

Estimativa preliminar de estabilidade de dois setores da Gruta de Ubajara.

Chrissandro Marques de Almeida¹, Francisco Wesley da Silva de Nojosa², Cesar Ulisses Vieira Veríssimo³, Raphaelle Silva de Almeida⁴.

Resumo – De um total de onze cavernas cadastradas no Parque Nacional de Ubajara, a Gruta de Ubajara representa a maior e a única aberta à visitação turística. Nos últimos anos, com a implementação de melhorias na infraestrutura, e a reativação do teleférico mais que dobrou o número de turistas que visitam a caverna. As discontinuidades, representadas por fraturas, são amplamente estudadas desde meados do século XX e suas implicações em obras de engenharia e na estabilidade do terreno foram inicialmente investigadas de forma aprofundada em projetos de mineração. O objetivo deste trabalho é de avaliar o risco associado a estabilidade de blocos em dois setores. O primeiro no Salão da Imagem, observada pela presença de uma enorme fratura aberta com intensa entrada de água e sedimentos da parte superior do maciço. O segundo setor está no corredor final do salão do Minotauro Superior, fora do trajeto turístico e situa-se em um conduto mais antigo da gruta. Os resultados mostram uma diferença entre metodologias clássicas utilizadas para a engenharia e novos estudos voltados diretamente para avaliação de cavidades subterrâneas naturais. Os dados aplicados nas metodologias mais modernas indicam que o maciço dos salões são estáveis a exceção do salão da imagem no período de chuvas intensas.

Abstract – Out of a total of eleven registered caves in the Ubajara National Park, the Ubajara Cave is the largest and the only one open to tourist visits. In recent years, with the implementation of infrastructure improvements and the reactivation of the cable car, the number of tourists visiting the cave has more than doubled. Discontinuities, represented by fractures, have been widely studied since the mid-20th century, and their implications for engineering works and ground stability were initially investigated in depth in mining projects. The objective of this study is to assess the risk associated with block stability in two sectors. The first is in the Image Hall, where a large open fracture with intense water and sediment inflow from the upper part of the rock mass has been observed. The second sector is located in the final corridor of the Upper Minotaur Hall, outside the tourist route, and lies within an older passage of the cave. The results show a difference between classical methodologies used in engineering and new studies specifically aimed at evaluating natural underground cavities. Data applied in the more modern methodologies indicate that the rock mass in the halls is stable, except for the Image Hall during periods of heavy rainfall.

Palavras-Chave – Estabilidade Geotécnica; Maciço Rochosos; Espeleologia;

¹ Geol., Universidade Federal do Ceará Tel, (85) 999313760, chris.malmeida@alu.ufc.br

² Geól., Universidade Federal do Ceará Tel, (85) 99725-9142, wesleynojosa@gmail.com

³ Geól., PhD, Universidade Federal do Ceará Tel, (85) 98888-0071, verissimo@ufc.br

⁴ Geól., Msc, Universidade de Fortaleza Tel, (85) 98871-1987, raphaelle@unifor.br

1. INTRODUÇÃO

O Parque Nacional De Ubajara está localizado próximo a divisa do estado do Ceará com o Piauí, na borda leste da serra do Ibiapaba a qual marca o limite da bacia sedimentar paleozoica do Parnaíba. Foi criado em 1959 com uma área inicial de 4.000 hectares. Em 1973, sua área foi reduzida para 563 hectares, tornando-se o menor parque nacional do Brasil na época. Posteriormente, em 2002, sua área foi ampliada para 6.288 hectares (Figura 1) (Brasil, 2002).

O Parque Nacional de Ubajara, em sua atual extensão, inclui uma faixa estreita de 3 a 5 km situada entre as cidades de Ubajara e Tianguá que bordeja a escarpa e sopé da serra de Ibiapaba no sentido N-S (Figura 1). Esta porção do relevo serrano corresponde ao limite leste atual da bacia sedimentar do Parnaíba, onde afloram as rochas siluro-devonianas do Grupo Serra Grande representadas pelas Formações Ipu na base (arenitos arcoseanos grossos a conglomeráticos) e Formação Tianguá (arenitos finos com níveis pelíticos intercalados) no topo. A erosão e o recuo da serra da Ibiapaba iniciados, por processos pós-rifte e pela erosão ao longo do Cenozoico (Claudino-Sales e Peulvast, 2007; Peulvast et al. 2008; Claudino-Sales e Lira, 2011), acabaram por expor os metacalcários pré-cambrianos da Formação Frecheirinha (Grupo Ubajara). A ação contínua da chuva durante o quaternário infiltrando e dissolvendo os metacalcários, configurou o relevo localmente observado a frente da serra, representado por um conjunto de morros e torres cársticas. No interior de um destes morros localiza-se a Gruta de Ubajara, principal atrativo turístico do Parque Nacional de Ubajara (veríssimo et al. 2005).

