



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM

PROPOSTA DE ZONEAMENTO GEOTÉCNICO DE CAVIDADES NATURAIS EM FORMAÇÕES FERRÍFERAS

Tatiana Soares Noce

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção de título de Mestre em Engenharia Mineral.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

COORIENTADOR: Prof. Dr. Frederico Garcia Sobreira

Ouro Preto – MG
Setembro de 2016



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM

PROPOSTA DE ZONEAMENTO GEOTÉCNICO DE CAVIDADES NATURAIS EM FORMAÇÕES FERRÍFERAS

Tatiana Soares Noce

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção de título de Mestre em Engenharia Mineral.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

COORIENTADOR: Prof. Dr. Frederico Garcia Sobreira

Ouro Preto – MG
Setembro de 2016

N756p

Noce, Tatiana Soares.

Proposta de zoneamento geotécnico de cavidades naturais em formações ferríferas [manuscrito] / Tatiana Soares Noce. • 2016.

203f.: il.: color; graf.; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.

Coorientador: Prof. Dr. Frederico Garcia Sobreira.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral.

Área de Concentração: Lavra de Minas.

1. Espeleologia. 2. Mecânica de rochas. 3. Grutas. I. Lima, Hernani Mota de. II. Sobreira, Frederico Garcia. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 551.44

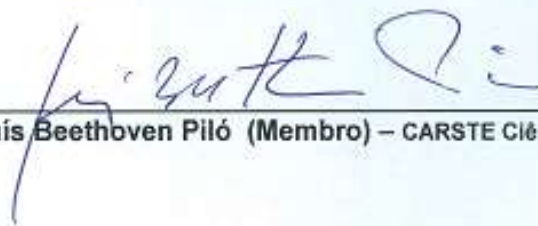
**“PROPOSTA DE ZONEAMENTO GEOTÉCNICO DE CAVIDADES
NATURAIS EM FORMÇÕES FERRÍFERAS”**

AUTOR: TATIANA SOARES NOCE RENÓ

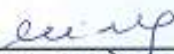
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 21 de julho de 2016, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Dr. Hernani Mota de Lima (Orientador) – UFOP



Dr. Luís Beethoven Piló (Membro) – CARSTE Ciência e Meio Ambiente



Prof. Dr.ª Milene Sabino Lana (Membro) – UFOP

Dedico este trabalho
à minha família

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Adriana e Marco Aurélio por ser minha fonte de inspiração, atenção e apoio incondicionais.

A minha irmã Mariana pelo amor, carinho e conselhos.

Ao meu marido Rodolfo, pelo amor, carinho, atenção e paciência em todos os momentos, além das diversas contribuições geológicas, geotécnicas e espeleológicas.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Hernani Mota de Lima e Prof. Dr. Frederico Garcia Sobreira, pela orientação, paciência, atenção e apoio incondicionais.

A Sociedade Excursionista e Espeleológica (SEE) pelo apoio tanto material quanto humano, sem o qual não seria possível a realização deste trabalho. Em especial, Bruninha, Birita, Pokapilha e Thiago pelo apoio nos trabalhos de campo e pelas descontrações.

As bicudas e República Bico Doce pelo apoio e amizade.

A Vale S/A pelo apoio financeiro, material e humano indispensáveis para a realização e conclusão do trabalho. Em especial Iuri Brandi, Raul Valentim, Pierre Munaro e Ramon Araújo.

Ao corpo docente do PPGEM, sempre dispostos a auxiliar.

Aos membros da banca Dra. Milene Sabino Lana e Dr. Luís Beethoven Piló pelo apoio e contribuições.

Por fim, agradeço a Deus e ao Santo Expedito por sempre iluminarem meu caminho.

Sumário

Agradecimentos	IX
Sumário	III
Lista de Ilustrações	V
Lista de Tabelas	VIII
Resumo	XI
Abstract	XIII
1- INTRODUÇÃO	15
1.1 - Apresentação.....	15
1.2 - Localização e Vias de Acesso.....	16
1.1 - Objetivos.....	17
1.1.1 - Objetivo Geral	17
1.1.2 - Objetivos Específicos	17
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 - Legislação Espeleológica Brasileira	19
2.2 - Cavidades em Formações Ferríferas e Canga.....	20
2.2.1 - Morfologia	21
2.2.2 - Características Geológicas.....	23
2.2.3 - Espeleogênese e Evolução.....	25
2.1 - Caracterização Geotécnica Aplicada a Ambientes Subterrâneos	26
2.1.1 - Caracterização da Rocha Intacta.....	27
<i>Ensaio de Resistência</i>	29
2.1.2 - Caracterização das Descontinuidades.....	31
2.1.3 - Classificações Geomecânicas	32
2.1.4 - Estabilidade de cavidades naturais	39
3- CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	41
3.1 - Geologia.....	41
3.1.1 - Estratigrafia	41
3.1.2 - Geologia Estrutural.....	43
3.2 - Geomorfologia.....	44
3.3 - Espeleologia e mineração	46
4- METODOLOGIA	47
4.1 - Levantamento Bibliográfico e Cartográfico	47
4.2 - Caracterização do Maciço Rochoso.....	49
4.3 - Investigação Estrutural e análise cinemática	49
4.4 - Ensaio de Resistência.....	51
4.5 - Classificação Geomecânica	51
4.6 - Definição da fragilidade da cavidade de acordo com os vãos	52
4.7 - Zoneamento geotécnico	53
6- CARACTERÍSTICAS ESPELEOLÓGICAS DAS CAVIDADES SELECIONADAS ... 54	
6.1 - Cavidade SPB65	54
6.2 - Cavidade SPB10	55
6.3 - Cavidade SPD10.....	57
6.4 - Cavidade SPD11	58
7- CAVIDADE SPB65	60
7.1 - Caracterização da rocha intacta	60
7.1.1 - Ensaio de Resistência.....	64
7.2 - Caracterização Estrutural.....	69
7.3 - Qualidade do Maciço Rochoso.....	77
7.3.1 - Rock Mass Rating (RMR).....	79
7.3.2 - Rock Tunneling Quality Index (Q).....	81
7.3.3 - Rock Mass Index (RMi)	83

7.4 - Dinâmica hídrica.....	85
7.5 - Dinâmica dos sedimentos	87
7.6 - Análise Cinemática.....	89
7.7 - Espeleogênese e Evolução	97
7.8 - Estabilidade dos vãos.....	99
8- CAVIDADE SPB10	102
8.1 - Caracterização da Rocha Intacta.....	102
8.1.1 - Ensaio de Resistência.....	103
8.2 - Caracterização Estrutural.....	104
8.3 - Qualidade do Maciço Rochoso	105
8.3.1 - Rock Mass Rating (RMR)	106
8.3.2 - Rock Tunneling Quality Index (Q).....	107
8.3.3 - Rock Mass Index (RMi)	107
8.4 - Dinâmica hídrica.....	108
8.5 - Dinâmica dos sedimentos	109
8.6 - Espeleogênese e Evolução	110
8.7 - Estabilidade dos vãos.....	111
9- CAVIDADE SPD10	113
9.1 - Caracterização da rocha intacta	113
9.1.1 - Ensaio de Resistência.....	114
9.2 - Caracterização estrutural.....	116
9.3 - Qualidade do Maciço Rochoso	118
9.3.1 - <i>Rock Mass Rating</i> (RMR).....	120
9.3.2 - <i>Rock Tunneling Quality Index</i> (Q).....	121
9.3.3 - Rock Mass Index (RMi)	123
9.4 - Dinâmica hídrica.....	126
9.5 - Dinâmica dos sedimentos	127
9.6 - Investigação Estrutural e Análise Cinemática	128
9.7 - Espeleogênese e Evolução	130
9.8 - Estabilidade dos vãos.....	131
10- CAVIDADE SPD11	133
10.1 - Caracterização da rocha intacta	133
10.1.1 - Ensaio de Resistência.....	134
10.2 - Caracterização estrutural.....	136
10.3 - Qualidade do Maciço Rochoso	138
10.3.1 - Rock Mass Rating (RMR)	139
10.3.2 - Rock Tunneling Quality Index (Q).....	141
10.3.3 - Rock Mass Index (RMi)	142
10.4 - Dinâmica hídrica.....	145
10.5 - Dinâmica dos sedimentos	146
10.6 - Investigação estrutural e análise cinemática	147
10.7 - Espeleogênese e Evolução	149
10.8 - Estabilidade dos vãos.....	149
11- ZONEAMENTO GEOTÉCNICO.....	152
11.1 - Caverna SPB65	155
11.2 - Caverna SPB10	159
11.3 - Caverna SPD10	161
11.4 - Caverna SPD11	164
12- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	167
REFERÊNCIAS.....	170

Lista de Ilustrações

Figura 1.1 – Localização da região de estudo em relação ao município de Mariana e a Comunidade do Gogo...	17
Figura 2.1 – Padrão morfológico em planta: a) Linear; b) Câmaras irregulares a direita. Fonte: Dutra (2013)...	22
Figura 2.2 – Exemplos de espeleotemas comuns em cavernas inseridas em litologias ferríferas: (a) Coralóides; (b) Crosta ferruginosa.....	23
Figura 2.3 – Cavidade sustentada pela carapaça de canga. Fonte: Munaro (2011.).....	26
Figura 2.4 – Perfis de rugosidade (ISRM 1981).....	32
Figura 2.5 – Relação entre o diâmetro equivalente (De) e o índice Q para determinação da necessidade de suporte. Fonte: Modificado de Barton <i>et al.</i> 1974.	37
Figura 2.6 – Princípios do sistema RMi. Fonte: Modificado de Palmstrom 1996.....	37
Figura 3.1 – Esboço do mapa geológico na região de estudo. Fonte: Modificado de Codemig, 2005.	43
Figura 3.2 – Anticlinal de Mariana com direção NW-SE mostrando a falha do fundão e as cavidades cadastradas. Fonte: Modificado de Codemig 2005.....	44
Figura 3.3 – Mapa hipsométrico da área de estudo. Fonte: Embrapa, 2006.....	45
Figura 3.4 – Perfil topográfico da região de estudo.....	45
Figura 3.5 – Região de estudo com as cavidades já prospectadas.	46
Figura 4.1 – Mapa de detalhe contendo cavidades selecionadas para o trabalho.	48
Figura 4.2 – Mapa de elevação do terreno mostrando inserção das cavidades selecionadas no relevo.....	48
Figura 4.3 – Modelo digital da região mostrando a inserção das cavidades no relevo.....	49
Figura 4.4 – Teste com barbante e bússola para a verificação do magnetismo na cavidade SPB65.	50
Figura 6.1 – a) Boca mostrando mata ciliar em seu entorno. b) Pingentes.....	55
Figura 6.2 – a) Pilar recoberto por pigmento branco. b) Interior da galeria mostrando passagem de água em toda a sua extensão.....	55
Figura 6.3 – a) Claraboia da cavidade vista de fora. b) Claraboia vista de dentro.	56
Figura 6.4 – a) Boca da cavidade envolta por campo rupestre. b) Entorno da cavidade SPB10 situada em alta vertente.....	56
Figura 6.5 – Blocos e matações no interior da cavidade SPB10.	57
Figura 6.6 – Crosta branca de origem microbacteriana cavidade SPD10.....	58
Figura 6.7 – Boca da cavidade SPD11 inserida em ruptura de relevo e envolta por campo rupestre.....	59
Figura 6.8 – a) Inclinação do teto da cavidade SPD11 em direção a E. b) Coralóide ferruginoso envolto por crosta branca micro bacteriana.	59
Figura 7.1 – Mapa mostrando a divisão de setores na cavidade SPB65.....	60
Figura 7.2 – a) Contato entre o xisto e o itabirito no interior da cavidade SPB65; b) Contato entre xisto e itabirito com <i>boudans</i>	61
Figura 7.3 – a) Itabirito de coloração cinza escuro a ocre bandado e intemperizado (setor A); b) Itabirito cinza escuro bandado com alterações incipientes (setor B).	63
Figura 7.4 – Mapa litológico da cavidade SPB65 com indicação dos perfis.....	64
Figura 7.5 – Perfil e cortes litológicos da cavidade SPB65.....	64
Figura 7.6 – Estereograma com polos dos planos de acamamento e representação do plano médio.	70
Figura 7.7 – Estereograma mostrando o eixo das dobras.	71
Figura 7.8 – a) Acamamento perturbado por dobramentos; b) Fratura aberta cortando o acamamento; c e d) Dobra sinistral parasítica no itabirito.....	71
Figura 7.9 – a) Instabilidade no teto segundo acamamento com abertura maior de 5 mm; b) Processo de deslocamento no teto segundo o acamamento do itabirito.....	72
Figura 7.10 – Estereograma mostrando as seis famílias de fraturas encontradas na cavidade SPB65 (J1, J2, J3, J4, J5 e J6).....	72
Figura 7.11 – Perfil cavidade SPB65 mostrando as duas zonas de falha normal em sua porção intermediária. ...	73
Figura 7.12 – a) Fratura de cerca de 1cm preenchida por material duro; b) Fratura aberta preenchida por material de oxidação; c) Zona de cisalhamento cortando a cavidade; d) Zona de falha localizada no setor C da cavidade SPB65.....	74
Figura 7.13 – a) Fratura com abertura de 1cm sem preenchimento cortando o acamamento; b) Zona de fraturamento mostrando rejeito de até 50 cm; c) Zona de fraturamento de atitude 107/61; d) Inflexão do acamamento no fraturamento.....	75
Figura 7.14 – a) Teto imbricado na passagem do penúltimo para o último salão causado pela decompressão; b) Rejeito dextral em fratura no itabirito.	75
Figura 7.15 – a) Estereograma com atitudes estruturas aferidas nos veios; b)) Estereograma com atitudes estruturas aferidas nos itabiritos e xistos.	76
Figura 7.16 – Mapa estrutural cavidade SPB65 com as principais estruturas observadas.	77
Figura 7.17 – Mapa de pontos cavidade SPB65.....	78

Figura 7.18 – Histograma mostrando a frequência de pontos da cavidade SPB65 por classe de RMR.	80
Figura 7.19 – Mapa de qualidade do maciço rochoso da cavidade SPB65 segundo o índice RMR.	81
Figura 7.20 – Histograma mostrando a frequência de pontos da cavidade SPB65 por classe de Q.	82
Figura 7.21 – Mapa de qualidade do maciço rochoso da cavidade SPB65 segundo o índice RMR.	82
Figura 7.22 – Histograma mostrando a frequência de pontos da cavidade SPB65 por classe de R _{Mi}	84
Figura 7.23 – Mapa de qualidade do maciço rochoso da cavidade SPB65 segundo o índice R _{Mi}	85
Figura 7.24 – Mapa e perfil mostrando o fluxo de água no interior da cavidade SPB65.	87
Figura 7.25 – Mapa mostrando a dinâmica sedimentar da cavidade SPB65.	89
Figura 7.26 – Cunha encaixada gerada no salão principal da cavidade SPB65.	90
Figura 7.27 – Ruptura em laje salão principal cavidade SPB65.	90
Figura 7.28 – Estereogramas mostrando as conformações das cunhas em forma de laje.	91
Figura 7.29 – Ruptura em forma de capela alongada salão principal cavidade SPB65.	91
Figura 7.30 – Estereogramas mostrando as conformações das cunhas alongadas com direção NW-SE.	92
Figura 7.31 – Cunha em forma de capela alongada segundo NW – SE observada na porção intermediária.	92
Figura 7.32 – Estereogramas mostrando as conformações das cunhas alongadas com direção NW-SE na porção intermediária.	92
Figura 7.33 – Cunha em forma de capela alongada segundo NWW – SEE observada na porção intermediária.	93
Figura 7.34 – Estereogramas mostrando as conformações das cunhas alongadas com direção NWW-SEE na porção intermediária.	93
Figura 7.35 – Cunhas em lajes alongadas na direção NW-SE formadas na porção intermediária.	93
Figura 7.36 – Estereogramas mostrando as conformações das cunhas em forma de laje alongada formadas na porção intermediária.	94
Figura 7.37 – Cunha em forma de capela porção superior da cavidade SPB65.	95
Figura 7.38 – Estereogramas mostrando as conformações das cunhas alongadas em forma de capela na porção superior.	95
Figura 7.39 – Cunhas na forma de lajes alongadas nível superior.	95
Figura 7.40 – Estereogramas mostrando as conformações das cunhas em forma de laje alongada formadas na porção superior.	96
Figura 7.41 – Cunhas em forma de capela alongada geradas no ponto 8.	97
Figura 7.42 – Cunhas em forma de lajes geradas no ponto 8.	97
Figura 7.43 - Relação de estabilidade entre tamanho dos vãos e índice Q dividido em setores. Fonte: Adaptado de Barton <i>et al.</i> 1974.	100
Figura 7.44 – Mapa da cavidade SP65 mostrando os círculos que circunscrevem sua morfologia em cada setor.	101
Figura 8.1 – a) Canga detrítica de coloração amarronzada e textura granular. b) Seixo maior em meio a seixos menores.	102
Figura 8.2 – a) Blocos de canga no interior da cavidade. b) Cobertura ferruginosa de aspecto liso sobre grande bloco de canga.	103
Figura 8.3 – Mapa e perfis litológicos da cavidade SPB10.	103
Figura 8.4 – a) Fratura irregular aberta por tração. b) Fratura aberta por gravidade. c) Zona de falha com mergulho de 90 ⁰ cortando a cavidade. d) Zona de falha a direita e grande bloco despencado abaixo.	105
Figura 8.5 – Mapa estrutural mostrando fraturamentos na cavidade SPB10.	105
Figura 8.6 – Mapa mostrando a distância média entre as juntas ao longo do perfil A da cavidade.	106
Figura 8.7 – Mapa e perfil mostrando o fluxo de água pluvial no interior da cavidade SPB10.	109
Figura 8.8 – a) Blocos e sedimentos remobilizados abaixo da clarabóia. b) Cascalho observado na porção central da cavidade.	110
Figura 8.9 – Mapa e perfil mostrando a dinâmica dos sedimentos no interior da cavidade SPB10.	110
Figura 8.10 – Clarabóia retangular encontrada na cavidade SPB10.	111
Figura 8.11 – Mapa da cavidade SPB10 mostrando o tamanho dos vãos e respectivos diâmetros equivalentes (De).	112
Figura 8.12 – Relação de estabilidade entre tamanho dos vãos e índice Q. Fonte: Adaptado de Barton <i>et al.</i> 1974.	112
Figura 9.1 – a) Itabirito descolorido mediamente alterado b) Canga detrítica mediamente alterada.	113
Figura 9.2 – Planta baixa, perfil e cortes litológicos cavidade SPD10.	114
Figura 9.3 – Estereograma mostrando atitude média do acamamento (S ₀) na cavidade SPD10.	116
Figura 9.4 – a) Acamamento com abertura superior a 5mm sem preenchimento. b) Processo de deslocamento no itabirito segundo acamamento.	116
Figura 9.5 – a) Cunha formada pela combinação S ₀ /J ₁ /J ₂ . b) – Buraco comum na canga.	117
Figura 9.6 – Estereograma mostrando as famílias de fraturas J ₁ e J ₂ observadas na cavidade SPD10.	117
Figura 9.7 – Mapa estrutural cavidade SPD10.	118

