

ÁREAS DE RISCO PARA A ENGENHARIA EM CALCÁRIOS CÁRSTICOS: MODELAGEM GEOLÓGICA E SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS

GEOHAZARDS FOR ENGINEERING IN KARSTIC LIMESTONES: GEOLOGICAL MODELING AND
CONSTRUCTION SOLUTIONS

Álvaro Rodrigues dos Santos (santosalvaro@uol.com.br)

Geólogo formado pela Universidade de São Paulo; ex-diretor de Planejamento e Gestão do IPT; autor dos livros “Geologia de Engenharia: Conceitos, Método e Prática”, “A Grande Barreira da Serra do Mar”, “Cubatão” e “Diálogos Geológicos” e “Enchentes e Deslizamentos: Causas e Soluções”, “Manual Básico para Elaboração e Uso da Carta Geotécnica”, “Cidades e Geologia”. Consultor em Geologia de Engenharia, Geotecnia e Meio Ambiente

Resumo

Diante do crescimento da ocupação física de seu país a engenharia brasileira precisa alertar-se e preparar-se para um crescente enfrentamento de riscos geológico-geotécnicos colocados por feições calcárias cársticas. A experiência já acumulada nesse tema indica que a escolha das medidas de engenharia que possam ser adotadas dependem radicalmente para seu sucesso da qualidade do modelo geológico que deve ser elaborado para cada caso em particular. O trabalho expõe diversos aspectos do fenômeno e registra a experiência do autor no estudo e tratamento de problemas cársticos na região de Cajamar, município da Região Metropolitana de São Paulo.

Abstract

Taking account the growth of the physical occupation of the country, the Brazilian engineering needs to be alert and prepared to face the increased of geological and geotechnical risks posed by karstical limestone features. The experience already accumulated shows that the choice of engineering providences that can be adopted depend radically for its success of the quality of the geological model that should be developed for each particular case. The article presents various aspects of the phenomenon and records the author's experience in the study and treatment of karstic problems in the region of Cajamar, county of São Paulo Metropolitan Region, BR.

Palavras-chave: calcário, risco, carste, abatimento, dolina, karst, subsidence, sinkhole

Introdução

Com o progressivo crescimento das cidades e da ocupação física do território brasileiro por atividades próprias da agricultura, da mineração e da infraestrutura civil, e consideradas as numerosas expressões calcárias de nossas formações geológicas, tem-se multiplicado os problemas e os riscos associados à presença de estruturas e fenômenos cársticos.

Bastante exigida nos EUA, países europeus e asiáticos, a Geotecnia Cárstica constitui, no entanto, uma área técnica ainda incipiente para a Geologia de Engenharia e a Engenharia Geotécnica brasileiras, pelo que se torna imperativa e fundamental uma maior troca de experiências profissionais com o problema, como também uma atenção especial a estudos e pesquisas que se aprofundem na compreensão dos fenômenos cársticos e nas soluções de engenharia mais adequadas para enfrenta-los.

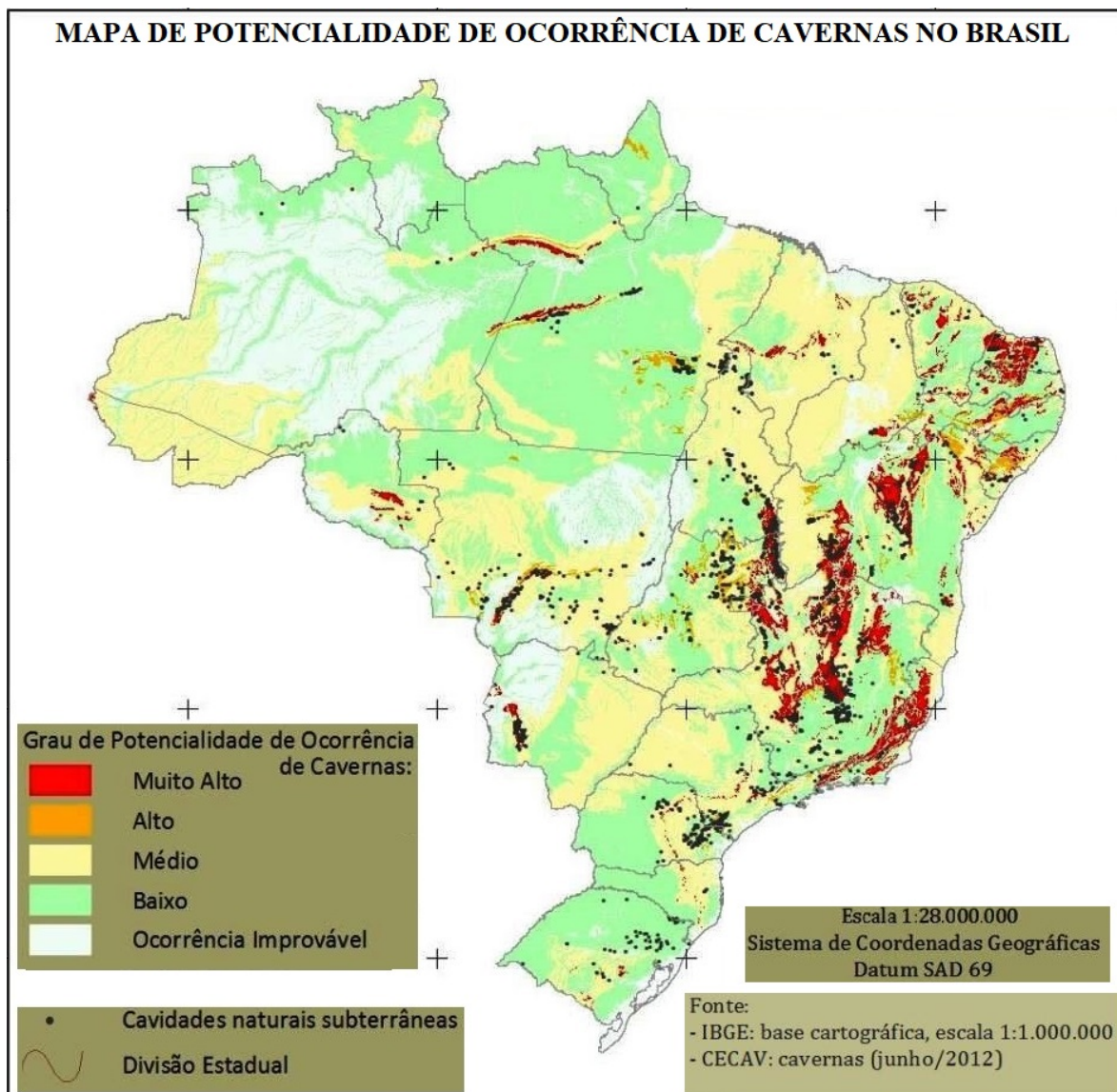
Esse é o exato objetivo desse artigo, colaborar para trazer o tema para a pauta da Geotecnia brasileira e dar conhecimento mais amplo sobre trabalhos que o autor vem conduzindo, com destaque ao município de Cajamar no Estado de São Paulo, e às conclusões geológicas e soluções de engenharia que, a propósito, tem sido desenvolvidas.

Rápido histórico de problemas geotécnicos associados a fenômenos cársticos no Brasil

Com diferentes consistências em sua descrição foram já relatados os seguintes casos de subsidências ou fenômenos cársticos no país: Mairinque - SP, Cajamar – SP, Sete Lagoas - MG, Almirante Tamandaré PR, Bocaiúva do Sul – PR, Colombo – PR, Vazante – MG, Teresina - PI, Lapão – BA, Vespasiano – Confins – MG, Jaíba – MG, Irecê – BA, Vale do Ribeira - SP. Muitos outros eventos similares por certo já aconteceram por todo o país, mas que, por motivos vários,

não obtiveram repercussão de mídia e/ou devida atenção de especialistas para sua análise e registro técnico.

