DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/76

Colapso de Solos em Ambientes Cársticos: Avaliação Geotécnica e Ambiental de Lapão (BA)

Aline Rodrigues de Cerqueira
Engenheira Civil, Barra do Mendes, Bahia, Brasil, alinetec10@hotmail.com

Eduardo Antonio Maia Lins
Professor Adjunto, IFPE, Recife, Brasil, eduardomaialins@gmail.com

RESUMO: O presente estudo analisa o colapso de solos na cidade de Lapão, Bahia, fenômeno associado à exploração intensiva e irregular de águas subterrâneas destinadas à irrigação agrícola. Inserida sobre o aquífero Bambuí, a região apresenta ambiente cárstico composto por rochas calcárias suscetíveis à dissolução e instabilidade estrutural. A perfuração indiscriminada de poços, somada à redução pluviométrica regional e à ausência de controle técnico, promoveu rebaixamento significativo do nível freático, reduzindo a sustentação hidráulica das cavidades subterrâneas e desencadeando dolinas de colapso, fissuras no terreno e danos em edificações urbanas. A investigação integrou métodos de geotecnia ambiental, incluindo levantamentos de eletrorresistividade e sondagens rotativas executadas pelo Serviço Geológico do Brasil e pela Consominas Engenharia. As análises geofísicas identificaram zonas de baixa resistividade (<500 Ω·m), associadas a calcários alterados e fraturados, enquanto os ensaios geotécnicos indicaram elevada condutividade hidráulica, fraturamento intenso e evidências de carstificação ativa. Fatores antrópicos adicionais, como infiltração de esgotos, ausência de saneamento e sobrecarga construtiva, intensificam a subsidência do terreno. O fenômeno é interpretado como colapso de solos metaestáveis decorrente da perda de poropressão e do rearranjo estrutural do maciço. Recomenda-se controle de captação subterrânea, implantação de saneamento, investigações geotécnicas prévias e zoneamento de risco. O caso evidencia a necessidade de gestão integrada dos recursos hídricos e do planejamento urbano em áreas cársticas.

PALAVRAS-CHAVE: Colapso de solos; Carste; Dolinas; Águas subterrâneas; Geotecnia ambiental.

ABSTRACT: This study investigates soil collapse in the municipality of Lapão, Bahia, Brazil, a phenomenon associated with intensive and irregular groundwater extraction for agricultural irrigation. The area is located over the Bambuí aquifer and is characterized by a karstic geological setting predominantly composed of limestone rocks, which are highly susceptible to dissolution and structural instability. The uncontrolled drilling of wells, combined with reduced rainfall and lack of technical management, caused a significant groundwater table drawdown, leading to loss of hydraulic support of underground cavities and triggering sinkholes, ground fissures, and structural damage to urban buildings. The investigation integrated environmental geotechnical approaches, including electrical resistivity surveys and rotary drilling. Geophysical results identified low-resistivity zones (<500 Ω·m) associated with weathered and fractured limestone, while borehole data indicated high hydraulic conductivity, intense fracturing, and active karstification processes. Additional anthropogenic factors, such as sewage infiltration, absence of sanitation systems, and structural overloading, further intensified ground subsidence. From a geotechnical perspective, the process is interpreted as the collapse of metastable soils caused by pore-pressure reduction and structural rearrangement of the rock mass. Recommended measures include groundwater abstraction control, sanitation implementation, mandatory geotechnical investigations, and land-use zoning. The case highlights the need for integrated groundwater management and preventive urban planning in karst environments.

KEYWORDS: Soil collapse; Karst; Sinkholes; Groundwater; Environmental geotechnics.

1. INTRODUÇÃO

Terrenos desenvolvidos sobre rochas carbonáticas figuram entre os ambientes geotécnicos mais complexos e desafiadores para a ocupação humana, em virtude da elevada heterogeneidade estrutural,

anisotropia hidráulica e intensa variabilidade espacial das propriedades mecânicas do maciço. A dissolução química do calcário, controlada pela interação entre água, dióxido de carbono e fraturas estruturais, promove a formação progressiva de vazios subterrâneos, condutos preferenciais de fluxo, cavernas e dolinas, configurando o relevo cárstico. Esse processo resulta em significativa redução da continuidade do meio rochoso, comprometendo sua capacidade de suporte e favorecendo a ocorrência de subsidências diferenciais e colapsos abruptos da superfície (Ford; Williams, 1989; White, 1988).