Figura 9.8 – Mapa de pontos cavidade SPD10.....	119
Figura 9.9 – Mapa mostrando a qualidade do maciço segundo o índice RMR.	121
Figura 9.10 – Mapa mostrando a qualidade do maciço segundo o índice Q.	123
Figura 9.11 – Mapa mostrando a qualidade do maciço segundo o índice R _{Mi}	126
Figura 9.12 – Mapa mostrando o fluxo de água pluvial no interior da cavidade SPD10.	127
Figura 9.13 – Depósito de sedimentos argiloarenosos na porção distal da cavidade SPD10.	128
Figura 9.14 – Demonstração do fluxo de sedimentos na cavidade SPD10.....	128
Figura 9.15 – Estereograma mostrando a conformação da cunha encontrada na cavidade SPD10.....	129
Figura 9.16 – Possibilidade de geração de cunhas no teto da cavidade SPD10.	130
Figura 9.17 – Possibilidade de geração de cunhas no teto e paredes da cavidade SPD10.....	130
Figura 9.18 – Processo de deslizamento de placas de itabirito segundo o acamamento (S ₀).	131
Figura 9.19 – Mapa da cavidade SPD10 mostrando o tamanho dos vãos e respectivos diâmetros equivalentes (De).	132
Figura 9.20 – Estabilidade dos vãos em relação ao índice Q. Fonte: Adaptado de Barton <i>et al.</i> 1974.....	132
Figura 10.1 – a) Contato canga/itabirito. b) Itabirito bandado e alterado no interior da cavidade.	133
Figura 10.2 – a) Seixos angulares na canga detrítica. b) Contato irregular entre canga e itabirito.....	134
Figura 10.3 – Mapa, perfil e cortes litológicos da cavidade SPD11.....	134
Figura 10.4 – Estereograma mostrando a média das medidas de acamamento na cavidade SPD11.	136
Figura 10.5 – Estereograma mostrando as atitudes das famílias de fraturas encontradas na cavidade SPD11. ..	137
Figura 10.6 – a) Cunha formada pelo acamamento (S ₀) e as famílias de fratura J ₁ e J ₂ . b) Grande cunha formada pelo acamamento (teto) e pelas famílias de fraturas (parede). c) Buraco na parede formado pela junção das três famílias de descontinuidades. d) Junta de tração observada na canga.	138
Figura 10.7 – Mapa mostrando principais estruturas aferidas na cavidade SPD11.	138
Figura 10.8 – Mapa de qualidade do maciço da cavidade SPD11 segundo o índice RMR.	140
Figura 10.9 – Mapa de qualidade do maciço da cavidade SPD11 segundo o índice Q.	142
Figura 10.10 – Mapa de qualidade do maciço da cavidade SPD11 segundo o índice R _{Mi}	145
Figura 10.11 – Mapa mostrando o fluxo de água pluvial no interior da cavidade SPD11.	146
Figura 10.12 – Processo de deslocamento com geração e transporte de sedimentos na cavidade SPD11.....	146
Figura 10.13 – Mapa mostrando a dinâmica dos sedimentos na cavidade SPD11.	147
Figura 10.14 – Estereograma mostrando a conformação das cunhas existentes na cavidade SPD11.	148
Figura 10.15 – Possível formação de cunhas na porção W da cavidade SPD11.	148
Figura 10.16 – Possibilidade de formação de cunhas no teto da cavidade SPD11.	148
Figura 10.17 – Boca da cavidade SPD11 com teto de canga e grandes blocos deslocados do teto no piso.	149
Figura 10.18 – Mapa da cavidade SPD10 mostrando o tamanho dos vãos e respectivos diâmetros equivalentes (De).	150
Figura 10.19 – Estabilidade dos vãos em relação ao índice Q. Fonte: Adaptado de Barton <i>et al.</i> (1974).	151
Figura 11.1 – a) Zoneamento de qualidade do maciço; b) Mapa da cavidade SPB65 mostrando os sinais de instabilidade.	156
Figura 11.2 – a) Zoneamento de possíveis mecanismos de ruptura; b) Zoneamento da influência da água.	157
Figura 11.3 – a) Zoneamento da influência dos sedimentos; b) Zoneamento do tamanho dos vãos.	157
Figura 11.4 – Zoneamento geotécnico cavidade SPB65.	158
Figura 11.5 – a) Zoneamento de qualidade do maciço; b) Mapa da cavidade SPB10 mostrando os sinais de instabilidade.	159
Figura 11.6 – a) Zoneamento de possíveis mecanismos de ruptura; b) Zoneamento da influência da água.	160
Figura 11.7 – a) Zoneamento da influência dos sedimentos; b) Zoneamento do tamanho dos vãos.	160
Figura 11.8 – Zoneamento geotécnico cavidade SPB10.	161
Figura 11.9 – a) Zoneamento de qualidade do maciço; b) Mapa da cavidade SPD10 mostrando os sinais de instabilidade.	162
Figura 11.10 a) Zoneamento de possíveis mecanismos de ruptura; b) Zoneamento da influência da água.	163
Figura 11.11 – a) Zoneamento da influência dos sedimentos; b) Zoneamento do tamanho dos vãos.	163
Figura 11.12 – Zoneamento da fragilidade geotécnica da cavidade SPD10.....	164
Figura 11.13 – a) Zoneamento de qualidade do maciço; b) Mapa da cavidade SPD11 mostrando os sinais de instabilidade.	165
Figura 11.14 – a) Zoneamento de possíveis mecanismos de ruptura; b) Zoneamento da influência da água.	165
Figura 11.15 – a) Zoneamento da influência dos sedimentos; b) Zoneamento do tamanho dos vãos.	166
Figura 11.16 – Zoneamento da fragilidade geotécnica cavidade SPD11.	166

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Classes de alteração das rochas (Modificado de ISRM 1981).....	28
Tabela 2.2 – Graus de coerência (Guidicini <i>et al.</i> 1972 apud Serra e Ojima 1998)	28
Tabela 2.3 – Resistência a compressão uniaxial estimados a partir de testes de campo com o martelo do geólogo. (Modificado de ISRM, 1981).	29
Tabela 2.4 – Classe e significado das classes de rochas segundo a classificação geomecânica RMR. Fonte: adaptado de Bieniawski (1989).	35
Tabela 2.5 – Classificação do maciço rochoso de acordo com o sistema Q.....	36
Tabela 2.6 – Valores de ESR de acordo com o tipo de escavação. Fonte: Barton <i>et al.</i> 1974.....	36
Tabela 2.7 – Valor de nj de acordo com o número de famílias de descontinuidades.	38
Tabela 2.8 – Sistema de classificação RMi. Fonte: Modificado de Palmstrom 1996.....	39
Tabela 7.1 – Características e resultados dos ensaios de carga pontual em xisto.	65
Tabela 7.2 – Características e resultados dos ensaios de carga pontual em <i>boudans</i>	65
Tabela 7.3 – Características e resultados dos ensaios de carga pontual em itabirito encontrado próximo a boca da cavidade SPB65.....	66
Tabela 7.4 – Características e resultados dos ensaios de carga pontual em itabirito encontrado na porção mediana da cavidade SPB65.....	67
Tabela 7.5 – Características e resultados dos ensaios de carga pontual em itabirito encontrado na porção distal da cavidade SPB65.....	68
Tabela 7.6 – Resistência a compressão uniaxial (σ_c) de cada tipo litológico de acordo com cada método.	69
Tabela 7.7 – Atitude média de cada família de fratura.	73
Tabela 7.8 – Valores de S, λ , Jv e RQD no interior da cavidade SPB65.....	78
Tabela 7.9 – Pontuação relativa às características de cada ponto da cavidade SPB65 segundo o sistema de classificação RMR.....	79
Tabela 7.10 – Tabela contendo as características utilizadas para o cálculo do volume do bloco (Vb) de cada ponto a partir do espaçamento entre as descontinuidades (S1, S2, S3).	83
Tabela 8.1 – Características dos ensaios de carga pontual realizados na canga da cavidade SPB10.	104
Tabela 8.2 – Características da canga onde se insere a cavidade SPB10 de acordo com o sistema de classificação RMR.	107
Tabela 8.3 - Características da canga onde se insere a cavidade SPB10 de acordo com o sistema de classificação Q.....	107
Tabela 8.4 – Características da cavidade SPB10 utilizadas para o cálculo do RMi.	108
Tabela 9.1 – Características utilizadas para o cálculo do índice de carga pontual ($I_{s(50)}$) do itabirito na cavidade SPD10.....	114
Tabela 9.2 – Características utilizadas para o cálculo do índice de carga pontual da canga.	115
Tabela 9.3 – Características e valor de RQD para os pontos em itabirito da cavidade SPD10.	119
Tabela 9.4 – Características do itabirito encontrado na cavidade SPD10 segundo o sistema de classificação de maciços RMR.	120
Tabela 9.5 – Características aferidas para a caracterização da canga segundo o sistema RMR.	120
Tabela 9.6 – Características utilizadas para a classificação do itabirito encontrado na cavidade SPD10 segundo o sistema Q.	122
Tabela 9.7 - Características utilizadas para a classificação da canga encontrado na cavidade SPD10 segundo o sistema Q.	122
Tabela 9.8 – Dados utilizados para o cálculo do volume do bloco (Vb) nos pontos em itabirito da cavidade SPD10.....	123
Tabela 9.9 – Características das descontinuidades do itabirito da cavidade SPD10 a partir do RMi.	124
Tabela 9.10 – Valores utilizados no cálculo do RMi no itabirito.	124
Tabela 9.11 – Características da canga encontrada na cavidade SPD10 segundo o sistema RMi.	125
Tabela 9.12 – Valores utilizados e cálculo do RMi da canga encontrada na cavidade SPD10.	125
Tabela 10.1 – Características utilizadas para o cálculo do índice de carga pontual ($I_{s(50)}$) do itabirito na cavidade SPD11.....	134
Tabela 10.2 - Características utilizadas para o cálculo do índice de carga pontual ($I_{s(50)}$) da canga na cavidade SPD11.....	135
Tabela 10.3 – Características e valor de RQD para os pontos em itabirito da cavidade SPD11.	138
Tabela 10.4 – Características do itabirito encontrado na cavidade SPD11 segundo o sistema de classificação de maciços RMR.	139
Tabela 10.5 – Características da canga encontrada na cavidade SPD11 segundo o sistema de classificação de maciços RMR.	140
Tabela 10.6 - Características do itabirito encontrado na cavidade SPD11 segundo o sistema de classificação de	

maciços Q.....	141
Tabela 10.7 – Características da canga encontrada na cavidade SPD11 segundo o sistema de classificação de maciços Q.....	141
Tabela 10.8 – Dados utilizados para o cálculo do volume do bloco a partir do espaçamento (VbS) e a partir do Jv (VbJv) nos pontos em itabirito da cavidade SPD11.	142
Tabela 10.9 – Características das descontinuidades do itabirito da cavidade SPD10 a partir do RMi.	143
Tabela 10.10 – Cálculo do RMi no itabirito da cavidade SPD11.	143
Tabela 10.11 – Características das juntas de alívio observadas na canga.	144
Tabela 10.12 – Valores utilizados e cálculo do RMi da canga encontrada na cavidade SPD11.	144
Tabela 11.1 – Pontuação utilizada para o zoneamento a partir da qualidade do maciço.	153
Tabela 11.2 – Pontuações utilizada para o zoneamento a partir de cada aspecto geotécnico.	154
Tabela 11.3 – Faixa de pontuação por nível de fragilidade geotécnica utilizados.....	155
Tabela A.1 – Pesos relativos ao parâmetro de resistência a compressão uniaxial segundo a classificação geomecânica RMR. Fonte: adaptado de Bieniawski (1989).....	176
Tabela A.2 – Pesos relativos ao parâmetro RQD segundo a classificação geomecânica RMR. Fonte: adaptado de Bieniawski (1989).....	176
Tabela A.3 – Pesos relativos as condições das descontinuidades segundo a classificação geomecânica RMR. Fonte: adaptado de Bieniawski (1989).	176
Tabela A.4 – Pesos relativos às condições hidrogeológicas segundo a classificação geomecânica RMR. Fonte: adaptado de Bieniawski (1989).	176
Tabela A. 5 - Índice Jn do Sistema Q. Fonte: adaptado de Barton <i>et al.</i> 1974.	177
Tabela A.6 – Índice Jr do Sistema Q. Fonte: adaptado de Barton <i>et al.</i> 1974.	177
Tabela A.7 – Índice Ja do Sistema Q. Fonte: adaptado de Barton <i>et al.</i> 1974.....	177
Tabela A.8 – Índice Jw do Sistema Q. Fonte: adaptado de Barton <i>et al.</i> 1974.....	178
Tabela A.9 – Índice SRF do Sistema Q. Fonte: adaptado de Barton <i>et al.</i> 1974.....	178
Tabela A. 10 – Classificação do tamanho e continuidade das descontinuidades (jL). Fonte: Adaptado de Palmstrom (1996).	179
Tabela A. 11- Classificação da rugosidade das juntas (jR). Fonte: Adaptado de Palmstrom 1996.	179
Tabela A. 12 – Classificação do fator de alteração das juntas (jA). Fonte: Adaptado de Bieniawski 1973 apud Palmstrom 1996.....	179
Tabela A. 13 – Atitudes de acamamento cavidade SPB65.	191
Tabela A. 14 – Atitudes das fraturas tomadas na cavidade SPB65.	192
Tabela A. 15 – Descrição das características de cada ponto da cavidade SPB65 segundo o sistema de classificação RMR.....	195
Tabela A. 16 – Descrição das características de cada ponto da cavidade SPB65 segundo o sistema de classificação Q.....	196
Tabela A. 17 – Descrição das características de cada ponto da cavidade SPB65 segundo o sistema de classificação RMi.	198
Tabela A. 18 – Valores e pontuações utilizados para o cálculo do Índice RMi de cada ponto na cavidade SPB65.	199
Tabela A. 19 – Termo utilizado para o índice RMi de cada ponto da cavidade SPB65.	199

Resumo

Segundo a legislação ambiental brasileira, as cavidades naturais subterrâneas, bem como sua área de influência, não podem sofrer impactos negativos irreversíveis até que se realizem estudos específicos de relevância e medidas compensatórias. Na ausência de estudos específicos para a determinação dessa área de influência, estipulou-se toda a área inserida em um raio de 250 m a partir da projeção horizontal da cavidade. Esse raio de proteção é contestado pela indústria da mineração, que associa a ele perda de reserva mineral lavrável quando as cavidades estão locadas no minério ou próximo dele. Sabe-se que se trata de um valor relativamente aleatório e sem explicações científicas plausíveis, podendo ser exagerado ou mesmo insuficiente para a proteção do ambiente cavernícola. Um dos parâmetros que deve ser analisado para a definição da real área de influência é a integridade física, que está associada à fragilidade geotécnica perante os níveis de vibração e deslocamento sofrido pelo maciço rochoso decorrente da atividade mineira. Esse estudo trata dos principais aspectos geotécnicos observados em cavidades naturais inseridas em formações ferríferas, e tem como objetivo a proposição de um zoneamento da fragilidade geotécnica dessas cavernas. Para tal, selecionaram-se quatro cavidades naturais, uma inserida no contato xisto/itabirito, uma inteiramente inserida em canga e duas inseridas no contato itabirito/canga, principais litologias observadas em cavidades inseridas neste contexto. Tal estudo pode ajudar a direcionar monitoramentos geotécnicos e estudos mais detalhados que, conseqüentemente, contribuirão para o estabelecimento de critérios técnicos para a definição da área de influência de cada cavidade. Nota-se uma melhor aplicabilidade do sistema de classificação de maciços *Rock Mass Index* (RMi), sendo este o principal parâmetro utilizado no zoneamento das cavidades. Além disso, definiu-se como aspectos a serem analisados os locais com instabilidades evidentes, a influência da água, da movimentação de sedimentos, as dimensões dos vãos sem apoio e os possíveis mecanismos de ruptura. A soma das pontuações atribuídas a esses parâmetros resultou no mapa de zoneamento da fragilidade geotécnica de cada cavidade. Assim, foi possível observar uma alta fragilidade geotécnica nesses ambientes, comumente compostos por rochas muito alteradas, com baixa resistência a compressão uniaxial e alta probabilidade de ocorrência de mecanismos de ruptura, muitas vezes relacionados a própria espeleogênese. Nota-se ainda, que as zonas mais frágeis são comumente coincidentes com os locais onde foram observadas instabilidades durante os trabalhos de campo, confirmando a aplicabilidade do presente trabalho, bem como a relação dos processos de instabilidades com a espeleogênese das galerias.

Abstract

According to the Brazilian environmental laws, an underground natural cavity as well as its area of influence cannot suffer irreversible adverse impacts until relevant specific studies are performed and compensatory measures are established. In the absence of specific studies to determine this area of influence, the whole area within a 250 m radius stemming from the cave's horizontal projection was stipulated. This radius of protection is contested by the mining companies that associate to it the loss of mineable resource when the caves are located in the ore resource or near it. It is known that it is a relatively random value with no plausible scientific explanations. It may be exaggerated or even insufficient to protect the cave environment. One of the parameters to be analyzed when defining the real area of influence, or protection, is the physical integrity, which is associated with the geotechnical fragility in face of the vibration and displacement levels suffered by the rock mass due to mining activity. This study addresses the main geotechnical aspects observed in natural cavities, in iron formations, and it is aimed at proposing a zoning towards the cave's geotechnical fragility. To this end, four natural caves were selected. The first one is located in the contact schist/itabirite. The second one is entirely located in the canga, and the third and the fourth one are inserted in the contact itabirite/canga, main lithologies observed in caves inserted in this context. The study is also aimed at contributing with the geotechnical monitoring and detailed studies to establish technical criteria to define a more adequate radius of protection for each cave. The Rock Mass Index system of classification showed the better applicability, which was the main parameter used in the caves zoning. Besides that, the signals of instability observed, the rupture mechanisms, the influence of water, the dynamic of sediments, and the dimension of the spans also were defined as aspects to be assessed. The sum of the scores assigned to these parameters resulted in a geotechnical zoning map of the caves. Thus, we observed high geotechnical fragility on these environments, commonly composed of much altered rocks with low uniaxial compressive strength and high probability of failure mechanisms. Note also that the most vulnerable areas are commonly coincide with the places where instabilities were observed during the field work, confirming the applicability of this method, and the relationship of instabilities processes with speleogenesis process of the galleries themselves.

1- INTRODUÇÃO

1.1 - Apresentação

O decreto federal nº 6.640 de 2008 determina que as cavidades naturais subterrâneas de relevância máxima, incluindo sua área de influência, não sofram impactos ambientais irreversíveis. Cavidades de outros níveis de relevância, assim como suas áreas de influência, podem ser suprimidas ou estar sujeitas a impactos ambientais, desde que precedidas de estudos específicos e mediante compensações ambientais. Esse decreto surgiu, principalmente, em função do conflito entre a preservação de ambientes cavernícolas e o desenvolvimento de atividades diversas em suas proximidades. A Resolução CONAMA 347 de 10 de setembro de 2004 determina que até que se realizem estudos específicos para um melhor dimensionamento da área de influência das cavidades naturais, esta será considerada como a projeção horizontal da caverna acrescida de um entorno de 250 m, em forma de polígono convexo. Esse entorno pode não representar a real área de influência das cavidades, podendo ser exagerado ou mesmo insuficiente para a sua preservação.

Quando se tratam de cavidades em formações ferríferas, o raio de influência pode reduzir, consideravelmente, uma reserva mineral economicamente lavrável, além de impedir a implantação de obras de infraestrutura vitais para a indústria da mineração. Para atender aos princípios de desenvolvimento sustentável, os mineradores têm dedicado diversos estudos para um melhor conhecimento da gênese, do comportamento geomecânico e do ecossistema de dentro e dos arredores das cavidades. Tais estudos buscam encontrar um termo que atenda a necessidade de preservação das cavidades sem impedir o avanço da mineração.

Um dos aspectos fundamentais a ser estudado trata da integridade física das cavidades perante os possíveis impactos que um dado empreendimento pode causar. Estudos desse tipo ainda são escassos, principalmente quando se remete as cavidades inseridas em formações ferríferas. Tal fato denota a importância da definição de uma metodologia adequada, que indique as principais características a serem analisadas para a garantia da preservação das cavidades. Em adição, um efetivo zoneamento da fragilidade geotécnica das cavidades, possibilita direcionar possíveis monitoramentos das cavernas

sobre condições de vibração do terreno. Desse modo, cavidades passíveis de supressão têm se tornado laboratórios de monitoramento, que indicam os limites nos quais suas estruturas não sejam agredidas pelos impactos externos. A partir dessas informações, é possível simular o comportamento do maciço rochoso e das estruturas geotécnicas das cavidades que serão suprimidas, e extrapolar esse comportamento para as cavidades de máxima relevância em contextos geológicos/geotécnicos semelhantes. A caracterização geotécnica, aliada ao zoneamento geotécnico é o passo inicial para esse tipo de monitoramento. Portanto, é fundamental padronizar as informações a serem coletadas, de modo a criar, ao longo do tempo, uma ampla biblioteca a ser utilizada em estudos de determinação do raio de influência de cavidades de todas as relevâncias.

Esse estudo teve por objetivo realizar o zoneamento geotécnico de cavidades inseridas em formações ferríferas e canga situadas na área do projeto Gogo de propriedade da Vale S.A, município de Mariana-MG. Para tal, foram utilizados três dos principais sistemas de classificação da qualidade do maciço, comumente utilizados em ambientes subterrâneos, aliados a uma análise pormenorizada das características que podem influenciar na estabilidade física das cavidades.

1.2 - Localização e Vias de Acesso

A região objeto de estudo está localizada na Serra de Antônio Pereira, município de Mariana, porção sudeste do estado de Minas Gerais. O acesso é feito a partir da porção norte da área urbana de Mariana pela MG-129, por cerca de 6 km até o trevo da comunidade do Gogo, seguindo daí por estradas secundárias não pavimentadas. A Figura 1.1 apresenta a localização de Mariana no estado de Minas Gerais e da área do Projeto Gogo em Mariana.

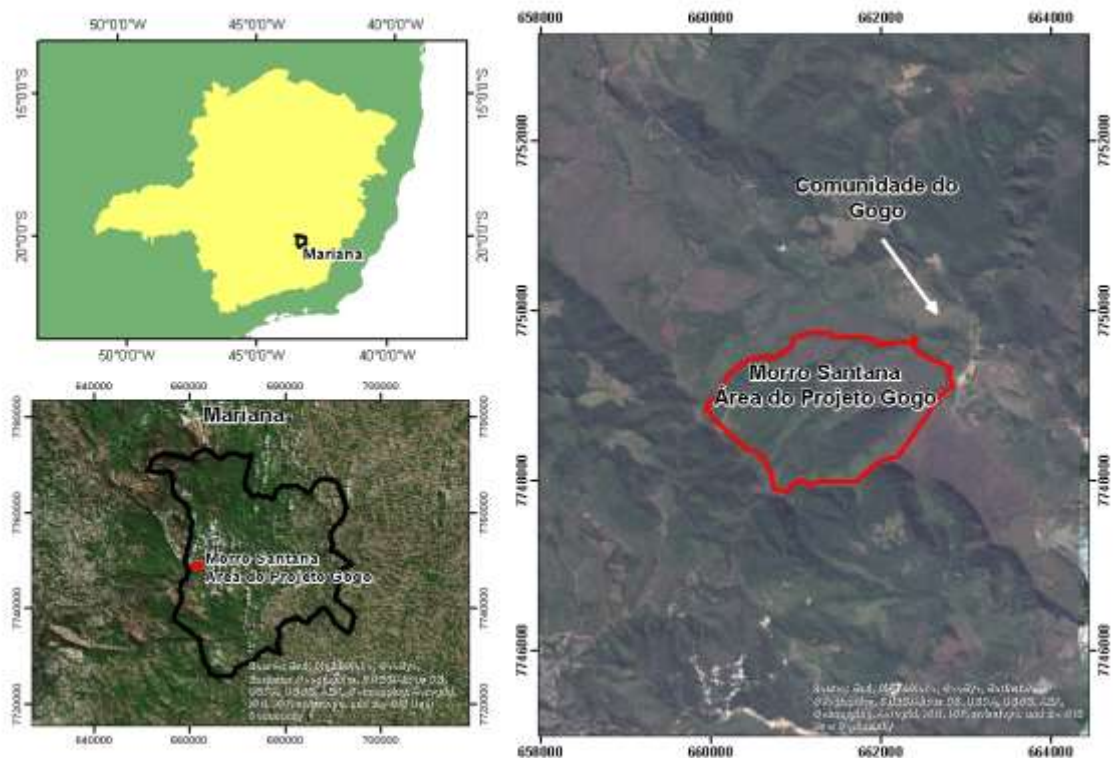


Figura 1.1 – Localização da região de estudo em relação ao município de Mariana e a Comunidade do Gogo.

