). O trabalho de campo para a identificação das feições erosivas e investigação dos condicionantes do meio físico, constatou 32 erosões de grande porte.

Este cadastro incluiu também as áreas de solapamento de margens fluviais, cuja identificação não foi possível por meio das fotografias aéreas em função da escala.

Dos principais aspectos levantados na investigação das erosões destacam-se: os condicionantes naturais do meio físico; os processos e mecanismos que comandam o desenvolvimento e evolução das feições erosivas; fatores da intervenção antrópica e todas as formas de impactos associados a essas erosões, tais como solapamentos das margens dos cursos d'água e abatimentos em setores da baixa vertente próximo às drenagens, trechos de ribeirões e córregos assoreados, e pontos de enchentes.

Os processos erosivos, aqui estudados sob a ótica dos condicionantes naturais e antrópicos, receberam tratamento analítico e integrado a fim de se estabelecer tipologias com comportamento semelhante quanto à de dinâmica e evolução e como estão integradas à área urbana do município.

Na área de Franca, é comum encontrar feições erosivas lineares, do tipo boçoroca, tanto em vertentes, quanto associadas às cabeceiras de drenagem. Nas vertentes, o processo é intensificado essencialmente pela ação do escoamento superficial. Nas cabeceiras de drenagem, tanto as alongadas quanto em anfiteatro, a interação dos condicionantes, solo, relevo e substrato rochoso aumentam a suscetibilidade ao desenvolvimento e instalação destas feições de erosão. As chuvas intensas aceleram ainda mais os processos, que respondem pela dinâmica e evolução das erosões.

Para cada erosão foram levantadas informações sobre histórico, dados geométricos, aspectos relacionados à dinâmica e fenomenologia dos processos atuantes, e eventuais medidas de controle adotadas. A análise realizada a partir dos dados de campo e da interpretação dos condicionantes naturais e antrópicos da erosão permitiu classificar as feições erosivas em cinco grupos.

GRUPO I: Compreende nove feições erosivas desenvolvidas pela concentração de águas superficiais, situadas a partir da ruptura de declive do terço superior da vertente, em substrato arenítico da Formação Franca. O aprofundamento da erosão chega a atingir o lençol freático e provoca a instabilidade dos taludes da erosão.

Correspondentes ao substrato arenítico da Formação Franca, as vertentes nas quais se situam essas erosões são predominantemente convexas, com rampas longas e declividades acima de 12%. Nesta situação, a velocidade do escoamento superficial aumenta significativamente no ponto de ruptura de declive do terço superior da vertente em direção a jusante. Da linha de ruptura até o fundo de vale observa-se uma associação de solos rasos do tipo Litólico (declividades acima de 20%) e Latossolo Vermelho-Amarelo, textura média. As boçorocas tendem a ser mais alongadas, por estarem situadas em rampas mais longas.

O processo descrito anteriormente é acelerado pela ação antrópica. A história da ocupação e instalação do núcleo urbano destaca a existência de valos abertos pelos próprios moradores, desviando as águas das ruas de um loteamento recém aberto para a cabeceira das erosões ou, no caso, dessas para um ponto de maior fraqueza ou de ruptura de declive, capazes de provocar o desenvolvimento de uma feição, que terá um porte e uma dinâmica de evolução de acordo com as características naturais do terreno.

No caso dessas erosões, a ordem da gravidade dos processos levou a situações de risco. Uma vez que essas erosões já estão incorporadas à área urbana, o monitoramento constante é a medida mais prudente e eficaz de se manter o controle dos processos. Dificilmente haverá uma tendência à evolução destas feições, pois todas as intervenções responsáveis pela dinâmica já levaram ao ápice do desenvolvimento das erosões, que apresentam hoje um estado maior de equilíbrio.



Foto 1 – Boçoroca recuperada, por meio de obras de drenagem e contenção dos taludes. Apesar das obras, ainda há algumas moradias em situação de risco.



Foto 2 – Cabeceira da erosão parcialmente aterrada com lixo; inclui também resíduos da indústria de couro.

GRUPO II: Compreende três feições erosivas desenvolvidas em amplos anfiteatros de cabeceiras de drenagem, em cotas superiores a 1000 m.

Essas erosões desenvolveram-se na parte superior do Planalto de Franca (cotas entre 1000 e 1025 metros), configurando amplos anfiteatros em cabeceiras de drenagem, associados aos arenitos da Formação Franca. Nestas áreas predominam solos do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo, textura média a arenosa. São solos bastante desenvolvidos e as erosões podem chegar a mais de 25 metros de profundidade.

Essas feições erosivas exibem forma circular ou arredondada, estrangulando-se bruscamente a jusante, e afunilando-se na linha do talvegue (afluente de primeira ordem) para o qual convergem as águas do escoamento superficial e do afloramento do lençol. A existência dessas gargantas, desenvolvidas na Formação Franca, está associada à presença de uma camada argilo-arenosa mais resistente que as camadas arenosas superiores.

Uma das hipóteses desse arredondamento das cabeceiras, típico dessas feições, é de que as linhas de concentração (ou valos), integradas à feição, foram se ramificando, até o momento em que a magnitude do processo levou à interligação dos diversos ramos, dando origem à forma circular.

Ação do escoamento superficial, proveniente das áreas de montante, contribui, significativamente, para a evolução das feições erosivas que ocorrem nessa situação. Assim, o volume de água que corre para o interior aumenta, consideravelmente,

no período chuvoso, com alta capacidade e energia de aprofundar ainda mais o leito da feição, solapando a base das vertentes e provocando desmoronamentos (VIEIRA, 1978).

Além do grande volume de água superficial, que provoca a retirada das camadas superficiais do solo (mais arenosas), parte dela se infiltra e alimenta o lençol freático. O pacote sedimentar, embora predominantemente arenoso, apresenta lentes de material mais argiloso que funcionam como barreira para a infiltração da água, provocando muitas vezes a formação de um lençol suspenso. Dessa forma, a partir do momento em que a erosão intercepta o lençol suspenso, o processo do “piping” é ativado, ou seja, aparecem surgências d’água que carregam de forma lenta e contínua as partículas de areia, silte e argila, formando vazios internos (cavernas) no solo. Ao atingir o máximo da instabilidade, a parte superior deste vazio desmorona e este processo se repete sucessivamente, promovendo a evolução lateral e remontante da boçoroca. Esta situação é mantida, desde que o lençol freático suspenso permaneça ativo. Os pontos de surgências d’água no interior da erosão também provocam solapamento da base dos taludes e conseqüentes escorregamentos, que contribuem significativamente para o processo de reativação de cabeceira e alargamento das boçorocas.

Essa dinâmica, nesse tipo de feição, ocorre de forma lenta e contínua, por apresentar um substrato mais resistente à ação dos processos de evolução. São feições que já existiam antes de 1972 e cabe lembrar que se desenvolveram em áreas mais favoráveis (cabeceiras de drenagem).

Chegam bem próximas aos limites dos divisores de suas respectivas bacias de contribuição.

Aparentemente, parecem ter encontrado o seu equilíbrio e apresentam atividade erosiva apenas quando ocorre período de chuvas prolongado que favorece a saturação dos solos, e conseqüente elevação do lençol freático, dando



Foto 3 - Vista geral de jusante para montante da boçoroca. Ao fundo da erosão, na linha do talvegue, observam-se diversos pontos de surgências d'água. Notam-se abatimentos e escorregamentos nas vertentes da feição erosiva.

início ao processo de dinâmica descrito anteriormente. Em função do porte dessas erosões, a sua inserção à área urbana sugere monitoramento constante e necessidade de execução de obras de controle, pois estão muito próximas a residências e estrada de acesso, que apresenta trincas e rachaduras no asfalto.



Foto 4 - Erosão de grande porte causada pela concentração de águas superficiais da Rodovia João Traficante. O aprofundamento da erosão, ao atingir o nível freático, provoca processo de reativação de cabeceira. A vegetação no interior da erosão indica estabilidade parcial do processo.

GRUPO III: Corresponde a treze feições erosivas desenvolvidas em cabeceiras de drenagem.

Todas as feições erosivas do Grupo III desenvolveram-se em cabeceiras de drenagem; apresentaram forma alongada e sem ramificações. A maioria delas, existentes desde 1972, reflete o período de consolidação e expansão do núcleo urbano. O processo de formação e evolução é semelhante ao

das boçorocas do Grupo II, diferenciando-se basicamente quanto à forma, além de se localizarem em cotas que variam entre 975 e 1050 m. Devido à maioria das feições serem mais antigas, encontram-se atualmente estabilizadas pela adoção de medidas de controle ou parcialmente estabilizadas, simplesmente pelo desvio da concentração de águas superficiais e recomposição natural da mata ciliar.



Foto 7 - Boçoroca de cabeceira de drenagem; recebe contribuição das águas de escoamento superficial.



Foto 8 - Boçoroca de cabeceira de drenagem, aterrada com lixo doméstico. Há alguns anos foi transformada no Aterro Sanitário e atualmente está com sua capacidade quase esgotada.

GRUPO IV: Corresponde a cinco feições erosivas desenvolvidas em cabeceiras de drenagem e associadas a processos de abatimentos e solapamento de margens fluviais.

As feições erosivas desse Grupo ocorrem nas vertentes do Planalto de Franca, em cotas situadas entre 950m e 975m, em setores suavizados do relevo e vales um pouco mais abertos, correspondendo também aos arenitos da Formação Franca, próximo ao contato com os basaltos da Formação Serra Geral. O perfil pedológico ao longo da vertente apresenta solos do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo, textura média, associados a hidromórficos no fundo de vale.

Essas erosões são menos profundas do que aquelas localizadas em cabeceiras de drenagem e terços superiores de vertentes de maior declividade, porém no processo de formação também atuam a ação do escoamento superficial (considerada a deflagradora do processo) e ação do escoamento subterrâneo. A dinâmica da evolução é rápida e a magnitude mais intensa, principalmente quando há um aumento da concentração da água superficial em direção às cabeceiras das boçorocas. No terço inferior da vertente, próximo ao fundo de vale, estão associados processos de abatimentos,



Foto 9 – Detalhe do contato entre litologias diferentes (basalto/arenito). Ao fundo, loteamento em consolidação. A falta de infraestrutura e sistema de drenagem adequados favorecem a concentração das águas superficiais para o fundo da erosão.

GRUPO V: Contempla apenas duas feições erosivas desenvolvidas pela concentração de águas superficiais, situadas a partir da ruptura de declive do terço superior da vertente, em basalto da Formação Serra Geral.

As boçorocas desenvolvidas em solos argilosos (Latosolo Roxo), derivados do basalto,

colapsos e solapamento das margens fluviais. Isto se deve à ocorrência expressiva de surgências d'água, no contato do solo derivado do arenito com o basalto alterado e/ ou Hidromórficos.

Esse processo ocorre basicamente pela existência de uma camada impermeável subjacente ao arenito Franca. A ação direta da água da chuva, combinada com o escoamento superficial concentrado, alimenta o lençol freático suspenso (contato arenito/basalto). Esta camada torna-se saturada, pelo confinamento das águas subterrâneas; gera pontos de alto gradiente hidráulico nas saídas das linhas de fluxo da água subterrânea e propicia a remoção do material arenoso (liquefação de areias). Estes vazios no interior dos solos caracterizam o "piping", que provoca o descalçamento e abatimentos no solo. Quanto maior o número de surgências d'água mais rápido é o processo evolutivo e mais difícil seu controle.

Boa parte dessas boçorocas, a concentração das águas superficiais provenientes das ocupações urbanas a montante foram as principais responsáveis pela deflagração do processo. Uma vez ativada esta dinâmica, a tendência é evoluir rapidamente até atingir os setores já ocupados, gerando sérios prejuízos.



Foto 10 – Boçoroca desenvolvida pela concentração da água superficial. Observa-se o rompimento da adutora de água do loteamento em consolidação. Este loteamento apresenta infraestrutura deficiente (ruas sem pavimentação, sistema de drenagem precário, etc.).

constituem o Grupo V. Uma vez que esses solos são mais resistentes, o processo de deflagração resulta essencialmente do escoamento superficial, provocado pelas formas de uso e ocupação do solo de montante.



Foto 14 – A concentração das águas pluviais servidas, provenientes do loteamento de montante foi desviada da cabeceira da erosão para a vertente esquerda, provocando o rompimento da tubulação do esgoto.

3.1 Diretrizes para o controle dos processos erosivos

Para a concepção de projetos de estabilização e recuperação de boçorocas é necessário o levantamento de parâmetros básicos que irão direcionar a obra na sua fase executiva. Para a realização desses estudos básicos, recomenda-se o seguinte roteiro:

- a) Definição prévia da destinação da área a ser recuperada e do projeto paisagístico;
- b) Obtenção de dados hidrológicos (vazão) da bacia de contribuição para o dimensionamento das obras hidráulicas;
- c) Levantamento topográfico em detalhe da boçoroca e seus arredores, visando o projeto de retaludamento;
- d) Caracterização geotécnica de parâmetros de solos, através de ensaios laboratoriais para as obras de terra (terraplenagem e compactação de aterros);
- e) Levantamento de dados hidrológicos e caracterização do regime pluviométrico
- f) Medidas de vazão do volume de águas sub-superficiais provenientes de surgências, para o dimensionamento dos drenos profundos;
- g) Elaboração do projeto básico de drenagem e de estabilização dos taludes resultantes;
- h) Acompanhamento da construção da obra e eventuais adaptações do projeto às condições locais;
- i) Estabilização da área recuperada através de revegetação e drenagem superficial complementar; e

- j) Manutenção e conservação das obras executadas.

Ressalta-se que um bom projeto de controle de erosão urbana exige perfeita caracterização dos fatores e mecanismos relacionados às causas do desenvolvimento dos processos erosivos. Particularmente, considerando as principais causas do desencadeamento e evolução dos processos erosivos na área urbana de Franca, podem ser destacadas algumas intervenções antrópicas responsáveis ou que potencialmente aceleraram o desenvolvimento desses processos:

- a) O traçado inadequado do sistema viário, muitas vezes agravado pela falta de pavimentação, guias e sarjetas;
- b) Deficiência do sistema de drenagem de águas pluviais e servidas, tanto nas formas de captação como na dissipação, observadas em diversos bairros da periferia; e
- c) Construção de loteamentos e conjuntos habitacionais em locais não apropriados, sob o ponto de vista geotécnico com deficiência de infra-estrutura.

As causas levantadas apontam para a ausência de planejamento e falta de conhecimento da natureza e fragilidade dos terrenos frente à ocupação urbana. Por outro lado, justifica-se a necessidade de se conhecerem as características específicas da boçoroca, especialmente aquelas relacionadas à dinâmica dos processos erosivos, para a elaboração da concepção dos projetos de contenção. Assim, os projetos de contenção das boçorocas de Franca devem levar em conta suas especificidades, o que dificulta a generalização de soluções.

Deve ser também destacado na elaboração do projeto que as características geométricas das boçorocas podem sofrer modificações após curtos períodos de chuvas, exigindo flexibilidade do projeto, com adaptações de obras a serem executadas durante a fase construtiva.

Na elaboração do projeto, respeitando-se as premissas anteriormente fixadas, as alternativas de obras contemplam um conjunto de medidas principais, conforme se segue.

Disciplinamento das águas superficiais

As águas superficiais pluviais e servidas provenientes da bacia de contribuição devem ser

captadas e conduzidas pelo interior da boçoroca ou desviadas da cabeceira, até um local adequado para descarga, onde sua energia possa ser dissipada. Na concepção do projeto, deve-se ter como preocupação básica a diminuição gradual da energia das águas captadas e a sua condução controlada, dentro ou fora da boçoroca. As principais estruturas utilizadas para o disciplinamento das águas superficiais são:

- a) Estruturas de captação e condução das águas superficiais; e
- b) Estruturas de controle e dissipação da energia das águas.

A totalidade das ocorrências erosivas de Franca foram originadas pela concentração do escoamento superficial das águas de chuva, exigindo obras de drenagem voltadas ao disciplinamento das águas superficiais.

No caso específico das erosões dos grupos I e V, necessário se faz situar, na bacia de contribuição, a linha de ruptura de declive posicionada à montante das cabeceiras das ocorrências erosivas, e conceber projetos de drenagem voltados à captação da totalidade das águas de chuva que se dirigem para esse setor da vertente. Essas águas, após captação, devem ser conduzidas com energia controlada para locais adequados.

Com relação às erosões dos grupos II, III, e IV, instaladas em cabeceiras de cursos d'água, recomenda-se a concepção de estruturas voltadas à contenção da energia de escoamento das águas superficiais. Essas estruturas devem contornar os anfiteatros de cabeceiras, e as águas aí acumuladas devem ser conduzidas com energia controlada para locais apropriados, preferencialmente a jusante das ocorrências erosivas.

Disciplinamento das águas subterrâneas

A ação das águas subterrâneas é uma das principais causas da evolução lateral e remonstante das boçorocas. Quando a boçoroca atinge o lençol freático, os mecanismos são intensificados em função do surgimento de um gradiente piezométrico que, ao emergir no pé do talude, remove as partículas sólidas, estabelecendo o processo de erosão regressiva (entubamento ou *piping*), e conseqüente solapamento do talude.

O tratamento convencional é feito com a aplicação de drenos enterrados, visando a drenagem

das águas subsuperficiais para impedir a remoção do solo pelo *piping*. Os principais tipos de drenos utilizados são: dreno cego, dreno com material sintético geotextil e drenos de bambu.

Com exceção das duas feições erosivas do grupo V, as demais erosões de Franca apresentam aquífero freático interceptado pelo aprofundamento erosivo, manifestando fenômeno erosivo interno dos taludes. Necessário, portanto, cuidados especiais com a drenagem das águas do aquífero freático no interior das erosões, concebendo-se drenos profundos. As feições erosivas dos grupos II, III, e IV, instaladas em cabeceiras de drenagens apresentam surgências d'água em diferentes posições dos taludes no interior das erosões, e com gradientes elevados, exigindo projetos específicos. (necessário complementar). Nas erosões situadas na área periurbana, recomenda-se a instalação de um sistema de drenagem tipo "espinha de peixe" no interior da boçoroca por meio de drenos enterrados tipo rachão (no ramo principal) e drenos de bambu nos ramos secundários. Em outras situações, pode-se também instalar dreno tipo "espinha de peixe", no fundo da erosão, promover a impermeabilização por meio de selo argiloso, para em seguida efetuar o aterro da erosão.

Com relação às erosões do grupo I, recomenda-se a instalação de drenos profundos especialmente nas porções inferiores das feições erosivas, nas proximidades dos fundos de vales, onde o aquífero freático se manifesta a pequenas profundidades e com elevados gradientes hidráulicos. A maioria dessas erosões apresenta algum tipo de obra que deve, portanto, ser monitorada.

Estabilização dos taludes da boçoroca

São obras complementares com a finalidade de proteger os taludes resultantes contra a erosão promovida pelas águas das chuvas e contra possíveis escorregamentos. Essas obras normalmente são implementadas por meio de serviços de terraplenagem (cortes e aterros) e medidas de proteção superficial através de revegetação. A estabilização dos taludes da erosão deve ser executada após a implantação do sistema de drenagem de fundo; quando for o caso. Esta medida atende à erosões dos Grupos I, II, III, IV e V.

Implantação e conservação das obras

Na execução das obras, as diretrizes de projeto devem ganhar maior detalhe, adaptando-se a obra projetada às condições locais com a realização de ajustes.

No planejamento da obra deve-se ter o cuidado de prever o início e fim dos trabalhos para a época do ano em que não ocorram chuvas intensas.

A conservação das obras pede inspeções periódicas para verificação das condições das estruturas hidráulicas e monitoramento específico para avaliar o funcionamento dos drenos e filtros.

Com o colapso de uma simples estrutura, seu efeito destruidor pode se multiplicar, comprometendo toda a obra.

Dessa forma, medidas de manutenção como a limpeza e desobstrução de canais e tubulações, reparos de danificações em canais, escadas hidráulicas e dissipadores podem prolongar a vida útil das obras.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista a demonstração de abordagens e técnicas no âmbito da Geologia de Engenharia, voltadas à investigação dos processos erosivos, foram apresentados estudos de caso, envolvendo o controle preventivo da erosão em bacia hidrográfica, e o controle corretivo de ocorrências erosivas lineares em área urbana.

A bacia hidrográfica do Rio São Francisco, com aproximadamente 80 mil hectares, importante área de contribuição do Pantanal Matogrossense, foi estudada por meio da abordagem morfopedológica e aplicação de critérios técnicos voltados à determinação da suscetibilidade a erosão laminar e linear, permitindo destacar as seguintes considerações:

- Com base em análise de dados disponíveis do meio físico em escala 1:250.000, interpretação de imagens digitais de alta resolução, e levantamentos em campo, foi elaborado mapa morfopedológico em escala 1:50.000, delimitando nove compartimentos, sintetizando as relações solo-relevo-substrato geológico, e permitindo compreender o funcionamento hídrico em escala de vertentes;
- A aplicação da abordagem morfopedológica permitiu obter para cada compartimento

informações envolvendo as interações entre a cobertura pedológica, a declividade, e o comportamento das águas de chuva e do aquífero freático ao longo das vertentes, e interpretar a dinâmica dos processos erosivos, pautado nas diferentes formas de uso e ocupação do solo;

- Critérios técnicos voltados à interpretação da suscetibilidade à erosão laminar e linear, envolvendo cinco classes, foram aplicados a cada compartimento morfopedológico, contemplando as porções superiores, médias, e inferiores das vertentes;

A determinação da suscetibilidade à erosão, compatibilizada com as classes de capacidade de uso das terras, conforme critério apresentado, permite considerar para cada compartimento morfopedológico as potencialidades e restrições ao uso solo, servindo de importante subsídio para o planejamento do uso do solo da bacia hidrográfica do Rio Santana e controle preventivo da erosão.

Para o perímetro urbano e periurbano de Franca (SP), foram identificadas e caracterizadas trinta e duas ocorrências erosivas lineares, com vistas à interpretação da dinâmica e evolução dos processos erosivos, e estabelecimento de critérios que permitiram a classificação das feições erosivas em cinco grupos, destacando-se as seguintes considerações:

- A existência de trinta e duas feições erosivas de grande porte, identificadas na área urbana e periurbana do município de Franca, permitiu caracterizar, em muitos casos, situações de risco aos equipamentos públicos urbanos, às residências, e consequentemente à população que mora nas proximidades dessas áreas;
- A compreensão da dinâmica e mecanismos que comandam o desenvolvimento das erosões mostrou-se fundamental para a determinação de diretrizes para o controle dos processos erosivos, e para a elaboração de projetos de controle eficientes, e que devem ser continuamente monitorados;
- As áreas suscetíveis à erosão, compatíveis aos diferentes grupos de feições erosivas, demonstram fragilidades naturais, que podem sofrer alterações e desequilíbrios sob condições de intervenções antrópicas inadequadas. Assim, os projetos de controle de erosão devem ser integrados às medidas de prevenção que devem fazer parte do planejamento urbano da cidade, bem como dos planos de bacias hidrográficas, respeitando a legislação ambiental.

REFERÊNCIAS

- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do Solo*. Livroceres, Piracicaba, 1985, 368 p.
- BOTELHO, R. G. M. *Identificação de unidades ambientais na bacia do rio Cuiabá (Petrópolis-RJ) visando o planejamento do uso do solo*. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, PPGG, UFRJ, 114 p, 1996.
- CANIL, K. *Processos erosivos e planejamento urbano: carta de risco de erosão das áreas urbana e periurbana do município de Franca, SP*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geografia, FFLCH, USP. São Paulo, 2000. 97p.
- CASTRO, S. S.; SALOMÃO, F. X. T. Compartimentação morfopedológicas e suas aplicações: Considerações Metodológicas. In: *GEOUSP Espaço e Tempo*, n. 7, p. 27-37. 2000.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - DAEE/IPT. *Controle de erosão: bases conceituais e técnicas; diretrizes para o planejamento urbano e regional; orientações para o controle de boçorocas urbanas*. São Paulo, 1989, 92 p.
- GHEZZI, A. O. *Avaliação e mapeamento da fragilidade ambiental da bacia do rio Xaxim, baía Antonina-PR, com auxílio de geoprocessamento*. Dissertação de mestrado, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da UFPR: Curitiba, 2003.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Mapa de Erosão do Estado de São Paulo, SP. Relatório Técnico n. 33.402. São Paulo, 1995.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo, Bacia do Pardo Grande. São Paulo: IPT, 1989. Relatório Técnico n. 28.184.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Subsídios técnicos para um plano de controle preventivo e corretivo de erosão para a área urbana do município de Franca, SP. Parecer Técnico n. 7.149. São Paulo, 1998.
- LEPSCH, I.F., Coord. *Manual para levantamento utilitário de meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso: 4ª aproximação*. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983. 175p.
- LOHMANN, M.; SANTOS, L.J.C. A Morfopedologia Aplicada à Compreensão dos Processos Erosivos na Bacia Hidrográfica do Arroio Guassupi, São Pedro do Sul-RS. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. n.2, ano 6, p. 91-102. 2005.
- LOHMANN, M.; SANTOS, L.J.C. A Morfopedologia Aplicada à Compreensão dos Processos Erosivos na Bacia Hidrográfica do Arroio Guassupi, São Pedro do Sul-RS. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. n.2, ano 6, p. 91-102. 2005.
- LOMBARDI NETO, F.; ROCHA, J. V.; BACELLAR, A. A. A. Planejamento agroambiental da microbacia hidrográfica do ribeirão cachoeirinha, município de Iracemápolis, SP, utilizando um Sistema de Informação Geográfica. In: *Simpósio Nacional de Controle de Erosão*, Bauru, n. 5, p. 257-259, 1995.
- RESENDE, M.; CURI, N.; RESENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. Viçosa: Editora NEPUT, 304 p., 1995.
- RUIZ, M. D.; GUIDICINI, G. Introdução in *Geologia de Engenharia*. Editores Antonio Manoel dos Santos Oliveira, Sérgio Nertan Alves de Brito. São Paulo: associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p.1. 587 p.
- SALOMÃO, F. X. T. *Controle e prevenção dos processos erosivos*. In: Guerra et al. *Erosão e conservação dos solos; conceitos, temas e aplicações*. Rio de Janeiro: Editora Bertrand do Brasil. Cap. 7, 2007.
- SALOMÃO, F. X. T. *Processos erosivos lineares em Bauru-SP*. Regionalização cartográfica aplicada ao controle preventivo de erosão urbano rural. São Paulo: Tese de doutorado. FFLCH-USP, 1994.
- SEPLAN. Secretaria de Estado de Planejamento. *Zoneamento Socioeconômico Ecológico de Mato Grosso*. Cuiabá: IOMAT. 302 p. 2008.
- VIEIRA, N.M. *Estudo Geomorfológico das boçorocas de Franca, SP*. Tese (Doutorado). Departamento de Geografia, FFLCH, USP. São Paulo, 1978.
- ZUQUETTE, L.V. Mapeamento geotécnico da região de Franca (SP). São Paulo, 1995. Relatório, Processo N. 92/1921-4. 109p.

PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE EXPANSÃO DE UM SOLO ARGILOSO COMPACTADO COM E SEM ADIÇÃO DE CAL



MIGUEL ANGEL MELLO SILVA JUNIOR
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Pernambuco, miguelmello@gmail.com

RESUMO ABSTRACT

Este trabalho analisa o comportamento de um solo argiloso compactado, potencialmente expansivo, localizado nas proximidades do Complexo Industrial de Suape, Município de Ipojuca, litoral sul do Estado de Pernambuco. Tem como objetivo específico avaliar a metodologia adotada por EADS & GRIM (1966) para a definição do teor de cal ótimo a ser utilizado e analisar o comportamento de expansão para diferentes teores de adição de cal. Foram ensaiados corpos de prova compactados do solo sem adição de cal e para diferentes teores. A estabilização de solo expansivo utilizando a cal tem sido usada com sucesso em muitos projetos para minimizar expansão e melhorar a plasticidade e trabalhabilidade do solo. A caracterização do solo compactado com e sem adição de cal consistiu na determinação de índices físicos, obtenção de curvas granulométricas, determinação da capacidade de troca catiônica e do pH. Foram executados, ainda, ensaios de potencial de expansão, pressão de expansão e ensaios de sucção através da técnica do papel de filtro, obtendo-se as curvas características de umidade do solo. Os ensaios para a determinação do teor ótimo de cal foram realizados segundo metodologia, baseada no pH, proposta por EADS & GRIM (1966). A análise dos resultados obtidos confirma a proposta apresentada pelos autores, ou seja, ocorre uma redução da expansão quando o solo se encontra com um pH próximo a 12,4 para o teor de cal ótimo obtido através do método proposto.

Palavras-chaves: solo expansivo; estabilização com cal; potencial de expansão; pressão de expansão.

GEOTECHNICAL PROPERTIES OF EXPANSION OF A CLAYEY SOIL COMPACTED WITH AND WITHOUT THE ADDITION OF CAL

This paper analyzes the behavior of a compacted clay soil, potentially expansive, located near the Industrial Complex Suape Ipojuca city, south coast of Pernambuco State. Specific aims to evaluate the methodology adopted by EADS & GRIM (1966) to define the optimum lime content being used and analyze the behavior of expansion for different levels of addition of lime. We tested specimens compacted soil without lime addition to different levels. The stabilization of expansive soil using lime has been used successfully in many projects to minimize expansion and improve the plasticity and workability of soil. The characterization of the compacted soil with and without addition of lime was the physical indices, obtaining size distribution curves, determination of cation exchange capacity and pH. Were performed, also testing the potential for expansion, expansion pressure and testing of suction using the technique of filter paper, resulting in the characteristic curves of soil moisture. The tests for determining the optimum lime content were performed using methods based on pH, proposed by EADS & GRIM (1966). The results obtained confirm the proposal presented by the authors, i.e. a reduction of the expansion occurs when the soil is with a pH around 12.4 to the optimum lime content obtained through the proposed method.

Keywords: expansive soil; lime stabilization; swell potential; swelling pressure.

1 INTRODUÇÃO

Um solo potencialmente expansivo é aquele que apresenta variações de volume diante da variação da umidade ou sucção, sendo constituído na sua fração mais fina por minerais expansivos (JUSTINO DA SILVA, 2005).

O problema dos solos expansivos não era reconhecido pelos engenheiros até 1930. Os danos ocorridos nas construções da época eram atribuídos a outras causas que não à atuação desse tipo de solo. O U. S. Bureau of Reclamation reconheceu os problemas de solos expansivos em 1938, quando da construção da fundação de um sifão de aço (CHEN, 1988).

Solos expansivos são encontrados em todos os cinco continentes e são particularmente difundidos em regiões áridas e semi-áridas. Em alguns países subdesenvolvidos, os edifícios foram construídos sem qualquer conhecimento da presença de solos expansivos. Isso foi em parte devido à falta de evidências históricas. Com o rápido desenvolvimento de infra-estrutura urbana, problemas de solo expansivo se tornaram mais evidentes. Há, portanto, uma necessidade de abordar problemas associados a estes solos (NG & MENZIES, 2007).

Os solos expansivos variam de volume com a variação de umidade ou sucção, representando, conseqüentemente, um caso particular de solo não-saturado, sendo por tal motivo aplicáveis os estudos desenvolvidos por FREDLUND & RAHARDJO (1993), sendo estes referências mundiais em solos não-saturados.

Embora a solução mais recomendada no meio técnico seja a substituição do solo expansivo por outro sem essa característica, em algumas ocasiões isso pode se tornar inviável. Por exemplo, em empreendimentos que incluem grande movimentação de terra, conforme observado recentemente no complexo industrial portuário de Suape, em Pernambuco, a escassez de locais utilizáveis como bota-fora e, principalmente, a dificuldade de serem encontrados materiais em distância viável que pudessem substituir os solos expansivos tornam importante o estudo do tratamento do solo existente. A aplicação de aditivos é uma das alternativas, e a cal o mais utilizado no mundo para esse tipo de problema.

Há alguns métodos desenvolvidos para a sua dosagem, sendo que o de EADS & GRIM (1966) é um dos baseados no pH do solo, recomendado por NELSON & MILLER (1992), pela ASTM D 6276, pela TM 5-818-7 das forças armadas americanas, entre outros.

