

Fenômenos Cársticos

A percepção de que a origem das anomalias geotécnicas, anteriormente descritas, estava associada às rochas carbonáticas existentes na fundação, foi se intensificando com o tempo. Foram executadas novas investigações geotécnicas, sendo que os serviços de instrumentação, contratados em dezembro de 1998, foram planejados sobre modelos de comportamento geotécnico, entre outros, que previam fenômenos cársticos como a causa mais provável para as deformações que ocorriam no terreno. Outros modelos consistiam de recalques devidos à compressibilidade do terreno natural (colúvio), e recalques como reflexo de um processo de escorregamento de talude.

Neste capítulo são apresentadas as características geológicas básicas das rochas carbonáticas e discutidos aspectos sobre sua dissolução e formação de feições cársticas, além do mecanismo de ocorrência de subsidências e dolinas.

Rochas carbonáticas na região do Espaço Natura e suas origens

Rochas carbonáticas ou calcários são rochas sedimentares constituídas por minerais solúveis, denominados calcita (carbonato de cálcio – CaCO_3) e/ou dolomita (carbonato de cálcio e magnésio – $\text{CaCO}_3.\text{MgCO}_3$). O termo “calcário” é empregado para caracterizar um grupo de rochas com mais de 50% de carbonatos. Em geral, os calcários têm de 80 a 100% desses minerais. De acordo com a proporção relativa de cada um desses minerais, tais rochas são divididas em calcários e dolomitos. Conforme a porcentagem de óxido de magnésio (MgO), são denominados calcário (0 a 10%), calcário dolomítico (10 a 50%), dolomito calcítico (50 a 90%) e dolomito (90 a 100%). Processos metamórficos da alta pressão e temperatura podem transformar esses sedimentos em mármore (calcítico ou dolomítico) e nas chamadas rochas cálcio-silicatadas. Estas últimas são menos solúveis que as anteriores, pois quase não contêm carbonatos.

Os calcários são rochas formadas por processos químicos e/ou bioquímicos em ambientes marinhos, de águas rasas. Existem dois tipos de formação de sedi-

mentos de carbonato de cálcio marinho: a bioconstruída e a bioinduzida. A precipitação bioconstruída se dá através da deposição de carapaças de microorganismos mortos, como os corais. A precipitação bioinduzida ocorre quando a atividade biológica gera um ambiente propício à sedimentação do carbonato. Em Cajamar, evidências apontam para o segundo tipo de precipitação.

As rochas da região entre Cajamar, São Paulo e Santana do Parnaíba pertencem a unidades litológicas pré-cambrianas do Grupo São Roque, de idade Neoproterozóica (1 bilhão a 570 milhões de anos).

Para melhor compreensão da dimensão geológica, a Tabela 1 apresenta a Escala do Tempo Geológico, representado pelas divisões eon, era, período e época.

Tabela 1 – Escala do Tempo Geológico, baseada em Gradstein & Ogg (1996) in Teixeira et al, 2000

Milhões de anos	Eon	Era	Período	Época
0,0 0	FANEROZÓICO	Cenozóico	Quaternário	Holoceno
1,8				Pleistoceno
5,3			Terciário	Plioceno
24,0				Mioceno
33,0				Oligoceno
55,0				Eoceno
65				Paleoceno
120,0		Mesozóico	Cretáceo	
140,0				Jurássico
265,0				Triássico
290,0		Paleozóico	Permiano	
350,0				Carbonífero
417,0				Dévoniano
443,0				Siluriano
495,0				Ordoviciano
545,0				Cambriano
2.500,0		PROTEROZÓICO		
3.800,0	ARQUEANO			
4.600,0	HADEANO			

A evolução dos fenômenos cársticos, conforme se verá mais adiante, estende-se por longo intervalo de tempo geológico, que muitas vezes vai até o Quaternário.

As rochas carbonáticas na região do Espaço Natura apresentam-se em estruturas conhecidas como dobras, que são ondulações adquiridas pelas massas rochosas quando submetidas a esforços tectônicos de várias origens. Quando a convexidade é voltada para cima, denomina-se anticlinal (ou antiforma), e, no caso contrário, sinclinal (ou sinforma). A Figura 1 mostra, esquematicamente, os elementos de uma dobra assimétrica.

Os eixos das dobras na área do Espaço Natura alinham-se na direção leste-oeste (E-W), oriundos de deformações surgidas no final do Proterozóico Superior, quando as unidades sofreram tais dobramentos, falhamentos e foram atravessadas por intrusões graníticas, como o corpo do Granito Tico-Tico, que é vizinho ao norte da área do empreendimento.