1.1 - Objetivos

1.1.1 - Objetivo Geral

O principal objetivo do trabalho foi propor uma metodologia de zoneamento geotécnico de cavidades naturais subterrâneas inseridas em rochas ferríferas de modo a possibilitar uma melhor compreensão do comportamento geomecânico dessas cavernas.

1.1.2 - Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, os objetivos específicos incluíram a realização de um amplo estudo da integridade física de cavidades naturais inseridas em formações ferríferas contendo:

- Estudos acerca do contexto estratigráfico no qual as cavidades se inserem e das estruturas geológicas associadas; além do seu estado de alteração e coerência;
- Análise da dinâmica hídrica e dos sedimentos no interior das galerias.
- Classificação do maciço rochoso encaixante segundo os sistemas de classificação *Rock Mass Rating (RMR)*, *Rock Mass Quality (Q)* e *Rock Mass*

Index (R_{Mi}), de modo a setorizar as cavidades em regiões com comportamento geomecânico similar;

- Análise cinemática com definição das principais possibilidades de ruptura perante o contexto estrutural;
- Análise da dimensão dos vãos livres sem suporte existentes no interior de cada cavidade.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Legislação Espeleológica Brasileira

Estudos feitos por Aquino (2011) mostram que o primeiro passo para a preservação do patrimônio espeleológico brasileiro foi dado em 1986, como resultado das intensas manifestações da comunidade espeleológica na época. Em abril daquele ano, foi publicada a Resolução CONAMA nº 009/1986, que criou uma comissão especial para tratar de assuntos relativos à preservação do patrimônio espeleológico. Em 1987, obteve-se o maior avanço até então, com a sanção da Resolução CONAMA nº 005/1987, que implantou o Programa Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeleológico. Esse programa, entre outras providências, inclui na legislação ambiental brasileira a obrigatoriedade da elaboração de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) nos casos de empreendimentos potencialmente lesivos ao patrimônio espeleológico nacional. A Resolução 005/1987 dá ainda a primeira definição das cavernas como sendo toda e qualquer cavidade natural subterrânea penetrável pelo homem, incluindo seu ambiente, seu conteúdo mineral e hídrico, sua fauna e flora e o corpo rochoso onde se insere.

Em 1988, com a promulgação da Constituição Federal, as cavidades naturais subterrâneas foram incluídas entre os bens da união, sendo necessária sua proteção, preservação e conservação. Em 1990, foi publicado o decreto federal nº 99556, que encarregou o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA de fiscalizar e controlar o uso do patrimônio nacional espeleológico. Em 1997 foi instituído o Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo – CECAV, unidade descentralizada do IBAMA voltada para a regulamentação e análise dos processos envolvendo o patrimônio espeleológico.

O maior avanço do ponto de vista preservacionista foi dado em 2004, com a publicação da Resolução CONAMA 347/2004, que aprimora e atualiza o Programa Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeleológico, além de instituir o Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE. Até então, todo o patrimônio espeleológico, juntamente com sua área de influência não poderiam sofrer impactos ambientais irreversíveis, sendo a área de influência definida como “Área que compreende os

elementos bióticos e abióticos, superficiais e subterrâneos, necessários à manutenção do equilíbrio ecológico e da integridade física do ambiente cavernícola”. A Resolução define que até que se realizem estudos específicos, essa área de influência é dada pela projeção horizontal da caverna acrescida de um entorno de duzentos e cinquenta metros em forma de poligonal convexa. As cavidades naturais subterrâneas foram definidas no mesmo ano como:

“Todo e qualquer espaço subterrâneo penetrável pelo ser humano, com ou sem abertura identificada, popularmente conhecido como caverna, gruta, lapa, toca, abismo, furna e buraco, incluindo seu ambiente, seu conteúdo mineral e hídrico, as comunidades bióticas ali encontradas e o corpo rochoso onde as mesmas se inserem, desde que a sua formação tenha sido por processos naturais, independentemente de suas dimensões ou do tipo de rocha encaixante.”

Em 2008, após pressão dos empreendimentos, principalmente da mineração, com relação à inflexibilidade da legislação espeleológica até o momento, foi sancionado o Decreto 6.640, que permite classificar a caverna de acordo com seu grau de relevância em máximo, alto, médio ou baixo. Dessa forma, as cavidades classificadas com grau de relevância máximo, assim como sua área de influência, não podem sofrer impactos negativos irreversíveis, e as classificadas com grau de relevância mais baixo, bem como suas áreas de influência, podem sofrer impactos ambientais mediante estudos específicos e medidas compensatórias. A determinação do grau de relevância é regulamentada pela Instrução Normativa do Ministério do Meio Ambiente IN 02/2009, que orienta a avaliação das cavidades em relação ao universal local e regional em que estão inseridas.

2.2 - Cavidades em Formações Ferríferas e Canga

Até o fim do século passado, as formações ferríferas não eram consideradas pela comunidade científica como uma litologia favorável à formação de cavernas, sendo as rochas carbonáticas as principais responsáveis por esse processo. Isso explica o porquê da maior parte dos estudos espeleológicos existentes no Brasil terem sido realizados em cavidades naturais inseridas em rochas carbonáticas. Por outro lado, Auler (2005), Auler & Piló (2005), Pereira (2012), dentre outros autores, afirmam existir um alto potencial para o cavernamento em minério de ferro e canga, sobretudo nas províncias minerais do Quadrilátero Ferrífero-MG e de Carajás-PA. Essa afirmação se tornou evidente com o amplo desenvolvimento das atividades minerárias voltadas à extração de minério de ferro, sendo necessário o desenvolvimento de diversos estudos espeleológicos nessa

litologia.

Os estudos de Auler & Piló (2005) indicam uma alta densidade de cavernas em formações ferríferas no Brasil, comparável ou superior a existente em áreas calcáreas, areníticas ou quartzíticas. Os autores afirmam ainda, que o potencial brasileiro de cavidades naturais inseridas em minério de ferro e canga é o maior do mundo, podendo alcançar a casa dos milhares. Os primeiros trabalhos a respeito foram publicados por George Simmons em 1963, contemplando cavidades na Serra do Batateiro, na Serra do Tamanduá, no Morro da Queimada e na Serra do Curral (AULER, 2005).

2.2.1 - Morfologia

As cavidades desenvolvidas em litologias ferríferas apresentam particularidades que as diferenciam das desenvolvidas em outros tipos de rochas encaixantes. Normalmente, suas dimensões são reduzidas, com uma projeção horizontal média inferior a 30 m (PILÓ & AULER, 2009; OLIVEIRA, 2011; MUNARO, 2011; VALENTIM & OLIVITO, 2011; PEREIRA, 2012). As cavernas com maior projeção horizontal já descritas em Minas Gerais nessas litologias estão localizadas na Serra do Gandarela (345 m) (OLIVEIRA, 2011) e na Serra da Piedade (365 m) (PEREIRA, 2012). No estado do Pará, a maior cavidade em litologia ferrífera está inserida na Serra Norte em Carajás (372 m) (PILÓ & AULER, 2009). Os estudos feitos por Auler *et al.* (2012) e Timo *et al.* (2014) na área foco deste estudo, mostra projeções horizontais máximas de 20 m para as cavidades naturais, comumente desenvolvidos em condutos extremamente estreitos.

São identificados dois padrões morfológicos principais em cavidades inseridas em litologias ferríferas (Figura 2.1) – um padrão linear, caracterizado por uma direção preferencial de desenvolvimento e seções mais triangulares, e um padrão composto por câmaras irregulares, caracterizado por salões interconectados, por passagens estreitas e padrão planimétrico mais globular (PILÓ & AULER, 2005; PILÓ & AULER, 2009; DUTRA, 2013).

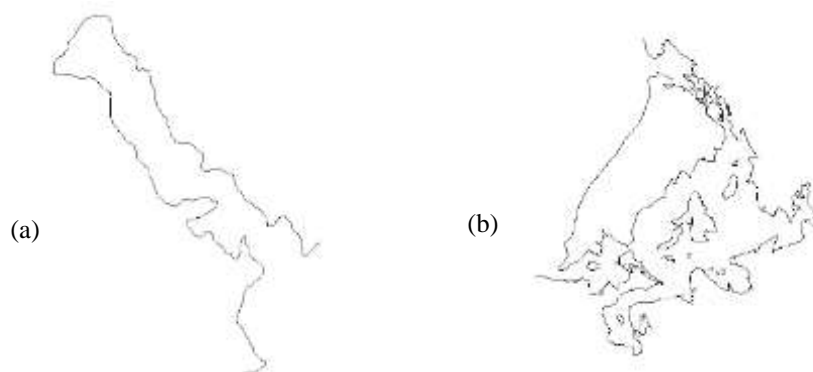


Figura 2.1 – Padrão morfológico em planta: a) Linear; b) Câmaras irregulares a direita. Fonte: Dutra (2013).

O primeiro padrão está, provavelmente, ligado a características estruturais das formações ferríferas, e o segundo as características da canga, podendo haver uma mistura entre os dois padrões. O perfil das cavernas, na maioria das vezes, acompanha o relevo e apresenta leitos baixos e largos com piso sub-horizontal (PILÓ & AULER, 2005; PILÓ & AULER, 2009). Segundo esses autores, desmoronamentos e deslocamentos são comuns, sendo, muitas vezes, responsáveis pela formação dos salões e pelos inúmeros fragmentos rochosos presentes no piso dessas cavidades. Além disso, devido ao fato de grande parte delas estarem localizadas próximas a superfície, esses desmoronamentos resultam na presença comum de claraboias. Canalículos na base das paredes também são comuns, representando prolongamentos estreitos que conferem irregularidades ao perímetro da gruta. As entradas comumente se apresentam com pequenas dimensões, dando acesso a galerias mais amplas.

Depósitos químicos (Figura 2.2) são recorrentes, comumente coraloides, em locais com maior fluxo de ar, e crostas ferruginosas em locais mais internos com maior umidade do ar (PILÓ & AULER, 2009). A mineralogia desses depósitos insere-se nos grupos de óxidos de ferro, óxidos de alumínio, fosfatos, sulfatos e quartzo (TIMO, 2014). A ausência de fluxos de água perenes também é uma característica comum dessas cavidades.

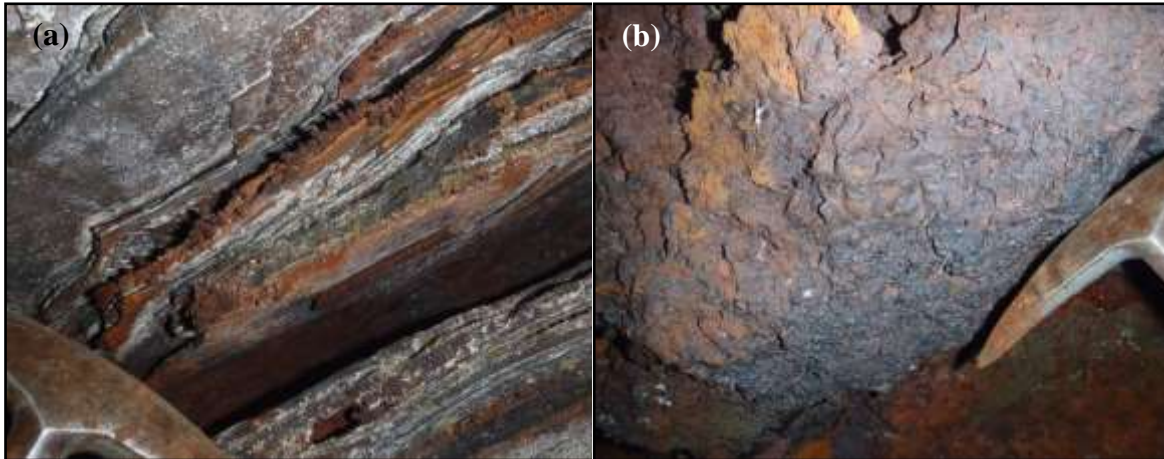


Figura 2.2 – Exemplos de espeleotemas comuns em cavernas inseridas em litologias ferríferas: (a) Coralóides; (b) Crosta ferruginosa.

2.2.2 - Características Geológicas

Estratigraficamente, cavidades desenvolvidas em formações ferríferas estão associadas aos Itabiritos da Formação Cauê, Grupo Itabira no Quadrilátero Ferrífero, e ao Jaspelito do Grupo Grão Pará em Carajás (AULER & PILÓ, 2005). No Quadrilátero Ferrífero, alvo desse estudo, as cavidades são comumente desenvolvidas no contato da canga com as formações ferríferas bandadas, podendo, em menor número, se desenvolver somente na canga.

As formações ferríferas, localmente conhecidas como itabirito consistem em uma rocha com protólito sedimentar de origem química, depositada em ambiente sedimentar oxidante e posteriormente metamorfisada. Trata-se de uma rocha estruturada por bandamentos alternados de porções compostas por silicatos e porções compostas por minerais de óxido de ferro. A alteração e lixiviação natural desses silicatos causa um processo de enriquecimento supergênico que gera uma concentração residual dos minerais de óxido de ferro e, conseqüentemente, a formação do minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero (PILÓ & AULER, 2005). Esse processo altera as características físicas e mecânicas do maciço e facilita a formação de vazios, que podem progredir para a formação de uma cavidade natural subterrânea nessa litologia.

A canga, também conhecida como capa laterítica, ocorre sobreposta às formações ferríferas bandadas e é caracterizada por uma baixa seleção e acentuada variação granulométrica, com seixos pouco arredondados à angulosos, tendo sido formada milhões de anos após a formação do minério de ferro. Segundo Auler e Piló (2005), no

Quadrilátero Ferrífero são observados dois tipos principais de canga: canga detrítica, gerada pela litificação dos fragmentos de rochas subjacentes caoticamente arranjados e canga estruturada, representada pelo itabirito muito intemperizado.

Ao contrário das rochas carbonáticas, a canga não apresenta atributos condicionantes para espeleogênese, sendo suficientemente consolidada para não sofrer abatimento quando as rochas subjacentes são submetidas a erosão (AULER & PILÓ, 2005). Dessa forma, o itabirito subjacente é erodido enquanto a canga é preservada, desenvolvendo um importante processo de formação das cavidades.

Em um estudo realizado em Carajás, Piló & Auler (2009) dividem os sedimentos clásticos encontrados nas cavidades em autogênicos, originados principalmente por processos gravitacionais de abatimento do teto e das paredes da caverna e alogênicos, advindos principalmente das claraboias ou cones sedimentares na entrada da cavidade. Depósitos químicos, por sua vez, são comumente coraloides, formados sobretudo em locais com maior fluxo de ar, e crostas ferruginosas, geradas em locais mais internos com maior umidade do ar (Piló & Auler 2009).

A Geologia Estrutural tem um papel fundamental no desenvolvimento da maioria das grutas, sobretudo quando a Formação Ferrífera aflora no interior da cavidade. De acordo com Piló & Auler (2005), as discontinuidades são as principais responsáveis pelos movimentos de massa no interior das cavernas, sendo esses movimentos fundamentais para a sua gênese. O acamamento do itabirito, por exemplo, é um importante fator no controle morfológico das cavernas nele inseridas. No caso da canga, são comumente observadas fraturas irregulares que facilitam o processo de alteração, influenciando fortemente o abatimento de blocos.

Do ponto de vista geomorfológico, as cavidades em formações ferríferas possuem três posicionamentos principais: bordas de lagoas, cabeceiras e bordas de drenagens e bordas de platôs, incluindo alta, média e baixa vertente (PILÓ & AULER, 2009). Os estudos de Pereira (2012) na Serra da Piedade indicam cavidades normalmente situadas em um relevo suave, em patamares altimétricos mais rebaixados e sem escarpa. Munaro (2011), por sua vez, afirma que essas cavidades ocorrem em quebras de relevo acompanhando a declividade natural do terreno. Outros trabalhos realizados na região

de estudo concordam com Munaro (2011), ao afirmar que essas cavidades estão associadas a rupturas de relevo típicas de platô recoberto por canga.

2.2.3 - Espeleogênese e Evolução

A gênese das cavidades naturais inseridas em formações ferríferas está normalmente relacionada a presença da cobertura de canga, sendo controlada ou pelo contato entre os dois materiais ou pelas variações de fácies no caso de grutas inseridas totalmente em canga (PILÓ & AULER, 2009; OLIVEIRA, 2011; DUTRA, 2013). No Quadrilátero Ferrífero estas cavidades estão, em sua maioria, inseridas no contato entre o Itabirito e a Canga, com sua gênese relacionada ao processo de percolação de fluídos que causa erosão e/ou dissolução na rocha encaixante (MUNARO, 2011). De acordo com Dutra (2013), após o alargamento inicial da cavidade por erosão e/ou dissolução, sua evolução parece ocorrer através de abatimentos.

É sabido o papel fundamental das estruturas na gênese desse tipo de cavidade, principalmente nos casos em que a formação ferrífera é aflorante em seu interior. Nesses casos, o plano de bandamento é a principal descontinuidade no controle morfológico da caverna, além da contribuição de sistemas de fraturas e juntas de alívio (PILÓ & AULER, 2009). Segundo esses autores, no caso de cavernas inseridas somente em canga, esse controle estrutural é dado a partir de juntas de alívio, que influenciam a ocorrência de abatimentos responsáveis pela evolução morfológica da cavidade.

Auler (2005) divide a espeleogênese das cavidades inseridas nesses ambientes basicamente em dois tipos: cavernas de erosão e cavernas de dissolução. As de erosão ocorrem normalmente imediatamente abaixo do manto de canga quando este é rompido por uma drenagem. Sua gênese está associada à remoção parcial do substrato friável, seguida por pequenos desmoronamentos laterais, lixiviação e carreamento deste material em direção à escarpa responsável pela evolução da caverna (Figura 2.3). Essas cavidades normalmente apresentam um único compartimento com dimensões reduzidas e condutos mais largos que estreitos. As cavernas de dissolução, por sua vez, são normalmente controladas pelo acamamento da formação ferrífera, aliado ao teor de material solúvel, sendo formadas inteiramente no itabirito. Normalmente apresentam vários compartimentos e extensões maiores.



Figura 2.3 – Caverna sustentada pela carapaça de canga. Fonte: Munaro (2011.)

Piló *et al.* (2015), por outro lado, afirma que apesar de a zona de contato irregular entre a canga e o itabirito apresentar pontos favoráveis para processos de erosão e dissolução, a gênese das cavidades inseridas neste contexto ainda não é confirmada, sendo estes processos, parte da evolução destas cavernas. Auler *et al.* (2015) observaram através de furos de sondagens, a presença de vazios isolados até centenas de metros abaixo da zona vadosa, sem influência de processos superficiais, excluindo a hipótese de gênese por erosão e dissolução, uma vez que ao contrário de cavidades carbonáticas, as cavidades em formações ferríferas não constituem rotas de drenagem subterrânea.

Estudos feitos por Parker *et al.* (2013) na região de Carajás, também atribuem a gênese dessas cavidades a comunidades microbianas. De acordo com os autores, trata-se de um ambiente com condições geoquímicas favoráveis a processos de redução microbiana do óxido de ferro, além de terem sido observadas feições microbianas, denominadas *snottites* nas cavernas estudadas. Esses pesquisadores afirmam ainda, ser necessário mais estudos para a confirmação desses processos.

2.1 - Caracterização Geotécnica Aplicada a Ambientes Subterrâneos

Do ponto de vista geotécnico, um maciço rochoso é definido como um conjunto de blocos de rocha justapostos e articulados, sendo o material que forma os blocos sua matriz, representada pela rocha intacta, e as superfícies que os limitam, as

descontinuidades. Trata-se, na maioria das vezes, de um meio altamente heterogêneo, com uma grande variedade de condicionantes e propriedades geológico-geotécnicas que tornam sua classificação uma tarefa extremamente complexa. Dependendo das modificações e solicitações aplicadas, o maciço se comporta de maneiras diferentes, de forma a alcançar o equilíbrio estático de seus blocos, uma vez que as características da rocha e das descontinuidades diferem de local para local em um maciço.

Diversos parâmetros devem ser analisados para um efetivo mapeamento geomecânico de uma cavidade, sendo a análise das descontinuidades considerada o principal parâmetro a ser aferido. Essa análise é utilizada na maior parte dos sistemas de classificação geomecânica de rochas, sendo as descontinuidades definidas como qualquer feição geológica, que determina planos ou superfícies de fraqueza que interrompem a continuidade do maciço, comumente planos de acamamento, superfícies de foliação, juntas, fraturas e falhas em geral. No entanto, as propriedades da rocha intacta não devem ser desconsideradas, tais como litologia, porosidade, permeabilidade, resistência e estado de alteração e fraturamento, além da presença ou ausência de água e sua taxa de fluxo. Além disso, é necessária uma análise cinemática das descontinuidades aferidas no maciço rochoso, bem como dos blocos delimitados por elas.

Após a descrição das características geológico-geotécnicas do maciço rochoso, valores são atribuídos para a sua compartimentação, a partir dos diversos sistemas de classificação geomecânica existentes. Ressalta-se que a variabilidade natural desses maciços não permite uma análise determinística dos parâmetros, sendo necessária a utilização de métodos probabilísticos. Esses sistemas procuram definir, caracterizar, correlacionar e quantificar os parâmetros geomecânicos de um maciço rochoso, sendo o método de caracterização e compartimentação mais utilizado.

2.1.1 - Caracterização da Rocha Intacta

A caracterização petrográfica do maciço consiste, sobretudo, da análise das suas características litológicas, aliadas ao estudo do estado de alteração e coerência do maciço rochoso. Do ponto de vista geotécnico, a litologia deve ser caracterizada pela sua composição, cor, textura e tamanho dos grãos, sendo indispensável uma caracterização litológica do maciço para uma melhor avaliação das suas propriedades

físico-mecânicas. Essas propriedades também são definidas pela ação de processos intempéricos, aferidos de acordo com o grau de alteração e de coerência do maciço rochoso.