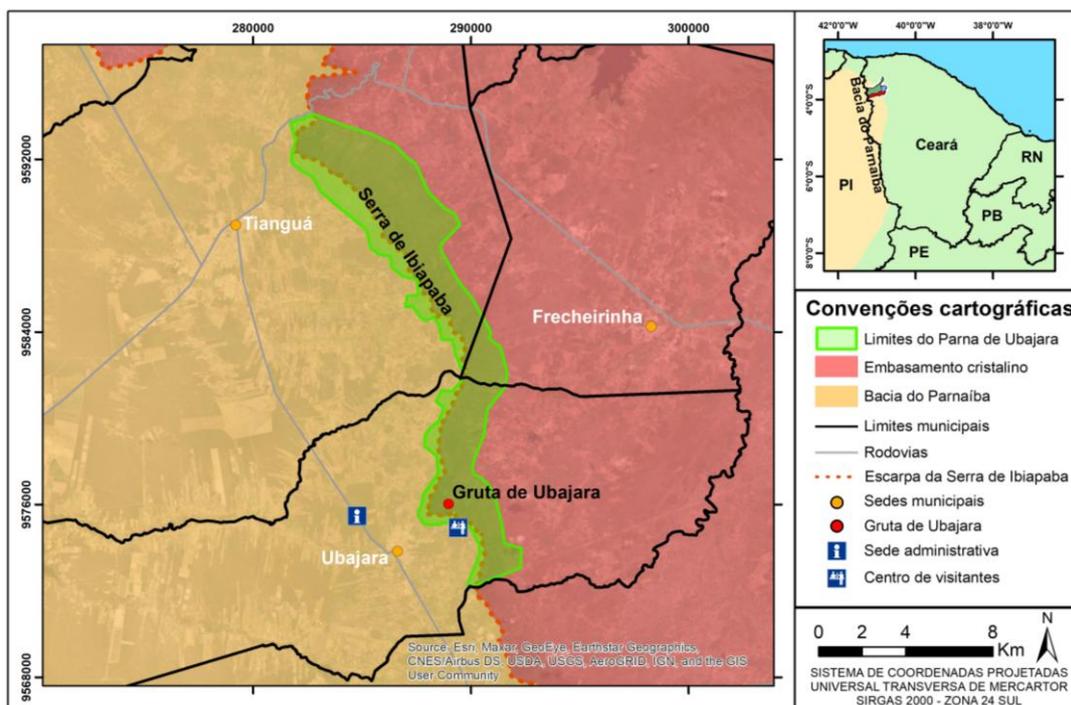


Figura 1. Localização da área de estudo.

A Gruta de Ubajara possui 1120 m de extensão linear, dos quais 420 m possuem iluminação e infraestrutura para visitação turística. Estudos sobre microclima e capacidade de carga turística realizados no ano de 2005, já registravam a elevada taxa de visitantes/ano da Gruta de Ubajara. Naquele período cerca de vinte e oito mil turistas, visitavam a caverna por ano, colocando a Gruta de Ubajara entre as mais visitadas do Brasil (Veríssimo et al. 2005). Conforme os dados disponíveis pelo ICMBio o número de turistas no Parque Nacional de Ubajara estimado em 70 mil no ano de 2021, aumentou para 185.888 em 2022. A reativação do teleférico e a implementação de melhorias na infraestrutura, como a construção de novas trilhas e mirantes, contribuíram para este recorde histórico de visitação turística na unidade de conservação.

Na Gruta de Ubajara é possível diferenciar dois setores, os quais retratam estágios distintos de evolução da caverna: o setor nordeste, limitado à leste pelo paredão externo onde situam-se a entrada principal e a sala do Sino e, à oeste, pela sala do Mocosal; e o setor sudoeste, representado pela galeria do riacho Mucuripe (Figura 2). O setor nordeste inclui todos os atuais corredores e áreas liberadas a visitação turística. Neste encontram-se as principais belezas

cênicas e os maiores salões e galerias da caverna. Estas áreas de fácil acesso possuem alturas que variam entre 10 e 20 m e pouco guardam dos registros da fase inicial de formação da caverna (fase freática) (Veríssimo et al. 2005). Neste artigo são apresentados os resultados do levantamento das principais descontinuidades presentes em dos setores da Gruta de Ubajara. O salão da Imagem, situado próximo da entrada principal e o salão da galeria Minotauro Superior situado acima do salão do Presépio (Figura 2). Os locais foram selecionados em função da existência de grande número de fragmentos de rocha pelítica de composição argilosa (metasiltito) no piso da caverna e de famílias de fraturas contendo materiais de preenchimento no teto; além de zonas de infiltração de água durante o período chuvoso. As descontinuidades, aqui representadas por famílias de fraturas são amplamente estudadas desde meados do século XX e suas implicações em obras de engenharia e na estabilidade do terreno foram inicialmente investigadas de forma aprofundada em obras de minas, durante os processos de lavra subterrânea, onde diversos autores criaram metodologias para avaliar descontinuidades e maciços rochosos. O objetivo deste trabalho é de avaliar o risco associado a estabilidade de blocos em dois setores. O primeiro no Salão da Imagem, onde é observada a presença de uma enorme fratura aberta com intensa entrada de água e sedimentos vindos da parte superior do maciço. Este setor faz parte do trajeto turístico. O segundo setor está no corredor final do salão do Minotauro Superior, que está fora do trajeto turístico e situa-se em um conduto mais antigo da gruta. Este último possui um intenso fraturamento e indicações de colapso com acúmulo de blocos decimétricos no chão utilizando os mais completos e recentes trabalhos sobre este conceito como as classificações de Jordá-Bordehore (2016) e (2017), assim como os trabalhos mais antigos como de Barton et al. (1974), para cavidades naturais, que ainda demonstra ser bastante robustos e base para os estudos atuais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos dos salões da Imagem e Minotauro Superior da Gruta de Ubajara, analisaram os principais pontos de instabilidade, sendo feita uma avaliação meticulosa do maciço rochoso. Para a coleta de das estruturas foi realizado inicialmente um mapeamento espeleológico para definir a morfologia dos salões e condutos da caverna, seguido de um mapeamento geológico-geotécnico para identificação de litotipos, características estruturais, descontinuidades, grau de fraturamento, caracterização do maciço rochoso e descrição das descontinuidades. As descontinuidades são descritas de acordo com o estabelecido pela ISRM (1978, 1981) onde são analisados espaçamento, orientação, persistência, abertura, preenchimento, resistência das paredes, rugosidade e percolação de água.

