

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ANÁLISE GEOMECÂNICA PRELIMINAR DA
ESTABILIDADE DA CAVERNA ÁGUA SUJA, PETAR – SP

Gustavo Haruki Saka

Orientador: Prof. Dr. Georg Robert Sadowski
Co-orientador: Prof. Dr. Ivo Karmann

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2011 / 21)

SÃO PAULO
2011

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ANÁLISE GEOMECÂNICA PRELIMINAR DA ESTABILIDADE DA
CAVERNA ÁGUA SUJA, PETAR – SP



A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Gustavo Haruki Saka", written over a horizontal line.

Autor: Gustavo Haruki Saka

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Georg Robert Sadowski", written over a horizontal line.

Orientador: Prof. Dr. Georg Robert Sadowski

Co-orientador: Prof. Dr. Ivo Karmann

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2011/21)

SÃO PAULO

2011

DEDALUS - Acervo - IGC



30900030345

TF
S458
GH.a

INSTITUTO DE PESQUISAS
GEOLOGICAS E METEOROLOGICAS

ANALISE GEOMETRICA E FOTOMETRICA DA
CAVERNA AGUA SUJA - RJ



[Handwritten signature]

Prof. Dr. Carlos Ribeiro

[Handwritten signature]

Coordenador Geral do Grupo de Pesquisas

De coordenador Geral do Grupo de Pesquisas

MONOGRAFIA DE TRABALHOS DE PESQUISA
(1954)

SAO PAULO

1954

Resumo

O objetivo deste trabalho foi analisar, de forma preliminar, a estabilidade da Caverna Água Suja, localizada no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), utilizando as metodologias usualmente aplicadas em escavações subterrâneas em Geomecânica. Foi discutido o fator de segurança para a caverna, especialmente do seu trecho inicial (275 metros), além de ser avaliada a aplicabilidade destes métodos para a análise de estabilidade de cavernas, através do estudo deste caso específico.

A Caverna Água Suja, que apresenta desenvolvimento horizontal total de 3150 metros, desenvolve-se nos metacarbonatos da Formação Mina de Furnas (Subgrupo Lajeado), constituída essencialmente por mármore finos a médios, com bandamento centi a decimétrico, correspondente ao acamamento sedimentar.

Os métodos utilizados para avaliar a estabilidade da caverna foram: Sistemas de Classificação Geomecânica de Maciços Rochosos (Q, RMR e GSI), análise de cunhas, análise numérica via Método de Elementos de Contorno e análise de ruptura flexural das bandas/camadas. Tais análises se basearam nos dados existentes na literatura sobre a caverna, complementados com observações de campo e em Modelo Digital de Terreno (MDT). Os parâmetros petrofísicos do metacarbonato e das descontinuidades foram também estimados a partir da literatura.

As combinações das famílias de descontinuidades, identificadas em campo e em lineamentos sobre MDT, formam cunhas de gravidade potenciais, especialmente a partir da combinação entre o acamamento/ bandamento (normalmente N60E/54NW) e a família de fraturas de atitude N70E/subvertical (associada às falhas e ao plano axial das dobras regionais). No entanto, quando as descontinuidades encontram-se intactas (preenchidas por calcita e/ou firmemente fechadas e seladas), tais cunhas apresentam FS altíssimos. Apesar disso, indícios de ruptura em cunha são encontrados na caverna: cicatrizes de ruptura angulosas, descolamento e erosão preferencial ao longo das descontinuidades e geometria dos perfis transversais da caverna correspondente à geometria teórica definida pelas cunhas críticas. A ruptura por cunhas pode ser explicada pela deterioração dos parâmetros de resistência à tração pela erosão preferencial das descontinuidades preenchidas e por fadiga. Além disso, a concentração de tensões distensivas nas arestas agudas da caverna, como o ápice dos perfis em capela, favorece a abertura de fraturas por tração, que pode desencadear a formação de cunhas.

De modo análogo à ruptura por cunha, a ruptura flexural é um fenômeno progressivo na caverna, essencialmente condicionado por descontinuidades. Quando descolados, os estratos

passam a se comportar como vigas e tornam-se sujeitos à ruptura por flexão. As camadas metacarbonáticas da Formação Mina de Furnas na área da caverna são em geral, de espessura decimétrica. Para esta ordem de grandeza, o comprimento máximo de uma camada isolada previsto (considerando resistência à tração da rocha intacta = 5MPa) seria de alguns metros, o que é observado na caverna. No entanto, a redução do número de pontos de apoio (devido a uma fratura sendo aberta) e a redução da resistência à tração do metacarbonato, devido à fadiga, progressivamente reduzem a condição de estabilidade, causando ruptura progressiva dos estratos.

Considerando que a deterioração das descontinuidades e dos parâmetros de resistência da rocha é um fator influente para ruptura por cunha e flexural, a entrada da caverna é mais sujeita a estes tipos de ruptura, uma vez que o intemperismo é mais intenso e o maciço encontra-se aliviado.

Aplicando os Sistemas de Classificação de Maciço Rochoso, o maciço foi classificado como de boa qualidade, sendo os índices obtidos independentemente, correlacionáveis ($Q = 29.3$; $RMR = 74$ e $GSI = 77$). A retroanálise via método numérico indica $GSI = 80$, próximo ao valor obtido diretamente. Plotando tais índices nos diagramas de suporte, usualmente utilizados para escavações subterrâneas, é previsto que reforços seriam necessários. O diagrama-Q forneceu a melhor previsão, considerando o fator $ESR = 1.6$, aplicado para minas subterrâneas permanentes; segundo este diagrama, seria necessário atirantamento pontual nos maiores condutos e nos menores, nenhum reforço. Em geral, o campo de estabilidade de cavernas é superior ao previsto pelos diagramas de suporte aplicados em túneis, porém foi considerada útil a aplicação de tais métodos, desde que com as devidas alterações nos diagramas de auto-sustentação.

Seria previsto pela análise numérica via Elementos de Contorno através da aplicação direta dos índices obtidos em Sistemas de Classificação de Maciços Rochoso (GSI médio = 75), que alguns trechos da Caverna Água Suja estivessem instáveis à ruptura em meio contínuo. No entanto, considerando que a caverna encontra-se essencialmente estável à ruptura por sobre-tensões em meio contínuo, por meio de retroanálise, obteve-se o valor de $GSI = 80$, próximo ao valor obtido diretamente. Neste cenário, trechos com $FS < 1$ são restritos a arestas agudas na caverna, onde se formam tensões distensivas, como no teto de perfis em capela; em alguns trechos, o contorno da caverna apresenta FS valores próximo a 1 (entre 1 e 2), especialmente na região onde as cavernas Água Suja de Cima e de Baixo se aproximam; a coalescência destes dois condutos forma o 1º Salão, que apesar de ter maiores dimensões, apresenta maior FS , no intervalo entre 2 e 3.

Conclui-se que a condição de estabilidade da caverna é complexa, dada a atuação e interação destes diferentes mecanismos de ruptura ao longo do tempo. Considerando que os fatores de segurança para estes mecanismos de ruptura (principalmente os condicionados por

descontinuidades) tendem a ser progressivamente reduzidos, pode-se dizer que a Caverna Água Suja está sujeita a eventos de ruptura, especialmente na sua entrada.

Abstract

The aim of this work was to analyse, in a preliminary view, the stability of the Água Suja Cave which is located at the State Touristic Park of Alto Ribeira (*Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira* – PETAR), through the methodologies usually applied to underground excavations in Geomechanics. Using these methods, the safety factor (SF) for the cave is discussed, specially concerning the initial 275 meters of the cave. Their applicability to assess the stability conditions of a karstic cave was hereby evaluated.

The Água Suja Cave, has a total horizontal extension of 3150 meters. It has been developed in metacarbonates of the Mina de Furnas Formation (Lajeado Subgroup), which is constituted essentially by fine to medium grained marble, with centi- to decimetric thick banding that corresponds to the original bedding.

The following methods were applied in order to evaluate the stability of the cave: usual Geomechanical Rock Mass Classifications (Q, RMR and GSI), wedge analysis, numerical analysis - through the use of the Boundary Element Method, and flexural strength analysis. They were applied on the available bibliographical data which were partially reviewed and complemented with field observations as also a regional analysis of the available Digital Terrain Model (DTM). Petrophysical parameters of the metacarbonates and of their discontinuities were also estimated based on the charted values.

The combination of the discontinuity sets identified in the field and from the DTM lineaments allowed to visualize potential roof wedges, specially by the combination of spatial position of the banding/bedding planes (normally around N60E/54NW) and that of the dominant N70E/subvertical joint set whose attitude is related to regional faults and folds. However, when the discontinuities are intact (healed by calcite filling and/or tightly closed and sealed), these wedges have utterly high safety factors. In spite of this aspect, evidences of wedge rupture are found in the cave: angular rupture scars, displacement and preferential erosion along the discontinuities and the geometry of the cave's cross sections, which correspond to the theoretical geometry previewed in the wedge analysis. The attained equilibrium profile could have been triggered by the gradual run-out of the tensile strength parameters due to preferential erosion of the calcite filled joints and time-dependent creep. With time it is expected that the concentration of tensile tensions in the sharp edges of the cave, such as the apex of the chapel-form cross sections, enhances the formation of tensile fractures which can lead to wedge formation.

Similarly to the wedge rupture, the flexural failure is also a progressive failure mechanism in the cave, essentially conditioned by discontinuities. When partially detached, the beds start behaving as beams/ cantilevers and are prone to flexural rupture. The metacarbonatic beds of the Mina de Furnas Formation in the cave usually show decimetric thickness. To this order of magnitude, the largest predicted beam length could have been of a couple of meters, what is confirmed by field observations. However, the reduction of points of support (due to a fracture opening) and of the tensile strength of the metacarbonate due to fatigue, progressively lower the stability condition, causing gradual rupture of the beds.

Considering that the deterioration of the discontinuities and the rock tensile strength parameters are an important factor for wedge and flexural failure, the entrance area of the cave, near to the surface, is more prone to these types of rupture, while there the weathering is more intense and the rock mass relieved.

Applying the Rock Mass Classifications, it was found that the rock mass can be classified as of good quality, being the three independently obtained indexes correlatable ($Q = 29.3$; $RMR = 74$ e $GSI = 77$). The back-analysis using a numerical approach indicates $GSI = 80$, which is similar to the values calculated directly. These indexes were plotted into the tunneling support diagrams and showed that supports would have been required. The Q -support chart offered the best prediction for $ESR = 1.6$ (applied for permanent mine opening); according to the Q -chart, spot bolting would have been necessary for the large passages while smaller conduits would have remained unsupported. In general, the stability field of caves is larger than that of the tunnels, but the application of this sort of methods was considered valid for caves, with the properly amendments in the stand-up time charts.

Using the GSI -value ($GSI=75$) obtained directly from the Rock Mass Classification indexes, it has been predicted by the numerical analysis that some portions of the Água Suja Cave would have been unstable or susceptible to failure in a continuum rock mass. However, considering that the cave looks still very likely stable at the over-stress conditions in the continuum mass, a value of $GSI=80$ was assumed as reasonable after a back-analysis. In this scenario, portions with $SF < 1$ are limited to sharp edges in cave, where tensile tensions are concentrated, such are the apexes of the chapel cross sections; in some segments, SFs close to 1 (1-2) surround the cave, specially in the region where the Upper and the Lower Água Suja Cave portions come closer; the coalescence of these two conduits forms the 1st Chamber, which presents higher SF (2-3), despite its size.

We conclude that the stability conditions of the cave are complex, due to the action and interaction of the potential failure mechanisms over time. Considering that the safety factor of these mechanisms (mainly those conditioned by discontinuities – flexural and wedge failure) tend to be progressively lowered, it can be said that Água Suja Cave is subject to rupture events, specially around its entrance.

Agradecimentos

Para a execução deste trabalho, tive a sorte de poder contar com a colaboração de pessoas sem as quais ele não seria possível.

Deixo minha mais sincera gratidão e admiração ao orientador deste trabalho, Prof. Dr. Georg Robert Sadowski, cujos ensinamentos técnicos, científicos e éticos levarei para a vida.

Ao Prof. Dr. Ivo Karmann, pela co-orientação dentro do tema de terrenos cársticos e pela indicação da Caverna Água Suja.

Agradeço ao pessoal do GGEO de 1988 pelo excelente mapeamento da Caverna Água Suja, sem o qual este trabalho não seria possível. E também a todo o pessoal do GGEO de 2011, que muito me ajudou na primeira visita à caverna, especialmente Maria Carolina Catunda e Camila Augusto dos Anjos.

A Leonardo Aguiar e Vinícius Zacatei, pela companhia na aventura que foi a segunda visita à caverna e a Adinan Jarouche, pelo companheirismo desde o ano passado na escolha do projeto.

Agradeço a Eduardo Zioli Fernandes, por ceder seu belo retrato da entrada da Caverna Água Suja e à Daniela Leonel Borges, não só pela revisão do *Abstract*, mas pelo fato de eu poder rascunhá-lo em inglês.

À Prof. Dra. Eliane Aparecida Del Lama pela gentileza em emprestar o martelo de Schmidt e me acompanhar durante os ensaios, juntamente com Natália Rodrigues, a quem também saúdo.

A todos os professores e funcionários do Instituto de Geociências, a quem devo minha formação acadêmica e profissional, especialmente os Profs. Drs. Jorge Kazuo Yamamoto e Gergely Szabó, que me orientaram ao longo do curso e me deixaram valiosas lições.

Aos amigos que me acompanharam ao longos dos cinco anos de graduação.

A minha família, especialmente Massayo Saka e Edson Haruhiko Saka, meus pais, e Mariana Naomi Saka, minha irmã, agradeço pela formação e apoio.

Sumário

Resumo

Abstract

Agradecimentos

1 Introdução.....	1
2 Objetivos.....	1
3 Justificativa.....	1
4 Fundamentação bibliográfica.....	2
4.1 Trabalhos de Geologia.....	2
4.1.1 Geologia regional.....	2
4.1.2 Geologia local	4
4.2 Morfologia da caverna do ponto de vista da Espeleogênese.....	5
4.3 Análise de estabilidade.....	6
4.3.1 Critério de ruptura Hoek & Brown.....	7
4.3.2 Sistemas de classificação de maciço rochoso	8
4.3.3 Análise de cunhas.....	8
4.3.4 Análise numérica geomecânica do maciço.....	8
4.3.5 Ruptura flexural.....	9
4.4 Bibliografia específica sobre estabilidade de cavernas.....	10
5 Materiais e Métodos.....	12
5.1 Sistemas de Classificação de Maciço Rochoso.....	12
5.2 Análise de cunhas.....	13
5.2.1 Análise de lineamentos estruturais em Modelo Digital de Terreno.....	13
5.3 Análise numérica.....	14
5.4 Avaliação da resistência flexural.....	14
6 Desenvolvimento do trabalho.....	15
7 Resultados Obtidos.....	17
7.1 Levantamento de descontinuidades e Análise de cunhas.....	17
7.1.1 Análise de lineamentos estruturais em Modelo Digital de Terreno.....	17
7.1.2 Dados estruturais – coletados em campo e da literatura.....	18
7.1.3 Análise de Cunhas.....	24
7.2 Sistemas de Classificação de Maciço Rochoso.....	30
7.2.1 Sistema Q.....	30
7.2.2 Rock Mass Rating (RMR).....	31
7.2.3 Geological Strenght Index (GSI).....	32
7.2.4 Comparação entre os índices Q, RMR e GSI.....	33

7.3 Análise numérica.....	35
7.3.1 Modelo discretizado da caverna.....	35
7.3.2 Parâmetros físicos da rocha intacta.....	36
7.3.3 Tensões in-situ e restrições do Examine 3D.....	37
7.3.4 Análise de tensões.....	38
7.3.5 Critério de ruptura Hoek-Brown para o maciço rochoso.....	41
7.3.5.i Calculado a partir dos índices obtidos via Sistemas de Classificação de Maciço Rochoso.....	41
7.3.5.ii Obtenção do índice GSI por retroanálise e redefinição da envoltória de ruptura Hoek-Brown.....	41
7.4 Ruptura por flexão de estratos.....	42
8 Interpretação e Discussão dos Resultados.....	47
8.1 Ruptura condicionada por descontinuidades.....	47
8.1.1 Ruptura em cunha.....	47
8.1.2 Ruptura flexural.....	48
8.2 Ruptura por sobre-tensões em meio contínuo: discussão do Fator de Segurança obtido via análise numérica.....	48
8.3 Abordagem empírica: tempo de auto-sustentação teórico do maciço baseado em Sistemas de Classificação de Maciço Rochoso.....	50
9 Conclusões.....	52
10 Referências Bibliográficas.....	54
Anexo 1: Análise numérica via EXAMINE 3D	
Anexo 1.A: Revisão bibliográfica: o Método de Elementos de Contorno	
Anexo 1.B: Representação de um elemento de tensão	
Anexo 1.C: Obtenção do índice GSI por retroanálise	
Anexo 2: Tipos de dolina	
Anexo 3: Análise de lineamentos sobre MDT	
Anexo 3. A: Lineamentos traçados sobre Fm. Mina de Furnas e sobre metacarbonatos do Subgrupo Lajeado.	
Anexo 3. B: Lineamentos traçados sobre Subgrupo Lajeado e Formação Água Clara	

1 Introdução

O colapso de cavernas naturais constitui um risco geológico tanto em superfície, devido à formação de dolinas, quanto para a visitação turística ou exploratória em seu interior. Para avaliar as condições de instabilidade geomecânica de uma caverna, pode-se compará-la a uma escavação subterrânea, apesar dos seus processos formadores serem distintos; o desenvolvimento de uma caverna ocorre numa escala de tempo muito superior aos processos de escavação antrópicos.

Este trabalho pretende analisar a estabilidade de trechos selecionados da Caverna Água Suja, localizada no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), utilizando as metodologias usualmente aplicadas em escavações subterrâneas em Geomecânica. Deste modo, espera-se oferecer uma estimativa do fator de segurança da estabilidade da caverna, além de avaliar a aplicabilidade destes métodos para cavernas, através do caso de estudo.

2 Objetivos

Avaliar de forma preliminar a estabilidade da caverna Água Suja através da aplicação de métodos usualmente utilizados para escavações subterrâneas: Sistemas de Classificação Geomecânica de Maciços Rochosos (Q, RMR e GSI), análise de cunhas e análise numérica via programa EXAMINE 3D (Rocscience 2003) no trecho inicial da caverna (275 metros iniciais). Espera-se oferecer uma estimativa do fator de segurança para o trecho selecionado, além de avaliar a aplicabilidade destes métodos para a análise de estabilidade de cavernas, através do estudo deste caso específico e seu confronto com alguns exemplos da literatura.

3 Justificativa

Dentro da área de geomecânica aplicada, este trabalho empregará os métodos já consagrados de análise de estabilidade de escavações subterrâneas, que apresentam uma série de aplicações em obras civis e mineiras, fazendo parte de sistemas de transporte, de armazenamento, transmissão de energia, distribuição de água e energia, entre outros (Francis & Rocha 1998). O custo, o tempo e a segurança da execução destas obras dependem do método de escavação, dos reforços e do tratamento do maciço rochoso (Hoek *et al.* 1997). A análise da estabilidade do maciço rochoso norteia a escolha dos sistemas de suporte e daí emerge sua importância.

Os métodos originalmente desenvolvidos para escavações subterrâneas serão aplicados a um trecho selecionado de uma caverna cárstica em rochas calcárias, a Caverna Água Suja, no

Vale do Ribeira, Estado de São Paulo. Estima-se que terrenos cársticos desenvolvidos sobre rochas carbonáticas cubram entre 10% e 15% da superfície dos continentes sem cobertura glacial; além disso, aproximadamente 25% a 30% da população mundial depende parcial ou totalmente da água subterrânea extraída de carstes (Ford & Williams 2007).

Além disso, o PETAR recebe anualmente milhares de visitantes, atraídos principalmente pela beleza das cavernas. Entre 1996 e 1998, o número de visitantes recebidos no parque variou entre 24.831 e 28.850 (Allegrini 1999 *apud* Karmann & Ferrari 2002). A análise da estabilidade da Caverna Água Suja pode ser utilizada para avaliar o grau de segurança dessa caverna para a visita.

4 Fundamentação bibliográfica

4.1 Trabalhos de Geologia

4.1.1 Geologia regional

A área de estudo localiza-se na porção sul da Faixa Ribeira (figura 1), dentro do Domínio Apiaí, onde se encontra um conjunto de rochas supracrustais de grau metamórfico baixo a médio. Neste domínio, a estratigrafia é melhor preservada em comparação às porções setentrionais da Faixa Ribeira, onde o grau metamórfico é mais alto (Campanha & Sadowski, 1999). Este conjunto de rochas supracrustais, denominado como Supergrupo Açungui, possui embasamento composto por rochas gnaisso-migmatíticas com intercalações de rochas charnockíticas e supracrustais de grau metamórfico variando de médio a alto. O Supergrupo Açungui e seu embasamento são intrudidas por uma série de corpos granitóides, com características diversas (Campanha 1991), além de alcalinas mesozóicas e alguns diques básicos relacionados ao Arco de Ponta Grossa.

O arcabouço regional da região é constituído por blocos tectônicos em um sistema anastomosado de zonas de cisalhamento dúcteis e dúcteis-rúpteis de caráter predominantemente transcorrente, aparentemente do tipo transpressivo, direção NE-SW e rejeitos quilométricos. Estes blocos, incluindo expressivas intrusões graníticas, encontram-se internamente dobrados e falhados, com vergência dominante no rumo SE (Campanha 1991).

Diversas divisões litoestratigráficas para a região foram propostas e uma discussão detalhada sobre o assunto pode ser encontrada em Campanha (1991), cuja proposição para a litoestratigrafia e descrição serão utilizados neste trabalho, com as atualizações de Campanha & Sadowski (1999) e Campanha *et al.* (2008).

O alvo de estudo encontra-se situado no Supergrupo Açungui em meio às rochas do Grupo

Votuverava, mais especificamente, no Subgrupo Lajeado, (figura 1). O Subgrupo Lajeado é constituído por pacotes relativamente espessos intercalados de metacarbonatos e metapsamitos a pelitos. A maior parte do Sistema Cárstico do Alto Vale do Rio Ribeira de Iguape (Karmann 1994), do qual a caverna Água Suja é parte desenvolve-se sobre os metacarbonatos do Subgrupo Lajeado. Dentro do Subgrupo Lajeado, a caverna Água Suja desenvolve-se nos metacarbonatos da Formação Mina de Furnas (figura 2).

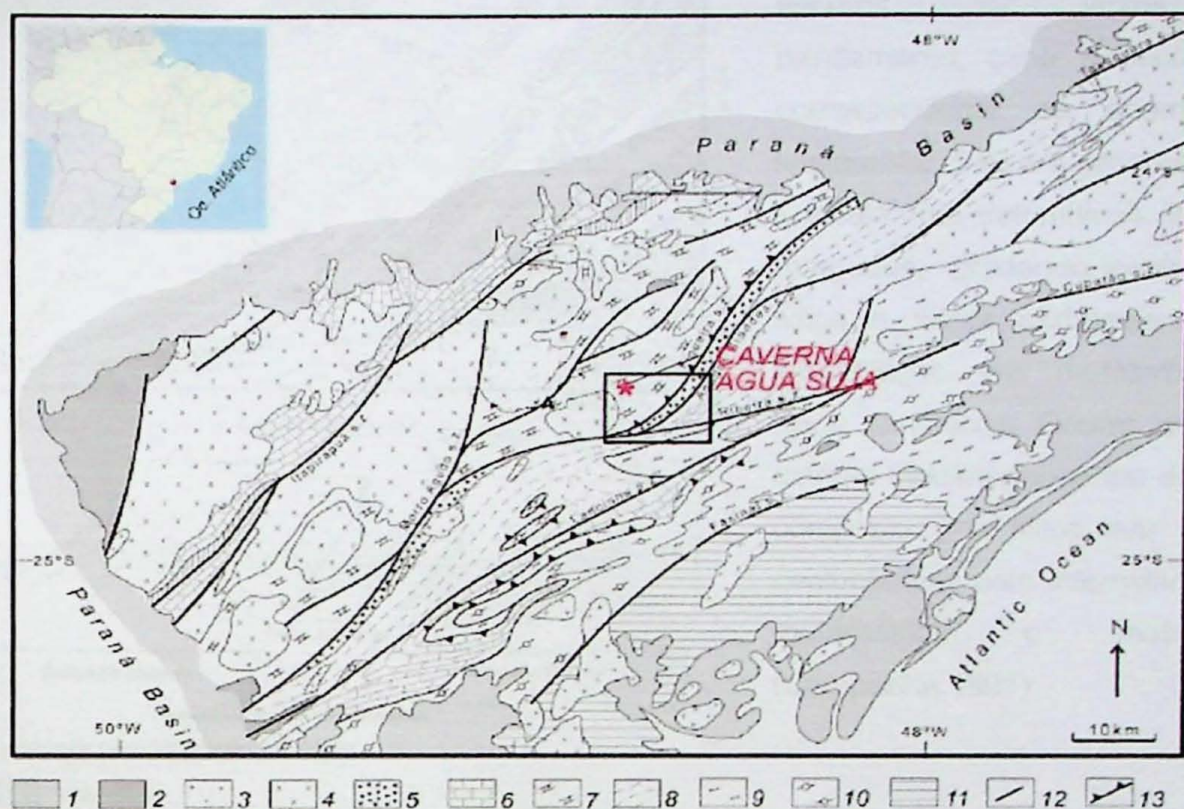
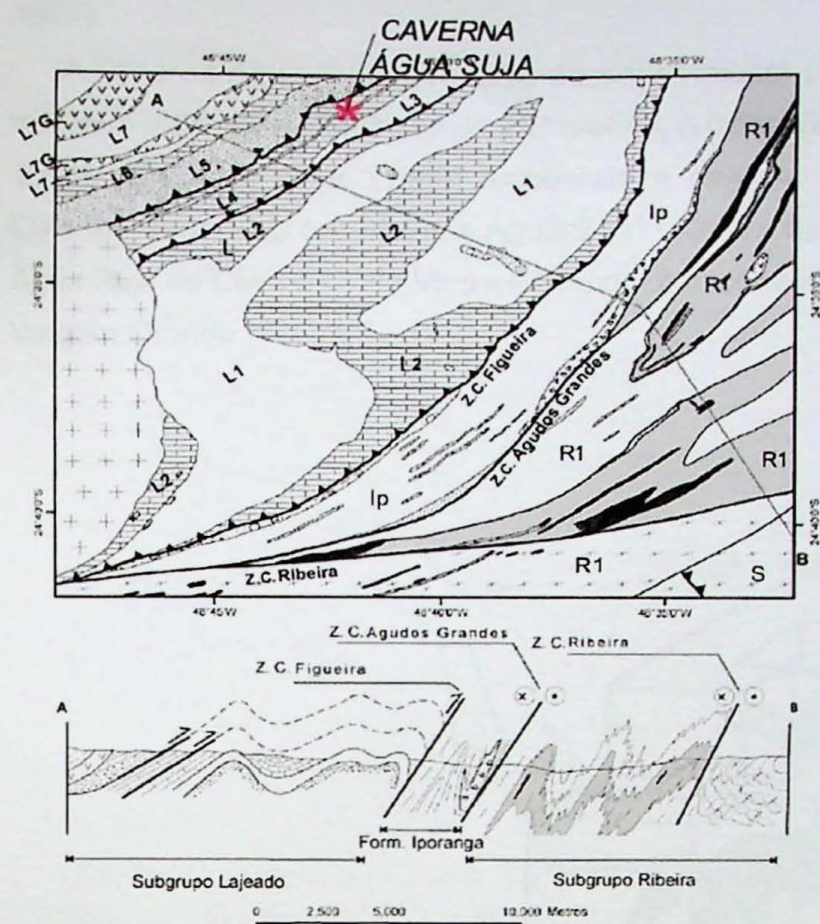
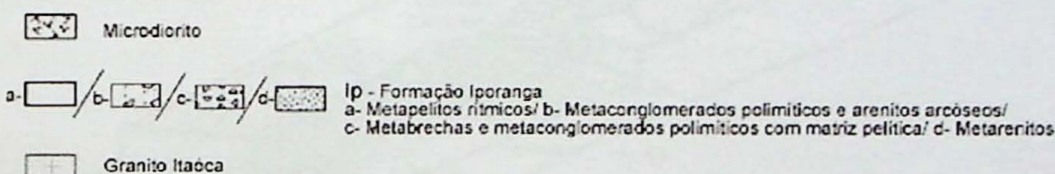


Figura 1: Localização da Caverna Água Suja no contexto geológico regional: (1) cobertura e rochas intrusivas fanerozóicas; (2) bacias tardias "strike-slip"; (3) granitos pós-tectônicos; (4) granitos sin a pós-tectônicos calci-alcalinos; (5) Formação Iporanga; (6) Metacarbonatos (Grupo Itaiacoca e Formação Capiu) (7) Metacarbonatos e metapelitos a metapsamitos (Subgrupo Lajeado e Formação Água Clara); (8) Metapelitos a metapsamitos e metabasitos (Subgrupo Ribeira); (9) Xistos e filitos (Complexos Embu, Setuva e Turvo-Cajati); (10) Complexo gnáissico-migmatítico; (11) Complexo Costeiro (Luis Alves); (12) Zonas de cisalhamento transcorrentes; (13) Zonas de cisalhamento inversas. A área selecionada corresponde ao mapa de detalhe (Figura 2). [Adaptado de Campanha *et al.* 2008].

4.1.2 Geologia local

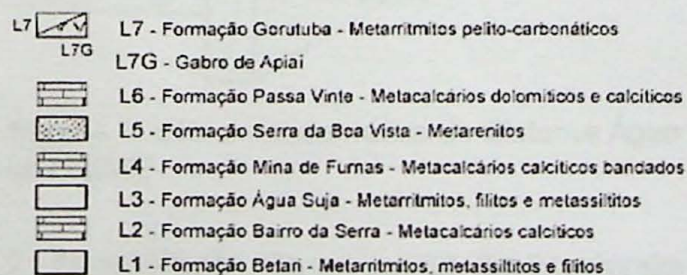


UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

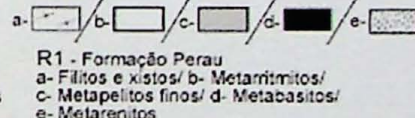


Grupo Voluverava

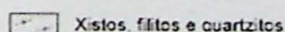
Subgrupo Lajeado



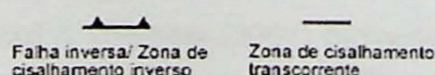
Subgrupo Ribeira



S- Grupo Setuva



NOTAÇÕES ESTRUTURAIS



A Formação Mina de Furnas é constituída essencialmente por mármore, finos a médios, cinza escuros, por vezes com bandamento, centi a decimétrico, correspondente ao acamamento sedimentar. São em geral calcíticos e localmente dolomíticos, impuros, margosos, gradando localmente a filitos e xistos carbonáticos com intercalação de metassiltitos e filitos sericíticos. Ocorre um nível estreito bastante contínuo de filitos, composto por filitos em bandas centimétricas com intercalações de metassiltitos e metarenitos (Campanha 1991).

Figura 2: Localização da Caverna Água Suja no contexto geológico local. [Adaptado de Campanha *et al.* (2008) e Campanha (1991).]

A presença destes níveis metapelíticos-psamíticos associa-se à morfologia observada no sumidouro principal da Caverna Água Suja, caracterizada por um *poço* de contato (Karmann 1994).

A Caverna Água Suja apresenta desenvolvimento planimétrico de aproximadamente 3000 metros e o desnível altimétrico de 297 metros, o maior dentre as cavernas do PETAR (Karmann 1994). Batistucci *et al.* (1988) mapearam a caverna em escala de ultra-detelhe, 1:400. A Caverna Água Suja (ou Sistema Água Suja) é composta pela Gruta Água Suja de Baixo, Gruta Água Suja de Cima e Gruta Vargem Grande, que conecta-se à Água Suja de Baixo pelo Abismo Vargem Grande (Figura 3).