As investigações realizadas neste trabalho têm por objetivo verificar a aplicabilidade da metodologia proposta por EADS & GRIM (1966) e analisar o comportamento de expansão para diferentes teores de cal. Com isso, será possível embasar soluções de engenharia para viabilizar alternativas de construção que utilizem jazidas desse tipo de solo para fins de pavimentação e terraplenagem.

2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento de deformação de uma argila potencialmente expansiva compactada com adição de cal através de ensaios de laboratório. Como objetivo secundário, avaliar a metodologia de EADS & GRIM (1966) e o comportamento do solo sem cal e com adição de 9% de cal durante a secagem e umedecimento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A amostra coletada para a realização desta pesquisa é proveniente de área próxima ao canteiro de obras da Refinaria Abreu e Lima, do complexo industrial portuário de Suape, no Município de Ipojuca, Pernambuco. Algumas obras da área de Suape identificaram a presença de solo expansivo na etapa de terraplenagem. Em face disso foram tomadas várias providências para sanar os problemas provenientes desse tipo de solo. Uma delas foi o aprofundamento do entendimento das propriedades relacionadas ao seu comportamento.

3.1 Aspectos geológicos da área de coleta do solo estudado

O local de coleta de amostra está situado na Província Costeira de Pernambuco, que é dividida em dois grandes elementos geológicos: o embasamento cristalino e uma seqüência da idade mesozóica, acumulada nas Bacias Pernambuco/Paraíba, ao norte, e Cabo, ao sul.

No local de coleta da amostra estavam presentes afloramentos de rochas vulcânicas escuras e de granulação fina, como o basalto, em vários estágios de intemperismo, características da Formação Ipojuca, representada pela sigla Kv e Kig. A avaliação geral da área permite-se concluir que trata-se de um solo de origem residual.

Segundo ALMEIDA (2003), esse termo foi introduzido por AMARAL & MENOR (1979) para designar a província magmática cretácea, constituída por rochas magmáticas, como os basaltos, andesitos, traquitos e riolitos, e o Granito do Cabo. Mais recentemente, alguns autores têm se referido a essa formação como Suíte Mágica Ipojuca.

Ocorrem intercaladas em camadas ou intrudidas na Formação Cabo ou no embasamento cristalino (ALMEIDA et al, 2003).

3.2 Aspectos mineralógicos do solo estudado

SILVA (2012) realizou com amostra coletada no mesmo local da presente pesquisa ensaio mineralógico através de difração de raios X.

Ele distinguiu a presença exclusiva de argilo-mineral do grupo das esmectitas, sendo distinguida a montmorilonita, francamente expansível se imersa em água. A Figura 1 apresenta gráfico gerado na execução do ensaio de difração de raios X.

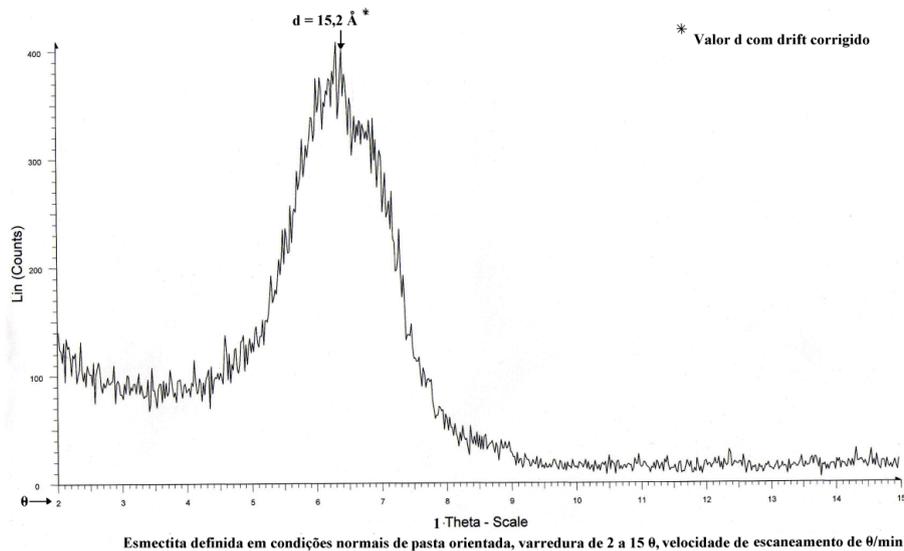


Figura 1 - Gráfico do difratograma de raio X na condição normal (SILVA, 2012).

3.3 Atividades de laboratório

Foram realizados ensaios de caracterização física e química, ensaios de compactação, determinação do teor da cal e da sucção matricial, potencial de expansão e pressão de expansão, para corpos de prova sem e com adição de cal.

3.3.1 Seleção da cal utilizada na estabilização

A cal utilizada é do tipo CH-I, definida pela NBR 7175, segundo Tabela 1:

Tabela 1 - Composição da cal segundo NBR 7175

		CH-I	CH-II	CH-III
CO ₂	Na fábrica	≤5%	≤5%	≤13%
	No depósito	≤7%	≤7%	≤15%
Óxido não-hidratado		≤10%	≤15%	≤15%
Óxidos totais na base não-voláteis		≥90%	≥88%	≥88%

Embora os tipos de cal hidratada, segundo alguns autores, não influenciavam consideravelmente nos resultados, para essa pesquisa foi selecionada essa cal devido à menor presença de CO₂, o que diminui a influência de outras espécies químicas além daquelas relacionadas ao interesse da pesquisa.

3.3.2 Dosagem da cal utilizada

Todas as dosagens realizadas com cal e solo, para todos os ensaios, foram efetuadas em peso seco, segundo equação (1) que se segue:

$$\frac{\text{Peso seco de cal}}{\text{Peso seco de solo}} = k \quad (1)$$

Sendo que k poderia assumir diferentes valores, a depender do ensaio, entre 0 e 10%.

As amostras, quando precisavam manter uma determinada umidade, eram acondicionadas com o mínimo de ar em sacos plásticos impermeáveis e devidamente fechados, impedindo também reações com componentes do ar atmosférico, o

que poderia adicionar mais uma variável ao comportamento dos ensaios.

3.3.3 Determinação do potencial hidrogeniônico (pH)

Com um pH-metro digital procedeu-se à determinação do pH de uma amostra sem cal e amostras de solo dosadas com percentuais de 1% a 10% de cal, variando de 1% em 1%, com base na TM 5-822-14, com algumas adaptações principalmente devido aos equipamentos disponíveis.

3.3.4 Dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo

Foi realizada a avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo (ensaio de dispersão SCS), com base na NBR 13602. A definição da composição granulométrica foi realizada com base na NBR 6502, conforme Tabela 2:

Tabela 2 – Definição do tamanho de partículas segundo NBR 6502

	Menor diâmetro (mm)	Maior diâmetro (mm)
Pedregulho	2,0	60,0
Areia grossa	0,6	2,0
Areia média	0,2	0,6
Areia fina	0,06	0,2
Silte	0,002	0,06
Argila	0	0,002

Com isso, além de serem obtidas informações a respeito da distribuição granulométrica, também foram obtidas informações relativas à dispersibilidade do material, o que poderá fornecer informações que podem ser utilizadas quando da confrontação com os ensaios químicos do complexo sortivo e da capacidade de troca catiônica.

Com base na determinação do pH, concluiu-se que o teor de 9% de cal seria o que provavelmente proporcionaria a melhor resposta em relação à redução do potencial de expansão e da pressão de expansão. Logo, foram realizados ensaios com duas amostras: uma com material sem cal e outro com material dosado com o teor de 9%

de cal, com cerca de 80 dias de cura, sem contato com o ar atmosférico. Com isso, ocorreu a maioria das reações da cal com o solo que poderiam estar relacionadas com o resultado do ensaio.

3.3.5 Limites de consistência

Foram realizados ensaios de limite de liquidez e plasticidade, respectivamente, segundo a NBR 6459 (Solo - Determinação do limite de liquidez) e NBR 7180 (Solo - Determinação do limite de plasticidade). Para isso foram utilizadas amostras sem a cal e com dosagens 1%, 3%, 5%, 7% e 9% de cal, curadas durante 80 dias, sem contato com o ar

atmosférico. Com isso, esperou-se a ocorrência de boa parte das reações da cal com o solo que poderiam estar relacionadas com os resultados dos ensaios.

3.3.6 Ensaio de compactação

Foram realizados ensaios de compactação de acordo com a NBR 7182 (Solo - Ensaio de compactação). Para isso foram utilizadas amostras com solo sem a cal e com dosagens de 1%, 3%, 5%, 7% e 9% de cal, curadas durante aproximadamente 50 dias, sem contato com o ar atmosférico. Com isso, esperou-se a ocorrência de boa parte das reações da cal com o solo que poderiam estar relacionadas com os resultados dos ensaios. Além disso, como o tempo de cura exerce influência no resultado dos ensaios, o seu aumento poderá tornar essa influência mais uniforme para as amostras.

Utilizou-se o processo de reuso do material após a secagem até próximo à umidade higroscópica. Isso foi possível devido ao fato de que a amostra, devido ao seu grande percentual de finos, não teria sua granulometria alterada em função do ensaio de compactação, fato que poderia ser verificado num ensaio em material com grãos quebradiços.

Optou-se pelo uso do cilindro pequeno, assumindo-se ligeira imprecisão no resultado, devido ao fato de uma fração muito pequena do ficar retida na peneira de 4,76mm na análise granulométrica, representando menos de 0,5% em peso. A energia do próctor normal foi utilizada uma vez que representa a condição usual em obras de terraplenagem.

3.3.7 Potencial de expansão e pressão de expansão

Foram realizados ensaios oedométricos em amostras de solo sem a cal e dosadas com teores de 1%, 3%, 5%, 7% e 9% de cal, tendo como referência a ASMT D 4546 (Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils).

Essa norma permite que se determine a magnitude da expansão ou colapso sob pressão axial

conhecida ou a magnitude da pressão vertical necessária para manter sem alteração de volume corpos de prova limitados lateralmente e axialmente carregados.

Foram necessárias algumas adaptações tanto do equipamento quanto do **método**. O **consolidômetro mencionado na norma** foi substituído pela prensa de adensamento tipo Bishop, que aplica uma carga à célula oedométrica. Por se tratar de solos expansivos, se utilizou sempre pedras porosas e papéis filtro secos, para evitar expansão antes do início do ensaio. Além disso, devido ao objetivo único de determinação do potencial de expansão e da pressão de expansão, os ensaios cessaram quando os mesmos foram obtidos, embora a referida norma orientasse o prosseguimento dos ensaios para a determinação de parâmetros de adensamento.

Foram utilizados os mesmos equipamentos para os ensaios de potencial de expansão e de pressão de expansão visando com isso facilitar a comparação entre os resultados obtidos.

Inicialmente foram preparados corpos de prova através de compactação estática, utilizando os dados dos ensaios de compactação. Com isso, foi possível o controle do peso específico aparente seco e a umidade da amostra, embora, conforme já apresentado, provavelmente tenderia a apresentar valores de expansão menores do que caso fossem realizadas as moldagens de forma dinâmica, conforme ocorre em obras de terraplenagem.

3.3.8 Curva característica da umidade do solo

As curvas características da umidade do solo, tanto de secagem quanto de umedecimento foram determinadas através de sucessivas aferições de sucção matricial pelo método do papel de filtro. Para aproveitar a oportunidade de estudo tentou-se também a determinação da sucção total, mesmo utilizando um tempo de equilíbrio inferior ao recomendado por MARINHO (1995). Foram encontrados valores de sucção total menor do que os de sucção matricial, o que levou a não consideração dos resultados nesta pesquisa.

Para isso, foram preparados corpos de prova com materiais que passam na peneira de 4,76mm, sendo uma de solo sem a cal e outra de solo com acréscimo de 9% de cal, curada durante 15 dias.

A moldagem dinâmica foi escolhida por permitir que os resultados dos ensaios pudessem ser comparáveis aos dos ensaios de compactação, embora esse tipo de moldagem permita menor controle sobre a massa específica aparente seca.

Foram realizados ensaios de compactação para a determinação da massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima com a aplicação de energia do próctor normal, sendo o solo curado durante 15 dias antes dos ensaios de compactação, como medida de diminuição de influência do decorrer das reações químicas entre o solo e a cal no início das determinações de sucção.

Em seguida, foram compactados corpos de prova no cilindro de próctor com amostras de solo sem a cal e com 9% de cal, segundo os parâmetros dos ensaios de compactação. Na seqüência, foram extraídos e cravados anéis em cada um, sendo um na porção superior, outro no centro e outro na porção inferior.

Após a devida raspagem dos materiais excedentes e pesagem, os corpos de prova moldados com os anéis foram deixados expostos para secagem natural, visando a redução de volume por contração, o suficiente para que se descolassem do anel, com isso, a integridade do corpo de prova foi mantida, visto que não foi utilizada ação mecânica para a sua retirada.

A retirada do anel visava à manutenção de iguais condições de confinamento lateral do corpo de prova durante acréscimos e decréscimos de teor de umidade visto que, a depender da variação do seu volume, ora o anel proporcionaria confinamento, ora não, o que poderia influenciar nos resultados dos ensaios.

Em seguida cada corpo de prova recebeu uma camada de fita crepe na superfície lateral que ficara descoberta pela ausência do anel, visando manter a integridade da amostra e a sua liberdade de variação de volume, bem como sua identificação.

O processo de umedecimento se deu por efeito capilar e por uso do aspersor, conforme nível de dificuldade. O processo de secagem ocorreu com o auxílio da estufa, em que os corpos de prova eram deixados por alguns minutos.

O papel de filtro utilizado foi o Whatman N°42, de acordo com MARINHO (1995), com 70 mm de diâmetro e a curva de calibração de CHANDLER et al (1992).

As equações (2) e (3) foram utilizadas como curva de calibração para o papel de filtro do ensaio: Umidade do papel de filtro (w) \leq 47%: Sucção (kPa) = $10^{(4,84-0,0622w)}$ (2)

Umidade do papel de filtro (w) $>$ 47%: Sucção (kPa) = $10^{(6,05-2,48\log w)}$ (3)

O tempo de equilíbrio foi de 7 dias, conforme orientação de MARINHO (1995).

Abaixo segue o procedimento para a determinação da sucção e obtenção da curva característica da umidade do solo.

1. Os corpos de prova eram umedecidos ou ressecados até que a umidade variasse em torno de 5%, para os corpos de prova de solo sem a cal e 3% para os corpos de prova de solo com 9% de cal;
2. Pesaram-se os corpos de prova e em seguida foram adicionados os papéis de filtro, cortados em quatro, sendo um na face em contato direto com o solo (sucção matricial) e um sobre dois pedaços de tela circulares, mantendo uma distância em torno de 6 mm. Foram aplicadas várias camadas de filme de PVC, isolando o corpo de prova do contato com o ar atmosférico e apertando-se bem para manter seguro o contato com o papel de filtro;
3. Em seguida foram envolvidos individualmente em folhas de alumínio, servido de proteção contra a luminosidade e colocados em uma caixa de isopor de espessura de 30 mm;
4. Decorridos 7 dias, foram retirados os papéis de filtro rapidamente com uma pinça e pesados com precisão de 10^{-4} g;
5. Lançou-se na curva de calibração de CHANDLER et al (1992) para a determinação da sucção correspondente a uma dada umidade do papel de filtro;
6. Retornou-se à etapa 1 até que se obteve pontos suficientes para a determinação de curvas representativas das amostras;
7. Após a determinação do último ponto os corpos de prova foram mantidos na estufa por 10 dias para a determinação do peso seco.

3.3.9 Análises químicas realizadas

Foram realizados ensaios químicos de amostras de solos sem a cal e dosados com teores de 1%, 3%, 5%, 7% e 9% de cal, conforme segue lista:

- Potencial hidrogeniônico (pH) em água
- Complexo sortivo (cálcio, magnésio, potássio e sódio)
- Hidrogênio
- Alumínio
- Capacidade de troca catiônica (com pH 7,0)
- Saturação por bases, alumínio e sódio
- Fósforo assimilável

Entre a dosagem e a realização dos ensaios houve um intervalo de 80 dias, permitindo a confrontação com os outros ensaios. Utilizou-se a metodologia da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) para a realização dos ensaios.

A determinação da capacidade de troca catiônica se mostrou interessante pela relação citada por diversos autores com o potencial de expansão do solo, bem como com os efeitos da cal utilizada na estabilização.

Já o pH em água poderá ser comparado às determinações de pH utilizadas inicialmente na

dosagem de cal para se verificar algum indício de reação entre o solo e a cal.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Dosagem do solo expansivo com a cal

A Figura 2 mostra que o acréscimo de cal permitiu um aumento considerável no valor de pH, obtendo-se valores crescentes até o pico de 12,42, muito próximo de 12,4 considerado como o pH que proporciona a maior redução do potencial de expansão para o teor de cal ótimo, segundo a metodologia apresentada por EADS & GRIM (1966), TM 5-818-7, TM 5-822-14 e a ASTM D 6276.

Essa elevação de pH se deve à liberação de íons hidroxila, conforme estudos de ROGERS & GLENDINNING (2000) apud LOVATO (2004).

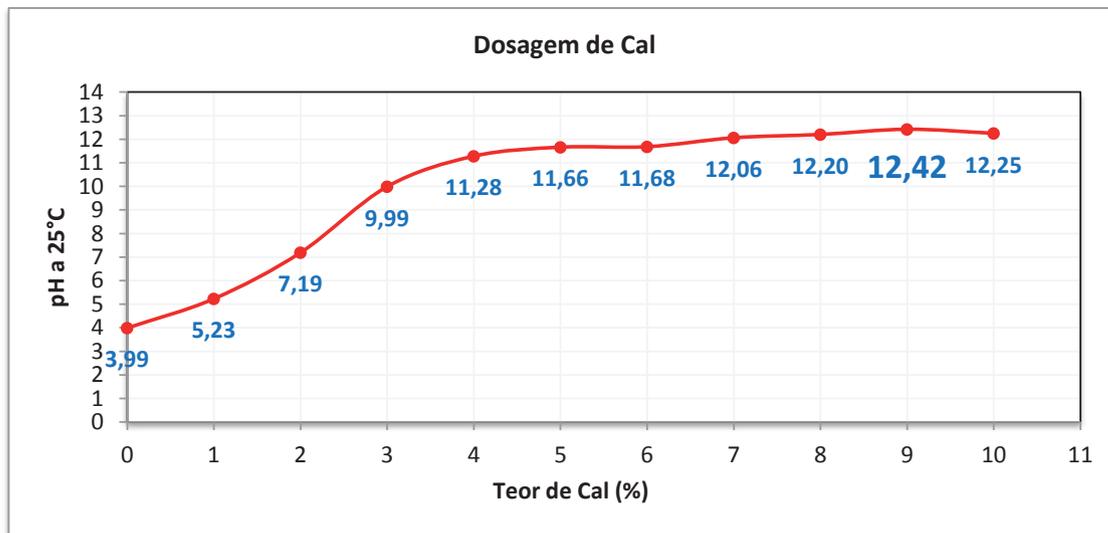


Figura 2 – pH do solo resultante das dosagens com a cal

4.2 Caracterização do solo sem a cal e com 9% de cal

As figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, as curvas granulométricas do solo sem a cal e do solo dosado com 9% de cal, com e sem defloculante. A composição granulométrica, os valores

de limites de consistência e a porcentagem de dispersão para o solo sem e com 9% de teor de cal estão apresentados na Tabela 3. Utilizando-se os dados referentes à composição granulométrica e limites de consistência, segundo o Sistema de Classificação Unificada de Solos, o solo sem a cal é classificada como MH.

Tabela 3 – Composição granulométrica, limites de consistência e percentagem de dispersão

	Solo sem cal	Solo com adição de 9% de cal
Argila (%)	52	41
Silte (%)	36	14
Areia fina (%)	7	38
Areia média (%)	3	3
Areia grossa (%)	1	2
Pedregulho (%)	1	2
Partículas < 0,002 mm (%)	52	41
Limite de Liquidez (%)	67,3	NL
Limite de Plasticidade (%)	51,9	NP
Índice de Plasticidade (%)	15,4	NP
Percentagem de Dispersão (%)	6,25	0

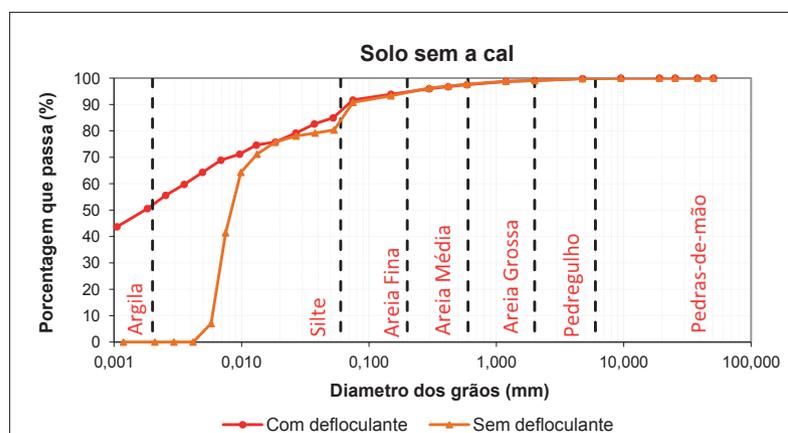


Figura 3 – Curvas granulométricas do solo sem a cal, com e sem defloculante

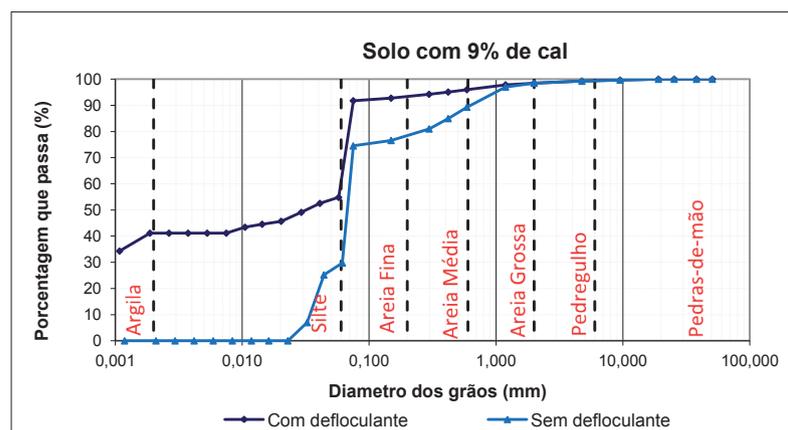


Figura 4 – Curvas granulométricas do solo com 9% de cal, com e sem defloculante

O solo sem a cal, segundo os critérios do Sistema de Classificação Unificado de Solos (ASTM, 1983 apud OLIVEIRA & BRITO, 1998), é classificado como MH.

Conforme definição da maioria das classificações de solos expansivos (CHEN, 1998) o solo

analisado possui uma característica comum a todos os solos expansivos, pois, apresenta um elevado percentual de partículas menores do que 0,002 mm (52%), conforme pode ser visto na Figura 3.

A adição de cal permitiu um aumento no percentual de partículas de textura mais grossa,

conforme se observa na Figura 4, correspondente à curva granulométrica referente ao solo com 9% de cal. Ainda na Figura 4 observa-se que ocorreu considerável desencontro nas curvas das amostras com e sem defloculante no intervalo referente à fração areia. Tal fato pode ser explicado por

fenômenos de floculação e/ou aglomeração também nessa fração em decorrência à adição de cal.

Na Tabela 4 se observa o efeito da adição de diferentes percentuais de cal ao solo na plasticidade, sendo evidentes as alterações nas características plásticas do solo.

Tabela 4 - Limites de consistência e plasticidade

Amostra	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)
9% cal	NL	NP	NP
7% cal	58,3	44,4	13,9
5% cal	58,5	45,9	12,6
3% cal	77,8	50,2	27,6
1% cal	78,4	55,4	23,0
0% cal	90,9	59,7	31,2

Através do confronto entre as composições granulométricas e os limites de consistência do solo sem a cal e com 9% de cal, conforme Tabela 3 e Figura 5, conclui-se que a cal proporcionou uma alteração considerável na textura do solo e no seu comportamento plástico. Tal fato se deve,

principalmente, à capacidade da cal em flocular e aglomerar as partículas devido ao aumento da concentração eletrolítica e redução da espessura da camada dupla difusa, visto que a cal possibilita um equilíbrio da deficiência de carga elétrica da partícula de argila.

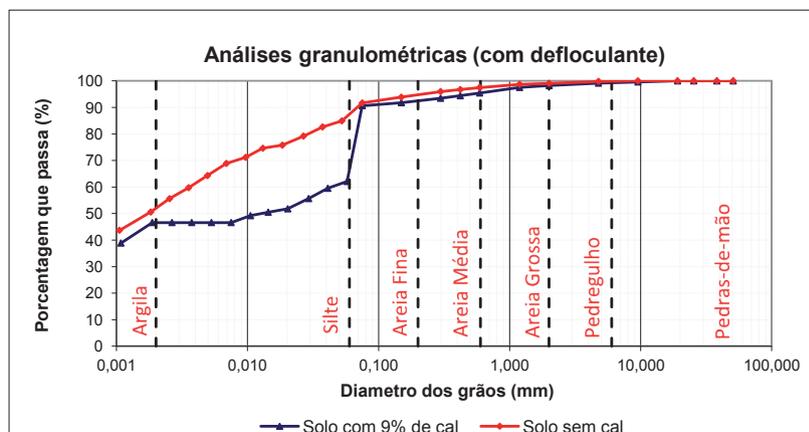


Figura 5 – Curvas granulométricas do solo natural sem a cal versus solo com 9% de cal

A cal reduz a deficiência por carga elétrica positiva das partículas do solo. Consequentemente diminui a afinidade do mineral expansivo por água e íons, levando à redução da expansão e alteração da plasticidade do solo.

Todos os autores pesquisados apontam para uma diminuição do índice de plasticidade do solo com o acréscimo de teores crescentes de cal, bem como do limite de liquidez. Conforme se observa

na Figura 6, houve redução do limite de liquidez e, na maioria das dosagens, do índice de plasticidade. Foi observado, também, redução no limite de plasticidade, em contraposição à elevação do limite de plasticidade apresentada por GOOSEN et al (2006), CASTRO (1981), CASTRO & SERAFIM LUIS (1974) e HILT & DAVIDSON (1960) apud PORTELINHA (2008).

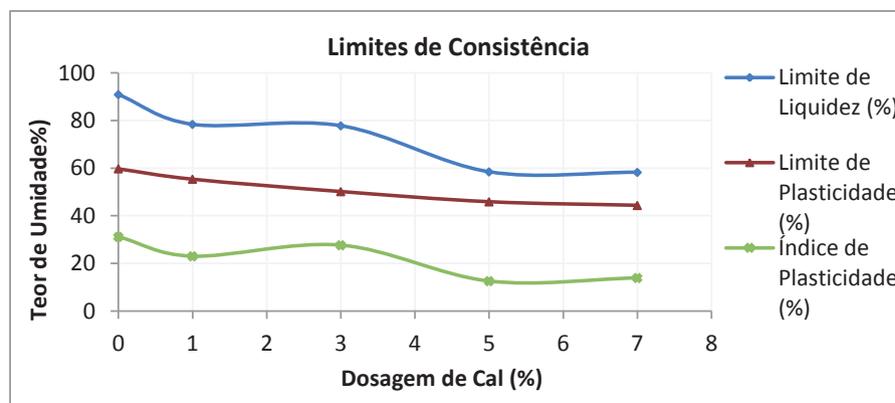


Figura 6 - Limite de plasticidade e de liquidez

4.3 Resultados dos ensaios de compactação

As curvas dos ensaios de compactação do solo sem cal e de todas as dosagens estão apresentados na Figura 7.

O intervalo de tempo entre a dosagem e ensaio de compactação foi de 80 dias. Conforme OSINUBI (1998) apud LOVATO (2004), quando decorrido um tempo considerável entre a mistura e o ensaio, através da reação de hidratação, às partículas se unem e torna-se necessário a ruptura das ligações formadas, para uma compactação satisfatória, o que pode ter ocorrido nos ensaios ilustrados na Figura 6. Com isto, para uma mesma energia de compactação, ocorreu uma diminuição da massa específica aparente seca máxima com o acréscimo de cal pela dificuldade em quebrar as

agregações. Além disso, a floculação aumenta a quantidade e o tamanho dos vazios no solo, o que implica na necessidade de mais água para a sua ocupação, contribuindo também para a diminuição da massa específica aparente seca máxima.

Na Figura 8 verifica-se uma diminuição da massa específica aparente seca máxima com teores crescentes de cal, a partir da dosagem de 1%. Na Figura 9, observa-se um comportamento geral de elevação da umidade ótima com os teores crescentes de cal, embora existam pequenas variações para menos, conseqüentes da imprecisão pertinente à própria metodologia do ensaio. A partir do teor de cal de 5%, tanto a diminuição da massa específica aparente seca quanto a elevação do teor de umidade ótimo apresentam uma variação mais acentuada.

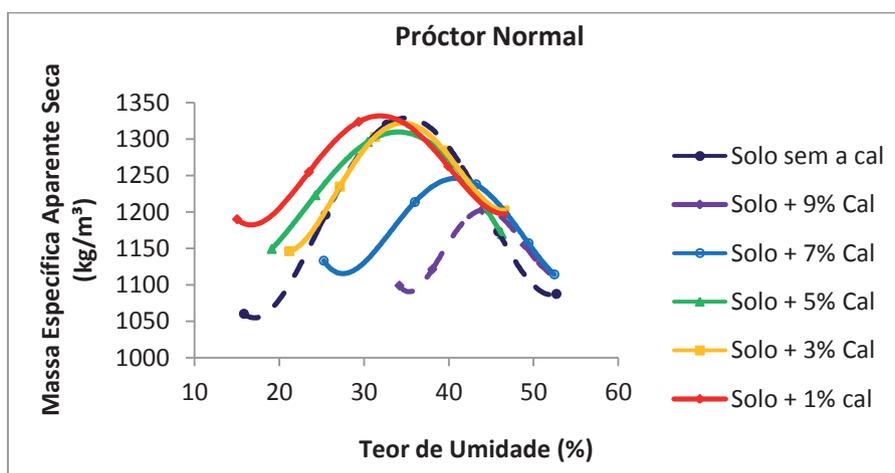


Figura 7 - Ensaio de compactação do solo sem e com adição de cal

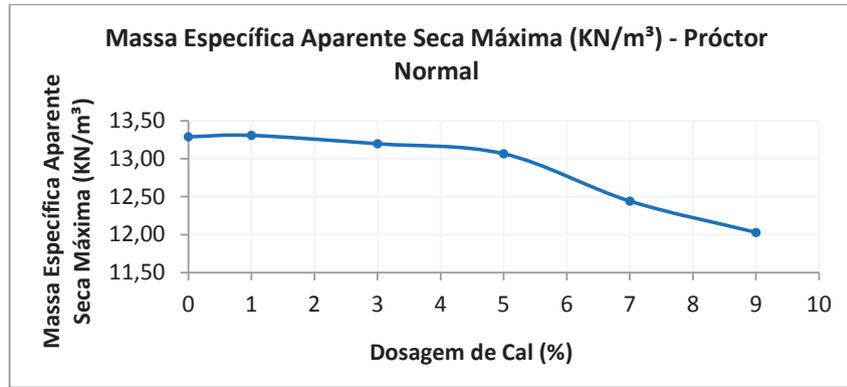


Figura 8 - Variação da massa específica aparente seca máxima com a adição de cal

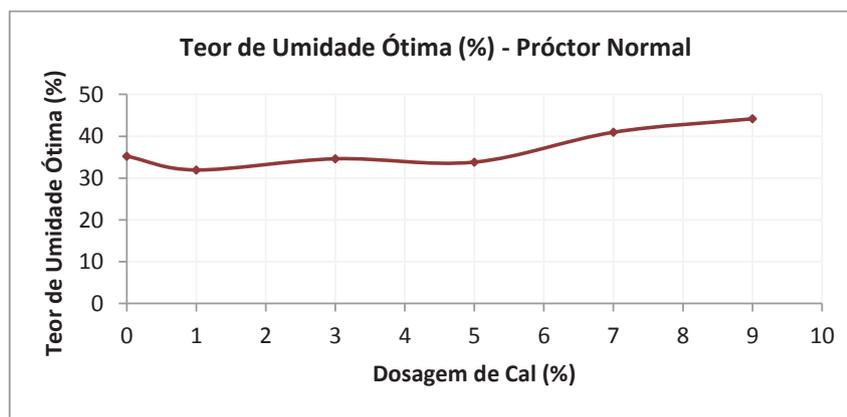


Figura 9 - Variação do teor de umidade ótima em relação ao teor de cal

4.4 Potencial de expansão e pressão de expansão

As figuras 10 e 11 apresentam os resultados dos ensaios de potencial de expansão e de pressão de expansão.