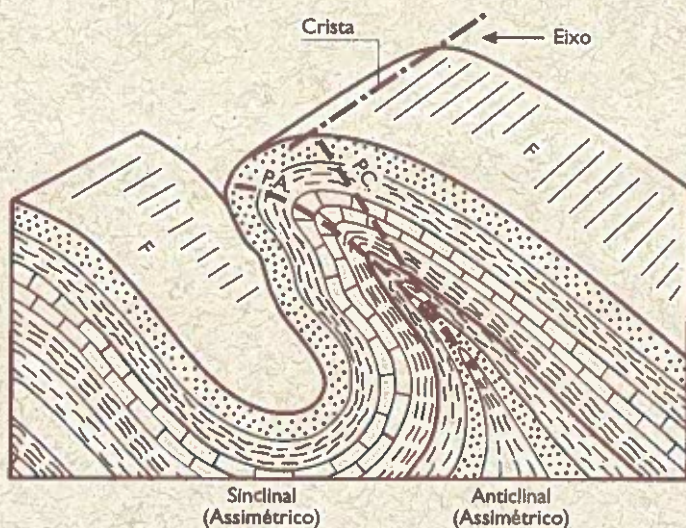


Figura 1 – Elementos da dobra: (F) flanco; (PA) plano axial; (PC) plano da crista (Leinz e Leonardos, 1970)



Foto 1 – Parede frontal da cava de exploração de calcário. Notar o maciço dobrado com concavidade para baixo (antiforma) e os flancos extremamente íngremes

Foto 2 – Estalactites e estalagmites, compostas por precipitação de calcita, na caverna Santana, no Estado de São Paulo (Teixeira et al, 2000)

A Foto 1 mostra um exemplo de maciço calcário da Pedreira Pires, ou Cinco Pires, situada no Município de Cajamar, onde se nota uma dobra antiformal, com flancos de elevada declividade, como ocorrem no corpo de calcário do Espaço Natura.

As dobras antiformais em maciços calcários são muito fraturadas, por serem submetidas a tensões de tração. Os processos geomorfológicos cenozóicos, responsáveis pelo desenvolvimento das formas de relevo e entalhamento dos vales fluviais regionais, foram acompanhados por atividade tectônica (Almeida & Carneiro, 1998), ocorrendo importante reativação de falhas do embasamento. Tais movimentações foram acompanhadas de esforços e deslocamentos que redundaram no abaixamento de blocos e fixação de coberturas sedimentares, induzindo novas deformações e falhamentos nas rochas locais.

Dissolução das rochas carbonáticas

A dissolução de rochas carbonáticas ocorre pela percolação da água subterrânea, que funciona como um solvente, devido à sua mobilidade lenta, à presença constante e ao contato permanente com os grandes volumes de rocha nos quais se infiltra.

Figura 2 – Dissolução e precipitação de rochas carbonáticas num perfil cárstico (Teixeira et al, 2000)



As rochas carbonáticas predominam entre aquelas passíveis de dissolução, pois os carbonatos são facilmente solubilizados. Como já visto, os principais componentes de rochas carbonáticas, geralmente de origem marinha, são o carbonato de cálcio (CaCO_3) e o carbonato de magnésio (MgCO_3).

O processo de dissolução dos calcários pela água se faz predominantemente por meio da reação química entre a rocha, a água e o gás carbônico dissolvido nesta última, conforme mostra a Figura 2.

A Foto 2 mostra estalactites e estalagmites, compostas por precipitação de calcita, na caverna Santana, no Estado de São Paulo.

A circulação da água subterrânea na rocha se dá preferencialmente por fendas e fraturas. Estas vão-se alargando lentamente, formando aberturas de formas variáveis, como chaminés e grutas.

Nos climas tropicais, com abundante cobertura de solos e vegetação exuberante, o processo de mobilização de carbonatos é mais desenvolvido que em climas temperados.

Formação de feições cársticas

A carstificação consiste na dissolução de rochas pelas águas superficiais e subterrâneas, com formação de rios subterrâneos, cavernas, dolinas, pináculos etc. A carstificação é o tipo mais comum de processo de dissolução de

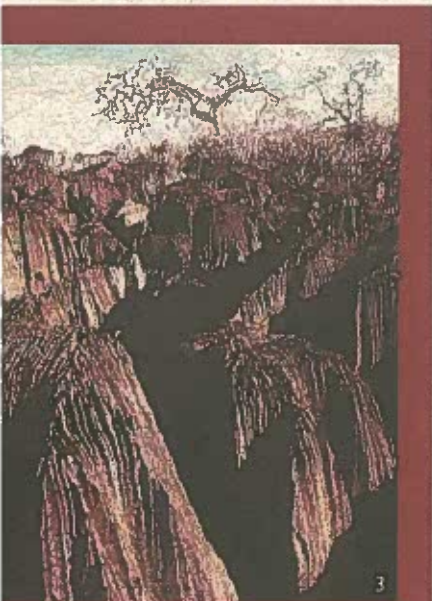


Foto 3 – Relevo cárstico na região da caverna do Padre, no Tocantins (Teixeira et al, 2000)

rochas solúveis nas quais se incluem, além de calcárias ou carbonáticas (calcário, dolomito, mármore), os evaporitos (halita, gipsita, anidrita), que são depósitos salinos.

O termo “karst”, de origem eslava e que significa “bonito”, é a raiz de outras palavras que descrevem uma topografia particular associada à ocorrência de rochas carbonáticas, muito comuns na região de Karst, entre o norte da Itália e a Bósnia. A Foto 3 mostra um exemplo de relevo cárstico na região da caverna do Padre, no Estado do Tocantins.