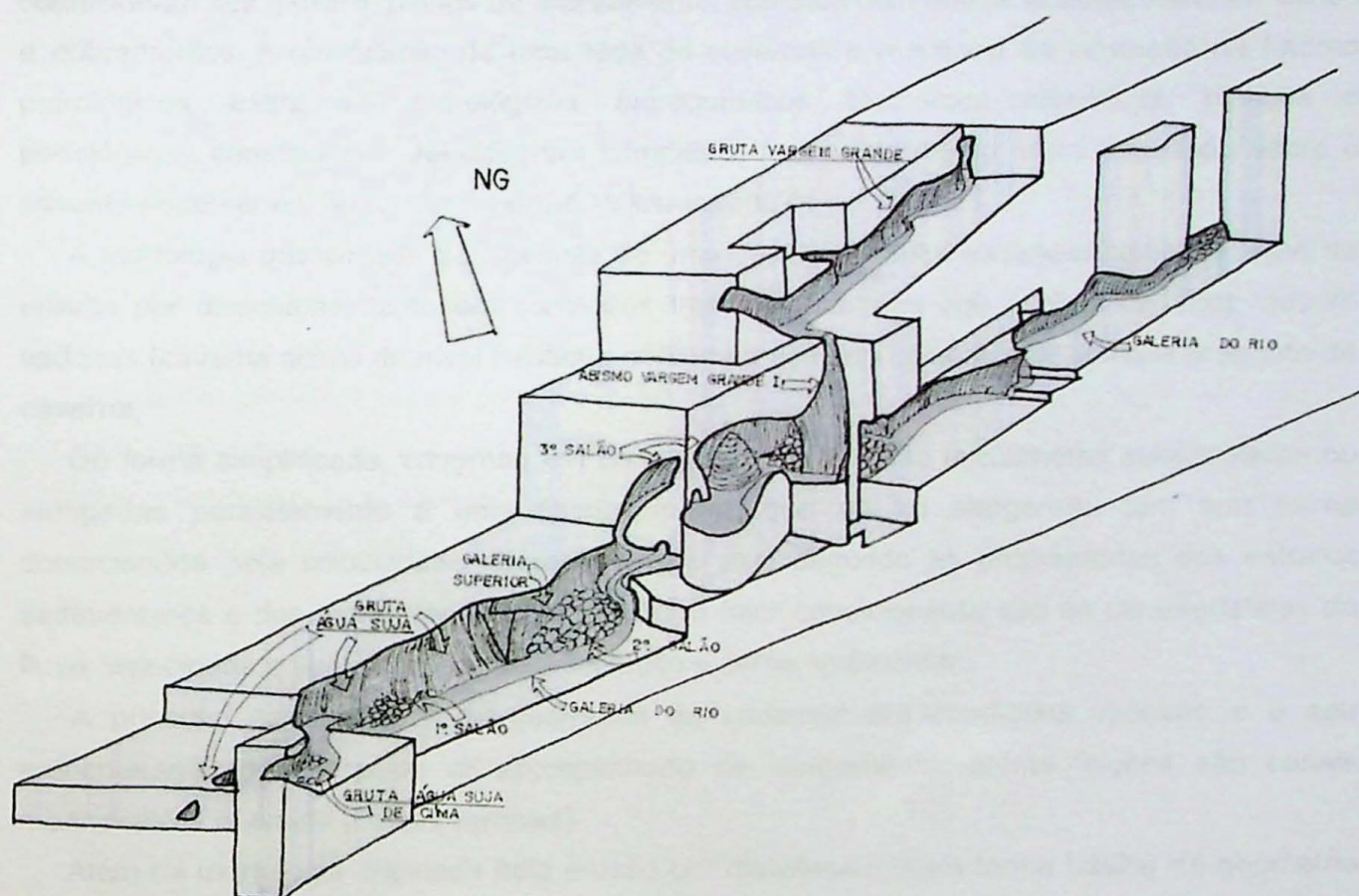


Figura 3: Bloco esquemática do Sistema Água Suja, sem escala. [Extraído de Batistucci et al. (1988)]

4.2 Morfologia da caverna do ponto de vista da Espeleogênese

Ford & Williams (2007) definem carste como um terreno com formas de relevo e hidrologia com feições características, formado a partir da combinação de rochas com alta solubilidade e do desenvolvimento de porosidade secundária. São exemplos de feições típicas dolinas, depressões fechadas, vales cegos e sistemas de cavernas associados à drenagem subterrânea.

Escavações subterrâneas e cavernas são relativamente análogas do ponto de vista de estabilidade geomecânica, porém são formadas por processos distintos. A morfologia da caverna pode ser explicada em termos de processos formadores naturais, que temporalmente são de desenvolvimento bem mais lento se comparados aos métodos de escavação utilizados pelo homem.

A maior parte dos sistemas cársticos desenvolve-se sobre rochas carbonáticas, devido a sua alta solubilidade. Além da solubilidade, outras propriedades da rocha são atuantes no desenvolvimento do carste: pureza da rocha, granulação e textura, porosidade primária e secundária e resistência mecânica. Do maciço rochoso, fatores estruturais e estratigráficos condicionam sua gênese: planos de acamamento, contatos com outros litotipos, fraturas, falhas e dobramentos. A ramificação de uma rede de cavernas é resultado da interação de fatores petrológicos, estruturais, hidrológicos, hidroquímicos, tectônicos, climáticos, bióticos e pedológicos, constituindo uma das mais complexas formas de relevo. Uma discussão sobre o assunto pode ser encontrada em Ford & Williams (2007).

A morfologia das seções transversais de uma caverna resulta essencialmente da ação da erosão por dissolução, tanto em condições freáticas (caverna sob o nível freático), quanto vadosas (caverna acima do nível freático), somada à ação do colapso das paredes e do teto da caverna.

De forma simplificada, cavernas em condições freáticas são inicialmente subcirculares ou alongadas paralelamente a uma fissura inicial, que ao se alargarem, tem sua forma condicionada pela solubilidade diferencial, que atua segundo as propriedades dos estratos sedimentares e das estruturas existentes. Outro fator condicionante são as características do fluxo: velocidade e tipo, potencial de dissolução e carga sedimentar.

A principal característica da geometria de cavernas em condições vadosas é o seu entricheiramento, que pode vir acompanhado de alargamento; outras feições são canais meandantes e *shafts* (canais verticais).

Além da morfologia originada pela erosão por dissolução, outra forma básica da geometria de cavernas é originada a partir do seu colapso; caracteriza-se por superfícies irregulares e arestas angulosas nas paredes e no teto da caverna. A causa deste colapso é a ruptura mecânica, seja ao longo de descontinuidades, seja na rocha intacta, que ocorre quando os valores de tensão superam os da resistência do material (Ford & William 2007).

4.3 Análise de estabilidade

Diferentes abordagens são utilizadas de forma complementar para a previsão da estabilidade e do comportamento geomecânico de uma escavação subterrânea, abaixo discutidas. A relação entre as tensões atuantes, face o desenvolvimento morfológico da

caverna com o tempo, e as propriedades de resistência da rocha responsáveis pela sua estabilidade são determinadas por algumas leis da mecânica dependentes das propriedades reológicas dos materiais envolvidos e formalizadas pelos chamados Critérios de Ruptura. Destes, os mais utilizados na análise de maciços de rocha são os critérios de Mohr-Coulomb e o de Hoek & Brown.

4.3.1 Critério de ruptura Hoek & Brown

Desenvolvido por Hoek e Brown em 1980, será adotado neste trabalho na versão de Hoek *et al.* (2002). Trata-se de um critério de ruptura que relaciona a tensão principal máxima (σ_1) e a mínima (σ_3) numa situação crítica de ruptura, levando em conta algumas características empíricas do maciço rochoso como um todo (parâmetros m e s) em contrapartida com o critério Mohr-Coulomb, geralmente aplicado de forma linear, relacionando tensão normal e cisalhante a um ângulo de atrito interno. Para a obtenção dos parâmetros necessários para o cálculo da envoltória de ruptura, seja via Método Hoek-Brown, seja via critério Mohr-Coulomb, podem ser utilizados os Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos (item 4.3.2). Nisto, reside uma das vantagens do critério Hoek-Brown, que pode ser estabelecido de modo relativamente simples não somente para amostras intactas, mas também para um maciço rochoso, através do índice GSI (*Geological Strength Index* - item 5.1: Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos).

A envoltória de ruptura do critério Hoek-Brown é dada pela equação:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

onde m_b é calculado a partir da constante m , apropriada para a rocha intacta:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (2)$$

sendo s e a , constantes do maciço rochoso, calculadas a partir das equações:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (4)$$

D é o grau de distúrbio do maciço rochoso, devido a danos causados por explosão e relaxamento de tensões. O parâmetro s é uma função do grau de fraturamento do maciço sendo igual à unidade para a rocha intacta.

A partir do critério ruptura Hoek-Brown podem ainda ser ajustados os parâmetros do critério Mohr-Coulomb, ângulo de atrito interno e coesão, de forma não linear. Equações para o ajuste destes critérios podem ser encontradas em Hoek *et al.* (2002).

4.3.2 Sistemas de classificação de maciço rochoso

Face à dificuldade de estabelecer correlações matemáticas que coincidam com os comportamentos encontrados na natureza tem sido desenvolvidas e reconhecidas abordagens de origem empírica. Tornou-se portanto, corrente a aplicação de Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos, que baseiam-se na ponderação de um conjunto de características geológico-geomecânicas cujo resultado é um índice semi-quantitativo ou nota utilizados como parâmetro-guia da previsão do comportamento geomecânico do maciço rochoso, bem como de sua trabalhabilidade em obras de engenharia (Serra Junior & Ojima 1998). Através destas classificações, pode-se dimensionar o sistema de suporte a ser empregado e estimar, no caso de escavações subterrâneas, o tempo de auto-sustentação do maciço (*stand up time*) em função das dimensões do vão dito ativo sem suporte (Lauffer 1958 *apud* Hoek & Brown 1982). Neste trabalho, serão aplicados três Sistemas de Classificação de Maciço Rochoso selecionados por serem corriqueiramente utilizados e estarem consolidados no meio profissional, posteriormente listados no item 5.1 – *Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos*.

4.3.3 Análise de cunhas

Em escavações subterrâneas em maciços rochosos fraturados, o tipo mais comum de instabilidade é gerado pela formação de cunhas, que podem estar sujeitas a cair do teto ou deslizar das paredes laterais (Goodman 1980). São formadas pela intersecção de elementos estruturais planares, tais como fraturas e planos de acamamento sedimentar, e a superfície da escavação (Hoek *et al.* 1995).

De forma sumária, a análise de cunhas consiste em:

- (1) Identificar as atitudes médias das famílias de descontinuidades encontradas no maciço.
- (2) Verificar quais são as cunhas hipotéticas com potencial de instabilidade.
- (3) Calcular o fator de segurança destas cunhas.
- (4) Calcular o suporte necessário para a escavação.

4.3.4 Análise numérica geomecânica do maciço

O estado de tensões no interior de um maciço rochoso é uma função do peso das rochas sobrejacentes e dos esforços tectônicos nele atuantes. A deformação, seja ela dúctil ou rúptil, e os deslocamentos no interior do maciço rochoso resultam da interação de um dado estado de tensões e das características geomecânicas das rochas que compõem o maciço rochoso.

Uma escavação subterrânea ou uma caverna induzem um rearranjo na distribuição dos elementos de tensão, e eventualmente pode ocorrer um acúmulo de tensões segundo a geometria da cavidade que pode superar a resistência da rocha e causar instabilidade (Hoek *et al.* 1995); a previsão das condições críticas de ruptura é baseada nos critérios de ruptura, como o de Hoek & Brown.

Conhecidas as condições nos limites de um corpo em equilíbrio, pode-se calcular a distribuição das tensões no maciço. No entanto, este cálculo não é trivial, sendo necessário a aplicação de artifícios matemáticos computacionais, como o Método de Elementos Finitos, Diferenciais Finitas e Elementos de Contorno.

O programa EXAMINE 3D (2000), que adota o Método de Elementos de Contorno (*Boundary Element Method*), será aqui utilizado na análise numérica da distribuição de tensões em meio contínuo. Shah (1992) discute o método e sua implementação; um breve resumo sobre o método segue ao final deste trabalho, no *Anexo 1.A – Análise numérica via Examine 3D (Rocscience 2000)*.

A principal vantagem do Método de Elementos de Contorno sobre os Métodos de Domínio (p.ex.: Elementos Finitos, Diferenciais Finitas), é que no método de Elementos de Contorno, a parte do problema que deve ser discretizada é o contorno da escavação (ou da caverna, no caso do trabalho) e da topografia, por outro lado, nos Métodos de Domínio, todo o domínio (no caso, o maciço rochoso) deve ser discretizado, aumentando assim o custo computacional, bem como a complexidade da discretização.

4.3.5 Ruptura flexural

A ruptura por flexão de estratos isolados, em maciços estratificados é um dos mecanismos importantes na condição de estabilidade da caverna (Ford & Williams 2007; Waltham *et al.* 2005). Para analisar a resistência à ruptura flexural de um estrato, uma abordagem tem sido compará-lo a uma viga, que pode estar apoiada em um ponto (engaste) ou em dois pontos (apoios). Para que um estrato se comporte como uma viga, é necessário que tenha ocorrido um descolamento prévio do estrato ao longo da descontinuidade.

Pode-se descrever a condição crítica de ruptura por flexão comparando o momento fletor da viga com a resistência à flexão, que é função da resistência à tração do material constituinte e da espessura da viga; o momento de flexão pode ser calculado a partir do comprimento da viga, seu peso e inclinação. Waltham *et al.* (2005) discorrem sobre o tema e propõem a seguinte expressão para estratos sedimentares na posição horizontal:

- i) para vigas apoiadas nos dois lados:

$$d = L^2 \gamma / 2T \quad (5);$$

- ii) para vigas engastadas em apenas um dos lados:

$$d = 6L^2 \gamma / 8T \quad (6).$$

onde d é a espessura da viga, L é seu comprimento, γ é o peso específico do material e T é a resistência à tração do material constituinte.

Considerando as vigas com um ângulo de caimento α , temos:

$$d = L^2 \gamma \cos(\alpha) / 2T \quad (9); \text{ e } d = 6L^2 \gamma \cos(\alpha) / 8T \quad (10).$$

Henry *et al.* (1977) ao estudarem experimentalmente a propagação de fissuras em calcários e metacalcários de granulação muito fina, demonstra a redução de sua resistência ao longo do tempo (figura 4).

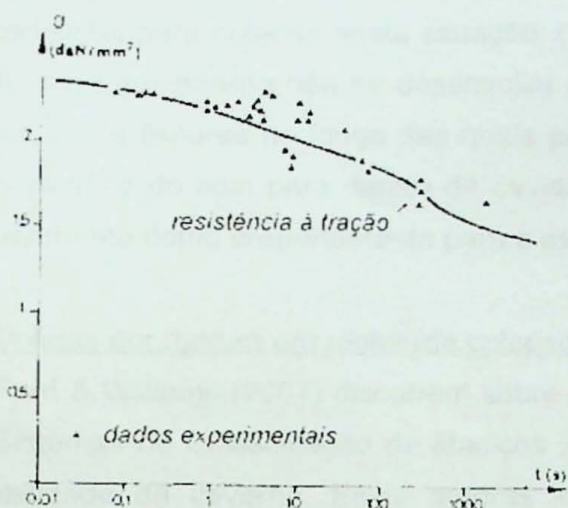


Figura 4: Curva de variação da resistência ao longo do tempo de uma viga de mármore muito fino, apoiada em um único ponto – adaptado de Henry *et al.* (1977).

4.4 Bibliografia específica sobre estabilidade de cavernas

Em terrenos cársticos, a abordagem usualmente adotada para a avaliação de estabilidade baseia-se na formação de colinas, seja por colapso, subsidência ou dissolução; a classificação de dolinas de Waltham *et al.* (2005) pode ser encontrada no Anexo 2, com a descrição dos principais parâmetros de cada tipo (processo de formação, rocha hospedeira, velocidade de formação, dimensões máximas e risco em engenharia). Tal abordagem é adotada devido ao interesse em avaliar a estabilidade da **superfície** do terreno em obras de engenharia ou durante exploração da água subterrânea. Uma abordagem mais abrangente é encontrada no trabalho de Waltham & Fookes (2003), que propõem um método para classificação das condições de terrenos cársticos para fins de engenharia.

Na literatura, dois conjuntos principais de trabalhos podem ser sumarizados sobre o tema. Um grupo abrange a formação de dolinas em solo (dolinas tipo *dropout* e *suffosion*) e o outro, em rocha (dolinas de colapso e de *caprock*).

Dolinas por ruptura/ subsidência em solo (tipo *dropout* e *suffosion*)

Alguns trabalhos, especialmente de autores chineses, tem discutido a questão de colapso

de solo (*dropout*) em terrenos cársticos desencadeado pelo rebaixamento do nível freático devido à utilização antrópica da água subterrânea e consequente aumento nas tensões efetivas; He *et al.* (2003) propõem um critério quantitativo baseado no critério de ruptura Mohr-Coulomb para avaliar a estabilidade do solo sobrejacente a cavernas sob condições de rebaixamento freático; Lei *et al.* (2002) apresentam um sistema de gestão de risco em áreas cársticas baseado em Sistema de informação geográfica (SIG).

Yang & Drumm (2002) propõem um método de avaliação de estabilidade para cavernas cujo teto situa-se na transição solo-rocha, baseado no critério de ruptura Mohr-Coulomb do solo, na largura da cavidade e na espessura de solo sobrejacente. Estes autores apontam dois mecanismos para colapso nesta situação: (1) quando a cobertura de solo é pouco espessa, o efeito de arqueamento não se desenvolve por completo e devido ao acúmulo de tensões, há formação de fissuras ao longo das quais pode se desencadear o colapso da cobertura; e (2) fluxo plástico do solo para dentro da cavidade. Tien (1990) também aponta o mecanismo de arqueamento como preponderante para a estabilidade de cavernas.

Dolinas por ruptura em rocha (de colapso e *caprock*)

Ford & Williams (2007) discorrem sobre o tema, considerando a possibilidade da aplicação de Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos como uma alternativa para a análise de estabilidade da caverna. Estes autores sugerem que ruptura por flexão seja o principal mecanismo de colapso em cavernas, comparando os estratos sedimentares a vigas, que podem estar engastados em um ponto ou apoiados em dois pontos. Esta abordagem é baseada no fato de que a resistência da rocha é muito maior do que a resistência flexural de estratos isolados.

Segundo Waltham *et al.* (2005), a estabilidade de uma caverna é função de sua dimensão e da condição estrutural do maciço rochoso. O colapso de uma caverna seria progressivo, composto por eventos de ruptura do teto da caverna, que migraria para cima até atingir a superfície, formando a dolina. O fator que desencadearia um evento de ruptura do teto seria o alargamento da seção transversal da caverna, que geraria instabilidade; dois mecanismos são apontados para a ruptura do teto: ruptura por flexão de estratos isolados e reequilíbrio da seção da caverna (efeito de arqueamento). O colapso pode se dar tanto pela migração vertical de uma cavidade isolada, quanto pela coalescência de fissuras, câmaras e shafts. Baryakh *et al.* (2008) e Baryakh *et al.* (2009) utilizam o método de Elementos Finitos para simular as condições de tensão e deformação em modelos simplificados de cavernas, no seu entorno e em áreas sobrejacentes. De forma semelhante, Hatzor *et al.* (2010) utilizam o Método de Elementos Distintos para estimar as condições de estabilidade de uma caverna, em termos de largura da cavidade e de espessura da cobertura sobrejacente.

5 Materiais e Métodos

Neste trabalho, foram aplicados quatro abordagens para a análise da estabilidade da caverna, usualmente utilizadas em escavações subterrâneas, abaixo listados.

5.1 Sistemas de Classificação de Maciço Rochoso

Três Sistemas de Classificação de Maciço Rochoso, amplamente empregados no meio profissional, serão empregados:

- Sistema Q, segundo as recomendações de Barton (2002), que é baseado em seis parâmetros: i) RQD; ii) Número de família de juntas (J_n); iii) Rugosidade da família de juntas crítica (J_r); iv) Grau de alteração ou preenchimento da família de juntas crítica (J_a); v) Condições hidráulicas (J_w); e vi) Condições relativas ao estado de tensões (SRF). Os valores atribuídos para estes parâmetros podem ser encontrados em Barton (2002). O índice Q é calculado segundo a equação:

$$Q = RQD / J_n \times J_r / J_a \times J_w / SRF \quad (7)$$

- RMR (*Rock Mass Rating*) de Bienawski (1989), que resulta da soma de seis parâmetros: i) Resistência à compressão uniaxial; ii) RQD; iii) Espaçamento das descontinuidades; iv) Condição das descontinuidades; v) Condições de água subterrânea; e vi) Orientação das descontinuidades. Os valores atribuídos para cada parâmetro podem ser encontrados tabelados em Bienawski (1989).
- GSI (*Geological Strenght Index*), de acordo com a revisão de Marinos & Hoek (2000), que relaciona o grau de fraturamento e imbricamento do maciço e as condições da superfície das descontinuidades.

Estes índices são aproximadamente correlacionáveis entre si, podendo ser calculados de forma independente e depois comparados. As equações que os relacionam são encontradas em Barton (2002) e Marinos & Hoek (2000).

Os parâmetros nos quais estes sistemas se baseiam foram obtidos em trabalho de campo, o primeiro de reconhecimento, realizado em 19 de Março, em conjunto com a excursão dos calouros de Geologia, organizada pelo GGEO e o segundo entre os dias 13 e 14 de Outubro de 2011. Também foram utilizados os dados de fraturas disponíveis em Karmann (1994) e o mapa da Caverna Água Suja na escala 1:400 de Batistucci *et al.* (1988).

Parâmetros físicos como resistência à compressão simples, módulo de elasticidade e razão de Poisson são encontrados no trabalho de Ruiz (1966) para o calcário de Apiaí.

5.2 Análise de cunhas

A análise de cunhas foi realizada utilizando o programa de computador UNWEDGE (Rocscience, 2004) utilizando dados de descontinuidade disponíveis na literatura e complementados com dados de campo e com os gerados a partir da análise de lineamentos.

Karmann (1994) descreve as principais famílias de fraturas encontradas nas Formações Bairro da Serra e Mina de Furnas dentro da área abrangida pela Figura 2; este autor denominou esta faixa carbonática de Furnas-Santana. Estes dados serão utilizados na análise de cunhas, somados aos dados de estratificação e da orientação das paredes da caverna de Batistucci *et al.* (1988).

5.2.1 Análise de lineamentos estruturais em Modelo Digital de Terreno

Para este trabalho, optou-se por utilizar o Modelo Digital de Terreno (MDT) baseado nos dados da missão espacial SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), de resolução espacial de 90 metros, adequada para análises de escala regional. Apesar da escala de trabalho do Modelo Digital de Terreno (MDT) baseado em SRTM não ser a mais indicada para o nível de detalhe deste trabalho, ela foi adotada pela sua imediata disponibilidade. Na figura 5, observa-se o expressivo controle estrutural na configuração do relevo, na região da caverna, ao se comparar o MDT ao mapa geológico da região da caverna.

Para o traçado dos lineamentos estruturais, foi utilizado o programa ARCGIS, sendo aplicadas três direções (N45W, N45E e N) de sombreamento para o realce dos lineamentos no MDT. Os resultados dos traçados dos lineamentos foram ponderados em função de seu comprimento, por meio de uma planilha de dados e de uma macro no programa Calc (BrOffice 2007), programada em linguagem BASIC. A ponderação considerou a seguinte expressão:

$$n_i = L_i / L' \quad (7),$$

onde n é o fator de ponderação para uma direção de lineamento i , L é o comprimento deste lineamento e L' é o comprimento do menor lineamento traçado. Deste modo, lineamentos de maior extensão apresentam maior peso nos resultados finais.

Os dados de descontinuidades obtidos em campo e na literatura foram comparados aos dados obtidos via análise de lineamentos sobre Modelo Digital de Terreno (MDT). A análise de lineamentos estruturais em fotos aéreas, imagens de satélite ou Modelos Digitais de Terreno é um método conveniente para a identificação das principais famílias de descontinuidades, uma vez que estas influenciam a geomorfologia em superfície (Ramsay & Huber 1987), especialmente as descontinuidades de ângulo de mergulho moderado a vertical.

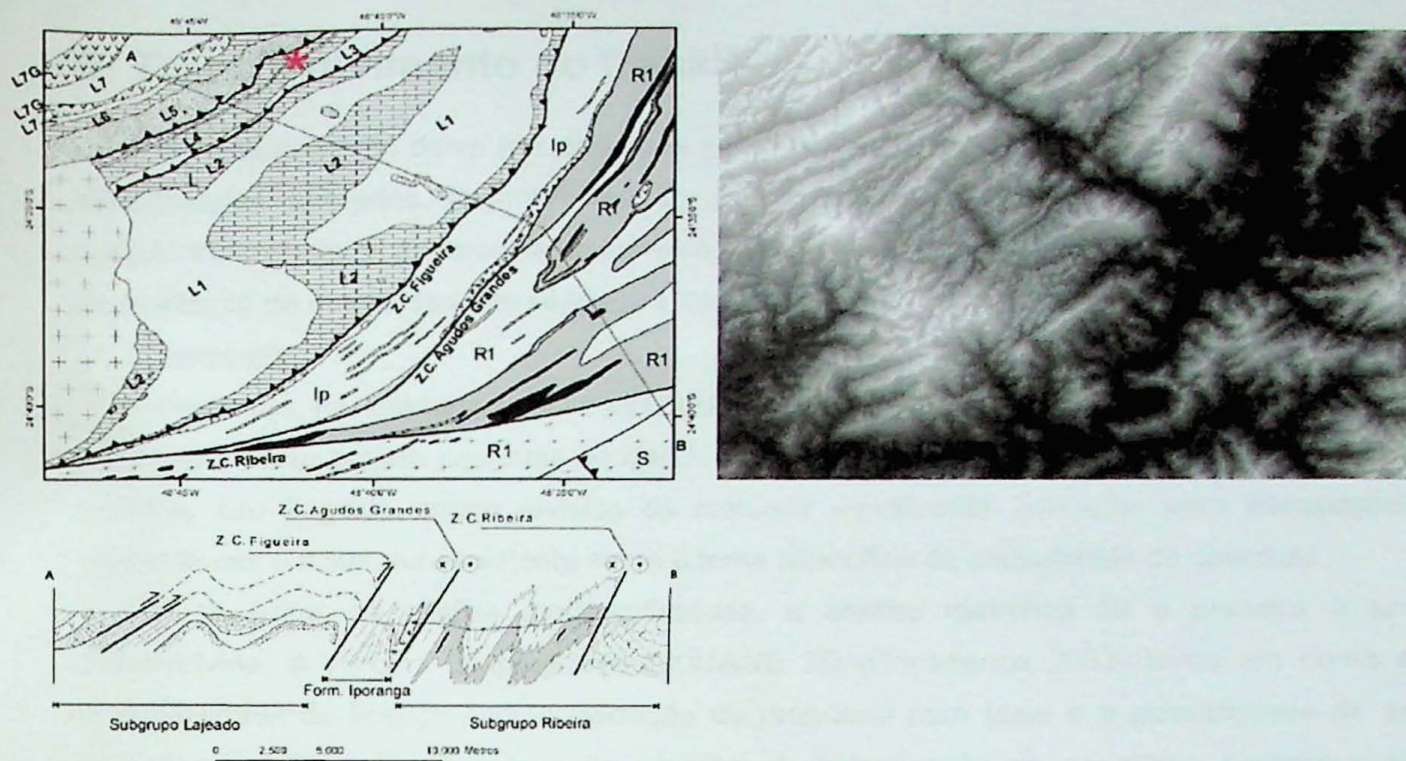


Figura 5: À esquerda, mapa e perfil geológico da região da Caverna Água Suja (asterisco vermelho) - adaptado de Campanha *et al.* (1998); canto superior direito: MDT da mesma área. É notável o controle geológico-estrutural do relevo.

5.3 Análise numérica

O programa EXAMINE 3D (Rocscience 2000), que implementa o Método de Elementos de Contorno, foi utilizado na análise numérica da distribuição de tensões. O alvo desta análise foi o trecho inicial da Caverna Água Suja (280 metros) e a Caverna Água Suja de Cima, que se conecta a este trecho. A geometria tridimensional da caverna foi traçada baseada nos mapas e perfis da Caverna Água Suja de Batistucci *et al.* (1988), utilizando o programa Autocad 2010 e EXAMINE 3D (2003).

O critério de ruptura Hoek-Brown foi adotado para a análise, segundo o trabalho de Hoek *et al.* (2002), sendo calculado a partir do programa ROCKLAB (Rocscience 2007). Os parâmetros físicos da rocha como resistência à compressão simples e densidade foram obtidos a partir dos dados tabelados de Ruiz (1966) para o metacalcário de Apiai.

5.4 Avaliação da resistência flexural

Foram utilizadas as expressões propostas por Waltham *et al.* (2005) – equações 7 e 8 – para a construção de envoltória de ruptura flexural. O resultado foi comparado com observações feitas em campo e com os perfis de Batistucci *et al.* (1988), considerando o efeito de diminuição da resistência flexural ao longo do tempo descrito por Henry *et al.* (1977).

6 Desenvolvimento do trabalho

O desenvolvimento deste trabalho pode ser sumarizado em duas etapas: aprendizado das metodologias aplicadas, levantamento de dados de descontinuidades e discretização do modelo tridimensional da caverna no primeiro semestre e aplicação e interpretação de métodos de avaliação de estabilidade no segundo semestre.

1º semestre:

Inicialmente, foi realizada revisão bibliográfica sobre a Geologia Regional e Local, já que a viabilidade deste projeto dependia de dados já existentes, especialmente do mapeamento da caverna. Em seguida, foram revistos os métodos usualmente aplicados para escavações subterrâneas e a literatura existente sobre o tema específico de estabilidade de cavernas.

Por se tratar da análise mais sofisticada, a análise numérica foi a primeira a ser desenvolvida; a escolha do programa EXAMINE 3D (Rocscience 2003) levou em conta a disponibilidade de licença para a utilização do programa para teste e a possibilidade de se discretizar a geometria complexa da caverna. A discretização da geometria complexa da caverna e do relevo é uma tarefa que demandou tempo e uma certa dose de criatividade, especialmente na intersecção entre duas cavidades e na intersecção da topografia com a cavidade.

A análise de lineamentos estruturais para identificação de famílias de descontinuidades, não prevista no projeto inicial, foi realizada em conjunto com a matéria Aplicações Geológicas de Geoprocessamento, do Professor Dr. Carlos Grohmann, e se mostrou de grande valia para a identificação das famílias de fraturas, como será demonstrado nos tópicos seguintes. Apesar da escala de trabalho do Modelo Digital de Terreno (MDT) baseado em SRTM não ser a mais indicada para o nível de detalhe deste trabalho, ela foi adotada pela sua imediata disponibilidade. Com o intuito de complementar os dados de descontinuidades disponíveis na literatura, foi realizado trabalho de campo de um dia em conjunto com a excursão do GGEO, que é o Grupo de Espeleologia dos estudantes de graduação.

2º semestre:

Com os dados obtidos na primeira etapa e com as observações adicionais do segundo trabalho de campo foram aplicados os métodos de avaliação de estabilidade previstos no projeto inicial (Análise numérica, de cunhas críticas e Sistemas de Classificação de Maciço Rochoso). Em relação ao projeto inicial, foi adicionada uma análise de estabilidade dos estratos à ruptura flexural, que tanto em campo, quanto na literatura, é mencionado como um fator influente na estabilidade de cavernas. Uma dificuldade encontrada foi a estimativa dos parâmetros físicos do maciço rochoso (p. ex.: tensões in-situ, c e ϕ das descontinuidades, etc), que tiveram que se basear em dados disponíveis na literatura; para um refinamento das análises, ensaios petrofísicos seriam recomendados. Os ensaios esclerométricos previstos em

projeto, foram realizados com o martelo de Schmidt, cedido pela Professora Dr. Eliane Aparecida Del Lama, porém, devido à dimensão reduzida das amostras coletadas, as medidas foram insatisfatórias e não serão apresentadas neste trabalho.