Cajamar e Mairinque estão situadas em rochas calcárias do Grupo São Roque, Sete Lagoas e Vazante em calcários do Grupo Bambuí, Lapão em calcários do Grupo Una, as cidades paranaenses em calcários do Grupo Açungui. As subsidências verificadas em Teresina estão associadas a lentes calcárias pertencentes à Bacia Sedimentar do Parnaíba.



Não há um mapeamento de corpos calcários no Brasil. Cabe como referência razoável dessas ocorrências o Mapa de Potencialidades de Ocorrência de Cavernas acima reproduzido.



Fig 1 - O famoso Buraco de Cajamar, colapso ocorrido em agosto de 1986 no bairro de Lavrinhas.
Foto arquivo IPT

Os diferentes processos de carstificação

As feições de dissolução cárstica podem ter origem hipogênica, quando as dissoluções são promovidas por águas interiores hidrotermais ácidas ascendentes, ou epigênica, quando as dissoluções são promovidas por águas meteóricas ácidas que se dirigem para um determinado nível hidrológico de base regional. Não são raros carstes de origem hipogênica retrabalhados por processos epigênicos.

As rochas calcárias são rochas carbonáticas, em que predominam os carbonatos de cálcio (CaCO_3) e magnésio (MgCO_3), que as compõem em diferentes proporções, formando então os calcários calcíferos (mais ricos em carbonato de cálcio) e os calcários dolomíticos (mais ricos em carbonato de magnésio). No âmbito dos processos epigênicos as águas de chuva (H_2O) interagem com o gás carbônico (CO_2) do ar produzindo um ácido fraco, o ácido carbônico (H_2CO_3). Essas águas assim levemente acidificadas, ao encontrar um maciço calcário fraturado, penetram por essas discontinuidades e vão lentamente, através do tempo geológico, dissolvendo a rocha e produzindo vazios que podem evoluir para grandes fendas, cavernas e canais por onde fluem as águas interiores. A maior parte das famosas e belas cavernas brasileiras, com suas estalactites e estalagmites, são feições originadas desse fenômeno de dissolução de rochas calcárias.

Os problemas geotécnicos e ambientais próprios de terrenos cársticos

O principal fenômeno cárstico de interesse da engenharia é o abatimento, brusco ou lento, de terrenos. Esses abatimentos, que podem destruir por completo edificações de superfície, colocando em risco patrimônios e vidas humanas, podem ser decorrentes do colapso de um teto de caverna, de contínua migração do solo de cobertura para o interior de vazios na interface solo/rocha ou na própria rocha calcária.

Tão mais prováveis serão os abatimentos quanto mais próximos da superfície estejam os vazios do maciço rochoso ou os vazios da zona de interface solo/rocha e do próprio horizonte de solos sobreposto à rocha sã.

Em boa parte do território brasileiro, por decorrência de seu clima tropical úmido, as rochas calcárias cársticas estão cobertas por uma camada de solos de espessura variada, são os chamados carstes cobertos, o que torna muito comum o abatimento decorrente de vazios residuais na camada de solos ou vazios resultantes da migração de solo para o interior de vazios subterrâneos. Carstes exumados, ou seja, calcários cársticos em superfície ou muito próximos à superfície, são mais comuns em climas áridos, onde as condições ambientais inibem a ação do intemperismo químico produtor de solos.

Um outro grande risco advindo da ocupação de terrenos cársticos está relacionado à construção de reservatórios de água (barragens para produção de energia ou abastecimento). As águas do reservatório podem migrar em grande vazão para os vazios da rocha calcária, não só impedindo o completo enchimento do lago, como provocando variações de nível, fluxo e pressões no lençol subterrâneo, o que, de sua parte, coloca em risco a própria obra da barragem, como também outras edificações próximas.

Do ponto de vista ambiental os terrenos cársticos, pela possibilidade de franca e rápida comunicação entre águas superficiais e águas subterrâneas, obrigam um redobrado cuidado para que se evite a contaminação do lençol freático. Nessas condições deverá ser severamente evitada em regiões cársticas a instalação de empreendimentos geradores de riscos de contaminação do solo e da água subterrânea, como indústrias utilizadoras ou produtoras de produtos químicos perigosos, disposição precária de lixo ou resíduos contaminantes no meio rural e urbano, cemitérios, depósitos vários de substâncias contaminantes, etc.

O importantíssimo fator hidrogeológico na evolução dos fenômenos cársticos

Quase sempre a aceleração de um processo de afundamento de terreno em regiões cársticas está associada a rebaixamentos do lençol de água subterrâneo, ou como consequência de um longo período de estiagem pluviométrica ou como decorrência direta de algum tipo de interferência humana, especialmente uma excessiva exploração de água subterrânea através de poços profundos. O rebaixamento do lençol freático implica na quebra do equilíbrio hidrostático subterrâneo e no direcionamento de redes de fluxo para o interior das cavidades com decorrente carreamento de solos.

A importância da modelagem geológica

Ainda que os diferentes terrenos cársticos tenham elementos estruturais e fenomenológicos em comum, a experiência prática nacional e internacional tem mostrado ser essencial a elaboração de um exato modelo geológico específico para cada caso com que os empreendimentos humanos se defrontem. Será esse modelo geológico - no qual devem ser destacadas em importância a distribuição espacial das diversas feições de interesse, os elementos fenomenológicos implicados em possíveis subsidências e a dinâmica hidrogeológica natural e induzida - que orientará as decisões de engenharia a serem tomadas. Sem a referência de um modelo geológico fatalmente essas decisões ficarão sujeitas a uma considerável margem de insegurança, portanto incorporando sérios riscos construtivos e operacionais para o pretendido empreendimento.

Terrenos calcários, áreas de risco potencial para a engenharia e o meio ambiente

Depreende-se que os terrenos calcários, pela possibilidade de apresentar feições cársticas, devem ser entendidos como típicas **áreas de risco** para o meio ambiente e para a ocupação humana por obras de engenharia: cidades, barragens, termoelétricas, instalações industriais, estradas, dutos, linhas de transmissão, etc., sugerindo, portanto, cuidadosa investigação anterior a qualquer decisão de engenharia. De tal forma que, detectadas e estudadas as feições cársticas, ou o empreendimento humano em questão possa ser deslocado para situações geologicamente mais seguras ou, impedido ou desaconselhado esse deslocamento, possa-se adotar as medidas necessárias para que acidentes e futuros problemas venham a ser evitados.

Decisões mais comuns frente à constatação de feições cársticas no terreno de interesse

Como já referido, uma vez constatadas feições cársticas que determinem risco para o empreendimento a ser implantado, a primeira opção que se apresenta é o deslocamento desse empreendimento para área geológica segura, o que em algumas situações poderá ser viabilizado com simples reposicionamento espacial do empreendimento dentro da própria gleba a ser ocupada. Uma vez essa decisão não sendo possível, cabem duas decisões alternativas subsequentes: a escolha do tipo de fundação mais apropriado (no caso de edificações) e a determinação de se tratar ou não as cavidades subterrâneas. Quanto às fundações, esse tema será considerado em maior detalhe mais adiante nesse trabalho. Quanto a um possível tratamento dos vazios, a medida mais comumente cogitada é a injeção de calda de cimento, com o que se procuraria obturar os vazios subterrâneos envolvidos na evolução do fenômeno de subsidência. A experiência tem mostrado que esse tipo de tratamento deve exigir, para sua adoção e cálculo, um

perfeito conhecimento do modelo geológico com que se está lidando. Quando os vazios são extensos e encontram-se no próprio maciço calcário rochoso inferior ao horizonte de solo os volumes injetados tendem a ser enormes e com resultados difíceis de serem avaliados. O melhor resultado que se pode esperar das injeções de calda de cimento está na obturação de vazios quando esses estão circunscritos à interface solo/rocha. Note-se que o objetivo das injeções não está em uma pretensa consolidação geotécnica dos horizontes subterrâneos carstificados, mas em impedir a continuidade dos processos de carreamento de solos para o interior de vazios e no decorrente impedimento que esses vazios migrem em direção à superfície do terreno ou estruturas de fundação.