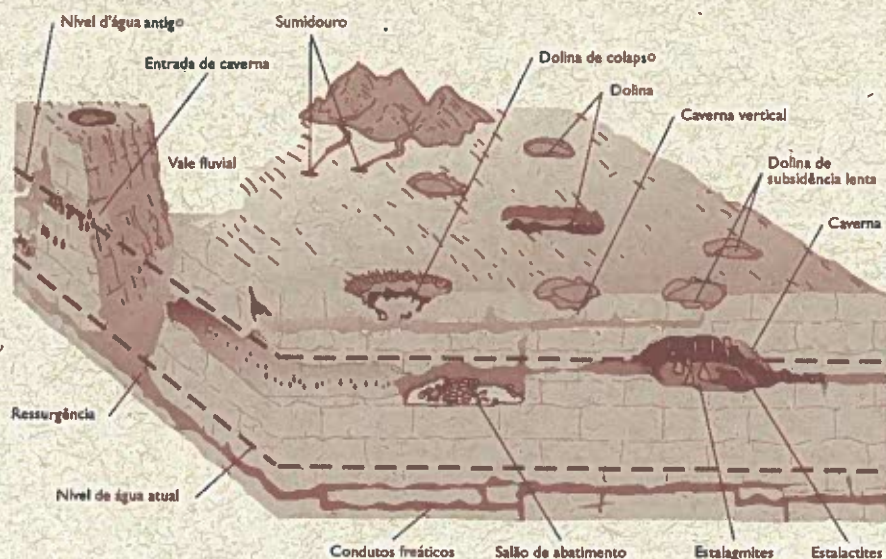


Figura 3 – Componentes principais do sistema cárstico (Teixeira et al, 2000)

São feições típicas de esculturas em calcários aflorantes. Da mesma forma, fenômenos ligados à dissolução por baixo de camadas de solo, denominados carstes cobertos, são igualmente freqüentes, e são os que ocorrem no Espaço Natura.

O relevo de carste consiste em uma assembléia de formas topográficas superficiais contendo depressões de todos os tamanhos, que podem atingir vários quilômetros de extensão. A Figura 3 ilustra os principais componentes do sistema cárstico.

As Fotos 4, 5 e 6 ilustram exemplos de carstes cobertos, na mesma pedra mostrada na Foto 1. A Foto 4 mostra bancadas da cava de exploração de calcário, notando-se a rocha muito fraturada e a superfície extremamente irregular do contato solo-rocha. Na Foto 5, observam-se cavidades de dissolução, pináculos e faces arredondadas pela erosão da água em carstes que foram expostos pela escavação do solo subjacente. A Foto 6 mostra uma cavidade de dissolução de dimensões métricas.

Cerca de 5 a 7% do território brasileiro é coberto por carste carbonático, constituindo-se em importante componente nas paisagens do Brasil (Teixeira et al, 2001). A maior área de rochas carbonáticas ocorre no noroeste de Minas Gerais, leste de Goiás, sudeste do Tocantins e oeste da Bahia (Grupo Bambuí) e na região central da Bahia (Grupo Una). Além de cavernas e vistosas paisagens, abrigam também importantes aquíferos. Grande parte da região metropolitana de Belo Horizonte, por exemplo, é abastecida de água subterrânea proveniente do carste. Nos Estados de São Paulo e Paraná, os terrenos cársticos concentram-se sobre calcários metamorfizados e dobrados

do Grupo Açungui, dando origem a importante província cárstica, com inúmeras cavernas, como as localizadas no alto Vale do Ribeira, na região limítrofe entre aqueles dois estados.

Na área do Espaço Natura observou-se a presença de calcários com teores inferiores a 4% MgO. Essas rochas são intercaladas com outras, como xistos, calcários impuros (ricos em sílica), filitos e anfibolitos. A norte do empreendimento ocorrem granitos, que fazem parte da intrusão do Granito Tico-Tico, de idade mais jovem (Neoproterozóico a Eopaleozóico), posterior à formação dos calcários.

No presente estágio de conhecimentos, a espessura do calcário abaixo da área do Espaço Natura é indeterminada. A integração das informações de todos os poços cadastrados pelo DAEE ao redor do empreendimento sugere que a espessura provável de calcário na região seja da ordem de uma centena de metros, compatível com estimativas realizadas pelo IPT em Cajamar, após estudos motivados pelo abatimento de uma dolina naquela cidade em 12 de agosto de 1986, fenômeno descrito mais pormenorizadamente adiante, na página 94.

As estruturas dobradas reconhecidas em perfis e no terreno fazem parte de sistemas mais amplos. Na área do Espaço Natura ocorrem amplas dobras regionais, cujos planos axiais são subverticais e os eixos, subhorizontais E-W. Observou-se que as dobras são mais abertas na região sul, com amplitudes da ordem de 700 m, e se tornam mais fechadas junto ao Granito Tico-Tico. A conformação dos vales e cristas de interflúvios na região do Bairro do Polvilho obedece às mesmas direções E-W das dobras.