Sob a ótica hidrogeológica, aquíferos cársticos distinguem-se por apresentar elevada condutividade hidráulica, regime de escoamento predominantemente turbulento em condutos e forte sensibilidade às variações do nível freático. Pequenas alterações no balanço hídrico podem desencadear respostas rápidas no sistema, modificando o estado de tensões efetivas e a estabilidade das cavidades subterrâneas (Freeze; Cherry, 1979; Fetter, 2001). O bombeamento excessivo de água subterrânea, prática recorrente em regiões agrícolas, promove o rebaixamento piezométrico, reduz a poropressão e elimina o suporte hidráulico que auxilia na sustentação do teto das cavidades, favorecendo processos de ruptura progressiva e subsidência do terreno. Assim, intervenções antrópicas passam a atuar como gatilhos que aceleram mecanismos geomorfológicos originalmente graduais.

Do ponto de vista geotécnico, o comportamento de solos e maciços metaestáveis em ambientes cársticos pode ser interpretado à luz do conceito de colapso estrutural. Solos colapsíveis são aqueles que, em condição parcialmente saturada, mantêm estrutura aparente estável, mas, quando submetidos à molhagem ou a mudanças no estado de tensões, sofrem rearranjo abrupto das partículas, ocasionando redução volumétrica expressiva e recalques súbitos (Teixeira, 1993). Em substratos calcários fraturados, esse fenômeno é potencializado pela presença de vazios, zonas dissolvidas, perda de cimentação carbonática e elevada permeabilidade, o que facilita a infiltração de água e a progressão do intemperismo químico. Consequentemente, fundações superficiais e obras lineares tornam-se particularmente vulneráveis a deformações diferenciais, trincas estruturais e falhas localizadas.

No Brasil, formações carbonáticas do Grupo Bambuí, amplamente distribuídas no Nordeste e Centro-Oeste, apresentam histórico de instabilidades geotécnicas relacionadas à carstificação ativa e à exploração intensiva de águas subterrâneas. A combinação entre clima semiárido, baixa recarga natural e uso agrícola irrigado favorece a superexploração hídrica, resultando em rebaixamento contínuo do lençol freático e agravamento dos processos de subsidência. Além disso, a expansão urbana frequentemente ocorre sem zoneamento geotécnico adequado, incorporando áreas suscetíveis a colapsos, infiltração de efluentes domésticos e sobrecarga construtiva, fatores que intensificam a dissolução calcária e a instabilidade do maciço (Kohler, 1995; Christofoletti, 1980).

Esse quadro é particularmente evidente no município de Lapão, Bahia, inserido sobre o aquífero Bambuí e caracterizado por economia fortemente dependente da agricultura irrigada. Nas últimas décadas, a redução dos índices pluviométricos, associada à perfuração indiscriminada de poços tubulares profundos, promoveu regime de superexploração hídrica e acentuado rebaixamento piezométrico regional. Como consequência, têm sido registrados episódios recorrentes de fissuras no pavimento, recalques diferenciais, danos em edificações e formação de dolinas de colapso tanto em áreas rurais quanto no perímetro urbano. Investigações geofísicas e sondagens diretas evidenciam maciços calcários intensamente fraturados, zonas de baixa resistividade elétrica associadas a rochas alteradas e elevada condutividade hidráulica, confirmando a elevada suscetibilidade do terreno a processos de instabilidade estrutural.

Nesse contexto, a compreensão integrada entre geologia, hidrogeologia e mecânica dos solos torna-se fundamental para o diagnóstico e a mitigação de riscos. Abordagens de geotecnia ambiental, associando métodos indiretos - como eletrorresistividade - a investigações diretas por sondagens rotativas, permitem caracterizar a distribuição espacial de vazios, zonas alteradas e descontinuidades estruturais, subsidiando o zoneamento de risco e o planejamento territorial. Assim, o presente trabalho tem por objetivo analisar, sob enfoque geotécnico e hidrogeotécnico, os mecanismos responsáveis pelo colapso de solos em Lapão, propondo diretrizes técnicas para a gestão sustentável do uso da água subterrânea e para a ocupação segura de terrenos cársticos, contribuindo para a prevenção de danos estruturais e para a resiliência urbana..