Na tabela 2, encontra-se o cronograma das atividades realizadas neste trabalho:

Tabela 1: Cronograma das atividades realizadas

	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov
Redação projeto	----								
Revisão bibliográfica (estudo Examine 3D e Método de Elementos de Contorno)	-----	-----	-----						
Trabalhos de campo	-							---	
Modelagem da geometria da caverna em computador				-----					
Análise de lineamentos estruturais sobre MDT				-----					
Identificação das famílias de fraturas					-----				
Análise das cunhas críticas						-----	-----		
Redação relatório parcial					-----	-----			
Aplicação de Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos							-----		
Estimativa de parâmetros geomecânicos para aplicação em métodos numéricos							-----		
Análise via método numérico							-----	-----	
Redação da monografia								-----	-----

7 Resultados Obtidos

7.1 Levantamento de descontinuidades e Análise de cunhas

7.1.1 Análise de lineamentos estruturais em Modelo Digital de Terreno

Optou-se por executar a análise em nível regional, em três níveis de abrangência e compará-los com os dados do campo. Considerando o mapa de detalhe da região de Apiaí de Campanha *et al.* (2008), foram traçados os lineamentos sobre (i) a Formação Mina de Furnas e (ii) os metacarbonatos da Subgrupo Lajeado; baseando-se no mapa geológico regional dos mesmos autores, traçou-se os lineamentos sobre (iii) os metassedimentos da Formação Água Clara e do Subgrupo Lajeado (Anexo 3).

Dentro dos limites dos metassedimentos da Formação Água Clara e do Subgrupo Lajeado, foram traçados 2174 lineamentos; para os metacarbonatos do Subgrupo Lajeado, 181 lineamentos e para os metacarbonatos da Formação Mina de Furnas, 37 lineamentos (Figura 6). Os resultados obtidos na área mais abrangente são estatisticamente mais significativos e apontam para famílias de fraturas de expressão regional; no entanto, é possível que os resultados obtidos para a Formação Mina de Furnas sejam mais indicativos das direções das descontinuidades na área da caverna, que regionalmente podem apresentar orientação pouco distinta.

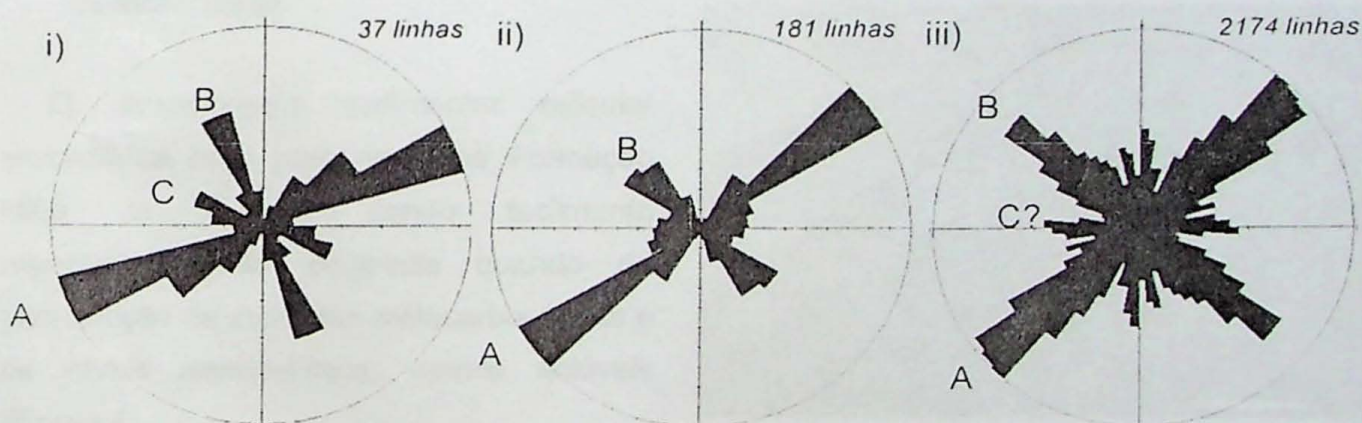


Figura 6: Diagramas de rosetas com as direções dos lineamentos traçados sobre MDT sombreado. À esquerda (i), lineamentos traçados dentro dos limites da Fm. Mina de Furnas; no centro (ii), nos limites dos metacarbonatos do Subgrupo Lajeado; à direita (iii), nos metassedimentos da Formação Água Clara e do Subgrupo Lajeado. Os conjuntos de lineamentos são assinalados com as letras A, B e C.

A) Predominam os lineamentos de direção NE, predominantemente N45E na análise regional, e que orientam-se mais para leste (N70E) na Formação Mina de Furnas (figura 6). Tal direção corresponde à direção do acamamento sedimentar reliquiar, da foliação plano-axial e das principais falhas da região, como observado na figura 2; fraturas de direção ENE, que

condicionam mineralizações sulfetadas, também são reconhecidas na região por Campanha (1991), na zona de charneira da sinclinal do Bairro da Serra.

Possivelmente, a discrepância entre a orientação dos lineamentos na área da Formação Mina de Fumas e nas demais deve-se à orientação das falhas inversas que limitam localmente a Formação Mina de Furnas (Figura 1), cuja orientação é bastante próxima a N70E.

B) Outro conjunto de lineamentos de grande expressão é reconhecido nas três escalas, com direção regional N45W, defletida na área da caverna para N20W. A direção N45W é semelhante a do Rio Betari, encaixado num dique de diabásio (mapa geológico de Campanha, 1991). Na figura 5, observa-se o dique como um extenso lineamento (em cinza escuro) cortando o relevo segundo a direção NW. Tal direção, regionalmente, pode ser associada ao Arco de Ponta Grossa (Almeida 1986).

C) Subordinadamente, ocorre um conjunto de lineamentos nos metacarbonatos da Formação Mina de Fumas de direção N70W; seu análogo na análise regional possivelmente é um conjunto de medidas de direção ENE (figura 6), que não se destaca na análise sobre os metacarbonatos do Subgrupo Lajeado.

Além destes conjuntos, na análise regional aparecem subordinadamente, dois outros conjuntos de lineamentos, cujas direções são N-S e NNW.

7.1.2 Dados estruturais – coletados em campo e da literatura

Acamamento

O acamamento sedimentar reliquiar encontra-se bem preservado na Formação Mina de Fumas, sendo facilmente reconhecido pelo contraste quando da intercalação de camadas metacarbonáticas e de níveis metapelíticos, menos solúveis (Figura 4).

Ao longo da caverna, como já indicado pelo perfil geológico (figura 2), o acamamento é bastante homogêneo com baixa dispersão em torno da atitude média

N50E/54NW (figura 8), que corresponde ao conjunto de lineamentos A da figura 6.ii e iii. Apesar de localmente o acamamento variar devido à presença de dobras, para as análises deste trabalho, será considerado o acamamento relativamente uniforme.



Figura 7: Foto no interior da caverna. Notar o acamamento sedimentar reliquiar (badamento), evidente pela intercalação de níveis carbonáticos e níveis mais pelíticos, sobressalentes.

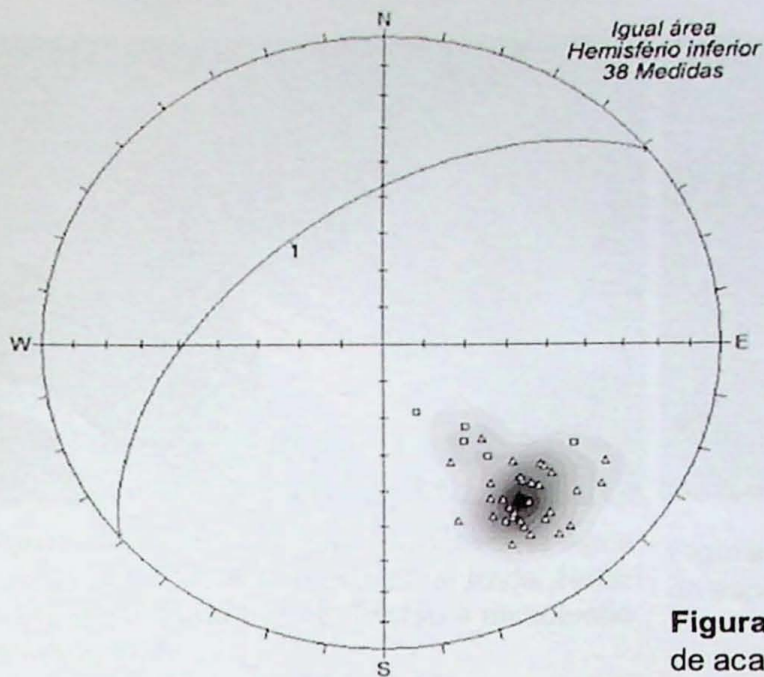


Figura 8: Estereograma com as medidas de acamamento da Caverna Água Suja.

- Este trabalho (5 medidas)
- △ Batistucci *et al.* (1988) (33 medidas)

Fraturas

Na etapa de campo foram reconhecidas fraturas simples e preenchidas; adicionalmente, Batistucci *et al.* (1988) reconhecem o desenvolvimento de uma foliação oblíqua ao acamamento, denominada de S_1 , que por simplificação será comparada aos dados das demais fraturas, uma vez que ela constitui uma superfície mais susceptível à ruptura.

Quando simples, as fraturas modelam o contorno da caverna, conforme figuras 9 e 10 ou ainda constituem zonas preferenciais de percolação de água, sendo alargadas (Figura 12). Fraturas preenchidas, normalmente por calcita, são extremamente abundantes ao longo da caverna, com espessura de 0.5 a 3 mm (Figuras 11 e 12) e predominam largamente, em número, em relação às abertas.

Figura 9: Foto da região da entrada da Caverna Água Suja de Baixo, com destaque para os planos de acamamento e de fratura (que condicionam o contorno do afloramento).

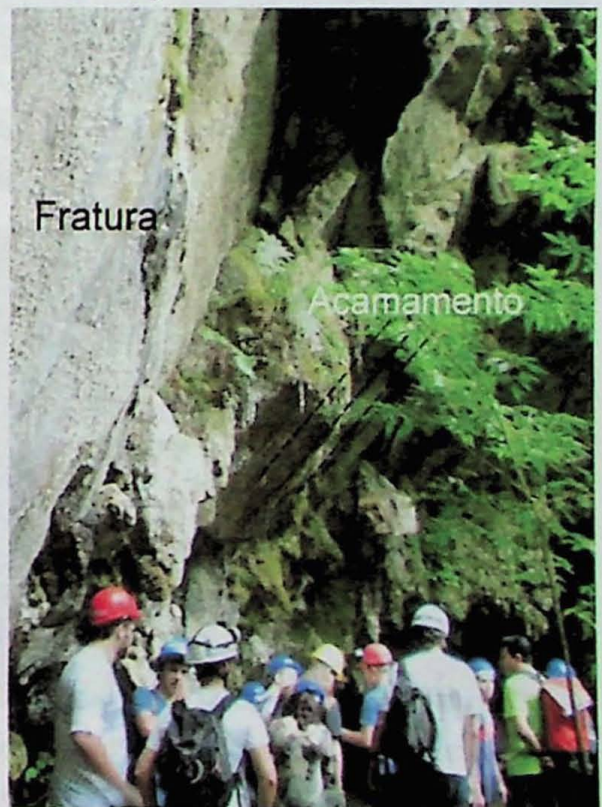




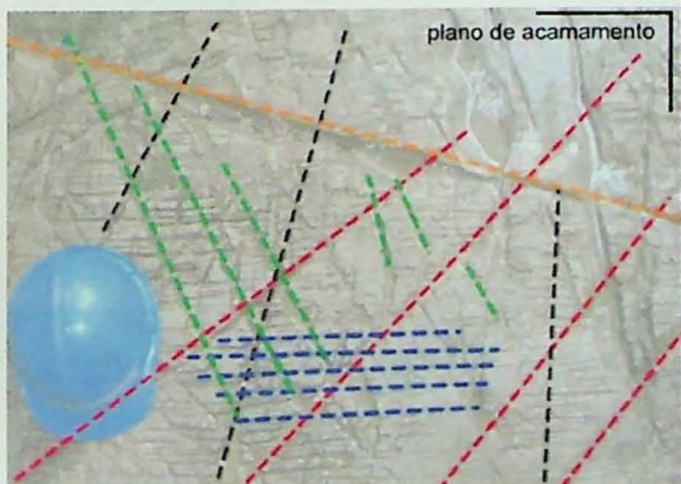
Figura 10: Foto no interior da Caverna Água Suja, a cerca de 30 metros da entrada. Notar o alargamento da fratura, devido à dissolução do carbonato.



Figura 11: Fraturas preenchidas por calcita, de espessura ~1mm (N5E/45SE)



Figura 12: Acima, foto da entrada da Caverna Água Suja de Baixo; notar a presença de blocos tabulares no chão, cuja geometria é condicionada pelos planos de acamamento. Abaixo, detalhe do bloco, onde se ressalta a intensa presença de fraturas, de espaçamento centi a decimétrico, preenchidas, que são preferencialmente erodidas. (Foto gentilmente cedida por Eduardo Zioli Fernandes)



Na figura 12, fica evidente a existência de ao menos 4 famílias de fraturas, de espaçamento centi a decimétrico, todas preenchidas, além de fraturas aleatórias; na figura, é notável o entalhamento dessas fraturas, indicando que elas constituam superfícies preferenciais de

dissolução.

Apesar da alta densidade de fraturas preenchidas, desenvolveu-se sobre os metacarbonatos da região um sistema de cavernas amplas, indicativo da boa qualidade do maciço rochoso; tal fato sugere que tais fraturas não estiveram abertas simultaneamente durante a carstificação; no entanto, como visto nas figura 10, o entalhamento das fraturas, seguido pelo seu alargamento pode ser um condicionante estrutural importante para o desenvolvimento da caverna.

Foram tomadas 28 medidas de fraturas, que foram acrescidas às 47 do trabalho de Batistucci *et al.* (1989). Dessas, respectivamente 20 e 42 medidas possuíam ângulo de mergulho superior a 45° e suas direções estão representadas na figura 13 para comparação com a análise de lineamentos traçados sobre MDT. É notável a semelhança entre os diagramas de rosetas das direções medidas de juntas em campo e das lineações traçadas sobre MDT, especialmente dos conjuntos de medidas de direção aproximada (A) N70E, (B) N15W e (C) N75W; tal semelhança tanto corrobora a significância estatística das medidas tomadas em campo, quanto ressalta o importante controle das descontinuidades sobre o relevo, que já havia sido detectado quando comparado o MDT ao mapa geológico.

A figura 14 traz em projeção estereográfica polar as medidas de fraturas tomadas em campo para este trabalho e de Batistucci *et al.* (1988). Como mencionado, os conjuntos reconhecidos na análise de lineamentos A, B e C também são encontrados por meio das medidas de campo. Além destes, observam-se duas outras famílias de fraturas, uma de direção NW e ângulo de mergulho ~35° e outra (família D) e outra de direção NE, e ângulo de mergulho ~50° (família E). Nota-se que a família D não foi observada como lineamentos sobre o MDT, possivelmente devido ao ângulo de mergulho, moderado; a família E apresenta uma margem ampla de variação quanto a direção, o que pode ter explicar sua pouca expressão na análise de lineamentos.

Na tabela abaixo, as famílias de juntas na área da Caverna Água Suja encontram-se sumarizadas:

Tabela 2: Famílias de fraturas identificadas

Fraturas	Atitude	Karmann (1992)
A	N70E/75SE a 85NW	N75E/60-80SE (Falhas inversas)
B	N20W/70NE a 80SW	N16W/75NE-75NW (Juntas preenchidas) N18W/80NE-SW (Juntas simples)
C	N75W/75SW a 75NE	N70W/70SW-75NE (Juntas preenchidas) N55W/75SE a 80NE (Juntas simples)
D	N45-80W/30-45NE	----
E	N10-40E/50SE	N35E/50SE (Falhas normais)

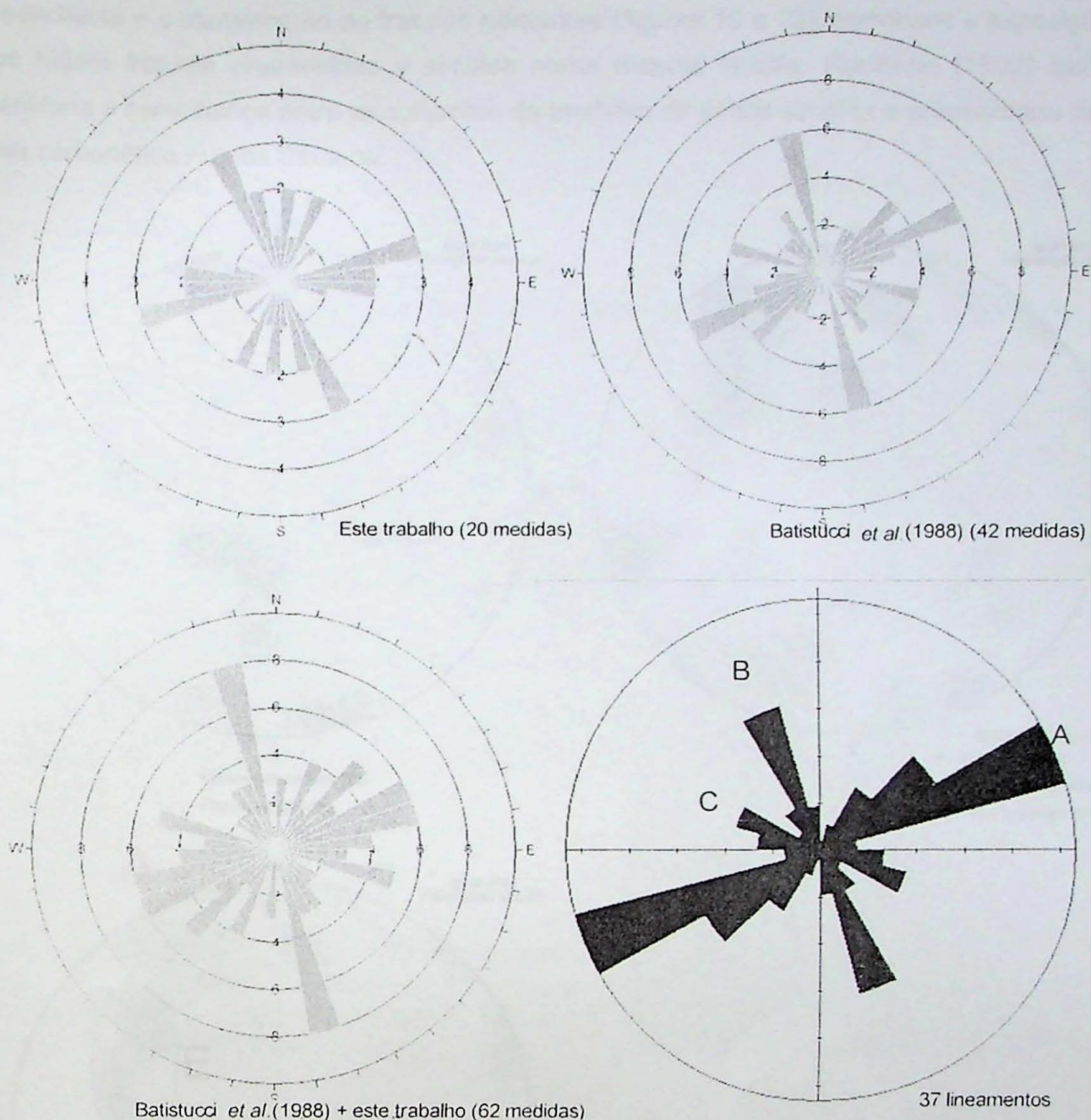


Figura 13: Rosetas com as direções das fraturas medidas em campo com mergulho maior do que 45°. No canto superior esquerdo, dados retirados para este trabalho; canto superior direito, dados de Batistucci *et al.* (1988); canto inferior esquerdo, dados reunidos deste trabalho e de Batistucci *et al.* (1988); no canto inferior direito, lineamentos traçados em MDT na área da Formação Mina de Furnas.

Karmann (1992) identifica diversos conjuntos de descontinuidades na área carbonática Furnas-Santana, classificando-as como juntas preenchidas, simples e de cisalhamento, falhas inversas, normais e direcionais, além do acamamento. Das 5 famílias de fraturas identificadas na área da Caverna Água Suja, 4 haviam sido listadas por Karmann (1992) – tabela 3. Optou-se por não classificar as famílias de fraturas em abertas ou fechadas, uma vez que não é clara uma distinção entre estas ou aquelas nos estereogramas da figura 14, coexistindo ambos os

tipos numa mesma concentração de medidas; além disso, o entalhamento de fraturas preenchidas e o alargamento de fraturas existentes (figuras 10 e 12), corrobora a suposição de que hajam fraturas preenchidas e simples numa mesma família. Karmann (1992) também menciona a semelhança entre os conjuntos de medidas de juntas simples e preenchidas para a área carbonática Furnas Santana.

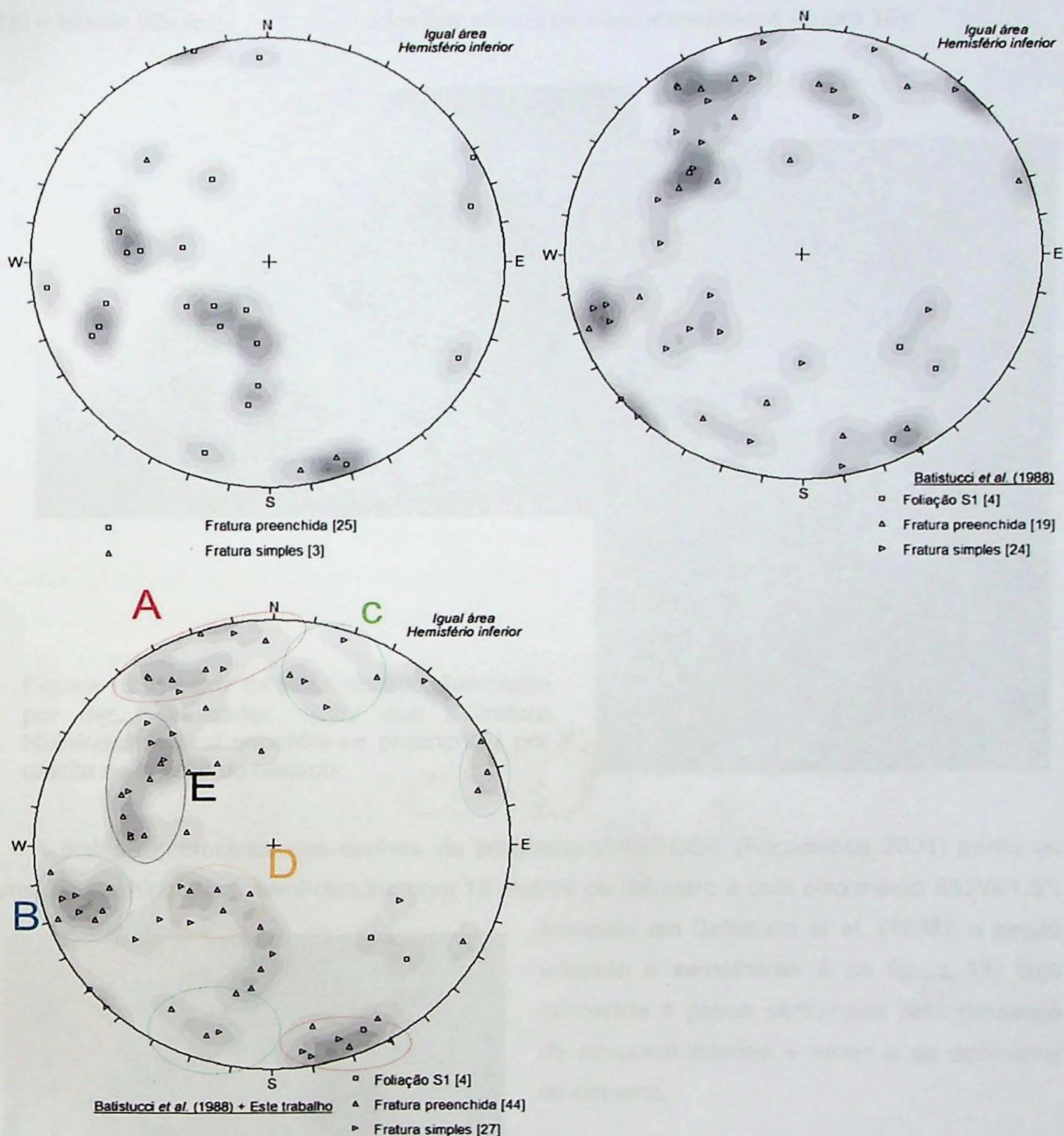


Figura 14: Estereogramas com as medidas de fraturas tomadas em campo. No canto superior esquerdo, dados retirados para este trabalho; canto superior direito, dados de Batistucci *et al.* (1988); canto inferior esquerdo, dados reunidos deste trabalho e de Batistucci *et al.* (1988). Encontram-se circuladas e assinaladas pelas letras A-E as famílias de fraturas identificadas.

7.1.3 Análise de Cunhas

Na Caverna Água Suja, são encontrados indícios de que ruptura em cunha é um fenômeno relevante para o desenvolvimento de sua geometria, apesar do preenchimento das fraturas. São observadas cicatrizes de ruptura em cunha (figura 15), trechos métricos a decamétricos onde um dos lados da caverna é estruturalmente controlado pela estratificação (figuras 7, 12 e 15) e blocos tabulares soltos limitados por planos de descontinuidades (figura 16).

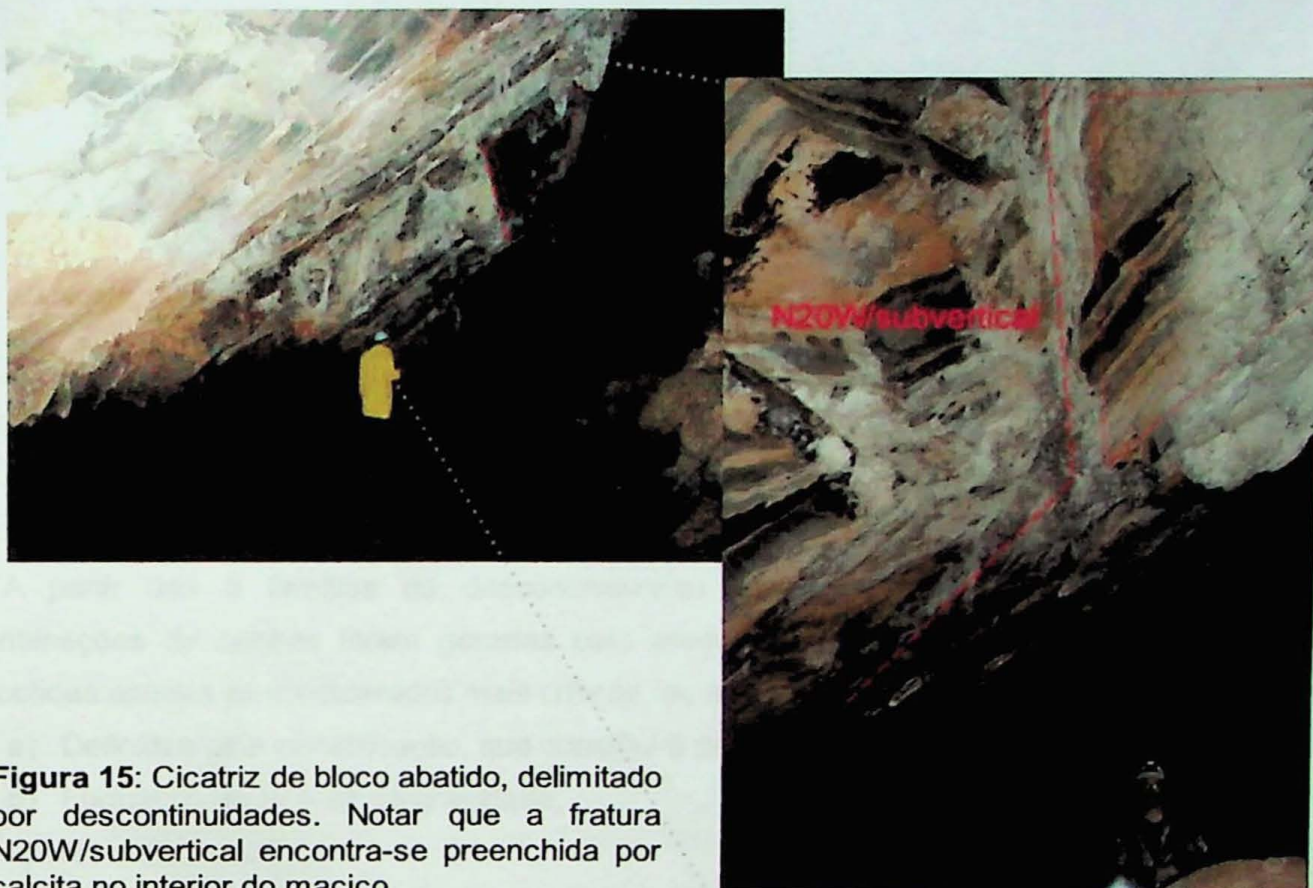


Figura 15: Cicatriz de bloco abatido, delimitado por descontinuidades. Notar que a fratura N20W/subvertical encontra-se preenchida por calcita no interior do maciço.

A análise geométrica das cunhas via programa UNWEDGE (Rocscience 2004) partiu de uma seção hipotética, semi-circular, com 13 metros de diâmetro e com eixo médio S52W/1.5°,



baseado em Batistucci et al. (1988); a seção adotada é semelhante à da figura 17, cuja geometria é pouco perturbada pela presença de descontinuidades e tende a se aproximar de um arco.

Figura 16: Bloco de carbonato definido por planos de descontinuidade.

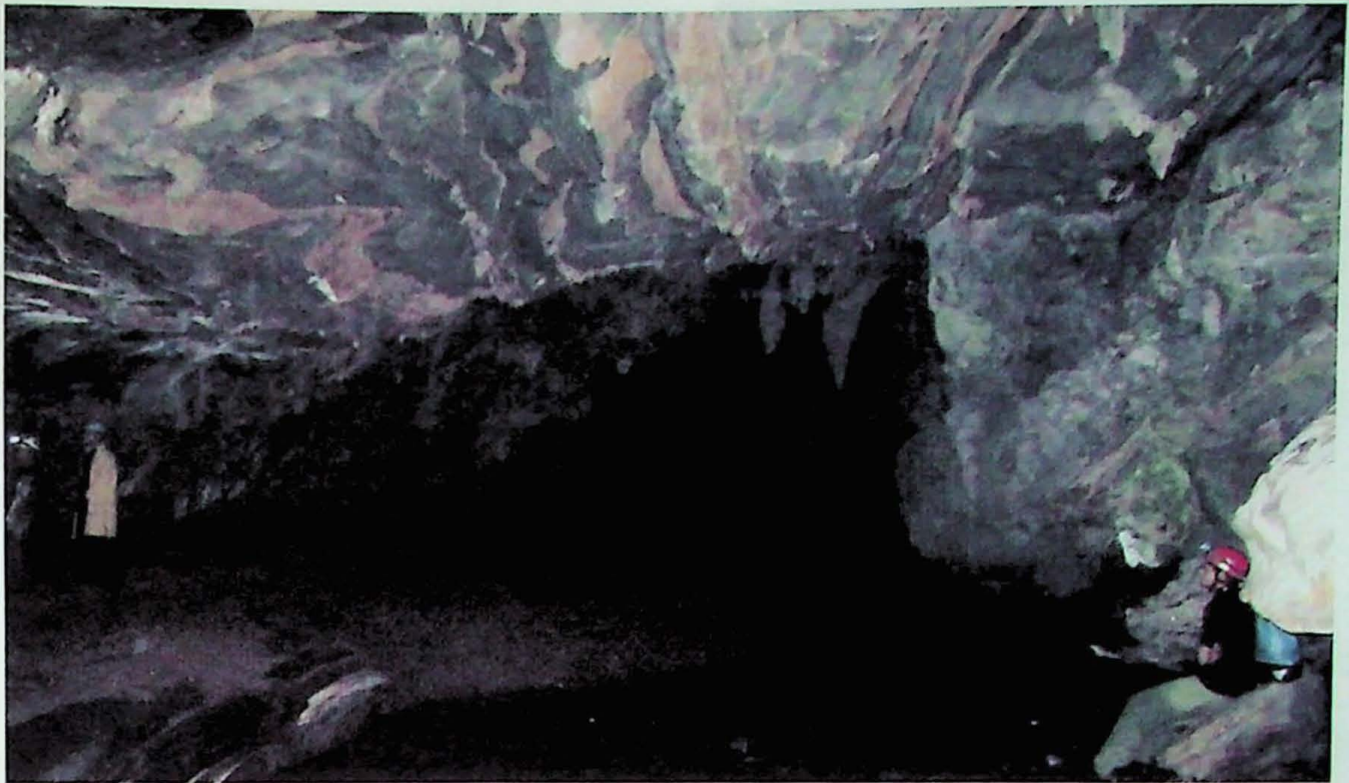


Figura 17: Perfil em arco na caverna. Notar a ausência de fraturas no teto da caverna, senão a estratificação.