Para o estudo do estado de alteração da rocha, recomenda-se uma análise visual do brilho e cor dos minerais e da rocha, além de uma análise tátil das condições de friabilidade. Sabe-se que em uma mesma litologia, quanto maior o grau de alteração da rocha, menos resistente ela se encontra. A análise do grau de alteração em uma mesma litologia é comumente realizada de acordo com a Classificação ISRM (1981) (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Classes de alteração das rochas (Modificado de ISRM 1981)

Termo	Classe
Rocha sã	W1
Rocha pouco alterada	W2
Rocha moderadamente alterada	W3
Rocha muito alterada	W4
Rocha completamente alterada	W5
Solo residual	W6

A coerência, por sua vez, é medida em ensaios *in situ* utilizando o martelo de geólogo e um canivete ou estilete, de modo a analisar a resistência que a rocha oferece quando submetida ao impacto do martelo e ao risco com lâmina de aço. Os graus de coerência e os critérios para sua utilização são definidos, com base em Guidicini *et al.* (1972) apud Serra e Ojima (1998) (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Graus de coerência (Guidicini *et al.* 1972 apud Serra e Ojima 1998)

Siglas	Denominações	Características da rocha
C1	Rocha coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo produzindo fragmentos de bordas cortantes. Superfície dificilmente riscável por lâmina de aço. Somente escavável a fogo.
C2	Rocha mediamente coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo. Superfície riscável com lâmina de aço. Escavável a fogo.
C3	Rocha pouco coerente	Quebra com facilidade ao golpe do martelo produzindo fragmentos que podem ser partidos manualmente. Superfície facilmente riscável com lâmina de aço. Escarificável.
C4	Rocha incoerente	Quebra com pressão dos dedos desagregando-se. Pode ser cortada com lâmina de aço. Friável e escavável com lâmina.

Ensaio de Resistência

A resistência do material rochoso é um parâmetro fundamental, utilizado nos principais sistemas de classificação de um maciço. Os ensaios menos onerosos mais comuns são o ensaio de resistência à compressão puntiforme, realizado em laboratório e o ensaio com o Martelo de Schmidt, que pode ser realizado *in situ*. Ambos apresentam índices correlacionáveis a resistência a compressão uniaxial da rocha. Pode-se mencionar ainda, uma faixa de valores de resistência das rochas estimada pela ISRM (1981) a partir de simples testes de campo com o martelo do geólogo (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Resistência a compressão uniaxial estimados a partir de testes de campo com o martelo do geólogo. (Modificado de ISRM, 1981).

Grau	Característica	Resistência Compressão Uniaxial (MPa)	Descrição em campo
R6	Extremamente resistente	> 250	Material rochoso é somente lascado sob repetidos golpes de martelo.
R5	Muito resistente	100 - 250	Requer várias batidas de martelo para quebrar a rocha intacta gerando fragmentos com bordas cortantes; Não é riscável pelo canivete;
R4	Rochas resistentes	50 - 100	Espécies quebradas por alguns golpes de martelo; superfície dificilmente riscável pelo canivete; Escavável a fogo.
R3	Rochas mediamente resistentes	25 - 50	Golpe firme com o martelo de geólogo quebra a rocha; o canivete apenas risca a superfície. Escavável a fogo.
R2	Rochas brandas	5 - 25	Quebra-se com um único golpe de martelo; As bordas dos fragmentos podem ser quebradas pela pressão dos dedos. O canivete corta o material. Escavação mecanizada.
R1	Rochas muito brandas	1 - 5	Esfarelamento sobre um golpe firme com o martelo de geólogo, pode ser conformado pelo canivete; Desplacamentos ao longo da foliação sob pressão dos dedos; Escavação mecanizada.

Grau	Característica	Resistência	
		Compressão Uniaxial (MPa)	Descrição em campo
R0	Solos Estruturados á rochas muito brandas	0.25 - 1	Penetrada pela ponta do dedo polegar; moldada pelas mãos; facilmente penetrada pelo canivete e martelo de geólogo; Escavada por equipamento manual.

- Resistência a Compressão Puntiforme:

O ensaio de carga pontual, desenvolvido por Franklin (1985), consiste em provocar a ruptura de amostras rochosas, por meio de uma força pontual crescente. A amostra de rocha é inserida entre duas ponteiros cônicos de metal duro, que provocam seu fraturamento, paralelamente ao eixo da carga. De acordo com Franklin (1985), a resistência de carga pontual é dada pela Equação 2.1, sendo I_s a resistência de carga pontual, P a carga de ruptura e D_e o diâmetro equivalente da amostra, dado pela distância entre as pontas dos cones.

$$I_s = P/D_e^2 \quad \text{Equação 2.1}$$

O índice de carga pontual (I_s) é relatado pelo autor como a resistência de carga pontual em uma amostra de 50 mm de diâmetro. Para ensaios realizados em amostras com outros diâmetros, o valor é multiplicado por um fator corretivo (F), dado pela Equação 2.2.

$$F = \left(\frac{D}{50}\right)^{0,45} \quad \text{Equação 2.2}$$

A metodologia mais conhecida, desenvolvida pela ISRM (2007), consiste na medição do índice de carga pontual (I_s), para rochas isotrópicas, e do índice anisotrópico de carga pontual (I_a), para rochas anisotrópicas. Esse último é dado pela proporção entre os índices nas direções de maior e menor fraqueza da rocha amostrada.

De acordo com Brady & Brown (1985), a correlação mais comum entre a resistência a compressão uniaxial (σ_c) e o índice puntiforme (I_s) é dada pela Equação 2.3 de Broch & Franklin (1972). Chau & Wong (1996), por outro lado, afirmam que essa correlação não é muito precisa, uma vez que pode levar a falsos resultados, sobretudo em rochas de

baixa resistência e maciços muito anisotrópicos.

$$\sigma_c \approx 24 * I_{s(50)} \quad \text{Equação 2.3}$$

Segundo Kahraman (2001) a proporção entre a resistência a compressão uniaxial e o índice de carga pontual pode variar de 15 a 50 de acordo com os diferentes tipos de rochas, podendo causar erros superiores a 100%. O autor fez ensaios em rochas de 48 localizações diferentes e chegou a equação de correlação Equação 2.4, com exceção do carvão mineral, para o qual foi estabelecida outra equação de correlação.

$$\sigma_c = 8,41 I_{s(50)} + 9,51 \quad \text{Equação 2.4}$$

- Ensaio com Esclerômetro ou Martelo de Schmidt

Inicialmente projetado para estimação da resistência de corpos de concreto, o martelo de Schmidt foi, posteriormente, adaptado por diversos autores para o estudo de maciços rochosos. Estudos feitos por Brandi *et al.* (2015) em cavidades naturais subterrâneas em terrenos ferríferos, mostram resultados animadores ao usar o Martelo de Schmidt para a definição das resistências geomecânicas. Ressalta-se que esse tipo de ensaio tem um caráter não destrutivo, sendo indicado para análise da resistência de cavidades naturais, uma vez que estas não podem sofrer nenhum tipo impacto de acordo com a legislação ambiental brasileira.

Foram criadas diversas normas técnicas para garantir que os dados gerados pelo Martelo de Schmidt sejam consistentes, confiáveis e possam ser reproduzidos. Entre elas pode-se citar a ISRM (1978) e ASTM D5873 (2000) apud Aydin & Basu (2005), que podem ser aplicadas em maciço rochoso.

2.1.2 - Caracterização das Descontinuidades

Quando se trata de ambientes subterrâneos, deve-se dar ênfase ao estudo das diferentes famílias de descontinuidades, uma vez que elas condicionam as propriedades e a compartimentação dos maciços rochosos em termos de resistência, deformabilidade e coeficiente hidráulico, além de terem o poder de modificar radicalmente o comportamento do maciço.

Devem ser analisados espaçamento, persistência, abertura, preenchimento, resistência das paredes, rugosidade e percolação de água. Segundo a ISRM (1981), o espaçamento e a persistência são, respectivamente, a distância entre duas descontinuidades adjacentes de uma mesma família e a extensão em comprimento da descontinuidade. A abertura é dada pela distância medida na perpendicular entre as paredes de uma descontinuidade. Essa abertura pode estar preenchida, sendo necessário conhecer a natureza do material de preenchimento, uma vez que ele pode afetar consideravelmente o comportamento do maciço rochoso quanto à resistência ao cisalhamento e à deformabilidade. A abertura e o material de preenchimento das descontinuidades influenciam ainda o comportamento hidráulico do maciço. A rugosidade é estimada a partir das ondulações na superfície da descontinuidade, sendo fundamental na análise da resistência ao cisalhamento das suas paredes. A Figura 2.4 mostra os perfis de rugosidade segundo a ISRM (1981).

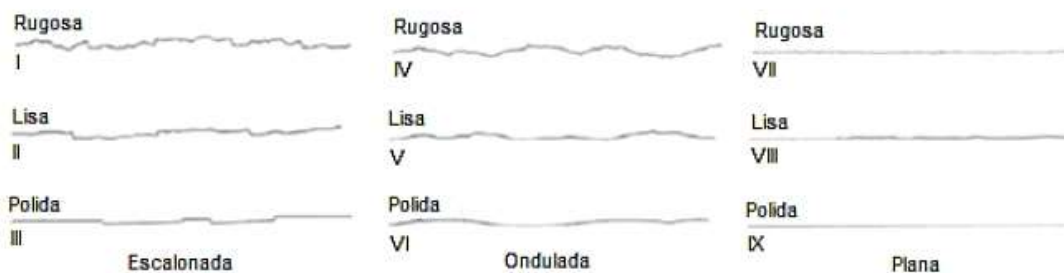


Figura 2.4 – Perfis de rugosidade (ISRM 1981).

A resistência das paredes é analisada através do estado de alteração da rocha junto às paredes da descontinuidade, além da análise dos fatores já citados, como abertura, preenchimento e rugosidade das descontinuidades.

2.1.3 - Classificações Geomecânicas

As classificações geomecânicas foram desenvolvidas baseadas nas diversas características do maciço rochoso, com o objetivo principal de definir zonas de maior fragilidade. Para Bieniawski (1989), os objetivos fundamentais das classificações geomecânicas são identificar os principais parâmetros que influenciam no comportamento do maciço rochoso e dividir o maciço em zonas com comportamentos similares, além de fornecer uma base para o entendimento de cada classe de rochas. Apesar de nenhuma dessas classificações ter sido criada com foco para cavidades naturais subterrâneas, elas podem ser utilizadas e adaptadas para esse intuito. Ressalta-se que esses ambientes são relativamente mais estáveis quando comparados a escavações/túneis, uma vez que a evolução da abertura das cavidades naturais está

relacionada à uma escala do tempo geológico, enquanto que as escavações são ambientes desenvolvidos recentemente, em uma velocidade muito maior.

São descritas nesse item, as principais características dos quatro sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos aplicáveis a ambientes subterrâneos, comumente encontrados na literatura: *Rock Structure Rating* (RSR), *Rock Mass Rating* (RMR), *Rock Mass Quality* (Q) e *Rock Mass Index* (RMI), além do *Rock Quality Designation* (RQD), que não é mais considerado um sistema de classificação, mas um importante parâmetro de outros sistemas.

Rock Quality Designation Index (RQD)

Desenvolvido por D. U. Deere em 1968, esse sistema foi aplicado inicialmente somente em amostras de furos de sondagem, funcionando como um indicativo de zonas de rocha de baixa qualidade no perfil do furo. É definido pela porcentagem de pedaços intactos com mais de 10 cm, em furos com no mínimo 54,7 mm de diâmetro (Equação 2.5).

$$RQD = \frac{\text{Soma dos comprimentos dos pedaços intactos } > 10\text{cm}}{\text{Comprimento do testemunho}} \quad \text{Equação 2.5}$$

Em caso de não disponibilidade de testemunhos de sondagem, Palmstrom (1982) sugeriu uma estimativa do RQD a partir do índice J_v , definido pela somatória do número de descontinuidades por unidade de volume (Equação 2.6 e 2.7). Sabe-se que S_i é o espaçamento entre as descontinuidades em metros para determinada família.

$$RQD = 115 - 3,3J_v \quad \text{Equação 2.6}$$

$$J_v = \sum \frac{1}{S_i} \quad \text{Equação 2.7}$$

(para $J_v < 4,4$; $RQD = 100\%$)

(para $J_v > 35$; $RQD = 0$)

Outra correlação foi estabelecida por Priest e Hudson (1976), onde o índice RQD é calculado a partir da frequência das descontinuidades por metro linear (λ) e do espaçamento médio das mesmas (S). Utilizam-se, nesse caso, as Equações 2.8 e 2.9 para definição do índice RQD, sendo N número de descontinuidades e L o comprimento da linha de mapeamento.

$$RQD = e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda + 1) * 100 \quad \text{Equação 2.8}$$

$$\lambda = \frac{N}{L} \quad \text{Equação 2.9}$$

Essas estimativas são de extrema importância na representação da qualidade do maciço *in situ*, buscando reduzir os efeitos da orientação dos testemunhos. Atualmente, esse sistema é um dos parâmetros utilizados em sistemas de classificação mais usuais, tais como RMR e Q descritos a seguir. Dessa forma o índice RQD não é mais utilizado para classificação de maciços, sendo apenas um parâmetro analisado em alguns dos principais sistemas de classificação.

Rock Structure Rating (RSR)

O sistema RSR foi desenvolvido por Wickham *et al.* (1972) apud Bieniawski (1989), para descrição da qualidade do maciço rochoso e seleção de suporte apropriado para túneis. Segundo os autores, duas características gerais podem influenciar o comportamento do maciço rochosos no caso de escavações subterrâneas, os parâmetros geológicos e os parâmetros de construção. O primeiro, baseado nas características estruturais e litológicas do maciço, e o segundo, nas características de escavação.

Bieniawski (1989) afirma a importância desse sistema como o primeiro a utilizar avaliações numéricas para correlacionar a qualidade do maciço com as dimensões das escavações e suportes necessários, sendo base para os sistemas mais modernos de classificação de maciço rochoso. Atualmente, trata-se de um sistema pouco utilizado e indicado, uma vez que seu desenvolvimento ficou restrito a sua criação, dando lugar aos demais sistemas, mais completos e atuais.

Rock Mass Rating (RMR)

O sistema RMR foi desenvolvido por Bieniawski em 1973, e revisado em 1989. Baseia-se em seis parâmetros geológico-geotécnicos principais, aos quais são atribuídos pesos relativos para obtenção de um índice RMR, que pode variar entre 0 e 100.

Os parâmetros analisados pelo sistema são a resistência do material à compressão uniaxial, o RQD, o espaçamento e as condições das discontinuidades (rugosidade, persistência, abertura e preenchimento), as condições hidrogeológicas e a orientação das

descontinuidades em relação a escavação.

É importante mencionar a necessidade de, antes de se iniciar o processo de classificação, dividir o maciço em regiões estruturais com características semelhantes, sendo cada uma classificada separadamente. Na maioria dos casos, essas divisões são coincidentes com grandes estruturas como zonas de contato, zonas de cisalhamento, falhas, diques, dentre outras diferenças estruturais (BIENIAWSKI, 1989).

Os pesos atribuídos para cada parâmetro são, posteriormente, somados para a determinação do valor de RMR e, conseqüentemente, da qualidade do maciço rochoso (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Classe e significado das classes de rochas segundo a classificação geomecânica RMR. Fonte: adaptado de Bieniawski (1989).

Peso	81 a 100	61 a 80	41 a 60	21 a 40	< 21
Tipo de classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Rocha de muito boa qualidade	Rocha de boa qualidade	Rocha de qualidade razoável	Rocha de má qualidade	Rocha de muito má qualidade

Rock Tunneling Quality Index (Q)

Sistema proposto por Barton, Lien e Lundle em 1974, baseado no crescente número de escavações subterrâneas, sendo utilizado para determinação das características do maciço rochoso e dos principais requisitos de suporte para túneis. O índice Q é dado pela Equação 2.10, baseada em seis parâmetros: RQD, número de famílias de descontinuidades (Jn), índice de rugosidade das famílias mais desfavoráveis (Jr), grau de alteração ou preenchimento da descontinuidade menos resistente (Ja), fluxo de água (Jw) e estado de tensão do maciço (SRF). Os pesos ou notas atribuídos a cada parâmetro são sugeridos por tabelas e definidos segundo as características observadas no maciço rochoso ou em testemunhos de sondagens.

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) * \left(\frac{J_r}{J_a}\right) * \left(\frac{J_w}{SRF}\right) \quad \text{Equação 2.10}$$

A partir da equação, é possível observar a relação dos parâmetros RQD e Jn com a média do tamanho dos blocos, dos parâmetros Jr e Ja com a resistência ao cisalhamento entre eles e dos parâmetros Jw e SRF com a condição de tensão do maciço analisado (BIENIAWSKI, 1989). Por fim, a partir do cálculo de Q, obtém-se um valor numérico

que, em escala logarítmica, que varia de 0,001 a 1000. A Tabela 2.7 apresenta o padrão geomecânico do maciço de acordo com este sistema de classificação.

Tabela 2.5 – Classificação do maciço rochoso de acordo com o sistema Q

Classe	Padrão geomecânico	Q
I	Excelente	> 400
II	Ótimo	100 - 400
III	Muito bom	40 - 100
IV	Bom	10 - 40
V	Regular	4 - 10
VI	Ruim	1 - 4
VII	Muito ruim	0,1 - 1
VIII	Extremamente ruim	0,01 - 0,1
IX	Péssimo	0,0001 - 0,01

Barton *et al.* (1974) ainda relacionam o índice Q com o comportamento e o suporte necessário para escavações subterrâneas através de um parâmetro adicional denominado Diâmetro equivalente (Figura 2.5). Esse parâmetro é calculado a partir do vão, diâmetro ou altura da parede da escavação por um índice ESR, relativo ao ambiente subterrâneo em análise (Equação 2.11 e Tabela 2.6).

$$De = \frac{\text{Vão, diâmetro ou altura da escavação (m)}}{ESR} \quad \text{Equação 2.11}$$

Tabela 2.6 – Valores de ESR de acordo com o tipo de escavação. Fonte: Barton *et al.* 1974.

Classe	Tipo de escavação	ESR
A	Cavidades minerais temporárias	3 a 5
B	Poços verticais de seção circular	2,50
	Poços verticais de seção quadrada ou retangular	2,00
C	Cavidades minerais definitivas, túneis de aproveitamento hidráulico, túneis piloto, túneis de desvio, escavações superiores de grandes cavidades	1,60
D	Cavernas de armazenagem, estações de tratamento de água, pequenos túneis rodo-ferroviários, chaminés de equilíbrio, túneis de acesso	1,30
E	Centrais subterrâneas, túneis rodo-ferroviários de grandes dimensões, abrigos de defesa, bocas de entrada, intersecções	1,00
F	Centrais nucleares subterrâneas, estações de caminhos de ferro, fábricas	0,80

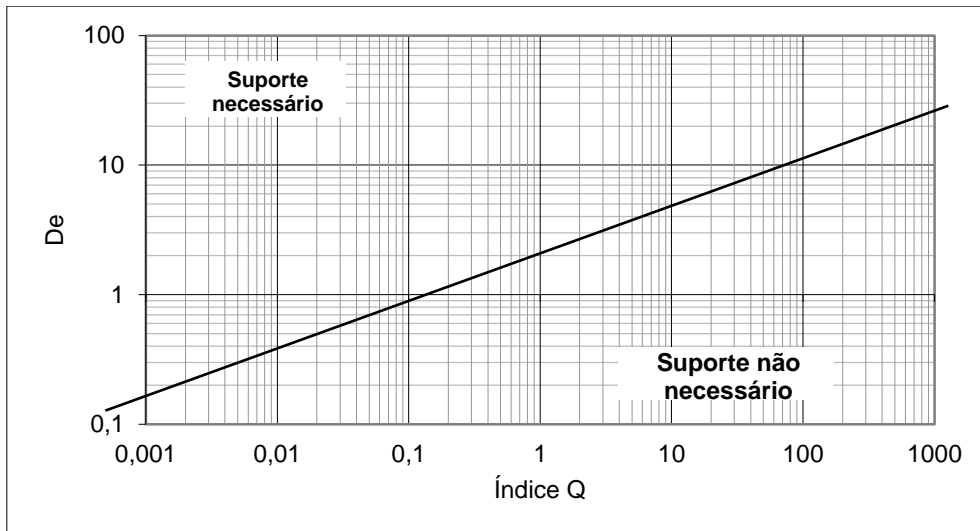


Figura 2.5 – Relação entre o diâmetro equivalente (De) e o índice Q para determinação da necessidade de suporte. Fonte: Modificado de Barton *et al.* 1974.