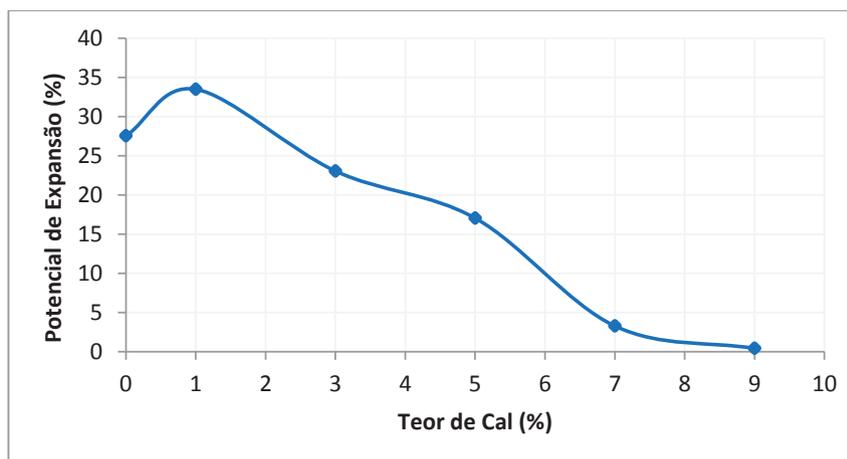


Figura 10 - Potencial de expansão relacionada à dosagem de cal

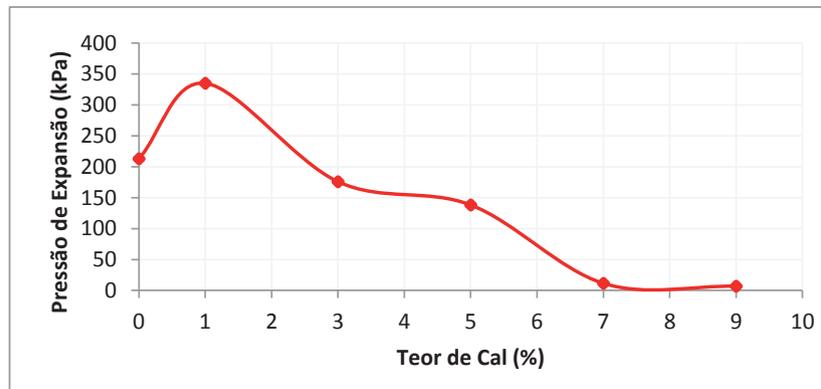


Figura 11 – Pressão de expansão para diferentes teores de cal

Para o solo sem a cal determinou-se um potencial de expansão de 27,5% e uma pressão de expansão de 213 kPa. Observou-se em relação ao solo sem a cal, a partir de 3%, uma diminuição do potencial de expansão e da pressão de expansão. Para o teor de 1% houve acréscimo tanto no potencial de expansão quanto da pressão de expansão resultando, respectivamente, 33,5% e 335 kPa. Enquanto, para o teor de 9% de cal, praticamente eliminou a expansão e reduziu a pressão de expansão para 7 kPa.

Segundo NELSON & MILLER (1992), a cal permite boa reatividade quando o pH do solo é maior do que 7, o que explica porque o solo estudado aumentou o potencial de expansão e a pressão de expansão, para o teor de 1%, visto que, conforme se observa na Figura 2, o pH é de 5,23, portanto inferior ao pH que permite boa reatividade.

Pode-se explicar a redução no potencial de expansão e na pressão de expansão para teor de cal igual ou superior a 3%, até 9%, pelos seguintes fatores:

- a) A redução na massa específica aparente seca contribui para que as partículas tenham menores forças de repulsão. Logo, a pressão de expansão resultante, considerando corpos de prova moldados com teores de umidades ótimas e as mesmas energias de compactação, sofrerá redução.
- b) A diminuição da sucção matricial contribui para que o solo tenha menos afinidade por água, o que diminui a quantidade de água disponível para equilibrar a excesso de carga elétrica negativa da superfície do mineral expansivo.

- c. A cal fornece cátions para equilibrar a superfície do argilomineral e, conseqüentemente, diminuir a espessura da camada dupla difusa, diminuindo a presença de água.
- d. A elevação do teor de umidade ótima contribui para que o solo já inicie o fenômeno de expansão a partir de um teor de umidade mais elevado, bem como com menor sucção. Logo, ele iniciará de uma condição mais expandida do que o solo sem a cal, diminuindo o potencial de expansão. Todavia, tal fato não está relacionado à diminuição da pressão de expansão, conforme apresentado por CHEN (1988).

4.5 Curva característica da umidade do solo

Os corpos de prova utilizados na determinação da curva característica foram moldados de amostras compactadas dinamicamente, tendo o ensaio de compactação sido realizado com acréscimo sucessivo de água, semelhante à curva de umedecimento na determinação da sucção. Verificou-se que o teor de umidade ótima de 44% corresponde a uma sucção matricial, na curva característica de umedecimento, de aproximadamente 10 kPa, conforme se pode observar na Figura 12.

Observa-se, na Figura 12 que a variação da sucção com a umidade do solo sem cal e com 9% de cal até 1500 kPa foi muito reduzida porque o tempo de cura do solo com 9% de cal utilizado na determinação do ponto inicial da curva característica foi de apenas 21 dias, deste modo, o solo ainda estava submetido à variação de volume. Abaixo de 1500 kPa, já com o tempo de cura de aproximadamente 40 dias a diferença de sucção entre o solo sem e com adição de cal aumentou pois o efeito da

sucção devido à ação eletrostática e à capilaridade é reduzido devido à presença da cal.

Na Figura 13 o valor da sucção do solo com 9% de cal, até aproximadamente 4000 kPa, é inferior ao do solo sem cal, isso ocorre porque a presença da cal induz a um aumento na granulometria e a uma redução no efeito de adsorção entre as partículas. Como consequência, tem-se uma redução de volume por contração no solo sem cal superior a do solo com cal. Somente a partir de 30% de umidade e 4000 kPa é que o solo passa a ter o mesmo comportamento de variação de volume por contração.

Em relação à expansão do solo, para um dado teor de umidade, uma sucção menor implica numa menor afinidade por água. Logo, estará menos sujeito a variações de umidade e, conseqüentemente, a variações de volume. Além disso, a menor sucção é resultante também da contribuição da cal na diminuição da deficiência por carga elétrica da superfície do argilomineral. Com isso, menos moléculas de água serão necessárias para alcançar o equilíbrio, o que diminui a afinidade por água do solo e a espessura da camada dupla difusa.

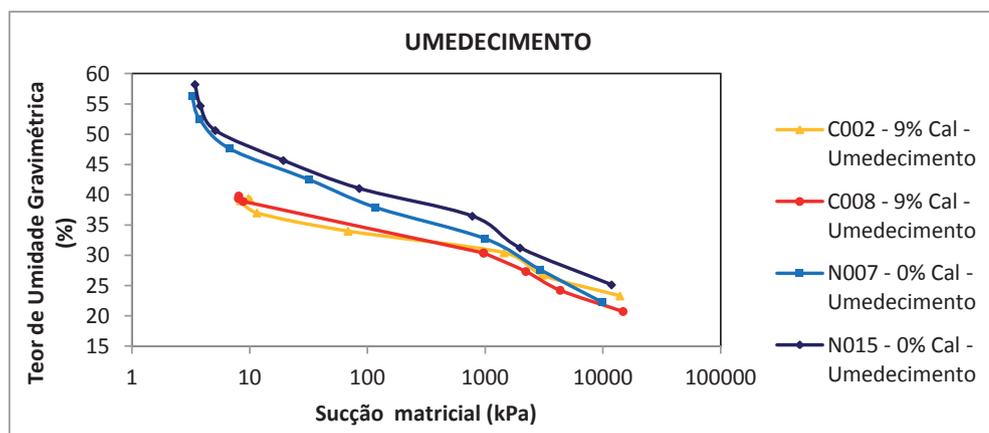


Figura 12 - Curva característica de umidade do solo com e sem adição de cal -trajetória de umedecimento

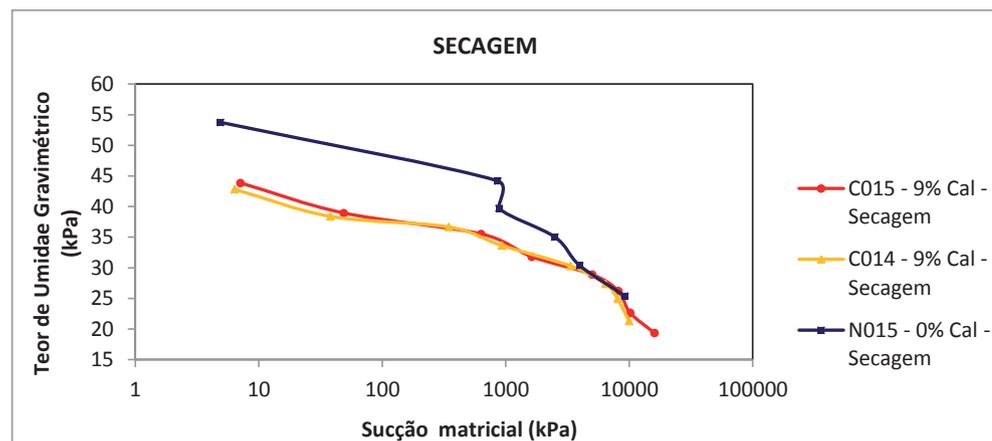


Figura 13 - Curva característica de umidade do solo com e sem adição de cal - trajetória de secagem

4.6 Ensaios químicos

A Tabela 5 apresenta os resultados da caracterização química do solo argiloso estudado, com e sem adição de cal.

Tabela 5 – Ensaio químicos

Teor de cal	(%)	0	1	3	5	7	9
pH em água		3,9	4,7	8,2	10,5	11,2	11,3
Complexo sortivo	(cmol(+)/kg)						
Cálcio		1,11	24,28	52,61	51,6	41,48	40,78
Magnésio		79,83	26,91	1,01	1,01	1,01	0,71
Potássio		0,31	0,26	0,25	0,20	0,20	0,20
Sódio		1,13	1,20	1,85	2,31	2,47	2,39
Soma de bases(SB)		82,38	52,66	55,72	55,13	45,17	44,08
Hidrogênio		7,25	1,26	0,00	0,00	0,00	0,00
Alumínio		30,26	11,17	0,00	0,00	0,00	0,00
CTC a pH 7,0		119,89	65,09	55,72	55,13	45,17	44,08
Saturação por bases (V)	(%)	69,00	81,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Saturação por Alumínio	(%)	26,86	17,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Saturação por Sódio	(%)	0,94	1,84	3,32	4,19	5,47	5,42
Fósforo assimilável (Mehlich)	mg/kg	131	81	164	131	3	1

A redução do pH para cada teor de cal pode ser explicado pelo processo de reação da cal com o solo, o que requer um tempo para que isto ocorra.

Os resultados do pH apresentados na Figura 14 indicam esta redução, chegando a ser da ordem de 10%.

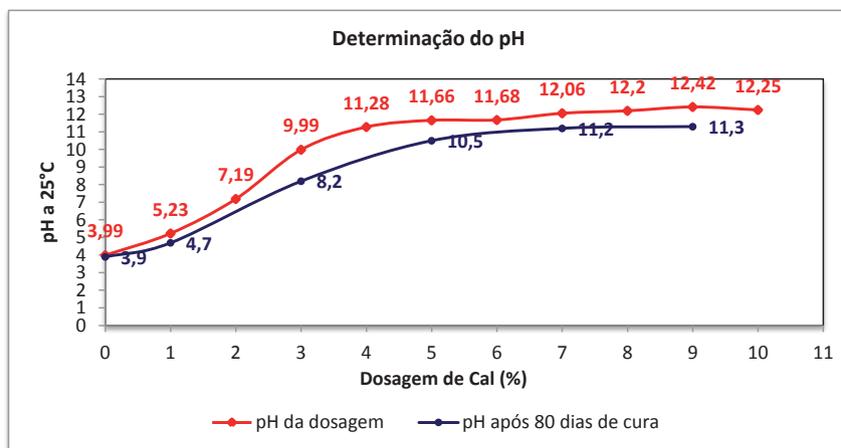


Figura 14 – pH após dosagem e pH após 80 dias de cura

A capacidade de troca catiônica está relacionada à estabilidade do argilomineral. Conforme pode ser observado na Figura 15, ela decresce com o aumento do teor de cal até 9%, resultando na menor capacidade de troca catiônica, coincidindo com o percentual que resultou em menores valores de potencial de expansão e de pressão de expansão.

Por ter maior afinidade com o argilomineral, os íons Ca^{2+} substituem outros íons, como o Na^{+} e o K^{+} , de acordo com a carga elétrica negativa da superfície do argilomineral. O aumento da densidade dos íons diminui a capacidade de troca catiônica, reduzindo o potencial de mudança de volume.

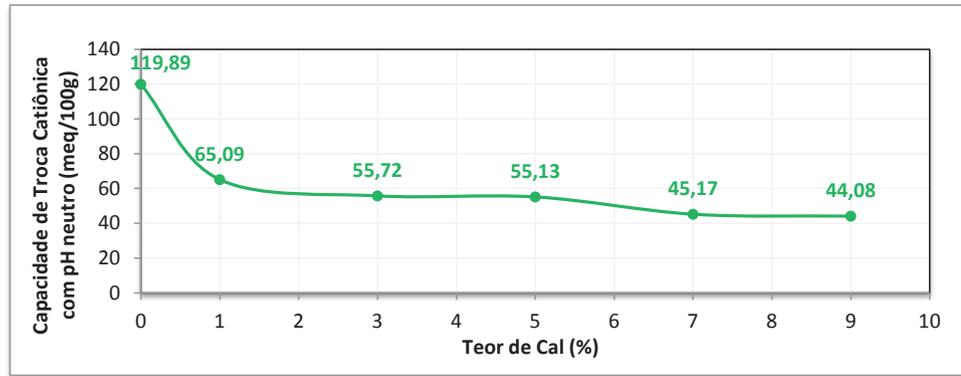


Figura 15 – Capacidade de troca catiônica

5 CONCLUSÕES

A adição de cal reduz a deficiência de carga elétrica do argilomineral, portanto, induz a uma diminuição da afinidade do solo por água, contribuindo, dessa maneira, para a redução do potencial de expansão e da pressão de expansão.

Devido a fenômenos de floculação uma parcela do material se tornou de textura mais grossa, o que diminui também a sucção, bem como a área específica disponível para umedecimento.

A redução da sucção matricial conseqüente do aumento do teor de umidade implica numa menor força de aproximação entre as partículas e no aumento de volume do solo, reduzindo, conseqüentemente, a massa específica aparente seca. Tal fato influi diretamente na diminuição do potencial de expansão e na pressão de expansão, pois, o teor de umidade inicial aumenta.

O aumento do teor de umidade ótima devido à adição de cal provocou um acréscimo no teor de umidade inicial diminuindo a variação de volume. Embora tenha ocorrido diminuição da pressão de expansão, ela não pode ser explicada pelo mesmo motivo, visto que a massa específica aparente seca é quem influi mais diretamente no comportamento.

A diminuição da capacidade de troca catiônica torna o material ensaiado menos sujeito a variações de volume, visto que o íon de cálcio é menos substituível do que íon de sódio ou potássio.

Ocorreu uma diminuição do índice de plasticidade e do limite de liquidez, indicando uma relação com o potencial de expansão do solo, conforme constatado, também, por CHEN (1988).

Os resultados do potencial de expansão e pressão de expansão para o teor de 1% de cal contrariaram a expectativa pois aumentaram em relação ao solo sem a cal, podendo tal fato ser explicado porque o solo só apresenta boa reatividade quando o pH é maior do que 7 (NELSON & MILLER, 1992).

Embora o teor de 9% de cal tenha praticamente eliminado o potencial de expansão e a pressão de expansão, não necessariamente ele deverá ser utilizado em obras de terraplenagem e pavimentação. A depender da tolerância prevista em projetos teores menores de cal também poderão ser utilizados.

Pode ter ocorrido diminuição da precisão dos resultados devido à não padronização dos tempos de cura, o que dificultou a confrontação de resultados.

Houve confirmação da metodologia de EADS & GRIM (1966) para a determinação do teor ótimo de cal.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. B., 2003. Mapeamento Geológico da Região do Engenho Sibiró - Porto de Galinhas (Litoral Sul, PE): Contribuição à Estratigrafia e à Tectônica da Sub-bacia de Pernambuco. Relatório de CHEN, F. H., 1988. Foundation on Expansive Soils, New York: Elsevier, 463 p.

DEPARTMENTS OF THE ARMY USA. TM 5-818-7: Foundations in Expansive Soils. Washington, 1983.

- DEPARTMENTS OF THE ARMY USA. TM 5-822-14/AFMAN: Soil stabilization for pavements. Washington, 1994.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H., 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils, New York: John Wiley & Sons, 517 p.
- FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO. Estudo de impacto ambiental da Refinaria do Nordeste - Abreu e Lima. Pernambuco, 2006.
- GOOSEN, F. A. Mattheus; AL-RAWAS, A. A., 2006. Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment, London: Taylor & Francis Group, 544 p.
- GUSMÃO, Alexandre Duarte (Org.). Geotecnia no Nordeste. 2. ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2005.
- LOVATO, R. S., 2004. Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 144 p.
- MARINHO, F. A. M., 1995. A técnica do papel de filtro para medição de sucção. Encontro sobre Solos Não Saturados. Rio Grande do Sul, 18 a 20 de outubro de 1995.
- NELSON, J. D. & MILLER, D. J. Expansive soils, New York: John Wiley & Sons, Inc, 1992.
- NG, Charles W. W.; MENZIES, Bruce., 2007. Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering, New York: Taylor & Francis Group, 687 p.
- OLIVEIRA, Antonio Manoel dos Santos (Edit.). Geologia de Engenharia. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.
- PORTELINHA, F. H. M., 2008. Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal de Viçosa, 161 p.
- SILVA, O. S., 2012. Estudo de propriedades geotécnicas de um solo argiloso, potencialmente expansivo, compactado com e sem adição de cal. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal de Viçosa, 167 p.
- SOTO, M. A. A., 2004. Comparação entre os métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados. Tese (Doutorado) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 233 p.

PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE EXPANSÃO DE UM SOLO ARGILOSO COMPACTADO COM E SEM ADIÇÃO DE CAL



MIGUEL ANGEL MELLO SILVA JUNIOR
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Pernambuco, miguelmello@gmail.com

RESUMO ABSTRACT

Este trabalho analisa o comportamento de um solo argiloso compactado, potencialmente expansivo, localizado nas proximidades do Complexo Industrial de Suape, Município de Ipojuca, litoral sul do Estado de Pernambuco. Tem como objetivo específico avaliar a metodologia adotada por EADS & GRIM (1966) para a definição do teor de cal ótimo a ser utilizado e analisar o comportamento de expansão para diferentes teores de adição de cal. Foram ensaiados corpos de prova compactados do solo sem adição de cal e para diferentes teores. A estabilização de solo expansivo utilizando a cal tem sido usada com sucesso em muitos projetos para minimizar expansão e melhorar a plasticidade e trabalhabilidade do solo. A caracterização do solo compactado com e sem adição de cal consistiu na determinação de índices físicos, obtenção de curvas granulométricas, determinação da capacidade de troca catiônica e do pH. Foram executados, ainda, ensaios de potencial de expansão, pressão de expansão e ensaios de sucção através da técnica do papel de filtro, obtendo-se as curvas características de umidade do solo. Os ensaios para a determinação do teor ótimo de cal foram realizados segundo metodologia, baseada no pH, proposta por EADS & GRIM (1966). A análise dos resultados obtidos confirma a proposta apresentada pelos autores, ou seja, ocorre uma redução da expansão quando o solo se encontra com um pH próximo a 12,4 para o teor de cal ótimo obtido através do método proposto.

Palavras-chaves: solo expansivo; estabilização com cal; potencial de expansão; pressão de expansão.

GEOTECHNICAL PROPERTIES OF EXPANSION OF A CLAYEY SOIL COMPACTED WITH AND WITHOUT THE ADDITION OF CAL

This paper analyzes the behavior of a compacted clay soil, potentially expansive, located near the Industrial Complex Suape Ipojuca city, south coast of Pernambuco State. Specific aims to evaluate the methodology adopted by EADS & GRIM (1966) to define the optimum lime content being used and analyze the behavior of expansion for different levels of addition of lime. We tested specimens compacted soil without lime addition to different levels. The stabilization of expansive soil using lime has been used successfully in many projects to minimize expansion and improve the plasticity and workability of soil. The characterization of the compacted soil with and without addition of lime was the physical indices, obtaining size distribution curves, determination of cation exchange capacity and pH. Were performed, also testing the potential for expansion, expansion pressure and testing of suction using the technique of filter paper, resulting in the characteristic curves of soil moisture. The tests for determining the optimum lime content were performed using methods based on pH, proposed by EADS & GRIM (1966). The results obtained confirm the proposal presented by the authors, i.e. a reduction of the expansion occurs when the soil is with a pH around 12.4 to the optimum lime content obtained through the proposed method.

Keywords: expansive soil; lime stabilization; swell potential; swelling pressure.

1 INTRODUÇÃO

Um solo potencialmente expansivo é aquele que apresenta variações de volume diante da variação da umidade ou sucção, sendo constituído na sua fração mais fina por minerais expansivos (JUSTINO DA SILVA, 2005).

O problema dos solos expansivos não era reconhecido pelos engenheiros até 1930. Os danos ocorridos nas construções da época eram atribuídos a outras causas que não à atuação desse tipo de solo. O U. S. Bureau of Reclamation reconheceu os problemas de solos expansivos em 1938, quando da construção da fundação de um sifão de aço (CHEN, 1988).

Solos expansivos são encontrados em todos os cinco continentes e são particularmente difundidos em regiões áridas e semi-áridas. Em alguns países subdesenvolvidos, os edifícios foram construídos sem qualquer conhecimento da presença de solos expansivos. Isso foi em parte devido à falta de evidências históricas. Com o rápido desenvolvimento de infra-estrutura urbana, problemas de solo expansivo se tornaram mais evidentes. Há, portanto, uma necessidade de abordar problemas associados a estes solos (NG & MENZIES, 2007).

Os solos expansivos variam de volume com a variação de umidade ou sucção, representando, conseqüentemente, um caso particular de solo não-saturado, sendo por tal motivo aplicáveis os estudos desenvolvidos por FREDLUND & RAHARDJO (1993), sendo estes referências mundiais em solos não-saturados.

Embora a solução mais recomendada no meio técnico seja a substituição do solo expansivo por outro sem essa característica, em algumas ocasiões isso pode se tornar inviável. Por exemplo, em empreendimentos que incluem grande movimentação de terra, conforme observado recentemente no complexo industrial portuário de Suape, em Pernambuco, a escassez de locais utilizáveis como bota-fora e, principalmente, a dificuldade de serem encontrados materiais em distância viável que pudessem substituir os solos expansivos tornam importante o estudo do tratamento do solo existente. A aplicação de aditivos é uma das alternativas, e a cal o mais utilizado no mundo para esse tipo de problema.

Há alguns métodos desenvolvidos para a sua dosagem, sendo que o de EADS & GRIM (1966) é um dos baseados no pH do solo, recomendado por NELSON & MILLER (1992), pela ASTM D 6276, pela TM 5-818-7 das forças armadas americanas, entre outros.

As investigações realizadas neste trabalho têm por objetivo verificar a aplicabilidade da metodologia proposta por EADS & GRIM (1966) e analisar o comportamento de expansão para diferentes teores de cal. Com isso, será possível embasar soluções de engenharia para viabilizar alternativas de construção que utilizem jazidas desse tipo de solo para fins de pavimentação e terraplenagem.

2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento de deformação de uma argila potencialmente expansiva compactada com adição de cal através de ensaios de laboratório. Como objetivo secundário, avaliar a metodologia de EADS & GRIM (1966) e o comportamento do solo sem cal e com adição de 9% de cal durante a secagem e umedecimento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A amostra coletada para a realização desta pesquisa é proveniente de área próxima ao canteiro de obras da Refinaria Abreu e Lima, do complexo industrial portuário de Suape, no Município de Ipojuca, Pernambuco. Algumas obras da área de Suape identificaram a presença de solo expansivo na etapa de terraplenagem. Em face disso foram tomadas várias providências para sanar os problemas provenientes desse tipo de solo. Uma delas foi o aprofundamento do entendimento das propriedades relacionadas ao seu comportamento.

3.1 Aspectos geológicos da área de coleta do solo estudado

O local de coleta de amostra está situado na Província Costeira de Pernambuco, que é dividida em dois grandes elementos geológicos: o embasamento cristalino e uma seqüência da idade mesozóica, acumulada nas Bacias Pernambuco/Paraíba, ao norte, e Cabo, ao sul.

No local de coleta da amostra estavam presentes afloramentos de rochas vulcânicas escuras e de granulação fina, como o basalto, em vários estágios de intemperismo, características da Formação Ipojuca, representada pela sigla Kv e Kig. A avaliação geral da área permite-se concluir que trata-se de um solo de origem residual.

Segundo ALMEIDA (2003), esse termo foi introduzido por AMARAL & MENOR (1979) para designar a província magmática cretácea, constituída por rochas magmáticas, como os basaltos, andesitos, traquitos e riolitos, e o Granito do Cabo. Mais recentemente, alguns autores têm se referido a essa formação como Suíte Mágica Ipojuca.

Ocorrem intercaladas em camadas ou intrudidas na Formação Cabo ou no embasamento cristalino (ALMEIDA et al, 2003).

3.2 Aspectos mineralógicos do solo estudado

SILVA (2012) realizou com amostra coletada no mesmo local da presente pesquisa ensaio mineralógico através de difração de raios X.

Ele distinguiu a presença exclusiva de argilo-mineral do grupo das esmectitas, sendo distinguida a montmorilonita, francamente expansível se imersa em água. A Figura 1 apresenta gráfico gerado na execução do ensaio de difração de raios X.

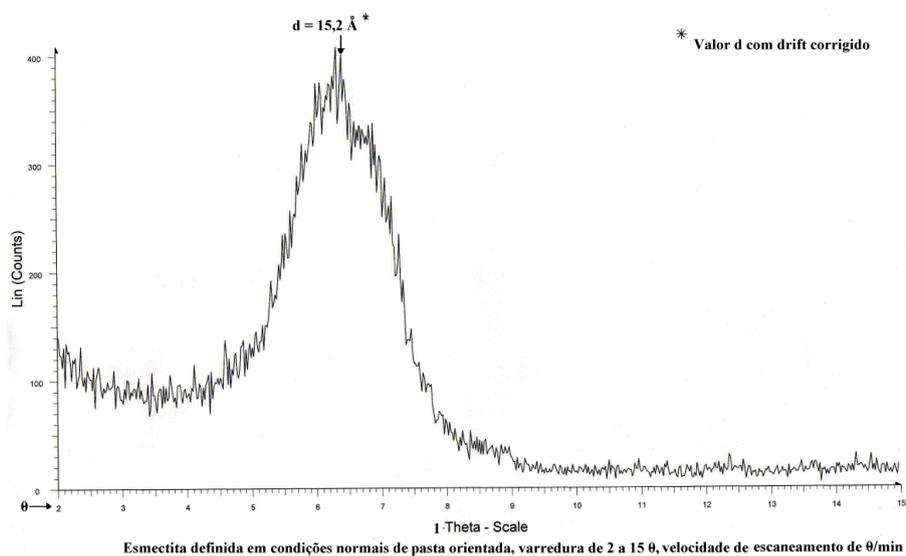


Figura 1 - Gráfico do difratograma de raio X na condição normal (SILVA, 2012).

3.3 Atividades de laboratório

Foram realizados ensaios de caracterização física e química, ensaios de compactação, determinação do teor da cal e da sucção matricial, potencial de expansão e pressão de expansão, para corpos de prova sem e com adição de cal.

3.3.1 Seleção da cal utilizada na estabilização

A cal utilizada é do tipo CH-I, definida pela NBR 7175, segundo Tabela 1:

Tabela 1 - Composição da cal segundo NBR 7175

		CH-I	CH-II	CH-III
CO ₂	Na fábrica	≤5%	≤5%	≤13%
	No depósito	≤7%	≤7%	≤15%
Óxido não-hidratado		≤10%	≤15%	≤15%
Óxidos totais na base não-voláteis		≥90%	≥88%	≥88%

Embora os tipos de cal hidratada, segundo alguns autores, não influenciavam consideravelmente nos resultados, para essa pesquisa foi selecionada essa cal devido à menor presença de CO₂, o que diminui a influência de outras espécies químicas além daquelas relacionadas ao interesse da pesquisa.

3.3.2 Dosagem da cal utilizada

Todas as dosagens realizadas com cal e solo, para todos os ensaios, foram efetuadas em peso seco, segundo equação (1) que se segue:

$$\frac{\text{Peso seco de cal}}{\text{Peso seco de solo}} = k \quad (1)$$

Sendo que k poderia assumir diferentes valores, a depender do ensaio, entre 0 e 10%.

As amostras, quando precisavam manter uma determinada umidade, eram acondicionadas com o mínimo de ar em sacos plásticos impermeáveis e devidamente fechados, impedindo também reações com componentes do ar atmosférico, o

que poderia adicionar mais uma variável ao comportamento dos ensaios.

3.3.3 Determinação do potencial hidrogeniônico (pH)

Com um pH-metro digital procedeu-se à determinação do pH de uma amostra sem cal e amostras de solo dosadas com percentuais de 1% a 10% de cal, variando de 1% em 1%, com base na TM 5-822-14, com algumas adaptações principalmente devido aos equipamentos disponíveis.

3.3.4 Dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo

Foi realizada a avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo (ensaio de dispersão SCS), com base na NBR 13602. A definição da composição granulométrica foi realizada com base na NBR 6502, conforme Tabela 2:

Tabela 2 – Definição do tamanho de partículas segundo NBR 6502

	Menor diâmetro (mm)	Maior diâmetro (mm)
Pedregulho	2,0	60,0
Areia grossa	0,6	2,0
Areia média	0,2	0,6
Areia fina	0,06	0,2
Silte	0,002	0,06
Argila	0	0,002

Com isso, além de serem obtidas informações a respeito da distribuição granulométrica, também foram obtidas informações relativas à dispersibilidade do material, o que poderá fornecer informações que podem ser utilizadas quando da confrontação com os ensaios químicos do complexo sortivo e da capacidade de troca catiônica.

Com base na determinação do pH, concluiu-se que o teor de 9% de cal seria o que provavelmente proporcionaria a melhor resposta em relação à redução do potencial de expansão e da pressão de expansão. Logo, foram realizados ensaios com duas amostras: uma com material sem cal e outro com material dosado com o teor de 9%

de cal, com cerca de 80 dias de cura, sem contato com o ar atmosférico. Com isso, ocorreu a maioria das reações da cal com o solo que poderiam estar relacionadas com o resultado do ensaio.

3.3.5 Limites de consistência

Foram realizados ensaios de limite de liquidez e plasticidade, respectivamente, segundo a NBR 6459 (Solo - Determinação do limite de liquidez) e NBR 7180 (Solo - Determinação do limite de plasticidade). Para isso foram utilizadas amostras sem a cal e com dosagens 1%, 3%, 5%, 7% e 9% de cal, curadas durante 80 dias, sem contato com o ar

atmosférico. Com isso, esperou-se a ocorrência de boa parte das reações da cal com o solo que poderiam estar relacionadas com os resultados dos ensaios.

3.3.6 Ensaio de compactação

Foram realizados ensaios de compactação de acordo com a NBR 7182 (Solo - Ensaio de compactação). Para isso foram utilizadas amostras com solo sem a cal e com dosagens de 1%, 3%, 5%, 7% e 9% de cal, curadas durante aproximadamente 50 dias, sem contato com o ar atmosférico. Com isso, esperou-se a ocorrência de boa parte das reações da cal com o solo que poderiam estar relacionadas com os resultados dos ensaios. Além disso, como o tempo de cura exerce influência no resultado dos ensaios, o seu aumento poderá tornar essa influência mais uniforme para as amostras.