Os calcários são estratificados e exibem alternâncias e repetições de camadas mais e menos solúveis. Em razão do mecanismo de formação de juntas associadas ao dobramento, a porção superior das antiformalas e a parte inferior das sinformas são mais afetadas e exibem fraturamento mais intenso, que favorece a intensificação de fenômenos de dissolução. Além disso, durante o Cenozóico houve exposição prolongada dessas rochas a condições subaéreas, que favoreceu a atuação mais intensa de processos cársticos sobre as antiformalas. Tais condições permitiram a dissolução e o desenvolvimento de feições cársticas.

Dolinas e formação de subsidências: mecanismos de formação e exemplos

A evolução do relevo em carstes cobertos resulta em modificações sensíveis na geometria da superfície do terreno, dando origem a fenômenos conhecidos como dolinas, que podem se manifestar na forma de subsidências e colapsos (Figura 4).

O principal controle dos processos de dissolução são as oscilações sazonais do lençol freático, que dependem do clima da região e, portanto, dos padrões de pluviosidade. O desenvolvimento de carste abaixo do lençol freático envolve a formação de carste em grandes profundidades, até mesmo abaixo de níveis de base locais, sendo controlado por níveis impermeáveis abaixo do calcário. Em terrenos altos, uma zona de cavernas se estabelece onde o contato com algum nível impermeável abaixo do calcário (o limite inferior de desen-

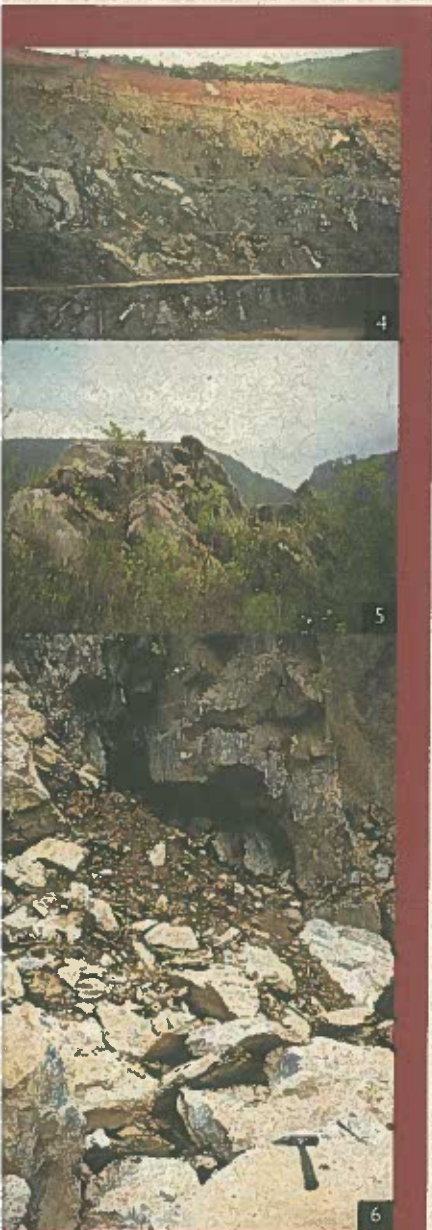


Foto 4 – Bancadas de exploração de calcário em pedreira de Cajamar, notando-se a rocha muito fraturada e a superfície extremamente irregular do contato solo-rocha

Foto 5 – Cavidades de dissolução, pináculos e faces arredondadas pela erosão da água em carstes que foram expostos por escavação do solo sobrejacente, na mesma pedreira

Foto 6 – Detalhe de uma cavidade de dissolução de dimensões métricas, na pedreira de Cajamar

volvimento da zona) estiver acima dos assoalhos dos vales fluviais. Entretanto, a carstificação pode ser mais profunda, já que o fluxo de água subterrânea pode atingir profundidades consideráveis em algumas rochas de textura aberta. Poderia ocorrer carste, portanto, abaixo do nível de base representado pelos assoalhos fluviais.

Os processos acima levam à formação de dolinas, que são depressões sub-circulares de tamanho variável, desde pequenos afundamentos de menos de 1,0 m de diâmetro até 100 m ou mais.