A partir das 5 famílias de descontinuidades mais a estratificação (figura 18), 20 combinações de cunhas foram geradas pelo programa UNWEDGE (2004). Destas, serão discutidas apenas as consideradas mais críticas, de acordo com os seguintes critérios:

- Definidas pela estratificação, que constitui o principal conjunto de descontinuidades;
- Formação de cunhas de gravidade;
- Maiores volumes.

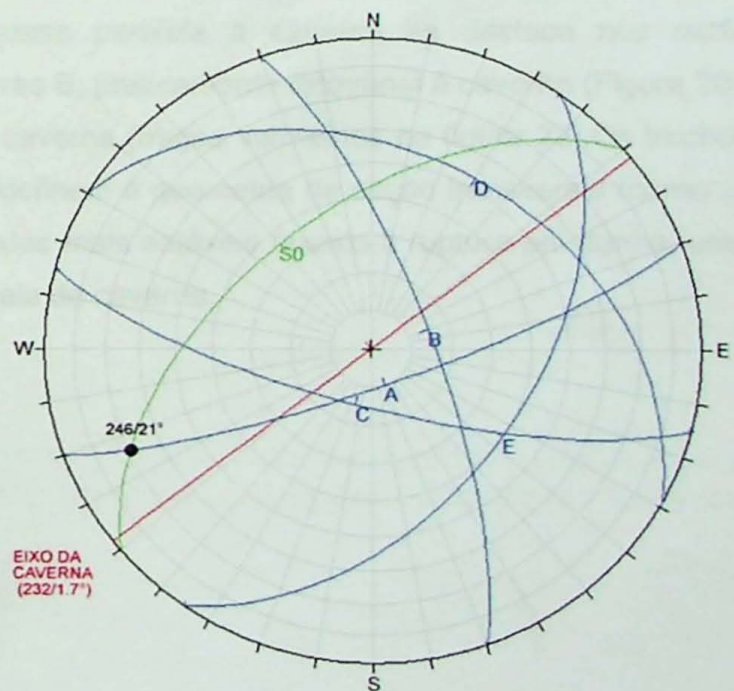


Figura 18: Estereograma com as famílias de descontinuidades e o eixo da caverna, utilizados para a análise de cunhas.

Estas cunhas são representadas na figura 20; é notável a formação de grandes cunhas de gravidade; isto é favorecido pela presença de fraturas subverticais (famílias A, B e C), e pelo fato da estratificação mergulhar ortogonalmente à direção do eixo da caverna; esta orientação é a mais propícia para geração de cunhas de gravidade e é classificada por Bienaswki (1989) como muito desfavorável. Outra família de descontinuidades cuja orientação é muito propícia à geração de cunhas é a família A; todas as combinações compostas pela família A e pela estratificação geram cunhas de gravidade. A intersecção desta família de fraturas com a estratificação se aproxima do eixo da caverna (figura 18) e é provável que a caverna tenha sua origem condicionada por esta intersecção; outra feição favorecida pela família de fraturas A é o entricheiramento vertical da caverna (figura 19).

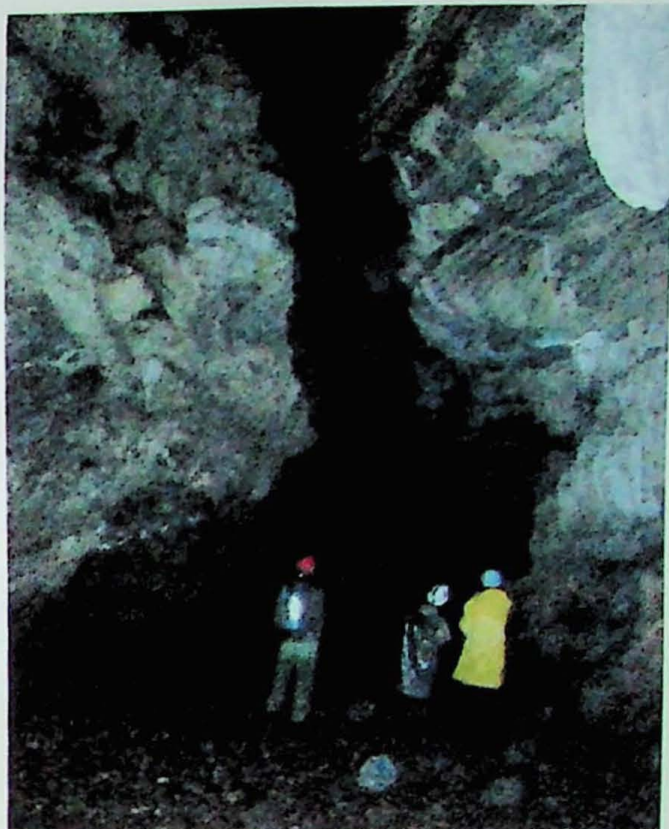


Figura 19: Entricheiramento da Caverna Água Suja.

Comparando os perfis teóricos da figura 20 com alguns dos perfis de Batistucci et al. (1988) – figura 21 – nota-se uma clara semelhança; é comum que a parede NW da caverna seja condicionada pelos planos de estratificação; os perfis em capela, alongados na vertical, apresentam a parede SE com alto mergulho, como previsto pela análise de cunhas. Como mencionado, a família de fraturas A, quase paralela à caverna se destaca nos perfis transversais; a influência da família de fraturas B, praticamente ortogonal à caverna (Figura 20-I e II), fica evidente no perfil longitudinal da caverna (traços vermelhos na figura 22). Os trechos da caverna onde cunhas críticas máximas definem a geometria da seção transversal (como os perfis das figuras 21) podem ser considerados mais estáveis quanto à ruptura em cunha, uma vez que cunhas maiores ultrapassam a escala da caverna.

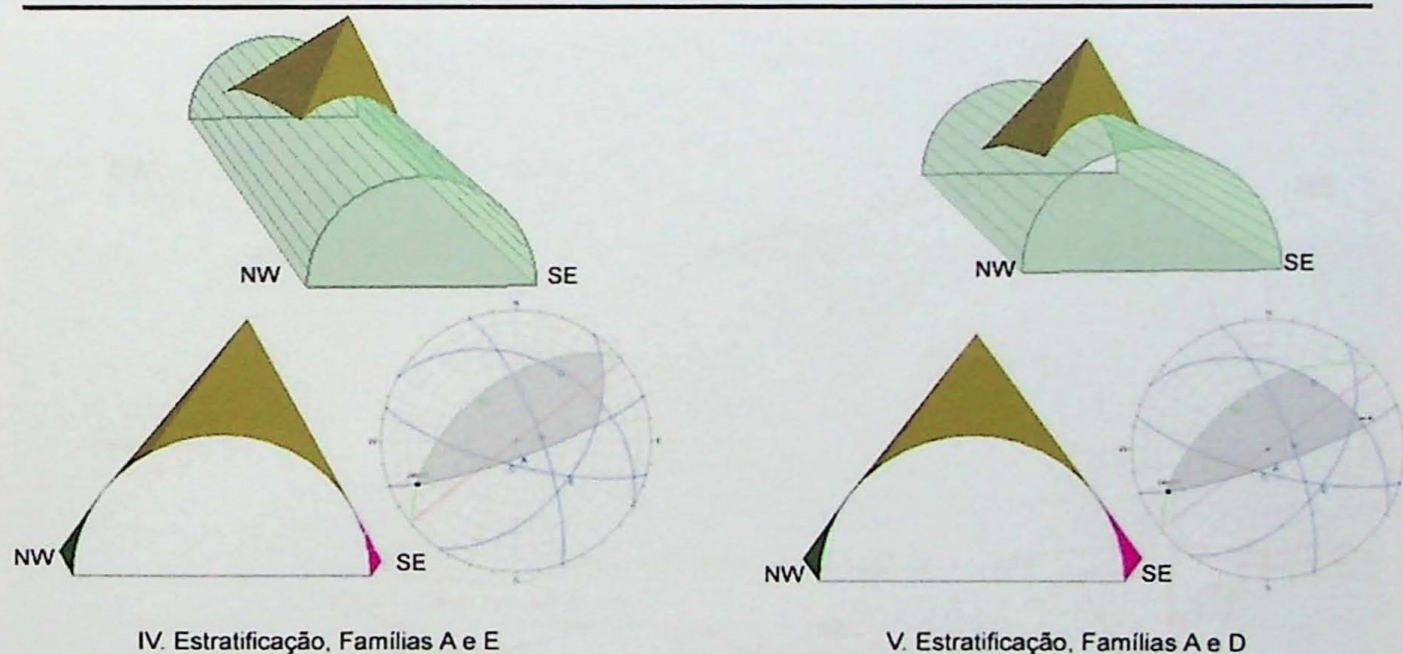
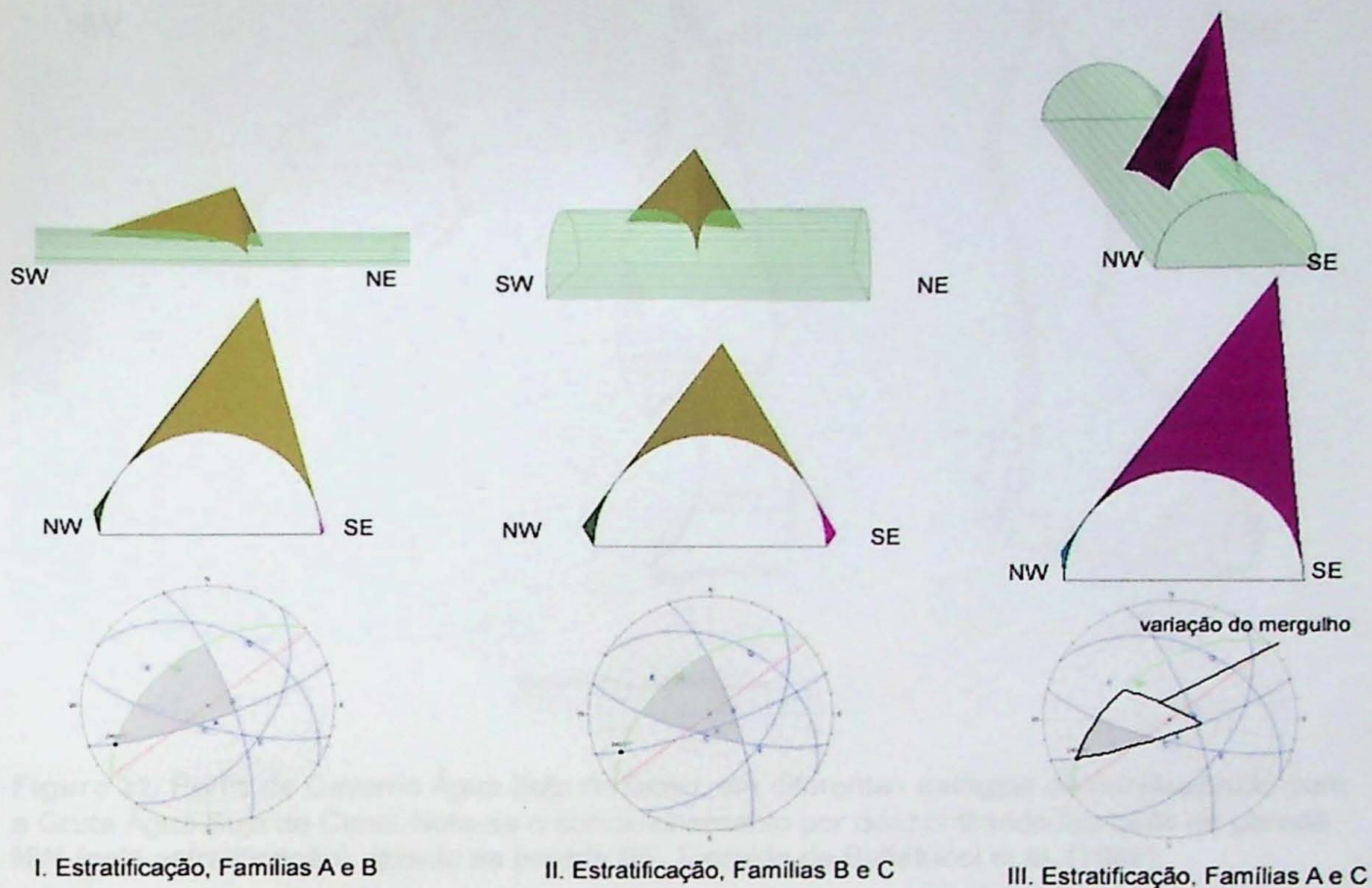


Figura 20: Cunhas críticas de gravidade teóricas formadas pelas famílias de descontinuidades encontradas na Caverna Água Suja; vista em perspectiva ou perfil longitudinal, perfil transversal e projeção esterográfica.

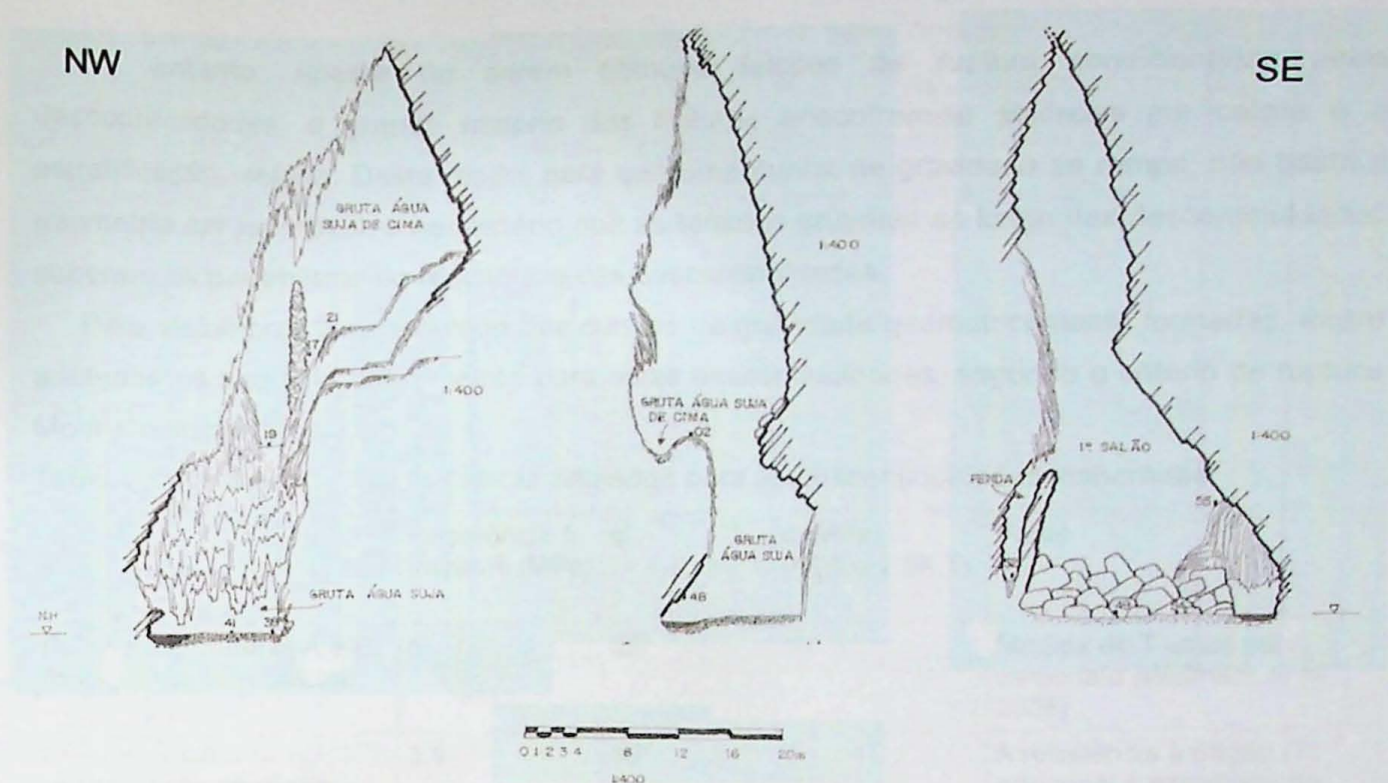


Figura 21: Perfis da Caverna Água Suja de Baixo, em diferentes estágios de coalescência com a Gruta Água Suja de Cima. Nota-se o condicionamento por discontinuidades tanto na parede NW (pela estratificação), quanto na parede SE. Extraído de Batistucci et al. (1988).

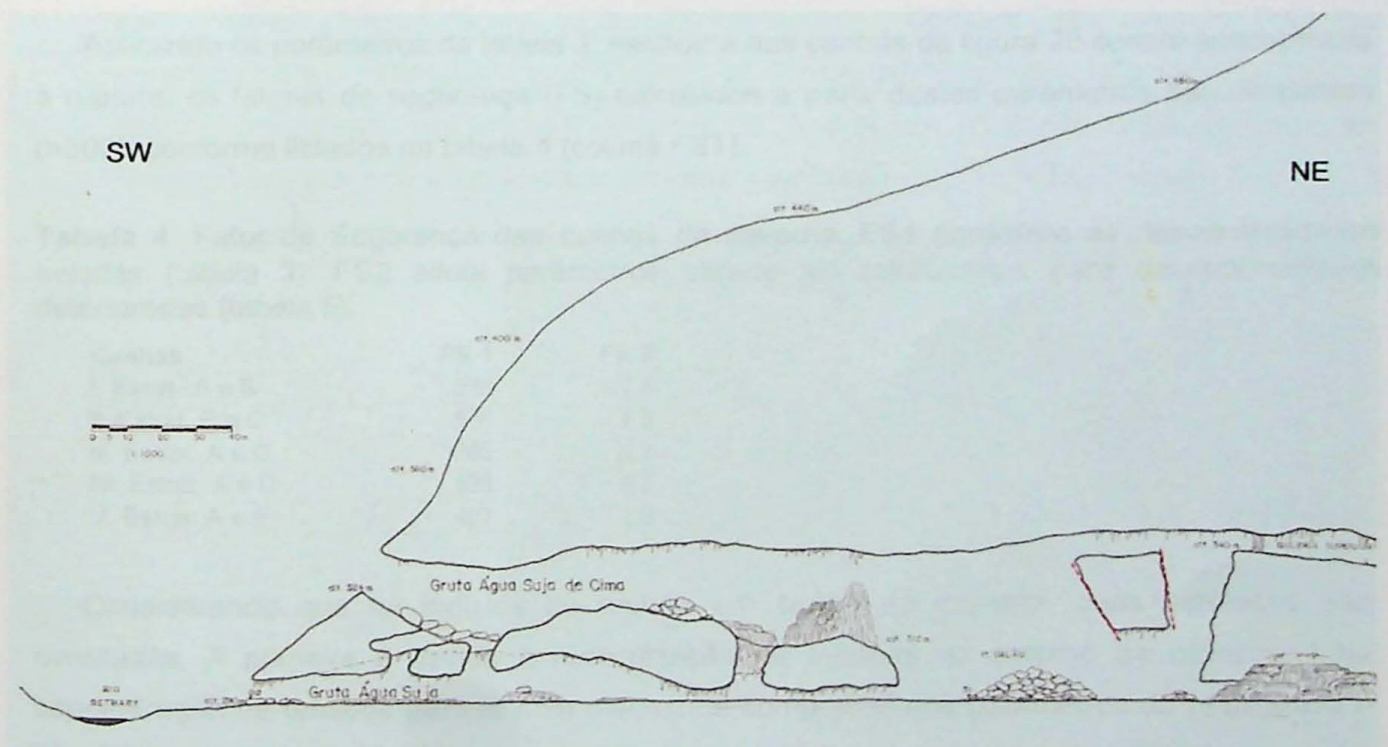


Figura 22: Perfil longitudinal da Caverna Água Suja. Os traços em vermelhos são superfícies de ruptura, provavelmente condicionadas pela família de fraturas B, de alto mergulho e direção ortogonal à caverna. Extraído de Batistucci et al. (1988).

No entanto, apesar de serem comuns feições de ruptura condicionadas pelas descontinuidades, a grande maioria das fraturas encontram-se soldadas por calcita e a estratificação, selada. Deste modo, para que uma cunha de gravidade se rompa, não basta a geometria ser favorável, é necessário que as tensões atuantes ao longo das descontinuidades superem os parâmetros de resistência das descontinuidades.

Para vislumbrar a estabilidade das cunhas de gravidade geometricamente formadas, foram adotados os seguintes parâmetros para estas descontinuidades, segundo o critério de ruptura Mohr-Coulomb (tabela 3):

Tabela 3: Parâmetros de resistência adotados para as descontinuidades inalteradas:

	Resistência à tração T (MPa)	φ	c (MPa) ($\approx 1,5$ a $2.5 \times T$)	Fonte
Famílias de fraturas A a E (preenchidas por calcita)	5	35°	10	Medida de T usual para carbonato (Waltham <i>et al.</i> 2005)
Estratificação (intercalação de níveis carbonáticos e pelíticos)	3.5	35°	7	A resistência à tração (T) ortogonal à estratificação em rochas sedimentares equivale a cerca de 70% da T (baseado nos dados de T de rochas sedimentares de Aadnoy & Looyeah (2011).

Aplicando os parâmetros da tabela 3, nenhuma das cunhas da figura 20 seriam susceptíveis à ruptura; os fatores de segurança (FS) calculados a partir destes parâmetros são altíssimos (>300), conforme listados na tabela 4 (coluna FS1).

Tabela 4: Fator de Segurança das cunhas da caverna. FS1 considera as descontinuidades seladas (tabela 3); FS2 adota parâmetros obtidos via retroanálise, para descontinuidades deterioradas (tabela 5).

Cunhas	FS 1	FS 2
I. Estrat. A e B	338	0.8
II. Estrat. B e C	576	1.3
III. Estrat. A e C	385	1.2
IV. Estrat. A e D	528	1.3
V. Estrat. A e E	407	1.0

Considerando que há indícios de ruptura em cunha na caverna, duas hipóteses são aventadas. A primeira é devido à redistribuição de tensões no entorno da caverna, haja concentração de tensões trativas com magnitude compatível aos parâmetros de resistência – isto será investigado posteriormente no item 7.3 – Análise numérica; a segunda hipótese é que ao longo do período de exposição da caverna, haja redução nos parâmetros de resistência à tração e coesão das descontinuidades devido à erosão preferencial (conforme observado na figura 12) e à redução da resistência à tração por fadiga (figura 4, Henry *et al.* 1977).

Para que as cunhas aqui discutidas tivessem $FS \approx 1$, seria necessário uma redução drástica nos parâmetros de resistência, como seria o caso quando da dissolução completa de uma fratura. Através de retroanálise, os seguintes parâmetros são obtidos para $FS \approx 1$:

Tabela 5: Parâmetros de resistência para as descontinuidades no caso em que o FS das cunhas é aproximadamente 1.

T (MPa)	0.01
ϕ	35°
c (MPa)	0.02

Utilizando estes parâmetros para recalcular o FS, ele assumiria valores próximos a 1 (tabela 4, coluna FS2). Na entrada da caverna, onde a deterioração das descontinuidades é acelerada, observa-se descolamento de camadas e abertura de uma fratura; a combinação destas descontinuidades pode gerar uma cunha de gravidade (figura 38).

7.2 Sistemas de Classificação de Maciço Rochoso

7.2.1 Sistema Q (Barton 2002)

A seguir segue um comentário sobre os 6 parâmetros, que compõem um valor-Q geral para a Caverna Água Suja.

- $RQD \approx 100$. O número de fraturas abertas por metro cúbico é $< 4.5 \rightarrow RQD = 100$ (Palmstrom 2005); são comuns trechos métricos a decamétricos ao longo da caverna sem fraturas abertas (figura 17 e 23); as descontinuidades mais comuns (fraturas preenchidas e a estratificação) encontram-se normalmente seladas, não segmentando o maciço em blocos. Na entrada da caverna, o grau de alteração e relaxamento do maciço é maior e são mais comuns fraturas abertas e portanto, o RQD é menor.



Figura 23: Trecho da caverna sem fratura aberta. É evidente o traço da estratificação.

- $J_n = 3$. Será considerada a estratificação como a única família de descontinuidades, devido a sua persistência e penetração em todo o maciço. As demais fraturas, predominantemente preenchidas e ocasionalmente abertas serão consideradas como

aleatórias.

- $J_r = 1$. Quando é possível observar a superfície das discontinuidades, estas são normalmente planas a levemente onduladas e lisas (Figura 9, na região da entrada da caverna). A superfície do acamamento, que constitui o principal conjunto de discontinuidades também é plana e lisa.
- $J_a = 0.75$. Predominam fraturas preenchidas por carbonato, regeneradas (*densamente soldadas*).
- $J_w = 0.66$. Nível freático médio encontra-se na base da Caverna (Figura 17). Eventualmente é observado fenômeno de enchimento repentino dos condutos, que está sob investigação por geólogo do Instituto Geológico (IG).
- $SRF = 1$. A tensão vertical atuando no teto da caverna (σ_1) é de algumas unidades de MPa (maior parte da caverna está entre 50 e 200 metros de profundidade – exceto os 50 metros iniciais da caverna e a área do Abismo Vargem Grande). Considerando que a resistência à compressão uniaxial (σ_c) da rocha é 90MPa (Ruiz 1966), a grandeza da razão σ_1/σ_c é de algumas dezenas, e portanto $SRF=1$ ("tensões médias, condições favoráveis de tensão"); esta condição de tensões favoráveis é corroborada pela ausência de fraturas de alívio no interior da caverna e pela ausência de feições de deslocamento (*rock slabbing/ bursting*).

Sendo o índice Q calculado pela equação 7, temos:

$$Q = 100 / 3 * 1 / 0.75 * 0.66 / 1 = 29.3 \text{ (12)},$$

que indica um maciço de boa qualidade (Classe B).

7.2.2 Rock Mass Rating (RMR)

Parâmetros utilizados para o cálculo do índice RMR:

- Resistência da rocha intacta: Resistência à compressão uniaxial = 90 MPa;
 - Peso relativo = 7
- RQD: ≈ 100 ;
 - Peso relativo = 20
- Espaçamento de fraturas (planos de estratificação): 60-600 mm;
 - Peso relativo = 9
- Condição de fraturas: Superfícies de estratificação planas a levemente onduladas, firmemente fechadas, normalmente inalteradas;
 - Peso relativo = 28
- Água subterrânea: condição úmida; nível freático na base da caverna, sem notável infiltração do teto e das paredes
 - Peso relativo = 10;

- Ajuste da nota devido à orientação de descontinuidades: a orientação dos planos de estratificação (direção paralela à caverna e mergulho $\approx 54^\circ$) é classificada como muito desfavorável (peso relativo = -12). No entanto, como discutido, os planos de estratificação encontram-se firmemente fechados, constituindo mais uma anisotropia no maciço do que uma família de fraturas, em termos práticos. Por isso, optou-se por anular este parâmetro.
 - Peso relativo = 0.

A soma destes valores fornece o resultado $RMR = 74$, que corresponde a um maciço de classe II, de boa qualidade.

7.2.3 Geological Strength Index (GSI)

Na tabela 6, encontra-se destacada em vermelho o setor que corresponde ao índice GSI atribuído ao Maciço Rochoso, entre 75 e 80 (≈ 77).

Considerou-se a superfície das descontinuidades de boa a muito boa qualidade, levando em conta que os planos de estratificação encontram-se firmemente fechados, coesos e que predominam fraturas preenchidas, seladas por calcita; a estrutura do Maciço Rochoso foi classificada como "em blocos" a "maciça": de forma geral, raramente fraturas abertas são observadas, porém blocos podem ser isolados quando os parâmetros de resistência das descontinuidades são reduzidos, como discutido no item 7.1.2 – *Análise de Cunhas*.

7.2.4 Concordância entre os Índices Q, RMR e GSI

Para comparar e avaliar os índices obtidos por Sistemas de Classificação de Rocha, foram utilizadas as seguintes relações de conversão entre os índices unidimensionais em Duffet (1983) e Hoek & Brown (1987): na tabela 7 apresentam-se os índices originais, as equações utilizadas para conversão e os índices convertidos.

Observa-se que não correspondem os índices Q, RMR e GSI a partir de 24 comparam os diferentes índices em função de seu valor RMR correspondente; os índices obtidos pelo Sistema Q e GSI divergem em 2 e 13 do índice RMR, respectivamente. Em todos os casos, o maciço pode ser considerado como bom, Classe 2 de Bieniawski (1976), com RMR no intervalo de 72 a 77.

Tabela 6: Tabela de Classificação para o índice GSI (segundo revisão de Marinos & Hoek 2000). Assinalado em vermelho, a classificação para o maciço rochoso da Caverna Água Suja.

		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		60	50		
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets			40	30	
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity				20	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces					10
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			

7.2.4 Comparação entre os índices Q, RMR e GSI

Para comparar e ajustar os índices obtidos por Sistemas de Classificação distintos, foram utilizadas expressões de conversão entre os índices encontradas em Barton (1995) e Hoek & Brown (1997). Na tabela 7 encontram-se os índices originais, as expressões utilizadas para conversão e os índices convertidos.

Observa-se que são correspondentes os índices Q, RMR e GSI; a figura 24 compara os diferentes índices em termos de seu valor RMR correspondente; os índices obtidos pelo Sistema Q e GSI divergem em -2 e +3 do índice RMR, respectivamente. Em todos os casos, o maciço pode ser classificado como bom, Classe 2 de Bienawski (1989), com RMR no intervalo de 72 a 77.