Utilizou-se o processo de reuso do material após a secagem até próximo à umidade higroscópica. Isso foi possível devido ao fato de que a amostra, devido ao seu grande percentual de finos, não teria sua granulometria alterada em função do ensaio de compactação, fato que poderia ser verificado num ensaio em material com grãos quebradiços.

Optou-se pelo uso do cilindro pequeno, assumindo-se ligeira imprecisão no resultado, devido ao fato de uma fração muito pequena do ficar retida na peneira de 4,76mm na análise granulométrica, representando menos de 0,5% em peso. A energia do próctor normal foi utilizada uma vez que representa a condição usual em obras de terraplenagem.

3.3.7 Potencial de expansão e pressão de expansão

Foram realizados ensaios oedométricos em amostras de solo sem a cal e dosadas com teores de 1%, 3%, 5%, 7% e 9% de cal, tendo como referência a ASMT D 4546 (Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils).

Essa norma permite que se determine a magnitude da expansão ou colapso sob pressão axial

conhecida ou a magnitude da pressão vertical necessária para manter sem alteração de volume corpos de prova limitados lateralmente e axialmente carregados.

Foram necessárias algumas adaptações tanto do equipamento quanto do **método**. O **consolidômetro mencionado na norma** foi substituído pela prensa de adensamento tipo Bishop, que aplica uma carga à célula oedométrica. Por se tratar de solos expansivos, se utilizou sempre pedras porosas e papéis filtro secos, para evitar expansão antes do início do ensaio. Além disso, devido ao objetivo único de determinação do potencial de expansão e da pressão de expansão, os ensaios cessaram quando os mesmos foram obtidos, embora a referida norma orientasse o prosseguimento dos ensaios para a determinação de parâmetros de adensamento.

Foram utilizados os mesmos equipamentos para os ensaios de potencial de expansão e de pressão de expansão visando com isso facilitar a comparação entre os resultados obtidos.

Inicialmente foram preparados corpos de prova através de compactação estática, utilizando os dados dos ensaios de compactação. Com isso, foi possível o controle do peso específico aparente seco e a umidade da amostra, embora, conforme já apresentado, provavelmente tenderia a apresentar valores de expansão menores do que caso fossem realizadas as moldagens de forma dinâmica, conforme ocorre em obras de terraplenagem.

3.3.8 Curva característica da umidade do solo

As curvas características da umidade do solo, tanto de secagem quanto de umedecimento foram determinadas através de sucessivas aferições de sucção matricial pelo método do papel de filtro. Para aproveitar a oportunidade de estudo tentou-se também a determinação da sucção total, mesmo utilizando um tempo de equilíbrio inferior ao recomendado por MARINHO (1995). Foram encontrados valores de sucção total menor do que os de sucção matricial, o que levou a não consideração dos resultados nesta pesquisa.

Para isso, foram preparados corpos de prova com materiais que passam na peneira de 4,76mm, sendo uma de solo sem a cal e outra de solo com acréscimo de 9% de cal, curada durante 15 dias.

A moldagem dinâmica foi escolhida por permitir que os resultados dos ensaios pudessem ser comparáveis aos dos ensaios de compactação, embora esse tipo de moldagem permita menor controle sobre a massa específica aparente seca.

Foram realizados ensaios de compactação para a determinação da massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima com a aplicação de energia do próctor normal, sendo o solo curado durante 15 dias antes dos ensaios de compactação, como medida de diminuição de influência do decorrer das reações químicas entre o solo e a cal no início das determinações de sucção.

Em seguida, foram compactados corpos de prova no cilindro de próctor com amostras de solo sem a cal e com 9% de cal, segundo os parâmetros dos ensaios de compactação. Na seqüência, foram extraídos e cravados anéis em cada um, sendo um na porção superior, outro no centro e outro na porção inferior.

Após a devida raspagem dos materiais excedentes e pesagem, os corpos de prova moldados com os anéis foram deixados expostos para secagem natural, visando a redução de volume por contração, o suficiente para que se descolassem do anel, com isso, a integridade do corpo de prova foi mantida, visto que não foi utilizada ação mecânica para a sua retirada.

A retirada do anel visava à manutenção de iguais condições de confinamento lateral do corpo de prova durante acréscimos e decréscimos de teor de umidade visto que, a depender da variação do seu volume, ora o anel proporcionaria confinamento, ora não, o que poderia influenciar nos resultados dos ensaios.

Em seguida cada corpo de prova recebeu uma camada de fita crepe na superfície lateral que ficara descoberta pela ausência do anel, visando manter a integridade da amostra e a sua liberdade de variação de volume, bem como sua identificação.

O processo de umedecimento se deu por efeito capilar e por uso do aspersor, conforme nível de dificuldade. O processo de secagem ocorreu com o auxílio da estufa, em que os corpos de prova eram deixados por alguns minutos.

O papel de filtro utilizado foi o Whatman N°42, de acordo com MARINHO (1995), com 70 mm de diâmetro e a curva de calibração de CHANDLER et al (1992).

As equações (2) e (3) foram utilizadas como curva de calibração para o papel de filtro do ensaio: Umidade do papel de filtro (w) \leq 47%: Sucção (kPa) = $10^{(4,84-0,0622w)}$ (2)

Umidade do papel de filtro (w) $>$ 47%: Sucção (kPa) = $10^{(6,05-2,48\log w)}$ (3)

O tempo de equilíbrio foi de 7 dias, conforme orientação de MARINHO (1995).

Abaixo segue o procedimento para a determinação da sucção e obtenção da curva característica da umidade do solo.

1. Os corpos de prova eram umedecidos ou ressecados até que a umidade variasse em torno de 5%, para os corpos de prova de solo sem a cal e 3% para os corpos de prova de solo com 9% de cal;
2. Pesaram-se os corpos de prova e em seguida foram adicionados os papéis de filtro, cortados em quatro, sendo um na face em contato direto com o solo (sucção matricial) e um sobre dois pedaços de tela circulares, mantendo uma distância em torno de 6 mm. Foram aplicadas várias camadas de filme de PVC, isolando o corpo de prova do contato com o ar atmosférico e apertando-se bem para manter seguro o contato com o papel de filtro;
3. Em seguida foram envolvidos individualmente em folhas de alumínio, servido de proteção contra a luminosidade e colocados em uma caixa de isopor de espessura de 30 mm;
4. Decorridos 7 dias, foram retirados os papéis de filtro rapidamente com uma pinça e pesados com precisão de 10^{-4} g;
5. Lançou-se na curva de calibração de CHANDLER et al (1992) para a determinação da sucção correspondente a uma dada umidade do papel de filtro;
6. Retornou-se à etapa 1 até que se obteve pontos suficientes para a determinação de curvas representativas das amostras;
7. Após a determinação do último ponto os corpos de prova foram mantidos na estufa por 10 dias para a determinação do peso seco.

3.3.9 Análises químicas realizadas

Foram realizados ensaios químicos de amostras de solos sem a cal e dosados com teores de 1%, 3%, 5%, 7% e 9% de cal, conforme segue lista:

- Potencial hidrogeniônico (pH) em água
- Complexo sortivo (cálcio, magnésio, potássio e sódio)
- Hidrogênio
- Alumínio
- Capacidade de troca catiônica (com pH 7,0)
- Saturação por bases, alumínio e sódio
- Fósforo assimilável

Entre a dosagem e a realização dos ensaios houve um intervalo de 80 dias, permitindo a confrontação com os outros ensaios. Utilizou-se a metodologia da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) para a realização dos ensaios.

A determinação da capacidade de troca catiônica se mostrou interessante pela relação citada por diversos autores com o potencial de expansão do solo, bem como com os efeitos da cal utilizada na estabilização.

Já o pH em água poderá ser comparado às determinações de pH utilizadas inicialmente na

dosagem de cal para se verificar algum indício de reação entre o solo e a cal.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Dosagem do solo expansivo com a cal

A Figura 2 mostra que o acréscimo de cal permitiu um aumento considerável no valor de pH, obtendo-se valores crescentes até o pico de 12,42, muito próximo de 12,4 considerado como o pH que proporciona a maior redução do potencial de expansão para o teor de cal ótimo, segundo a metodologia apresentada por EADS & GRIM (1966), TM 5-818-7, TM 5-822-14 e a ASTM D 6276.

Essa elevação de pH se deve à liberação de íons hidroxila, conforme estudos de ROGERS & GLENDINNING (2000) apud LOVATO (2004).

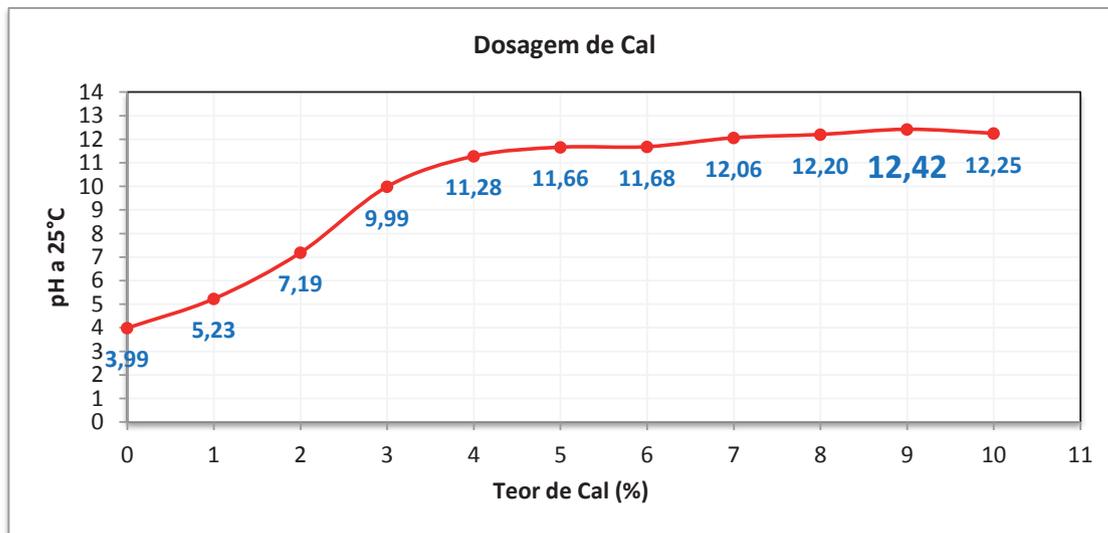


Figura 2 – pH do solo resultante das dosagens com a cal

4.2 Caracterização do solo sem a cal e com 9% de cal

As figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, as curvas granulométricas do solo sem a cal e do solo dosado com 9% de cal, com e sem defloculante. A composição granulométrica, os valores

de limites de consistência e a porcentagem de dispersão para o solo sem e com 9% de teor de cal estão apresentados na Tabela 3. Utilizando-se os dados referentes à composição granulométrica e limites de consistência, segundo o Sistema de Classificação Unificada de Solos, o solo sem a cal é classificada como MH.

Tabela 3 – Composição granulométrica, limites de consistência e percentagem de dispersão

	Solo sem cal	Solo com adição de 9% de cal
Argila (%)	52	41
Silte (%)	36	14
Areia fina (%)	7	38
Areia média (%)	3	3
Areia grossa (%)	1	2
Pedregulho (%)	1	2
Partículas < 0,002 mm (%)	52	41
Limite de Liquidez (%)	67,3	NL
Limite de Plasticidade (%)	51,9	NP
Índice de Plasticidade (%)	15,4	NP
Percentagem de Dispersão (%)	6,25	0

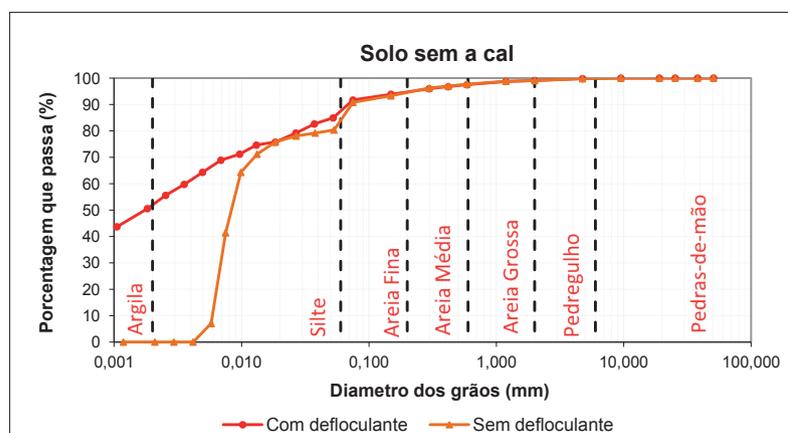


Figura 3 – Curvas granulométricas do solo sem a cal, com e sem defloculante

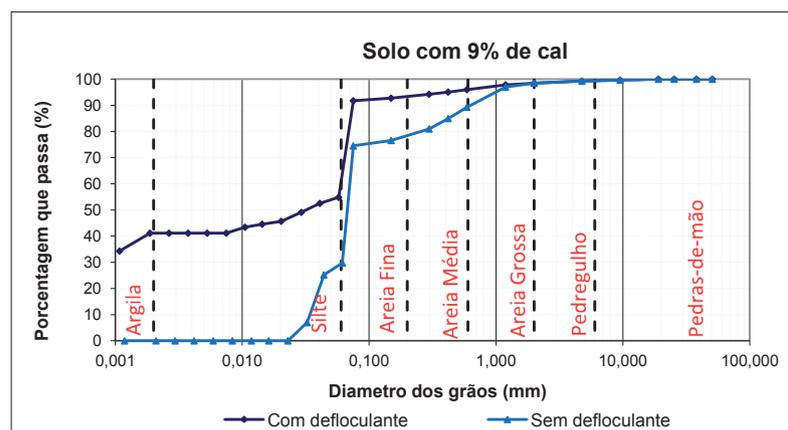


Figura 4 – Curvas granulométricas do solo com 9% de cal, com e sem defloculante

O solo sem a cal, segundo os critérios do Sistema de Classificação Unificado de Solos (ASTM, 1983 apud OLIVEIRA & BRITO, 1998), é classificado como MH.

Conforme definição da maioria das classificações de solos expansivos (CHEN, 1998) o solo

analisado possui uma característica comum a todos os solos expansivos, pois, apresenta um elevado percentual de partículas menores do que 0,002 mm (52%), conforme pode ser visto na Figura 3.

A adição de cal permitiu um aumento no percentual de partículas de textura mais grossa,

conforme se observa na Figura 4, correspondente à curva granulométrica referente ao solo com 9% de cal. Ainda na Figura 4 observa-se que ocorreu considerável desencontro nas curvas das amostras com e sem defloculante no intervalo referente à fração areia. Tal fato pode ser explicado por

fenômenos de floculação e/ou aglomeração também nessa fração em decorrência à adição de cal.

Na Tabela 4 se observa o efeito da adição de diferentes percentuais de cal ao solo na plasticidade, sendo evidentes as alterações nas características plásticas do solo.

Tabela 4 - Limites de consistência e plasticidade

Amostra	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)
9% cal	NL	NP	NP
7% cal	58,3	44,4	13,9
5% cal	58,5	45,9	12,6
3% cal	77,8	50,2	27,6
1% cal	78,4	55,4	23,0
0% cal	90,9	59,7	31,2

Através do confronto entre as composições granulométricas e os limites de consistência do solo sem a cal e com 9% de cal, conforme Tabela 3 e Figura 5, conclui-se que a cal proporcionou uma alteração considerável na textura do solo e no seu comportamento plástico. Tal fato se deve,

principalmente, à capacidade da cal em flocular e aglomerar as partículas devido ao aumento da concentração eletrolítica e redução da espessura da camada dupla difusa, visto que a cal possibilita um equilíbrio da deficiência de carga elétrica da partícula de argila.

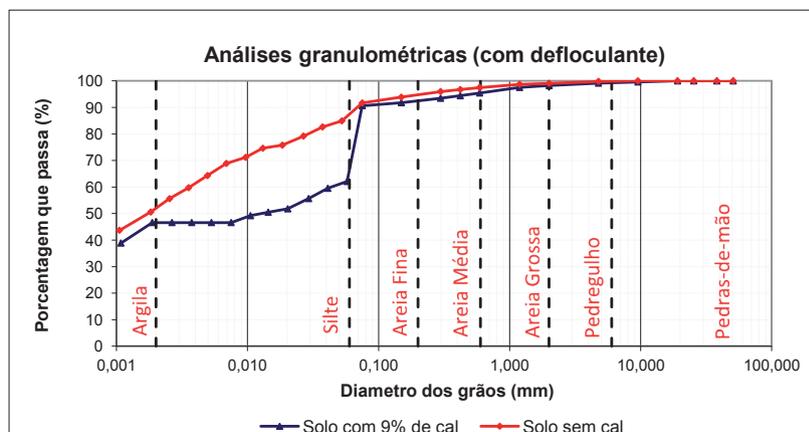


Figura 5 – Curvas granulométricas do solo natural sem a cal versus solo com 9% de cal

A cal reduz a deficiência por carga elétrica positiva das partículas do solo. Consequentemente diminui a afinidade do mineral expansivo por água e íons, levando à redução da expansão e alteração da plasticidade do solo.

Todos os autores pesquisados apontam para uma diminuição do índice de plasticidade do solo com o acréscimo de teores crescentes de cal, bem como do limite de liquidez. Conforme se observa

na Figura 6, houve redução do limite de liquidez e, na maioria das dosagens, do índice de plasticidade. Foi observado, também, redução no limite de plasticidade, em contraposição à elevação do limite de plasticidade apresentada por GOOSEN et al (2006), CASTRO (1981), CASTRO & SERAFIM LUIS (1974) e HILT & DAVIDSON (1960) apud PORTELINHA (2008).

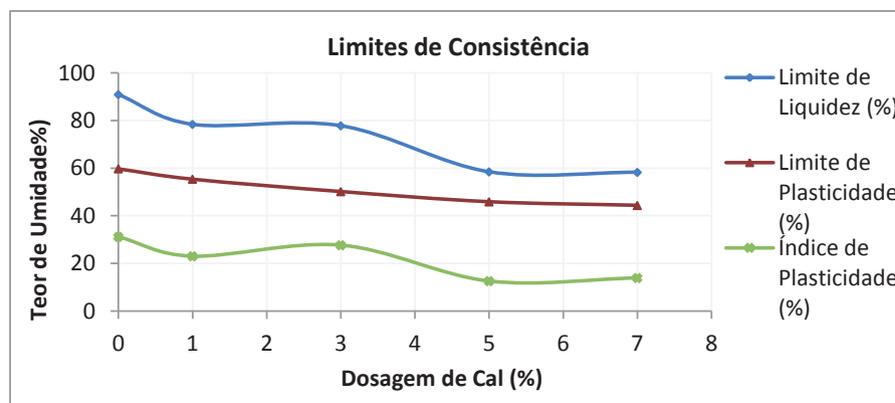


Figura 6 - Limite de plasticidade e de liquidez

4.3 Resultados dos ensaios de compactação

As curvas dos ensaios de compactação do solo sem cal e de todas as dosagens estão apresentados na Figura 7.

O intervalo de tempo entre a dosagem e ensaio de compactação foi de 80 dias. Conforme OSINUBI (1998) apud LOVATO (2004), quando decorrido um tempo considerável entre a mistura e o ensaio, através da reação de hidratação, às partículas se unem e torna-se necessário a ruptura das ligações formadas, para uma compactação satisfatória, o que pode ter ocorrido nos ensaios ilustrados na Figura 6. Com isto, para uma mesma energia de compactação, ocorreu uma diminuição da massa específica aparente seca máxima com o acréscimo de cal pela dificuldade em quebrar as

agregações. Além disso, a floculação aumenta a quantidade e o tamanho dos vazios no solo, o que implica na necessidade de mais água para a sua ocupação, contribuindo também para a diminuição da massa específica aparente seca máxima.

Na Figura 8 verifica-se uma diminuição da massa específica aparente seca máxima com teores crescentes de cal, a partir da dosagem de 1%. Na Figura 9, observa-se um comportamento geral de elevação da umidade ótima com os teores crescentes de cal, embora existam pequenas variações para menos, conseqüentes da imprecisão pertinente à própria metodologia do ensaio. A partir do teor de cal de 5%, tanto a diminuição da massa específica aparente seca quanto a elevação do teor de umidade ótimo apresentam uma variação mais acentuada.

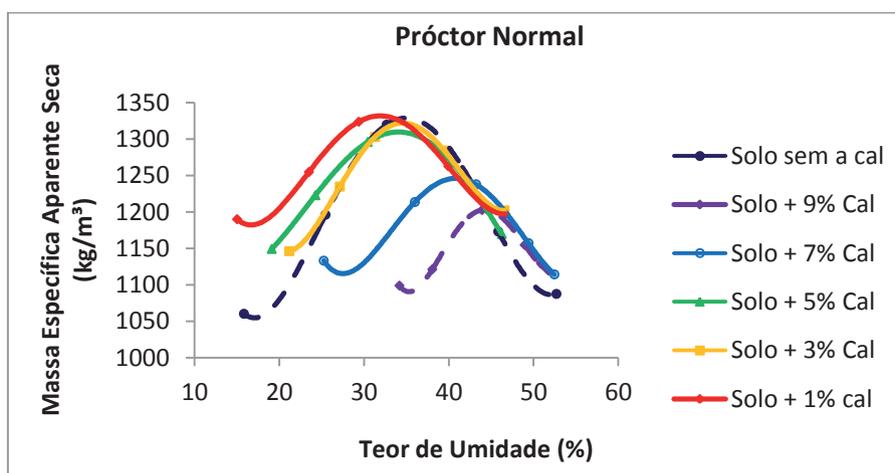


Figura 7 - Ensaio de compactação do solo sem e com adição de cal

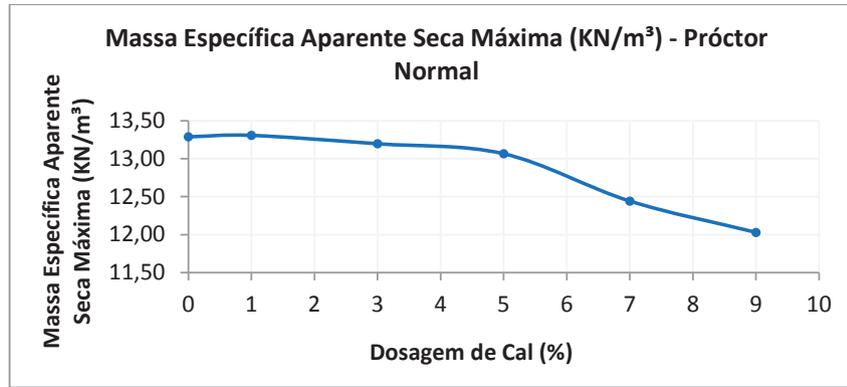


Figura 8 - Variação da massa específica aparente seca máxima com a adição de cal

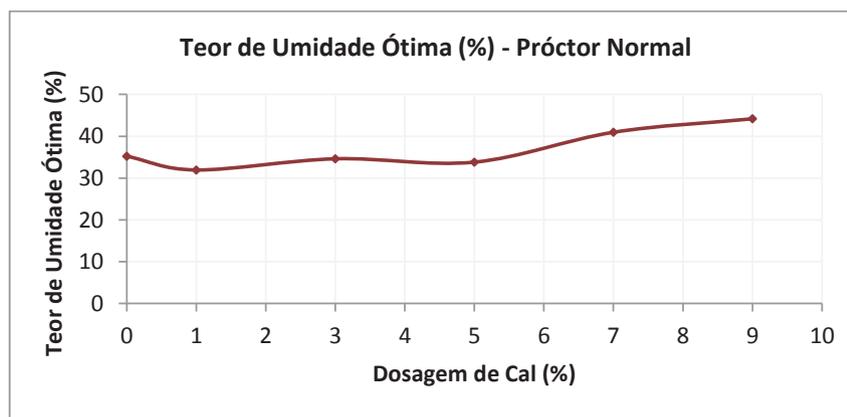


Figura 9 - Variação do teor de umidade ótima em relação ao teor de cal

4.4 Potencial de expansão e pressão de expansão

As figuras 10 e 11 apresentam os resultados dos ensaios de potencial de expansão e de pressão de expansão.

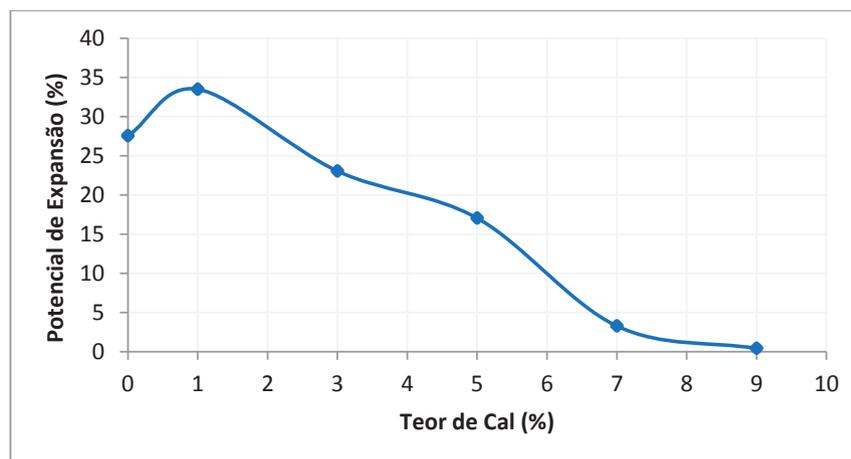


Figura 10 - Potencial de expansão relacionada à dosagem de cal

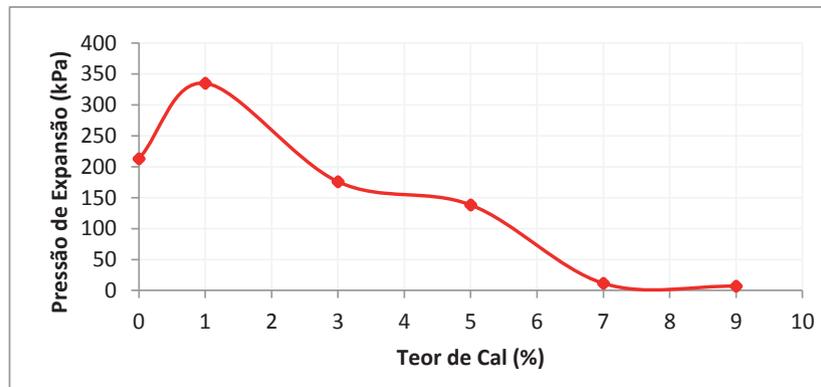


Figura 11 – Pressão de expansão para diferentes teores de cal

Para o solo sem a cal determinou-se um potencial de expansão de 27,5% e uma pressão de expansão de 213 kPa. Observou-se em relação ao solo sem a cal, a partir de 3%, uma diminuição do potencial de expansão e da pressão de expansão. Para o teor de 1% houve acréscimo tanto no potencial de expansão quanto da pressão de expansão resultando, respectivamente, 33,5% e 335 kPa. Enquanto, para o teor de 9% de cal, praticamente eliminou a expansão e reduziu a pressão de expansão para 7 kPa.

Segundo NELSON & MILLER (1992), a cal permite boa reatividade quando o pH do solo é maior do que 7, o que explica porque o solo estudado aumentou o potencial de expansão e a pressão de expansão, para o teor de 1%, visto que, conforme se observa na Figura 2, o pH é de 5,23, portanto inferior ao pH que permite boa reatividade.

Pode-se explicar a redução no potencial de expansão e na pressão de expansão para teor de cal igual ou superior a 3%, até 9%, pelos seguintes fatores:

- a) A redução na massa específica aparente seca contribui para que as partículas tenham menores forças de repulsão. Logo, a pressão de expansão resultante, considerando corpos de prova moldados com teores de umidades ótimas e as mesmas energias de compactação, sofrerá redução.
- b) A diminuição da sucção matricial contribui para que o solo tenha menos afinidade por água, o que diminui a quantidade de água disponível para equilibrar a excesso de carga elétrica negativa da superfície do mineral expansivo.

- c. A cal fornece cátions para equilibrar a superfície do argilomineral e, conseqüentemente, diminuir a espessura da camada dupla difusa, diminuindo a presença de água.
- d. A elevação do teor de umidade ótima contribui para que o solo já inicie o fenômeno de expansão a partir de um teor de umidade mais elevado, bem como com menor sucção. Logo, ele iniciará de uma condição mais expandida do que o solo sem a cal, diminuindo o potencial de expansão. Todavia, tal fato não está relacionado à diminuição da pressão de expansão, conforme apresentado por CHEN (1988).

4.5 Curva característica da umidade do solo

Os corpos de prova utilizados na determinação da curva característica foram moldados de amostras compactadas dinamicamente, tendo o ensaio de compactação sido realizado com acréscimo sucessivo de água, semelhante à curva de umedecimento na determinação da sucção. Verificou-se que o teor de umidade ótima de 44% corresponde a uma sucção matricial, na curva característica de umedecimento, de aproximadamente 10 kPa, conforme se pode observar na Figura 12.

Observa-se, na Figura 12 que a variação da sucção com a umidade do solo sem cal e com 9% de cal até 1500 kPa foi muito reduzida porque o tempo de cura do solo com 9% de cal utilizado na determinação do ponto inicial da curva característica foi de apenas 21 dias, deste modo, o solo ainda estava submetido à variação de volume. Abaixo de 1500 kPa, já com o tempo de cura de aproximadamente 40 dias a diferença de sucção entre o solo sem e com adição de cal aumentou pois o efeito da

sucção devido à ação eletrostática e à capilaridade é reduzido devido à presença da cal.

Na Figura 13 o valor da sucção do solo com 9% de cal, até aproximadamente 4000 kPa, é inferior ao do solo sem cal, isso ocorre porque a presença da cal induz a um aumento na granulometria e a uma redução no efeito de adsorção entre as partículas. Como consequência, tem-se uma redução de volume por contração no solo sem cal superior a do solo com cal. Somente a partir de 30% de umidade e 4000 kPa é que o solo passa a ter o mesmo comportamento de variação de volume por contração.

Em relação à expansão do solo, para um dado teor de umidade, uma sucção menor implica numa menor afinidade por água. Logo, estará menos sujeito a variações de umidade e, conseqüentemente, a variações de volume. Além disso, a menor sucção é resultante também da contribuição da cal na diminuição da deficiência por carga elétrica da superfície do argilomineral. Com isso, menos moléculas de água serão necessárias para alcançar o equilíbrio, o que diminui a afinidade por água do solo e a espessura da camada dupla difusa.

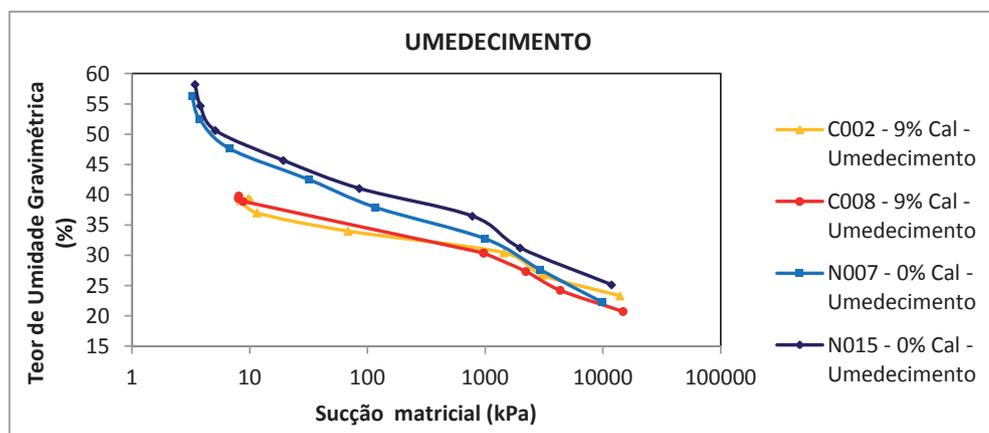


Figura 12 - Curva característica de umidade do solo com e sem adição de cal -trajetória de umedecimento

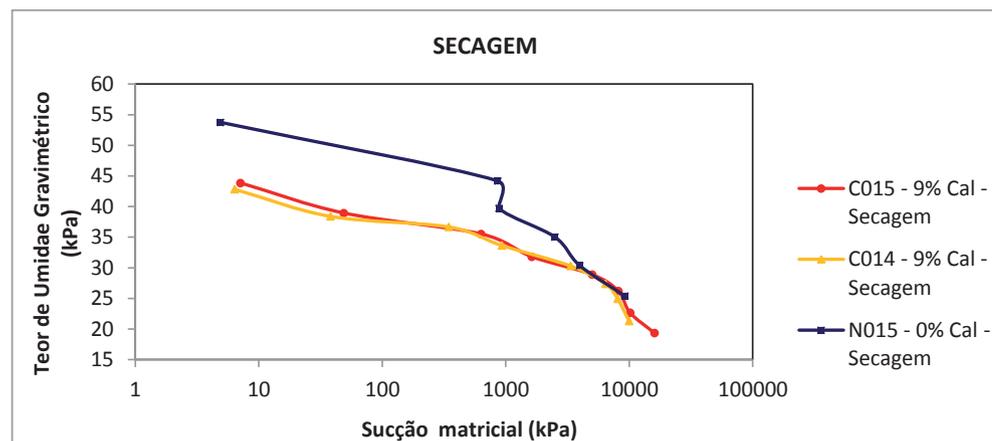


Figura 13 - Curva característica de umidade do solo com e sem adição de cal - trajetória de secagem

4.6 Ensaios químicos

A Tabela 5 apresenta os resultados da caracterização química do solo argiloso estudado, com e sem adição de cal.