Com base nos dados obtidos em campo foi aplicado o sistema de classificação Q de Barton permitindo realizar uma distinção da qualidade dos maciços rochosos de cada salão e realizar comparativos entre gráficos de estabilidades voltados para a mineração e engenharia, com o modelo proposto por Jordá-Bordehore (2017).

3. RESULTADOS

Mapeamento espeleométrico foi realizado da entrada principal da caverna até os salões das Cortinas, Rosas e escadaria do Mocosal. Na zona intangível foi mapeado o salão do Minotauro Superior, devido a ser considerado também uma zona de relevância para estudos geotécnicos. A coleta de medidas estruturais em conjunto com a análise morfológica da gruta se mostrou importante para demonstrar os condicionantes de estabilidade formadores dos espaços vazios no interior da gruta. A disposição de corredores, salas e condutos, o colapso de teto e blocos se apresentam nitidamente associados a fraturas e ao acamamento principal. Observamos que, mesmo atualmente, as fraturas abertas estão preenchidas com sedimento terrígeno ou estão abertas ou semiabertas com aporte de sedimento e de água meteórica. Foi observado que existem duas famílias de fraturas principais, com direções NW-SE e NE-SW, associadas ao acamamento (S0) com direção E-W, sendo responsáveis por movimento de colapso de blocos e abertura de salões e condutos, marcando o controle estrutural e desenvolvimento da Gruta de Ubajara. Na figura 2 está o mapa topográfico-estrutural, mostrando as estruturas, morfologia e conjuntos de fraturas que percorrem a gruta de Ubajara.

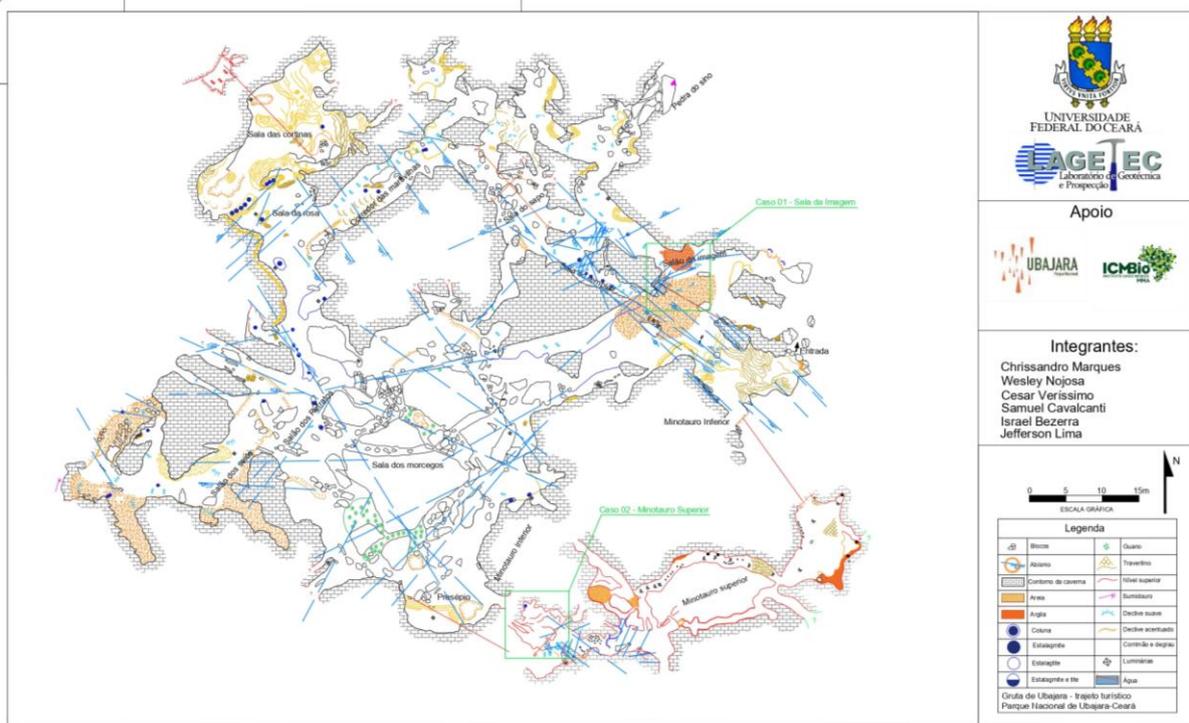


Figura 2 – Mapa topográfico-estrutural do setor turístico da Gruta de Ubajara

3.1 – Caracterização estrutural e geotécnica

Como pode ser visto na figura 3A, o salão da imagem o calcário apresenta uma descontinuidade principal com direção NW-SE, associada a uma descontinuidade secundária com direção NE-SW que se intersectam, levando a formação de abertura que permite a grande infiltração de água e entrada de solo/sedimento proveniente das porções superiores da caverna. Esse conjunto de descontinuidades sofreu um elevado processo de dissolução devido a infiltração de água meteórica, com aberturas significativas. É perceptível a entrada de sedimentos terrígenos através desta fratura, sendo necessária a remoção periódica do sedimento acumulado.