2. METODOLOGIA

2.1 Delineamento metodológico e estratégia de investigação

O estudo foi desenvolvido segundo abordagem integrada de geotecnia ambiental, estruturado como estudo de caso aplicado, com caráter exploratório, descritivo e explicativo, visando compreender os mecanismos físico-mecânicos e hidrogeológicos responsáveis pelo colapso do terreno em ambiente cárstico urbano. Terrenos carbonáticos apresentam elevada heterogeneidade estrutural, anisotropia hidráulica e presença de vazios dissolvidos, o que inviabiliza a caracterização confiável por métodos isolados. Assim, recomenda-se a integração de técnicas indiretas e diretas para reduzir incertezas e aumentar a confiabilidade do diagnóstico geotécnico (Ford; Williams, 1989).

Nesse contexto, adotou-se estratégia multiproxy, combinando levantamentos geofísicos de eletrorresistividade, sondagens rotativas com ensaios hidráulicos e análise hidrogeológica regional, permitindo correlacionar propriedades elétricas, parâmetros geomecânicos e comportamento do aquífero. Tal integração metodológica é amplamente indicada em investigações de risco geotécnico em meios cársticos, dada a forte variabilidade espacial das propriedades do maciço (White, 1988).

2.2 Levantamento de dados secundários e reconhecimento geotécnico de campo

A primeira etapa consistiu na compilação de dados secundários referentes à pluviometria histórica, cadastro de poços tubulares, registros de níveis d'água, relatórios técnicos, laudos estruturais e mapeamentos prévios de ocorrências de subsidência. Esses dados subsidiaram a análise do balanço hídrico regional e a identificação de tendências de superexploração do aquífero.

Paralelamente, realizou-se reconhecimento geológico-geotécnico de campo, com inspeções sistemáticas para registro de fissuras no pavimento, recalques diferenciais, danos em edificações, surgimento de dolinas e pontos de infiltração de efluentes. Esse procedimento permitiu selecionar áreas críticas para investigação detalhada e estabelecer correlações preliminares entre uso do solo, cargas antrópicas e manifestações de instabilidade, prática recomendada em avaliações de risco geotécnico urbano.

2.3 Investigação geofísica por eletrorresistividade

A caracterização indireta do subsolo foi conduzida por meio do método da eletrorresistividade, técnica amplamente empregada em estudos geotécnicos e ambientais por sua sensibilidade a variações de saturação, porosidade, fraturamento e grau de alteração mineralógica (Ward, 1990; Telford *et al.* 1990). O método baseia-se na injeção de corrente elétrica no terreno e na medição das diferenças de potencial geradas, permitindo estimar a resistividade aparente dos materiais.

Foram executados perfis utilizando arranjo dipolo–dipolo, cuja geometria proporciona elevada resolução lateral e é particularmente eficaz na identificação de feições cársticas, tais como vazios, condutos dissolvidos e zonas fraturadas. Os dados coletados foram submetidos a inversão bidimensional para obtenção de seções geoelétricas, possibilitando distinguir:

- baixas resistividades (< 500 Ω·m), associadas a calcários alterados, fraturados ou saturados;
- resistividades intermediárias, relacionadas a rochas parcialmente competentes;
- valores elevados, compatíveis com maciços preservados ou cavidades secas.

Essa etapa permitiu mapear descontinuidades estruturais e orientar a locação das sondagens diretas.

2.4 Sondagens rotativas e caracterização geomecânica do maciço

Com vistas à validação das anomalias geofísicas, executaram-se sondagens rotativas com recuperação contínua de testemunhos, método consagrado para descrição litológica e avaliação da qualidade do maciço rochoso. A integridade estrutural foi quantificada por meio do índice Rock Quality Designation (RQD), parâmetro proposto por Deere (1964) para mensurar o grau de fraturamento e amplamente empregado na classificação geomeânica de rochas.