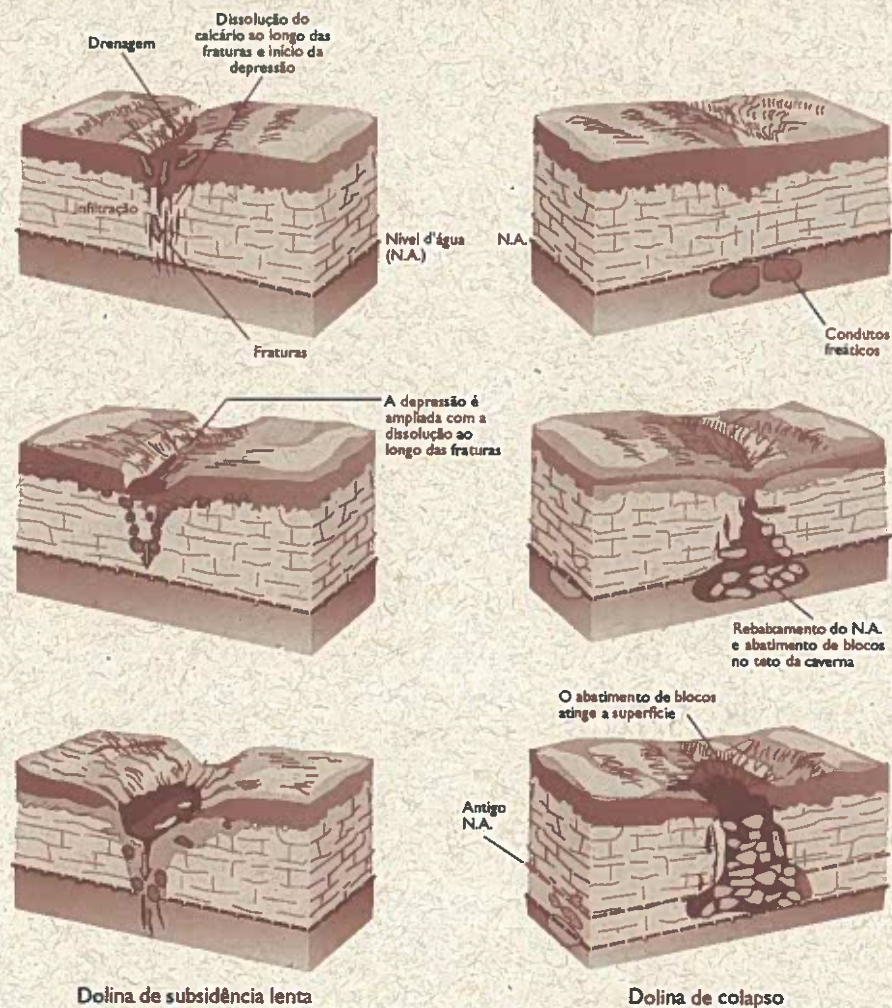


Figura 4 – Evolução esquemática de dolinas de subsidência lenta e de colapso (Teixeira et al, 2000)

Dolinas de subsidência da cobertura (Figuras 5 e 6) são processos de subsidência gradual, decorrentes de adensamento de solos moles originários de antigas dolinas (Figura 5) ou de processos de lixiviação (remoção de material solúvel) do solo pela percolação subvertical (Figura 6). O adensamento pode ocorrer por rebaixamento do lençol freático ou por carregamentos externos, como peso de aterros novos e migração de solos arenosos para o interior das cavidades.

A Figura 5A mostra a situação de equilíbrio antes do rebaixamento do nível da água. A paleodolina não é aparente na superfície, mas é indicada pela concavidade da linha de seixos e pelos pedregulhos próximos ao topo rochoso. A figura 10B indica a situação após o rebaixamento. A reativação do desenvolvimento da dolina torna-se aparente quando o adensamento do solo mole (denominado *wad*) leva à subsidência superficial. A periferia da dolina é carac-

terizada por uma zona de cisalhamento e fraturas de distensão (alívio). As figuras 5C e 5D indicam a compressão do solo mole e os seus reflexos em superfície, levando ao aprofundamento da dolina.

Figura 5 – Mecanismo de formação de dolinas de subsidência da cobertura devido a solos moles originados de antigas dolinas (adaptado de Brink, 1979)

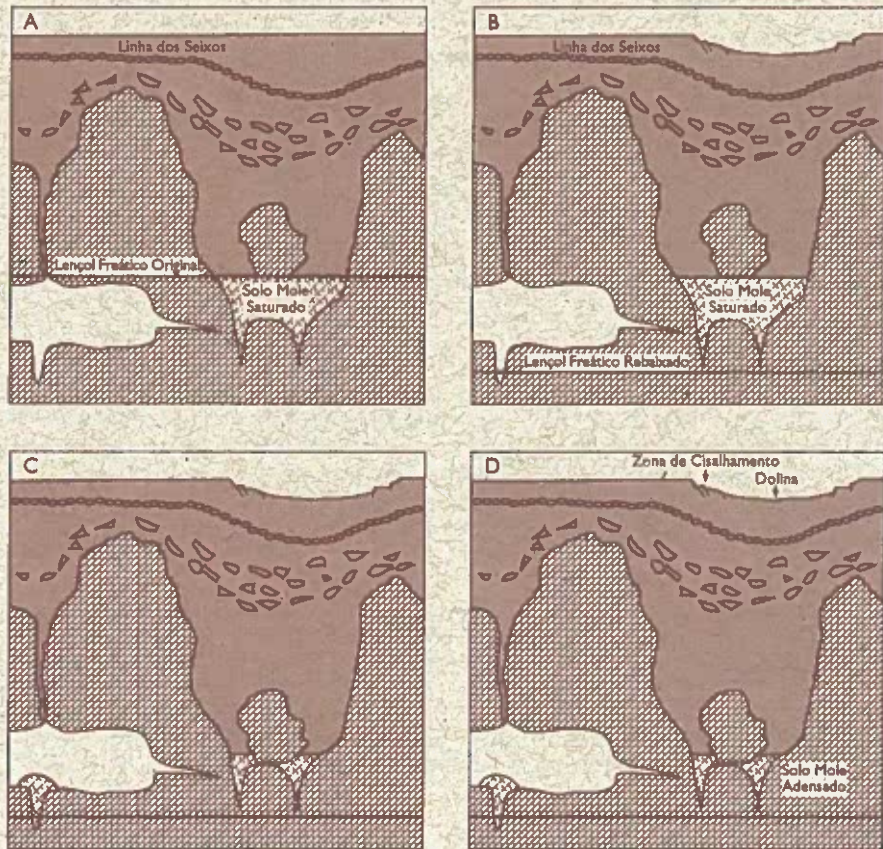
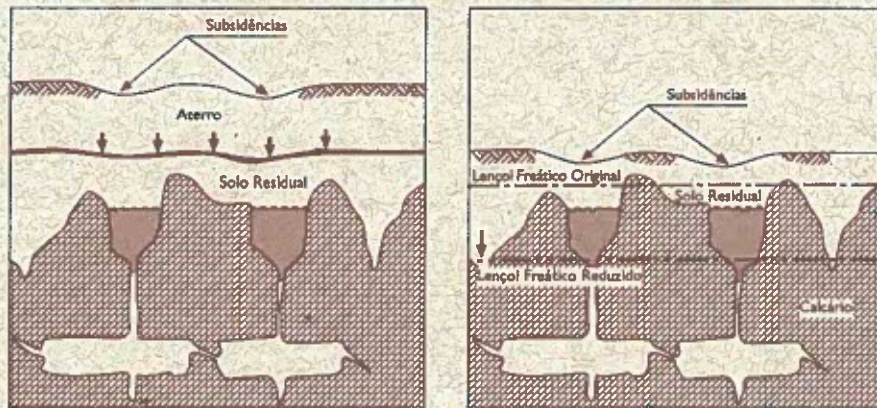