Rock Mass Index (R_{Mi})

Esse sistema combina, basicamente, a resistência a compressão uniaxial da rocha intacta com as principais características das descontinuidades, sendo essas as principais responsáveis pela redução da resistência mecânica de um maciço (PALMSTROM, 1996). Dessa forma, utiliza-se uma equação básica com esses dois parâmetros para a representação do valor de R_{Mi} (Equação 2.12 e Figura 2.6).

$$R_{Mi} = \sigma_c * J_P \tag{Equação 2.12}$$

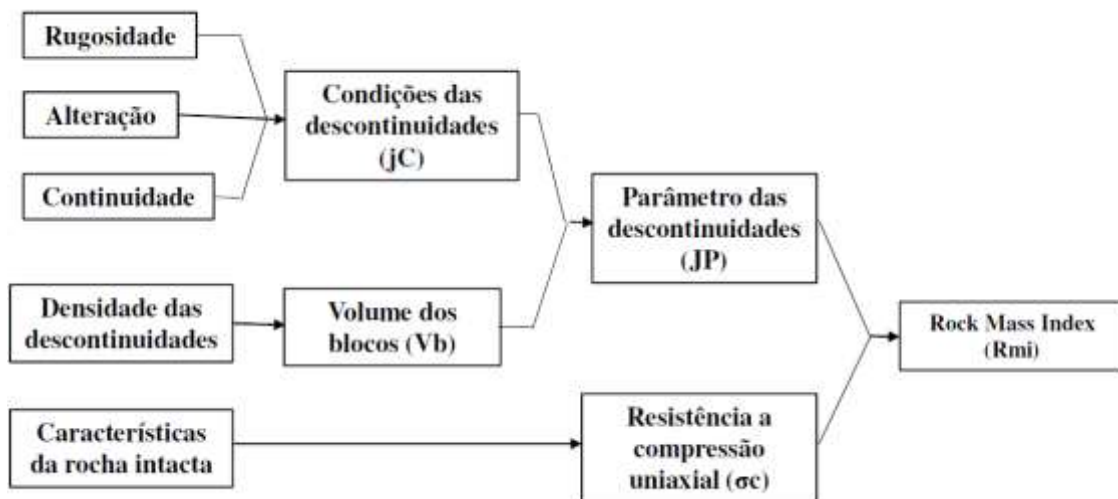


Figura 2.6 – Princípios do sistema RMI. Fonte: Modificado de Palmstrom 1996.

O volume do bloco (V_b) é considerado o principal parâmetro do sistema, dado, sobretudo, pelo espaçamento e frequência das juntas. Palmstrom (1996) apresenta

diversas maneiras de se calcular o volume do bloco, entre elas pode-se ressaltar a partir do espaçamento das descontinuidades e a partir da contagem volumétrica de juntas (Jv), representados, respectivamente, pelas equações 2.13 e 2.14.

$$Vb = (S1 * S2 * S3) / (\sin \gamma1 * \sin \gamma2 * \sin \gamma3) \quad \text{Equação 2.13}$$

$$Vb = \beta * Jv^{-3} * (1 / (\sin \gamma1 * \sin \gamma2 * \sin \gamma3)) \quad \beta = 20 + 7 * \left(\frac{S3}{S1}\right) \quad \text{Equação 2.14}$$

Sendo $\gamma1$, $\gamma2$ e $\gamma3$ dados pelos ângulos entre as famílias de descontinuidades e S1, S2 e S3 dados pelo espaçamento entre as descontinuidades de uma mesma família. Sabe-se ainda que $S1 < S2 < S3$.

No caso de maciço com menos de três famílias de descontinuidades ou quando não é possível medir a sua atitude, Palmstrom (1996) utiliza diversas equações como alternativas. Uma delas baseia-se no espaçamento médio (Sm) e no comprimento médio (Lm) das descontinuidades, dada pela Equação 2.15. Para descontinuidades persistentes, utiliza-se um valor máximo de Lm igual a quatro.

$$Vb = \beta * Jv^{-3} \quad \beta = 20 + 21 * L/S * nj \quad \text{Equação 2.15}$$

O valor de nj varia de acordo com o número de famílias de descontinuidades, dados pela Tabela 2.7. Nesse caso, o valor de Jv é dado pelo inverso de Sm.

Tabela 2.7 – Valor de nj de acordo com o número de famílias de descontinuidades.

Famílias de descontinuidades	Nj
Três mais aleatórias	3,5
Três	3
Duas mais aleatórias	2,5
Duas	2
Uma mais aleatórias	1,5
Uma	1

O valor de JP, descrito pelo autor a partir das equações 2.16 e 2.17, pode variar de (0), em maciços muito fragmentados, a (1), quando aplicado na rocha intacta.

$$JP = 0,2\sqrt{jC} * Vb^D \quad \text{Equação 2.16}$$

$$D = 0,37jC^{-0,2} \quad \text{Equação 2.17}$$

O fator de condição das juntas (jC) é obtido a partir da rugosidade (jR), do grau de

alteração (j_A) e da continuidade (j_L), sendo dado pela Equação 2.18.

$$j_C = j_L \left(\frac{j_R}{j_A} \right) \quad \text{Equação 2.18}$$

Os fatores j_R e j_A são similares aos parâmetros rugosidade das juntas (J_r) e grau de alteração (J_a) descritos no sistema Q de Barton. Por outro lado, o conceito de comprimento e continuidade das juntas (j_L), foi introduzido pelo sistema R_{Mi} com o objetivo de representar o efeito da persistência das descontinuidades.

Os parâmetros j_L , j_R e j_A são obtidos a partir da avaliação das características do maciço e inserção em tabelas desenvolvidas para tal. A partir dos dados apresentados, obtém-se o valor de R_{Mi} e, conseqüentemente, a caracterização da qualidade do maciço e sua resistência (Tabela 2.8).

Tabela 2.8 – Sistema de classificação R_{Mi}. Fonte: Modificado de Palmstrom 1996.

CLASSIFICAÇÃO		
Termo para R_{Mi}	Termo para resistência do maciço rochoso	R_{Mi}
Extremamente baixo	Extremamente fraco	< 0,001
Muito baixo	Muito fraco	0,001 - 0,01
Baixo	Fraco	0,01 - 0,1
Moderadamente alto	Moderadamente forte	0,1 - 1
Alto	Forte	1 - 10
Muito alto	Muito forte	10 - 100
Extremamente alto	Extremamente forte	> 100

2.1.4 - Estabilidade de cavidades naturais

A estabilidade de cavidades naturais é um assunto em amplo desenvolvimento, ainda com poucas publicações, sendo encontrados estudos apenas em ambientes carbonáticos. Szunyogh (2010) indica passos para esse tipo de análise, dados inicialmente por uma análise pormenorizada das famílias de descontinuidades, seguida de uma investigação de possíveis áreas de risco, com avaliação de blocos de rochas já tomados por rachaduras ou suspensos e da presença e amplitude dos sedimentos no piso. Deve-se ainda, segundo o autor, avaliar se os processos citados estão em andamento ou finalizados, e utilizar métodos de suporte nesses locais caso necessário.

Em um estudo de estabilidade de uma cavidade de calcário na Turquia, Genis *et al.*

(2015) sugerem que a maior instabilidade nesse tipo de ambiente é causada pelas descontinuidades, com possibilidades de deslizamento, tombamento e queda de blocos no interior da galeria. Os autores afirmam ainda que a resistência a compressão uniaxial da rocha encaixante da cavidade é boa e que não representa um problema para a sua estabilidade.

A maioria dos trabalhos existentes sobre o assunto apresenta casos de cavernas turísticas e já impactadas pelo homem e indicam métodos de suporte e mitigação dos impactos.

No caso de cavidades em formações ferríferas pode-se citar os estudos de monitoramento desenvolvidos por Brandi *et al.* 2015 em Carajás-Pa. Os autores obtiveram autorização de supressão de uma cavidade de alta relevância próxima a um empreendimento mineiro, tendo sido realizado um avanço controlado da lavra. Assim, foi apresentada uma possibilidade de redução em até 175 metros do raio de influência, onde até uma distância de 75 metros da galeria, não houve movimentação de estruturas geológicas sob condições de vibração do terreno.

3- CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 - Geologia

A região de estudo situa-se a sudeste do Quadrilátero Ferrífero, porção meridional do Cráton São Francisco. O Quadrilátero Ferrífero é conhecido como uma importante província mineral, devido principalmente à presença de ouro em unidades arqueanas e proterozóicas, além de depósitos de ferro que podem chegar a magnitudes mundiais. Segundo Dorr (1969), ele foi assim denominado devido aos vastos depósitos de minério de ferro que ocorrem nos limites de Itaúna, Mariana, Congonhas do campo e Itabira, formando um quadrilátero. Além disso, a região é caracterizada por um arranjo grosseiramente quadrangular de sinclinais paleoproterozóicas separados por estruturas antiformais irregulares em terrenos arqueanos e domos de rochas cristalinas arqueanas e proterozóicas (Noce, 1995 apud Rosière & Chemale, 2000).

3.1.1 - Estratigrafia

O Quadrilátero Ferrífero é dividido basicamente em quatro unidades litoestratigráficas: Complexos metamórficos, Supergrupo Rio das velhas, Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi, conforme a coluna estratigráfica definida por Alkmim & Marshak (1998).

Os complexos metamórficos são compostos por migmatitos e gnaisses de composição tonalítica, granodiorítica e granítica de idade mesoarqueana. Também são observados corpos intrusivos de composição granítica de dimensões variadas.

O Supergrupo Rio das Velhas é composto por terrenos *greenstone* de idade neoarqueana gerados por magmatismo máfico ultramáfico, metassedimentos químico exalativos vulcanoclásticos e metassedimentos siliciclásticos. É representado principalmente pelos grupos Nova Lima e Maquiné e caracterizado pelas inúmeras mineralizações auríferas em zonas de cisalhamento. O Grupo Nova Lima se insere no miolo do anticlinal de Mariana, com um contato tectônico contendo veios de quartzo intensamente deformados e uma foliação com aspecto milonítico (CAVALCANTI, 1999). De acordo com Cavalcanti (1999), o Grupo Nova Lima é formado por Sericita Quartzo Xisto alterados e raros níveis de filito carbonoso. O grupo Maquiné é normalmente composto por quartzitos, metapelitos e metaconglomerados.

O Supergrupo Minas, amplamente encontrado na região de estudo, é composto por rochas metassedimentares paleoproterozóicas e é subdividido nos grupos Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará. O Grupo Caraça é subdividido nas formações Moeda e Batatal, sendo a primeira composta basicamente por quartzitos sericíticos com níveis conglomeráticos, e a segunda, composta por filitos carbonosos sericíticos de grande importância nos processos deformacionais e mineralizantes devido a suas características reológicas e composicionais (CAVALCANTI, 1999). O Grupo Itabira ocorre bordejando a estrutura do Anticlinal de Mariana e é subdividido nas formações Cauê, com formações ferríferas do tipo Lago Superior, em contato gradacional com a Formação Gandarela, composta por mármore dolomíticos (DORR, 1969). O Grupo Piracicaba é composto por Metapelitos e Metarenitos das Formações Barreiro, Taboões, Fecho do Funil e Cercadinho, e finalmente, o Grupo Sabará é composto principalmente por metavulcânicas de ante país.

Segundo Dorr (1969) o Grupo Itacolomi é composto por uma sucessão de metarenitos e metaconglomerados, os quais provavelmente foram depositados em uma bacia do tipo rift em um ambiente continental a marinho raso. Trata-se de um Grupo restrito a região de Ouro Preto.

Estudos de Munaro (2011) indicam os metassedimentos do Grupo Nova Lima como litotipo predominante na região do Morro Santana em Mariana-MG, observados em escarpas e fundos de vale. Sobreposto a estes metapelitos estão as rochas ferríferas da Formação Cauê, comumente cobertas por uma camada de canga, sendo estas as rochas mais encontradas na superfície das escarpas. O contato entre estes grupos é tectônico ao longo de falhas de empurrão, sendo comum a presença de veios de quartzo auríferos (MUNARO, 2011). Associadas à Formação Cauê ocorrem coberturas detrítico-lateríticas constituídas por canga. Tais coberturas caracterizam depósitos elúvio-coluvionares cenozóicos, constituídos de fragmentos de tamanhos variados de hematita e/ou itabirito cimentados por oxi-hidróxidos de ferro (DORR, 1969). A maior parte das cavidades prospectadas na região está inserida em rochas do Grupo Itabira, como pode ser observado na Figura 3.1.

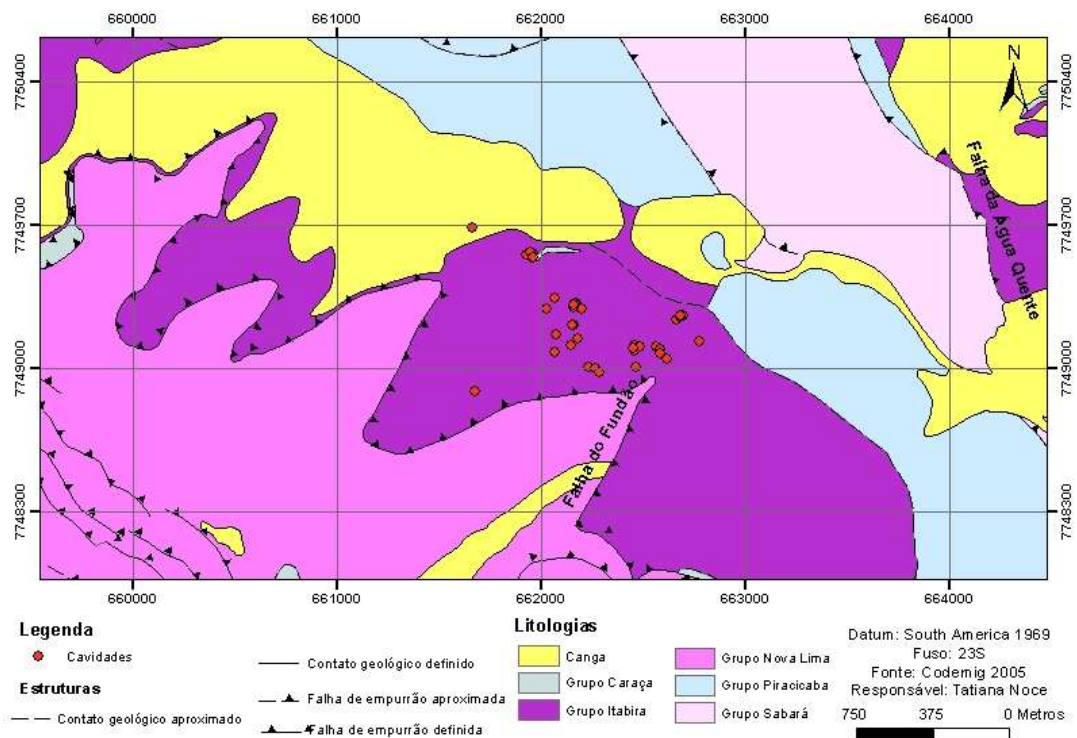


Figura 3.1 – Esboço do mapa geológico na região de estudo. Fonte: Modificado de Codemig, 2005.

3.1.2 - Geologia Estrutural

A área de estudo situa-se na Serra de Antônio Pereira, flanco nordeste do Anticlinal Mariana, com estruturação geral NW-SE em uma feição geomorfológica tipo hogback, sustentada pelas formações ferríferas (Munaro, 2011). Insere-se em um domínio estrutural caracterizado pela alta magnitude de deformação com indicadores cinemáticos mostrando transporte de leste para oeste (Nalini *et al.*, 1992). De acordo com os autores, a porção nordeste no anticlinal apresenta-se intensamente afetada pela falha do fundão, onde são observadas estruturas geológicas rotacionadas sinistralmente (Figura 3.2).

Endo e Fonseca (1992) apresentam a falha do fundão como uma zona de cisalhamento dúctil a dúctil-rúptil encontrada no contato entre os Supergrupos Minas e Rio das Velhas (Figura 3.2). Os autores a dividiram em quatro segmentos distintos, com a região do Gogo inserida no primeiro destes segmentos. Foram aferidas atitudes de 030/42 para foliação principal e 99/19 para lineação de estiramento mineral, sendo observadas múltiplas gerações de veios de quartzo.

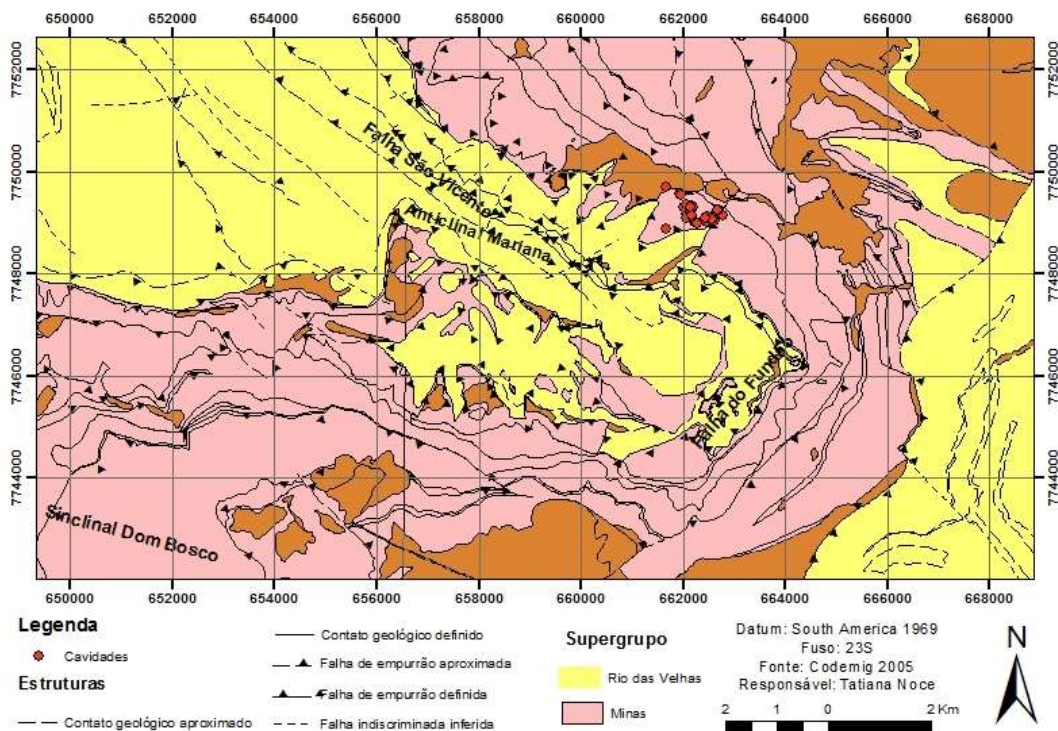


Figura 3.2 – Anticlinal de Mariana com direção NW-SE mostrando a falha do fundão e as cavidades cadastradas. Fonte: Modificado de Codemig 2005.

3.2 - Geomorfologia

O Quadrilátero Ferrífero é conhecido pela ampla relação entre seus atributos geológicos e as formas de relevo que compõe sua fisiografia, sendo sua geomorfologia resultado de uma evolução associada ao condicionamento estrutural e à atuação de processos desnudacionais diferenciados. Oliveira *et al.* (2011) delimitam dez unidades geomorfológicas distintas dentro da unidade espeleológica do Quadrilátero Ferrífero, sendo a área de estudo pertencente a unidade geomorfológica Ouro Preto – Antônio Pereira.

A unidade geomorfológica em questão delimita as Serras de Ouro Preto e de Antônio Pereira, seguindo cerca de 18 km na direção NW até a Serra do Caraça, platô mais elevado do Quadrilátero Ferrífero. No contexto evolutivo atual, a área de estudo apresenta altimetria variando entre 700 a 1350m (Figura 3.3 e 3.4). Nota-se que a porção mais rebaixada do recorte adotado corresponde à planície do Córrego Canelas, que deságua no Ribeirão do Carmo na área urbana de Mariana. A região apresenta um relevo escarpado e vertentes de declividade abrupta, os quais lhe conferem uma fisiografia serrana. Litologicamente, predominam nas terras altas itabiritos da Formação

Cauê e xistos do Grupo Nova Lima nas terras baixas.

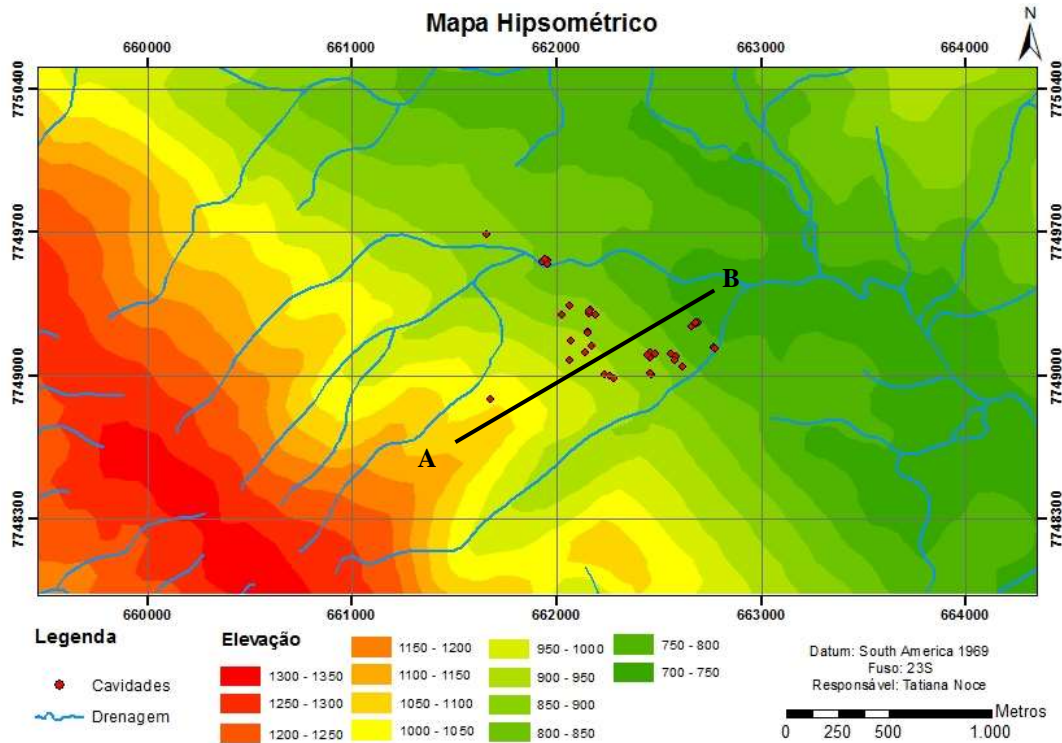


Figura 3.3 – Mapa hipsométrico da área de estudo. Fonte: Embrapa, 2006.