Tabela 5 – Ensaio químicos

Teor de cal	(%)	0	1	3	5	7	9
pH em água		3,9	4,7	8,2	10,5	11,2	11,3
Complexo sortivo	(cmol(+)/kg)						
Cálcio		1,11	24,28	52,61	51,6	41,48	40,78
Magnésio		79,83	26,91	1,01	1,01	1,01	0,71
Potássio		0,31	0,26	0,25	0,20	0,20	0,20
Sódio		1,13	1,20	1,85	2,31	2,47	2,39
Soma de bases(SB)		82,38	52,66	55,72	55,13	45,17	44,08
Hidrogênio		7,25	1,26	0,00	0,00	0,00	0,00
Alumínio		30,26	11,17	0,00	0,00	0,00	0,00
CTC a pH 7,0		119,89	65,09	55,72	55,13	45,17	44,08
Saturação por bases (V)	(%)	69,00	81,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Saturação por Alumínio	(%)	26,86	17,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Saturação por Sódio	(%)	0,94	1,84	3,32	4,19	5,47	5,42
Fósforo assimilável (Mehlich)	mg/kg	131	81	164	131	3	1

A redução do pH para cada teor de cal pode ser explicado pelo processo de reação da cal com o solo, o que requer um tempo para que isto ocorra.

Os resultados do pH apresentados na Figura 14 indicam esta redução, chegando a ser da ordem de 10%.

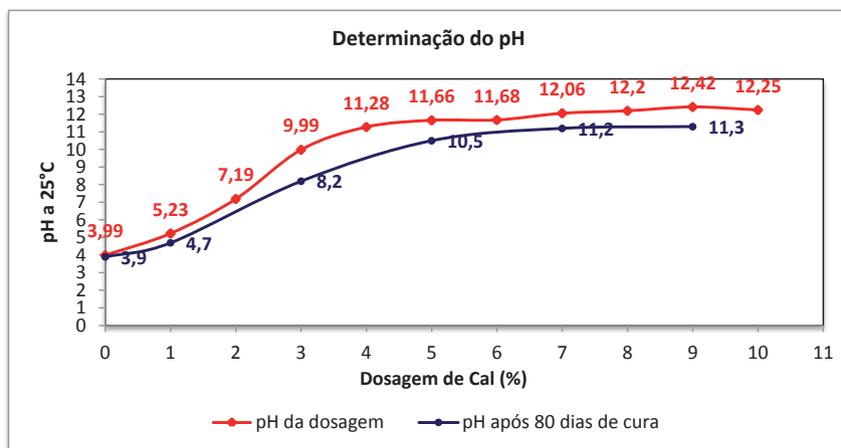


Figura 14 – pH após dosagem e pH após 80 dias de cura

A capacidade de troca catiônica está relacionada à estabilidade do argilomineral. Conforme pode ser observado na Figura 15, ela decresce com o aumento do teor de cal até 9%, resultando na menor capacidade de troca catiônica, coincidindo com o percentual que resultou em menores valores de potencial de expansão e de pressão de expansão.

Por ter maior afinidade com o argilomineral, os íons Ca^{2+} substituem outros íons, como o Na^{+} e o K^{+} , de acordo com a carga elétrica negativa da superfície do argilomineral. O aumento da densidade dos íons diminui a capacidade de troca catiônica, reduzindo o potencial de mudança de volume.

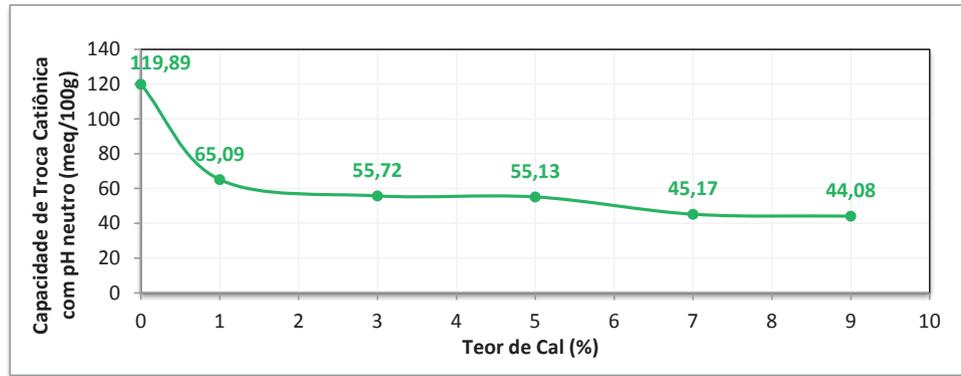


Figura 15 – Capacidade de troca catiônica

5 CONCLUSÕES

A adição de cal reduz a deficiência de carga elétrica do argilomineral, portanto, induz a uma diminuição da afinidade do solo por água, contribuindo, dessa maneira, para a redução do potencial de expansão e da pressão de expansão.

Devido a fenômenos de floculação uma parcela do material se tornou de textura mais grossa, o que diminui também a sucção, bem como a área específica disponível para umedecimento.

A redução da sucção matricial conseqüente do aumento do teor de umidade implica numa menor força de aproximação entre as partículas e no aumento de volume do solo, reduzindo, conseqüentemente, a massa específica aparente seca. Tal fato influi diretamente na diminuição do potencial de expansão e na pressão de expansão, pois, o teor de umidade inicial aumenta.

O aumento do teor de umidade ótima devido à adição de cal provocou um acréscimo no teor de umidade inicial diminuindo a variação de volume. Embora tenha ocorrido diminuição da pressão de expansão, ela não pode ser explicada pelo mesmo motivo, visto que a massa específica aparente seca é quem influi mais diretamente no comportamento.

A diminuição da capacidade de troca catiônica torna o material ensaiado menos sujeito a variações de volume, visto que o íon de cálcio é menos substituível do que íon de sódio ou potássio.

Ocorreu uma diminuição do índice de plasticidade e do limite de liquidez, indicando uma relação com o potencial de expansão do solo, conforme constatado, também, por CHEN (1988).

Os resultados do potencial de expansão e pressão de expansão para o teor de 1% de cal contrariaram a expectativa pois aumentaram em relação ao solo sem a cal, podendo tal fato ser explicado porque o solo só apresenta boa reatividade quando o pH é maior do que 7 (NELSON & MILLER, 1992).

Embora o teor de 9% de cal tenha praticamente eliminado o potencial de expansão e a pressão de expansão, não necessariamente ele deverá ser utilizado em obras de terraplenagem e pavimentação. A depender da tolerância prevista em projetos teores menores de cal também poderão ser utilizados.

Pode ter ocorrido diminuição da precisão dos resultados devido à não padronização dos tempos de cura, o que dificultou a confrontação de resultados.

Houve confirmação da metodologia de EADS & GRIM (1966) para a determinação do teor ótimo de cal.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. B., 2003. Mapeamento Geológico da Região do Engenho Sibiró - Porto de Galinhas (Litoral Sul, PE): Contribuição à Estratigrafia e à Tectônica da Sub-bacia de Pernambuco. Relatório de CHEN, F. H., 1988. Foundation on Expansive Soils, New York: Elsevier, 463 p.

DEPARTMENTS OF THE ARMY USA. TM 5-818-7: Foundations in Expansive Soils. Washington, 1983.

- DEPARTMENTS OF THE ARMY USA. TM 5-822-14/AFMAN: Soil stabilization for pavements. Washington, 1994.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H., 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils, New York: John Wiley & Sons, 517 p.
- FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO. Estudo de impacto ambiental da Refinaria do Nordeste - Abreu e Lima. Pernambuco, 2006.
- GOOSEN, F. A. Mattheus; AL-RAWAS, A. A., 2006. Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment, London: Taylor & Francis Group, 544 p.
- GUSMÃO, Alexandre Duarte (Org.). Geotecnia no Nordeste. 2. ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2005.
- LOVATO, R. S., 2004. Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 144 p.
- MARINHO, F. A. M., 1995. A técnica do papel de filtro para medição de sucção. Encontro sobre Solos Não Saturados. Rio Grande do Sul, 18 a 20 de outubro de 1995.
- NELSON, J. D. & MILLER, D. J. Expansive soils, New York: John Wiley & Sons, Inc, 1992.
- NG, Charles W. W.; MENZIES, Bruce., 2007. Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering, New York: Taylor & Francis Group, 687 p.
- OLIVEIRA, Antonio Manoel dos Santos (Edit.). Geologia de Engenharia. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.
- PORTELINHA, F. H. M., 2008. Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal de Viçosa, 161 p.
- SILVA, O. S., 2012. Estudo de propriedades geotécnicas de um solo argiloso, potencialmente expansivo, compactado com e sem adição de cal. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal de Viçosa, 167 p.
- SOTO, M. A. A., 2004. Comparação entre os métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados. Tese (Doutorado) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 233 p.

TELEVISAMENTO DE FUROS DE SONDAGENS NOS ESTUDOS DO METRÔ DE SÃO PAULO – PROPOSTA METODOLÓGICA PARA EXECUÇÃO E ANÁLISE

DANIELA GARROUX GONÇALVES DE OLIVEIRA
MARCELO DENSER MONTEIRO
FABRÍCIA MASSONI
HUGO CÁSSIO ROCHA

Geólogos da Companhia do Metropolitano de São Paulo (METRÔ)
Rua Augusta, 1626 Cerqueira César, São Paulo-SP. CEP: 01304-902. Tel. 11 3371 7244
E-mail: dggoliveira@metrosp.com.br; mdmonteiro@metrosp.com.br;
hcrocha@metrosp.com.br; fmassoni@metrosp.com.br.

RESUMO ABSTRACT

A caracterização geológico-geotécnica de maciços rochosos é fundamental para identificação de condicionantes geológicos associados à estabilidade de escavações e estruturas subterrâneas. Feições como planos de foliação, dobras, falhas e sistemas de fraturas, merecem atenção especial por estarem associados a pontos de fraqueza do maciço. Em muitos locais, as condições geológicas, geomorfológicas e de ocupação urbana dificultam a exposição e identificação destas feições em superfície. Neste contexto, o meio técnico desenvolveu novas técnicas para facilitar o acesso às feições supracitadas. Dentre estas, encontra-se o televisamento de sondagens, que consiste na obtenção de imagens 360° das paredes dos furos de sondagem, fornecendo o que pode ser considerado um testemunho de sondagem virtual.

Esta técnica tem crescente aplicação em estudos e investigações de grandes obras de infraestrutura. Todavia, não há no Brasil um instrumento que oriente e padronize a realização destes serviços, assim como uma sistemática na interpretação dos dados.

É proposta uma metodologia para a descrição destes testemunhos virtuais, tendo como base os métodos sugeridos para a descrição quantitativa de discontinuidades em maciços rochosos da ISRM (1978). Sugerem-se também adaptações de alguns parâmetros de caracterização e classificação geológico-geotécnica, como o grau de fraturamento e o RQD, para testemunhos virtuais obtidos no televisamento.

APPLICATION OF THE OPTICAL TELEVIEWER IN THE STUDIES OF THE SÃO PAULO METRO AND PROPOSED METHODOLOGY IN ITS EXECUTION AND ANALYSIS

The geological and geotechnical characterization of rock masses is critical to identify geological conditions associated to stability of excavations and underground structures. Features such as plans foliation, folds, faults and fractures systems deserve special attention because they are associated with weakness points of the massif. In many places, geological, geomorphological and urban occupation conditions hinder exposure and identification of these features on the surface. In this context, professionals and researchers developed new technologies to facilitate access to the features mentioned above. Among these innovations is the optical televiewer, which consists in obtaining 360° images of the borehole walls, providing what could be considered a virtual log.

This technique has growing application in studies and investigations of major infrastructure works, however, in Brazil there isn't a tool to guide and standardize the performance of these services, as neither as a systematic interpretation of data.

A methodology is proposed for the description of these virtual logs, based on the suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses of ISRM (1978). It is also suggested adaptations of some characterizing and classifying geological and

Ressalta-se que os serviços de televisamento possuem caráter complementar aos serviços de sondagens, já há muito tempo utilizados como base de investigação direta do subsolo, não podendo ser considerados uma substituição deste método tradicional, que permite, além da obtenção de informações relevantes por meio da análise macroscópica do material, a coleta de amostras para ensaios geotécnicos e demais análises.

Palavras-Chave - Televisamento, Perfilagem Ótica, Descrição e Caracterização de Maciços Rochosos, Metrô de São Paulo.

1 INTRODUÇÃO

O que certamente se trata de uma inovação no meio técnico, contando, atualmente, com aproximadamente sete empresas que fornecem este serviço no país, o televisamento de furos de sondagem requer uma atenção especial para que seja aproveitado ao máximo, obtendo-se todas as informações possíveis para melhor caracterizar e classificar um maciço rochoso, contribuindo com a caracterização feita em testemunhos de sondagens.

Considerando que já existe um documento contendo uma sugestão de método para a descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos (ISRM, 1978), optou-se por seguir as mesmas sugestões dos parâmetros aí descritos, adaptando-o para o televisamento de furos de sondagens.

Este documento, ISRM (*op.cit.*), já admite o uso de câmeras para a determinação de características de descontinuidades, inclusive recomendando a aplicação de equipamentos de filmagem para identificação e avaliação da abertura destas, parâmetro que influenciará nas tensões cisalhantes, normais e na condutividade hidráulica do maciço rochoso.

O propósito deste estudo é atingir um mínimo grau de padronização na caracterização e classificação de descontinuidades em um maciço rochoso, além da rocha intacta propriamente dita, a partir de imagens das paredes de furos de sondagem, prevendo a necessidade de um período experimental, com a intenção de revisões ao longo do tempo.

geotechnical parameters, as the degree of fracturing and theoretical RQD to core samples.

It is noteworthy that the optical televiewer services should be considered as a complementary service to drill holes, which has been long used as a basis for direct investigation of the subsurface, not being considered a replacement of the traditional method, which allows, in addition, to obtain relevant information through macroscopic analysis of the material, collection of samples for geotechnical testing, besides other analyzes.

Keywords - Optical Televiewer, Rock Massif Characterization, São Paulo Subway

2 EQUIPAMENTO E AQUISIÇÃO DE IMAGENS

O equipamento de televisamento consiste, simplificada, em uma sonda de aço com uma câmera em sua parte interna, ligada a um cabo especial que, além de sustentar a sonda, envia as imagens adquiridas a uma central acoplada a um computador. Esta sonda é também equipada com um sistema de magnetômetros e acelerômetros tri-ortogonais, que possibilitam obter uma imagem espacialmente orientada da parede dos furos, além de um sistema de controle de profundidade.

Na aquisição das imagens é necessário que o furo esteja devidamente limpo para que a filmagem seja executada em condições adequadas.

Para a obtenção dos dados é utilizado um software de aquisição ligado diretamente à câmera. As imagens e dados obtidos são, posteriormente, exportados para outro software que permite o tratamento das informações obtidas. Na fase de interpretação, as descontinuidades podem ser identificadas e caracterizadas, obtendo-se suas respectivas atitudes, além de outros parâmetros, sendo possível elaborar estereogramas dos polos e dos planos estruturais, bem como análises estatísticas.

Durante a aquisição, ou durante o processamento, é possível incluir a declinação magnética. Entretanto, na prática, para evitar supostos erros de programas (*bugs*), recomenda-se a aquisição das imagens considerando-se o norte magnético, incluindo a correção da declinação magnética apenas em fase posterior.

3 CARACTERIZAÇÃO DO TESTEMUNHO VIRTUAL

Considerando que um maciço rochoso, do ponto de vista da engenharia, é um conjunto de blocos de rocha intacta delimitados por descontinuidades, é essencial que sejam descritos tanto a rocha intacta como as descontinuidades que a delimita, assim como no aplicado em testemunhos de sondagem. Sendo assim, sugere-se a divisão das descrições e interpretações em duas partes distintas, conforme apresentado nos itens a seguir.

3.1 Rocha intacta

Os parâmetros sugeridos para a descrição da rocha intacta, possíveis de serem observados nas imagens de televisamento e de interesse para projetos de engenharia, são: a descrição dos litotipos, sua estrutura, textura e composição mineralógica, além do seu grau de alteração.

Propõe-se a divisão do testemunho virtual em zonas sempre que houver mudanças em um destes parâmetros, principalmente definindo intervalos com graus de alteração distintos e delimitando domínios estruturais e litológicos diferentes.

Sugere-se a elaboração de um perfil de sondagem virtual, assim como já é tradicionalmente realizado para demais testemunhos de sondagens. A figura 1 apresenta uma sugestão para este perfil virtual, tendo como base o modelo já utilizado para os perfis individuais de sondagem executados para a Companhia do Metropolitano de São Paulo. Neste perfil individual de furo televisado deverão ser indicadas todas as características que descrevem a rocha, inserindo-se parâmetros que serão descritos detalhadamente nos próximos itens.

Na caracterização da rocha intacta é extremamente essencial descrever os aspectos do corpo rochoso como um todo. Inclui-se aí as estruturas ditas penetrativas, que não interrompem, necessariamente, a continuidade física do meio rochoso, como a foliação, xistosidade, bandamento, acamamento, dobramentos, veios, etc. Estas estruturas devem ser devidamente caracterizadas, pois são de suma importância na definição do modelo geológico estrutural do maciço, diversas vezes indicando aspectos que influenciarão em seu comportamento geomecânico. Ademais, muitas

destas estruturas estão frequentemente associadas a planos descontínuos, por exemplo, um sistema de fraturas com planos paralelos à foliação da rocha.

Por tantas vezes esta distinção entre descontinuidades e feições penetrativas não é tão evidente, o que aumenta a importância da insistência em uma descrição detalhada de todas as feições observadas no maciço. Ressalta-se a importância de se demarcar a foliação ao longo de toda a imagem do furo de sondagem, verificando se há quaisquer mudanças relevantes na sua orientação, o que poderia fornecer indícios de alterações no padrão geológico-estrutural, indicando, por exemplo, a proximidade de uma zona de cisalhamento.

As figuras 2 e 3 ilustram alguns aspectos estruturais penetrativos, observados em imagens da rocha gnáissica do embasamento cristalino da Bacia de São Paulo, obtidas em televisamento de furos de sondagem ao longo de diversos projetos das linhas do Metrô.

Com relação ao estado de alteração da rocha, apenas será possível uma caracterização limitada, feita visualmente. Na prática poderão ser notadas variações no brilho e na coloração dos minerais, indicando uma maior alteração da rocha com relação aos trechos de rocha sã, exemplo figura 4. Na descrição deste parâmetro em testemunhos de sondagens, além das variações nas características dos minerais que compõem a rocha, também é avaliada a sua resistência mecânica, como, quebra com dificuldade ao golpe do martelo, ou, quebra com facilidade sob pressão dos dedos.

Nas filmagens, pode-se observar a “rugosidade” das paredes, que seria, indiretamente, a avaliação da resistência mecânica, considerando que a perfuração do furo pela sondagem mecanizada implicaria em um desgaste nestas paredes, sendo mais evidente este desgaste quanto mais alterada for a rocha. Exemplo disso pode ser observado na figura 5, onde as paredes dos furos refletem o desgaste maior da rocha devido ao seu estado de alteração.

Para a caracterização de tais intervalos alterados sugere-se o uso da tabela adaptada de IPT (1984, *apud* Serra Junior & Ojima, 1998) (Tabela 1).

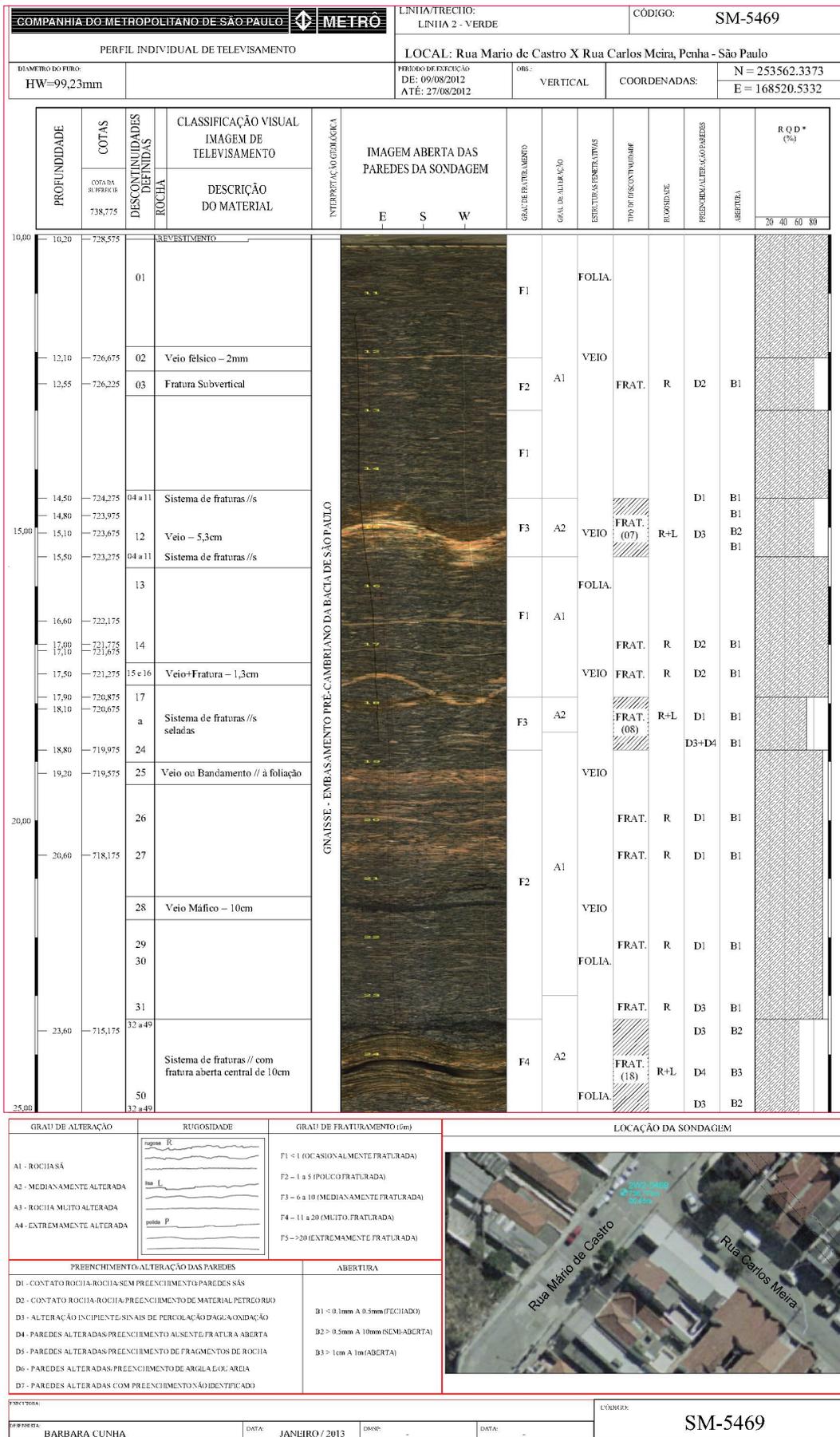
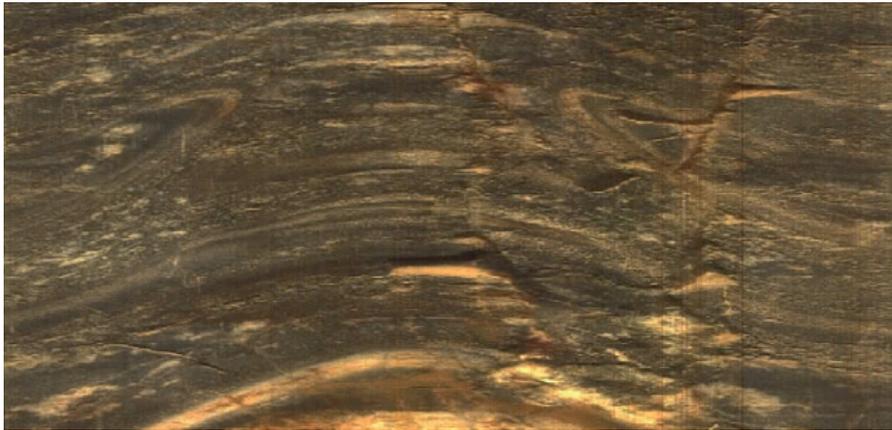
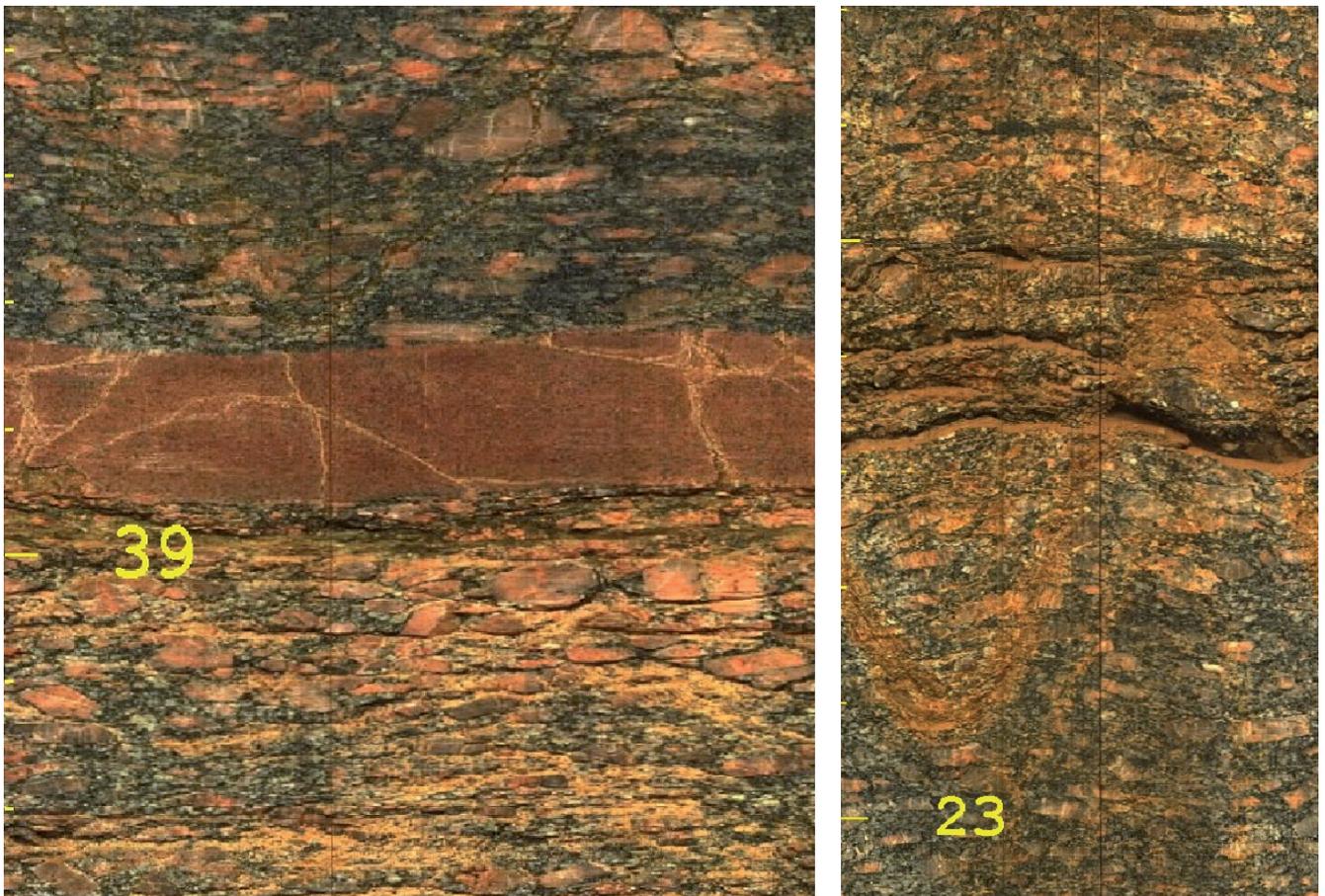


Figura 1 - Sugestão de modelo para perfil individual de televisamento (PIT).

Tabela 1 – Graus de alteração (adaptado de IPT, 1984, apud Serra Junior & Ojima, 1998).

SIGLAS	DENOMINAÇÕES	CARACTERÍSTICAS DA ROCHA
A1	Rocha sã ou praticamente sã	Apresenta minerais sem vestígios de alteração ou minerais ligeiramente descoloridos. Minerais com brilho.
A2	Rocha medianamente alterada	Apresenta minerais com menor brilho e a rocha é bastante descolorida.
A3	Rocha muito alterada	Apresenta minerais sem brilho, rocha intensamente descolorida.
A4	Rocha extremamente alterada	Apresenta minerais totalmente sem brilho e a rocha é intensamente descolorida, aspecto de solo.

**Figura 2** – Dobras intrafoliais centimétricas.**Figura 3** – Dobra de arrasto com trecho cisalhado e cominuído. Fonte: Metrô-SP.



Figuras 4 e 5 - Diferenças no aspecto de trechos menos e mais alterados (acima e abaixo do veio, na figura 4 e abaixo e acima do veio na figura 5). Fonte: Metrô-SP.

3.2 Descontinuidades

Sob a designação descontinuidade engloba-se qualquer feição geológica que interrompa a continuidade física de um dado meio rochoso, como as superfícies de fraturas, falhas, etc. Em termos práticos, pode-se designar por descontinuidade qualquer superfície natural em que a resistência à tração é nula, ou muito baixa (ISRM, *op.cit.*).

O televisamento fornece a imagem do testemunho virtual “enrolado” (imagem da superfície cilíndrica das paredes dos furos de sondagem e perfurações) e “desenrolado” (analogamente, imagem da superfície cilíndrica aberta das paredes dos furos de sondagem e perfurações). Nas imagens da superfície cilíndrica aberta das paredes dos furos é possível delimitar as descontinuidades, pois estas, dependendo do mergulho da estrutura analisada, formam curvas senoidais, passíveis de serem definidas digitalmente a partir de três pontos demarcados sobre a imagem, definindo, automaticamente, uma linha, conforme

observado na figura 6, à qual corresponde a uma descontinuidade espacialmente posicionada, com sua respectiva atitude.

É certo que esta ferramenta, ao fornecer orientações destas descontinuidades e suas respectivas profundidades, já reflete uma grande vantagem no uso deste equipamento, sendo de grande utilidade na análise estrutural do maciço rochoso. Porém, a análise e interpretação destas feições podem prosseguir e fornecer mais informações relevantes do maciço rochoso.

Tendo como base os métodos sugeridos da ISRM, os demais parâmetros das descontinuidades devem ser descritos, como o tipo de estrutura (além daquelas intrínsecas à matriz rochosa e já descritas no item rocha intacta), espaçamento (definido a posteriori, após a definição das famílias de descontinuidades), rugosidade, abertura, preenchimento, alteração das paredes e percolação d’água, observados de forma indireta, já que, de modo geral, muitos destes aspectos estão nas superfícies das paredes das descontinuidades.