Para o salão da imagem além das famílias de descontinuidades com orientação NW-SE e NE-SW, existe uma descontinuidade formada por acamamento (S0) dos calcários, apresentando baixo mergulho. Essas três famílias de descontinuidades foram chamadas respectivamente F1, F2 e F3 como pode ser visto na figura 3B.

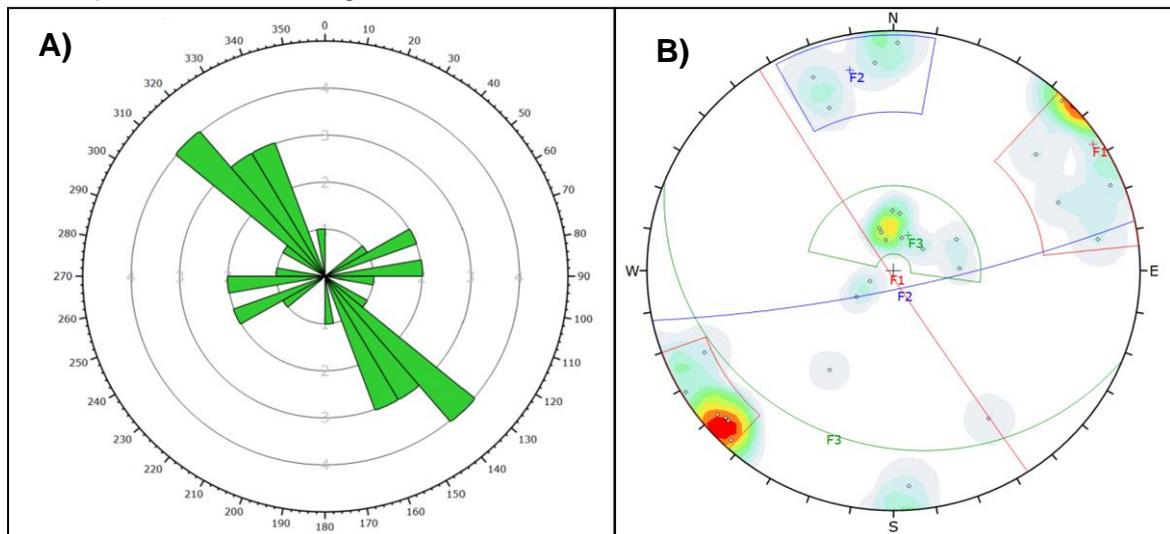


Figura 3A – Diagrama de rosetas do Salão da Imagem. Figura 3B - Concentração de polos de atitudes e planos médios das famílias de descontinuidade F1, F2 e F3

As características das descontinuidades do Salão da Imagens são apresentadas na tabela 1, em resumo as três descontinuidades são significativamente abertas, as famílias F1 e F2 são preenchidas por material terrígeno intercalados com blocos de metassilito, apresentando zonas de infiltração no teto do salão no período de chuvas na região e apresentam elevada persistência como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Característica das descontinuidades do salão da imagem

Parâmetros	F1 (227/88)	F2 (169/81)	F3 (202/18)
Resistência	R5		
Abertura	Muito aberta Extremamente larga 10 - 1000mm	Muito aberta Extremamente larga 10 - 1000mm	Aberta 0,5 - 2,5mm
Rugosidade	Rugosidade plana		
Preenchimento	Material terrígeno não coesivo	Material terrígeno não coesivo	Sem Preenchimento
Persistência	Muito grande (>20m)		
Alteração da parede	Levemente alterada		
Espaçamento (mm)	Grande (600- 2000 mm)		

A figura 4A mostra que o Salão do Minotauro Superior tem conjuntos de fraturas com dois trends de orientação principal, que são respectivamente: NE-SW e NW-SE, associadas a foliação/acamamento para os blocos de metassilito. As famílias de descontinuidades foram respectivamente nomeadas como F1, F2 e F3 como pode ser visualizado a na figura 4B.