Durante a perfuração foram registrados grau de alteração, espaçamento de fraturas, zonas de perda de recuperação, ocorrência de vazios e preenchimentos argilosos, indicadores típicos de carstificação ativa. Ensaios de perda d'água sob pressão foram realizados para estimativa da condutividade hidráulica, conforme procedimentos descritos por Hoek; Bray (1981), permitindo avaliar a permeabilidade do maciço e sua suscetibilidade à percolação e dissolução progressiva.

Esses parâmetros forneceram base objetiva para caracterização do comportamento mecânico e hidráulico do substrato carbonático.

2.5 Análise hidrogeológica e fundamentação mecânica

A interpretação hidrogeológica baseou-se na correlação entre dados de captação, níveis estáticos e precipitação regional, permitindo inferir tendências de rebaixamento piezométrico associadas ao bombeamento intensivo. O comportamento do sistema foi analisado à luz dos princípios clássicos do fluxo subterrâneo e da teoria das tensões efetivas, segundo a qual:

$$\sigma' = \sigma - u \tag{1}$$

onde σ' representa a tensão efetiva, σ a tensão total e u a poropressão. A redução da pressão neutra decorrente do bombeamento implica aumento das tensões transmitidas ao arcabouço sólido, favorecendo instabilidades estruturais (Freeze; Cherry, 1979; Fetter, 2001). Em meios cársticos, essa condição promove perda de sustentação hidráulica das cavidades e pode deflagrar subsidências e colapsos localizados.

2.6 Integração espacial e modelo conceitual de instabilidade

Os resultados geofísicos, geotécnicos e hidrogeológicos foram integrados em ambiente georreferenciado, permitindo sobreposição espacial de zonas de baixa resistividade, maciços fraturados, setores de alta condutividade hidráulica e locais de ocorrência de danos estruturais. Essa integração possibilitou elaborar modelo conceitual de evolução do colapso, no qual a carstificação natural é intensificada por rebaixamento do nível freático, infiltração de efluentes e sobrecarga construtiva.

Tal abordagem permitiu delimitar áreas de maior suscetibilidade geotécnica e fundamentar tecnicamente recomendações de zoneamento de risco e planejamento urbano.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Contexto hidroclimático e intensificação da exploração subterrânea

A análise histórica dos dados pluviométricos e de uso hídrico indica tendência consistente de redução das precipitações anuais associada ao aumento progressivo da dependência de captações subterrâneas para irrigação agrícola. Esse desequilíbrio entre recarga natural e extração antrópica caracteriza regime de superexploração do aquífero, promovendo rebaixamento contínuo do nível freático.

Do ponto de vista hidrogeológico, essa condição implica redução da poropressão e aumento das tensões efetivas transmitidas ao arcabouço sólido do maciço (Freeze; Cherry, 1979). Em aquíferos cársticos, onde a sustentação parcial de cavidades depende da pressão hidráulica interna, o rebaixamento piezométrico favorece instabilidade estrutural e colapso progressivo de vazios (Ford; Wolliams, 1989). Assim, o cenário identificado no município de Lapão constitui importante fator predisponente à subsidência.

3.2 Resposta geofísica do substrato carbonático

Os levantamentos de eletrorresistividade executados pelo Serviço Geológico do Brasil revelaram forte variabilidade lateral das propriedades elétricas do subsolo, evidenciando a heterogeneidade típica de terrenos cársticos. As seções geoelétricas apresentaram extensas zonas de baixa resistividade (< 500 Ω·m), interpretadas como calcários alterados, saturados e intensamente fraturados, além de anomalias circulares compatíveis com vazios ou cavidades.

Conforme descrito por Telford *et al.* (1990), reduções significativas de resistividade em rochas carbonáticas geralmente refletem aumento de porosidade, saturação e conectividade hidráulica, características associadas a processos de dissolução ativa. A presença dessas anomalias, coincidente com áreas onde foram registrados danos estruturais, sugere relação direta entre alteração do maciço e manifestações superficiais de instabilidade.