Figura 6 – Mecanismo de formação de dolinas de subsidência da cobertura devido a solos moles decorrentes de lixiviação (adaptado de Brink, 1979)



A Figura 6 mostra o mesmo mecanismo da Figura 5 com adensamento de solos moles produzidos por lixiviação. O adensamento e, conseqüentemente, o recalque em superfície podem ocorrer tanto por rebaixamento do lençol freático quanto por carregamentos externos, como o peso de aterros novos.

No Espaço Natura foram detectados, por sondagem, solos moles no topo e no interior do maciço calcário, produzidos por lixiviação. Com base nas inú-

meras sondagens descritas no próximo capítulo, foram realizados mapeamentos de regiões amolecidas do subsolo da área do Almoarifado Vertical e do Picking, através de uma ampla pesquisa dos valores de ensaios SPT (Standard Penetration Test) obtidos das sondagens a percussão. A Figura 7 mostra uma seção transversal intermediária aos dois prédios, onde estão lançados contornos de isovalores de SPT, identificando as regiões de solos moles, que são originadas a partir do topo rochoso do calcário.

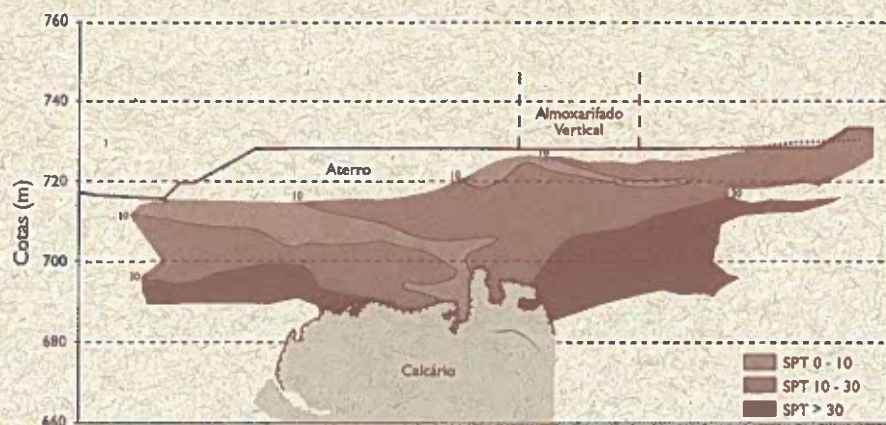


Figura 7 – Mapeamento de regiões de solos moles no subsolo do Espaço Natura

As Fotos 7 e 8 mostram uma interessante comparação, documentada por intermédio de fotos tiradas antes e após a chuva em uma área da Flórida, onde ocorre uma série de dolinas de subsidência. Quando a intensidade da chuva é maior que a capacidade drenante do solo, formam-se pequenas lagoas nas dolinas.

Comportamento geotécnico das dolinas

Conforme descrito no item anterior, as dolinas podem apresentar comportamentos totalmente distintos em termos de previsibilidade. As dolinas de subsidência ocorrem lentamente em superfície, enquanto os *sinkholes* são inesperados, pois não são visíveis superficialmente, podendo ser catastróficos conforme as dimensões e os locais em que ocorra.

Uma maneira de avaliar o tipo de dolina em formação é a monitoração de deformações verticais no subsolo (Jennings, 1966). Medem-se os deslocamentos verticais (recalques) no subsolo, em várias profundidades, por instrumentos conhecidos como tassômetros (capítulo "Instrumentação e Monitoramento").