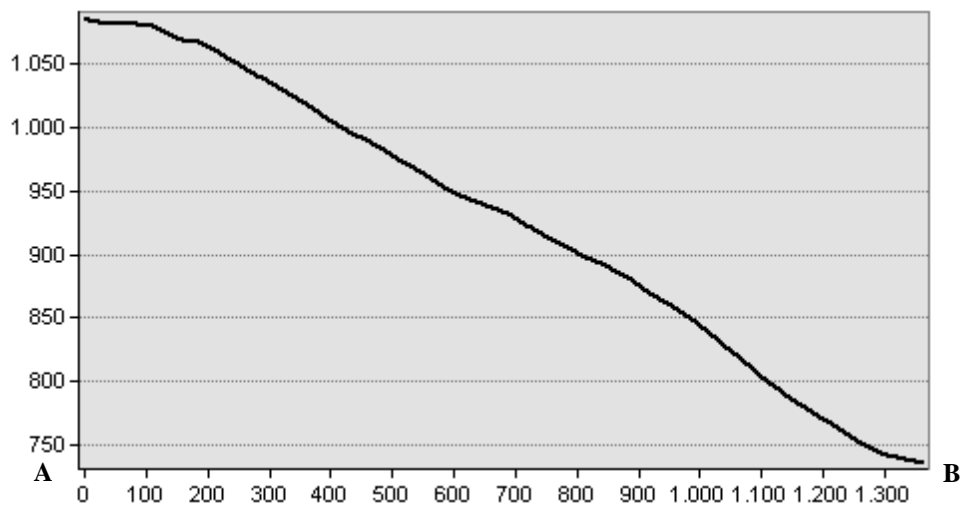


Figura 3.4 – Perfil topográfico da região de estudo.

Um perfil topográfico SW-NE, direção de maior inclinação da serra, mostra uma encosta regular retilínea, com declividade de aproximadamente 30% e topo convexo. Trata-se de uma estrutura *hogback* sustentada pela formação ferrífera, com inclinação geral acompanhando o acamamento S0 para NE. Apresenta topos sustentados pela carapaça de canga formando platôs inclinados, com encostas íngremes e drenagens encaixadas.

3.3 - Espeleologia e mineração

Os estudos realizados na área do projeto Gogo pela Vale S/A em parceria com as empresas Spelayon Consultoria e Carste Consultores Associados mapearam um total de 38 galerias classificadas em cavidades naturais, cavidades antropizadas e antigas minas de ouro (Figura 3.5). Nesses estudos foram cadastradas mais de 100 galerias na região.

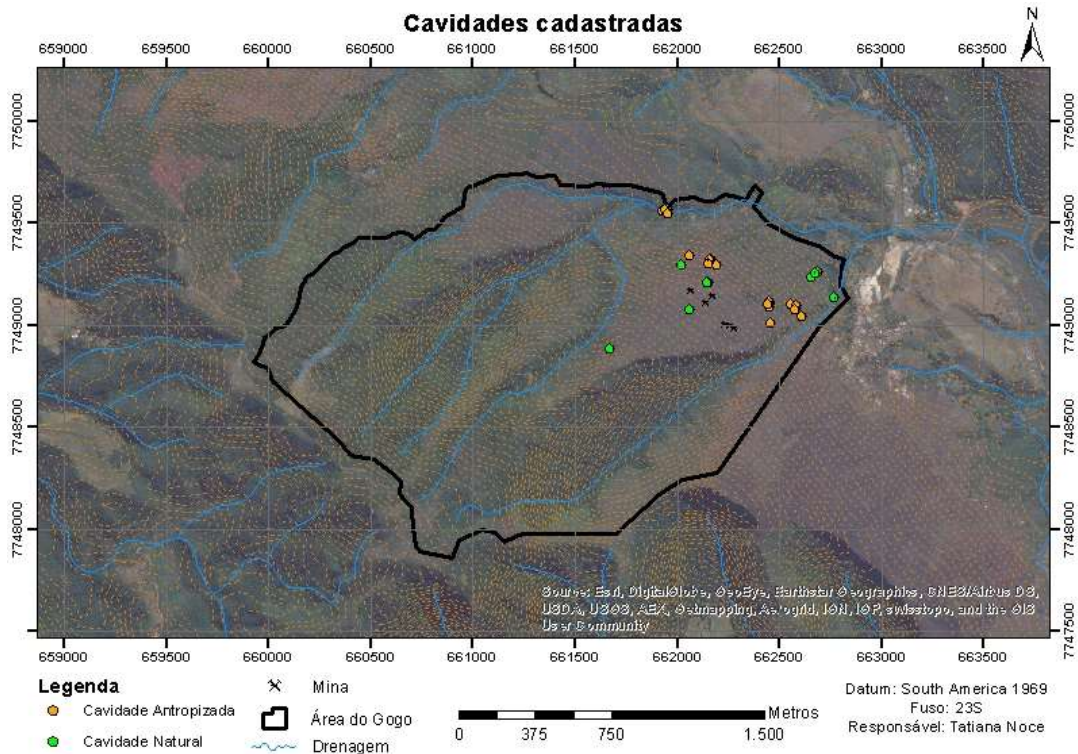


Figura 3.5 – Região de estudo com as cavidades já prospectadas.

Verificou-se que a maior parte das galerias são antigas minas de ouro subterrâneas, atualmente abandonadas, ou cavidades inicialmente naturais e posteriormente escavadas e/ou antropizadas.

A área é caracterizada pela abundância de registros de atividades mineradoras, tais como escavações superficiais, canais para a condução de água (aquedutos), galerias subterrâneas, buracos de ventilação das galerias (sarilhos), e artefatos utilizados para extração do ouro. A partir do século XVII a região de Ouro Preto e Mariana se tornou o berço da exploração aurífera no Brasil, inicialmente por aluvião, posteriormente por elúvios e por fim pela escavação de galerias. Essas galerias são amplamente encontradas na região do Morro Santana e Gogo e apresentam dimensões variadas.

4- METODOLOGIA

4.1 - Levantamento Bibliográfico e Cartográfico

Esse estudo teve início com o levantamento e análise da bibliografia existente acerca da estratigrafia, geologia estrutural, geomorfologia e fisiografia local e regional da área de estudo. Ainda nesse contexto, foram analisados diversos trabalhos envolvendo estudos espeleológicos em cavidades de minério de ferro e estudos geotécnicos e geomecânicos aplicados a ambientes subterrâneos. Finalizando essa primeira fase, foram confeccionados mapas base, com o auxílio dos *softwares ArcGIS 10.1* e *Google Earth Pro*, para utilização nas etapas de campo, obtidos a partir da aquisição das informações cartográficas e espeleológicas da área de estudo, aliado ao levantamento das cavidades já cadastradas.

Em uma segunda etapa foram desenvolvidos os primeiros trabalhos de campo e análise dos mapas existentes das cavidades cadastradas, de modo a selecionar cavernas a serem estudadas. Foram analisados os principais aspectos litológicos, as características naturais e antrópicas, a posição no relevo, o desenvolvimento linear, dentre outros aspectos. Ressalta-se que foram selecionadas, preferencialmente, cavidades totalmente naturais, visto que grande parte das cavidades existentes na área são antigas minas de ouro subterrâneas, atualmente abandonadas, o que não é o foco principal do trabalho.

Foram selecionadas 4 cavidades para a realização do estudo: SPB65, SPB10, SPD10 e SPD11 (Figura 4.1). Essa seleção baseou-se sobretudo na litologia das galerias e na sua inserção no relevo. Assim, buscando uma maior aplicabilidade do trabalho, foi selecionada uma cavidade inserida no contato entre xisto e itabirito, uma inserida inteiramente na canga e duas inseridas no contato entre o itabirito e a canga, principais litologias desse tipo de cavidade. Além disso, de acordo com a inserção no relevo, foram selecionadas duas cavidades inseridas em baixa para média vertente, com elevação entre 720 m e 750 m, uma em alta vertente, com elevação acima de 900 m e uma em média vertente, com elevação de cerca de 840 m (Figura 4.2 e Figura 4.3).

Ressalta-se que a galeria inserida no contato entre xisto e itabirito não é totalmente natural, sendo sua seleção devido as inúmeras estruturas geológicas de fácil observação e medição, propiciando uma melhor análise da geologia estrutural da região de estudo.

Além disso, foram observados diversos mecanismos de ruptura em ação que podem exemplificar as possíveis instabilidades físicas de cavidades naturais.

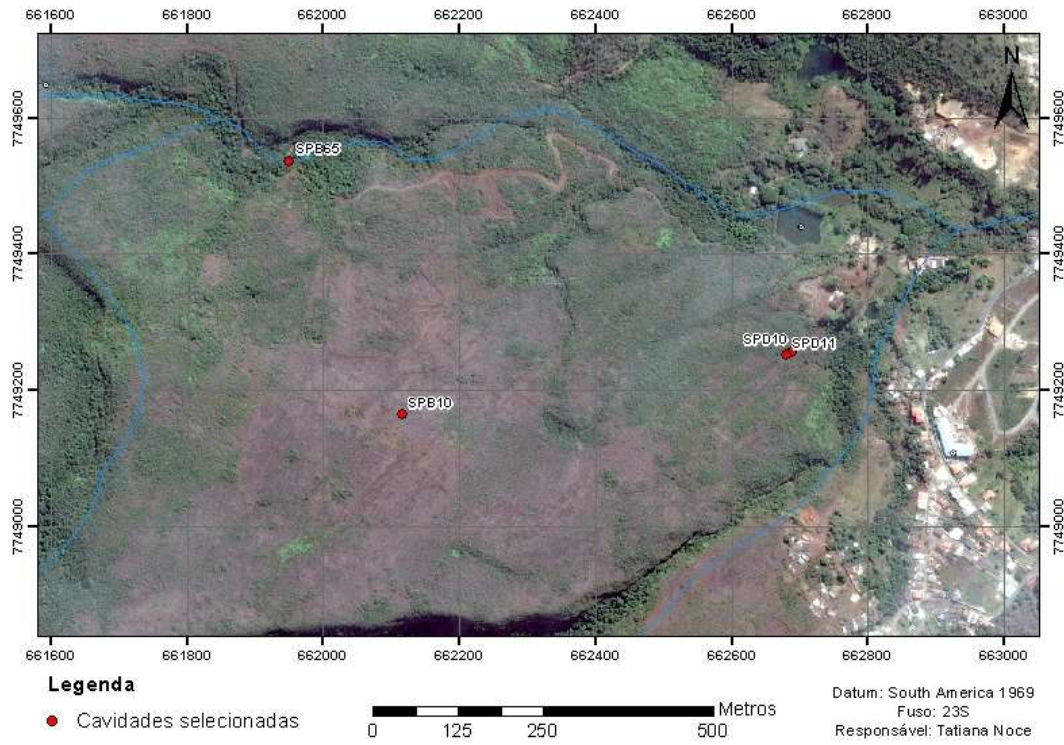


Figura 4.1 – Mapa de detalhe contendo cavidades selecionadas para o trabalho.

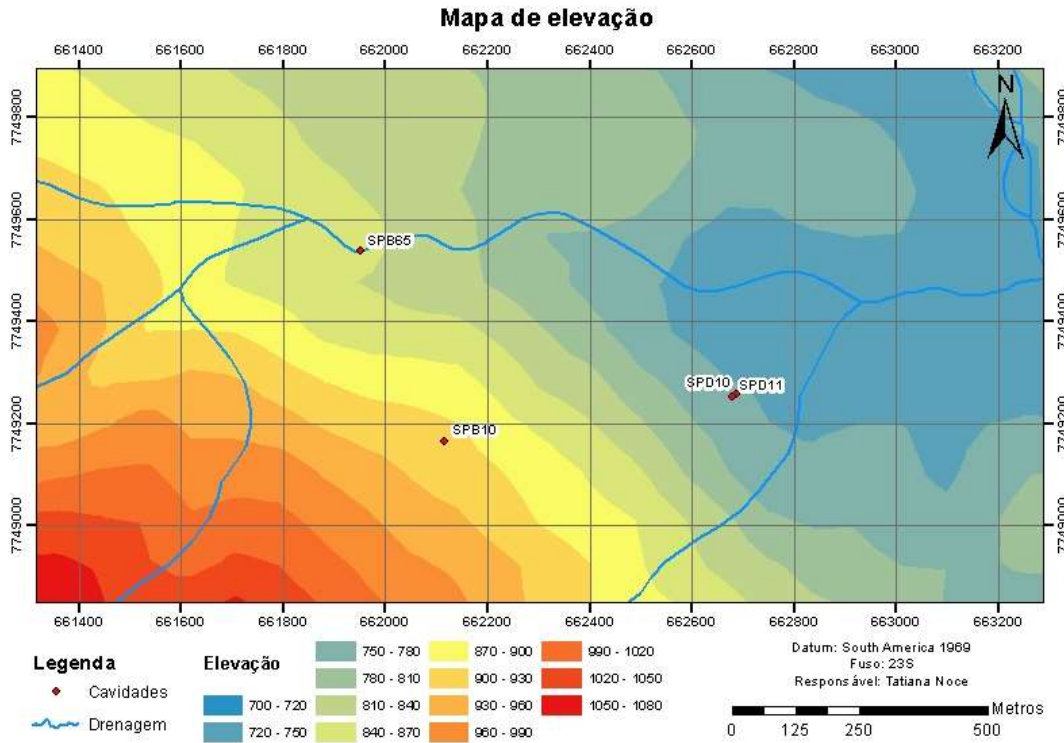


Figura 4.2 – Mapa de elevação do terreno mostrando inserção das cavidades selecionadas no relevo.



Figura 4.3 – Modelo digital da região mostrando a inserção das cavidades no relevo.

Os mapas, perfis e cortes das cavidades selecionados apresentados no trabalho são baseados no levantamento topográfico realizado pela equipe da Carste Consultores Associados, em anexo ao trabalho de Auler *et al.* (2012) (mapas e cortes no anexo).

4.2 - Caracterização do Maciço Rochoso

Após a seleção, foram desenvolvidos os trabalhos de mapeamento e caracterização geotécnica das cavidades, com a análise dos principais aspectos que possam afetar a fragilidade física destas.

Foi realizada uma investigação pormenorizada do maciço rochoso em que se inserem, com estudo da litologia, estado de alteração da rocha, coerência e condição das discontinuidades. O estudo do estado de alteração e coerência da rocha baseou-se, sobretudo nas tabelas 2.1 e 2.2, apresentadas no capítulo de revisão bibliográfica.

Foram analisados diversos aspectos relativos às discontinuidades, tais como espaçamento, orientação, persistência, abertura, preenchimento, resistência das paredes, rugosidade e percolação de água.

4.3 - Investigação Estrutural e análise cinemática

No interior e proximidades das cavidades selecionadas realizou-se um levantamento local das estruturas existentes, com medição de direção e mergulho, e a caracterização do tipo de estrutura. A partir das atitudes das estruturas caracterizadas, realizou-se uma análise cinemática de cada cavidade com o auxílio de projeções estereográficas utilizando o *software DIPS*. Essa investigação permitiu um reconhecimento das direções de esforços compressivos e trativos atuantes no meio, que permitiram elucidar as

possíveis movimentações das massas rochosas.

Foram então gerados modelos estruturais de cada cavidade, com a distribuição espacial das descontinuidades, suas características geométricas e principais tipos de estruturas, além da detecção de possíveis zonas de fraqueza. Esse modelo estrutural foi gerado com o auxílio dos *softwares ArcGIS 10.1 e AutoCAD 2013*.

Por fim, a partir da direção das estruturas observadas em conjunto com as seções orientadas de cada cavidade, foi utilizado o *software Unwedge 3.0* para analisar a possibilidade de geração de cunhas nas laterais e no teto das cavernas. É importante mencionar que utilização deste *software* se restringiu a definição da geometria das cunhas e suas prováveis movimentações, sem utilização de outras ferramentas como definição do fator de segurança e dimensionamento das cunhas.

Ressalta-se que as cavidades apresentam um campo magnético considerável, resultante principalmente da existência do mineral magnetita, comum em formações ferríferas que, em muitas vezes, impossibilita a utilização de bússola em seu interior. Assim, foram feitos testes de confirmação desse campo magnético utilizando um barbante e a bússola de geólogo. Para a realização do teste, estica-se um barbante desde cerca de 10 m para fora da caverna até cerca de 10 m para o seu interior próximo às paredes de itabirito. Ao longo do barbante são realizadas medidas de azimute, analisando sua variação (Figura 4.4). Nos casos confirmados o levantamento estrutural foi realizado a partir dos traços das estruturas presentes, os quais foram plotados na planta baixa da cavidade e posteriormente extraídos os valores de azimute.



Figura 4.4 – Teste com barbante e bússola para a verificação do magnetismo na cavidade SPB65.

4.4 - Ensaios de Resistência

Como não foram realizados furos de sondagem e os laboratórios da UFOP não disponibilizam equipamentos para ensaios de compressão uniaxial, optou-se por realizar ensaios de carga pontual, que oferecem índices correlacionáveis com a resistência a compressão uniaxial das rochas. Esse tipo de ensaio é amplamente reconhecido como um ensaio de referência para a classificação da resistência das rochas. Foi utilizado o aparelho PLT100 da marca GCTS *testing systems*, de acordo com as normas estabelecidas pela ISRM (2007). Foram utilizadas as equações de correlação entre a resistência a compressão uniaxial (σ_c) e o índice de carga pontual ($I_{s(50)}$) elaboradas por Broch & Franklin (1972) e Kahraman (2001), uma vez que tratam-se de equações aplicáveis a todas as litologias, não tendo sido encontradas equações específicas para as litologias estudadas (Equação 2.3 e Equação 2.4).

Além disso, foi realizada uma análise da resistência a partir de testes simples utilizando estilete e martelo de geólogo de acordo com a ISRM(1981) e apresentado na Tabela 2.3.

4.5 - Classificação Geomecânica

Após avaliar as principais características do maciço rochoso onde as cavidades estão inseridas, foram utilizados alguns dos principais sistemas de classificação existentes voltados ao ambiente subterrâneo, de modo a individualizar o maciço em regiões com características semelhantes.

Foram aplicados três sistemas de classificação para identificar aquele(s) que melhor se adequam a cavidades naturais subterrâneas inseridas em litologias ferríferas, além de tentar reduzir possíveis erros interpretativos. Utilizou-se assim, os sistemas *Rock Mass Rating* (RMR), *Rock Mass Quality* (Q) e *Rock Mass Index* (RMi).

O RQD, utilizado como parâmetro fundamental nos sistemas RMR e Q, foi calculado a partir da Equação 2.6 de Palmstrom (1982) descrita na revisão bibliográfica. Para o cálculo do índice RMR, foram utilizadas as Tabelas A.1 a A.4 apresentadas em anexo com os pesos referentes a cada parâmetro, que posteriormente foram somadas para obtenção do índice RMR e definição da qualidade do maciço segundo esse sistema

apresentada na Tabela 2.4. Ressalta-se, que como se tratam de cavidades naturais, optou-se por não utilizar a penalização da classificação de acordo com a orientação da galeria em relação a descontinuidade.

Os parâmetros J_n , J_r , J_a , J_w e SRF utilizados pelo sistema de classificação de maciços Q foram obtidos a partir de análise geológica pormenorizada aliada a inserção das características observadas em suas respectivas tabelas, que estão apresentadas em anexo pelas Tabelas A.5 a A.9. É importante mencionar, que para valores de RQD menores que 10, os autores utilizam o valor 10 para o cálculo de Q. A definição da qualidade do maciço segundo esse sistema foi feita utilizando a Equação 2.10 e inserindo o resultado na Tabela 2.5.

O cálculo do índice RM_i foi feito a partir das equações Equação 2.12, Equação 2.16, Equação 2.17 e Equação 2.18, sendo o volume do bloco calculado a partir da Equação 2.13 no caso de três ou mais famílias de descontinuidades, e da Equação 2.15 quando há menos de três famílias. Para a definição dos valores atribuídos aos parâmetros j_L , j_R e j_A foram utilizadas as Tabelas A.10 a A.12 em anexo. O índice RM_i foi então inserido na Tabela 2.8 para a definição da qualidade do maciço segundo esse sistema

4.6 - Definição da fragilidade da cavidade de acordo com os vãos

A fragilidade geotécnica das cavidades também foi analisada a partir do tamanho dos vãos, utilizando como base a Figura 2.5 e a Equação 2.11. Como se tratam de cavidades naturais subterrâneas, não correlacionáveis com nenhum tipo de escavação apresentado na Tabela 2.6, o índice ESR foi dado como 1, de modo a anular esse parâmetro na análise, considerando apenas o tamanho do vão. Além disso, a Figura 2.5 foi adaptada de acordo com as necessidades desse estudo, considerando as zona de não necessidade de suporte como um maciço relativamente estável, autoportante. Por outro lado, a zona de necessidade de suporte representaria um maciço com maior susceptibilidade a processos de instabilidades.

Dessa forma, a fragilidade geotécnica de cada galeria de acordo com o tamanho dos vãos foi feita a partir da relação entre esse parâmetro e a qualidade do maciço obtido a partir do sistema de classificação Q, excluindo-se o índice ESR por não se tratar de

escavações. Parte-se do princípio que seria incorreto comparar uma cavidade natural subterrânea, formada em uma escala de tempo geológico, com uma escavação antrópica, formada em uma escala de tempo bem menor.

4.7 - Zoneamento geotécnico

A partir das análises feitas anteriormente, foram definidos os principais aspectos a serem analisados para um efetivo zoneamento geotécnico de cavidades naturais inseridas em formações ferríferas. Foram confeccionados mapas baseados em cada aspecto geotécnico, definindo zonas de fragilidade de acordo com cada um. Elaborou-se então, uma metodologia para pontuar cada aspecto e conseguir efetivar o zoneamento geotécnico, objetivo do presente trabalho.

Por fim, foi feita a união destes mapas e pontuações de modo a elaborar um mapa de zoneamento geotécnico final para cada cavidade, dividindo em zonas de diferentes fragilidades.