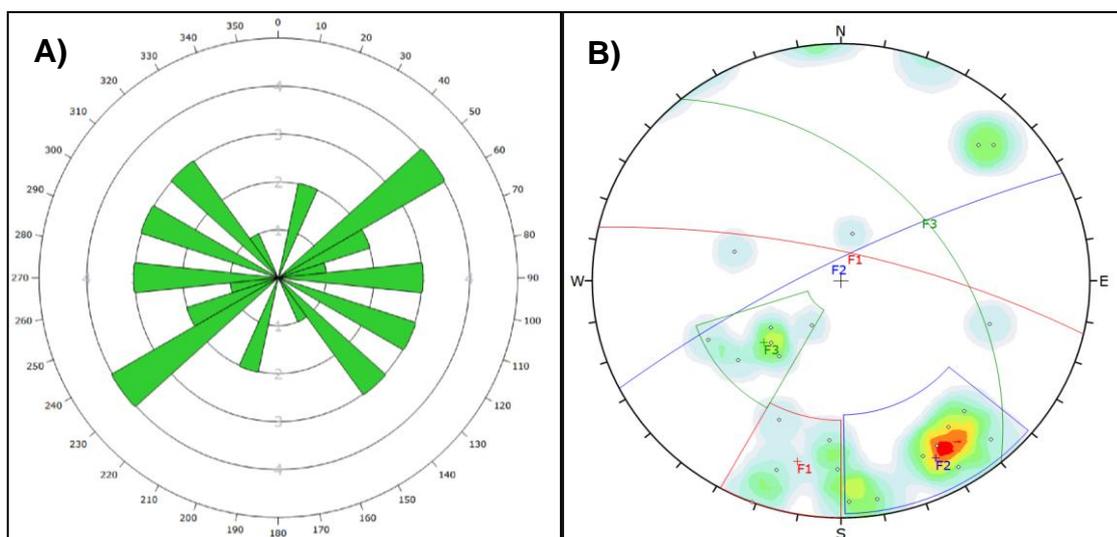


Figura 4A – Diagrama de rosetas do Salão do Minotauro Superior. Figura 4B - Concentração de polos de atitudes e planos médios das famílias de descontinuidade F1, F2 e F3.

Para o Minotauro Superior, observa-se que as famílias F1 e F3, apresentam aberturas significativas enquanto a família F2 está parcialmente fechada. Este salão tem presença mínima de água, corroborado pelo baixo grau de alteração no maciço rochoso, preenchidas por material terrígeno e calcita recristalizada, com a persistência variando de média para as famílias F1 e F3, e grande para família F2. Os dados completos das características das descontinuidades podem ser vistos logo abaixo na tabela 2.

Tabela 2 - Características das famílias de descontinuidades do Salão do Minotauro Superior

Parâmetros	F1 (012/76)	F2 (333/80)	F3 (050/44)
Resistência	R5		

Abertura	Aberta Larga 10mm	Muito aberta Muito larga 10 - 100mm	Fechado Parcialmente fechado 0,25 – 0,5mm
Rugosidade	Lisa ondulada		
Preenchimento	Calcita	Calcita	Material terrígeno
Persistência	Média 3 – 10mm	Média 3 – 10mm	Grande 10 – 20mm
Alteração da parede	Pouco alterada		
Espaçamento (mm)	Pequeno 60 – 200mm	Pequeno 60 – 200mm	Moderado 200 - 600mm

3.2 – Caracterização dos maciços rochosos dos salões

O sistema Q foi escolhido para avaliar as condições do maciço rochoso dos salões. Este índice é calculado a partir da equação 1 a partir de um conjunto de classificações propostas por Barton (1974).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

Para o salão da Imagem foi considerado dois cenários: um para o período de chuvas e outro para o período da estiagem. O regime de chuvas no Parque Nacional de Ubajara é bem-marcado, sendo o primeiro semestre o período de chuvas intensas em relação ao segundo período do ano em que as chuvas são incipientes na região. Durante as observações de campo notou-se como a entrada de sedimentos carregados para interior da caverna devido a infiltração de água através das descontinuidades no primeiro semestre do ano, enquanto na segunda parte cessa a percolação de água bem como o transporte de sedimentos para o interior da caverna. A presença de água em um maciço rochoso tem um peso elevado na metodologia de Barton. A caracterização geomecânica através do sistema de Q de Barton, avalia todos os condicionantes geológicos, estruturais e geotécnicos dos maciços rochosos.

Para todos os salões foi considerado o índice SRF=1, este índice foi atribuído por Jordá-Bordehore (2017) na caracterização dos maciços rochosos de 137 cavidades naturais, com características semelhantes a Gruta de Ubajara. Os parâmetros obtidos para o cálculo do índice Q estão apresentados na tabela 3A. Para o salão da imagem em relação ao primeiro cenário obtivemos um índice Q=3, classificado como classe VI - muito ruim. Apesar de ter sido o único salão com RQD = 100, a significativa abertura das descontinuidades, a elevada persistência e o material de preenchimento não coesivo, associado a um contexto de elevado fluxo de água, contribuíram efetivamente para que o salão tenha recebido uma classificação tão baixa. Essa divergência foi apontada por Barton (1974) e Bieniawski (1989), e corrobora para que o índice RQD não seja considerado mais um sistema classificação independente.

O segundo cenário foi considerado devido a gruta passar por um grande período de estiagem durante o ano, e, considerar o comportamento do maciço em diferentes cenários em uma caverna turística, é importante para traçar eventuais alterações no plano de manejo. Neste cenário em obtivemos um índice Q = 8, classificado como classe V - regular, esse resultado indica que o maciço rochoso do salão tem uma variação considerável na sua classificação geomecânica, implicando que a maior entrada de água contribui para um estado crítico no início do ano. Isso pode ser visto na tabela 3B quando observamos o parâmetro Jw com valor mais elevado em relação ao primeiro cenário.

Tabela 3A - Parâmetros do sistema Q para o salão da imagem no período de chuvas. Tabela 3B - Parâmetros do sistema Q para o salão da imagem no período seco.