Obviamente, em dependência do grau de extensão da carstificação presente, resta a alternativa última de se alterar o layout de ocupação da gleba considerada ou até de se cancelar a ocupação do local por empreendimentos de engenharia.

A caracterização geológica dos terrenos cársticos

No Brasil são abundantes os terrenos calcários, e nesses terrenos não são raras as feições cársticas. A identificação dessas feições, pelo levantamento do histórico regional e por exame superficial dos terrenos, é um procedimento fácil e corriqueiro para a geologia. Como também são conhecidas e eficientes as técnicas geológicas diretas (sondagens mecânicas) e indiretas (sondagens geofísicas elétricas) para o mapeamento das condições subterrâneas dos horizontes de solos superiores e dos maciços calcários, identificando a existência ou não de vazios, sua distribuição, seu comportamento hidrogeológico, etc. No entanto, falta ainda que esses procedimentos sejam definitivamente incorporados como uma providência normal e rotineira aos estudos preliminares de obras de engenharia em terrenos calcários, como também aos planos de gestão urbana (Planos Diretores, Cartas Geotécnicas) de cidades já instaladas sobre esse tipo de terreno. De modo que, nesse último caso, esses planos de gestão incorporem, por sua vez, ações de monitoramento permanente e de cuidados preventivos (por exemplo, a proibição da exploração da água subterrânea, ou ao menos sua exploração em condições controladas e limitadas), assim como planos contingenciais de Defesa Civil.

Estudo de caso: Cajamar – SP. Revisão do modelo geológico e soluções de engenharia adotadas

A região de Cajamar, município pertencente à Região Metropolitana de São Paulo, apresenta feições próprias de um típico carste coberto, com a rocha calcária sã sobreposta por um pacote de solos de alteração de ordem de dezenas de metros de espessura. São já razoavelmente conhecidos da engenharia paulista os problemas geológico-geotécnicos advindos das feições cársticas presentes no município.

Com vários eventos já registrados, por certo os dois casos mais emblemáticos dessa tipologia de problemas foram o famoso Buraco de Cajamar, afundamento de grande expressão ocorrido em 1986 no bairro de Lavrinhas dessa cidade, e o comprometimento das fundações da moderna fábrica da empresa de cosméticos Natura, no ano de 1999, situada ao Km 29 da Rodovia Anhanguera.

Note-se que tem sido crescentemente comuns na região casos de impossibilidade de enchimento de estacas hélice contínuas por total fuga do concreto de enchimento para o interior de feições cársticas situadas à base do furo.



Fig 2 -.Moderna fábrica da Natura contígua à Via Anhanguera, bairro de Polvilho em Cajamar – SP, afetada por fenômenos cársticos. Notar a associação com o vale do rio Juqueri. Foto Natura.

O modelo geológico originalmente adotado para Cajamar

A partir dos estudos realizados pelo IPT a propósito do Buraco de Cajamar adotou-se generalizadamente a hipótese pela qual os vazios originadores dos fenômenos de abatimento situavam-se no interior do maciço rochoso calcário são. Em determinadas circunstâncias haveria a migração de solos para esses vazios, o que os reproduziria na base da camada de solos. Esses vazios assim formados no próprio pacote de solos sobreposto à rocha são poderiam com o tempo migrar em direção à superfície e propiciar um colapso da capa superior de solos.

A adoção desse modelo geológico clássico (vide fig. 3) deu-se em um momento em que a experiência brasileira no trato dessa questão era praticamente nula, tendo a equipe do IPT que trabalhava no caso sido assessorada por dois geólogos do USGS – United States Geological Survey, especialmente convidados para tanto. Esses excepcionais consultores naturalmente aportaram à análise sua experiência em abatimentos cársticos ocorridos no território norte-americano. Dessa forma, foi assumido na ocasião que o grande abatimento cárstico ocorrido teria sido fruto da geração de vazios no pacote superior de solos por uma contínua migração de solos para o interior de cavidades existentes no interior do maciço rochoso sotoposto. O modelo geológico referido está descrito em meu livro “Geologia de Engenharia: Conceitos, Método e Prática” – 2ª edição, no Caso de Aplicação nº 7.

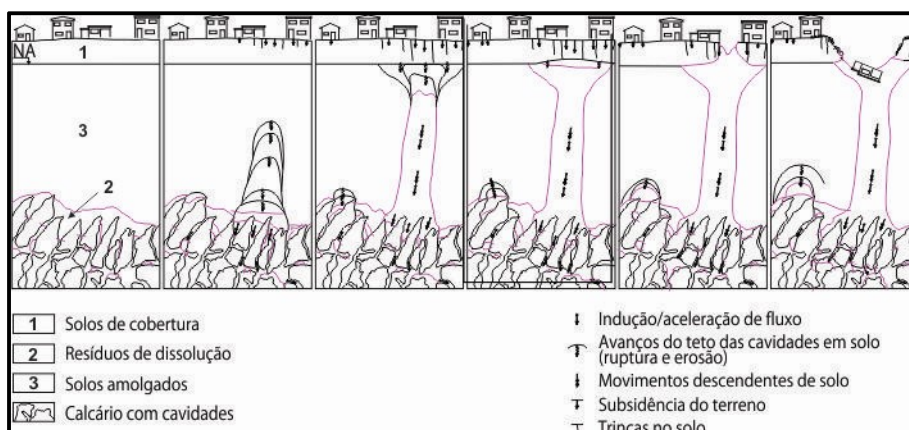


Fig 3 - O modelo originalmente proposto pelo IPT, indicando um processo de migração de solo para os vazios em rocha e a migração do vazio formado em direção à superfície

Como decorrência desse modelo, na prática não se recomendaria o tratamento dos vazios cársticos por injeção de calda de cimento (ou produtos similares), pois que quando essa rede de vazios situa-se no interior do maciço rochoso os volumes injetados são normalmente absurdamente grandes e com resultados imponderáveis.

Um novo modelo geológico impunha-se como necessário

Os novos estudos que tenho levado a efeito na região de Cajamar, com a realização de inúmeras sondagens diretas e indiretas em apoio a investigações geológico-geotécnicas para a instalação de grandes empreendimentos, um melhor conhecimento das peculiaridades fisiográficas do município e municípios vizinhos, entrevistas sobre eventuais problemas de abatimentos de terrenos e um melhor entendimento dos processos geológicos pretéritos de metamorfose das rochas regionais, conduziram-me a questionar a validade do modelo até então proposto levando-me a construir um novo modelo geológico para as feições cársticas da região e fenomenologia associada.

Em resumo, o principal ponto de partida para a concepção do novo modelo geológico foi a constatação que o maciço calcário propriamente dito da região estudada decididamente não é generalizadamente cárstico, ou seja, não apresenta comuns feições cársticas em seu interior e nem registros clássicos dessas feições em sua superfície, condição que contradiz em essência o modelo geológico inicial.

Geologicamente a região de Cajamar é formada por um pacote de rochas metamórficas do Grupo São Roque, Proterozóico Superior, idades entre 600 milhões a 1 bilhão de anos. Nesse pacote predominam, em sequência estratigráfica da base para o topo, micaxistos, filitos, metacalcários e metadolomitos e metarenitos. Não são raras as intercalações de quartzitos e metanfilitos no interior dos xistos e dos filitos.

Importante ter em conta que esse pacote de rochas (originalmente sedimentares formadas em ambientes marinhos de águas rasas) está intensamente dobrado, pelo que, a depender da relação entre a geometria dessas dobras e a superfície atual do terreno, essas diferentes litologias podem ocorrer lado a lado, como, por exemplo, em uma situação espacial em que o ápice de uma dobra é interceptado pela atual superfície do terreno.