Outras informações de caracterização e até mesmo classificação das descontinuidades no maciço rochoso podem ser determinados, como o grau de

fraturamento e o RQD teórico, através de diversas correlações estabelecidas por distintos autores, conforme apresentado mais adiante.



Figura 6 – Exemplo de fratura delimitada digitalmente, com uma linha vermelha (imagem “enrolada” à esquerda e “desenrolada” à direita), após análise utilizando software de televisamento RGLDIP da câmera OPTV, da *Robertson Geologing*. E exemplo de descontinuidade rugosa, citado no item *RUGOSIDADE*. Fonte: Metrô-SP.

Todos os parâmetros devem ser descritos e anexados como informações tanto no perfil individual de televisamento (PIT, Figura 1) como em uma tabela de dados (Ex.: Tabela 2), que complementar as informações inseridas neste perfil. Cada descontinuidade deverá ser enumerada na fase de processamento de dados, incluindo-se como uma das informações presentes no perfil de sondagem. A tabela 2, então, complementar este perfil com informações sobre a atitude de cada estrutura, além de fornecer informações sobre a distribuição do espaçamento para cada família de descontinuidade. Para isso, sugere-se utilizar a

tabela 2 somente para os tipos de estruturas não penetrativas, as descontinuidades como fraturas e falhas, por exemplo, que será feito observando as imagens geradas no televisamento. As estruturas ditas penetrativas, como foliação, bandamento, veios, acamamento e xistosidade deverão ser indicadas e tratadas separadamente.

Após a definição das estruturas descontínuas, estas feições podem ser separadas por *sets* de famílias, que devem ser pré-definidas em fase anterior à da elaboração da tabela 2, utilizando estereogramas de concentração de polos, caso necessário.

Tabela 2 – Exemplo de tabela com parâmetros complementares de atitude e distribuição de espaçamento, como informações complementares do perfil individual de televisamento.

NÚMERO	PROFUNDIDADE	ESPAÇAMENTO (m)	ATTITUDE	FAMÍLIA	TIPO DE ESTRUTURA	OBSERVAÇÕES
01	22,50	0	210/40	F1	Fratura	
04	24,20	1,70	215/50	F1	Fratura	Percolação d'água
07	26,75	2,55	209/45	F1	Fratura	Presença de argila
09	28,30	1,55	213/38	F1	Fratura	Paralela a veio de 3cm
12	32,50	4,20	210/50	F1	Fratura	Sistema de 6 fraturas paralelas
13	32,58	0,08	210/48	F1	Fratura	
14	32,65	0,07	215/45	F1	Fratura	
15	32,80	0,15	220/40	F1	Fratura	
16	32,85	0,05	212/50	F1	Fratura	
17	32,95	0,10	218/45	F1	Fratura	
02	23,45	0	140/70	F2	Fratura	
08	27,90	4,45	138/64	F2	Falha	Possível deslocamento milimétrico, prov. falha normal.
09	29,45	1,55	150/75	F2	Fratura	
03	23,85	0	85/75	F3	Fratura	
05	24,85	1,00	78/80	F3	Fratura	
06	25,30	0,45	80/70	F3	Falha	Deslocamento de 2 cm
10	30,25	4,95	72/80	F3	Fratura	
11	31,20	0,95	80/75	F3	Fratura	
18	33,80	2,60	84/78	F3	Fratura	

Tipo de estrutura

É de suma importância classificar o melhor possível os tipos de estruturas observados, principalmente buscando separar fraturas de demais estruturas como foliação, bandamento, falha, zona de cisalhamento, veios, dobras, acamamento e contato litológico, conforme já mencionado anteriormente, diferenciando as estruturas penetrativas das discontinuidades propriamente ditas. Esta delimitação de estruturas deverá estar

especificada tanto no perfil individual de furo televisado (PIT, figura 1) como na tabela com informações complementares (Tabela 2).

Algumas vezes mais de um tipo de estrutura ocorre em um mesmo trecho e isto deverá ser mencionado, como, por exemplo, o caso de fraturas dentro de um veio (Figura 7). Este veio, devido ao seu comportamento reológico distinto da rocha matriz, evidencia uma maior competência e um comportamento mais rúptil, eventualmente apresentando maior número de fraturas visíveis,

inclusive com distribuição das atitudes de famílias diferente daquelas da encaixante. Portanto, delimitar todos esses casos é essencial para compreender as mudanças na qualidade do corpo rochoso.

O software permite a definição de camadas, inclusive fornecendo a espessura real desta. Isto deverá ser utilizado para a definição de estruturas e demais feições que impliquem na necessidade de definição de espessura (Ex.: abertura e preenchimento).

Toda a ocorrência de planos de falha e cisalhamento deve ser detalhadamente caracterizada, devido a sua importância na estabilidade do maciço rochoso e sua influência nos projetos de obras de engenharia, especialmente obras subterrâneas, barragens e taludes. Sempre que possível de ser observado, indicar os rejeitos aparentes, como o exemplo da figura 8, ilustrando uma falha de componente normal e rejeito aparente de 12 cm.



Figura 7 - Veio de 20 cm de espessura com fraturas que não se propagam para a rocha adjacente, evidência de comportamento geomecânico distinto entre os materiais. Fonte: Metrô-SP.

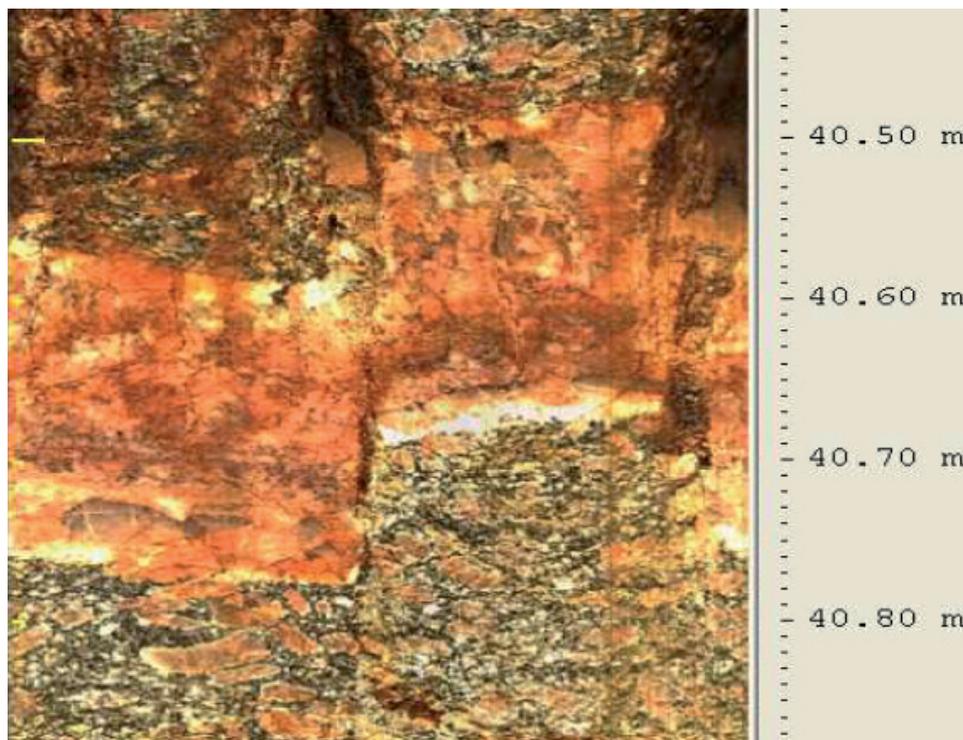


Figura 8 - Falha com componente normal e rejeito aparente aproximado de 12 cm. Fonte: Metrô-SP.

Rugosidade

A rugosidade de discontinuidades é um importante componente na resistência ao cisalhamento, especialmente no caso onde há contato parede-parede. Em termos gerais a rugosidade é caracterizada em termos de irregularidades (também definida como a rugosidade em si) e

ondulações. Na prática a ondulação afetará a direção inicial de deslizamento sobre um plano, enquanto que as rugosidades afetarão a resistência ao cisalhamento. A diferença principal está na escala de amostragem, conforme pode ser compreendido com maiores detalhes em ISRM (*op.cit.*). Na figura 9 ilustra-se um exemplo de discontinuidade rugosa filmada em um televisamento.

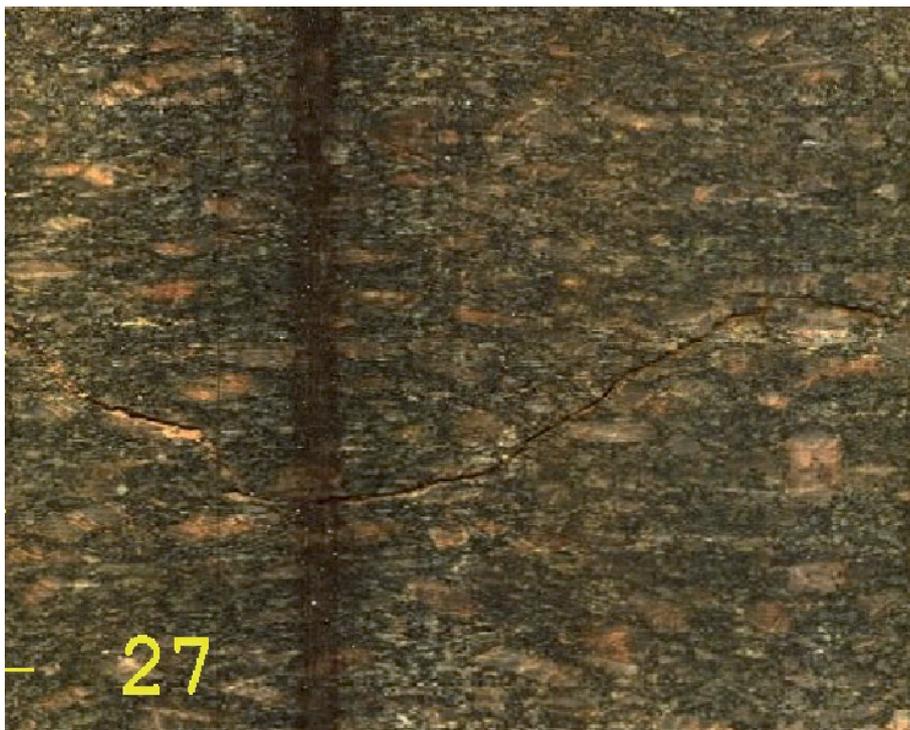


Figura 9 - Exemplo de fratura evidentemente rugosa e/ou irregular. Fonte: Metrô-SP

No caso de imagens de televisamento os diâmetros dos furos filmados com maior frequência são de 7,5 e 9,92 cm (NW e HW, respectivamente). Portanto, é possível definir as irregularidades ou rugosidades deste plano.

Segundo ISRM (*op.cit.*) a medição de irregularidades em apenas 2% do comprimento total de determinado plano é suficiente para estimar sua rugosidade média. Considerando estes 2% como sendo aquele obtido nas imagens de televisamento, poderia se extrapolar a rugosidade para planos de aproximadamente 3,75 e 4,96 metros (para diâmetros NW e HW, respectivamente).

Um dos métodos de se avaliar a rugosidade em um plano, conforme sugerido por ISRM (*op.cit.*) é a comparação do perfil de rugosidade usando uma linha reta como referência (Figura 10). No caso do televisamento considera-se como referência

a linha traçada automaticamente quando clicados os três pontos que definem o plano da discontinuidade no espaço (Ex.: Figuras 6 e 11).

Na prática, ao serem marcados os traços de discontinuidades no testemunho virtual, quanto mais esta linha fica inserida no traço da discontinuidade na imagem, menos rugosa esta seria e vice-versa.

Outra forma para se quantificar a rugosidade em imagens de televisamento, seria identificar o seu perfil geométrico, enquadrando-o entre as opções apresentadas na figura 13, adaptada dos perfis de rugosidade de Barton *et al.*(1974), apresentado na figura 12. Nos casos de testemunhos, tanto virtuais como os reais, só é possível observar a rugosidade em uma escala de detalhe, diferente do que ocorre na descrição deste mesmo parâmetro em paredes rochosas (denominada também

ondulação). A figura 12 foi modificada separando os perfis de menor detalhe, inicialmente divididos em recortada, ondulada e plana, juntando com os de maior detalhe, sendo possível a caracterização das descontinuidades apenas em rugosa, lisa ou

polida. O termo polida só deverá ser utilizado em casos aonde haja uma evidência clara de deslocamento em cisalhamento, segundo o definido em ISRM (*op.cit.*).

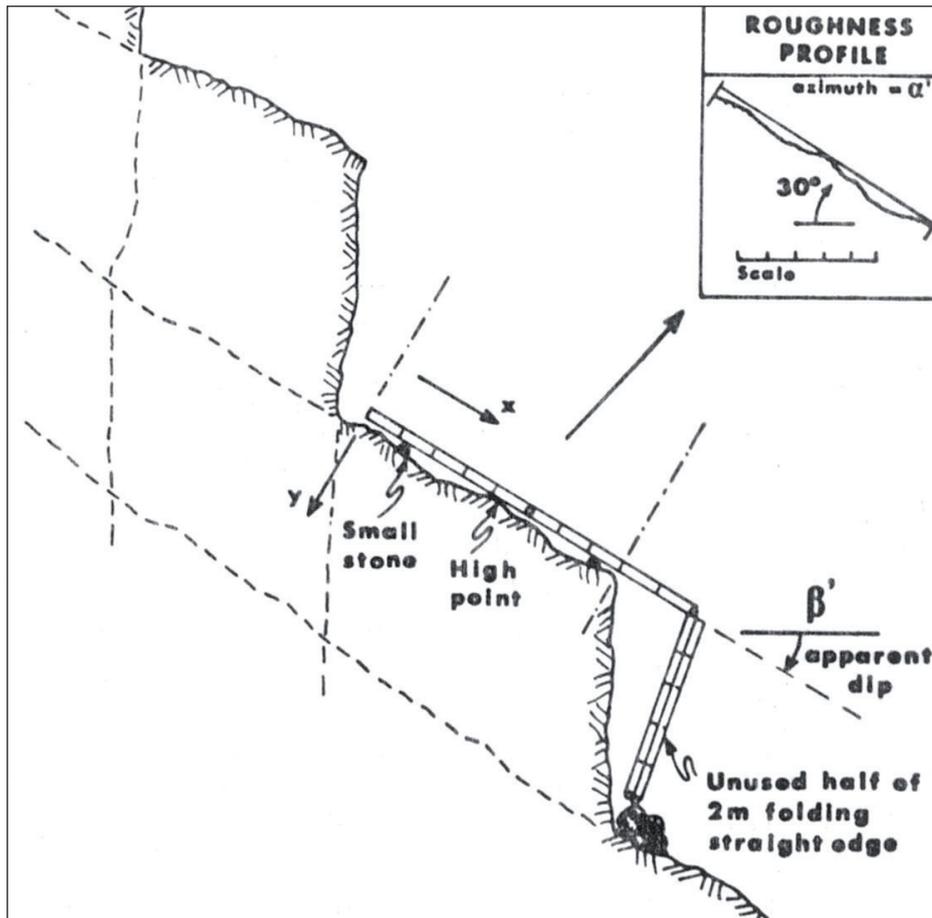


Figura 10 – Proposta de ISRM (1978) para identificação de ondulações e rugosidades em planos de descontinuidades.



Figura 11 – Exemplo de plano de fratura lisa. Notar que é quase imperceptível a visualização da fratura devido ao “encaixe” quase perfeito com a linha de referência em vermelho. Fonte: Metrô-SP.

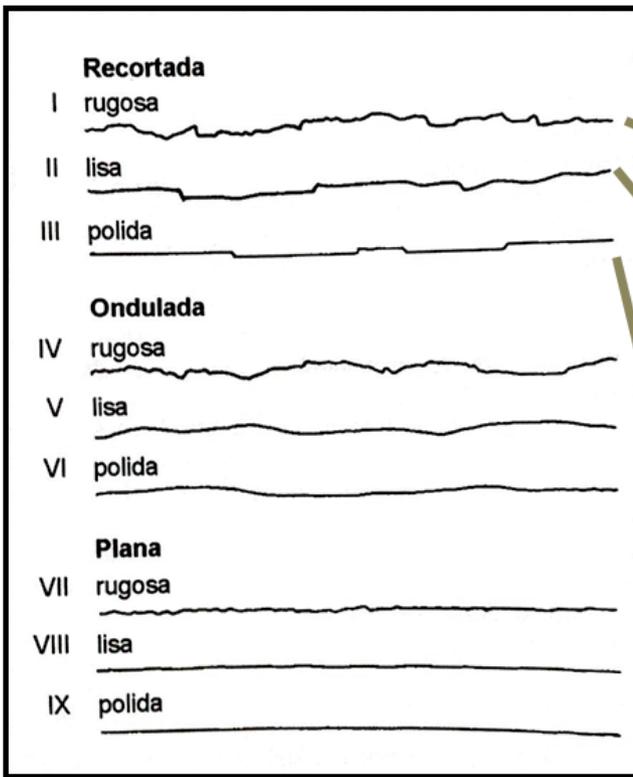


Figura 12 - Perfis de rugosidade de Barton *et al.* (1974).

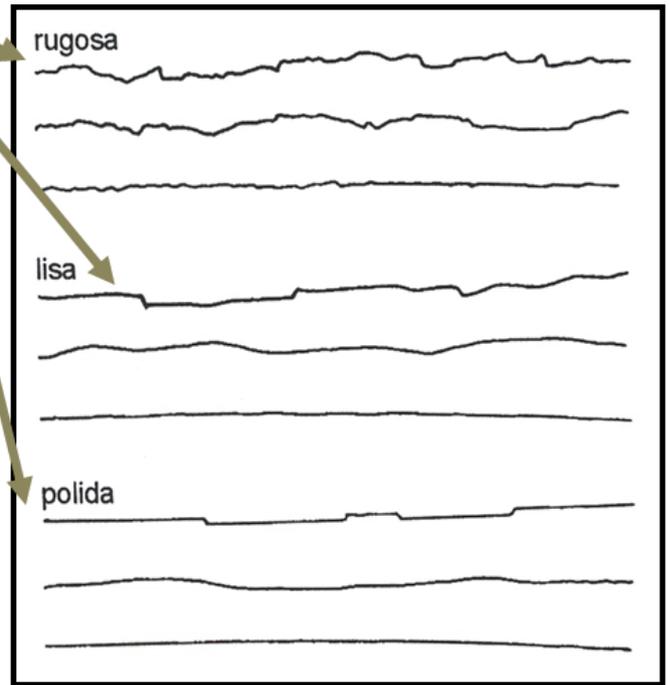


Figura 13 - Adaptação dos perfis de rugosidade de Barton para aplicação em imagens de televisamento.

Abertura

A distância entre as paredes de uma descontinuidade, medida no sentido ortogonal, corresponde à sua abertura. Quando as descontinuidades se encontram fechadas, com paredes sãs, as propriedades do maciço podem ser equiparadas às do material que o constitui. Se ocorrerem descontinuidades abertas, a sua influência será muito importante (Serra Junior & Ojima, 1998).

No caso do testemunho virtual, há a oportunidade de observar com detalhe a abertura da descontinuidade que, praticamente, se perde na operação de sondagem, quando da recuperação dos testemunhos. Já há recomendação do uso de equipamentos de filmagem na definição deste parâmetro pela ISRM (*op.cit.*).

Segundo Baillot *et al.* (2004), uma das principais vantagens do televisamento é fornecer dados que estão mais próximos da realidade do maciço rochoso. Isto se deve ao fato de que em testemunhos de sondagem, geralmente, a recuperação é menor quanto pior for a qualidade do maciço amostrado. Sendo assim, justamente as "piores" partes do maciço são aquelas com menor

recuperação. Ao utilizar o método de televisamento, esses níveis, de menor qualidade de rocha não recuperada, pela presença de solo e fraturas abertas, podem ser observados e devidamente caracterizados.

Portanto, este parâmetro deverá ser incluído nas observações dos testemunhos virtuais e sempre que uma fratura não for selada, deverá ser indicada a sua abertura, considerando a distância ortogonal entre as duas paredes que contemplam o topo e a base desta abertura. Para indicação da abertura de uma descontinuidade sugere-se a utilização da tabela de abertura fornecida nos métodos de descrição e caracterização de descontinuidades da ISRM (*op.cit.*), conforme apresentado na tabela 3. Esta mesma tabela foi inserida no perfil individual de televisamento, apresentado na figura 1.

Exemplos de abertura de descontinuidades são apresentados nas figuras 14, 15 e 16. Algumas vezes uma fratura com preenchimento muito alterado pode ser lavada durante a perfuração e esta aparecerá como uma abertura, o que pode ser ocasionalmente observável, quando se resta alguma parte deste preenchimento, conforme pode

ser visto nas laterais da figura 16. Na figura 17, retirada de Baillot *et al.* (*op.cit.*), compara-se a imagem desenrolada mostrando uma fratura aberta,

com fotos do mesmo trecho de um testemunho de sondagem, onde esta mesma fratura aberta já não pode mais ser observada.

Tabela 3 – Caracterização das aberturas de descontinuidades, traduzido de ISRM (*op.cit.*).

ABERTURA	DESCRIÇÃO	
<0.1 mm	Muito apertado	Feições fechadas
0.1 – 0.25 mm	Apertado	
0.25 – 0.5 mm	Parcialmente aberto	
0.5 – 2.5 mm	Aberto	Feições semi-abertas
2.5 - 10 mm	Moderadamente largo	
>10 mm	Largo	
1 – 10 cm	Muito largo	Feições abertas
10 – 100 cm	Extremamente largo	
> 1 m	Cavidade	

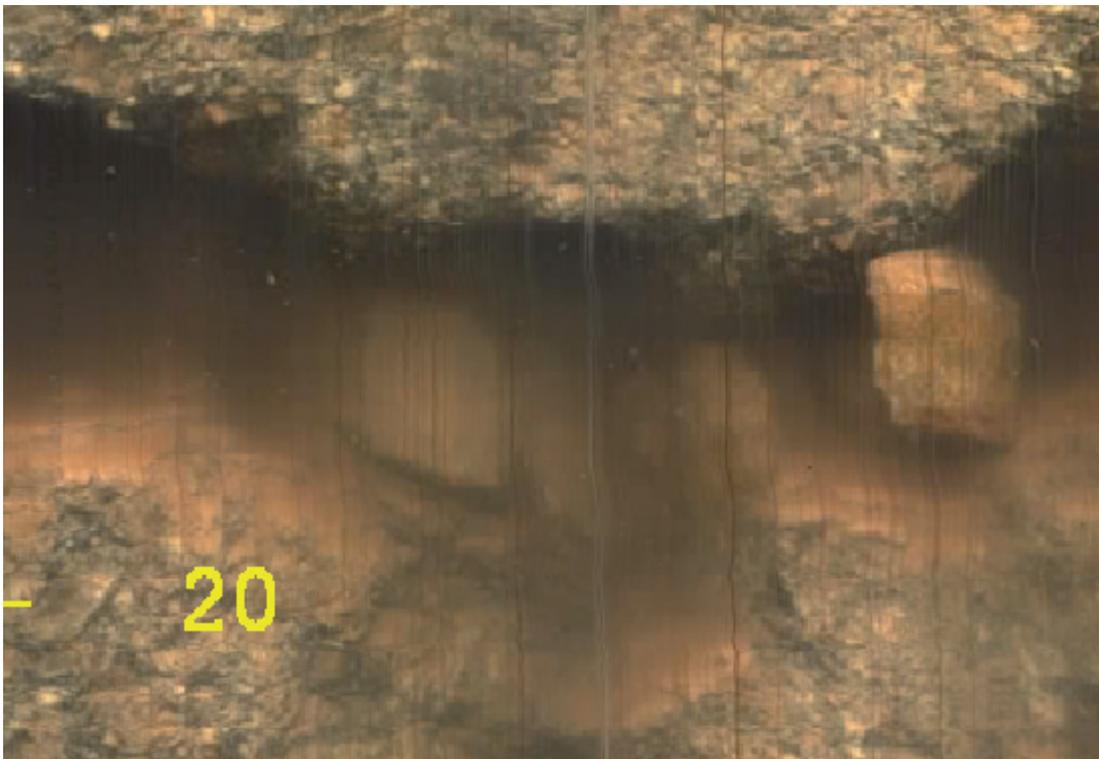


Figura 14 – Exemplo de descontinuidade aberta com preenchimento de rocha triturada. Fonte: Metrô-SP.



Figuras 15 e 16 - Planos de fraturas abertas, na primeira figura associado a um sistema de fraturas paralelas e na segunda figura observar trecho de rocha muito alterada e comiúda, provavelmente relacionada a um plano de falha, que foi lavado na perfuração de sondagem. Fonte: Metrô-SP.

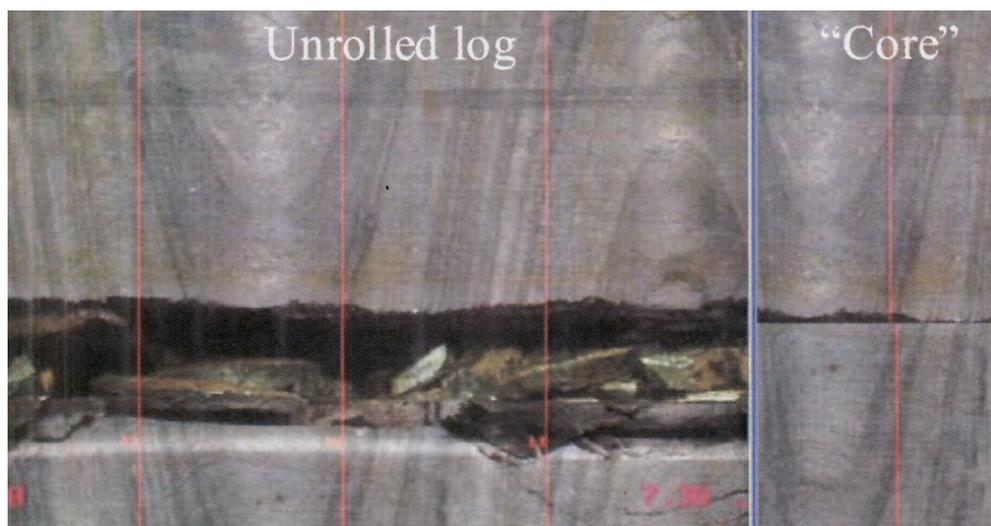


Figura 17 - Comparação entre fratura aberta no testemunho virtual e no testemunho de sondagem. Fonte: Baillot *et al.*, 2004.

Preenchimento, percolação d'água e condições de alterações das paredes

A descrição das condições de alteração das paredes denota as mesmas limitações e subjetividade que a caracterização do grau de alteração da rocha. Entretanto, é possível inferir estados de alteração das paredes de descontinuidades,

levando-se em consideração o brilho dos minerais ao longo das feições. A figura 5 apresenta-se como um bom exemplo para ilustrar a evidência da alteração das paredes de fraturas.

As condições de alteração das paredes e a presença de preenchimento podem ser caracterizadas utilizando-se a tabela modificada do IPT (Tabela 4), que também faz parte do perfil da sondagem virtual (Figura 1).

No caso do preenchimento é factível uma descrição, mesmo que somente visual, deste material. Aconselha-se a diferenciação, sempre que possível, de materiais que selam as fraturas, como preenchimento quartzo-feldspático, de epidoto e carbonáticos, daqueles que são materiais soltos, como areia, argila e fragmentos de rocha. Exemplos de presença de preenchimento em discontinuidades estão ilustrados nas figuras 5, 14, 16, 17 e 18.

Caso haja preenchimento no interior de uma fratura aberta, este também deverá ser descrito, se possível, detalhadamente. Notar que, muitas

vezes, o preenchimento original pode ter sido removido pela lavagem durante a perfuração e o que observamos na imagem é uma abertura que se, inicialmente estava preenchida, restam, algumas vezes, apenas resquício do preenchimento então existente, como observado na figura 16 e já citado anteriormente.

Também é observável evidências de percolação d'água, quando existente, como paredes oxidadas e a própria surgência de água no interior do furo, fator muito importante para a qualidade geotécnica de um maciço (Ex.: Figura 19).

Tabela 4 - Caracterização do preenchimento, modificado de IPT, 1984 (*apud* Serra Junior & Ojima, 1998).

SIGLAS	PREENCHIMENTO DAS DESCONTINUIDADES
D1	Contato rocha-rocha, paredes sãs, sem preenchimento, brilho intenso
D2	Contato rocha-rocha, preenchimento de material pétreo rijo (calcita, quartzo, <u>epidoto</u>)
D3	Paredes com alteração incipiente, brilho mais fraco, sinais de percolação d'água, oxidadas, sem preenchimento
D4	Paredes alteradas, brilho fraco, preenchimento ausente, fratura aberta
D5	Paredes alteradas, sem brilho, com preenchimento de fragmentos de rocha
D6	Paredes alteradas, sem brilho, com preenchimento de argila e/ou areia, detalhar sempre que possível
D7	Paredes alteradas, sem brilho, com preenchimento não identificado, detalhar

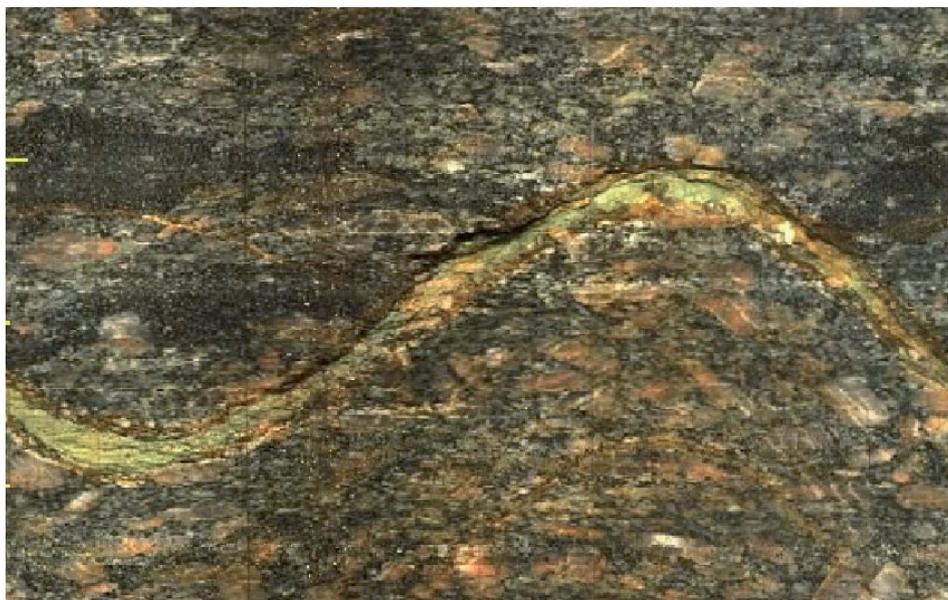


Figura 18 - Preenchimento argiloso, coloração esverdeada, preenchimento típico de fraturas no gnaisse do embasamento da Bacia de São Paulo. Fonte: Metrô-SP.



Figura 19 – Oxidação evidente e surgência de água no interior do furo.
Fonte: Metrô-SP.

Grau de fraturamento e espaçamento

O grau de fraturamento de um maciço rochoso (IPT, 1984, *apud* Serra Junior & Ojima, 1998) visa caracterizar a distribuição de descontinuidades

em testemunhos de sondagem. O fraturamento é expresso em graus de intensidade e explicita a quantidade de fraturas por metro, definido em trechos com fraturamento homogêneo (isofraturamento), conforme apresentado na tabela 5.

Tabela 5 – Grau de Fraturamento (IPT, 1984, *apud* Serra Junior & Ojima, 1998)

SIGLAS	FRATURAS/M	DENOMINAÇÕES DO MACIÇO
F1	< 1	ocasionalmente fraturado
F2	1 a 5	pouco fraturado
F3	6 a 10	medianamente fraturado
F4	11 a 20	muito fraturado
F5	> 20	extremamente fraturado

O mesmo parâmetro pode ser utilizado nos testemunhos virtuais, levando-se em consideração que um testemunho de sondagem poderá apresentar maior incidência de fraturamento devido a quebras mecânicas, dependendo das condições na perfuração e posterior descrição, podendo haver modificações significativas que dependem da experiência da equipe técnica envolvida no procedimento.