A) Salão da imagem		Valores dos Parâmetros	B) Salão da imagem		Valores dos Parâmetros
RQD	Excelente	100	RQD	Excelente	100
Condições de compartimentação do maciço (Jn)	Três famílias de descontinuidades	9	Condições de compartimentação do maciço (Jn)	Três famílias de descontinuidades	9
Condições das descontinuidades (Jr)	Superfície rugosa plana	1,5	Condições das descontinuidades (Jr)	Superfície rugosa plana	1,5
Condição de alteração das paredes (Ja)	Paredes levemente alteradas, preenchimento com materiais abrasivos	2	Condição de alteração das paredes (Ja)	Paredes levemente alteradas, preenchimento com materiais abrasivos	2
Índice Jw do Sistema Q (presença de água)	Influência elevada de água com carreamento significativo do preenchimento	0,33	Índice Jw do Sistema Q (presença de água)	Pequena influência de água (<5 L/min)	1
Índice SRF do Sistema Q (estado de tensões do maciço)	Tensões baixas, próximo da superfície	1	Índice SRF do Sistema Q (estado de tensões do maciço)	Tensões baixas próximo da superfície	1

O Minotauro Superior recebeu a melhor classificação entre todos os salões, com seu índice Q = 48, sendo classificado como classe IV - bom, constatado pelos parâmetros vistos na tabela 4 que as características das descontinuidades como, espaçamento pequeno ou moderado, preenchimento com material terrígeno ou calcita recristalizada, poucas alterações nas paredes e persistência média para as famílias F1 e F3, contribuíram para que o salão tenha um bom índice Q. Este salão tem como principal característica que seu teto não é formado pelos calcários da Formação Frecheirinha, mas pelas lentes de metassilitos. Nota-se que o salão sofre abatimento de blocos, apesar de um considerável índice Q. Uma possibilidade é que devido o menor grau espaçamento entre as famílias de descontinuidades, contribuindo para um maior fraturamento do maciço e conseqüentemente, maiores possibilidade de queda de blocos. Outra possibilidade é o vão de o salão não ter mais que 10m, contribuindo para uma maior possibilidade da queda de blocos. Jordá-Bordehore (2017) mostra esse processo, mas em cavidades vulcânicas.

Tabela 4 - Parâmetros do sistema Q para o salão do Minotauro Superior

Salão do Minotauro Superior		Valores dos Parâmetros
RQD	Excelente	81
Condições de compartimentação do maciço (Jn)	Três famílias de descontinuidades	9
Condições das descontinuidades (Jr)	Superfície rugosa descontínua	4
Condição de alteração das paredes (Ja)	Paredes duras compactas, preenchimento com materiais impermeáveis	0,75
Índice Jw do Sistema Q (presença de água)	Pequena influência de água (<5 L/min)	1
Índice SRF do Sistema Q (estado de tensões do maciço)	Tensões baixas próximo da superfície	1

4. ESTABILIDADE DE CAVIDADES NATURAIS

Estudar e compreender os riscos associados as cavidades naturais subterrâneas são essenciais para reconhecer o impacto que pode ser ocasionado por condicionantes geológicos-geotécnicos importantes para o desenvolvimento turístico ou em projetos de engenharia civil. Barton (1974) quando formulou seu sistema de classificação Q também apresentou seu gráfico de estabilidade exibido na figura 5, que leva em consideração os valores obtidos no sistema em relação ao parâmetro De (diâmetro da equivalente), calculado através da equação 2:

$$De = \text{Vão, diâmetro ou altura da escavação (m)/ESR.} \quad (2)$$

Para cálculo do vão utilizou-se a abordagem empregada há vários anos para o suporte de túneis em que é definida pela medida entre as paredes laterais. Para a Gruta de Ubajara foi realizada a medida entre as duas paredes que definem os seus limites ao longo de cada salão. O parâmetro ESR é relativo ao ambiente subterrâneo analisado relacionado ao objetivo de escavação projetado e grau de segurança requerido. Para o cálculo do De seguimos as definições de Oliveira (2020), que considerou índice ESR=1 para cavidades naturais ferruginosas, desta forma excluindo esse parâmetro da análise, passando a considerar apenas o tamanho do vão, partindo do princípio que é incorreto traçar um comparativo entre uma cavidade natural subterrânea, formada na escala de tempo geológico, com uma escavação antrópica, com uma ação do tempo consideravelmente menor. As medidas entre as paredes dos vãos dos Salões da Imagem e do Minotauro Superior estão representadas nas figuras 5A e 5B respectivamente.