Tabela 7: Comparação entre Índices Q, RMR e GSI, através de expressões de conversão:

	Índice original	Expressão de conversão	Índice convertido
Q → RMR	Q = 29.3	(Barton 1995) $RMR = 15\log(Q) + 50$	$RMR_Q = 72$
RMR → Q	RMR = 74	(Barton 1995) $RMR = 15\log(Q) + 50$	$Q_{RMR} = 39.8$
RMR → RMR' → GSI	RMR = 74; (*) RMR' = 79	(Hoek & Brown 1997) $GSI = RMR' - 5$	$GSI_{RMR} = 74$
GSI → RMR' → RMR	GSI = 77	(Hoek & Brown 1997) $GSI = RMR' - 5$	$RMR'_{GSI} = 82$; $RMR_{GSI} = 77$
<i>RMR': desconsidera a orientação das descontinuidades e o maciço seco</i>			

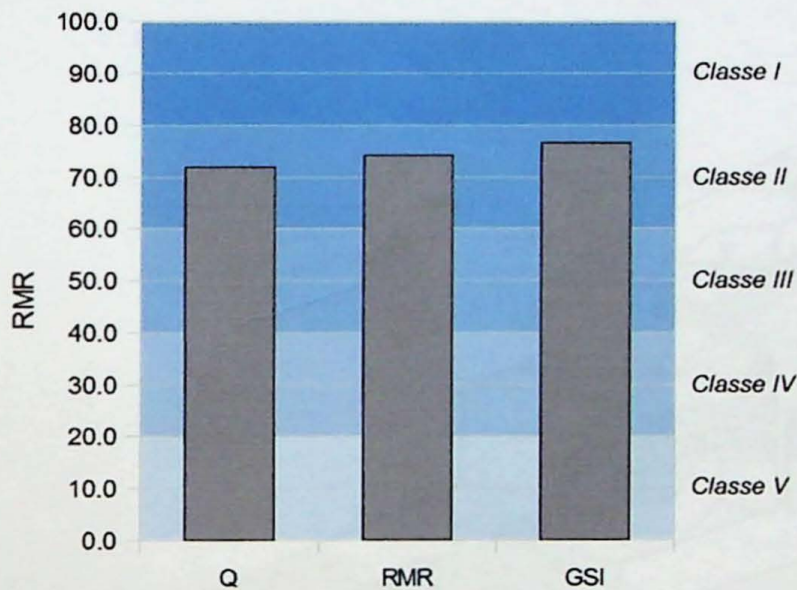


Figura 24: Comparação entre os índices Q, RMR e GSI em termos de valor correspondente em RMR.

7.3 Análise numérica

7.3.1 Modelo discretizado da caverna

A partir do mapa e dos perfis de Batistucci *et al.* (1988), a geometria dos 275 metros iniciais na horizontal da Caverna Água Suja foram discretizados, incluindo tanto a cavidade inferior quanto a superior (Água Suja de Cima); isto representa somente o segmento inicial da caverna, que apresenta desenvolvimento horizontal total de 3150 metros. A discretização da geometria da caverna foi feita a partir da ligação dos perfis traçados por estes autores, ao longo do mapa em planta. A topografia foi traçada a partir do mapa topográfico U-12 D.A.E.E (1957) *apud* Batistucci *et al.* (1988), em escala 1:10.000. As figuras 25 e 26 ilustram o modelo geométrico do segmento inicial da caverna discretizado.

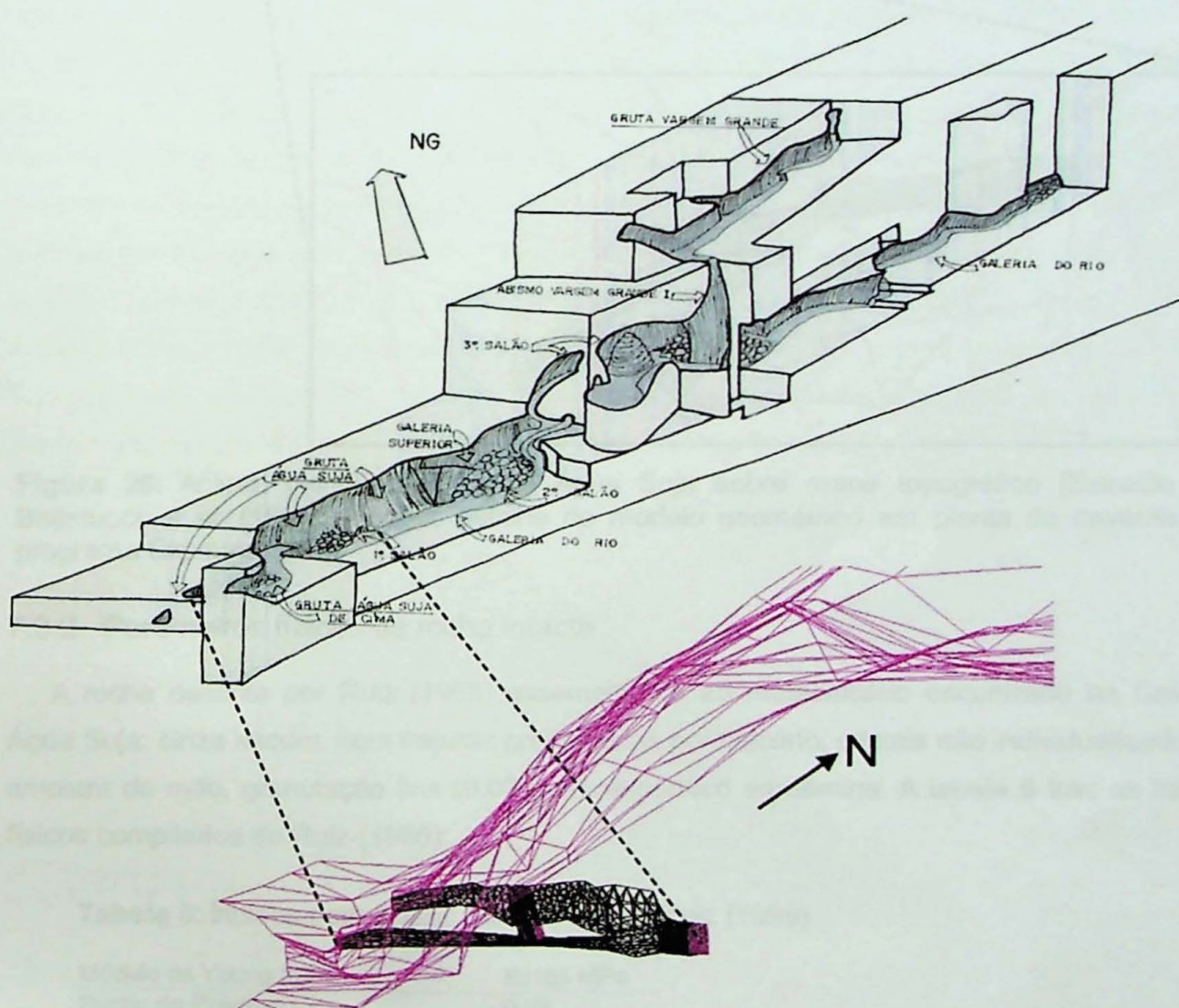


Figura 25: Acima, bloco esquemática do Sistema Água Suja, sem escala [Extraído de Batistucci *et al.* (1988)]. Abaixo, detalhe do modelo geométrico da caverna no programa Examine 3D.

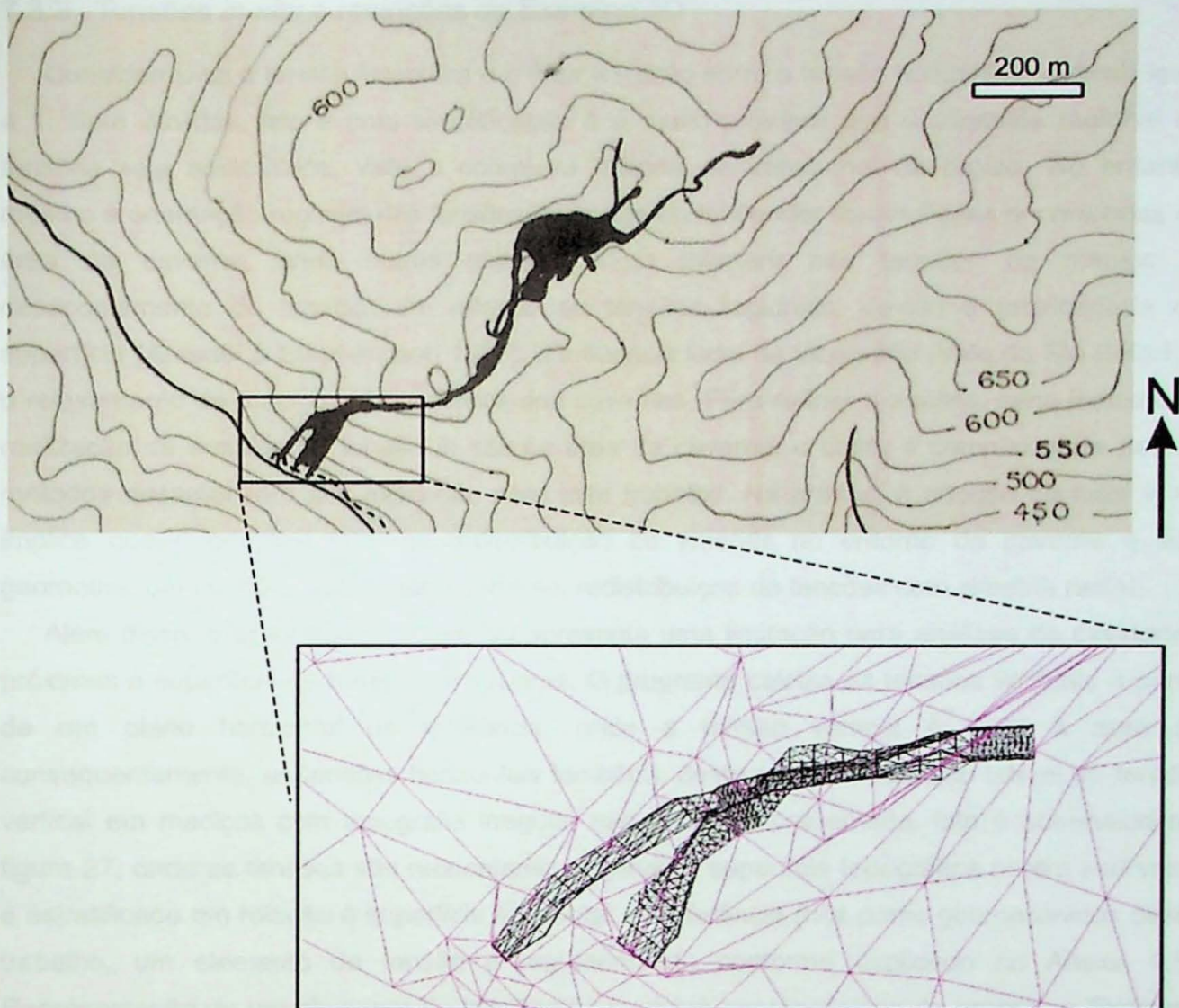


Figura 26: Acima, planta da Caverna Água Suja sobre mapa topográfico [Extraído de Batistucci *et al.* (1988)]. Abaixo, detalhe do modelo geométrico em planta da caverna no programa Examine 3D.

7.3.2 Parâmetros físicos da rocha intacta

A rocha descrita por Ruiz (1966) assemelha-se ao metacalcário encontrado na Caverna Água Suja: cinza escuro, com fraturas preenchidas por calcário, cristais não individualizados na amostra de mão, granulação fina (0.02 mm), esparítico em lâmina. A tabela 9 traz os índices físicos compilados de Ruiz (1966):

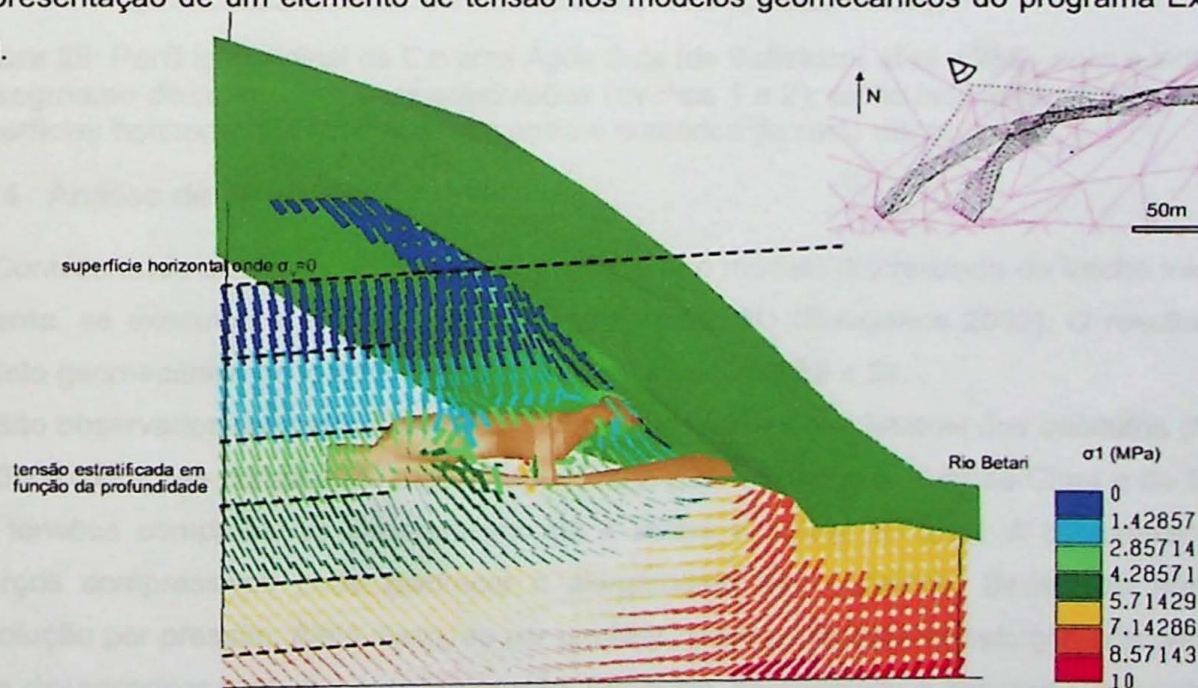
Tabela 8: Índices petrofísicos compilados de Ruiz (1966)

Módulo de Young (MPa)	82185 MPa
Razão de Poisson	0.33
Massa específica	2.76 g/cm ³
Resistência à compressão uniaxial	90 MPa

7.3.3 Tensões *in-situ* e restrições do Examine 3D

Considerou-se a tensão litostática e o fator k (razão entre a tensão horizontal/ vertical) igual a 1. Sem dúvidas, isto é uma simplificação e é muito provável que o elipsoide regional de tensões seja assimétrico, visto a complexa história deformacional da região. No entanto, mesmo a orientação regional das tensões pode não corresponder às condições encontradas na área da caverna, onde outros efeitos podem interferir nas tensões no maciço: o desacoplamento de tensões em relação às tensões regionais, devido à proximidade da superfície (Amadei & Stephansson 1997), a influência local da topografia (Vale do Rio Betari) e o relaxamento do maciço pela presença das cavernas. Para refinar a análise, seria indicada a realização de ensaios de tensão *in situ* na área da caverna; o custo e complexidade destes métodos desautorizam sua execução para este trabalho. Na prática, a adoção do fator $k = 1$ implica que o principal fator na redistribuição de tensões no entorno da caverna é sua geometria; um conduto circular teria portanto, redistribuição de tensões com simetria radial.

Além disso, o programa Examine 3D apresenta uma limitação para análises de cavidades próximas à superfície de terrenos irregulares. O programa calcula as tensões verticais a partir de um plano horizontal de referência, onde a tensão vertical é igual a zero (e consequentemente, as tensões horizontais também); deste modo, a variação lateral da tensão vertical em maciços com topografia irregular não é bem representada. Isto é observado na figura 27, onde as tensões são reorientadas segundo a superfície topográfica porém seu valor é estratificado em relação à superfície horizontal de referência (nos perfis geomecânicos deste trabalho, um elemento de tensão é representando conforme explicado no Anexo 1.B: Representação de um elemento de tensão nos modelos geomecânicos do programa Examine 3D).



Devido a esta limitação do programa, optou-se por segmentar a análise da caverna em dois trechos, conforme a figura 28, com dois planos horizontais distintos de referência, onde $\sigma_v = 0$. Os resultados apresentados neste trabalho se concentram principalmente no trecho 2, uma vez que os resultados obtidos no trecho 1 são menos representativos, visto a acentuada variação da superfície topográfica sobre o trecho.

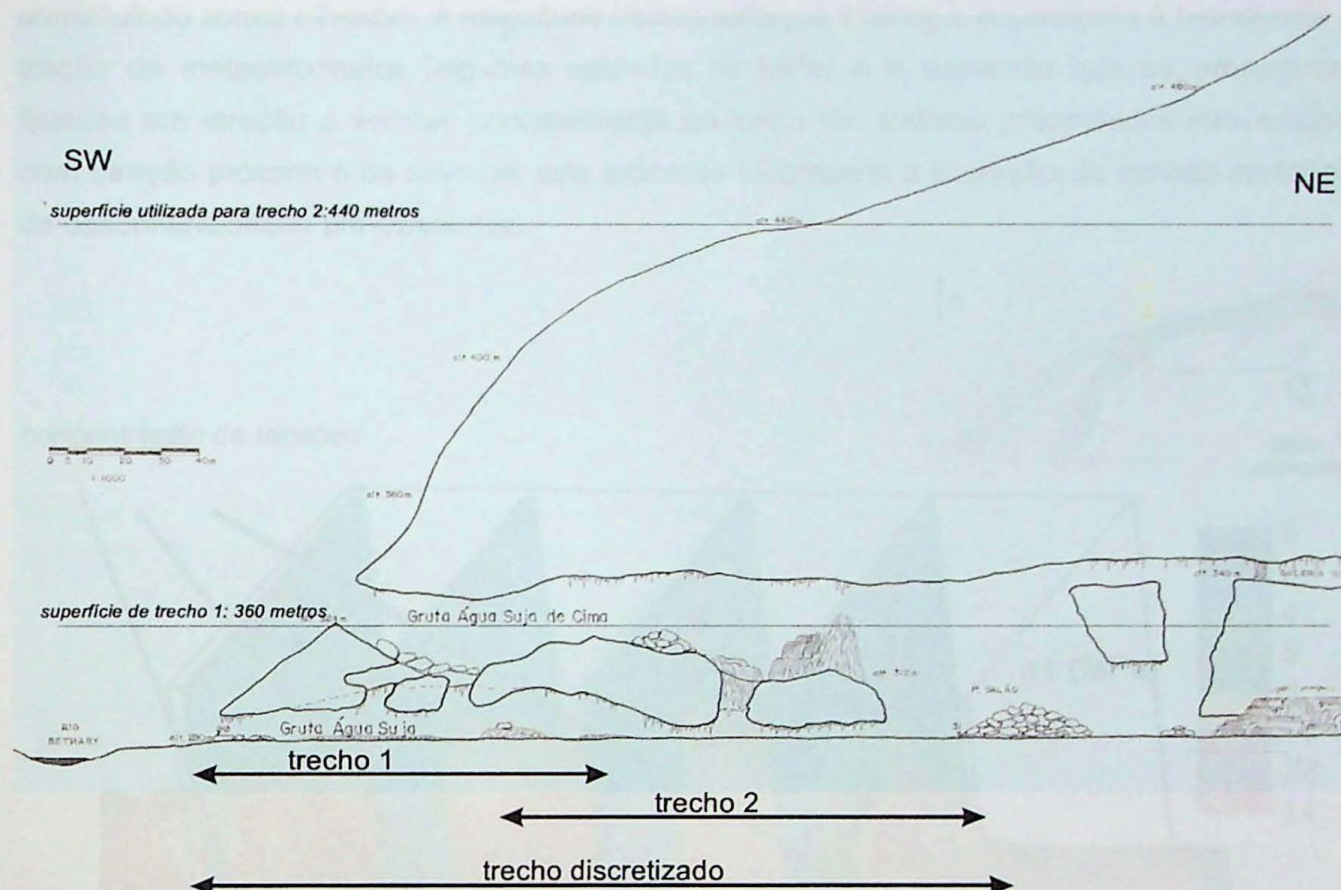


Figura 28: Perfil longitudinal da Caverna Água Suja (de Batistucci *et al.* 1988), com a indicação do segmento discretizado e suas subdivisões (trechos 1 e 2); estão indicadas as altitudes das superfícies horizontais utilizadas para a análise numérica de cada trecho.

7.3.4 Análise de tensões

Considerando os parâmetros até aqui descritos e o modelo discretizado do trecho inicial da caverna, se executou a análise numérica via Examine 3D (Rosscience 2003). O resultado do modelo geomecânico de tensões é representado nas figuras 29 a 32.

São observadas concentrações de tensões compressivas nas laterais dos condutos (figuras 29, 30 e 32) e nas zonas onde eles se aproximam (Cavernas Água Suja de Cima e de Baixo); tais tensões compressivas superam em até 4 vezes a tensão *in situ*. A concentração de esforços compressivos pode favorecer o alargamento dos condutos, devido ao efeito de dissolução por pressão. Além disso, se por um lado, a concentração de esforços compressivos pode desencadear ruptura por sobre-tensão, por outro, desfavorece a formação de cunhas de gravidade, uma vez que as descontinuidades permaneceriam firmemente fechadas, com os

parâmetros de resistência intactos, e as possíveis cunhas, imbricadas. Isto é confirmado pela escassez de feições de ruptura na Caverna Água Suja de Baixo no trecho sob a Caverna Água Suja de Cima.

Nas arestas agudas dos condutos, como no topo de perfis em capela, são observados esforços trativos (σ_3) - figura 32 - e esforços compressivos máximos (σ_1) reduzidos (figura 31), constituindo zonas aliviadas. A magnitude destes esforços trativos é equivalente à resistência à tração de metacarbonatos (algumas unidades de MPa) e é esperado que se propaguem fissuras em direção à vertical, principalmente ao longo de fraturas preenchidas subverticais com direção próxima à da caverna; este processo favoreceria a liberação de cunhas ao longo de descontinuidades pré-existentes.

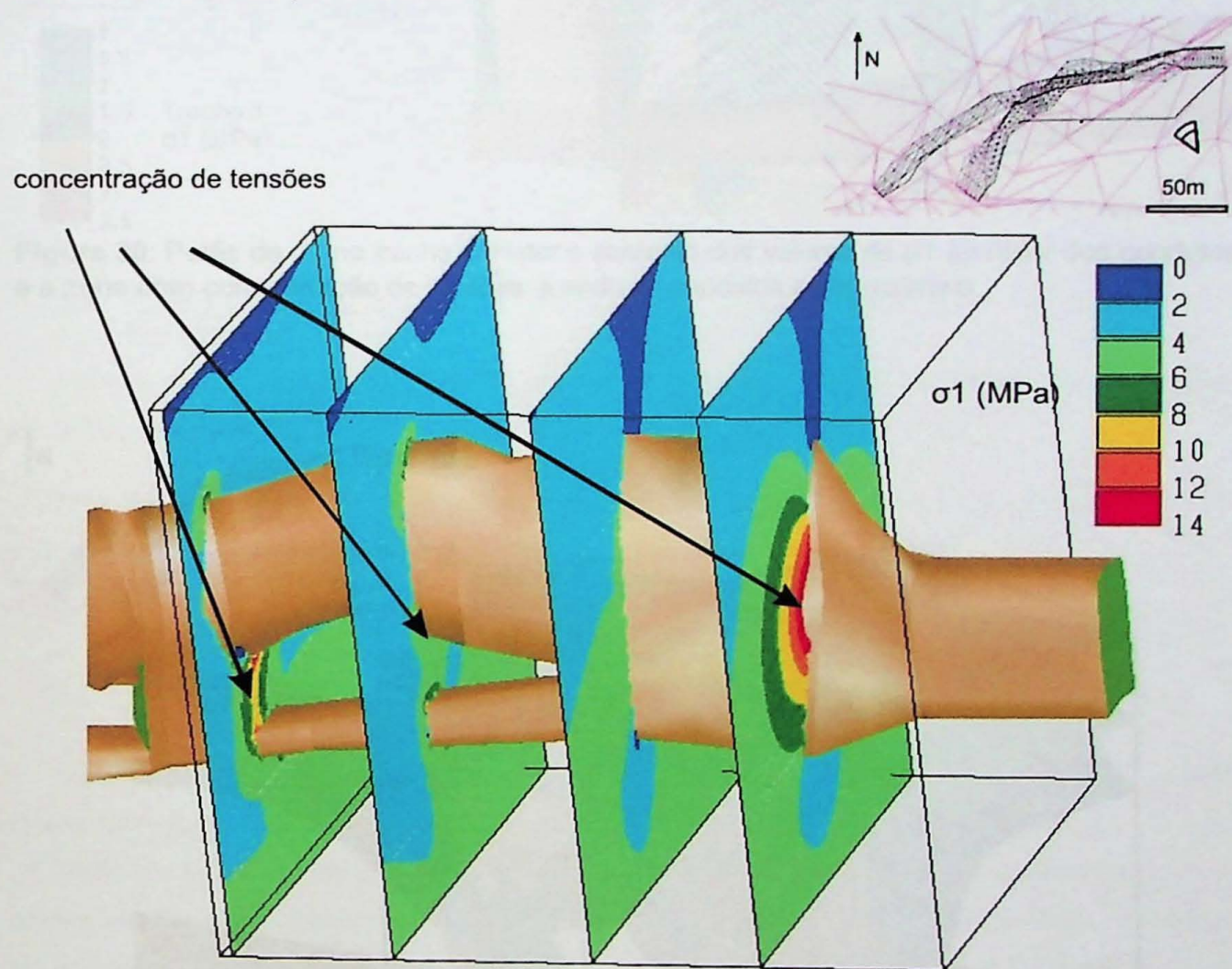


Figura 29: Perfis geomecânicos (σ_1). Nota-se a concentração de tensões na região entre dois condutos e na lateral do 1º Salão.

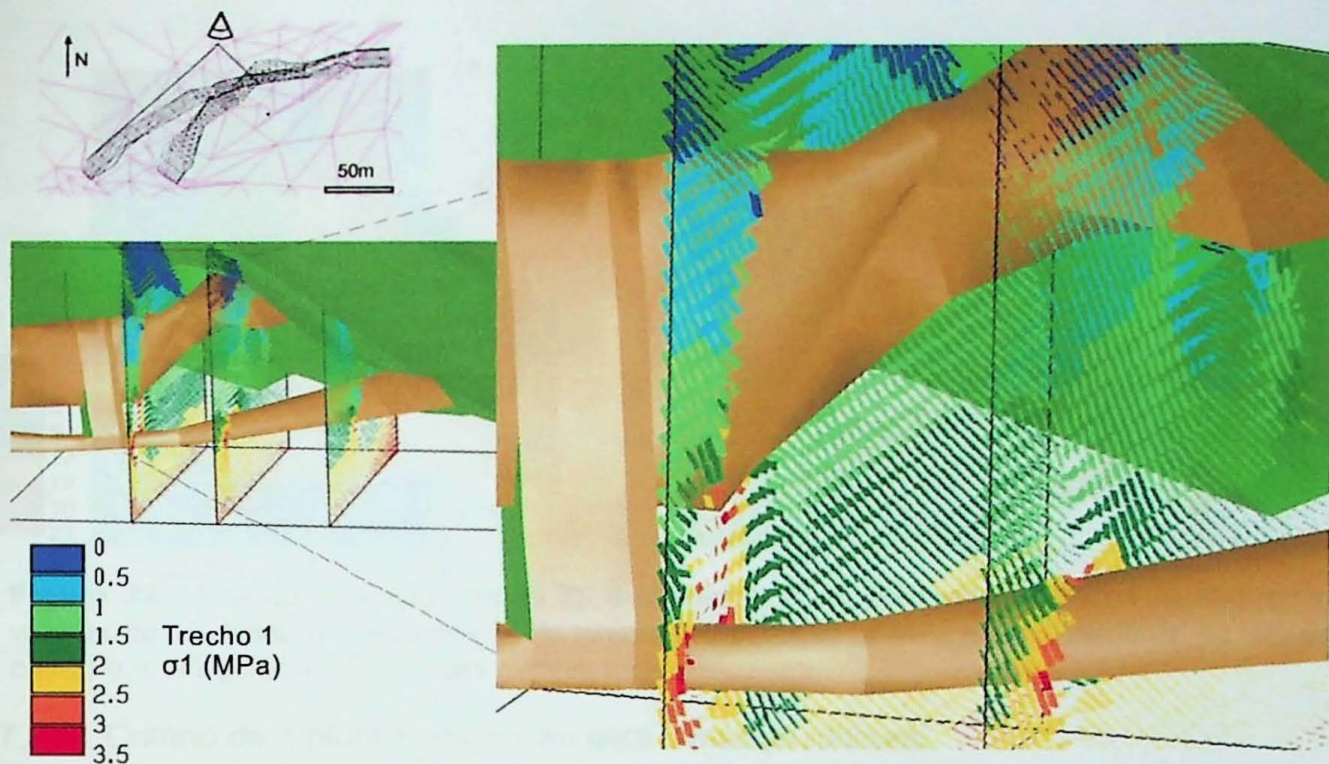


Figura 30: Perfis de σ_1 no trecho 1. Notar o aumento dos valores de σ_1 ao redor dos condutos e a zona com concentração de tensões quando os condutos se aproximam

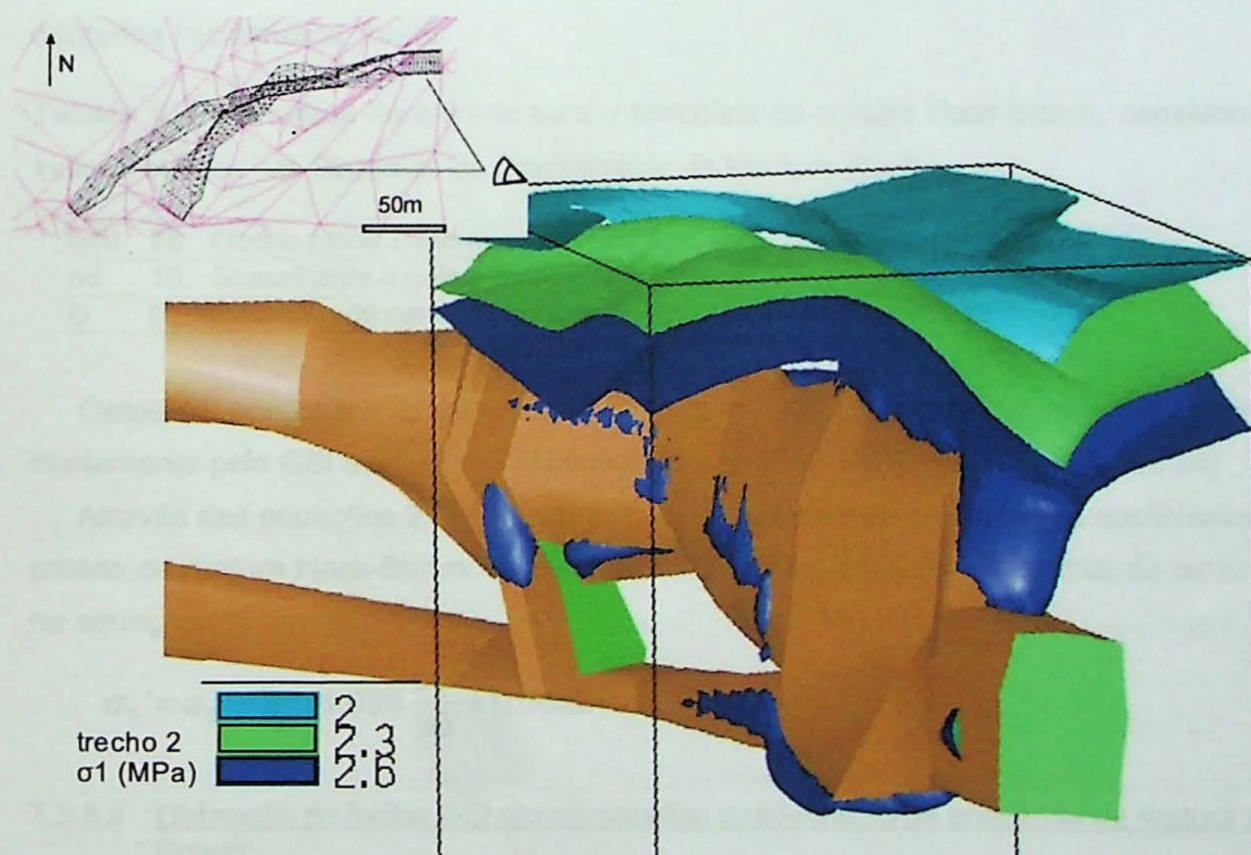


Figura 31: Trecho 2, com superfícies isobáricas (σ_1) lançadas. Observa-se relaxamento no teto da caverna e redistribuição lateral das tensões.