O grau de fraturamento deverá ser indicado no perfil de televisamento, utilizando os parâmetros da tabela 5, conforme pode ser observado na figura 1. Deverão ser considerados os trechos em que o espaçamento das descontinuidades é homogêneo.

Outro parâmetro essencial a ser descrito é o espaçamento, que corresponde à distância entre

descontinuidades adjacentes de uma mesma família, fator que controlará o tamanho dos blocos em um maciço rochoso.

Esta distância entre descontinuidades de um mesmo *set* deverá ser medida ortogonalmente a estas. Como nem sempre isso é possível, deverá ser realizada uma correção com relação à distância aparente e a linha medida, que no caso do televisamento, seria a própria direção do furo de sondagem. Esta correção é apresentada detalhadamente nos métodos sugeridos da ISRM (*op.cit.*) e apresenta a seguinte relação (equação 1):

$$S = dm \cdot \text{sen}\alpha \quad (1)$$

onde:

S - espaçamento real

d_m - distância medida (distância aparente)

α - ângulo entre o plano e a linha medida

Na figura 20 ilustramos esta relação para um furo vertical televisado e a relação para um *set* de família 1. Notar que $\alpha=90^\circ$ - mergulho da família 1.

Há sugestões do uso de equipamentos televisivos nos métodos da ISRM na observação e detalhamento do parâmetro espaçamento. Neste método sugere-se a confecção de histogramas com distribuições dos espaçamentos observados para cada *set* (Ex.: Figura 21), contribuindo assim para um levantamento sistemático e tratamento estatístico da distribuição das discontinuidades para cada família.

Como citado anteriormente no início do item 2.2, o espaçamento poderá ser visualizado ao

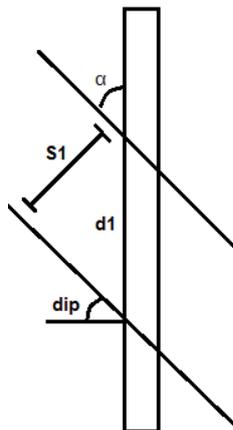


Figura 20 – Ilustração de correção de espaçamento.

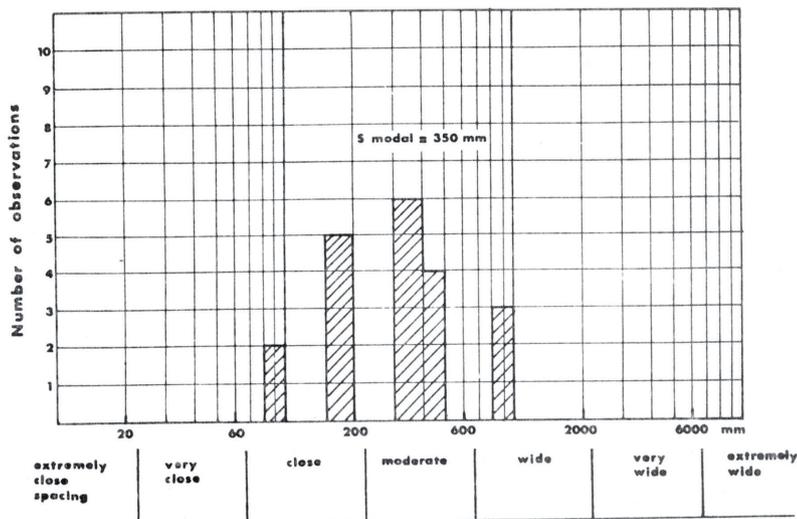


Figura 21 – Histograma de distribuição de espaçamentos para um mesmo *set*, retirado de ISRM (1978).

dividirem-se as discontinuidades por famílias, conforme apresentado na tabela 2. É importante citar que, muitas vezes, ocorrem fraturas verticais a subverticais com relação à inclinação do furo televisado, onde nem sempre é possível a demarcação destas na fase de interpretação de imagens, devido o software não permitir o fechamento de curvas senoidais extremamente abertas. Entretanto é essencial que estas feições estejam caracterizadas e façam parte dos demais parâmetros a serem descritos, como o espaçamento e o grau de fraturamento. A figura 22 ilustra um exemplo da ocorrência de um *set* de fraturas verticais.

Recomenda-se também a classificação de cada *set* utilizando tabela sugerida no método da ISRM (*op.cit.*) e adaptada para o televisamento (Tabela 6).



Figura 22 – Exemplo de ocorrência de *set* de fraturas verticais, com relação à direção do furo televisado. Fonte: Metrô de SP.

Tabela 6 – Classificação de espaçamento, modificado de ISRM (1978).

DESCRIÇÃO	ESPAÇAMENTO
Espaçamento extremamente fechado	<20 mm
Espaçamento muito fechado	20 - 60 mm
Espaçamento fechado	60 - 200 mm
Espaçamento moderado	200 - 600 mm
Espaçamento amplo	600 - 2000 mm
Espaçamento muito amplo	> 2000 mm

4 RQD TEÓRICO

Propõe-se aqui também a aplicação do parâmetro RQD – *Rock Quality Designation* já tradicionalmente obtido em furos de sondagem. Este parâmetro, RQD, amplamente utilizado na caracterização e classificação de maciços rochosos para obras de engenharia, foi definido por Deere (1964) com o intuito de quantificar a qualidade de um maciço rochoso, considerando o percentual de segmentos intactos de rocha competente com comprimento superior a 10 centímetros, em relação ao comprimento total da perfuração (manobra) ou trecho considerado.

Deere *et al.* (1967, *apud* Priest & Hudson, 1976) sugeriu que uma *scanline*, linha de medida, pode ser diretamente análoga a um furo de sondagem, desde que o parâmetro RQD possa ser obtido em ambos os casos. A partir daí alguns autores buscaram encontrar uma correlação entre o RQD medido em furos de sondagem e o RQD, dito teórico, obtido em linhas de medidas.

Priest & Hudson (1976) obtiveram um método para a determinação do RQD teórico (RQD*) a partir do valor médio do espaçamento (λ -número de descontinuidades por metro), utilizando uma função exponencial negativa, da seguinte forma (equação 2):

$$RQD^* = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1) \quad (2)$$

Segundo os autores, utilizando-se dados experimentais, o RQD* foi comparado com o RQD medido, sendo obtido um erro máximo de 5% do valor e sugerem que este método deveria ser

aplicado em uma variedade de tipos rochosos para determinar sua aplicabilidade.

La Pointe (1980) utiliza a geostatística no estudo de distribuição de descontinuidades, afirmando que cada família de juntas pode ser representada por uma função semi-variograma espacial juntamente com componente aleatório local, correspondente ao espaçamento médio das juntas mais persistentes. Entretanto, em testemunhos de sondagens, no caso de maciços rochosos não homogêneos, o uso de valores médios assim como distribuição de frequências, pode não ser realista, super, ou, subestimando valores de algumas áreas, sendo necessário obter a determinação de variabilidade espacial em mais linhas de medidas.

Sen & Eissa (1992) através de modelos conceituais e com base em medidas obtidas em *scanlines*, relacionam os parâmetros RQD e o índice volumétrico de juntas (J_v) com a média e desvio padrão, a partir de uma distribuição log-normal, ajustada pela frequência multiplicada pelos valores de espaçamento de descontinuidades, através da seguinte relação, que determina a esperança do RQD (equação 3):

$$E(RQD) = 100 \left\{ 1 - F \left[\frac{\ln(0.1\lambda)}{\sigma_{\ln x}} - \sigma_{\ln x} + 1 \right] \right\} \quad (3)$$

onde:

λ - número médio de descontinuidades

$\sigma_{\ln x}$ - desvio padrão dos valores logaritizados de espaçamento

Nesta equação o valor resultante dentro dos colchetes denota a área sobre a função de

distribuição de probabilidade normal padronizada de $-\infty$ até o valor entre os colchetes.

Os autores, neste trabalho, ressaltam a importância do desvio padrão, modificando significativamente o valor do RQD e, dessa forma, caracterizando melhor a distribuição do espaçamento das descontinuidades. Por exemplo, para maciços pouco fraturados um desvio padrão menor aumenta o valor médio do RQD, já em maciços muito fraturados um desvio padrão menor diminui o valor médio do RQD.

Um estudo mais detalhado sobre a aplicação desta técnica em pedreiras com distintos litotipos é apresentado em Oliveira (2000). Neste trabalho concluiu-se que uma distribuição exponencial negativa seria a que melhor representaria o comportamento da variação de espaçamentos das descontinuidades, para maciços rochosos graníticos e gnáissicos. No caso de rochas basálticas, com disjunções colunares, e em rochas areníticas, com acamamento regular, os valores de espaçamento de descontinuidades se aproximariam de uma distribuição normal.

Considera-se aqui que um testemunho virtual pode ser diretamente análogo a uma *scanline*, sendo sugerida esta aplicação de RQD teórico para testemunhos virtuais e comparação com os RQD's medidos nos testemunhos destas mesmas sondagens, buscando, assim, a determinação da aplicabilidade do método. É importante considerar apenas as descontinuidades relevantes, desconsiderando pequenas fissuras que, provavelmente, não implicariam em uma quebra do testemunho.

Neste caso, o RQD teórico deverá também ser obtido para trechos isofraturados, assim como sugerido para o RQD medido em testemunhos de sondagem que, ao invés de considerar manobras, conforme apresentado por Serra Junior & Ojima (*op.cit.*), considera trechos em que o espaçamento das descontinuidades é homogêneo.

Sugere-se a adição de uma coluna dos valores de RQD teórico no perfil individual de televisamento (PIT, figura 1), indicando sempre qual foi a equação utilizada para a obtenção destes valores. Vale ressaltar a importância de uma comparação dos valores de RQD obtidos em imagens com os calculados diretamente nos testemunhos de sondagem, como efeito de validação desta proposta.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram feitas algumas considerações e propostas de diretrizes para a aplicação dos serviços de televisamento e interpretação de seus resultados, buscando a caracterização e classificação de maciços rochosos a partir desta técnica, em ampla difusão no mercado, bem como a uniformização de seus escopos. Para tanto há a necessidade de um período experimental, testando a aplicabilidade de tais sugestões, tendo como base a realização de estudos de casos, preferencialmente em contextos geológicos distintos.

Sugere-se a comparação entre os parâmetros de caracterização e classificação obtidos em testemunhos virtuais com os obtidos diretamente em testemunhos de sondagem, para que a metodologia aqui proposta possa ser verificada, testando principalmente a correlação entre RQD medido e RQD teórico obtido nestes testemunhos virtuais.

Outras correlações também poderão ser realizadas, aumentando as possibilidades de aplicação desta ferramenta, como a verificação do parâmetro persistência para planos de descontinuidades, utilizando a análise estrutural tridimensional destes planos em furos adjacentes, por exemplo.

Adicionalmente, deve-se considerar que as classificações geomecânicas mais usuais, como RMR e Q, foram estabelecidas por amostragem com testemunhos de sondagem e conduzem a estimativa de suporte baseada em correlações estatísticas da classe com o suporte. A simples utilização de melhores parâmetros classificatórios para um mesmo maciço pode levar à subestimação do suporte necessário. Portanto recomenda-se o uso criterioso de novos parâmetros com antigas classificações.

Vale lembrar que qualquer investigação geológico-geotécnica de um maciço rochoso sempre deverá levar em consideração as necessidades de cada projeto, assim como sua fase de estudo, fornecendo os subsídios para cada caso em particular. Todas as descrições realizadas em testemunhos virtuais podem, sempre que possível, ser enriquecidas por meio da comparação destes com seus testemunhos de sondagem.

Conforme citado em ISRM (*op.cit.*), na medida em que as descrições de maciços rochosos e suas descontinuidades se tornem mais completas

e unificadas, será viável projetar estruturas de engenharia em rocha reduzindo os gastos e aumentando a confiabilidade da interpretação e extrapolação dos resultados.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia do Metropolitan de São Paulo (METRÔ) por apoiar e autorizar a publicação deste estudo. Também são prestados agradecimentos às empresas Alphageos Tecnologia Aplicada S.A., em nome do Tecg. Marcelo dos Santos e Progeo Engenharia Ltda, em nome do Geól. Daniel França, assim como o Geól. Apolo Oliva Neto, da empresa Drill Center, representante da empresa Robertson Geollogging no Brasil. Agradecimento especial à técnica Barbara G. A. P. da Cunha pela ajuda com a montagem do perfil individual de televisamento.

REFERÊNCIAS

- BAILLOT, R.T., COLAS, R., BARTON, N., ABRAHÃO, R. & RIBEIRO JÚNIOR, A., 2004. Comparing 360° televising of drill hole walls with core logging. *Proc. International Site Investigation Conf. Portugal*.
- BARTON, N., LIEN, R. & LUNDE, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock mechanical*, v. 6, n. 4, p. 189-236.
- DEERE, D.U., 1964. Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mech. Eng. Geol.*, 1, p. 17-22.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS - ISRM, 1978. Suggested methods for the quantitative description of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, vol. 15, n. 6, p. 319-368.
- OLIVEIRA, D.G.G., 2000. Estudo geológico-geotécnico de maciços rochosos: levantamento sistemático e caracterização da distribuição de descontinuidades em taludes. *Monografia de trabalho de formatura pelo Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo -IGUSP, São Paulo*, 49 p.
- PRIEST, S.D., 1993. Discontinuity analysis for rock engineering, *Editora Chapman & Hall, Londres*. 473p.
- PRIEST, S.D. & HUDSON, J.A., 1976. Discontinuity spacings in rock. *International Journal Of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 13, p. 135-148.
- LA POINTE, P.R.A., 1988. Method to characterize fracture density and connectivity through fractal geometry. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, vol. 25, p. 421-429.
- SEN, Z. & EISSA, E.A., 1992. Rock quality charts for log-normally distributed block sizes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, vol. 29, p. 1-12.
- SERRA JUNIOR, E. & OJIMA, L. M., 1998. Caracterização e classificação de maciços rochosos. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A.. *Geologia de Engenharia*, cap. 13, p. 211-226.

RUPTURA DO TALUDE SUDESTE DA MINA DE N4E – UM ESTUDO DE CASO, CARAJÁS, ESTADO DO PARÁ

GILVAN SÁ

*M.Sc. Geólogo VALE S/A, Belo Horizonte, MG, Brasil - gilvan.sa@vale.com
Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica stricto sensu (MPEG) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (CAPES), Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP;*

RODRIGO P. DE FIGUEIREDO

D.Sc. Engenheiro de Minas, Professor Associado, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil - rpfigueiredo@yahoo.com.br;

FÁBIO SOARES MAGALHÃES

D.Sc. Geólogo VOGBR Recursos Hídricos e Geotecnia Ltda, Belo Horizonte, MG, Brasil - fmagalhaes@vogbr.com.br;

RESUMO ABSTRACT

A mina de minério de ferro de N4E está situada no Complexo Minerador de Carajás, Estado do Pará, onde existe um histórico de grandes deformações fortemente condicionada pela zona de cisalhamento de contato no talude de lapa entre a formação ferrífera da Formação Carajás sobreposta às rochas metabásicas da Formação Parauapebas (Grupo Grão Pará). Os eventos de rupturas demonstraram um forte condicionamento geológico estrutural, nas rochas metabásicas do talude de lapa, caracterizando rupturas planares e plano-circulares demonstrando a necessidade de um melhor entendimento do arcabouço estrutural e dos condicionantes de rupturas. Neste sentido, procurou-se, através de mapeamentos litoestruturais e geomecânicos, de campanhas de ensaios de laboratório e retroanálises deste evento, aferir e recalibrar os parâmetros de resistência da hematita friável, da máfica decomposta e da zona de cisalhamento e entender o comportamento das rupturas. Após selecionar a ruptura do talude sudeste, foram realizadas retroanálises, ajustes e aferições dos parâmetros de resistência e métodos aplicados. Os critérios de resistência ao cisalhamento utilizado para as retroanálises foram: Critérios de Mohr-Coulomb e Critério de Barton & Bandis, os quais auxiliaram nos ajustes dos parâmetros a partir dos ensaios de laboratório, demonstrando boa aplicabilidade ao estudo de caso. Os métodos utilizados para o cálculo do fator de segurança foram: métodos Spencer e GLE/Morgenstern Price,

N4E iron mine is located in the Carajás Mining Complex in southeast Pará, has a history of large strain strongly related to the shear contact zone in the footwall slope between the Carajás Formation superimposed on metabasic rocks of Parauapebas Formation (Grão Pará Group). The failure events have demonstrated a strong structural geological conditioning in the metabasic rocks of footwall slope, which is generally classified as planar and circular plan failures showing that a better understanding is required about the structural framework and the potential failure mechanisms. In this way geomechanical and litho-structural mapping, laboratory tests and back analysis were carried out for validations and calibration of the strength parameters of hematite friable, mafic decomposed and shear zone, as well as to understand the behavior of failure mechanisms in that location. After selecting the southeastern slope failure this study carried out back analysis, adjustments and measurements of strength parameters and verification of the applied methods. The Mohr-Coulomb failure criterion and Barton & Bandis failure criterion were used in back analysis, where those criteria helped in the adjustment of the parameters obtained from laboratory tests, showing good applicability to the case study. The analysis methods used to calculate the safety factor were Spencer and GLE/Morgenstern Price, due to their greater accuracy. Previously back analyses were

aplicados em função de seu maior rigor. Anteriormente as análises não contemplavam esta informação e só eram realizadas pelo Método de Mohr-Coulomb. O resultado final apresentou parâmetros de resistência ajustados às condições da ruptura presente no contato do talude de lapa, além de confirmar a grande deformação do maciço sem sua ruptura plena em função das macrorrugosidades no contato de base, a qual corroborou diretamente para o modo e desenvolvimento desta ruptura, confirmada nas retroanálises realizadas, aferindo e recalibrando os parâmetros de resistência com maior precisão para utilizações futuras.

Palavras-chaves: Estabilidade de Taludes; Mina de N4E; Província Mineral de Carajás; Mineração

1 INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta estudos realizados no talude sudeste da mina de ferro N4E, Complexo Minerador de Carajás, Estado do Pará, onde ocorreram rupturas de grandes proporções. Segundo Sá (2010), popularmente conhecida como “região das trincas”, o talude sul-sudeste da mina de N4E é assim denominado pelo forte controle estrutural condicionado pela zona de cisalhamento do contato de lapa entre a Formação Ferrífera da Formação Carajás sobreposta às rochas metabásicas da Formação Parauapebas, ambas pertencentes ao Grupo Grão Pará.

Essas rupturas na realidade referem-se a reativações de um mesmo processo de instabilização e, em função dessas reincidências, realizaram-se estudos detalhados das características da superfície

only carried out with Mohr-Coulomb criteria and did not cover this information. The final result showed strength parameters adjusted to the failure conditions presents in the footwall contact, and confirm the large deformation without failure of the mass on the basis of macro-wrinkles at the contact (which helped directly the development of this form and confirmed by the back-analysis performed). This study also re-calibrates the existing resistance parameters with more accuracy for future use.

Key Words: Slope Stability; N4E Mine, Carajás Mineral Province; Mining

de ruptura por meio de mapeamentos, ensaios geotécnicos e retroanálises com a finalidade de se obter com maior confiabilidade seus parâmetros de resistência.

Essas instabilizações provocaram no maciço do talude sudeste grandes deformações, porém não se observou uma deflagração abrupta, mas sim abatimentos graduais de um trecho de até 155 m de altura e elevação do piso do banco da cota 460 de até três metros de altura (Sá 2010).

A mina de N4E é uma das maiores minas a céu aberto em rocha branda do Brasil com aproximadamente quatro quilômetros de comprimento, e uma das mais importantes do complexo minerador de Carajás (Figura 1). A região estudada possui atualmente um talude com altura global aproximadamente de 200 m.

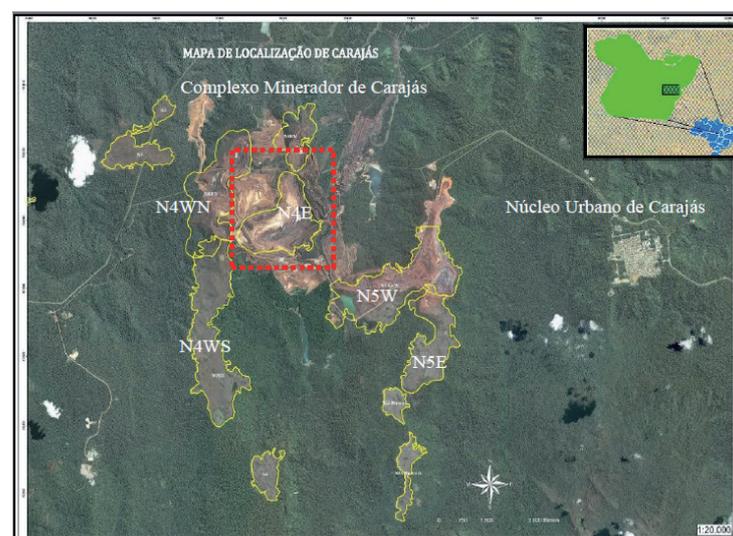


Figura 1 - Localização das minas de ferro do Complexo Minerador de Carajás.

2 CARACTERÍSTICAS LITOESTRUTURAIS DA MINA N4E

A mina N4E é composta por litotipos de idade arqueana, com idades entre 2,8 a 2,5 Ga, atribuídos ao Grupo Grão Pará, subdivididos nas Formações Parauapebas e Carajás (Tabela 1) e representados no mapa litoestrutural da Figura 2.

Tabela 1 – Coluna estratigráfica adaptada Macambira (1990, in Sá 2010).

EON	ERA	UNIDADE
FANEROZÓICO	CENOZÓICO	Coberturas Lateríticas
	PALEOZÓICO	Corpos Máficos Intrusivos
NEOPROTEROZÓICO		Granito Serra dos Carajás
		Gabro Santa Inês
		Fm. Igarapé Azul
		Fm. Igarapé Boa Sorte
	Gr. Grão Pará	Fm. Igarapé Cigarra
		Fm. Carajás
		Fm. Parauapebas
	Gr. Igarapé Pujuca	Fm. Gameleira
		Fm. Corpo 4
		Fm. Bueno
	Complexo Xingu	

A Formação Parauapebas é constituída por rochas metavulcânicas em diferentes estados de alterações (máfica sã - MS, semidecomposta - MS e decomposta - MD) e ocorrem como rochas encaixantes de capa e lapa ao minério de ferro, mostrando feições dúcteis e rúpteis, recobertas por uma cobertura laterítica.

A Formação Carajás é composta por diferentes tipos de minério de ferro tais como: Jaspilito (JP), Hematita macia ou friável (HM), Hematita dura (HD), minério de baixo teor (MBT), Canga de minério (CM), canga química (CQ), intrusões de soleiras e diques máficos.

As superfícies de cisalhamento são estruturas comuns na região da mina (Figura 3) e condicionam o contato de lapa entre a formação ferrífera e o maciço de rochas metabásicas onde são mais persistentes e paralelas ao bandamento.

O Sistema de Falhas Embaúbas, de direção geral E-W a NE-SW de caráter dúctil-rúptil a

rúptil, localizada na porção sul-sudeste da mina de N4E, está disposta concordantemente com o contato de lapa entre a formação ferrífera e o maciço metabásico (Figura 3) com alto grau de alteração variando entre 0,5 a 1,0 m. O qual ocorre discordantemente no contato de capa, onde ocorrem superfícies de cisalhamento subverticais e de caráter mais rúpteis.

Sá (2010) cita que essa zona de cisalhamento pode ter sido a responsável, por meio de movimentos transcorrentes destrais, pela grande inflexão observada no corpo de minério que se traduz no formato da cava em um grande “J” (Figura 2).

Essa estrutura é também importante do ponto de vista geotécnico, pois se constataram várias rupturas e reativações caracterizando o local de sua ocorrência como uma região de instabilidades conhecida informalmente na mina como “área das trincas”.

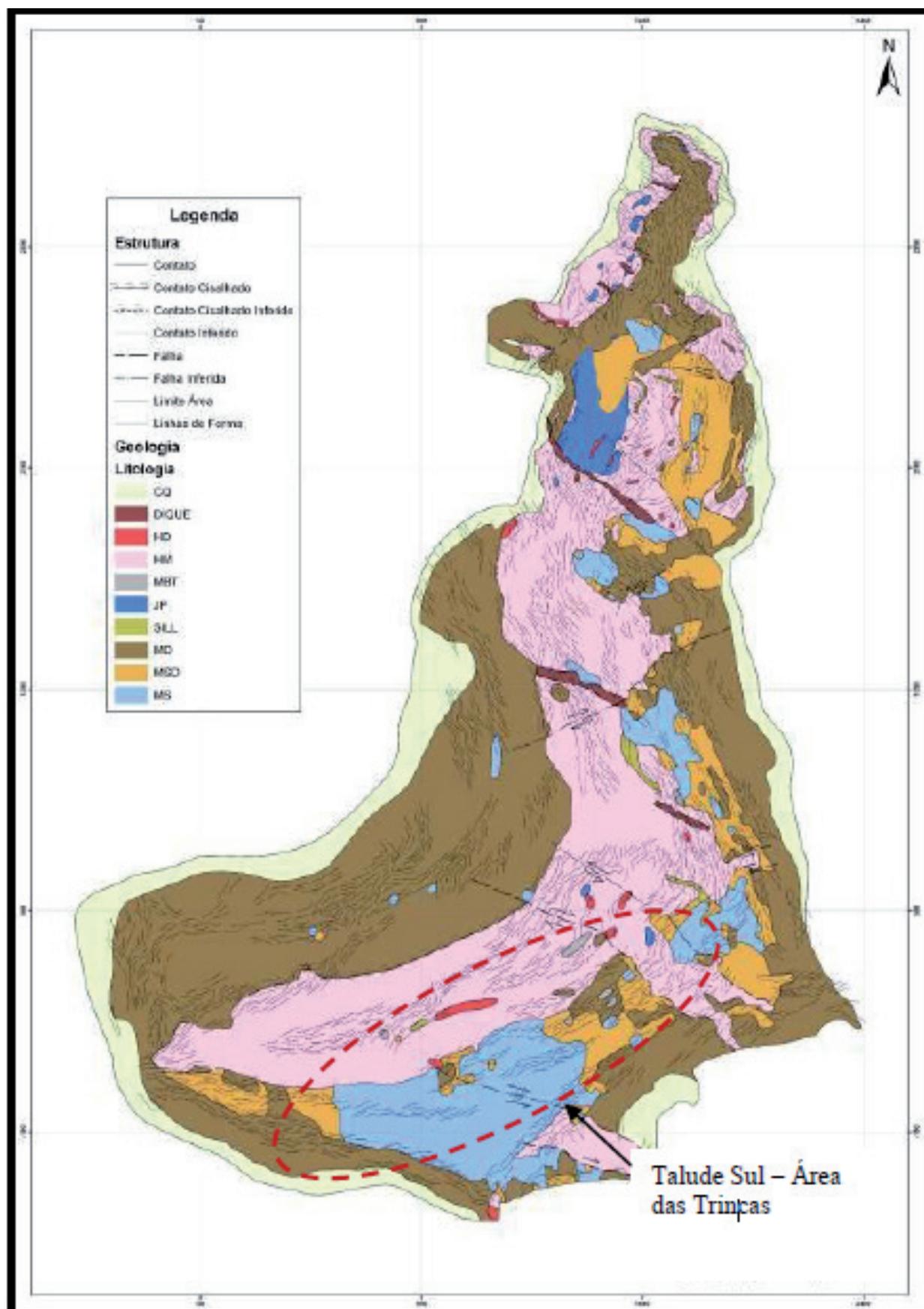


Figura 2 – Mapa litoestrutural da mina N4E (BVP, 2008 *in* Sá 2010). Siglas dos litotipos – CQ canga química, HD hematita dura, HM hematita macia, MBT minério de baixo teor, JP jaspilito, MD máfica decomposta, MSD máfica semidecomposta, MS máfica sã.

Esses cisalhamentos, localizados no contato de lapa, são representados em estereograma na Figura 4 com máximos de 164/45 (rumo de mergulho/mergulho) para o Flanco Sul.



Figura 3 – Zona de cisalhamento no contato de lapa, paralelo à foliação e com formas onduladas.

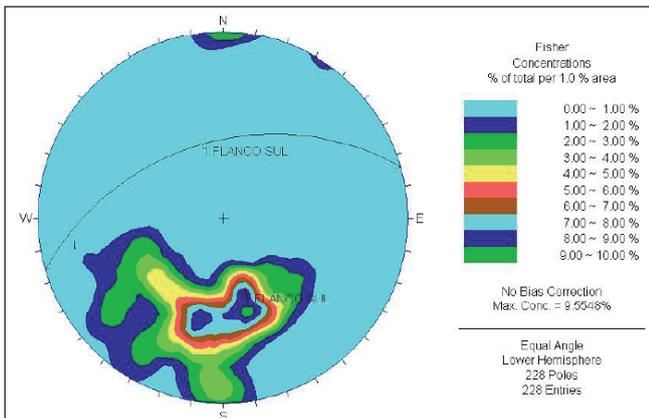


Figura 4 – Estereograma de polos dos planos do cisalhamento de lapa com máximo de 164/45 – Flanco Sul de N4E. (Software DIPS 5.0 Tutorials. www.rocsience.com.)

3 HISTÓRICO DOS EVENTOS

Para uma melhor compreensão das recorrências das instabilidades, os eventos ocorridos no talude sudeste são descritos em ordem cronológica, que se iniciaram em 2001 e finalizaram-se em 2007.

No início do ano de 2001, com o avanço da lavra, observou-se uma instabilidade envolvendo cinco bancadas de 15 m de altura atingindo altura total de 75m. Verificou-se que a ruptura se deu no minério pelo contato cisalhado de lapa com a rocha máfica decomposta, associada a uma surgência de água na cota 615. Após essa deformação,

verificou-se uma reativação na mesma área em 22 de maio de 2002 com o surgimento de trincas de alívio. Para a estabilização da área foram realizados retaludamentos.

Em 27 de junho de 2002 verificou-se uma deformação de grande porte nesse local, mobilizando o talude desde seu pé no banco 460 m até a crista no banco 615 m, caracterizando uma instabilização global com altura de 155 m. Essa deformação não se caracterizou como uma ruptura brusca e plena, mas observaram-se trincas e recalques da ordem de 2 a 3 m na crista do banco 615 m (Figura 5) e soerguimento de aproximadamente 3 m no pé do banco 460 m por uma extensão de aproximadamente 100 m (Figura 6).



Figura 5 – Surgimento de trincas no Talude Sudeste de N4E, banco 615 m.



Figura 6 – Soerguimento do banco 460.

Essas instabilidades foram condicionadas pelo contato de base entre o minério de ferro e a rocha máfica onde se instala uma zona de cisalhamento subparalela ao talude. A superfície desse contato encontrava-se bastante cisalhada, alterada

e com baixa resistência. Somada a isso, observou-se a condição de saturação do maciço, o que deve ter contribuído para a sua instabilização.

Em 18 de março de 2005 ocorreu nova reativação da ruptura com surgimento de novas trincas na face do talude e nos bancos superiores, soerguimento de aproximadamente 1,0 m do pé e deslocamento do piso em até 2,40 m. Essa instabilidade não ocorreu de forma abrupta, mas sim gradualmente. Na foto da Figura 7 é possível observar a área instável e o início do retaludamento. Trincas e recalques foram observados no banco superior, com abatimentos da ordem de 2,0 m no mesmo local (Figura 8).



Figura 7 - Vista geral do flanco sudeste da mina N4E.



Figura 8 - Vista da crista com surgimento de trincas e recalques.

Em outubro de 2007 ocorreu nova instabilização no flanco sul/sudeste da mina N4E, entre os bancos 460 na base e 530 no topo com uma extensão lateral de aproximadamente 150 m. Também

nesse caso não se verificou uma ruptura plena com deslocamento abrupto de massa, mas apenas abatimentos métricos de topo e soerguimento da berma de pé (Figura 9).

Observou-se na porção superior da instabilidade, no banco 530, que a ruptura novamente foi condicionada pelo plano de cisalhamento do contato de lapa entre a formação ferrífera e a rocha máfica sã/decomposta, que se estende por todo o talude que compõe o flanco sul da mina N4E (Figura 10).