Adicionalmente, feições arqueadas e descontinuidades verticais observadas nas seções indicam deformações internas e subsidência progressiva, compatíveis com abatimento do teto de cavidades. Esses padrões corroboram a interpretação de carstificação ativa intensificada por intervenções antrópicas.

3.3 Caracterização geotécnica do maciço por sondagens rotativas

As sondagens rotativas realizadas pela Consominas Engenharia confirmaram as interpretações geofísicas, evidenciando maciços predominantemente calcários com elevado grau de fraturamento, zonas de alteração intensa, perdas frequentes de recuperação de testemunhos e ocorrência de vazios preenchidos por materiais argilosos.

Os valores de RQD mostraram grande variabilidade espacial, com trechos classificados como maciços de baixa qualidade geomecânica, indicando descontinuidades frequentes e reduzida integridade estrutural (Deere, 1964). Ensaios de perda d'água sob pressão revelaram condutividades hidráulicas médias a muito altas, evidenciando elevada permeabilidade e conectividade entre fraturas, condição que favorece percolação de água e intensificação do intemperismo químico.

Do ponto de vista mecânico, tais características implicam redução da rigidez e da capacidade de suporte do terreno, aumentando a suscetibilidade a recalques diferenciais sob cargas superficiais. Esse comportamento é coerente com o conceito de maciços metaestáveis, cuja resistência depende parcialmente da pressão neutra e da cimentação carbonática, ambas reduzidas pela exploração hídrica.

3.4 Integração hidrogeotécnica e mecanismo de colapso

A integração dos resultados evidencia forte correlação espacial entre:
(i) zonas de baixa resistividade elétrica;
(ii) maciços altamente fraturados e permeáveis;
(iii) áreas com grande concentração de poços tubulares;
(iv) locais de ocorrência de subsidências e danos estruturais.

Essa convergência de evidências sustenta modelo conceitual no qual o bombeamento excessivo promove rebaixamento piezométrico, elevando as tensões efetivas ($\sigma' = \sigma - u$) e reduzindo a sustentação hidráulica das cavidades. O enfraquecimento progressivo do teto rochoso culmina em ruptura localizada, propagando-se para a superfície sob a forma de dolinas de colapso ou recalques diferenciais.

O processo é agravado por fatores urbanos adicionais, como infiltração de efluentes domésticos, que aumenta a agressividade química da água percolante, e sobrecarga de edificações, que eleva as tensões aplicadas. Esse comportamento está em consonância com descrições clássicas de subsidência induzida em terrenos cársticos (White, 1988; Fetter, 2001).

3.5 Implicações geotécnicas e discussão crítica

Os resultados demonstram que o colapso observado não decorre exclusivamente da evolução natural do carste, mas de processo induzido por ação antrópica, no qual a superexploração hídrica atua como principal gatilho de instabilidade. A presença de maciços intensamente fraturados, elevada permeabilidade e vazios dissolvidos configura condição crítica para implantação de fundações superficiais sem investigação prévia.

Do ponto de vista prático, a área deve ser classificada como de alta suscetibilidade geotécnica, demandando investigações obrigatórias, restrições de carga, controle de captação subterrânea e implantação de saneamento. A adoção dessas medidas é fundamental para mitigar riscos estruturais e garantir segurança urbana.

Assim, o caso de Lapão constitui exemplo representativo da interação entre processos geológicos naturais e pressões antrópicas, reforçando a necessidade de gestão integrada de recursos hídricos e planejamento territorial preventivo em ambientes cársticos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu caracterizar, de forma integrada, os mecanismos geológicos, hidrogeológicos e geotécnicos associados aos processos de colapso do terreno observados no município de Lapão, evidenciando que as subsidências registradas resultam da interação entre a fragilidade natural do sistema cárstico e a intensificação de pressões antrópicas sobre o aquífero subterrâneo. A ocorrência de rochas carbonáticas intensamente fraturadas, associadas a condutos dissolvidos e elevada permeabilidade, confere ao maciço comportamento estrutural heterogêneo e suscetível à perda de suporte, constituindo condição predisponente a recalques diferenciais e colapsos localizados.