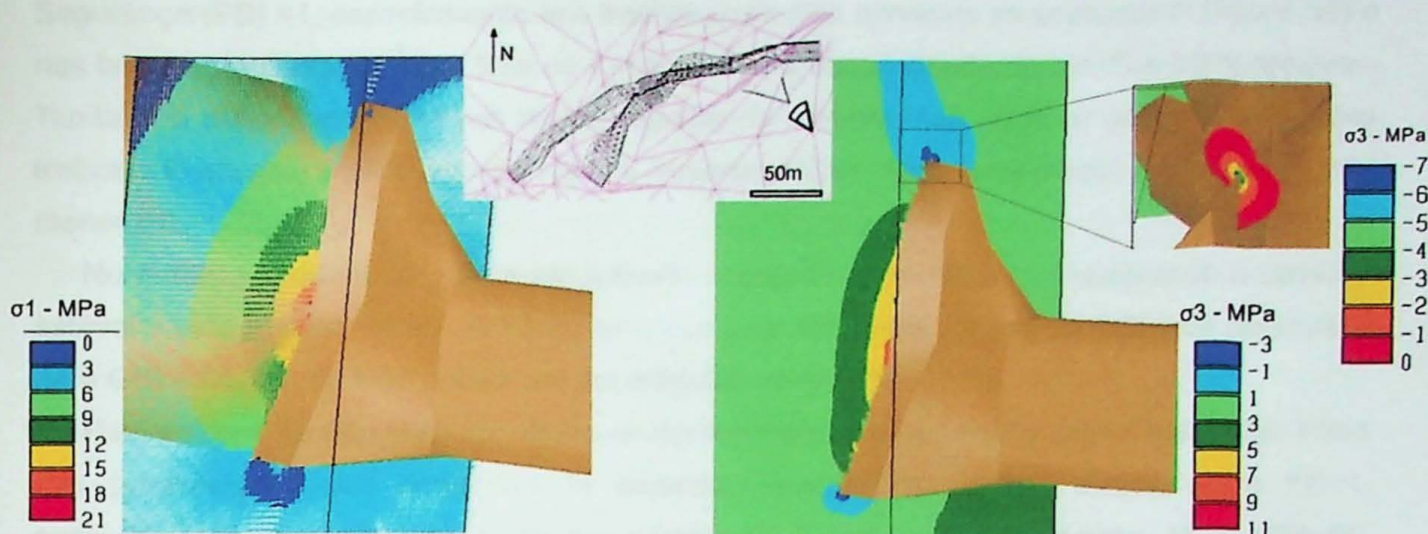


Figura 32: Vista do 1º Salão (trecho 2). À esquerda, perfil com valores de σ_1 ; à esquerda, valores de σ_3 . Notar a concentração de tensão nas paredes laterais e o relaxamento no teto da caverna, com geração de tensões trativas no teto.

7.3.5 Critério de ruptura Hoek-Brown para o maciço rochoso

7.3.5.i Calculado a partir dos índices obtidos via Sistemas de Classificação de Maciço Rochoso

Para a definição da envoltória de ruptura segundo o critério Hoek-Brown os parâmetros adotados inicialmente, foram:

Tabela 9: Parâmetros de entrada para a envoltória de ruptura Hoek-Brown, considerando os índices obtidos via Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos.

GSI	75	Obtido pelos Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos
mi	10	Semelhante a calcário esparítico
D	0	Evolução da caverna é gradual; maciço é pouco perturbado

Optou-se por utilizar o índice $GSI = 75$, um valor intermediário entre o índice obtido diretamente pelo GSI e o índice GSI convertido a partir do RMR (item 7.2.4, figura 24)

Através das equações 2, 3 e 4, estes parâmetros fornecem os seguintes coeficientes para o critério de ruptura Hoek-Brown: $m_b = 4.095$; $s = 0.0622$ e $a = 0.501$. Substituindo estes valores na equação (1), temos:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + 90 \left(4.095 \frac{\sigma_3'}{90} + 0.0622 \right)^{0.501} \quad (8)$$

7.3.5.ii Obtenção do índice GSI por retroanálise e redefinição da envoltória de ruptura Hoek-Brown

Aplicando o valor de $GSI=75$, seria previsto pela análise numérica via Elementos de Contorno que alguns trechos da Caverna Água Suja estivessem instáveis, com Fator de

Segurança (FS) <1, especialmente nos trechos onde dois condutos se sobrepõem (figura 36) e nas laterais da Caverna Água Suja de Cima, devido a concentração de tensões compressivas. Também é encontrado FS<1 nas arestas agudas da caverna, nas quais se acumulam tensões trativas. É interessante o fato de que os maiores salões não apresentam necessariamente menor FS.

No entanto, este modelo pode ser refinado utilizando retroanálise, considerando a caverna estável a este tipo de ruptura. O FS foi simulado para diferentes valores de GSI e os resultados para GSI = 68, 75, 85 e 95 podem ser encontrados no Anexo 1.C.

Para valores de GSI = 75-85, obtém-se um resultado mais coerente com a realidade: FS=1 nas proximidades dos contornos da caverna, com alguns poucos trechos com FS<1, possivelmente originados pelas arestas criadas na discretização da caverna. Para GSI=95, praticamente inexistem locais onde o FS=1, o que é pouco provável: seria prudente imaginar que algum trecho da caverna encontre-se no limiar do equilíbrio, FS>≈1. Para valores de GSI = 68, a previsão é absurda, com trechos extensos instáveis.

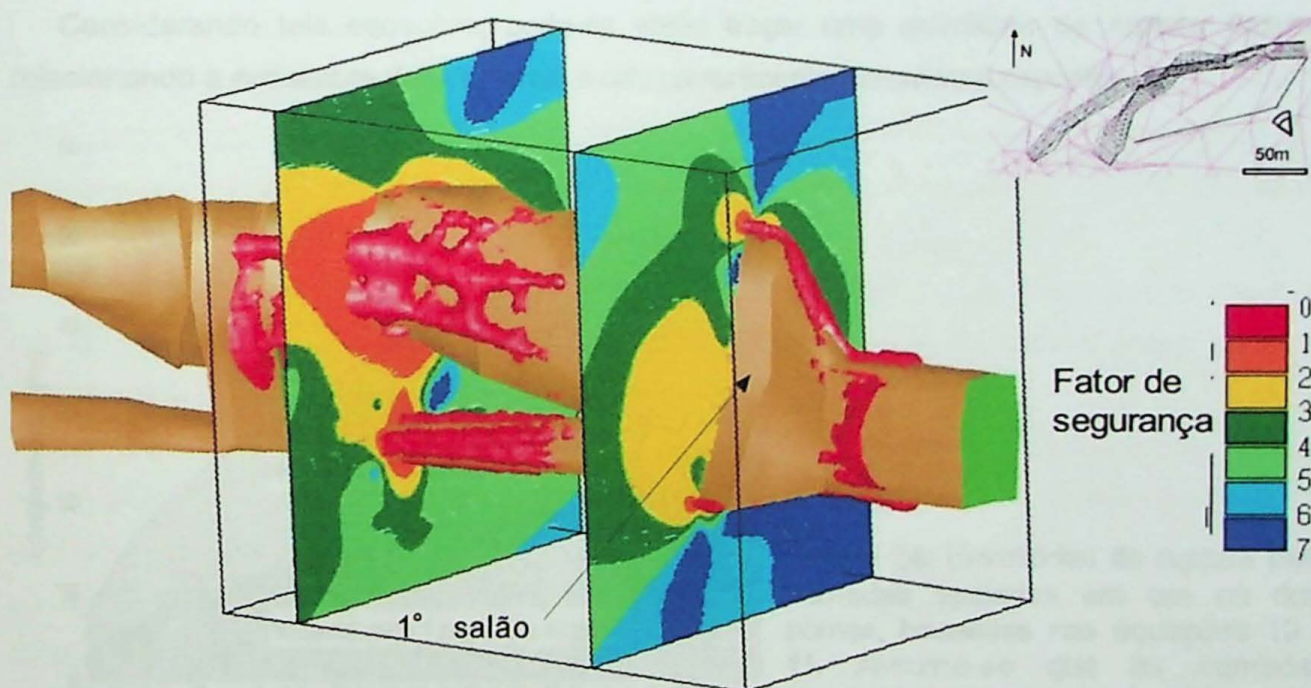


Figura 33: Valores calculados para o Fator de Segurança considerando GSI=75. A superfície vermelha corresponde ao isovalor FS = 1 e engloba as regiões com FS<1.

Considerando o GSI no intervalo 75-85 (GSI = 80), a expressão 12 é recalculada:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + 90 \left(4.895 \frac{\sigma_3'}{90} + 0.1084 \right)^{0.501} \quad (9).$$

No item 8.2, o Fator de Segurança fornecido pela análise numérica a partir da expressão 9 (GSI = 80) é discutido.

7.4 Ruptura por flexão de estratos

Para que ocorra ruptura por flexão de um estrato (ou banda) exposto na caverna, ele deve

ter sido previamente descolado dos demais ao longo do plano de acamamento (ou foliação). Isso pode ocorrer devido à interação de três fatores: i) redução dos parâmetros de coesão e resistência à tração da superfície de acamamento devido à fadiga e processos erosivos (como dissolução preferencial), ii) distribuição não uniforme do momento fletor ao longo da superfície de acamamento, em função da distância em relação aos pontos de apoio, gerando concentrações de tensões distensivas e iii) deslizamento interestratal durante a progressão da flexura.

Partindo de um estrato já descolado, pode-se avaliar sua estabilidade modelando-o como uma viga. Considerando que um carbonato com resistência à compressão por volta de 100 MPa apresenta resistência à tração por volta de 5 MPa (Waltham *et al.* 2005), que o mergulho médio das camadas na Caverna Água Suja é 54° e que o peso específico do metacarbonato é de 27.6 kN/m³ (Ruiz 1966), obtemos as seguintes relações, a partir das equações 5 e 6:

$$\frac{d}{L^2} = 1.62 \quad (10); \quad \frac{d}{L^2} = 9.73 \quad (11).$$

Considerando tais equações, pode-se então traçar uma envoltória de ruptura flexural, relacionando a espessura das camadas e seu comprimento transversal exposto.

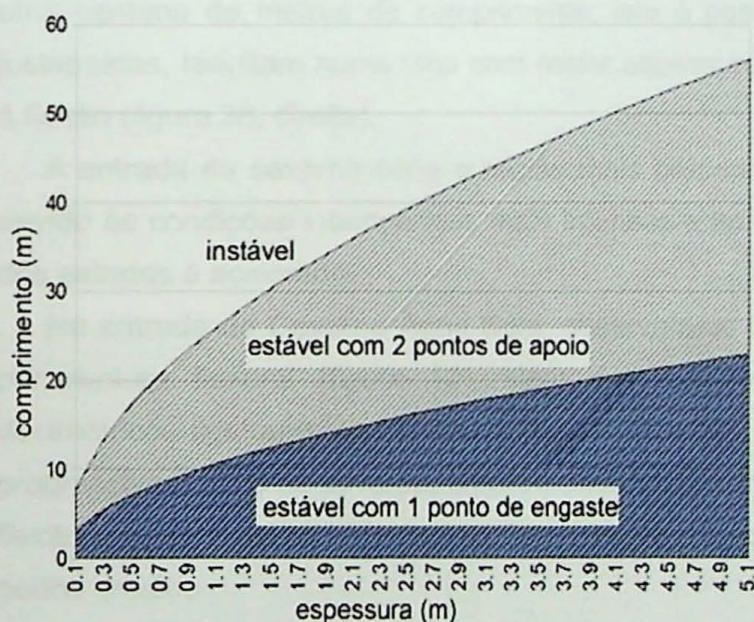


Figura 34: Envoltórias de ruptura para camadas apoiadas em um ou dois pontos, baseadas nas equações 10 e 11. Assume-se que as camadas apresentem espessura constante.

As camadas (bandas) metacarbonáticas da Formação Mina de Furnas na área da caverna são em geral, de espessura decimétrica. Para esta ordem de grandeza, o comprimento máximo de um estrato isolado seria de alguns metros (figura 34). Esta previsão corresponde ao que é observado ao longo da caverna: na parede NW da caverna, observam-se estratos num arranjo escalonado, cujas dimensões encontram-se no campo de estabilidade de ruptura por flexão (figura 35). O padrão escalonado forma-se devido à restrição do comprimento exposto de cada estrato em função de sua espessura, isto é, o segmento exposto de cada estrato isolado deve ser estável.

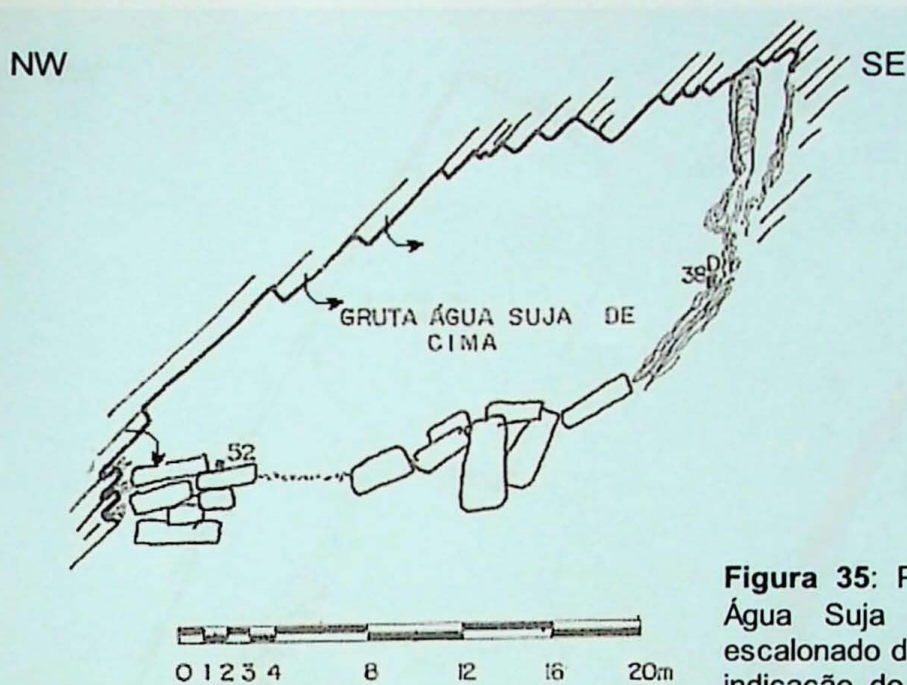


Figura 35: Perfil da entrada da Gruta Água Suja de Cima, com padrão escalonado de estratos na parede NW e indicação do momento fletor. Extraído de Batistucci et al. (1989).

Este padrão escalonado pode ser observado também no perfil do 3º Salão da Caverna Água Suja (figura 36, esquerda). É notável a extensão da parede NW deste salão, de mais de uma centena de metros de comprimento; isto é possível devido à coesão interestratal, que justapostos, resultam numa viga com maior espessura e consequentemente, maior resistência à flexão (figura 36, direita).

A entrada da caverna seria a região mais propensa a este tipo de ruptura, uma vez que, devido às condições intempéricas mais intensas e ao relaxamento do maciço, o descolamento dos estratos é acelerado.

Na entrada da Caverna Água Suja, observam-se blocos tabulares, possivelmente gerados por ruptura flexural (figura 12), além de cicatrizes de ruptura por flexão em estratos decimétricos ligeiramente afastados (figura 37 e 38). Este processo de ruptura flexural seria progressivo e ativo na caverna; considerando as dimensões métricas do bloco da figura 12, sua flexão é relativamente recente (em comparação à idade da caverna), uma vez que o bloco foi pouco erodido.

Fator tempo

Henry et al. (1977) ao estudar experimentalmente a propagação de fissuras em calcários e metacalcários de granulação muito fina, demonstra a redução de sua resistência à tração ao longo do tempo. Considerando tal fenômeno, a envoltória de ruptura apresentada na figura 34, seria válida para $t=0$, como por exemplo, imediatamente após o descolamento de um estrato. A redução dos valores de resistência ao longo de tempo levaria à redução da envoltória de ruptura e à gradual ruptura por flexão dos estratos.

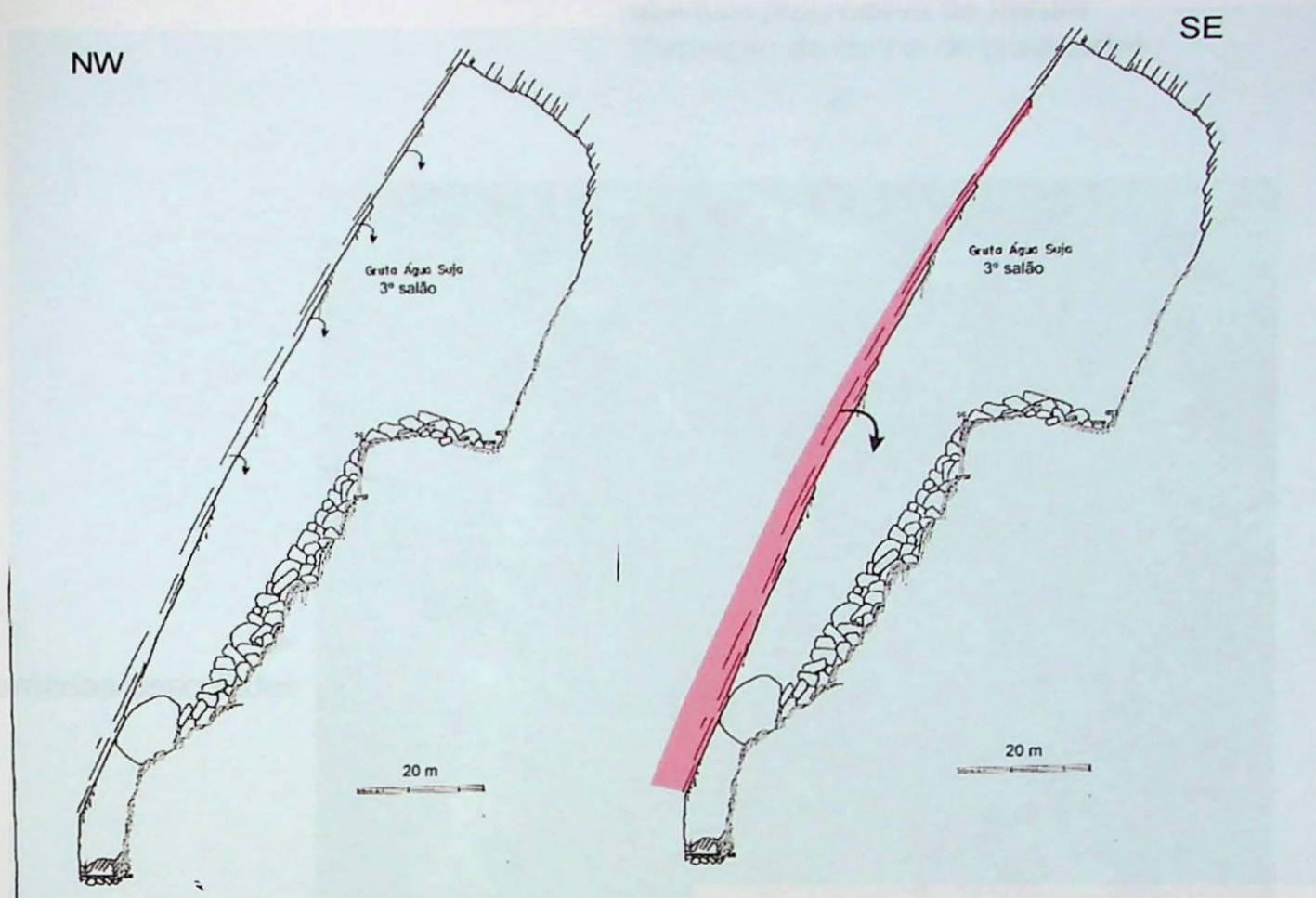


Figura 36: Perfil do 3º Salão da Caverna Água Suja, cuja parede NW é condicionada pela estratificação; à esquerda, detalhe para o momento fletor atuante em cada estrato; à direita, a espessura resultante da justaposição de vários estratos somando à resistência à tração do plano de acamamento possibilita a estabilidade de uma parede tão extensa. Adaptado de Batistucci *et al.* (1989); a espessura dos estratos é esquemática.

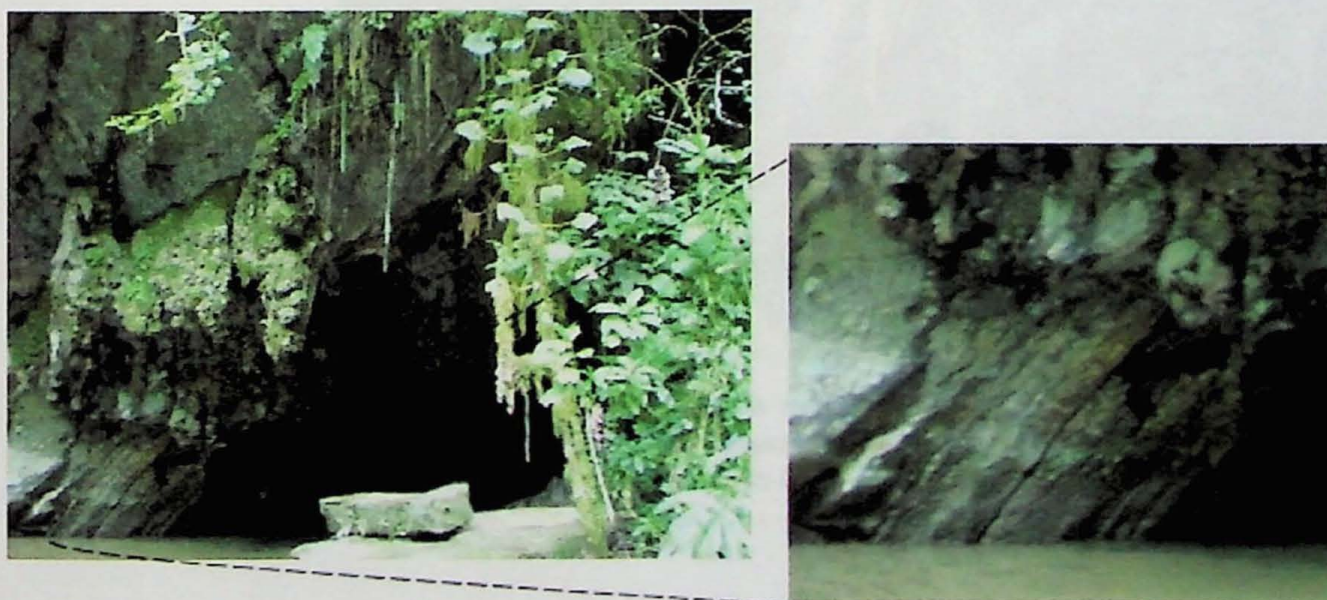


Figura 37: Entrada da Caverna Água Suja. Nota-se a existência de blocos tabulares no leito da drenagem, possivelmente formados por ruptura flexural. Cicatrizes de rupturas por flexão são observadas (em detalhe) em estratos de espessura decimétrica ligeiramente afastados.

abertura progressiva de fratura
(formação de cunha de gravidade)

camadas descoladas

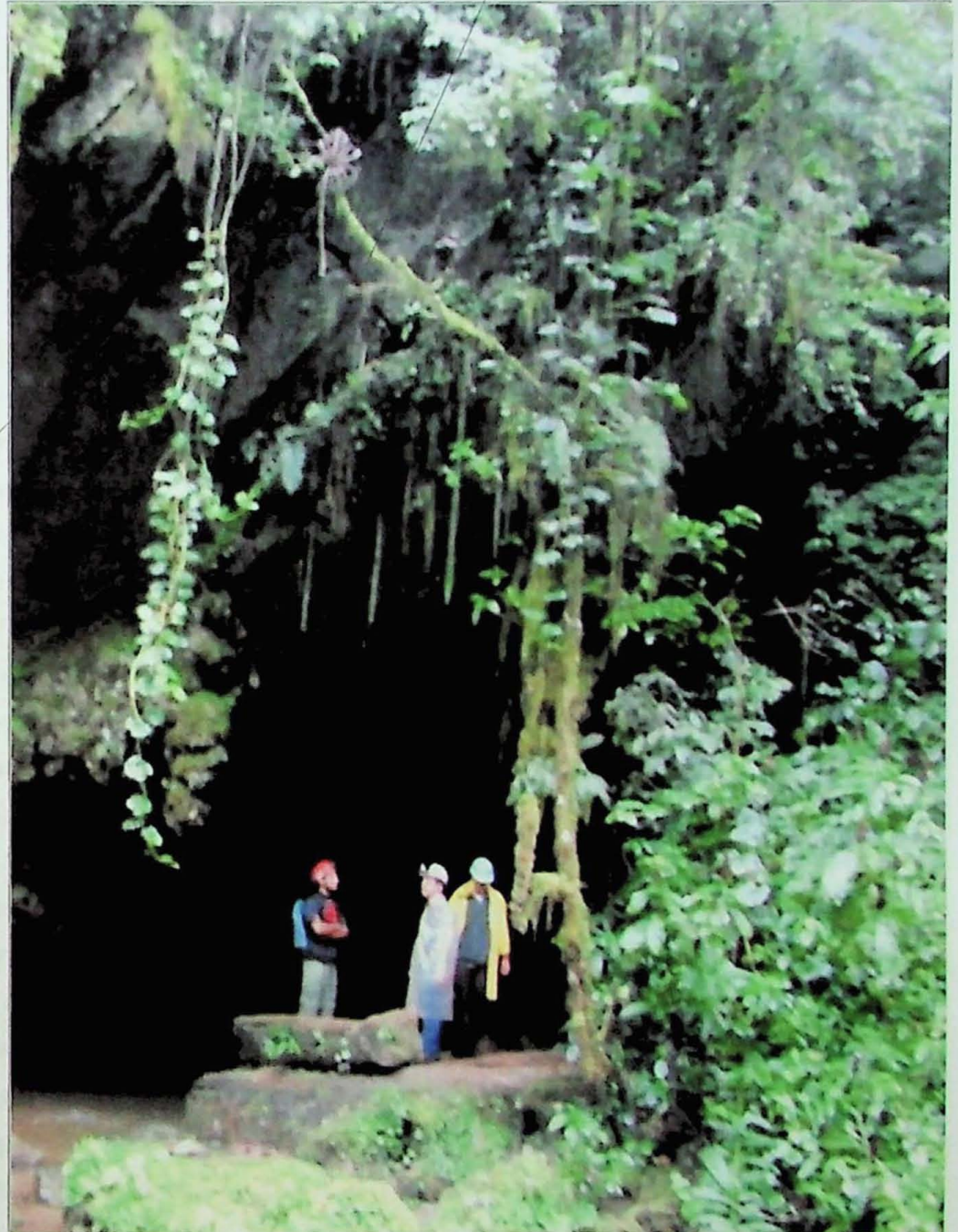


Figura 38: Entrada da Caverna Água Suja. Nota-se a existência de blocos tabulares no leito da drenagem, possivelmente formados por ruptura flexural. Os estratos encontram-se afastados, podendo ser modelados como vigas; notar a abertura de uma fratura cuja geometria favorece a formação de cunhas de gravidade.

8 Interpretação e Discussão dos Resultados

8.1 Ruptura condicionada por descontinuidades

8.1.1 Ruptura em cunha

Conforme discutido, as combinações das famílias de descontinuidades existentes no maciço formam blocos geometricamente susceptíveis à ruptura por cunhas de gravidade. De forma geral, qualquer combinação entre o acamamento/ bandamento (normalmente N60E/54NW), a família de fraturas de atitude N70E/subvertical e uma terceira família qualquer gera uma cunha de gravidade em potencial. No entanto, os parâmetros de resistência para estas descontinuidades, quando intactas, são muito maiores do que o peso do bloco, gerando fatores de segurança altíssimos, na ordem de dezenas e centenas.

Apesar disso, cicatrizes de ruptura em cunha na caverna e a geometria dos perfis transversais da caverna indicam que a ruptura por cunha seja um fenômeno corrente na caverna. Deste modo, dois mecanismos são apontados para a ruptura em cunhas. O primeiro é a redução da resistência à tração e da coesão das descontinuidades ao longo do tempo devido à fadiga (Henry *et al.* 1977); considerando o longo tempo de evolução da caverna, a redução dos parâmetros de resistência à tração constitui um importante mecanismo para a ruptura ao longo de descontinuidades. A erosão por dissolução preferencial ao longo de fraturas preenchidas ou estratos carbonáticos também reduz os parâmetros de resistência: uma fratura aberta tem resistência à tração nula.

Seria necessária uma redução drástica (10^{-2} - 10^{-3}) nos parâmetros de resistência à tração das descontinuidades, se apenas este efeito fosse considerado. Outro fenômeno favorece a abertura de descontinuidades firmemente fechadas ou preenchidas: a concentração de tensões trativas nas arestas definidas por ângulos agudos no contorno da caverna, como o ápice de perfis em capela. Nestes locais, a tensão distensiva atinge valores de algumas unidades de MPa, compatíveis com a resistência à tração das descontinuidades intactas. Deste modo, é esperado que se propaguem fissuras em direção à vertical, principalmente ao longo de fraturas preenchidas subverticais com direção próxima à da caverna; este processo favoreceria a liberação de cunhas ao longo de descontinuidades pré-existentes, além disso, tal fenômeno favoreceria à propagação vertical da caverna, com formação de perfis transversais, entricheirados; Criss *et al.* (2008) também relatam a importância da distribuição de tensões para a propagação da caverna para cima devido a tensões trativas no teto de dutos circulares, assumindo tensões horizontais desprezíveis.

Assim como a concentração de tensões distensivas favorece a ruptura de cunhas, a concentração de tensões compressivas no teto da caverna a desfavorece, pois as descontinuidades permaneceriam firmemente fechadas, com os parâmetros de resistência

intactos, e as possíveis cunhas, imbricadas. No trecho onde Caverna Água Suja de Baixo encontra-se sob a Água Suja de Cima, concentram-se tensões compressivas, sendo raras feições de ruptura por cunha. Além disso, nestes trechos, são abundantes espeleotemas no teto do conduto inferior, possivelmente relacionado ao aumento da dissolução por pressão.

8.1.2 Ruptura flexural

De modo análogo à ruptura por cunha, a ruptura flexural é um fenômeno progressivo na caverna, essencialmente condicionado por descontinuidades. Quando descolados, os estratos, passam a se comportar como vigas e tornam-se sujeitos à ruptura por flexão.

A resistência flexural de uma viga baseia-se no seu comprimento, espessura, na resistência à tração do material e na presença de um ou dois pontos de apoio. Deste modo, são três os mecanismos que desencadeiam a ruptura por flexura: o descolamento de um estrato, a redução do número de pontos de apoio (por uma fratura, por exemplo) e a progressiva redução da resistência à tração por fadiga ao longo do tempo.

As camadas metacarbonáticas da Formação Mina de Furnas na área da caverna são em geral, de espessura decimétrica. Para esta ordem de grandeza, o comprimento máximo de uma camada isolada, previsto pela envoltória de ruptura (considerando resistência à tração da rocha intacta = 5MPa) seria de alguns metros, o que é observado na caverna. No entanto, a redução do número de pontos de apoio (devido a uma fratura sendo aberta) e a redução da resistência à tração do metacarbonato devido à fadiga (Henry *et al.* 1977) progressivamente reduzem a envoltória de ruptura, causando ruptura progressiva dos estratos.

Considerando que o descolamento de um estrato é a condição inicial para que este tipo de ruptura ocorra, a entrada da caverna é mais sujeita a este tipo de ruptura, uma vez que o intemperismo é mais intenso e o maciço encontra-se aliviado. Em campo, na área da entrada, predominam estratos descolados, são observadas cicatrizes de ruptura flexural e são encontrados blocos tabulares, provavelmente formados por flexão.