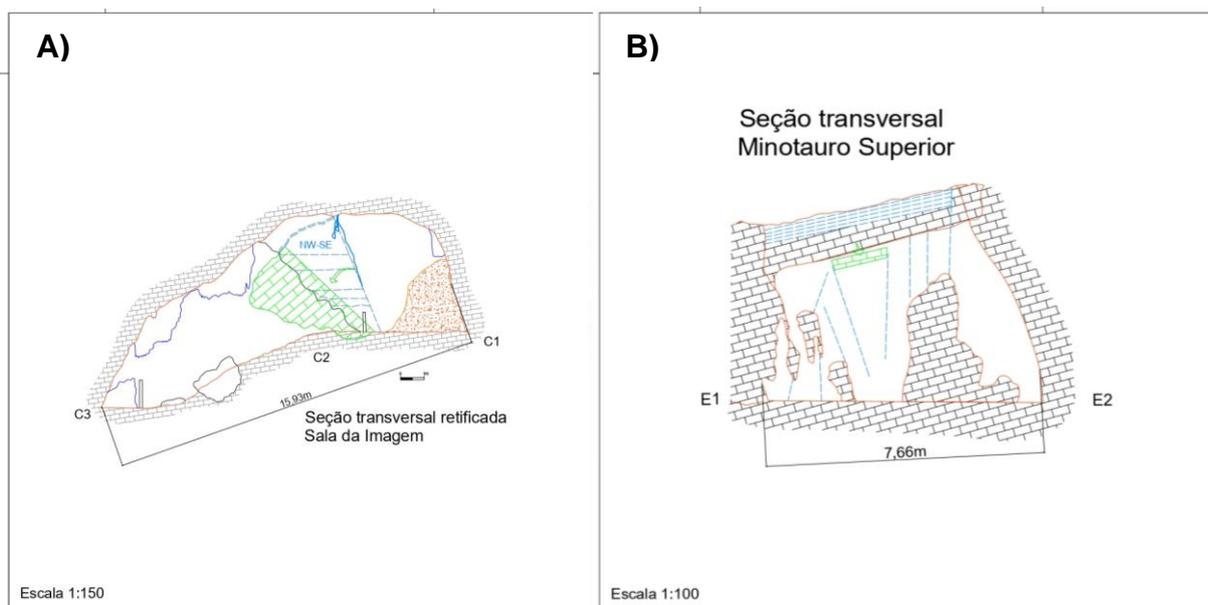


Figura 5A - Seção transversal do Salão da Imagem. Figura 5B - Seção transversal do Salão do Minotauro Superior

Observa-se na figura 6 que pelo método de Barton que o salão da imagem para os seus dois cenários encontra-se no campo da instabilidade, e, apenas o salão do minotauro superior foi considerado estável, próximo ao limite de transição. Por serem aplicações diretas oriundas de escavações não naturais, os resultados são muito conservadores em relação as observações de campo para cavidades naturais, o que dificulta sua atribuição direta. Jordá-Bordehore (2016) indica que cavernas de grandes dimensões não são instáveis, mas autoportantes, tornando o antigos ábacos e gráficos de estabilidade voltados para obras de construções de túneis e minas obsoletos.

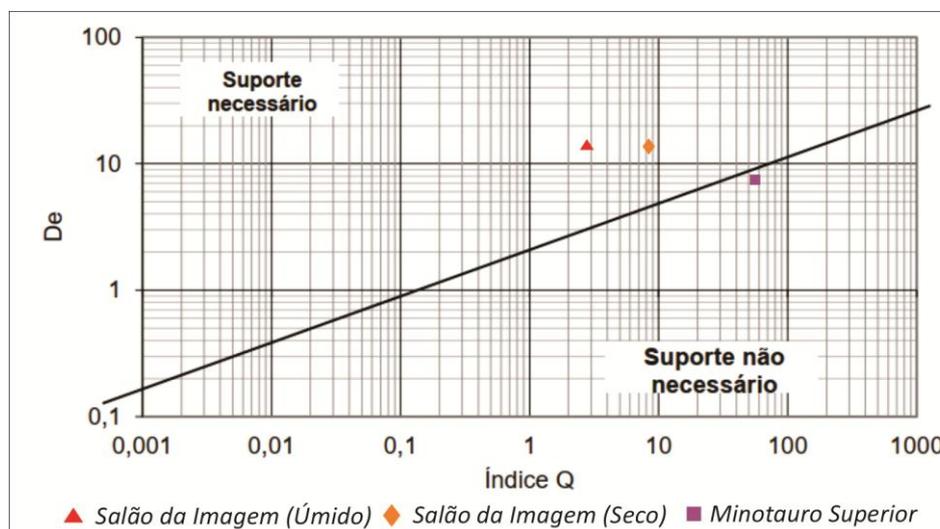


Figura 6 - Relação Índice Q x Diâmetro equivalente dos salões da Gruta de Ubajara

Para uma melhor classificação utilizou-se o ábaco de estabilidade de Jordá-Bordehore (2017), criado a partir do estudo de 137 cavernas, sendo 53 em terrenos cársticos e 74 formadas em ambientes vulcânicos. Diferentemente do gráfico de Barton, este apresenta uma zona de transição que compreende cavidades naturais com pequenas instabilidades, podendo ocorrer colapso de blocos localmente, mas que em um contexto geral são estáveis. Os resultados para os salões de Ubajara encontram-se na figura 7. Os dados plotados neste gráfico indicaram boas estabilidades para os salões da Imagem no período seco e salão do Minotauro Superior, enquanto o salão da Imagem no período de chuvas encontra-se na zona de transição. Este resultado corrobora com as observações onde salões se apresentam estáveis, sem ou com colapso apenas em zonas localizadas no salão da Imagem ou Minotauro Superior.