Os levantamentos de eletrorresistividade realizados pelo Serviço Geológico do Brasil demonstraram a presença de extensas zonas de baixa resistividade elétrica, compatíveis com calcários alterados e fraturados, enquanto as sondagens rotativas executadas pela Consominas Engenharia confirmaram maciços de baixa qualidade geomecânica, com elevado grau de descontinuidades e condutividade hidráulica significativa. A concordância entre os métodos indiretos e diretos reforça a confiabilidade do diagnóstico, indicando que a carstificação ativa e a intensa conectividade hidráulica do substrato favorecem a evolução de vazios subterrâneos e a consequente instabilidade da superfície.

Sob o ponto de vista hidrogeológico, a redução progressiva da recarga natural, combinada ao bombeamento intensivo de poços para irrigação agrícola, promove rebaixamento do nível freático e diminuição da poropressão, aumentando as tensões efetivas atuantes no maciço rochoso. Esse processo compromete a sustentação hidráulica das cavidades calcárias e atua como gatilho para a ruptura do teto das estruturas subterrâneas, deflagrando subsidências e dolinas de colapso. Fatores urbanos adicionais, como infiltração de esgotos domésticos e sobrecarga construtiva, intensificam a dissolução química do carbonato e aceleram a degradação estrutural do terreno.

Os resultados obtidos indicam que o fenômeno observado não deve ser interpretado exclusivamente como evolução natural do carste, mas sim como processo induzido e amplificado por ações antrópicas, evidenciando a necessidade de gestão integrada entre recursos hídricos, planejamento urbano e geotecnia preventiva. Nesse contexto, a ocupação de áreas sobre substrato carbonático sem investigação prévia configura risco elevado, especialmente para edificações com fundações rasas ou cargas concentradas.

Do ponto de vista prático, recomenda-se a implantação de sistema público de esgotamento sanitário, o controle e regularização das captações subterrâneas, o fechamento de poços em áreas urbanas sensíveis, a realização obrigatória de investigações geotécnicas prévias em novas construções e o estabelecimento de zoneamento de suscetibilidade geotécnica. Tais medidas são essenciais para reduzir a exposição a danos estruturais e aumentar a segurança da população.

Por fim, o caso de Lapão constitui referência relevante para estudos de geotecnia ambiental em terrenos cársticos no semiárido brasileiro, demonstrando a importância da integração entre métodos geofísicos, sondagens diretas e análise hidrogeológica na avaliação de riscos. A abordagem adotada mostrou-se eficaz para o diagnóstico de áreas instáveis e pode ser replicada em municípios com contexto geológico semelhante, contribuindo para políticas públicas de monitoramento hidrogeotécnico e ocupação territorial sustentável..

REFERÊNCIAS

Albrecht, K. J. (1996) Avaliação dos problemas geológico-geotécnicos em terrenos cársticos: base para o mapeamento geotécnico. 1996. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

Christofoletti, A. (1980) Geomorfologia. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher.

Consominas Engenharia. (2018) Relatório de sondagens rotativas e caracterização geotécnica – Lapão (BA). Salvador: Consominas Engenharia.

Deere, D. U. (1964) Technical description of rock cores for engineering purposes. Rock Mechanics and Engineering Geology, London, v. 1, n. 1, p. 16–22.

Fetter, C. W. (2001) Applied hydrogeology. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.

Ford, D.; Williams, P. (1989) Karst geomorphology and hydrology. London: Unwin Hyman.

Freeze, R. A.; Cherry, J. A. (1979) Groundwater. Englewood Cliffs: Prentice Hall.

Hoek, E.; Bray, J. (1981) Rock slope engineering. 3. ed. London: Institution of Mining and Metallurgy.

Serviço Geológico do Brasil (CPRM). (2013) Relatório técnico de investigação geofísica e hidrogeológica – município de Lapão (BA). Salvador: CPRM.

Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. (1990) Applied geophysics. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

Teixeira, W. (1993) Solos colapsíveis: mecanismos e implicações geotécnicas. In: Oliveira, A. M. S.; Brito, S. N. A. (org.). Geologia de engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – ABGE, p. 137–162.

Ward, S. H. (1990) Geotechnical and environmental geophysics. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists.

White, W. B. (1988) Geomorphology and hydrology of karst terrains. New York: Oxford University Press.