8.2 Ruptura por sobre-tensões em meio contínuo: discussão do Fator de Segurança obtido via análise numérica

Considerando a caverna estável à ruptura em meio contínuo segundo o critério Hoek-Brown, por meio de retroanálise, se obteve o valor de $GSI = 80$. Neste cenário, o FS obtido pela análise numérica é representado na figura 39. Interpreta-se que zonas com $FS < 1$ são restritas a arestas agudas na caverna, onde se formam tensões distensivas, como no teto de perfis em capela; em alguns trechos, o contorno da caverna apresenta FS valores próximo a 1 (entre 1 e 2), especialmente nas zonas que circundam a região onde as Cavernas Água Suja de Cima e de Baixo se aproximam; a coalescência destes dois condutos forma o 1º Salão, que apesar de ter maiores dimensões, apresenta maior FS, no intervalo entre 2 e 3.

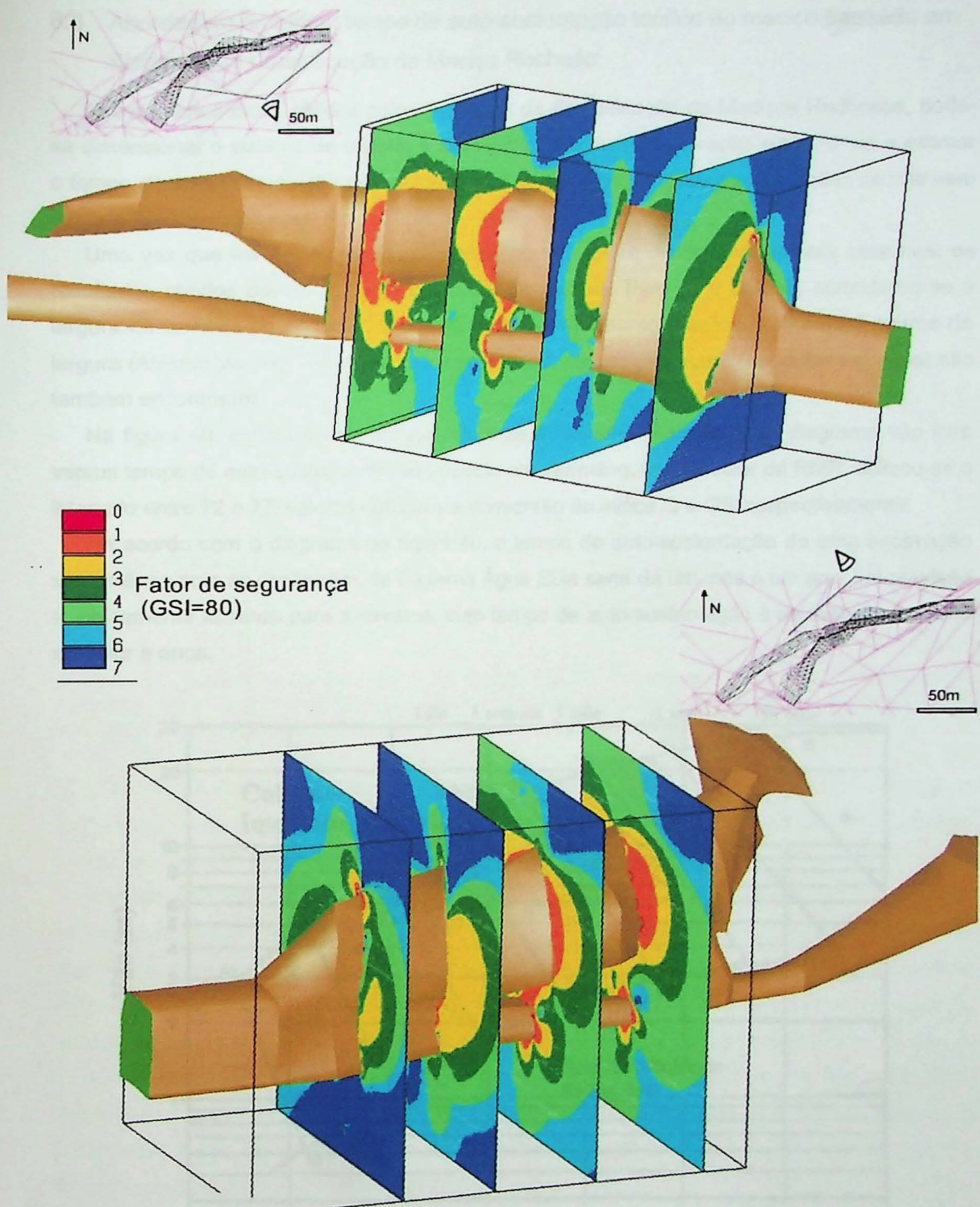


Figura 39: Perfis de Fator de Segurança do trecho 2 da Caverna Água Suja para GSI=80.

8.3 Abordagem empírica: tempo de auto-sustentação teórico do maciço baseado em Sistemas de Classificação de Maciço Rochoso

Através dos índices obtidos pelos Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos, pode-se dimensionar o sistema de suporte a ser empregado numa escavação subterrânea e estimar o tempo de auto-sustentação do maciço (*stand up time*) em função das dimensões do vão sem suporte (Lauffer 1958 apud Hoek & Brown 1982).

Uma vez que estes métodos de classificação não foram desenvolvidos para cavernas, os resultados obtidos devem ser interpretados com cautela. Para esta análise, considerou-se a largura da caverna no intervalo de 8 a 22 metros. No entanto, trechos com até 90 metros de largura (Abismo Vargem Grande) e com menos de 5 metros de largura (condutos estreitos) são também encontrados.

Na figura 40, encontra-se o campo referente à Caverna Água Suja no diagrama vão livre versus tempo de auto-sustentação, assinalado em vermelho. Para o valor de RMR, utilizou-se o intervalo entre 72 e 77, valores obtidos via conversão do índice Q e GSI respectivamente.

De acordo com o diagrama da figura 40, o tempo de auto-sustentação de uma escavação subterrânea com as dimensões da Caverna Água Suja seria de um mês a um ano. Tal previsão é, obviamente absurda para a caverna, cujo tempo de auto-sustentação é de magnitude muito superior a anos.

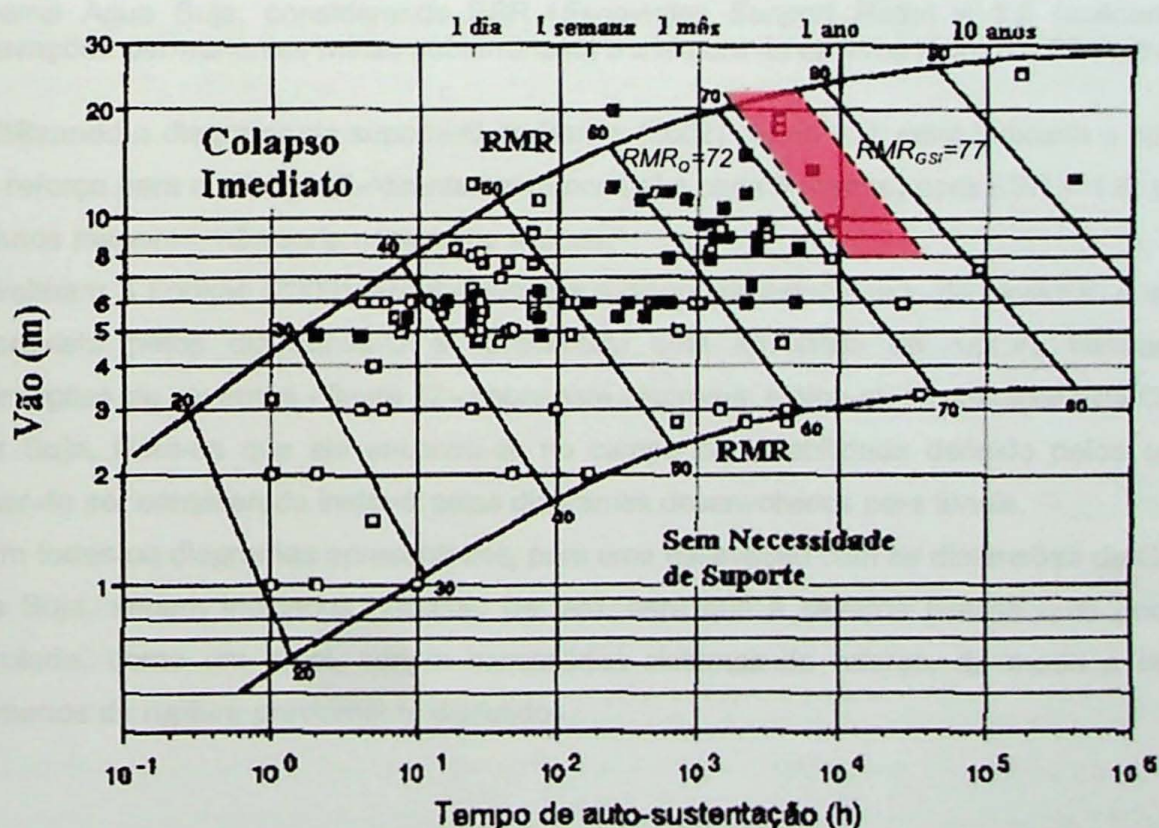
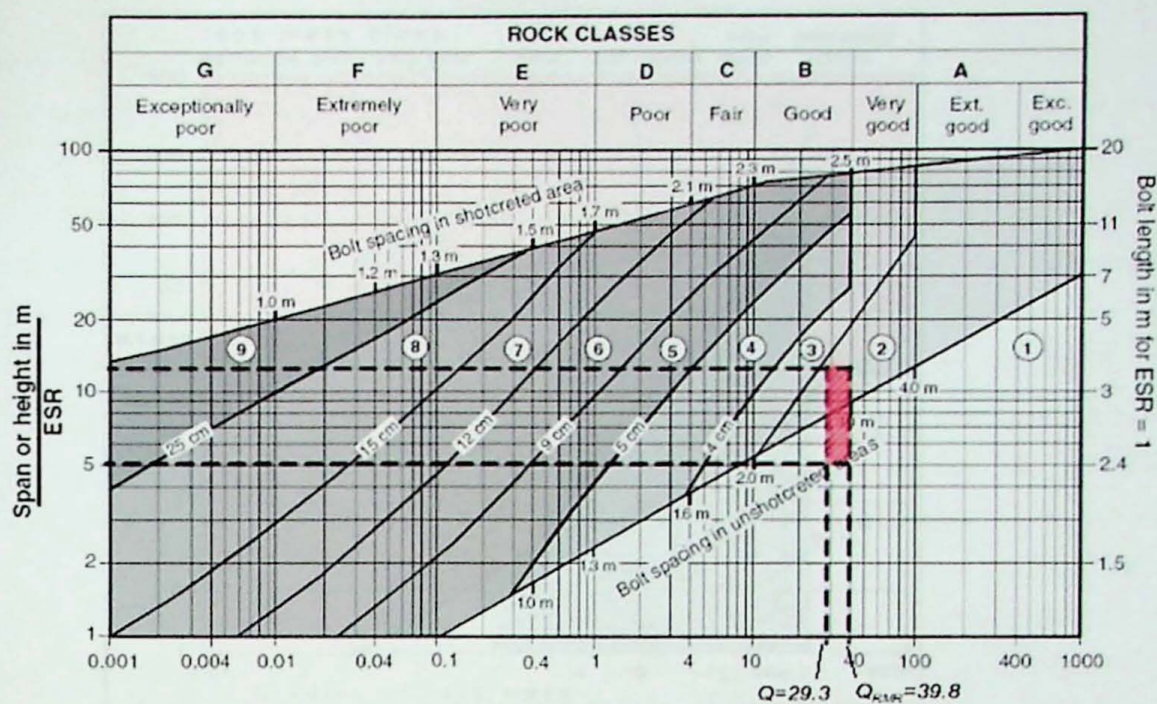


Figura 40: Relação entre a extensão do vão livre e o tempo de auto-sustentação (adaptado de Bienawski 1989). O trecho assinalado corresponde à Caverna Água Suja; linhas tracejadas correspondem aos índices RMR obtidos a partir dos índices Q e GSI.



REINFORCEMENT CATEGORIES:

- | | |
|--|--|
| 1) Unsupported | 6) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 9 - 12 cm |
| 2) Spot bolting | 7) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 12 - 15 cm |
| 3) Systematic bolting | 8) Fibre reinforced shotcrete, > 15 cm, reinforced ribs of shotcrete and bolting |
| 4) Systematic bolting, (and unreinforced shotcrete, 4 - 10 cm) | 9) Cast concrete lining |
| 5) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 5 - 9 cm | |

Figura 41: Diagrama de suporte-Q de Barton (2002). A área em vermelho corresponde à Caverna Água Suja, considerando ESR (*Excavation Support Ratio*) = 1.6 (aplicado para escavações permanentes minas subterrâneas) e a largura da caverna entre 8 e 22 metros.

Utilizando o diagrama de suporte-Q de Barton (2002) (figura 41), seria indicada a categoria 2 de reforço para o maciço (2-Atirantamento pontual a cada 3 metros) para ESR = 1.6; para os condutos menores, não seria necessário suporte.

Waltham & Fookes (2003) reconhecem que o campo de estabilidade de cavernas é superior ao previsto pelos diagramas-Q e apresentam uma envoltória de ruptura baseada em observações de cavernas - figura 42 - sobre este diagrama, plotou-se as condições da Caverna Água Suja. Nota-se que ela encontra-se no campo de estabilidade definido pelos autores, apesar de ser considerada instável pelos diagramas desenvolvidos para túneis.

Em todos os diagramas apresentados, para uma escavação com as dimensões da Caverna Água Suja, seriam indicados reforços. De fato, para que a caverna tivesse uma geometria controlada, como um túnel, seriam necessários sistemas de reforço, de modo a inibir os fenômenos de ruptura previamente discutidos.

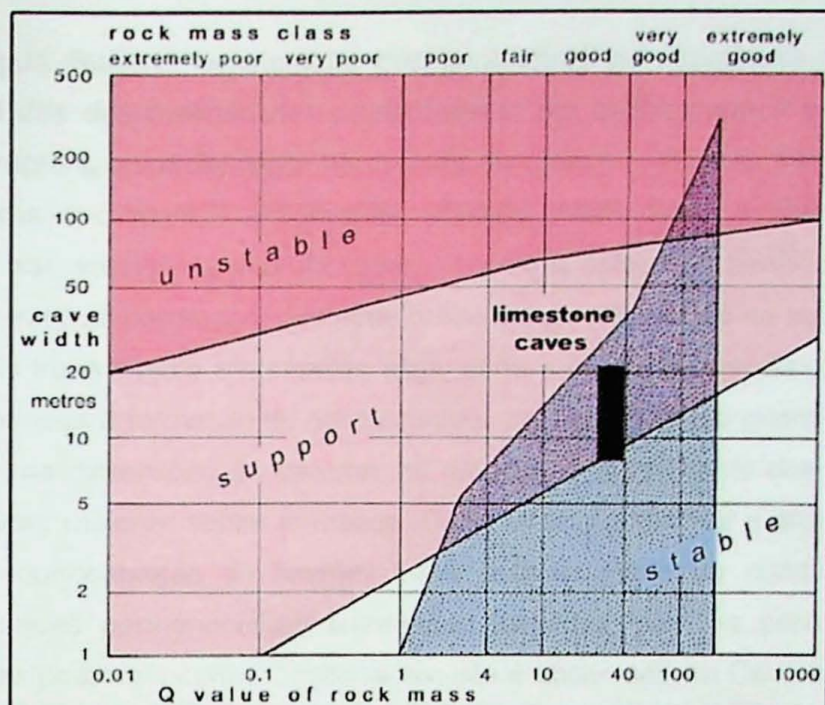


Figura 42: Campo de estabilidade de cavernas em função de seu valor-Q e largura; os campos *unstable*, *support* e *stable* (instável, suporte e estável) são os aplicados no *Norwegian Tunneling Method* (Método Norueguês de Túneis) – extraído de Waltham & Fookes (2003); o retângulo escuro corresponde às condições da Caverna Água Suja.

9 Conclusões

A estabilidade de uma caverna é complexa, dada a atuação e interação de diferentes mecanismos de ruptura. Além disso, é fato conhecido que são variáveis em função do tempo tanto os parâmetros de resistência da rocha e das discontinuidades, quanto as dimensões da própria caverna, o que torna a questão ainda mais complexa.

Para avaliar a estabilidade de uma caverna, deve-se primeiro identificar os potenciais fenômenos de ruptura. Os mecanismos identificados como mais importantes na Caverna Água Suja podem ser separados, em termos analíticos práticos, em dois tipos: 1- essencialmente condicionados por discontinuidades (em cunha e flexural) e 2- devido a sobre-tensões em meio contínuo.

Qualquer combinação entre o acamamento/ bandamento (normalmente N60E/54NW), a família de fraturas de atitude N70E/subvertical- e uma terceira família qualquer gera uma cunha de gravidade em potencial, no entanto, quando as discontinuidades encontram-se intactas (preenchidas por calcita e/ou firmemente fechadas e seladas), tais cunhas apresentam FS altíssimos. A despeito disso, indícios de rupturas condicionadas por discontinuidades são encontrados na caverna: cicatrizes de ruptura por flexão e em cunha, descolamento e erosão preferencial ao longo das discontinuidades e geometria dos perfis transversais da caverna correspondente à geometria teórica definida pelas cunhas críticas.

É fato que tanto o processo de ruptura flexural quanto em cunha encontram-se ativos na

Caverna Água Suja. A deterioração dos parâmetros de resistência à tração pela erosão preferencial das descontinuidades preenchidas e por fadiga torna a caverna sujeita a estes modos de ruptura, especialmente na entrada da caverna, onde os agentes intempéricos são mais intensos e o maciço encontra-se relaxado. Além disso, a concentração de tensões distensivas nas arestas agudas da caverna, como o ápice dos perfis em capela, favorece a abertura de fraturas por tração, que pode desencadear a formação de cunhas.

Os perfis transversais em capelas altas, onde a cunha crítica máxima já se rompeu, são menos propensos à formação de novas cunhas, por uma questão geométrica: cunhas maiores ultrapassam as dimensões da caverna; no entanto, o alargamento dos condutos permite que cunhas críticas maiores sejam formadas. Outro fator que diminui a propensão de ruptura por cunha é a concentração de tensões compressivas acima do conduto, uma vez que as descontinuidades permaneceriam firmemente fechadas, com os parâmetros de resistência intactos, e as possíveis cunhas, imbricadas; isto é observado na Caverna Água Suja de Baixo no trecho sob a Caverna Água Suja de Cima.

Através da aplicação direta dos Sistemas de Classificação de Maciços Rochoso (GSI médio = 75), seria previsto pela análise numérica via Elementos de Contorno que alguns trechos da Caverna Água Suja estivessem instáveis à ruptura em meio contínuo. No entanto, considerando que a caverna encontra-se essencialmente estável à ruptura por sobre-tensões em meio contínuo, por meio de retroanálise, obteve-se o valor de GSI = 80, próximo ao valor obtido diretamente. Neste cenário, trechos com $FS < 1$ são restritos a arestas agudas na caverna, onde se formam tensões distensivas, como no teto de perfis em capela; em alguns trechos, o contorno da caverna apresenta FS valores próximo a 1 (entre 1 e 2), especialmente na região onde as cavernas Água Suja de Cima e de Baixo se aproximam; a coalescência destes dois condutos forma o 1º Salão, que apesar de ter maiores dimensões, apresenta maior FS, no intervalo entre 2 e 3.

Aplicando os Sistemas de Classificação de Maciço Rochoso, o maciço foi classificado como de boa qualidade, sendo os índices obtidos independentemente, correlacionáveis ($Q = 29.3$ [Barton 2002]; $RMR = 74$ [Bienawski 1989] e $GSI = 77$ [Hoek et al. 2002]). A retroanálise via método numérico indica $GSI = 80$, próximo ao valor obtido diretamente. Aplicando tais índices nos diagramas de suporte, usualmente utilizados para escavações subterrâneas, reforços seriam necessários. O diagrama-Q forneceu a melhor previsão, considerando o fator $ESR = 1.6$ (Excavation Support Ratio), aplicado para minas subterrâneas permanentes; segundo este diagrama, seria necessário atirantamento pontual nos maiores condutos e nos menores, nenhum reforço. De fato, para que a caverna tivesse uma geometria controlada, como um túnel, seriam necessários sistemas de reforço, de modo a inibir os fenômenos de ruptura previamente discutidos. Waltham & Fookes (2003) reconhecem que o campo de estabilidade de cavernas é superior ao previsto pelo diagrama e apresentam uma envoltória de ruptura

baseada em observações de cavernas; neste diagrama, a caverna encontra-se no campo de estabilidade. Considerou-se útil a aplicação de tais métodos, utilizados para escavações subterrâneas, na avaliação de estabilidade da caverna.

Em suma, considerando que os fatores de segurança para os diversos mecanismos de ruptura (principalmente os condicionados por descontinuidades) tendem a ser progressivamente reduzidos, pode-se dizer que a Caverna Água Suja está sujeita a eventos de ruptura, especialmente na sua entrada e portanto, há risco na visita turística ou exploratória da Caverna Água Suja. Considerando que há risco, a questão seria avaliar qual a probabilidade de um evento de ruptura ocorrer durante uma visita. Pode-se dizer que se a Caverna Água Suja fosse aproveitada para algum uso civil (como uma via de transporte, por exemplo), seriam recomendados reforços para o maciço.

10 Referências Bibliográficas

- Aadnoy B; Looyeah R. 2011. *Petroleum Rock Mechanics: Drilling Operations and Well Design*. Oxford. 376 p.
- Almeida F.F.M. 1986. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-Paleozóico no Brasil. *Rev. Bras. Geoc.*, **16**(4):325-349.
- Amadei B. O., Stephansson O. 1997. *Rock Stress and its Measurement*. Chapman & Hall, Londres, 490 p.
- Augusto W.C.B. 2009. *Caracterização geológica dos monumentos da cidade de São Paulo*. Monografia de Conclusão de Curso, IGc-USP, 41 p.
- Autodesk 2009. *AUTOCAD 2010 - version 18.0*. Califórnia, EUA. 1 DVD.
- Baryakh A.A., Rusin E.P., Stazhevsky S.B., Fedoseev E.A., Khan G.N. 2009. Stress-strain state of karst areas. *Journal of Mining Science*, **45**: 517-524.
- Baryakh A.A., Stazhevsky S.B., Timofeev E.A., Khan G.N. 2008. Strain state of a rock mass above karst cavities. *Journal of Mining Science*, **44**: 531-538.
- Barton N. 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* **39**/2: 185-216.
- Batistucci N.L.N., Karmann I., Chamani M.E.A.P.C., Philadelhi M.A., Gesicky A.L.D., Pissato E., Silva E.L., Chamani M.C., Batistucci L.F.N., Gabas S.G., Barros E.J., Seoane J.C.S., Nascimento M.C., Neto A.A., Shinohara E.J. 1988. *Mapa Espeleológico - Sistema Água Suja*. São Paulo, Grupo da GEO de Espeleologia. 25 folhas.
- Bienawski Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. John Wiley and Sons, Nova Iorque, 251p.

- BrOffice 2007. BrOffice Calc Versão 3.0.1. BrOffice. Disponível em <http://broffice.org>. Acessado em 04 nov 2011.
- Campanha, G.A.C., 1991. *Tectônica Proterozóica no Alto e Médio Vale do Ribeira, Estados de São Paulo e Paraná*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 296p.
- Campanha, G.A.C., Basei, M.A.S., Tassinari C., Nutman A.P., Faleiros F.M. 2008. Constraining the age of Iporanga Formation with SHRIMP U-Pb zircon: implications for possible Ediacaran glaciation in the Ribeira Belt, SE Brazil. *Gondwana Research*, **13**: 117-125.
- Campanha, G.A.C., Sadowski, G.R. 1999. Tectonics of the Southern Portion of the Ribeira Belt (Apiaí Domain). *Precambrian Research*, **98**: 31-51.
- Criss E.M., Criss R.E., Osburn G.R. 2008. Effects of Stress on Cave Passage Shapes in Karst Terranes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **41**(3): 499-505.
- Francis, F. O., Rocha, H. C. Obras Subterrâneas Civis. In: Oliveira, A.M.S., Brito, S.N.A. (Eds.). 1998. *Geologia de Engenharia*. São Paulo, ABGE, p. 439-456.
- Ford D.C. & Williams P. W. 2007. *Karst Hidrogeology and Geomorfology*. Chichester, Wiley, 561 p.
- Goodman, R.E. 1980. *Introduction to rock mechanics*. Wiley and Sons, New York. 478 p.
- He K.Q, Liu C.L., Wang S.J. 2003. Karst collapse related to over-pumping and a criterion for its stability. *Environmental Geology*, **43**: 720-724.
- Henry J. P. , Paquet J., Tancrez J. P. 1977. Experimental Study of Crack Propagation in Calcite Rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech*, **14**, 85-91.
- Hoek E. & Brown E.T. 1980. *Underground Excavations in Rock*. The Institute of Mining and Metallurgy, Londres, 402p.
- Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F. 1995. *Support of underground excavation in hard rock*. Balkema, Rotterdam, 215p.
- Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B., 2002. Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition. *Proceedings of the fifth North American rock mechanics symposium*, p. 267-273.
- Lei M., Jiang X., Li Y. 2002. New advances in karst collapse research in China. *Environmental Geology*, **42**: 462-468.
- Karmann I., 1994. *Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto Vale do rio Ribeira de Iguape, sudeste do Estado de São Paulo*. Tese de doutorado, Igc-USP, 241 p.
- Karmann, I., Ferrari J. A. 2002. Carste e Cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), SP. In: Schobbenhaus, C., Campos, D.A., Queiroz E. T., Winge, M., Bebert-Born, M.L.C. (Org), 2002. *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Brasília, DNPM. v. 1, p. 401-413.

- Marinos P., Hoek E. 2000. GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In: *GeoEng2000*, Melbourne, CD-ROM.
- Palmstrom A. 2005. Measurement of and Correlation between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). *Tunnels and Underground Space Technology*, **20**: 362-377.
- Ramsay, J.G. & Huber, M.I. 1987. *The Techniques of Modern Structural Geology. Volume 2: Folds and Fractures*. Academic Press, London , 700p.
- Ramsay, J.G. & Lisle R.J. 2000. *The Techniques of Modern Structural Geology. Volume 3: Applications of Continuum Mechanics in Structural Geology*. Academic Press, London , 1061p.
- Ruiz M.D. 1966. *Características tecnológicas de rochas do Estado de São Paulo*. Bol. 50, IPT, São Paulo.
- Serra Junior E.; Ojima L. M. 1998. Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos. In: Oliveira, A. M. S; Brito, S. N. A. (Eds.). 1998. *Geologia de Engenharia*, São Paulo, ABGE, Cap. 13: 211-226.
- Rocscience 2003. *EXAMINE 3D - Engineering Analysis for Underground Excavations, version 4.0*. Toronto, Canadá, Rocscience inc. 1 CD-ROM.
- Rocscience 2004. *UNWEDGE - Underground Wedge Stability Analysis, version 3.0*. Toronto, Canadá, Rocscience inc. 1 CD-ROM.
- Rocscience 2007. *ROCKLAB - Rock Mass Strength Analysis using the Generalized Hoek-Brown failure criterion*. Toronto, Canadá, Rocscience inc. Disponível em <http://download.rocscience.com/ordering/FreeDownloadsForm.asp>. Acessado em 14 mar 2011.
- Shah S. 1992. *Practical Implementation of the Direct Boundary Element Method for Three-dimension Stress Analysis of Underground Excavations*. Tese de Doutorado, Universidade de Toronto, 258p.
- Waltham A.C. & Fookes P.G. 2003. Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hidrogeology*, **36**: 101-118.

Anexo 1: Análise numérica via Examine 3D (Rocscience 2000)

1. A) Revisão bibliográfica: o Método de Elementos de Contorno (*Boundary Element Method*)

Num maciço rochoso contínuo e elástico, sob condição de equilíbrio, dois fatores governam a distribuição da tensão (Ramsay & Lisle 2000):

1. O primeiro fator é expresso em termos de equações diferenciais de equilíbrio, que impõem restrições aos gradientes de tensão de acordo com as forças atuantes no corpo, que no caso bidimensional de um elemento de tensão atuando sobre um cubo elementar são:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X = 0 \quad (1); \quad \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + Y = 0 \quad (2), \text{ onde } \sigma_y \text{ e } \sigma_x \text{ são as tensões normais atuantes}$$

ao longo dos eixos x e y , τ_{xy} é a tensão cisalhante e X e Y correspondem a forças de corpo por unidade de volume ao longo das direções x e y .

2. O segundo fator é que as condições nos limites do corpo sejam contínuas com aquelas no seu interior, de acordo com as equações diferenciais de equilíbrio. Exemplos de limites de corpo são a superfície do terreno, descontinuidades ou cavidades subterrâneas, cujos estados de tensão são conhecidos, ou parcialmente conhecidos.

Conhecidas as condições nos limites do corpo, pode-se portanto, calcular a distribuição das tensões no maciço. No entanto, este cálculo não é trivial, sendo necessário a aplicação de artifícios matemáticos computacionais para tanto.

Estes métodos podem ser agrupados em duas classes (Hoek 1995).

a) Métodos de Elementos de Contorno: a superfície da cavidade é dividida geometricamente em elementos e o maciço rochoso é considerado contínuo.

b) Métodos de Domínio, que inclui os métodos de Elementos Finitos, Diferenciais Finitas e Elementos Distintos: o maciço rochoso é dividido em elementos, cada qual com suas propriedades geomecânicas.

O programa EXAMINE 3D (2000), utilizado neste trabalho para análise numérica adota o Método de Elementos de Contorno (*Boundary Element Method*); Shah (1992) discute o método e sua implementação.

A principal vantagem do Método de Elementos de Contorno sobre os Métodos de Domínio (p.ex.: Elementos Finitos, Diferenciais Finitas), é que no método de Elementos de Contorno, a parte do problema que deve ser discretizada é o contorno da escavação (ou da caverna, no caso do trabalho) e da topografia; nos Métodos de Domínio, todo o domínio (no caso, o maciço rochoso) deve ser discretizado, aumentando assim o custo computacional, bem como a complexidade da discretização.

A discretização pode ser entendida como a substituição da superfície dos objetos da análise (no caso, o maciço rochoso e a caverna) por um conjunto de elementos geométricos, normalmente triangulares ou quadrangulares, com a finalidade de simplificar o problema (Shah 1992). Para cada elemento discretizado, associam-se variáveis conhecidas e a serem calculadas. Um nível racional de discretização deve ser empregado para tornar a execução computacional viável, enquanto os resultados gerados sejam compatíveis com o nível de detalhe exigido.

A essência do Método de Elementos de Contorno é a transformação de um conjunto de equações diferenciais fundamentais de equilíbrio para um conjunto de equações integrais. Tais equações integrais envolvem as variáveis nos extremos da região da integração, i.e., nos contornos do problema. O processo de discretização da superfície de contorno converte o conjunto de equações integrais em um sistema linear de equações algébricas, que podem ser resolvidas através de técnicas iterativas ou de eliminação.

Uma vez que todas as variáveis desconhecidas no contorno são resolvidas, a solução em qualquer ponto no interior no domínio (deslocamentos e tensões) pode ser obtida a partir dos valores calculados no contorno, uma vez que a solução é contínua no domínio.