6- CARACTERÍSTICAS ESPELEOLÓGICAS DAS CAVIDADES SELECIONADAS

6.1 - Caverna SPB65

Trata-se de uma caverna com entrada aparentemente natural, posteriormente ampliada pela mineração. A escavação foi feita em uma direção preferencial N-S acompanhando os veios de quartzo que marcam o contato entre o xisto e o itabirito, provavelmente associados aos Supergrupos Rio das Velhas e Minas, respectivamente. A galeria está inserida em um vale encaixado pertencente à bacia do Ribeirão do Carmo, o que explica a exposição dos xistos do Grupo Nova Lima. Seu entorno é caracterizado pela mata ciliar do Ribeirão, sendo a caverna situada em média vertente com acesso através de um alicie íngreme a partir da margem direita da drenagem (Figura 6.1a).

A projeção horizontal da galeria alcança 168 m, com 860,3 m² de área e 1368 m³ de volume (AULER *et al.* 2012). Devido às suas grandes dimensões, a caverna apresenta uma expressiva zona afótica com um padrão misto, composto por câmaras irregulares e um conduto principal preferencialmente linear e ascendente. Além disso, esta caverna é marcada por um desnível, que chega a 16,3 metros (AULER *et al.* 2012). Ocorre um estreitamento em direção à parte distal da galeria, comprovando sua semelhança morfológica com cavernas naturais em formações ferríferas. As Figuras A.1 e A.2 em anexo mostram os mapas cortes e perfis da galeria elaborados pela Carte Consultores Associados Ltda. e utilizados como base para a elaboração dos mapas do presente trabalho. Neles é possível observar a morfologia da galeria, bem como seu perfil ascendente.

É comum a presença de blocos e sedimentos clásticos grosseiros autóctones, crostas de óxido-hidróxidos, pigmentos brancos de origem micro-bacteriana e escorrimentos, que algumas vezes formam pequenos pingentes (Figura 6.1b). Por se tratar de uma caverna antropizada, observam-se, frequentemente, pilares de sustentação (Figura 6.2a). Há também um fluxo de água perene desde sua porção intermediária até a boca, além de guano em toda a sua extensão (Figura 6.2b).

Auler *et al.* 2012 classificaram esta galeria como de máxima relevância, em virtude de

espeleotemas únicos, táxons novos, alta riqueza de espécies, troglóbios não raros e espécies troglomórficas. Em uma análise mineralógica de pingentes, cortinas e estalagmites os autores encontraram altas concentrações de escorodita, um arsenato hidratado de ferro encontrado em zonas de alteração de depósitos metálicos. Trata-se de um mineral nunca antes detectado em cavernas desse tipo, incentivando a máxima relevância da galeria. Tal fato, provavelmente é explicado por se tratar de uma mina, e não de uma cavidade natural subterrânea, onde é necessário esse tipo de estudo.



Figura 6.1 – a) Boca mostrando mata ciliar em seu entorno. b) Pingentes.



Figura 6.2 – a) Pilar recoberto por pigmento branco. b) Interior da galeria mostrando passagem de água em toda a sua extensão.

6.2 - Caverna SPB10

A caverna SPB10 é classificada como natural, possuindo uma claraboia provavelmente antrópica (Figura 6.3a e b). Apresenta uma entrada larga em baixa escarpa com um desenvolvimento retilíneo na direção NE, com pequeno declive e estreitamento em direção ao interior (Figuras A.3 e A.4 em anexo).



Figura 6.3 – a) Claraboia da cavidade vista de fora. b) Claraboia vista de dentro.

Está inserida entre média e alta vertente com o entorno composto por campo rupestre (Figura 6.4a e b). Trata-se de uma galeria totalmente desenvolvida em canga detrítica, com uma projeção horizontal de 13,6 m, uma área de 76,4 m² e um volume de 63 m³ (AULER *et al.* 2012). A cavidade é caracterizada por processos de abatimentos, com blocos e matações autóctones em toda a sua extensão (Figura 6.5), além de sedimentos finos a grosseiros advindos da claraboia.



Figura 6.4 – a) Boca da cavidade envolta por campo rupestre. b) Entorno da cavidade SPB10 situada em alta vertente.

Observam-se ainda crostas de óxido-hidróxidos e pequenos coraloides, provavelmente produtos do escoamento pluvial no interior da cavidade. Auler *et al.* (2012) classifica a caverna SPB10 como de alta relevância, justificada pela sua média projeção horizontal, área e volume, por táxons novos e pela alta abundância de espécie rara.



Figura 6.5 – Blocos e matações no interior da cavidade SPB10.

6.3 - Cavidade SPD10

Trata-se de uma cavidade totalmente natural, inserida no contato entre o itabirito e a canga, sendo retilínea, pouco desenvolvida com a largura maior próximo a boca (Figuras A.5 e A.6 em anexo). Sua projeção horizontal é de 11,7 m, com uma área de 46,2 m² e um volume de 38 m³. Apresenta um único salão com maior prolongamento no eixo NS, sendo a entrada na extremidade norte e o teto inclinado para E, acompanhando o mergulho das camadas de itabirito. A entrada é extremamente baixa, localizada em uma ruptura isolada na superfície da canga.

A galeria está inserida entre média e baixa vertente, em uma ruptura do relevo com escarpa pouco contínua coberta por campo rupestre. São observados sedimentos tanto autóctones quanto alóctones, uma vez que a caverna apresenta uma leve inclinação em direção ao interior. Além disso, observam-se coraloides, crostas cinza, escorrimentos e uma crosta branca de origem micro bacteriana em toda a sua extensão (Figura 6.6).



Figura 6.6 – Crosta branca de origem microbacteriana cavidade SPD10.

A cavidade SPD10 é classificada por Auler *et al.* (2012) como de alta relevância, devido a sua média projeção horizontal, área e volume, presença de táxons novos e espécies troglomórficas, além de alta abundância de troglóbios não raros.

6.4 - Cavidade SPD11

Também inserida no contato entre a canga e o itabirito, a cavidade SPD11 apresenta um entorno composto por campos rupestres, e encontra-se na mesma ruptura de relevo que a galeria SPD10. A caverna em questão apresenta um piso ligeiramente inclinado em direção a sua boca, sendo seus sedimentos autóctones, formando cones de deposição na saída de pequenos canalículos no interior da galeria, além de um fluxo pluvial em direção a seu exterior. O teto apresenta-se inclinado para E acompanhando o acamamento do itabirito (Figura 6.8a).

São observados depósitos clásticos grosseiros, sedimentos finos, escorrimentos, coraloides e uma crosta branca provavelmente de origem micro-bacteriana (Figura 6.8b). Possui uma entrada ampla, com o maior prolongamento de 17,7 m no sentido NS, com uma área de 102,3 m² e um volume de 191 m³ (AULER *et al.* 2012) (Figuras A.7 e A.8 em anexo).



Figura 6.7 – Boca da cavidade SPD11 inserida em ruptura de relevo e envolta por campo rupestre.

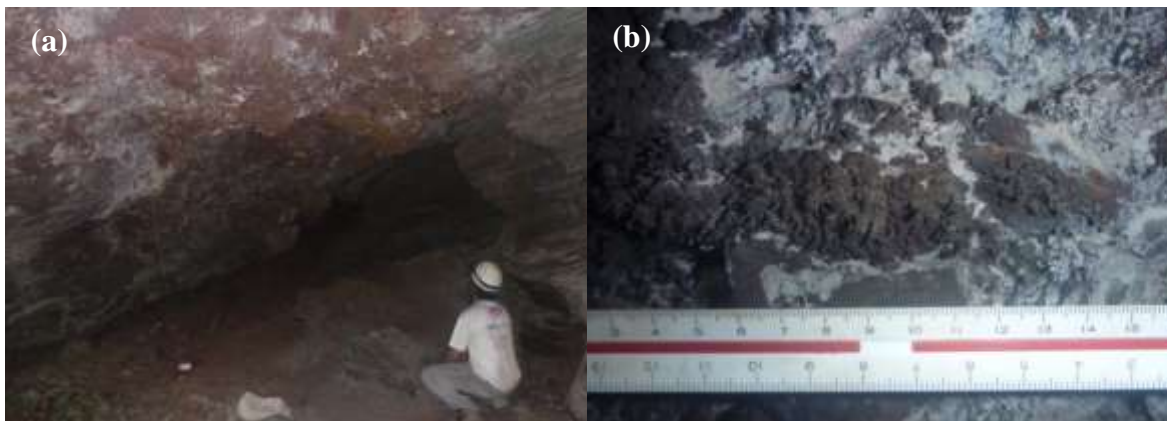


Figura 6.8 – a) Inclinação do teto da cavidade SPD11 em direção a E. b) Coralóide ferruginoso envolto por crosta branca micro bacteriana.

Quanto ao grau de relevância, é classificada por Auler *et al.* (2012) como máximo devido a presença de um troglóbio raro, denominado *Trichorrhina sp*, além de sua média projeção horizontal, área e volume.

7- CAVIDADE SPB65

Para melhor entendimento da caracterização petrográfica e estrutural da cavidade SPB65, ela foi dividida em quatro setores diferentes (Figura 7.1). A divisão foi baseada em regiões com características semelhantes, sendo o setor A composto pelo salão principal e adjacências, comumente dado pela sua zona fótica, o setor B composto pela porção mais intermediária, o setor C dado pela porção distal principal e o setor D, composto pela porção distal superior da galeria.

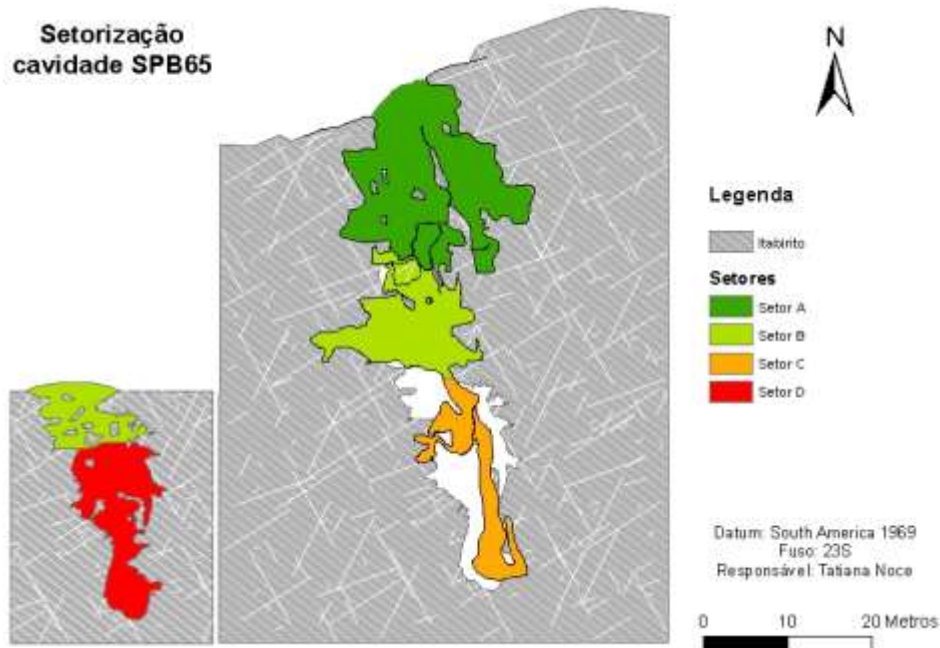


Figura 7.1 – Mapa mostrando a divisão de setores na cavidade SPB65.

7.1 - Caracterização da rocha intacta

A cavidade está inserida no contato entre o xisto, pertencente ao Grupo Nova Lima (Supergrupo Rio das Velhas) e o itabirito pertencente ao Grupo Itabira (Supergrupo Minas) (Figura 7.2a). Trata-se de um contato tectônico contendo inúmeros veios e *boudans* de quartzo intensamente deformados, alcançando até 2 m de espessura (Figura 7.2b).

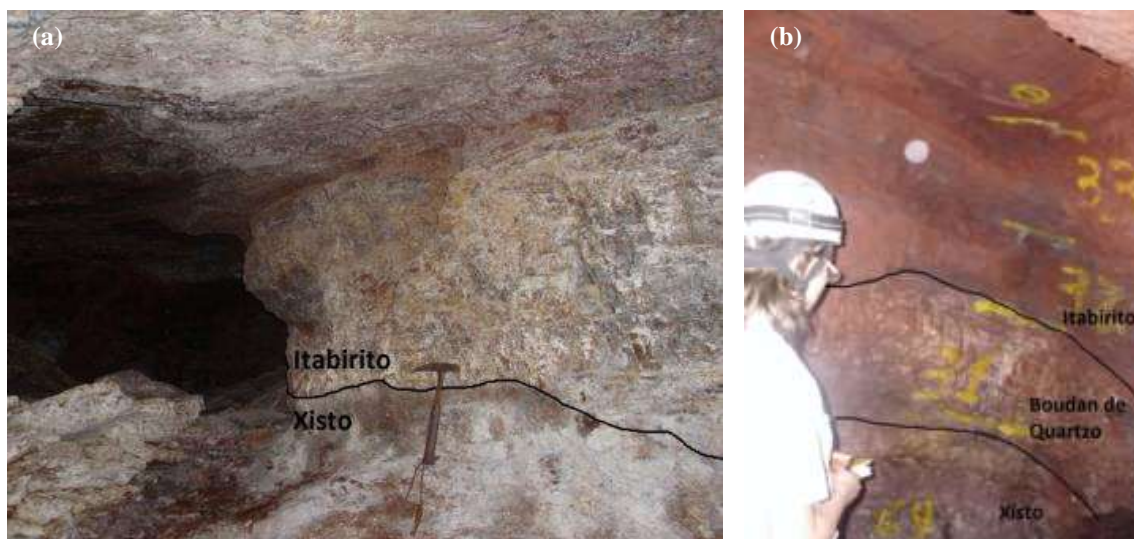


Figura 7.2 – a) Contato entre o xisto e o itabirito no interior da cavidade SPB65; b) Contato entre xisto e itabirito com *boudans*.

Os xistos do Grupo Nova Lima, encontrados principalmente no piso e porções inferiores dos setores A B e C, são rochas metamórficas, algumas vezes com caráter ferruginoso e comuns intercalações lenticulares de filitos grafitosos e carbonáticos. Na cavidade eles são compostos principalmente por minerais quartzo, sericita e feldspato, podendo ser denominado como um Quartzo sericita xisto e por vezes Sericita quartzo xisto, dependendo do mineral de maior concentração. Apresentam coloração variando entre amarelo, ocre e bege, com porções mais esbranquiçadas em setores mais quartzosos, e porções mais esverdeadas em setores mais serícíticos.

A textura é granolepidoblástica com intercalações de camadas milimétricas de quartzo e de sericita, e granulometria variando de muito fina a fina. O xisto encontra-se intemperizado, com minerais muito alterados, por vezes pulverulentos ou friáveis, sendo classificado como rocha muito alterada (W4). Quebra-se facilmente ao golpe do martelo, produzindo fragmentos que podem ser partidos manualmente, classificando-o com uma rocha pouco coerente (C3). Apresenta-se comumente recoberto por uma fina camada de material silto-argiloso, provavelmente advinda do intemperismo da própria rocha.

Na região do contato entre os Grupos Nova Lima e Itabira existem veios irregulares, *boudans* e lentes compostas predominantemente pelo mineral quartzo. Esse material, possivelmente mineralizado em ouro, direcionou as intervenções antrópicas (escavações) que são observadas na cavidade. Além da composição básica de quartzo

leitoso, é comum a presença de sericita próximo aos contatos, o que causa uma coloração mais amarelada nesses locais. Os veios apresentam espessuras de até 2 m, com alguns salões do setor C inseridos quase inteiramente neles. São aflorantes, no interior da cavidade nos setores A, B e C, muitas vezes intensamente dobrados e fraturados. A textura é cristalina composta por quartzo, além de uma fina película de minerais argilosos oriundos de outros pacotes rochosos nas zonas de fratura, causando zonas oxidadas de colorações enegrecidas. Dessa forma, os veios são classificados como rocha sã ou praticamente sã (W1). Trata-se de uma rocha coerente, sendo dificilmente quebrada ao golpe do martelo, produzindo fragmentos de rochas cortantes, classificando-a como rocha coerente (C1).

O Grupo Itabira, é representado em toda a extensão da galeria pelos itabiritos pertencentes a Formação Cauê, com expressivas variações composicionais no interior da cavidade, sendo observados nos setores A, B e D. Sua composição geral é dada por minerais de óxido de ferro, principalmente hematita, magnetita e martita, além de quartzo e anfibólio. Apresenta uma textura granular acamadada e granulometria variando desde muito fina a grossa. O itabirito encontrado no setor A apresenta um bandamento milimétrico relativamente regular de camadas silicáticas e camadas ferruginosas, gerando uma coloração cinza escura a ocre, com granulometria variando de fina a média (Figura 7.3a). Por estar muito próximo da zona de contato e da entrada da caverna, ele se encontra bastante alterado e deformado, com o grau de alteração classificado como rocha muito alterada (W4), dado por minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis. No mesmo salão, os itabiritos apresentam-se pouco coerentes (C3), principalmente devido ao amplo intemperismo sofrido a partir da exposição proporcionada pela proximidade da boca.

O itabirito encontrado no setor B, por sua vez, apresenta uma coloração cinza escuro a ocre com maiores concentrações de zonas ferruginosas no bandamento. Essa porção apresenta-se menos alterada e mais coerente, uma vez que a influência da entrada da cavidade é menor ou ausente. Este itabirito apresenta-se moderadamente alterado (W3) e mediamente coerente (C2), quebrando com dificuldade ao golpe do martelo (Figura 7.3b). Em alguns locais, próximos do setor D, a coerência aumenta, classificando-o como rocha coerente (C1), quebrando-se com bastante dificuldade ao golpe do martelo e produzindo fragmentos cortantes.



Figura 7.3 – a) Itabirito de coloração cinza escuro a ocre bandado e intemperizado (setor A); b) Itabirito cinza escuro bandado com alterações incipientes (setor B).

O setor D apresenta um trecho de itabirito exposto por processos de abatimento posteriores a formação e escavação da galeria. Seu bandamento apresenta maiores concentrações de zonas silicáticas e uma coloração cinza mais claro, com níveis amarronzados e porções mais esbranquiçadas. Devido as maiores concentrações de camadas silicáticas, este itabirito apresenta-se mais bandado e com uma granulometria mais grosseira, resultando em uma maior porosidade, tornando-se conseqüentemente mais friável. Essas características são observadas nos dois salões mais distais e superiores da galeria, os quais se encontram instáveis com abatimentos recentes e o piso coberto por sedimentos e blocos. A rocha encontra-se moderadamente alterada (W3) e pouco coerente (C3), quebrando-se com facilidade ao golpe do martelo e produzindo fragmentos que podem ser partidos manualmente. Além disso, a superfície do itabirito encontra-se limpa, sem a presença dos argilo-minerais comumente observados no restante da cavidade.

A Figura 7.4 representa o mapa litológico em planta da cavidade SPB65 com o plano de referência que corta as camadas de itabirito. A Figura 7.5, por sua vez, apresenta o perfil e os cortes litológicos, mostrando a estratigrafia típica da cavidade, composta por xistos na base, veios e *boudans* de quartzo no contato e itabirito no topo.

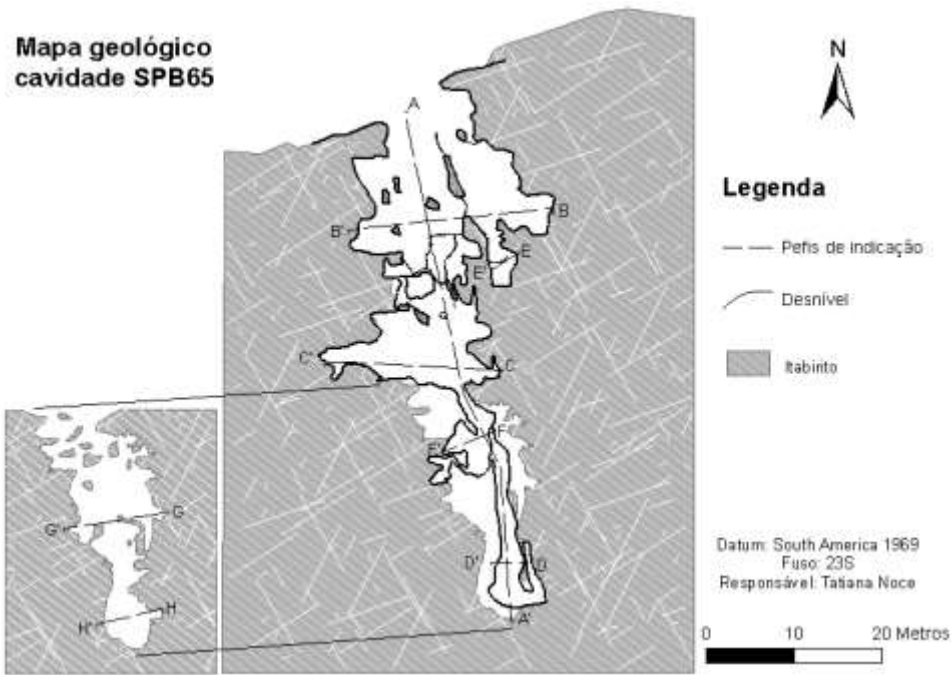


Figura 7.4 – Mapa litológico da cavidade SPB65 com indicação dos perfis.