Principais constatações que conduziram à concepção de um novo modelo

- Não há na região de Cajamar evidências clássicas de relevo (dolinas, furnas...) que denotem fenômenos cársticos pretéritos ou recentes na região. Ou seja, não há respostas em superfície, ao menos nítidas e clássicas, a esse tipo de fenômeno. Onde, até hoje, ter sido praticamente impossível se trabalhar com mapeamentos de risco preventivos na região com base na identificação dessas feições.
- O conhecimento maior da região e entrevistas com antigos moradores indicam que não há também na região outras evidências específicas clássicas como cavernas, sumidouros, lapas, etc.;
- Na totalidade de pedreiras de calcário ativas e abandonadas não há evidências generosas de feições cársticas no interior do maciço calcário são (vide foto); via de regra os maciços são compactos e consistentes;
- Nos furos de sondagem a percussão que encontram vazios ou trechos de quase nula resistência à penetração, sistematicamente essas feições situam-se imediatamente acima de topo rochoso do maciço calcário são, no interior da interface solo/rocha, condição em que é comum acontecer total perda da água usada na execução da sondagem;
- São comuns na região casos de total fuga do concreto utilizado no preenchimento de estacas hélice contínuas. Essas fugas acontecem quando a parte inferior do cilindro escavado está no interior ou muito próxima da zona de interface solo/rocha.
- Os pacotes de solos superficiais e solos de alteração superiores ao maciço são atingem normalmente espessuras que vão de 20 a 80 metros.
- É de extrema irregularidade a superfície de contato solo-rocha, podendo comportar desníveis entre pontos próximos na ordem de algumas dezenas de metros. Vide croqui.
- Do ponto de vista do relevo, a maior probabilidade de se encontrar essas feições cársticas está em zonas baixas e faixas ao longo de fundos de vales que, em superfície, podem ou não conter cursos de água em seu talvegue.

- Nos furos de sondagem rotativa que se aprofundam na rocha são raros ou de pequeno porte os vazios encontrados, sempre mais relacionados à intensidade de fraturamento e a fraturas abertas na zona superior do maciço do que a fenômenos extensivos de dissolução;
- As injeções de calda de cimento executadas mostram que sistematicamente o trecho em rocha são toma volumes muito pequenos de calda, mesmo em traços de alta diluição e pressões elevadas;
- As sondagens elétricas (eletro-resistividade) não estão se mostrando resolutivas para a identificação de potenciais vazios em profundidades inferiores a 70m;
- Não se tem conhecimento de afundamentos naturais em terrenos intocados pelo homem. Todos os afundamentos ou acomodações de terreno registrados até hoje foram associados a algum tipo de ocupação do terreno e à extração de água subterrânea por poços profundos em pontos próximos, concomitantemente, ou não, a longos períodos de estiagem pluviométrica.
- As exposições proporcionadas por obras de terraplenagem nas áreas baixas e vales onde se concentram feições de vazios cársticos em profundidade mostram os estratos metamórficos com alta inclinação e direção aproximadamente L – W e L - SW, coincidente com as direções estruturais regionais e com o posicionamento dos alongados corpos calcários da região (vide Fig. 6);
- As sondagens realizadas nessas áreas baixas mostram que, independentemente das litologias (xistos, filitos, metarenitos...) presentes em superfície, sistematicamente encontra-se a rocha calcária são imediatamente abaixo do pacote de solos de alteração. As sondagens rotativas que penetram esse substrato de rocha calcária são chegaram a perfurá-lo até profundidades de algumas dezenas de metros, não atingindo seu limite inferior;
- De todos os furos de sondagem que se aprofundaram na rocha, e foram muitos, não houve uma evidência sequer de solo migrado para fendas abertas na rocha calcária;
- Sondagens e exposições por terraplenagem mostram uma zona argilosa com espessura média em torno de 6 metros na interface pacote de solos/rocha calcária são. Essa zona de interface é caracterizada por feições brechóides onde se destaca, além da matriz francamente argilosa, núcleos alterados de diferentes litologias, feições de microdobramentos e cisalhamentos e bolsões de um material escuro, siltoso, extremamente fofo, pulverulento e friável, que desde as investigações no famoso Buraco de Cajamar passamos a apelidar de “pó de café” (vide Figs 9 e 10). Ensaio petrográficos e mineralógicos indicaram que esse pó de café constitui o resíduo margo-siltoso resultantes da dissolução de antigos blocos calcários.
- Sistematicamente as sondagens que se aprofundam até a interface solo/rocha encontram um Nível d'água superior, a alguns metros de profundidade. Esse lençol superior é sustentado pela camada argilosa impermeável brechóide da interface solo/rocha. Em sondagens que atravessem esse estrato argiloso há normalmente total perda de águas de circulação, ou para vazios aí existentes, ou, em maior profundidade, para um lençol inferior provavelmente associado às fraturas da rocha calcária são.

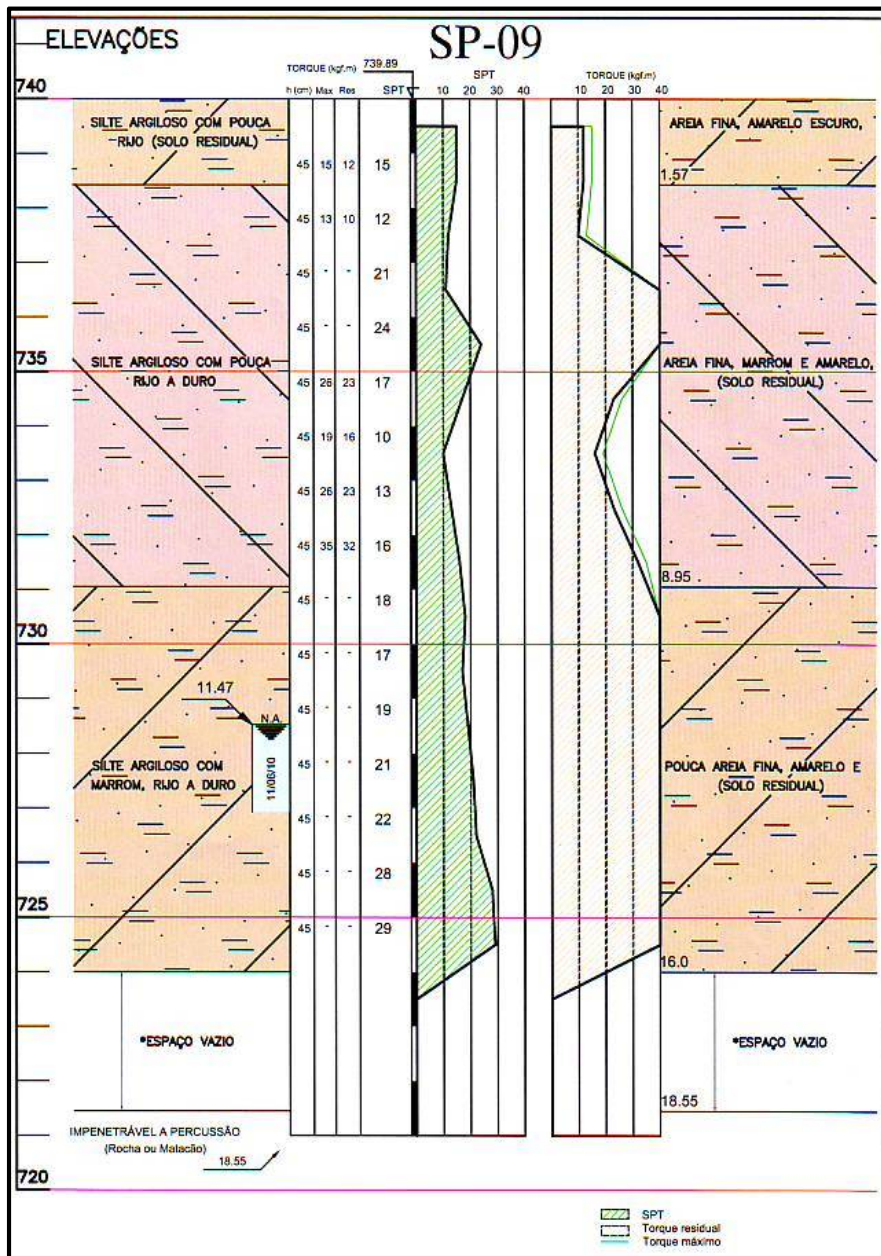


Fig 4 - Perfil típico de sondagem a percussão em terrenos cársticos da região de Cajamar. Imediatamente acima do topo rochoso aparecem bolsões totalmente vazios ou preenchidos de solo muito mole.