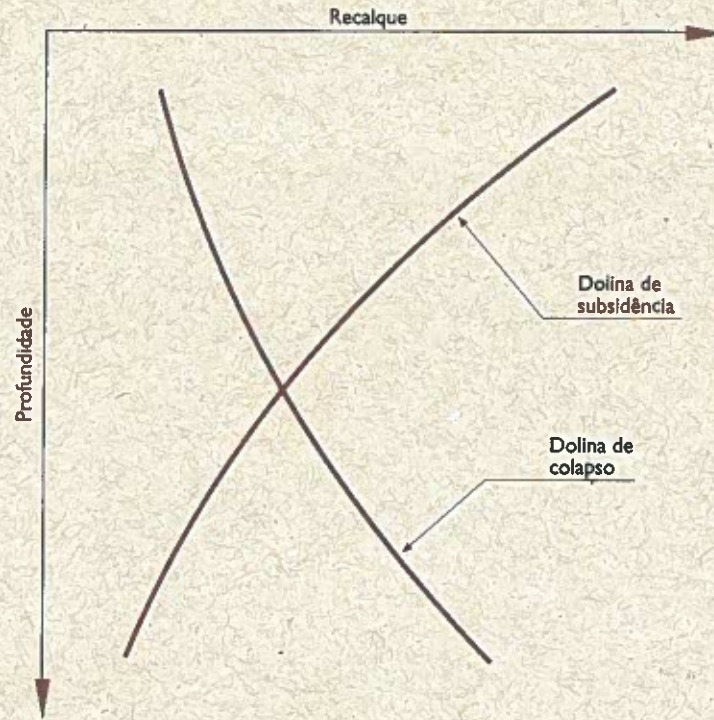
Em processos de subsidência, devido ao adensamento de solos moles existentes sobre o topo rochoso, os recalques são decrescentes com a profundidade (ver Figura 8), pois os solos existentes entre duas profundidades distintas são comprimidos, e esta compressão é acumulada de baixo para cima. De maneira oposta, no caso de *sinkholes*, os recalques são crescentes com a profundidade, pois os solos existentes entre duas profundidades distintas são estendidos devido à formação de cavidade sobre o topo rochoso, e esta extensão é menor em superfície (Figura 8).



Foto 7 – Região de dolinas na Flórida, antes da chuva

Foto 8 – Região de dolinas na Flórida, após a chuva

Figura 8 –
Comportamento
distinto de recalque de
subsuperfície para
dolinas de subsidência
e de colapso



A monitoração do subsolo do Espaço Natura (capítulo "Instrumentação e Monitoramento"), efetuada por meio de tassômetros, mostrou que os recalques subsuperficiais são decrescentes com a profundidade, indicando a tendência de formação de dolinas de subsidência e, mais importante, descartando a possibilidade de formação de dolinas de colapso



Foto 9 – Situação
estabilizada da dolina de
Cajamar, com afloramento do
nível da água no fundo
(Teixeira et al, 2000)

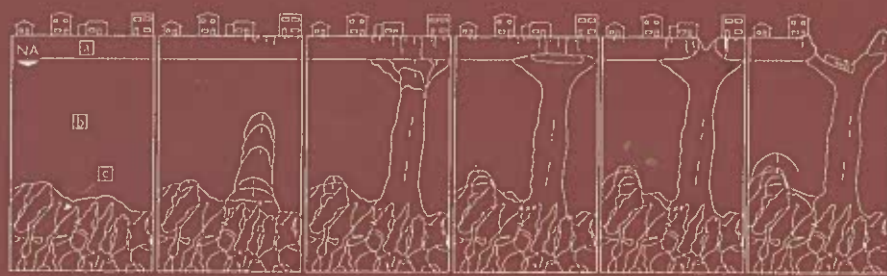
Histórico de fenômenos cársticos em áreas urbanizadas no Brasil

a) Cajamar (SP)

O caso de dolina de colapso mais conhecido no Brasil é o da cidade de Cajamar, ocorrido em agosto de 1986, amplamente divulgado na mídia, por ter destruído uma construção residencial. A Foto 9 mostra o local da dolina, 5 meses após o início do colapso.

O colapso foi repentino, embora posteriormente tenham sido recuperadas evidências de movimento de massas em subsuperfície, como trincas em edificações, ruídos e rupturas na rede de distribuição de água (Nakazawa et al, 1987). As informações coletadas permitiram caracterizar o fenômeno como de carstê coberto (Prandini et al, 1987), desenvolvido em pelo menos duas fases:

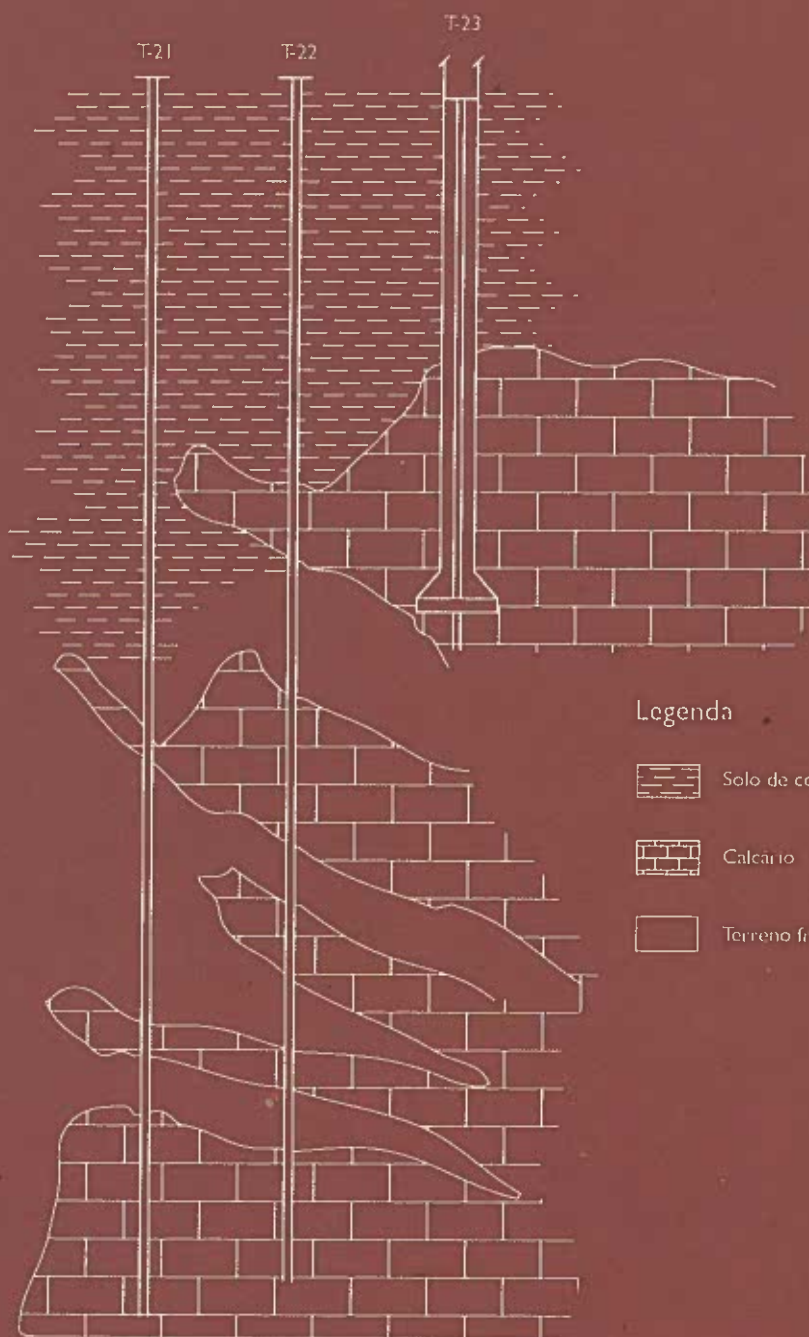
- 1) formação de cavidades de dissolução no calcário, durante uma fase inicial, cuja idade e duração são indeterminadas. Esses espaços, uma vez saturados, passaram a constituir um aquífero;
- 2) desenvolvimento de cavidades em solo e movimentação de superfície em uma fase atual. As cavidades em rocha são fatores predisponentes da subsidência de colapso (Prandini et al, 1987).



- a Solos de cobertura
- b Resíduos de dissolução
- c Solos amolgados
- d Calcário com cavidades

- ↑ Indução/aceleração de fluxo
- ↑ Avanços do teto das cavidades em solo (ruptura e erosão)
- ↓ Movimentos descendentes de solo
- ⊥ Subsistência do terreno
- ⊥ Trincas no solo

Figura 9 – Modelo interpretativo da dolina de Cajamar (Nakazawa et al, 1987)



Legenda

- Solo de cobertura
- Calcário
- Terreno fraco

Figura 10 – Provável maciço calcário com vazios originados por dissolução (Costa Nunes et al, 1987)

A Figura 9 mostra o processo de formação da dolina de Cajamar, amplamente pesquisado por técnicos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

b) Votorantim (SP)

Em Votorantim, assim como na cidade vizinha de Capão Bonito, existem importantes instalações industriais para fabricação de cimento, que estão localizadas dentro da mesma unidade geológica, representada pelo Grupo Açungui (Costa Nunes et al, 1987).

Nessas indústrias, surgiram problemas inesperados quando da escavação dos tubulões da fundação dos silos, apresentando grandes cavidades preenchidas com material argiloso, em meio à rocha calcária. Era impossível mudar o *layout* das instalações, já parcialmente construídas. Como a profundidade dos fenômenos cársticos era bastante grande, chegando a mais de 40 m, a solução de fundações profundas ultrapassando a zona cárstica não se revelou viável, sendo, além disso, de difícil execução em face da ocorrência de lentes de rocha dura intermeadas de solo mole. A Figura 10 mostra o provável perfil geológico do subsolo, a partir das sondagens realizadas no local.

A solução adotada para a estabilização do subsolo foi a substituição do material mole por lavagem cruzada e enchimento dos vazios com calda de cimento, cimento-argila ou argamassa injetada até uma certa profundidade das fundações das estruturas. Em Capão Bonito, foi encontrada uma cavidade em forma de gruta num dos tubulões, que consumiu 93 m³ de concreto no seu fechamento.