No entanto, apesar da sofisticação dos métodos numéricos para o cálculo das condições mecânicas no interior do maciço, alguns fatores devem ser considerados durante a interpretação dos resultados (Shah 1992):

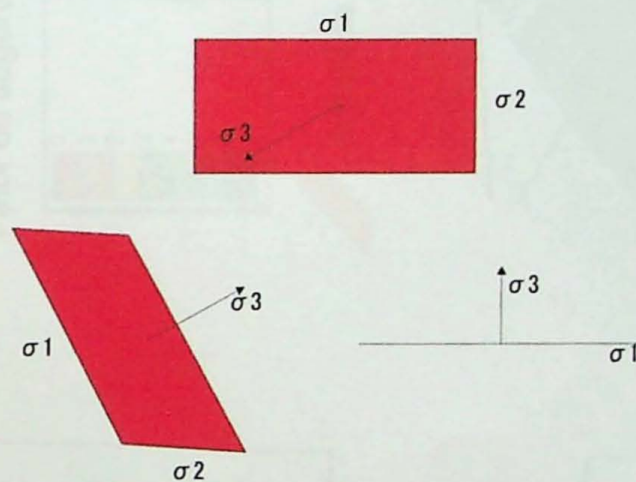
- O baixo nível de informações de entrada: as tensões *in situ* e as propriedades do material rochoso são variáveis e normalmente não bem estabelecidas;
- Aspectos geológicos, como descontinuidades e água subterrânea não são completamente conhecidos, sendo aplicados modelos restritos pelo nível de investigação;
- Cavidades subterrâneas não podem ser consideradas isoladas, uma vez que a interação entre cavidades vizinhas é de importância primária na avaliação de estabilidade de um dado trecho da escavação/ caverna.
- A geometria exata das escavações subterrâneas não é conhecida previamente, especialmente em mineração, já que é praticamente impossível executar a geometria exata do projeto, devido a limitações das técnicas de construção e das características do maciço rochoso.

Estes aspectos apresentam implicações para modelar a escavação subterrânea. A inerente incerteza e imprecisão dos dados de entrada tornam este tipo de análise muito mais qualitativa, do que quantitativa. O objetivo destas análises deve ser vislumbrar a influência de diversos fatores que governam a estabilidade geral das escavações. Para este propósito, é essencial que um número de análises seja conduzido para que o efeito de fatores como a tensão *in-situ* e as propriedades do material possam ser avaliados. Isto envolveria a influência de estruturas geológicas como falhas e

juntas. Em suma, o objetivo do modelo numérico deve ser de avaliar a importância e a influência dos diversos fatores que governam a segurança de uma escavação subterrânea. Deste modo, na prática construtiva, pode-se escolher o melhor projeto de escavação, a fim de minimizar as zonas de concentração excessiva de tensões ou sobre-tensão (*over-stress*), sujeitas à ruptura no maciço rochoso.

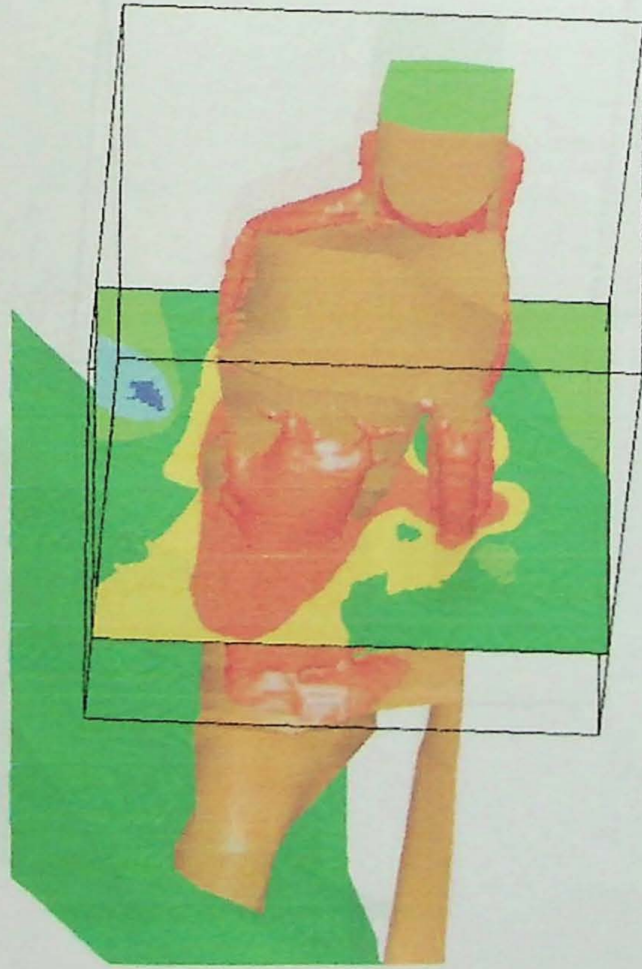
Deve-se considerar também que, caso as escavações a serem analisadas forem parte de um sistema tridimensional complexo (como um sistema de cavernas), a análise bidimensional não se aplica, visto que há interferência entre as diversas escavações; neste caso, a análise tridimensional é necessária para modelar a redistribuição de tensões e de deslocamentos.

1. B) Representação de um elemento de tensão nos modelos geomecânicos do programa Examine 3D (Rocscience 2003)

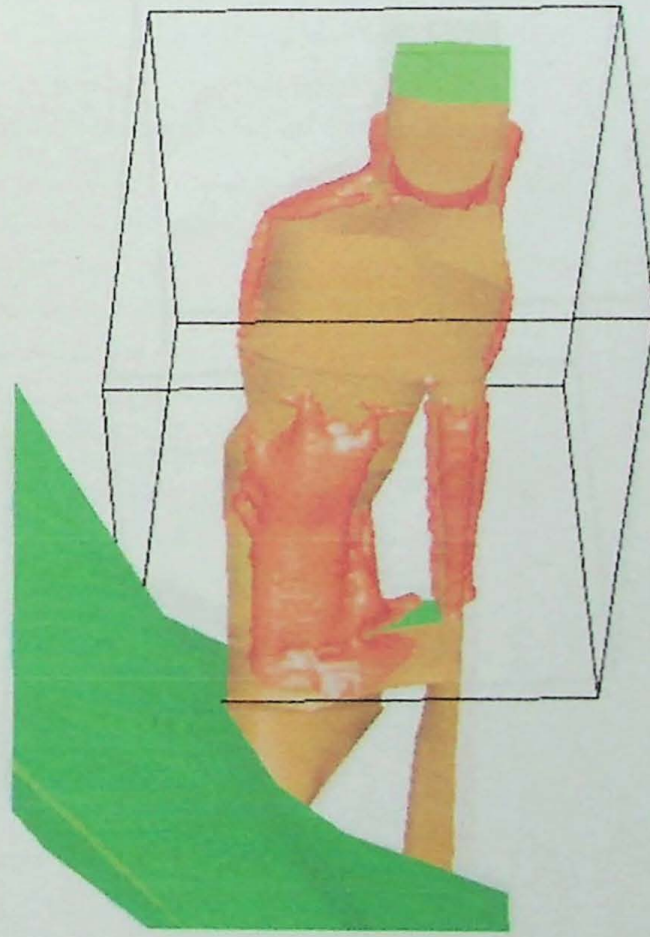


Nos modelos geomecânicos apresentados neste trabalho, Cada elemento de tensão é representado por um retângulo, orientado no espaço segundo a posição dos eixos principais de tensão. Sua cor representa o intervalo de valor na qual ele se encontra. Na figura acima, três exemplos de elementos de tensão.

Anexo 1.C.i: Análise numérica - obtenção do índice GSI por retroanálise

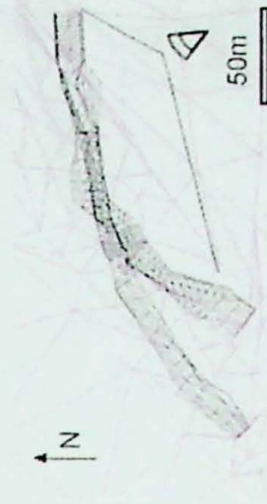
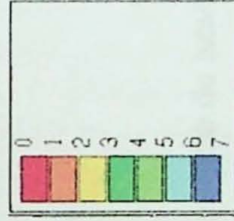


i) Trecho 2 - GSI=68 (vista da face SE)

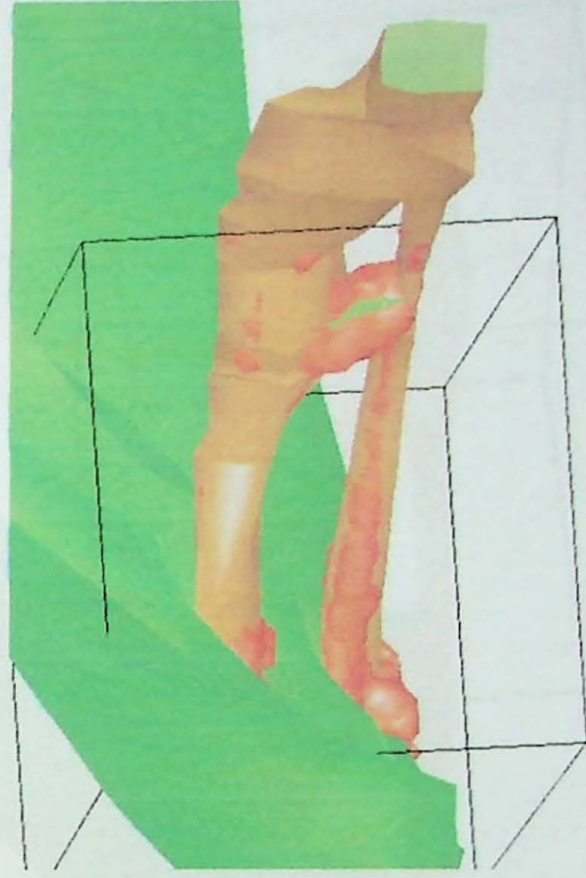


ii) Trecho 2 - GSI=68

Fator de segurança

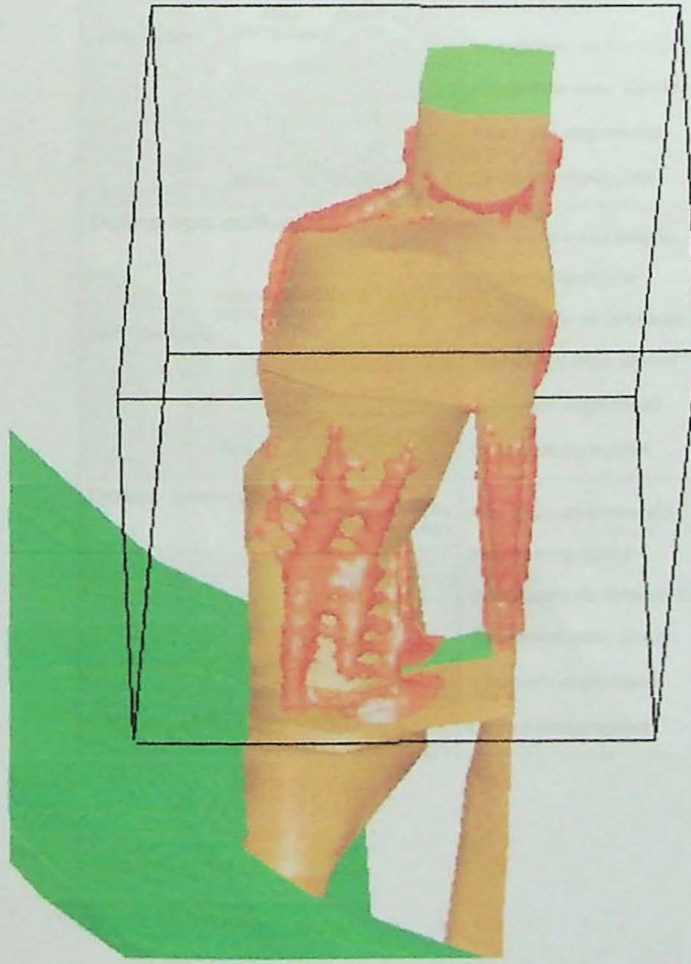


Superfície de isovalor, FS=1

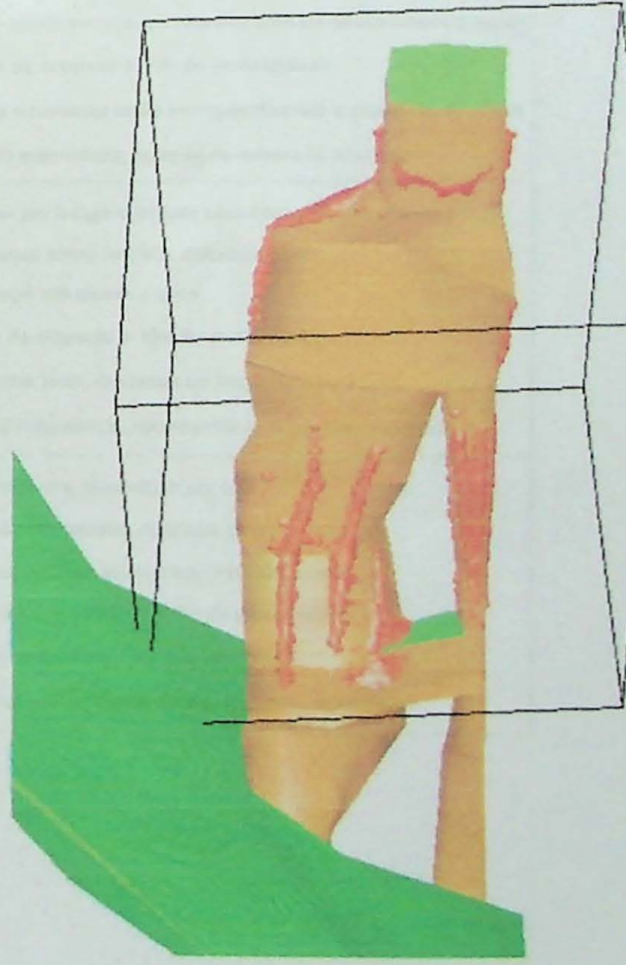


iii) Trecho 1 - GSI=68

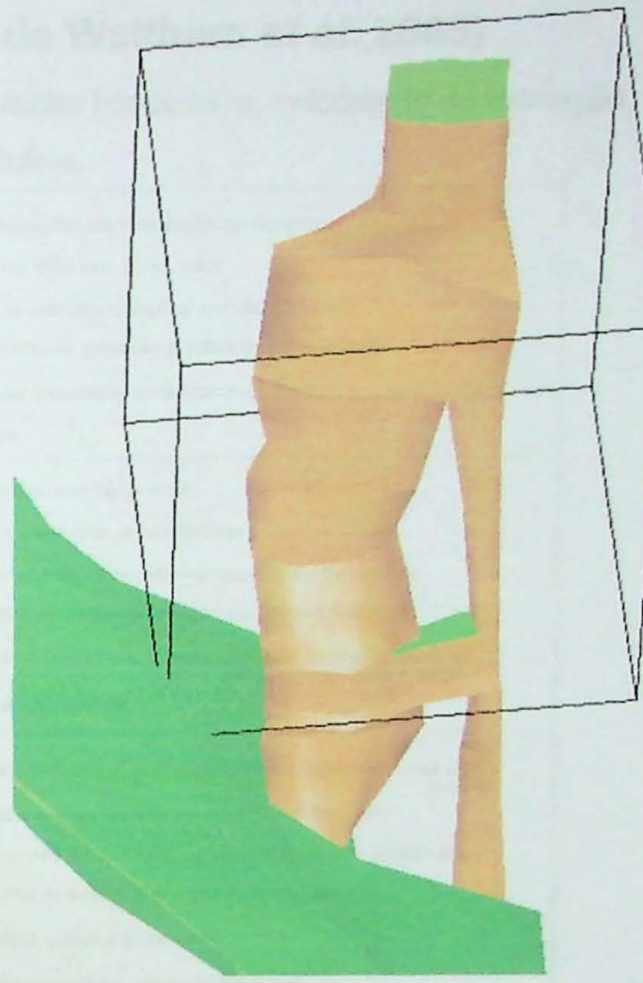
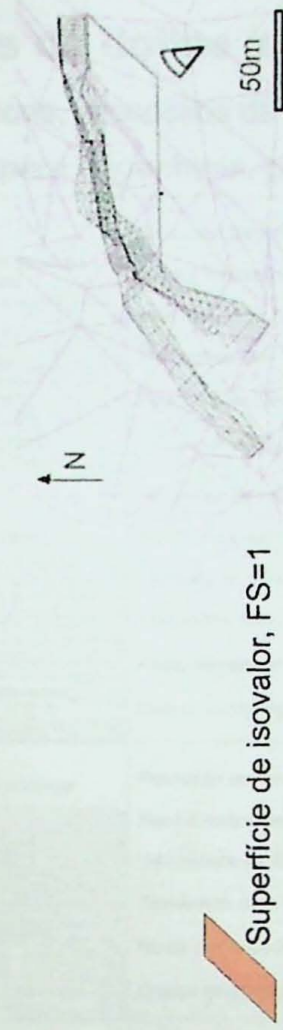
Anexo 1.C.ii: Análise numérica -
obtenção do índice GSI por retroanálise



iv) Trecho 2 - GSI=75



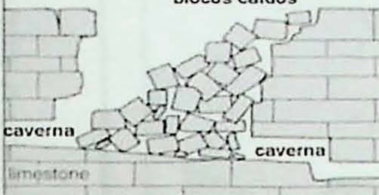
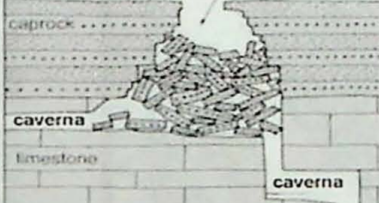
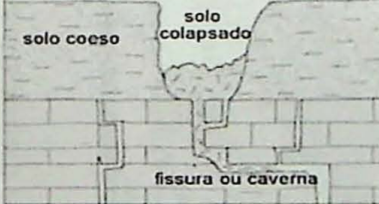
v) Trecho 2 - GSI=85



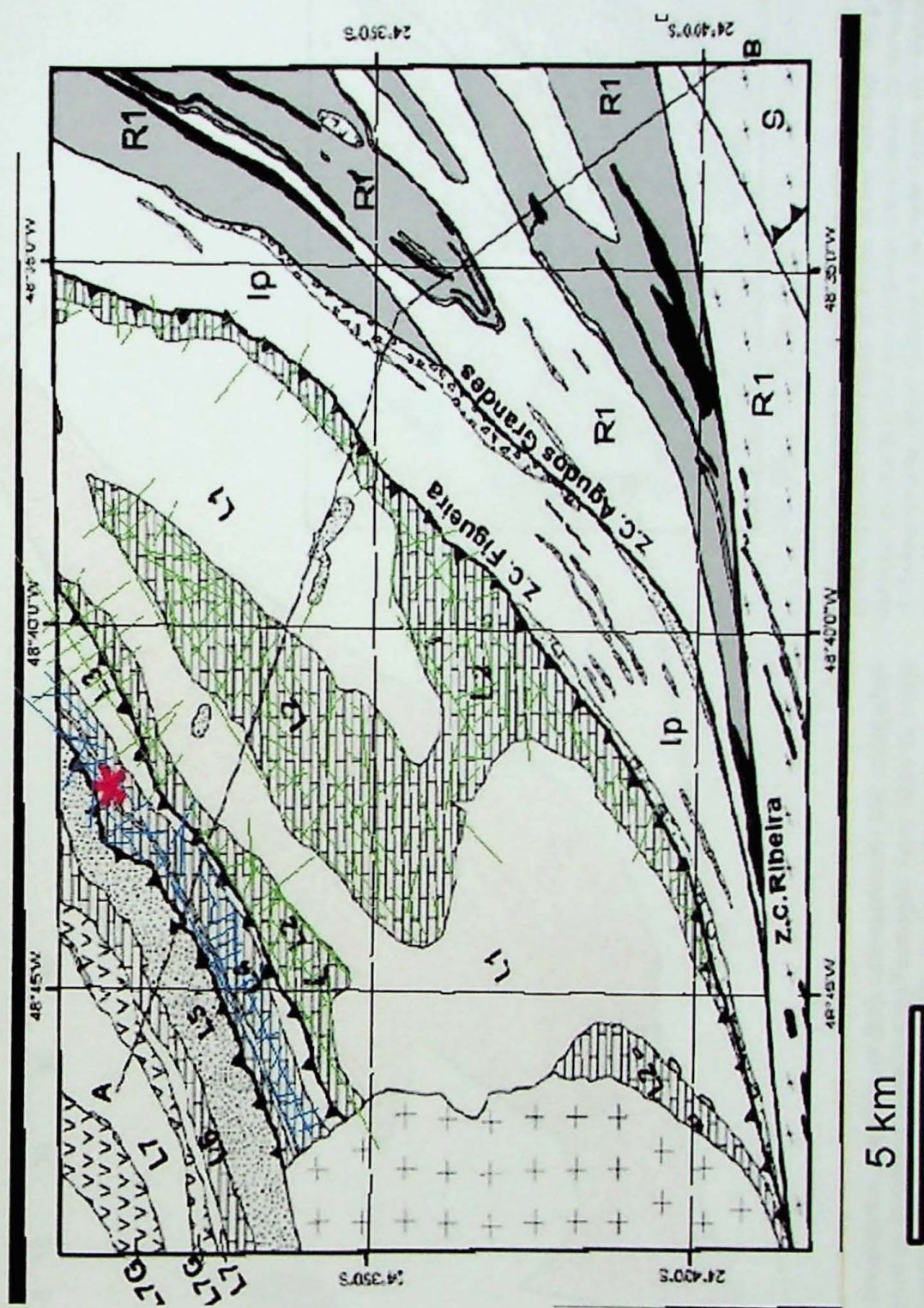
F) Trecho 2 - GSI=95

Anexo 2: Tipos de dolina (extraído de Waltham *et al.* 2005)

Perfis esquemáticos, processos de formação, rocha hospedeira, velocidade de formação, dimensões e riscos para engenharia por tipo de dolina.

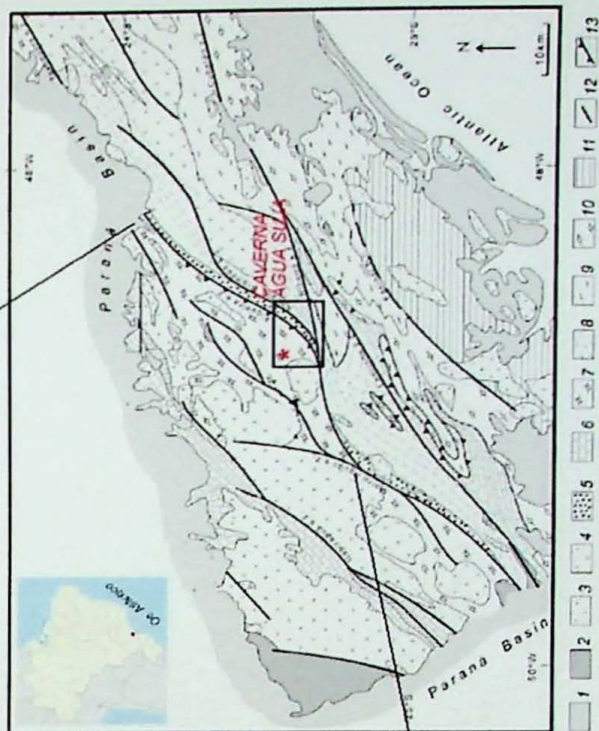
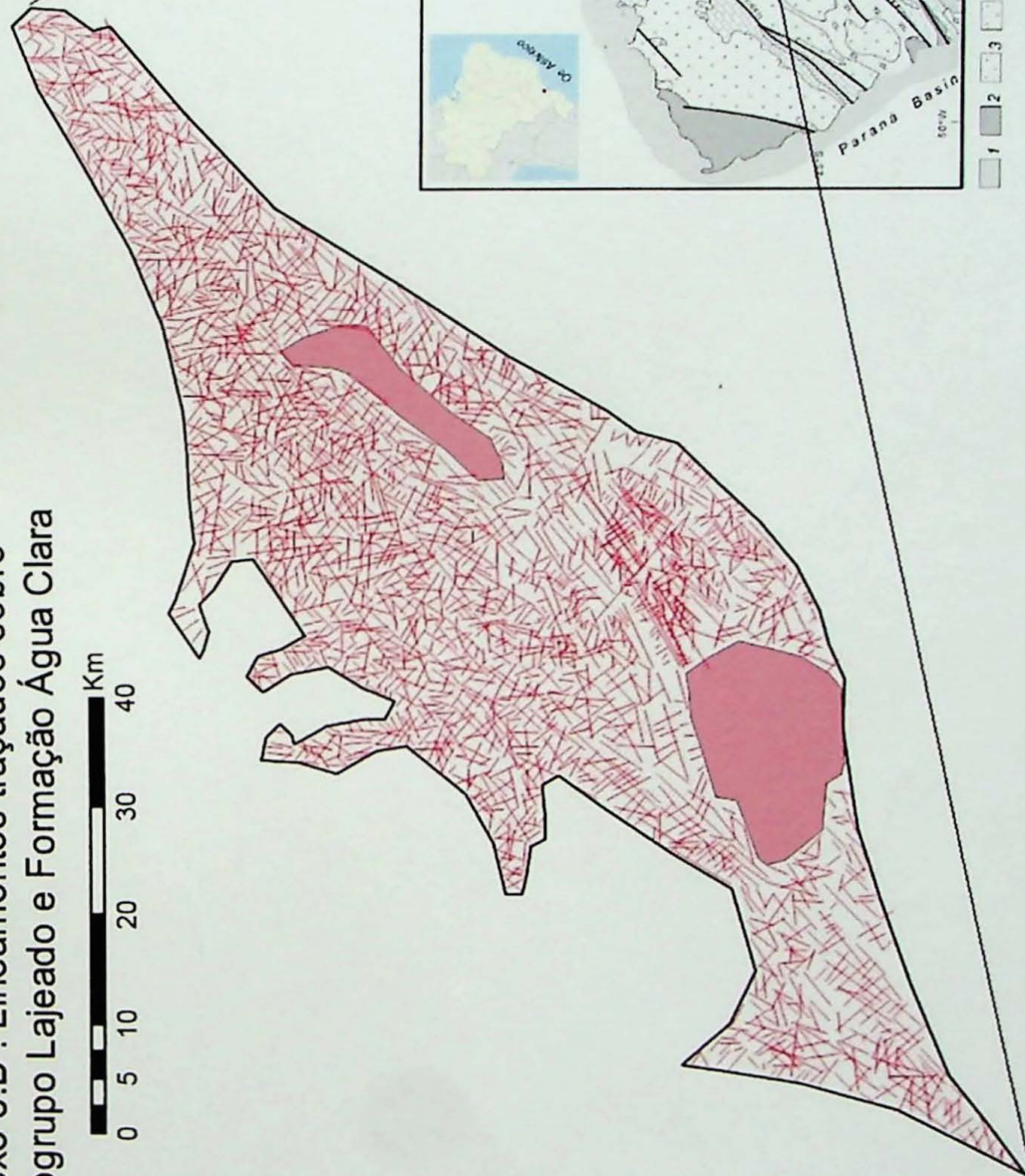
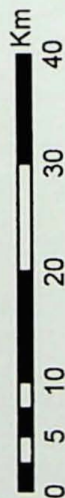
Dolina de dissolução 	<i>Processo de formação</i> <i>Rocha hospedeira</i> <i>Velocidade de formação</i> <i>Tamanhos max. típicos</i> <i>Risco em engenharia</i> <i>Outras designações</i>	Rebaixamento por dissolução da superfície Calcário, dolomito, gesso, sais Relevos estáveis formados em >20.000 anos Até 1000m de extensão e 100m de profundidade Fissuras e cavernas serão encontradas sob a superfície do relevo <i>Cockpit</i>
Dolina de colapso 	<i>Processo de formação</i> <i>Rocha hospedeira</i> <i>Velocidade de formação</i> <i>Tamanhos max. típicos</i> <i>Risco em engenharia</i> <i>Outras designações</i>	Ruptura do teto da caverna Calcário, dolomito, gesso, basalto Extremamente raros, em eventos rápidos de ruptura Até 300m de extensão e 100m de profundidade Superfície sujeita a <i>breakdown</i>, ruptura do teto da caverna quando aumentada a carga Colapso de caverna
Dolina tipo caprock colapso por stoping 	<i>Processo de formação</i> <i>Rocha hospedeira</i> <i>Velocidade de formação</i> <i>Tamanhos max. típicos</i> <i>Risco em engenharia</i> <i>Outras designações</i>	Ruptura de rocha insolúvel em caverna subjacente, em rocha solúvel Qualquer rocha cobrindo calcário, dolomito, gesso Eventos de ruptura raros, cuja evolução dura > 10.000 anos Até 300m de extensão e 100m de profundidade Superfície sujeita a <i>breakdown</i> Colapso subjacente, carste interestratil
Dolina tipo dropout 	<i>Processo de formação</i> <i>Rocha hospedeira</i> <i>Velocidade de formação</i> <i>Tamanhos max. típicos</i> <i>Risco em engenharia</i> <i>Outras designações</i>	Colapso de solo para dentro de fissuras em rocha Solo coeso sobre calcário, dolomito, gesso Colapso ocorre em minutos (fissuras formam-se em meses a anos) Até 50m de extensão e 10m de profundidade Fissuras e cavernas serão encontradas sob a superfície do relevo Dolina de subsidência, colapso de cobertura, aluvionar
Dolina tipo suffosion 	<i>Processo de formação</i> <i>Rocha hospedeira</i> <i>Velocidade de formação</i> <i>Tamanhos max. típicos</i> <i>Risco em engenharia</i> <i>Outras designações</i>	Remoção por lavagem do solo para dentro de fissuras em rocha Solo incoeso sobre calcário, dolomito, gesso Subsidência em meses a anos Até 50m de extensão e 10m de profundidade Subsidência lenta, destrutiva ao longo do tempo Dolina de subsidência, subsidência de cobertura, aluvionar
Dolina soterrada 	<i>Processo de formação</i> <i>Rocha hospedeira</i> <i>Velocidade de formação</i> <i>Tamanhos max. típicos</i> <i>Risco em engenharia</i> <i>Outras designações</i>	Dolina em rocha, preenchida por solo Depressão em calcário, dolomito, gesso Condições geológicas estáveis (>10.000 anos) Até 300 m de extensão e 100m de profundidade Subsidência local por recalque diferencial Dolina preenchida, dolina de compactação, paleodolina

Anexo 3.A : Lineamentos traçados sobre Fm. Mina de Furnas e sobre metacarbonatos do Subgrupo Lajeado



Em azul, lineamentos traçados na área referente à Formação Mina de Furnas. Em verde, lineamentos traçados na área referente aos demais metacarbonatos do Subgrupo Lajeado, ambos sobre o mapa geológico local de Campanha et al. (2008).

Anexo 3.B : Lineamentos traçados sobre Subgrupo Lajeado e Formação Água Clara



Localização da Caverna Água Suja no contexto geológico regional: (1) cobertura e rochas intrusivas fanerozóicas; (2) bacias tectônicas "strike-slip"; (3) granitos pós-tectônicos; (4) granitos sin a pós-tectônicos calci-alcalinos; (5) Formação Iporanga; (6) Metacarbonatos (Grupo Itaiacoca e Formação Capiru) (7) Metacarbonatos e metapelitos a metapsamitos (Subgrupo Lajeado e Formação Água Clara); (8) Metapelitos a metapsamitos e metabasitos (Subgrupo Ribeira); (9) Xistos e filitos (Complexos Embu, Setuva e Turvo-Cajati); (10) Complexo gnáissico-migmatítico; (11) Complexo Costeiro (Luis Alves); (12) Zonas de cisalhamento transcorrentes; (13) Zonas de cisalhamento inversas. A área selecionada corresponde ao mapa de detalhe (Figura 2). [Adaptado de Campanha *et al.* 2008].

Em vermelho, lineamentos traçados na área correspondente aos metapelitos e metacarbonatos do Subgrupo Lajeado e da Formação Água Clara do mapa geológico regional de Campanha *et al.* (2008). As áreas delimitadas em rosa correspondem a granitos intrusivos no Subgrupo Lajeado. À direita, mapa geológico regional de Campanha *et al.* (2008)

DOAÇÃO

TGC-USP

Data: *02/02/82*