Fig 5 - Frentes típicas de pedreiras de calcário no município de Cajamar – SP, mostrando o maciço compacto, sem a presença de figuras clássicas de dissolução. Foto ARSantos.

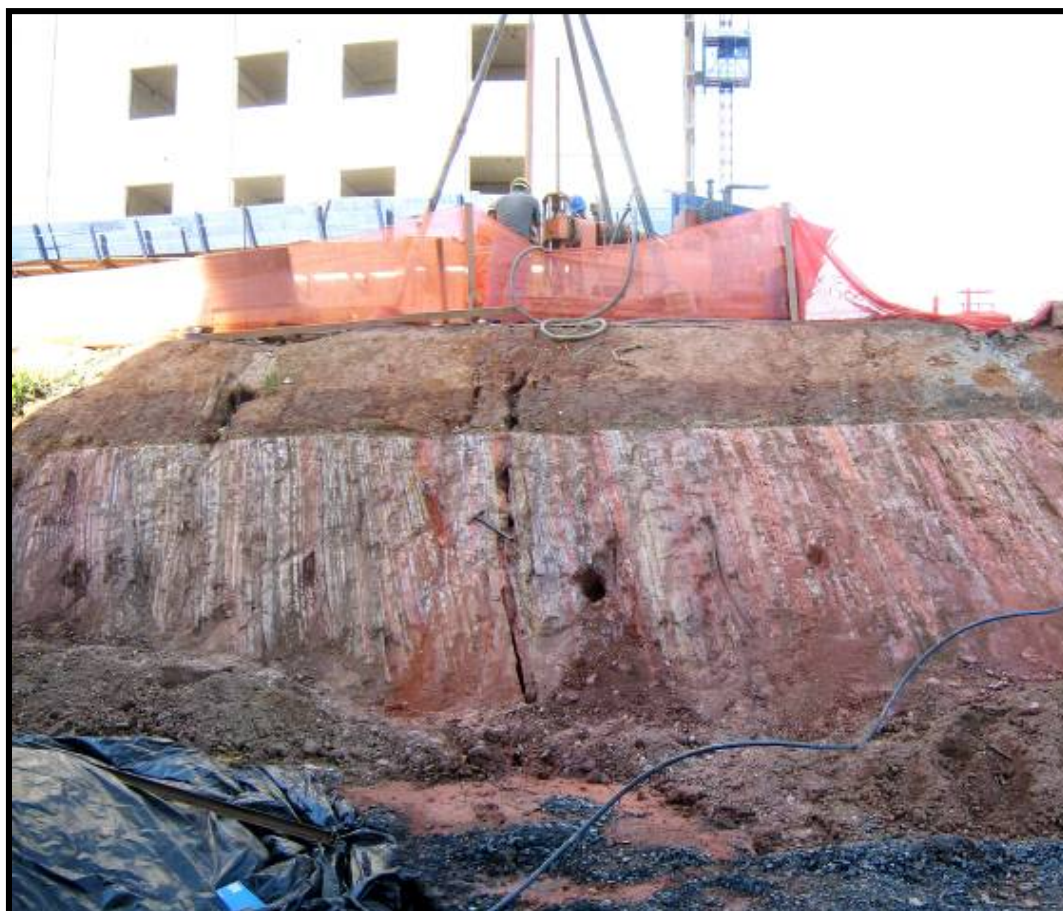


Fig 6 - Notar a orientação praticamente vertical dos diversos estratos xistosos metamorizados. A rocha calcária são encontra-se em média de 30 – 80 metros de profundidade a partir desse nível. Foto ARSantos



Fig 7 - Testemunhos de sondagem rotativa mostrando fraturas abertas com sinais de dissolução na zona superior do maciço calcário são. Foto ARSantos.

O novo modelo geológico

A consideração e a integração de todo esse conjunto de informações e observações levaram à construção de um novo modelo geológico, o qual apóia-se na hipótese de um comportamento físico diferenciado dos diferentes estratos sedimentares originais frente aos esforços metamorfizantes de compressão ocorridos no Proterozóico Superior. O banco calcário, sotoposto a camadas sedimentares de argilas, siltes e areias, constituindo uma camada rochosa mais espessa e mais competente (rígida), teria oferecido uma maior resistência a esses esforços de compressão, com conseqüente predomínio de fraturamentos sobre dobramentos (vide Fig. 8).

Se isso é verdade, especialmente na conformação dos anticlinais a base dos estratos superiores por certo teria sido “arrastada” sobre a camada calcária fraturada durante os esforços de compressão/dobrimento, em um processo semelhante a um *nappe de charriage* (superfície de arrastamento). Esse fenômeno explicaria a situação geológica singularmente heterogênea e irregular, de caráter brechóide, da zona de interface entre o solo saprolítico resultante da alteração dos estratos metamórficos superiores e a rocha sã metacalcária.

É justamente nessa zona brechóide de interface que têm origem e se situam as feições cársticas (bolsões de vazios preenchidos ou não por solos muito moles) geotecnicaamente preocupantes para a construção civil. Como essa interface nunca deva ter estado acima ou próxima a um nível hidrológico de base, condição necessária para a atuação de processos epigênicos de dissolução calcária, outros processos, inclusive hipogênicos, devem explicar os fenômenos dissolutivos que aí se verificaram.

Como já foi referido, os furos de sondagem rotativa que se aprofundam na rocha sã mostram um maciço bastante fraturado, mas praticamente isento de figuras expressivas de dissolução, fato corroborado pela verificação que nas injeções de calda de cimento executadas o trecho em rocha calcária sã toma volumes muito pequenos ou praticamente nenhum volume de calda, mesmo em traços de alta diluição e pressões mais elevadas. Vide fig. 17.

Vários ensaios laboratoriais foram realizados para auxiliar o entendimento dos processos físicos e físico-químicos que tenham proporcionado esse quadro de dissoluções de núcleos calcários na interface solo/rocha, mas os resultados são ainda inconclusivos, e exigirão um aprofundamento maior de estudos para se estabelecer ao menos uma hipótese confiável.

Os calcários na região são naturalmente margosos e/ou quartzosos. Assim, de sua dissolução química restam esses resíduos de “impurezas” que chegam a preencher parcialmente ou totalmente, em menor condição de densidade, os bolsões calcários então dissolvidos. Essa seria a origem do já referido “pó de café”, um resíduo siltoso de um bolsão calcário dissolvido. Isso justificaria o fato desse “pó de café” constituir-se em um verdadeiro “marcador” para áreas dessa interface que devam significar maiores preocupações geotécnicas.

Expressão geomorfológica das zonas carstificadas em superfície

Como já foi afirmado, as áreas de maior probabilidade de ocorrência de feições cársticas em sub-superfície coincidem com fundos de vale e zonas baixas aluvionares.