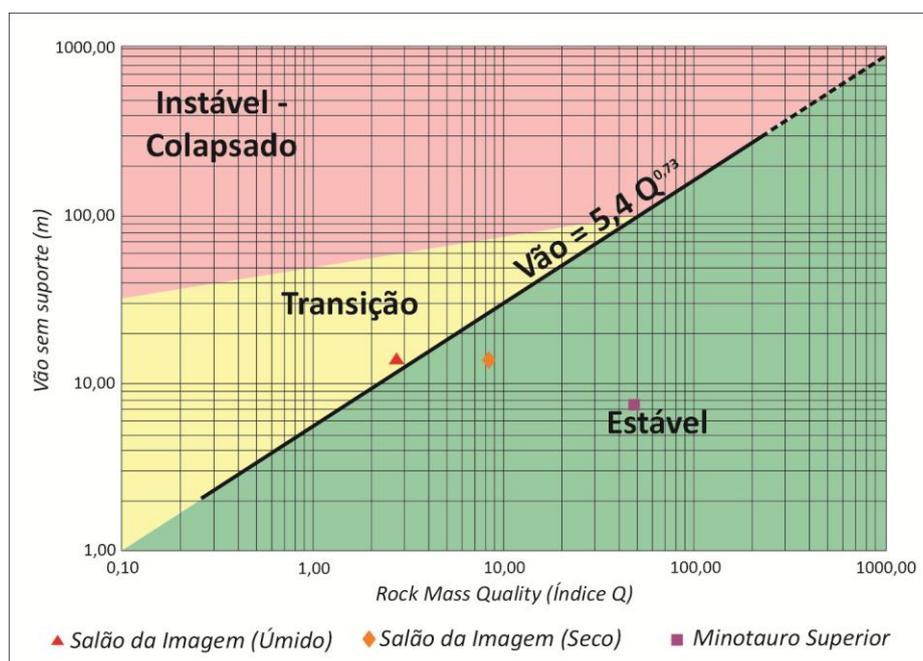


Figura 7 - Gráfico de estabilidade para cavidades naturais

5. CONCLUSÕES

Os sistemas de classificações geomecânicas amplamente utilizados no setor minerário e na engenharia estão sendo utilizados nos últimos anos para estudar cavidades subterrâneas naturais. Os resultados obtidos através do sistema Q quando plotados em gráficos de estabilidade antigos, voltados para mineração e engenharia demonstraram resultados não satisfatórios demonstrando resultados conservadores indicando maciços rochosos de má qualidade não correspondendo com observações realizadas em campo.

O modelo proposto por Jordá-Bordehore (2017) se apresentou mais adequado para os dois exemplos de salões estudados na Gruta de Ubajara indicando que os salões apresentam boa estabilidade exceto o salão da imagem considerando seu cenário de maior criticidade no qual apresentou um maior risco estando próxima a zona de interseção do campo de transição com a estabilidade. A entrada de sedimento terrígeno, não se mostrou como um fator decisivo para reduzir as condições de qualidade do maciço rochoso. Realizando observações de campo no salão da imagem no período chuvoso conclui-se que o salão tem uma boa estabilidade global, sendo apenas no local de entrada de sedimentos que o salão apresenta um cenário de maior instabilidade, corroborando com os estudos de Jordá-Bordehore (2017) sobre grandes salões em cavidades naturais carbonáticas são maciços autoportantes que apresentam instabilidade apenas em pontos localizados.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos as todas as pessoas que nos ajudaram e incentivaram este trabalho. Agradecemos ao Chefe e aos técnicos do ICMBio e PARNA Ubajara pelo apoio logístico e infraestrutura local disponibilizada, a COOPTUR e ao DEGEO pelo fornecimento do veículo para atividades de campo. As turmas de espeleologia 2019.2 e 2022.1. Ao Jeferson, Samuel, Israel e Rafaele que foram fundamentais e nos auxiliaram com toda a atenção.

7. REFERÊNCIAS

BARTON N, LIEN R AND LUNDE J, (1974) Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics* 1974; 6(4): 189 –236.

BIENIAWSKI, Z.T., (1989) *Engineering rock mass classifications*. New York Wiley.

BRASIL. (2002) Decreto s/nº, de 13 de dezembro de 2002. Altera os limites do Parque Nacional de Ubajara. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, dez.*

CLAUDINO-SALES, V. e LIRA, M. C. (2011) Megageomorfologia do Noroeste do estado do Ceará, Brasil. *Revista Caminhos de Geografia – UFU (Uberlândia-MG)*, v. 12, n 38, p. 200-209.

CLAUDINO-SALES, V. e PEULVAST, J-P. (2007) Evolução Morfoestrutural do Relevo da Margem Continental do Estado Do Ceará, Nordeste do Brasil. *Revista Caminhos de Geografia – UFU (Uberlândia-MG)*, v. 7, n. 20, p. 1-21.

ISRM, (1978) International Society for Rock Mechanics. Basic Geotechnical Description Of Rock Masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v. 15, n. 1, p. 89-98.

ISRM, (1981) International Society for Rock Mechanics. Suggested Methods For Determining Hardness and Abrasiveness Of Rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v. 18, n. 1, p. 87-110.

JORDÁ-BORDEHORE, L. et al. (2016) Stability assessment of shallow limestone caves through an empirical approach: application of the stability graph method to the Castañar Cave study site (Spain). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 75, n. 4, p. 1469-1483, Jan.

JORDÁ-BORDEHORE, L. (2017) Stability assessment of natural caves using empirical approaches and rock mass classifications. *Rock Mechanics and Rock Engineering*.

NOCE, T. S. Proposta de Zoneamento Geotécnico de Cavidades Naturais em Litologias Ferruginosas. *Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Minas, UFOP, Ouro Preto, 2016.*

OLIVEIRA, Paula Cristine Leal. *Avaliação da aplicação de sistemas de classificação geomecânica para cavidades ferruginosas. 2020.*

PEULVAST, J. P.; CLAUDINO SALES, V.; BÉTARD, F. e GUNNEL, Y. (2008) Low post-Cenomanian denudation depths across the Brazilian Northeast: Implications for long-term landscape evolution at a transform continental margin. *Global and Planetary Change*, n. 62, p. 39-60.

VERÍSSIMO, C.U.V et al. (2005) Espeleoturismo e Microclima da Gruta de Ubajara, Ce. *Estudos Geológicos*. v.15, p. 242- 251.