Figura 9 - Vista frontal da área de instabilidade de outubro de 2007, talude sul/sudeste da mina N4E.



Figura 10 - Vista do flanco sul/sudeste de N4E. Contato cisalhado de lapa entre a formação ferrífera e a rocha metabásica.

Nas fotos das Figuras 11 e 12 verifica-se o abatimento ocorrido no plano de falha em rocha máfica da ordem de três metros. No local, a espessura da zona de cisalhamento varia entre 1 e 2 m. Nas porções laterais da instabilidade em hematita também se verificaram trincas com abatimentos da mesma ordem.

Novamente verificaram-se soerguimentos na berma do banco 460 com dimensões que evoluíram de forma lenta de 0,4 a 2,5 m, como mostram as das fotos Figuras 13 e 16.



Figura 11 – Ruptura através do plano de contato de lapa (máfica decomposta x hematita) mostrando recalque de 3 m na crista da ruptura.



Figura 12 – Detalhe da superfície de ruptura na máfica decomposta (contato de lapa).



Figura 13 – Início do soerguimento lento e progressivo na ordem de 0,5m no pé da ruptura - banco 460 (outubro de 2007).



Figura 14 – Avanço gradual do soerguimento no pé do banco (Outubro/2007).



Figura 15 – Prosseguimento do soerguimento - deformação lenta na berma 460 (Outubro/2007).



Figura 16 – Fase final do soerguimento no pé da ruptura da ordem de 2,5 m

4 AVALIAÇÃO DO MECANISMO DE RUPTURA

O contato de lapa no local da ruptura apresenta uma inflexão próxima ao pé do talude na bancada 460 m (horizontalização). A existência dessa inflexão deve ter proporcionado um movimento ascendente da parte inferior da massa instável, que explica seu soerguimento através de superfícies de cavalgamento, como representado na Figura 17. A ação de um empuxo passivo, atuante sempre que ocorrem tais movimentos ascendentes e as características mais dúcteis do contato cisalhado explicam a natureza lenta e não brusca da deformação notada nessa ruptura. Nota-se na Figura 17 o detalhe das “superfícies de cavalgamento” na berma 460, onde ocorre a inflexão da máfica do contato de lapa funcionando como uma macrorrugosidade do contato.

Deste modo, a interpretação para as instabilidades é a de que elas tenham sido deflagradas pela remoção de minério do banco 460 que servia de arrimo e condicionada pelo plano de cisalhamento de baixa resistência que ocorre no contato da rocha máfica com o minério, somada a presença de água. Acredita-se que os soerguimentos tenham ocorrido devido à inflexão desse contato que se horizontalizou, aproximando-se do pé do talude e se estendendo abaixo do banco 460, como mostra a Figura 17.

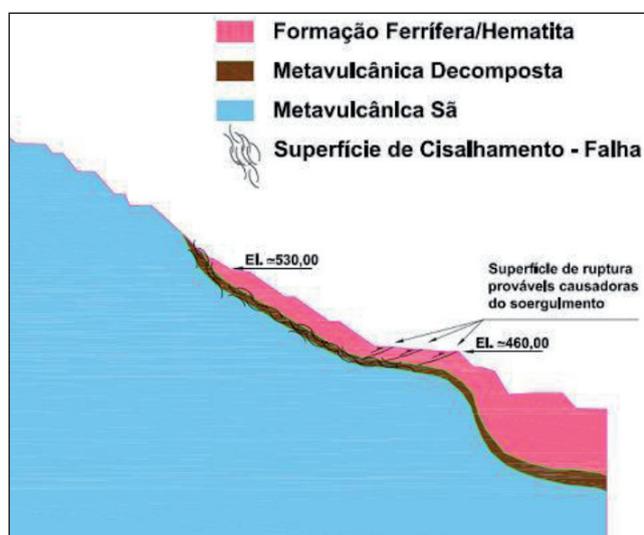


Figura 17 – Seção típica mostrando o contato de lapa em máfica decomposta, cisalhada, definindo a superfície de ruptura. Notar a influência da inflexão da zona de cisalhamento na base da superfície de ruptura (VALE 2007, in Sá 2010).

O soerguimento da berma 460 foi lento e progressivo como mostrado pelas fotos das Figuras 13 a 16, diferentemente do que ocorreu em outras rupturas, cujas superfícies apresentavam-se retilíneas. Apesar de não ter sido realizada uma instrumentação por meio de levantamento topográfico para acompanhamento dessa deformação, observou-se um soerguimento de aproximadamente 3 m. Esse soerguimento foi calculado pela diferença topográfica entre as cotas da praça deformada e não-deformada. Além disso, houve uma coincidência com os recalques de 3 m na crista do banco 530 (VALE 2007, in Sá 2010).

5 PARAMETROS DE RESISTÊNCIA

Os parâmetros de resistência utilizados para as retroanálises foram estimados a partir de resultados de ensaios de duas campanhas realizadas entre os anos de 2003 e 2009 (Sá 2010). O programa consistiu na realização de ensaios de caracterização completa e compactação no proctor normal, cisalhamento direto, triaxiais (CUnat, CUsat, CDSat) e *Ring Shear*.

Os litotipos ensaiados foram a máfica decomposta (MD) e a hematita friável (HF). Como a ruptura se deu no contato entre o pacote de hematita friável (HF) e a máfica decomposta (MD) de lapa caracterizada por uma superfície cisalhada e de difícil acesso para amostrá-la, os parâmetros de resistência foram obtidos a partir de resultados dos ensaios de cisalhamento *Ring Shear* em amostras de máfica decomposta (MD) com as mesmas e/ou características de alteração e cisalhamento muito próximas à da zona de cisalhamento que define a superfície de ruptura.

Através dos resultados dos ensaios realizados no Laboratório de Engenharia Civil da CESP foi possível definir envoltórias médias para cada litotipo e valores de resistência (c e ϕ) a serem utilizados nas análises de estabilidade, utilizando-se o *Software. ROCKDATA 3.0 Tutorials (RocScience)* homologado na VALE S.A. A Tabela 2 apresenta o quantitativo de ensaios realizados nas campanhas entre 2003 e 2009 (Sá 2010).

Tabela 2 – Quantitativos totais dos ensaios realizados em ambas as campanhas (Sá 2010).

Tipo de ensaio	Máfica decomposta (MD)	Hematita (HM)
Cu (sat)	12	7
CD (sat)	4	4
Cis. Dir. inund.	2	6
<i>Ring Shear</i>	2	n/e(*)

(*) não ensaiado.

A Tabela 3 apresenta de forma resumida os valores de resistência médios para os litotipos ensaiados e utilizadas nas análises e retroanálises de estabilidade.

Tabela 3 – Parâmetros de resistência obtidos por ensaios.

Tipologias Avaliadas		Peso Específico Seco γ (kN/m ³)	Peso Específico Saturado γ (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito ϕ (°)
Máfica Descomposta (parâmetros médios)	MD	18,5	20	94	26
Hematita Friável (parâmetros médios)	HM	37	38	123	38
Zona de Cisalhamento	ZC	19	20	9 (*)	18 (*)

(*) Resistência a grandes deformações do ensaio do *Ring Shear*

6 PARAMETRIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA

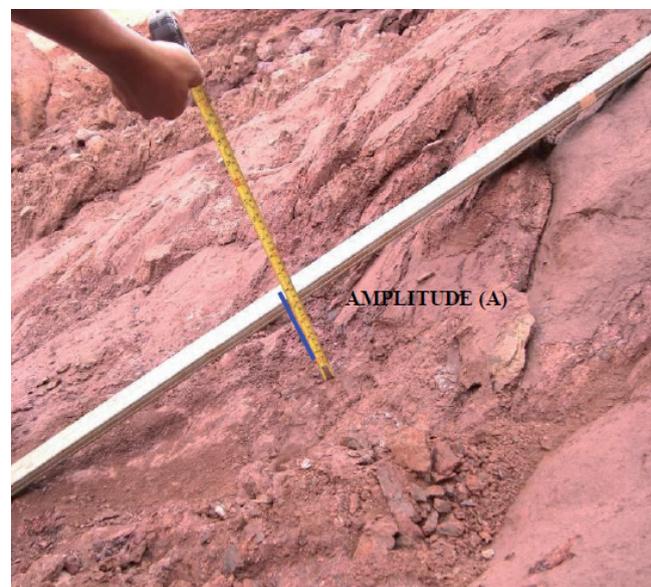
Para a parametrização da superfície de ruptura se fez necessária a determinação das amplitudes das ondulações e dos ângulos de rugosidade médio, visando calcular o JRC (Coeficiente de Rugosidade das Juntas) das superfícies de escorregamento, verificados preferencialmente no contato de lapa entre o minério e a máfica. Para esta parametrização utilizou-se o método de Barton (1982, in Sá, 2010). O intuito foi fornecer subsídios para as retroanálises apresentadas no item 7.

Para o cálculo do JRC (Coeficiente de Rugosidade das Juntas) da superfície de ruptura utilizou-se os dados obtidos através do mapeamento litoestrutural da mina N4E (Sá 2010).

6.1 Caracterização das amplitudes das ondulações

Foram levantados 26 pontos representativos do contato de lapa num total de 90 medidas de

amplitude das rugosidades/ondulações. A foto da Figura 18 indica a forma de obtenção desse parâmetro com a utilização de uma régua metálica de 1 m de comprimento e bússola de geólogo.

**Figura 18** – Determinação das amplitudes (A).

Realizou-se um tratamento estatístico desses dados com a utilização de planilha *Excel*, chegando-se ao valor médio de 15 cm, conforme gráfico apresentado na Figura 19.

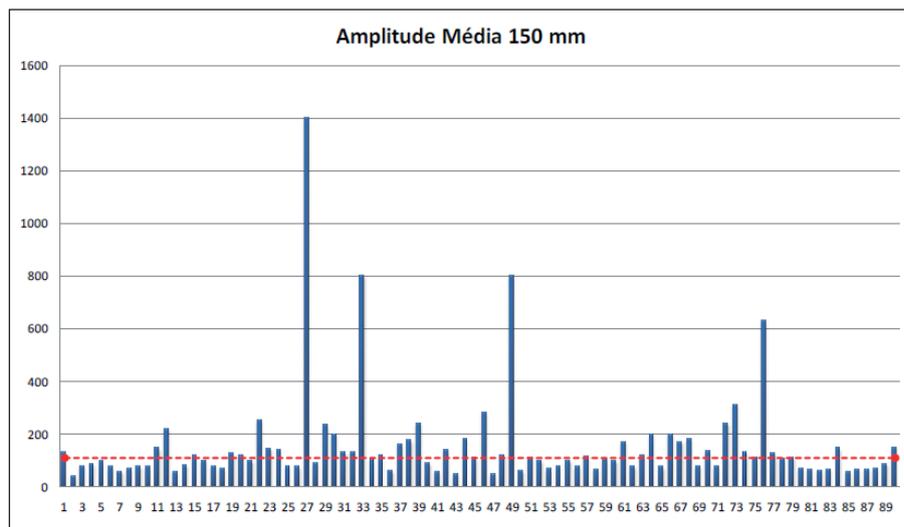


Figura 19 – Média para a amplitude (A) = 15 cm (Sá 2010).

6.2 Estimativa do JRC

Para o cálculo dos parâmetros de resistência das superfícies cisalhadas de contato utilizou-se o modelo de Barton (1982) definido pela equação 1.

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_r + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (1)$$

Onde:

JRC = coeficiente de rugosidade das juntas;

JCS = resistência à compressão das paredes da junta;

ϕ_r = ângulo de atrito residual.

O valor de JRC foi estimado em função dos valores de amplitude (A) das ondulações das superfícies cisalhadas do contato de lapa expostas na mina N4E. Com a utilização do ábaco proposto por Barton (1982) para estimativa do valor de JRC, foi estimado um $JRC_0 = 20$ (valor referente à escala das medidas realizadas - 1 m), conforme indicado na Figura 20 pela seta azul.

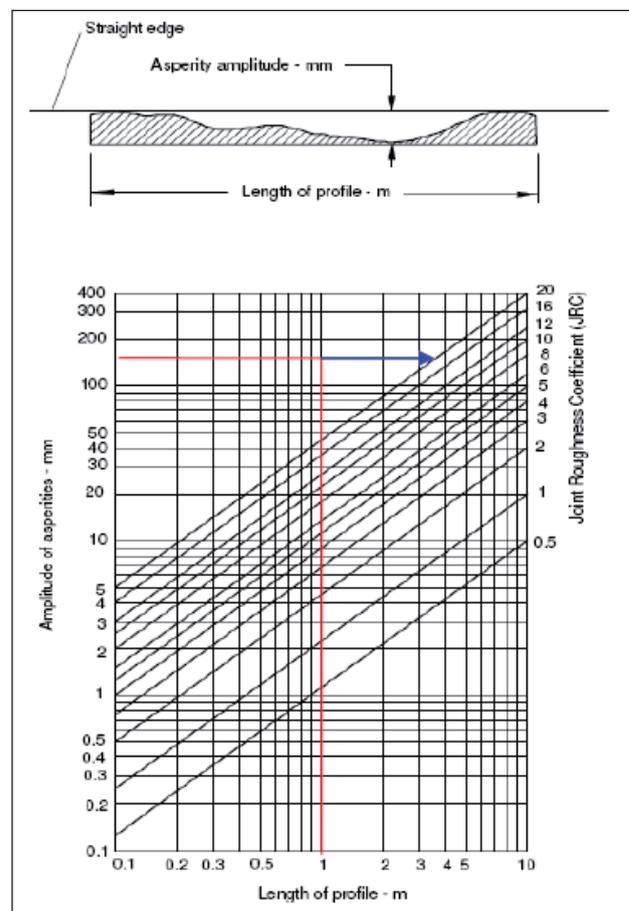


Figura 20 – Estimativa do valor de JRC_0 por meio do valor médio da amplitude para a escala de 1 m (Barton 1982, in Sá 2010).

Em campo estimou-se em 10 m o comprimento de onda das ondulações das superfícies cisalhadas na escala das bancadas. Para o cálculo do JRC para esse comprimento utilizou-se a equação proposta por Barton & Bandis (1982), que fornece a seguinte correção de escala:

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,02 JRC_0} \quad (2)$$

Onde o JRC_0 e L_0 estão referidos à escala das leituras e JRC_n e L_n , a escala cujos valores se quer estimar (dimensões *in situ*).

Logo, se os valores de:

$$JRC_0 = 20,$$

$$L_0 = 1 \text{ m}$$

$$\text{e } L_n = 10 \text{ m,}$$

utilizando a equação 2 tem-se um valor corrigido de JRC_n igual a 8.

6.3 Estimativa do JCS

Segundo Barton & Choubey (1977), o valor do JCS pode ser determinado pelo martelo de Schmidt, utilizando-se uma relação proposta por Deere & Miller (1966) para se estimar a resistência à compressão uniaxial. Porém, no presente estudo adotou-se o valor da resistência à compressão uniaxial do maciço (BVP 2009, *in* Sá 2010), cuja expressão, conforme o critério de Mohr-Coulomb, é:

$$JCS = \sigma_{cm} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3)$$

Foram admitidos os valores médios dos parâmetros de resistência para a máfica decomposta, quais sejam: $c = 94 \text{ kPa}$ e $\phi = 26^\circ$. Aplicando-se, pois, a equação 3, obtém-se o valor de JCS para a máfica decomposta:

$$JCS = 300 \text{ kPa}$$

Os parâmetros de resistência encontrados para a zona de cisalhamento pelo modelo de Barton & Bandis (1982) estão resumidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de resistência calculados pelo Modelo de Barton & Bandis e adotados nas análises de estabilidade (Sá 2010).

Tipologia de Contato		Peso Específico Seco γ (kN/m ³)	Peso Específico Saturado γ (kN/m ³)	JRC	JCS (kPa)	Ângulo de Atrito ϕ_r (°)
Zona de Cisalhamento Decomposta	ZC-MD	19	20	8	300	18

7 RETROANÁLISES PARA AJUSTES DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DA SUPERFÍCIE DA RUPTURA

Como visto, esse evento envolveu uma deformação lenta através do contato cisalhado de lapa. Essa superfície apresenta-se com uma espessura em torno de 2 m, muito alterada e com baixa resistência, configurando uma ruptura plano-circular.

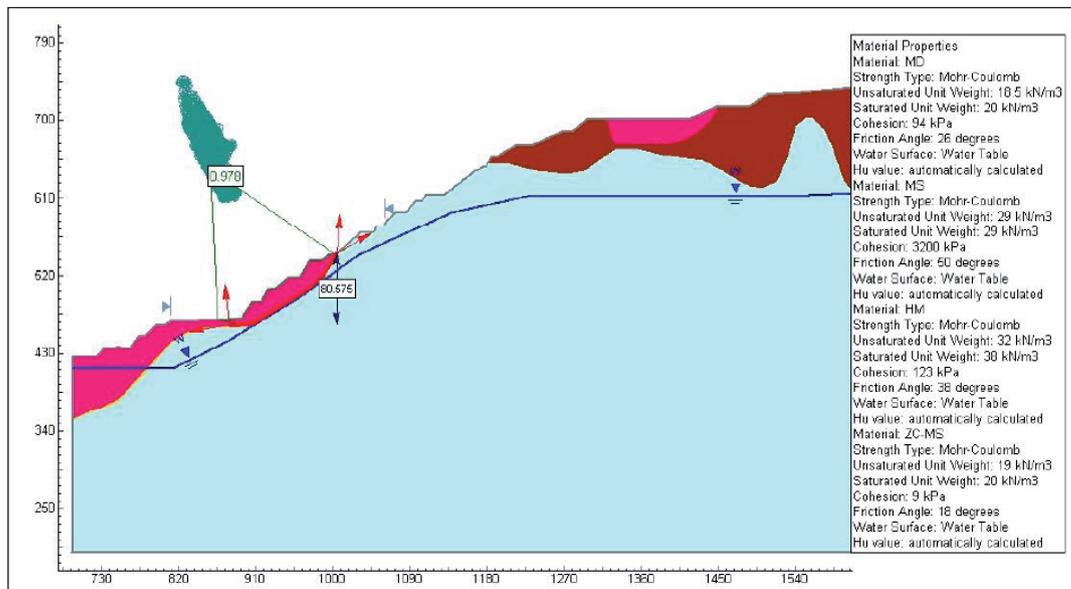


Figura 22 – Retroanálise da Seção da Ruptura Talude Sudeste – Critério de Mohr-Coulomb (Sá 2010).

Na Figura 23 é apresentado o fator de segurança obtido considerando-se os parâmetros de melhor ajuste para a hematita friável (HM). É possível observar um FS de 1,051 pelo Método de Spencer e de 0,956 pelo Método GLE/Morgenstern-Price com os parâmetros $c = 125$ kPa e $\phi = 42^\circ$ para a hematita friável. Essa retroanálise foi

realizada variando-se os valores de c e ϕ da hematita friável (HM) e fixando-se os demais parâmetros. Na Tabela 5 estão apresentados os resultados em termos de Fatores de Segurança. Os valores que forneceram os Fatores de Seguranças mais próximos da unidade foram: $c = 125$ kPa e $\phi = 42^\circ$. (Sá 2010).

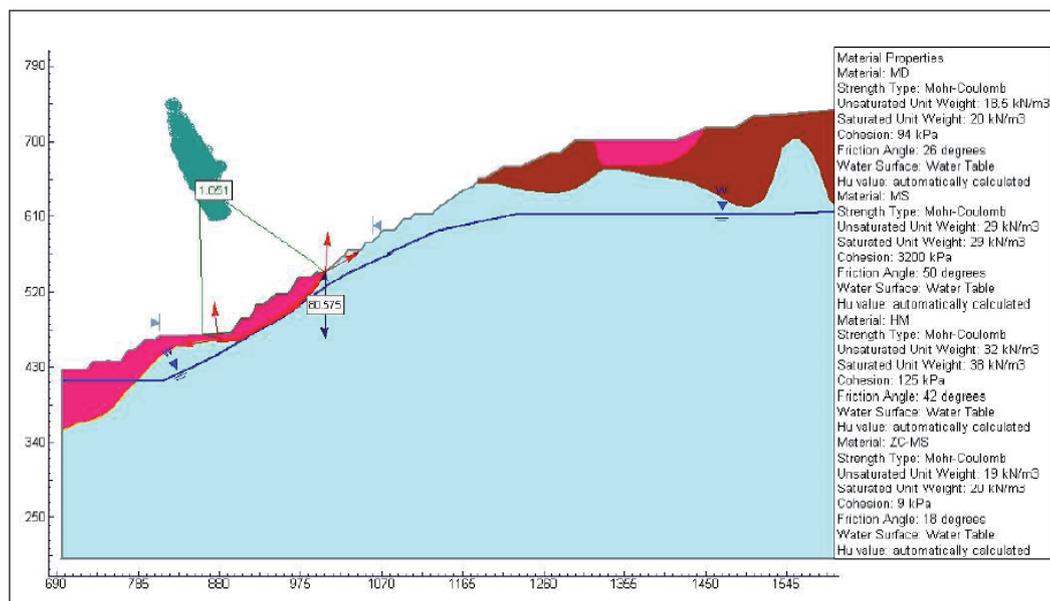


Figura 23 - Retroanálise do talude sudeste: resultado para os parâmetros de melhor ajuste da HM - critério de Modelo Mohr-Coulomb (Sá 2010).

Tabela 5 - Resultados (FSs) para a retroanálise com critério de Mohr-Coulomb para os parâmetros da HM (Sá 2010).

Parâmetros Geomecânicos		Fator de Segurança (FS)	
Coesão (c) kPa	Ângulo de atrito (f)	Método Spencer	Método GLE
100	38	0,959	0,875
100	39	0,965	0,890
100	40	0,989	0,899
100	41	0,990	0,916
100	42	1,026	0,924
110	42	1,016	0,935
115	42	1,040	0,941
120	42	1,045	0,951
125(*)	42(*)	1,051(*)	0,956(*)

(*) Parâmetros que forneceram o melhor ajuste (FS ≈ 1)

Posteriormente ao ajuste dos parâmetros para a hematita friável, fixaram-se os mesmos ($c = 125$ kPa e $\phi = 42^\circ$) e foram retroanalísados os parâmetros de Barton & Bandis da zona de cisalhamento

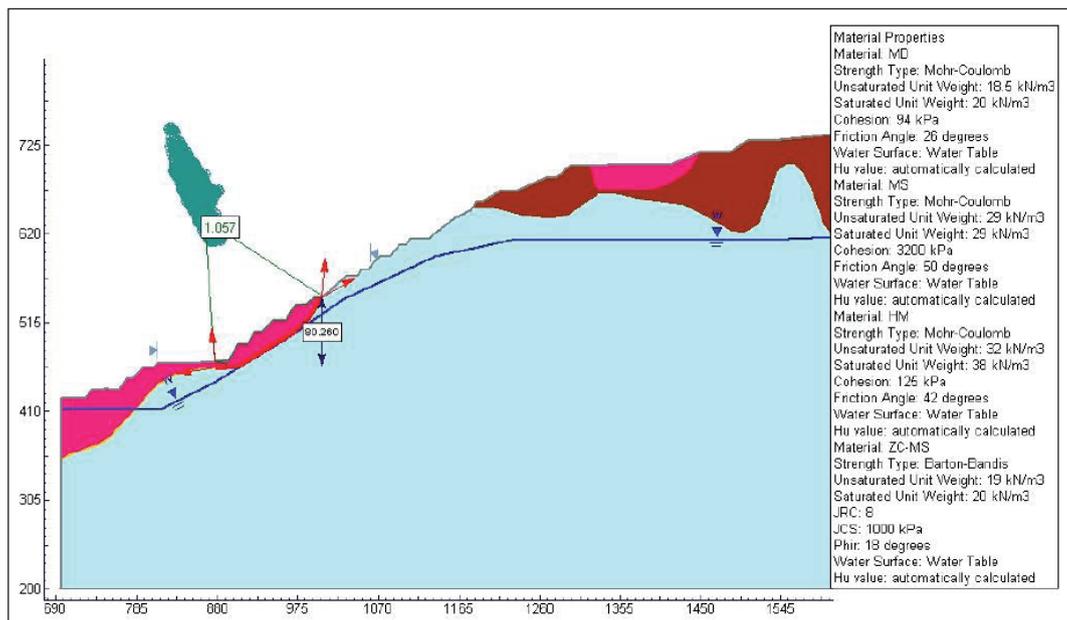
(ZC-MD). Os resultados estão apresentados na Tabela 6, onde é possível verificar que o melhor valor de parâmetros para um FS próximo da unidade foi: JCS = 1,000 kPa (Sá, 2010).

Tabela 6 – Resultados (FSs) para a retroanálise com o critério de Barton & Bandis para a ZC-MD (Sá 2010).

Litologia	c (kPa)	Ângulo de atrito f
MD	94	26
HM	100	42
HM	125(*)	42(*)
JCS (kPa)	FS - Método Spencer	FS - Método GLE
300	0,994	1,025
300	1,032	0,940
320	1,032	0,940
350	1,032	0,940
400	1,033	0,941
650	1,043	0,951
700	1,040	0,956
900	1,048	0,975
1000(*)	1,057(*)	0,977(*)

(*) Parâmetros que forneceram o melhor ajuste (FS \approx 1)

A Figura 24 apresenta a seção retroanalizada utilizando o critério de Barton & Bandis de melhor ajuste dos parâmetros para superfície de ruptura representada pela zona de cisalhamento (ZC-MD).

**Figura 24** - Retroanálise do Talude Sudeste, melhor ajuste para ZC-MD – Critério de Barton & Bandis (Sá 2010).

Nessa seção, o melhor ajuste para a superfície de ruptura (ZC-MD) foi obtido com JCS = 1.000 kPa: um Fator de Segurança igual a 1,057 pelo Método de Spencer e igual a 0,997 pelo Método GLE/Morgenstern-Price (Tabela 6).

8 CONCLUSÕES

Este item apresenta os resultados obtidos e considerações acerca do modo de ruptura e parametrização da superfície de ruptura e litotipos associados.

Segundo Sá (2010), trata-se de uma superfície de ruptura do tipo plano-circular, iniciando planar no topo e à medida que tangencia a inflexão da máfica de lapa passa a ter um comportamento circular.

Para estudo e retroanálise desta ruptura, foi empregado o critério de resistência de Mohr-Coulomb, para os ajustes dos parâmetros de resistência da hematita friável (HF) e máfica decomposta (MD), e de Barton & Bandis para os ajustes dos parâmetros de resistência da superfície de contato definida pela zona de cisalhamento (ZC-MD) localizada entre o pacote de hematita friável e a rocha metabásica (máfica decomposta - MD) encaixante dos taludes de lapa.

Para o material que compõe a zona de cisalhamento (ZC-MD) foi adotado o ângulo de atrito básico obtido através de resultado do ensaio de *Ring Shear* (ângulo de atrito residual), uma vez que não foi possível amostrar a máfica decomposta da zona de cisalhamento (ZC-MD). Este parâmetro residual, obtido através do ensaio de cisalhamento *Ring Shear*, foi comparado a valores de coesão e ângulo de atrito anteriormente praticados por empresas de consultorias de forma empírica ou sob influência de sua expertise e até de campanhas de ensaios preliminares. Como estes resultados foram muito próximos, pode-se assim validá-los, demonstrando que este ensaio apresentou um resultado confiável para a coesão e ângulo de atrito residual utilizados para a zona de cisalhamento - ZC-MD (Sá 2010).

Através dos valores obtidos pelos ensaios de laboratório, do mapeamento das rugosidades / ondulações da superfície de ruptura (superfície de cisalhamento da encaixante no contato de lapa), dos cálculos do JRC e JCS através do Modelo de Barton (1982) e de suas aferições pelas retroanálises realizadas nesta ruptura, pode-se recalibrar os parâmetros de resistência anteriormente utilizados por unidade litológica, através da aplicação do *Software Slide 5.0*. Com isto foi possível trabalhar com valores dos parâmetros de resistência,

com maior confiabilidade e representatividade, assim como entender melhor o comportamento desta ruptura.

Como relação à superfície de cisalhamento, anteriormente em retroanálises não se utilizava o critério de Barton & Bandis. As análises de estabilidade eram realizadas somente com o critério de Mohr-Coulomb. Os parâmetros de resistência para os litotipos estudados, máfica decomposta (MD), hematita friável (HF) e máfica decomposta da zona de cisalhamento (ZC-MD), foram ajustados tanto pelo critério de Mohr-Coulomb quanto pelo critério de Barton & Bandis. A utilização do critério de Barton & Bandis para ajuste dos parâmetros de resistência da zona de cisalhamento foi possível devido ao minucioso mapeamento das amplitudes das rugosidades em campo, por meio de metodologia adequada. Esse nível de detalhamento ainda não havia sido empregado na mina N4E e, conseqüentemente, não se levava em consideração tal aspecto nas análises de estabilidade e retroanálises anteriores (Sá 2010).

Através deste estudo de caso foi possível observar que a ruptura não foi brusca em função do JCS = 1.000 kPa e da inflexão no pé do talude, no nível 460, causando grandes deformações em escalas métricas com estufamento do piso do banco 460 em até 3m. Segundo Sá, 2010, outras rupturas que ocorrem na mesma mina, porém em setores diferentes, se deram de forma planar e bruscas. A inflexão da rocha metabásica no contato de lapa corroborou diretamente para o modo e desenvolvimento desta ruptura. Sendo assim, através das retroanálises realizadas, foi possível aferir os parâmetros de resistência e recalibrá-los com maior precisão para utilizações futuras.

REFERÊNCIAS

- Barton, N. R. & Choubey, V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, **10**(1-2):1-54.
- Barton, N. 1982. Shear strength investigations for surface mining. In: C.O. Brawner (ed.), *Stability in surface mining*, Proceedings of 3rd International Conference, Vancouver, British Columbia, p. 171-196. Society of Mining Engineers. AIME, New York.

- Barton, N. & Bandis, S. 1982. Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock. In: R.E. Goodman & F.E. Heuze (eds), *Issues in Rock Mechanics*. In Proceedings of 23rd US Symposium of Rock Mechanics, Berkeley, California, p. 739-760. AIME, New York.
- BVP Engenharia Ltda. 2008. Mapeamento litoestrutural e geomecânico da Mina de N4E, Serra dos Carajás – PA. Relatório Interno, Carajás – PA, 84 pp.
- BVP Engenharia Ltda. 2009. Consolidação e análise dos resultados dos ensaios geotécnicos de laboratório realizados nas Minas de N4E, N5E e N4WN - VL 707.01-09-E-CA-RT-19-002. 51 pp.
- BVP Engenharia Ltda. 2009. Detalhamento geotécnico das rochas máficas decompostas e hematitas moles da Mina N4E e correlação com ensaios laboratoriais - VL 707-01-09-E-CA-RT-11-003-00. 23 pp.
- CESP. 2006. Relatório LEC-037/06. Mina de Ferro Carajás (CVRD) – Ensaio geotécnicos para definição de parâmetros de estabilidade das pilhas de estereis e taludes de mina (Parte 1). Ilha Solteira – SP. 60 pp.
- CESP. 2006. Relatório LEC-038/06. Mina de Ferro Carajás (CVRD) – Ensaio geotécnicos para definição de parâmetros de estabilidade das pilhas de estereis e taludes de mina (Parte 2). Ilha Solteira – SP. 121 pp.
- CESP. 2009. Relatório LEC-006/09 – Mina de Ferro Carajás (CVRD) – Ensaio geotécnicos em amostras indeformadas de solo e de rocha extraídas das cavas N4E, N4W e N5E. Ilha Solteira – SP. 114 pp.
- Macambira, M.J.B.; Ramos, J.F.F.; Assis, J.F.P.; Figueiras, A.J.M. 1990. Projeto Serra Norte e Projeto Pojuca. Convênio SEPLAN/DOCEGEO/UFPA/DNPM. Relatório final. 150 pp.
- RocScience. SLIDE 5.0 Tutorials. www.rocscience.com.
- RocScience. DIPS 5.0 Tutorials. www.rocscience.com.
- RocScience. ROCKDATA 3.0 Tutorials. www.rocscience.com.
- Sá, G. 2010. Caracterização litoestrutural e parametrização geomecânica das superfícies de ruptura em taludes da Mina de N4E – Carajás/PA. Dissertação de Mestrado. UFOP, Ouro Preto – MG, 172 pp.