Essa correspondência geomorfológica, que tem sido importantíssima por possibilitar a compartimentação geotécnica das glebas estudadas em zonas de maior ou menor risco, e assim permitir uma melhor orientação e programação das investigações, por certo se explicam pelo fato dos vales atuais em sua maior parte coincidirem com anticlinais de grandes dobras metamórficas, situação em que, como se sabe (Geomorfologia Estrutural), há o aparecimento de fraturas apicais de descompressão que potencializam a ação dos processos intempéricos e erosivos, fazendo com que, paradoxalmente, um parte alta de uma dobra venha a geomorfologicamente corresponder a um vale (vide Figs 8, 11, 12, 13, 14 e 15).

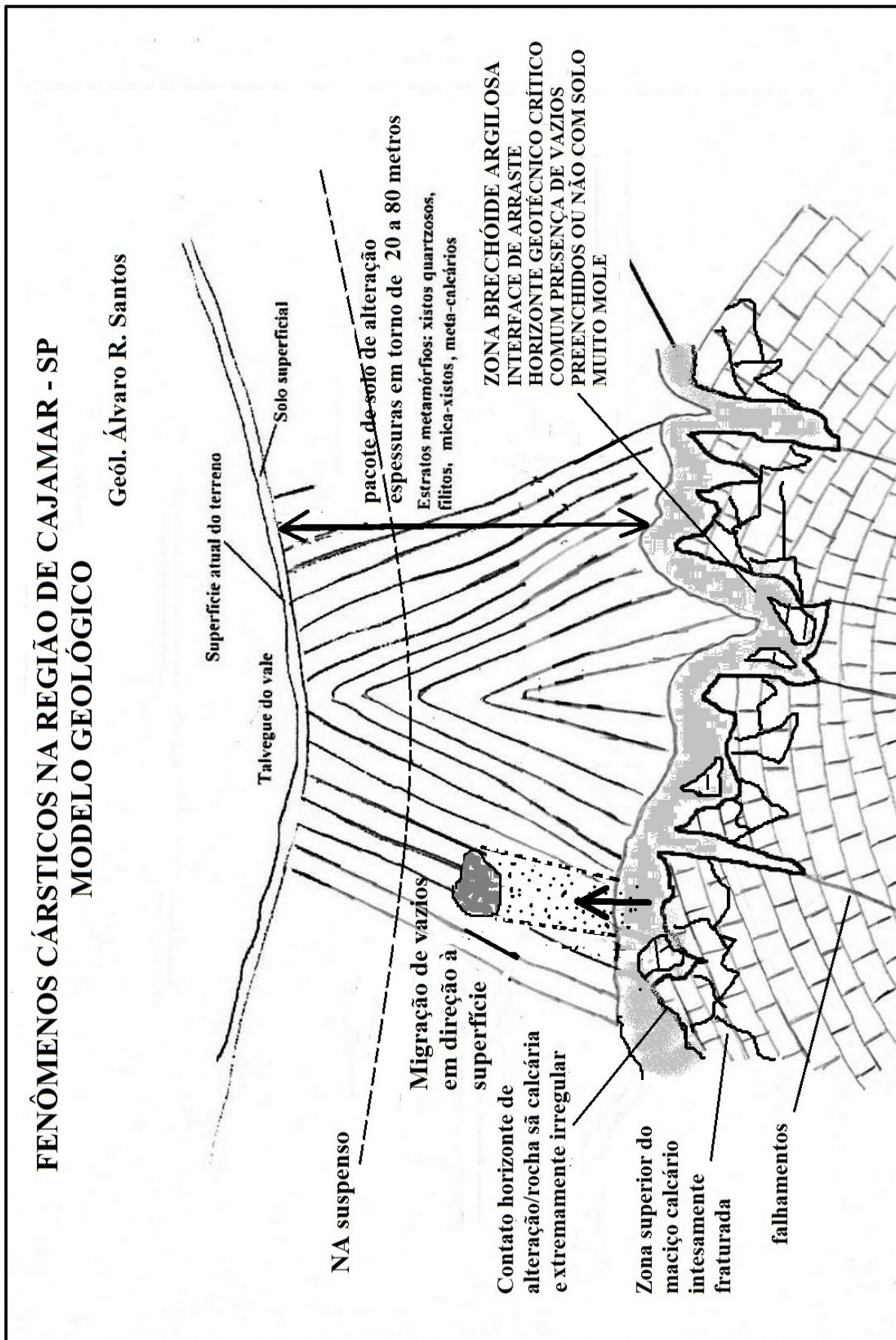


Fig 8 – Croqui do novo modelo geológico para os fenômenos cársticos da região de Cajamar – SP



Fig 9 - Terraplenagem que expôs porção da zona brechóide da interface solo/rocha permitindo sua investigação detalhada. Notar convivência espacial de materiais argilosos claros e avermelhados e bolsões com material pulverulento ("pó de café") originário da dissolução de núcleos calcários. Foto ARSantos.



Fig 10 - Detalhe da zona de interface solo/rocha brechóide argilosa e cárstica. Foto ARSantos.

Os 3 eixos estruturais já definidos

O estabelecimento dessa correspondência geomorfológica, os dados históricos de ocorrências cársticas na região, os dados colhidos de campo e o entendimento geológico do fenômeno promovido pela construção do novo modelo geológico apresentado nesse trabalho permitiram traçar 3 alinhamentos cársticos, coincidentes com eixos estruturais regionais, em que a

probabilidade de ocorrência de feições cársticas é comprovadamente maior. São os eixos Lavrinhas, Copase e Polvilho-Natura. Certamente a continuidade de trabalhos na região virá a revelar outros alinhamentos cársticos na região. Vide Fig 11.

O fator hidrogeológico potencializador dos abatimentos

Em conclusão, os problemas cársticos da região de Cajamar têm origem exclusivamente na zona brechóide argilosa de interface entre o pacote de solos de alteração e o substrato calcário são. Segundo esse modelo, os colapsos têm sua maior possibilidade de acontecer quando esses bolsões vazios ou preenchidos com solos muito moles encontram-se mais próximos à superfície do terreno, como consequência de sua própria evolução natural ou por intervenções de terraplenagens.

A associação dos abatimentos à exploração de poços profundos indica que esses processos acontecem, ou são diretamente potencializados, quando há a comunicação hidráulica entre o lençol d'água superior, sustentado pela zona brechóide argilosa, com vazios internos a essa zona ou diretamente com o lençol d'água inferior, controlados pelas fraturas da rocha sã. Por decorrência dessas intercomunicações hidráulicas haveria a aceleração do carreamento do solo superior para o interior dos vazios, como também o aumento relativo do peso de horizontes superiores sobre vazios interiores. Obviamente, quando esses vazios aproximam-se da superfície do terreno abre-se a probabilidade maior para o colapso do horizonte superior e os decorrentes abatimentos em superfície.

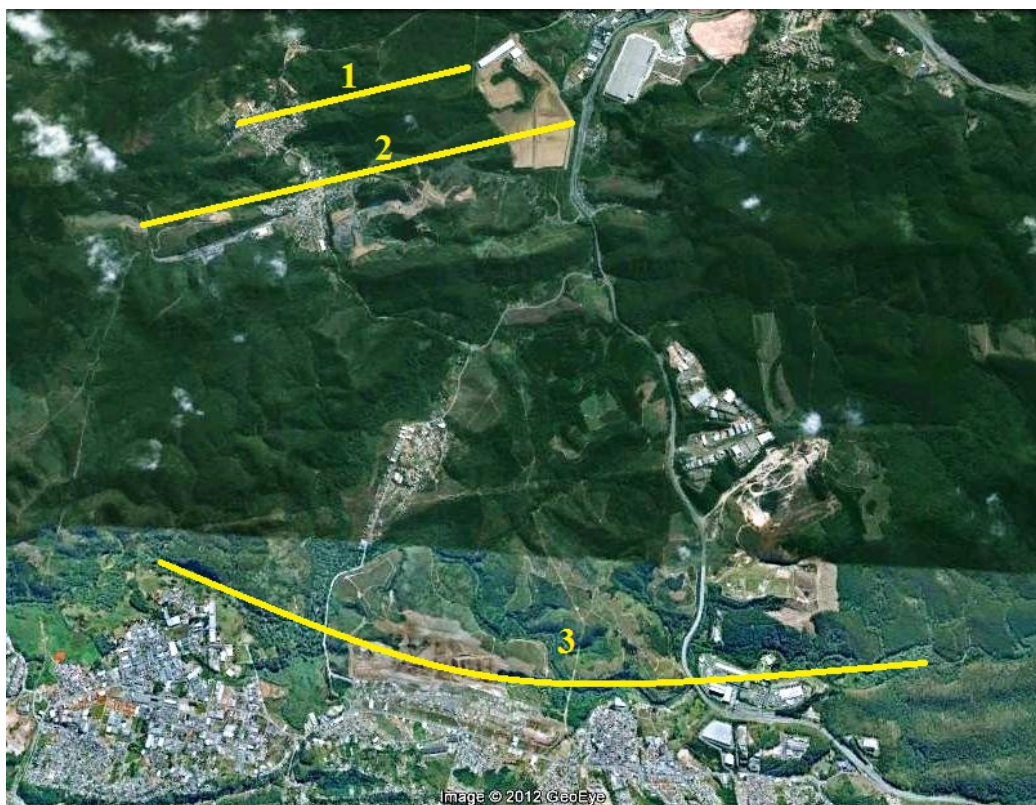


Fig 11 - Imagem aérea Google do município de Cajamar mostrando os três alinhamentos cársticos já com segurança definidos. 1 – Alinhamento Lavrinhas; 2 – Alinhamento Copase; 3 - Alinhamento Polvilho-Natura. Desenho ARSantos sobre Imagem Google.



Fig 12 - Extensa faixa de concentração de vazios cársticos expressa geomorfologicamente pela zona de fundo de vale (alinhamento 3 – Polvilho – Natura) ocupada por grande empreendimento imobiliário. Desenho ARSantos sobre imagem aérea.



Fig 13 - Grande empreendimento imobiliário que teve uma segunda fase avançando sobre a faixa do vale aí presente, coincidente com o alinhamento cárstico Polvilho - Natura, apresentado grande concentração de vazios na interface solo/rocha, o que veio a demandar extensivo tratamento geotécnico por injeções de calda de cimento e adoção de estacas hélice contínuas como sistema de fundação. Foto ARSantos.



Fig 14 - Empreendimento imobiliário em que a prospecção geológica detectou faixa de concentração de vazios cársticos (linhas amarelas), coincidente com o alinhamento cárstico Lavrinhas. Foto ARSantos



Fig 15 - Gleba a ser ocupada por futuro grande empreendimento logístico cuja setorização geomorfológica inicial orientou as investigações e confirmou a maior concentração de vazios cársticos nas zonas baixas do Vale Norte, do Vale Sul e da Várzea.



Fig 16 – Empreendimento imobiliário ocupando gleba com concentração de vazios cársticos. As condições geológicas levaram à opção por estacas metálicas cravadas e tratamento dos vazios cársticos com injeção de calda de cimento. Foto ARSantos

Decorrências técnicas do novo modelo geológico

Do modelo geológico proposto há quatro decorrências de enorme importância técnica e prática:

- 1) Como as feições cársticas estão associadas a anticlinais ou sinclinais de dobras, que comumente traduzem-se no relevo atual por fundos de vale e áreas baixas, fica possível, através de uma boa caracterização geológica e geomorfológica da região, concluir-se sobre as áreas de maior ou menor probabilidade de ocorrência de feições cársticas. Esse fato permitirá a produção de Cartas Geotécnicas especificamente dirigidas ao risco de abatimentos cársticos, o que, por sua vez, possibilitará aos empreendedores públicos e privados melhor decidir sobre a localização de seus empreendimentos ou providenciar os serviços de investigação e adequado tratamento geotécnico que se mostrem porventura necessários. Ou seja, as áreas baixas e fundos de vale na região devem em uma primeira instância a inspirar cuidados especiais para a instalação de empreendimentos civis. Sua ocupação somente deverá ser liberada a partir de uma profunda investigação geológica, e, no caso de apresentar vazios cársticos de expressão, após devidamente equacionadas as questões relacionadas ao tipo de fundação mais adequado e à necessidade ou não de tratamento por injeções de calda de cimento;
- 2) Pelo fato dos vazios apresentarem-se a profundidades relativamente baixas (algumas dezenas de metros) e circunscritos à zona de interface solo/rocha a injeção de calda de cimento (ou material similar) coloca-se como um expediente indicado e confiável para a estabilização geotécnica de terrenos a serem ocupados por algum empreendimento. O que não aconteceria se esses vazios estivessem conectando-se com uma rede de vazios cársticos internos ao maciço rochoso, quando então, pelos grandes volumes de calda de cimento que seriam consumidos na injeção e pela grande extensão e erraticidade da rede de vazios do maciço, ficaria praticamente impossível ter-se o devido controle dos resultados do tratamento executado.

Importantíssimo observar que a injeção de calda de cimento tem como objetivo essencial a obturação de vazios visando a interrupção do processo de sua evolução e migração em direção à superfície do terreno ou para os entornos de um elemento de fundação; não se tratando, pois, de um expediente de consolidação geotécnica clássica da zona de interface solo/rocha.

- 3) O modelo geológico proporciona ainda, conhecidos alguns parâmetros da extensão de suas feições no terreno em questão, a escolha do tipo de fundação mais adequado ao empreendimento que se pretenda construir (vide esquema orientativo na Fig. 18).
- 4) A constatação e compreensão do papel potencializador dos abatimentos cumprido pela depleção provocada ou espontânea do Nível d'água subterrâneo torna indispensável a radical e permanente proibição de operação de poços profundos para exploração de água subterrânea na gleba considerada e em sua região de entorno para a estabilização geotécnica pretendida.

<i>BOLETIM DE INJEÇÃO</i>		<i>FURO Q4P2I5</i>			
<i>DADOS DE SONDAGEM</i>		<i>Observação</i>	<i>DADOS DE INJEÇÃO</i>		
<i>Profundidade</i>	<i>Descrição</i>		<i>Trecho injetado</i>	<i>Traço água:cim</i>	<i>Volume injetado (l)</i>
0,00 – 2,50	Aterro	<i>Perda d'água com 5,90</i>	<i>Sem injeção</i>		
2,50 – 29,30	<i>Silte argiloso com baixa quantidade de areia col. Vermelha.</i>		<i>Sem injeção</i>		
29,30 – 31,70	<i>Silte arenoso coloração cinza medianamente mole.</i>		<i>Sem injeção</i>		
31,70 – 32,56	<i>Vazio com algum solo residual.</i>		<i>Sem injeção</i>		
32,56 – 37,56	<i>Rocha calcária fraturada pouco alterada.</i>		<i>Perda d'água total com 31,80</i>	<i>30,56 – 29,56</i>	<i>0,5:1,0</i>
			<i>31,56 – 30,56</i>	<i>0,5:1,0</i>	<i>6396</i>
			<i>32,56 – 31,56</i>	<i>0,5:1,0</i>	<i>2952</i>
			<i>37,56 – 32,56</i>	<i>1,0:1,0</i>	<i>Não tomou calda</i>

Fig. 17 – Típico boletim de injeção de calda de cimento em terreno cárstico de Cajamar. Notar que o maciço calcário não toma calda de cimento. Os volumes injetados estão relacionados sempre à zona cárstica de interface solo/rocha

Orientações técnicas práticas extraídas da atual experiência acumulada no estudo e tratamento de terrenos cársticos em Cajamar

Os casos práticos de estudos e tratamento de terrenos cársticos que vem sendo conduzidos na região de Cajamar, orientados pelo novo modelo geológico proposto, tem confirmado sua correção e proporcionado o aprimoramento de uma série de orientações técnicas executivas, entre as quais se destacam:

- 1) Em sendo detectados os vazios cársticos, a escolha do tipo de fundação mais adequado dependerá da espessura do pacote de solos A-D e da profundidade da zona de vazios. Vide Tabela Orientativa na Fig. 18 adiante.
- 2) As pressões de injeção de caldas de cimento nos vazios devem ser apenas suficientes para que se tenham como preenchidas as cavidades. Pressões muito altas podem provocar a fuga do material para terrenos vizinhos e a impregnação de horizontes de alteração mais permeáveis, o que não é um resultado buscado, ou até um desarranjo estrutural no horizonte solo/rocha com conseqüências geotécnicas imprevisíveis. Desta forma, para os objetivos de preenchimento desejados sempre será mais indicado trabalhar com uma malha mais densa de furos de injeção de baixa pressão do que com poucos

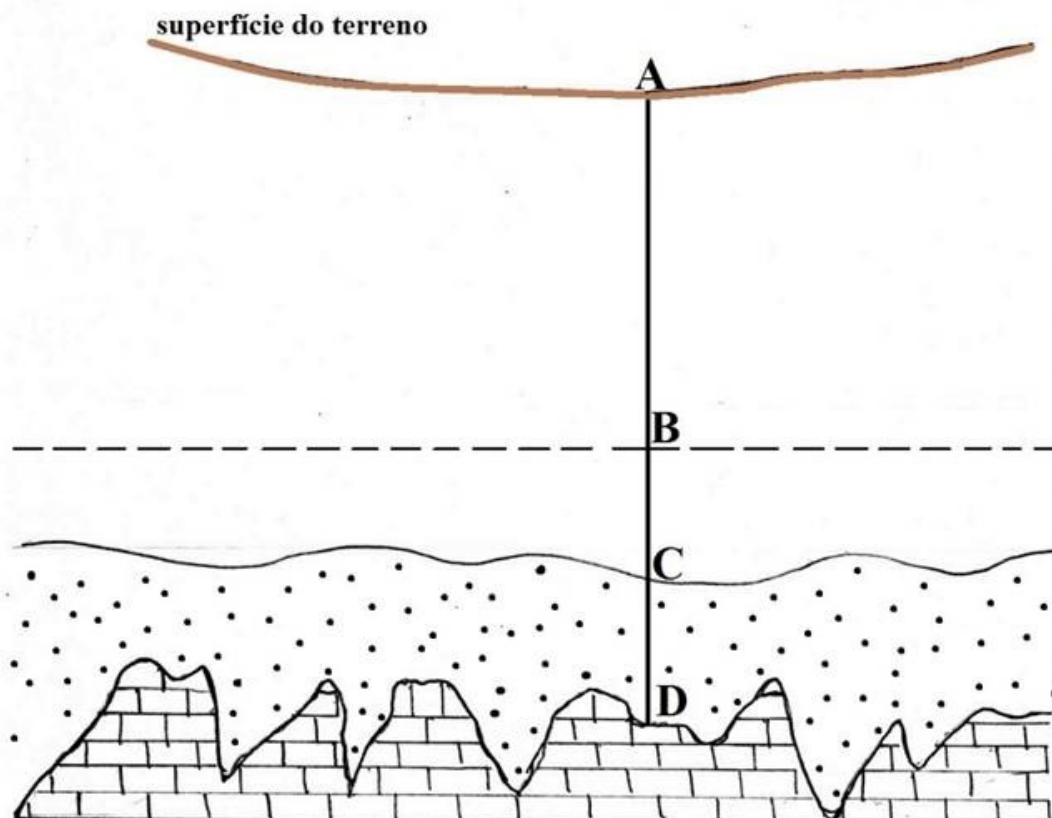
furos de alta pressão. Recomenda-se a utilização de pressões máximas de injeção em torno de 5 Kg/cm², estabelecendo como critério de seu término a observação de não tomada de calda por 10 minutos consecutivos com a pressão estabilizada em 5 Kg/cm².

Dentro do mesmo raciocínio, deve-se optar por caldas grossas, de baixa fluidez, com traço recomendado de 0,5litros de água para 1 Kg de cimento, e adoção de intervalos de tempo controlados entre os diversos estágios de uma injeção.

Sob essas especificações tem-se observado uma ordem de grandeza de 20 metros cúbicos de calda como volume médio injetado por furo, em malha com espaçamento médio de 5 metros.

ESQUEMA ORIENTATIVO PARA A ESCOLHA DO TIPO DE FUNDAÇÃO E PARA A DECISÃO DE TRATAMENTO POR INJEÇÕES DE CALDA DE CIMENTO EM TERRENOS CÁRSTICOS DA REGIÃO DE CAJAMAR - SP

Geól. Álvaro Rodrigues dos Santos



A-D pacote superior de solos

D-? maciço calcário são

C-D zona de interface solo/rocha - argilosa brechóide cárstica (~6m)

A-D maior que 50m e ausência de vazios até 35 metros de profundidade sugere adoção de estacas tipo hélice contínua com profundidade limite em B.

A-D maior que 50m e presença de vazios até 35m sugere adoção de estacas metálicas apoiadas no topo do maciço rochoso D e tratamento dos vazios com injeções de calda de cimento ou similar

A-D menor que 50m com presença de vazios em C-D sugere adoção de estacas metálicas cravadas apoiadas no topo do maciço rochoso D e tratamento da zona de vazios C-D com injeções de calda de cimento

B-C faixa de segurança (~5m) definindo profundidade limite (B) para posicionamento da base de estacas tipo hélice

OBS: A NÃO OPERAÇÃO DE POÇOS PROFUNDOS NO TERRENO A SER OCUPADO E EM TERRENOS PRÓXIMOS É CONDIÇÃO ABSOLUTA PARA A OCUPAÇÃO CONSTRUTIVA DE TERRENOS CÁRSTICOS!!

Fig 18 – Esquema orientativo para o bom equacionamento dos problemas cársticos na região de Cajamar - SP



Fig 19 - Bomba pneumática utilizada para a injeção de calda de cimento com misturador acoplado. Foto ARSantos.



Fig 20 - Ponto sendo injetado com controle de manômetro. Foto ARSantos.



Fig 21 – Sistema centralizado com misturador e bomba atendendo vários pontos de injeção. Foto ARSantos.

Referências bibliográficas

- PRANDINI, F.L.; NAKAZAWA, V.A.; ÁVILA, I.G.; OLIVEIRA, A.M.S.; SANTOS, A.R. 1987. Cajamar - Carst e urbanização: zoneamento de risco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5., 1987, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABGE. v.2, p.461-470.
- SANTORO, E., CARNEIRO, C. D. R. and OLIVEIRA, M.C.B DE 1988. Estrutura geológica da região de Cajamar-Jordanésia, SP. *Rev. Bras. Geociências* vol. 18(3):, p. 353 - 361
- SANTOS, A.R.; PONÇANO, W.L. 2009. Caso de aplicação nº 7 – Colapso e subsidência de origem cárstica na área urbana de Cajamar – SP, livro *Geologia de Engenharia – Conceitos, Método e Prática*, 2ª ed., Santos, A.R, O Nome da Rosa, São Paulo, 2009.
- SANTOS, A.R., 2011. “Novo modelo geológico orienta a escolha de terrenos e o tratamento de fundações para empreendimentos na região de Cajamar (SP)”. Artigo técnico publicado no portal PINI Web.
- SANTOS, A.R., 2017. Caso de Aplicação nº 30 – Calcários cársticos: áreas de risco para a engenharia. *Modelagem geológica e soluções construtivas*. Livro *Geologia de Engenharia – Conceitos, Método e Prática*, 3ª ed, O Nome da Rosa, São Paulo, 2017.