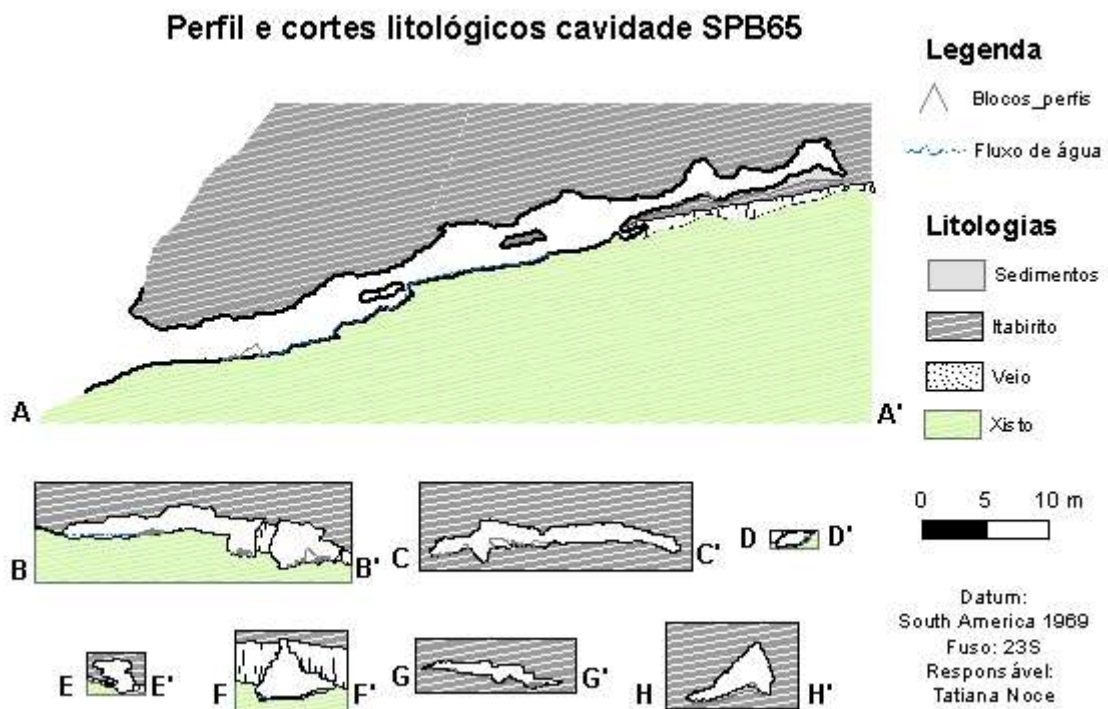


Figura 7.5 – Perfil e cortes litológicos da cavidade SPB65.

7.1.1 - Ensaios de Resistência

Segundo a Tabela 2.3 o xisto encontrado na cavidade é classificado como rocha branda (R2), com resistência a compressão uniaxial estimada entre 5 e 25 MPa. Foram realizados treze testes de carga pontual em amostras de xisto, apresentados na Tabela

7.1.

Tabela 7.1 – Características e resultados dos ensaios de carga pontual em xisto.

Ensaio	Direção	Litologia	P (N)	De (mm)	Is(50) (MPa)
1	L a S0	Xisto	1140	50,63	0,45
2	L a S0	Xisto	480	47,67	0,21
3	L a S0	Xisto	1550	43,98	0,76
4	L a S0	Xisto	–	–	–
5	L a S0	Xisto	620	39,86	0,35
6	L a S0	Xisto	960	33,85	0,70
7	// a S0	Xisto	240	34,37	0,17
8	// a S0	Xisto	340	36,67	0,22
9	// a S0	Xisto	170	30,45	0,15
10	// a S0	Xisto	240	25,95	0,27
11	// a S0	Xisto	680	18,02	1,32
12	L a S0	Xisto	390	24,17	0,48
13	L a S0	Xisto	480	16,89	1,03

Excluindo-se o maior e o menor valor do índice de carga pontual ($Is_{(50)}$) para cargas perpendiculares e paralelas a zona de fraqueza principal, conforme as normas da ISRM (2007), tem-se que o índice de carga pontual médio do xisto é 0,55 MPa para esforços perpendiculares a principal zona de fraqueza, e 0,22 MPa para esforços paralelos a principal zona de fraqueza.

Obteve-se então, a partir das equações 2.3 e 2.4, conforme mencionado na metodologia, os valores de resistência a compressão uniaxial (σ_c) de 13,15 MPa e 14,12 MPa para esforços perpendiculares, e 5,28 MPa e 11,36 MPa para ensaios paralelos.

Os veios de quartzo, segundo a Tabela 2.3, são classificados como rochas resistentes (R4), sendo quebrados por vários golpes do martelo. Dessa forma sua resistência a compressão uniaxial (σ_c) estaria entre 50 e 100 MPa. Como se trata de uma rocha muito resistente, sem ensaios invalidados e sem direção de maior ou menor fraqueza, foram realizados apenas 6 ensaios de carga pontual nessa litologia (Tabela 7.2).

Tabela 7.2 – Características e resultados dos ensaios de carga pontual em *boudans*.

Ensaio	Litologia	P (N)	De (mm)	Is(50) (MPa)
1	Veio de quartzo	4950	57,6468	1,5881
2	Veio de quartzo	3300	54,3499	1,1599
3	Veio de quartzo	1790	37,9058	1,0998
4	Veio de quartzo	3050	44,8664	1,4431

Ensaio	Litologia	P (N)	De (mm)	Is(50) (MPa)
5	Veio de quartzo	1630	32,5474	1,2684
6	Veio de quartzo	1010	26,5109	1,0801

Ao se excluir os valores extremos, obteve-se um índice de carga pontual ($I_{s(50)}$) igual a 1,3498 MPa, que inserido nas devidas equações obtêm-se valores de σ_c igual a 33,40 MPa e 20,86 Mpa.

O itabirito, conforme apresentado no item 7.1 -, apresenta características diferentes em três setores da cavidade. O itabirito encontrado no setor A quebra-se facilmente ao golpe do martelo, sendo classificado conforme a ISRM (1981) como rocha branda (R2), com resistência a compressão uniaxial no intervalo entre 5 e 25 MPa. Realizou-se um total de 15 testes de carga puntiforme neste itabirito (Tabela 7.3).

Tabela 7.3 – Características e resultados dos ensaios de carga pontual em itabirito encontrado próximo a boca da cavidade SPB65.

Ensaio	Direção	Litologia	P (N)	De (mm)	Is(50) (MPa)
1	L a S0	Itabirito	–	–	–
2	L a S0	Itabirito	770	50,057	0,307
3	L a S0	Itabirito	–	–	–
4	L a S0	Itabirito	850	48,821	0,353
5	L a S0	Itabirito	–	–	–
6	L a S0	Itabirito	2980	49,597	1,207
7	L a S0	Itabirito	–	–	–
8	L a S0	Itabirito	–	–	–
9	L a S0	Itabirito	2570	50,057	1,026
10	L a S0	Itabirito	2180	50,727	0,853
11	// a S0	Itabirito	120	32,253	0,095
12	// a S0	Itabirito	760	35,949	0,507
13	// a S0	Itabirito	800	35,949	0,534
14	// a S0	Itabirito	680	40,996	0,370
15	// a S0	Itabirito	820	34,706	0,578

Seguindo as normas da ISRM (2007), o índice de carga pontual médio ($I_{s(50)}$) do itabirito encontrado próximo a boca da galeria é 0,74 MPa para esforços perpendiculares ao acamamento e 0,47 MPa para esforços paralelos. Assim, utilizando as equações de correlação obtêm-se uma resistência a compressão uniaxial (σ_c) igual a 17,86 MPa e 15,77 MPa para os esforços perpendiculares e 11,29 MPa e 13,47 MPa para esforços paralelos.

O setor B apresenta os itabiritos mais resistentes, que se quebram com dificuldade aos golpes do martelo, sendo classificados como rochas medianamente resistentes (R3) com resistência a compressão uniaxial (σ_c) variando entre 25 e 50 MPa. Foram realizados 15 ensaios de carga pontual nestes itabiritos, sendo 5 paralelos a principal direção de fraqueza, 5 perpendiculares a ela e 5 invalidações do teste (Tabela 7.4).

Tabela 7.4 – Características e resultados dos ensaios de carga pontual em itabirito encontrado na porção mediana da cavidade SPB65.

Ensaio	Direção	Litologia	P (N)	De (mm)	Is(50) (MPa)
1	└ a S0	Itabirito	–	–	–
2	└ a S0	Itabirito	1580	31,915	1,267
3	└ a S0	Itabirito	–	–	–
4	└ a S0	Itabirito	–	–	–
5	└ a S0	Itabirito	–	–	–
6	└ a S0	Itabirito	–	–	–
7	└ a S0	Itabirito	2250	53,357	0,814
8	└ a S0	Itabirito	2650	47,873	1,134
9	└ a S0	Itabirito	1430	23,507	1,843
10	└ a S0	Itabirito	2190	37,082	1,392
11	// a S0	Itabirito	670	31,755	0,542
12	// a S0	Itabirito	960	47,873	0,411
13	// a S0	Itabirito	920	38,431	0,553
14	// a S0	Itabirito	630	34,687	0,444
15	// a S0	Itabirito	780	39,606	0,448

Seguindo as normas da ISRM (2007), obtêm-se o valor de índice de carga pontual ($I_{s(50)}$) médio de 1,26 MPa para esforços perpendiculares a principal zona de fraqueza, e 0,48 MPa para esforços paralelos. Ao se utilizar as equações de correlação de Broch & Franklin (1972) e Kahraman (2001), chega-se aos seguintes valores de resistência a compressão uniaxial (σ_c) dessa rocha: 30,34 MPa e 20,14 MPa para esforços perpendiculares, e 11,47 MPa e 13,53 MPa para esforços paralelos.

Os itabiritos menos resistentes são observados no setor D, provavelmente devido a maior concentração de camadas quartzosas, as quais apresentam uma maior granulometria e conseqüentemente, uma maior porosidade e friabilidade. A partir de testes com o martelo de geólogo, nota-se que a rocha se quebra facilmente com apenas um golpe, causando esfrelamento e deslocamento. Dessa forma, ela é classificada de acordo com a ISRM (1981) como uma rocha muito branda, com resistência a compressão uniaxial (σ_c) entre 1 e 5 MPa. Foram realizados 24 testes de carga pontual nesses itabiritos, com apenas 17 validações (Tabela 7.5).

Tabela 7.5 – Características e resultados dos ensaios de carga pontual em itabirito encontrado na porção distal da cavidade SPB65.

Ensaio	Direção	Litologia	P (N)	De (mm)	Is(50) (MPa)
1	└ a S0	Itabirito	1250	52,515	0,463
2	└ a S0	Itabirito	–	–	–
3	└ a S0	Itabirito	–	–	–
4	└ a S0	Itabirito	1050	51,065	0,407
5	└ a S0	Itabirito	–	–	–
6	└ a S0	Itabirito	750	41,213	0,405
7	└ a S0	Itabirito	1350	50,965	0,524
8	└ a S0	Itabirito	860	38,215	0,522
9	└ a S0	Itabirito	500	31,087	0,418
10	// a S0	Itabirito	380	36,319	0,249
11	// a S0	Itabirito	260	35,665	0,176
12	// a S0	Itabirito	440	36,143	0,291
13	// a S0	Itabirito	220	28,187	0,214
14	// a S0	Itabirito	370	37,219	0,234
15	└ a S0	Itabirito	–	–	–
16	└ a S0	Itabirito	–	–	–
17	└ a S0	Itabirito	–	–	–
18	└ a S0	Itabirito	–	–	–
19	└ a S0	Itabirito	330	37,424	0,207
20	└ a S0	Itabirito	340	23,262	0,445
21	└ a S0	Itabirito	340	24,201	0,419
22	// a S0	Itabirito	80	25,928	0,089
23	// a S0	Itabirito	80	28,187	0,078
24	// a S0	Itabirito	50	25,854	0,056

Excluindo-se os valores indicados pela ISRM (2007) e utilizando as devidas proporções, conclui-se que o índice de carga pontual $Is_{(50)}$ do itabirito encontrado na porção mais distal da cavidade é de 0,44 MPa para os esforços perpendiculares ao acamamento principal, e 0,17 MPa para os esforços paralelos. A partir daí, ao utilizar as equações de correlação, chega-se a valores de resistência a compressão uniaxial (σ_c) de 10,56 MPa e 13,21 MPa para os esforços perpendiculares, e 4,16 MPa e 10,97 MPa para esforços paralelos.

A partir da Tabela 7.6 é possível observar que os resultados obtidos pelas duas equações de correlação utilizadas se aproximam dos valores obtidos pelos testes com o martelo de geólogo. Algumas vezes, os valores obtidos pelos ensaios de carga pontual se mostraram um pouco inferiores a faixa de valores indicada pelos testes com o martelo de geólogo, fato explicado provavelmente por se tratarem de amostras já

descomprimidas, coletadas do piso, de modo a não afetar a estrutura da galeria.

Tabela 7.6 – Resistência a compressão uniaxial (σ_c) de cada tipo litológico de acordo com cada método.

Litologia	Setor	Martelo de Geólogo	σ_c (MPa)			
			Broch & Franklin (1972)		Kahraman (2001)	
			Perpendicular	Paralelo	Perpendicular	Paralelo
Xisto		5 a 25	13,15	5,28	14,12	11,36
Veio		50 a 100	33,40		20,86	
Itabirito	A	5 a 25	17,86	11,29	15,77	13,47
Itabirito	B	25 a 50	30,34	11,47	20,14	13,53
Itabirito	D	1 a 5	10,56	4,16	13,21	10,97

Para dar continuidade ao trabalho optou-se por utilizar os resultados obtidos a partir dos ensaios perpendiculares a principal zona de fraqueza, uma vez que esta se encontra sub-horizontalizada na galeria, sendo assim, perpendicular ao maior esforço advindo do peso das camadas sobrejacentes. Também optou-se por utilizar a resistência a compressão uniaxial obtida a partir da equação de Broch & Franklin (1972), vista como equação clássica da mecânica de rochas, além de seus resultados terem sido mais fidedignos quando comparado aos resultados obtidos a partir dos testes com o martelo do geólogo.

7.2 - Caracterização Estrutural

O mapeamento estrutural da cavidade SPB65 foi realizado utilizando a própria bússola do geólogo, uma vez que em testes com o barbante não foram observadas variações consideráveis de azimute. O acamamento principal (S_0) é de difícil observação nos xistos, uma vez que essas rochas se encontram bastante intemperizadas, alteradas e dobradas. Nos itabiritos, por outro lado, essas estruturas são de fácil observação e medição, dado pelos níveis bem definidos de composição quartzosa e ferruginosa. Foram tomadas um total de 37 medidas desta estrutura, levando a um acamamento médio de 55/13 (Figura 7.6 e Tabela 1 em apêndice).

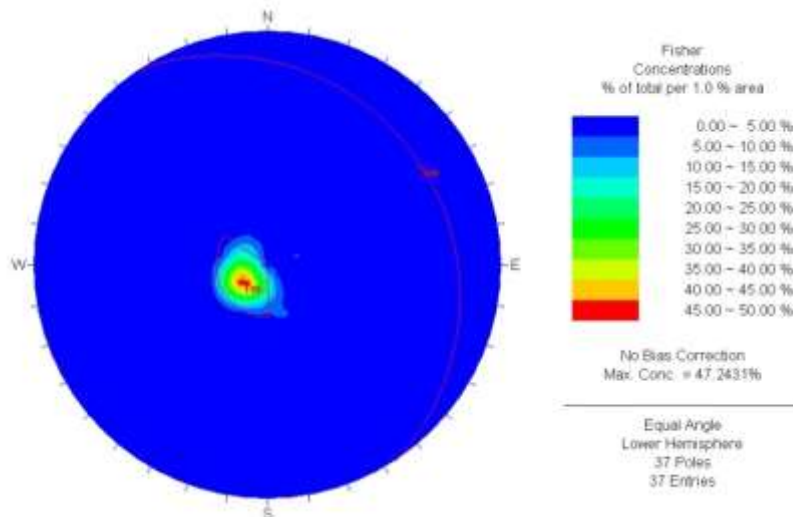


Figura 7.6 – Estereograma com polos dos planos de acamamento e representação do plano médio.

Esta estrutura apresenta-se bastante perturbada por dobramentos, pela intrusão de veios hidrotermais e pelas muitas famílias de fraturas existentes (Figura 7.8a e Figura 7.8b). O eixo médio de dobramento é 331/06, aproximadamente paralelo ao eixo principal de desenvolvimento da cavidade (Figura 7.4 e Figura 7.7). Tal fato condiz com uma maior concentração e espessura dos veios e *boudans* nessa região, justificada pelo fluxo direcionado para zona de charneira das dobras. Esta região do eixo de dobras pode consistir em uma zona de fraqueza que favoreceu o desenvolvimento natural da cavidade, assim como em uma maior concentração da mineralização, que posteriormente foi escavada. As dobras encontradas na galeria apresentam uma cinemática sinistral, sendo observadas inúmeras dobras parasíticas representantes dessa movimentação (Figura 7.8c e Figura 7.8d).

Possivelmente existe uma relação desse sistema de dobramento com a falha do fundão, maior estrutura registrada por Endo e Fonseca (1992) nas proximidades da região de estudo, caracterizada principalmente pelas estruturas geológicas rotacionadas sinistralmente. São observadas também dobras do tipo *kink band*, comuns em rochas anisotrópicas e foliadas, com charneiras angulosas, provavelmente formadas por falhamentos.

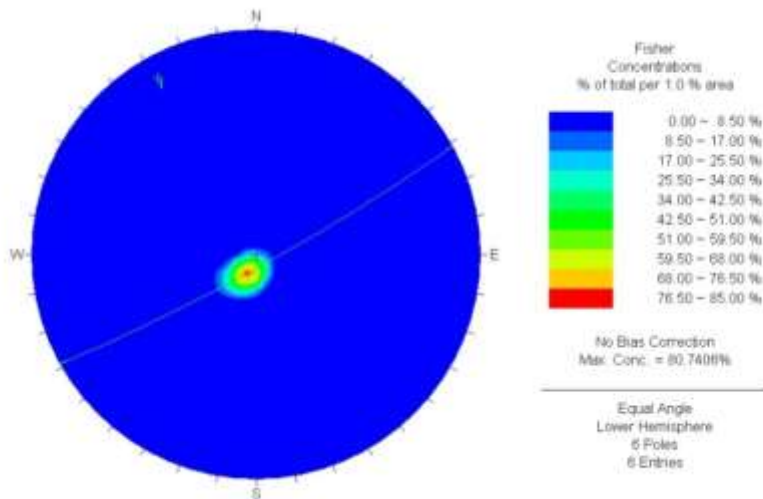


Figura 7.7 – Estereograma mostrando o eixo das dobras.

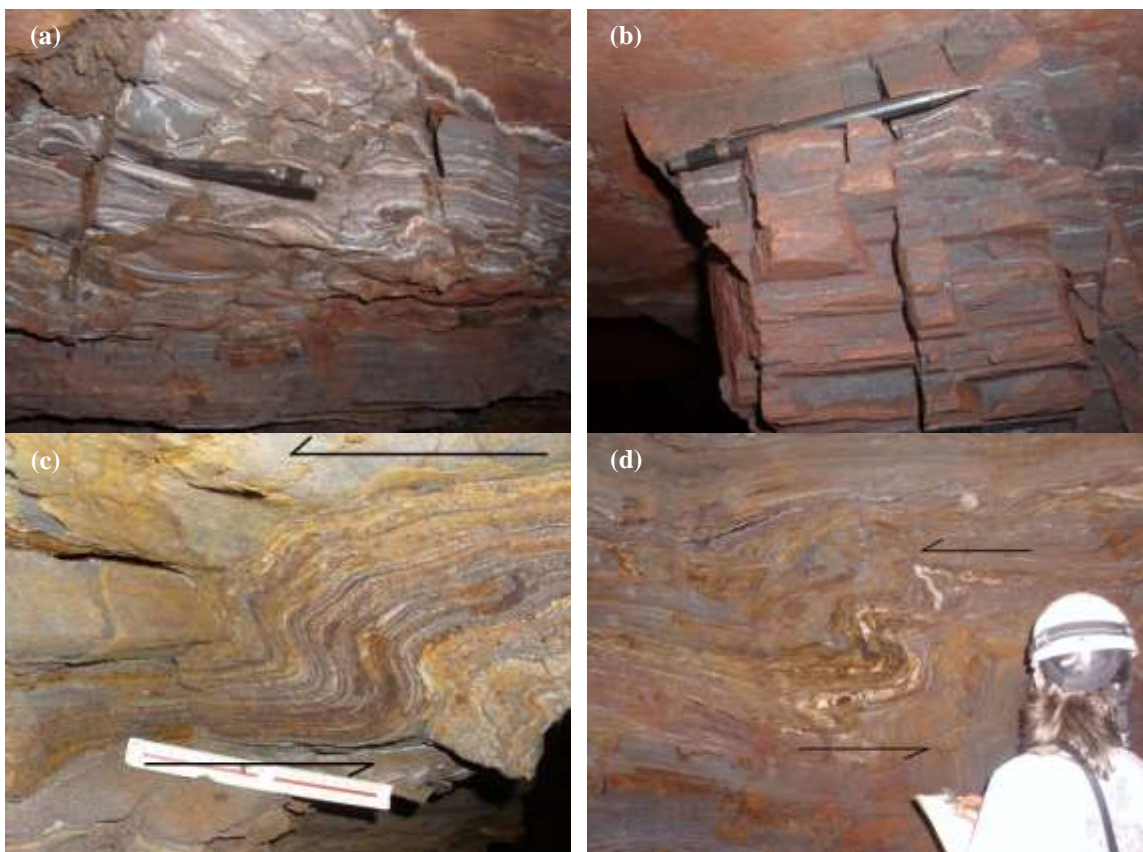


Figura 7.8 – a) Acamamento perturbado por dobramentos; b) Fratura aberta cortando o acamamento; c e d) Dobra sinistral parasítica no itabirito.

Instabilidades são comuns segundo os planos de acamamento, sobretudo rupturas no teto geradas por tração, quando a descontinuidade não apresenta coesão suficiente para suportar o peso do material em balanço (Figura 7.9a e Figura 7.9b). Trata-se da estrutura mais persistente, alcançando até 20 m de continuidade, com valores de espaçamento inferiores a 6 cm. Outro agravante é a abertura, algumas vezes, maior que 1 cm e sem preenchimento (Figura 7.9a).



Figura 7.9 – a) Instabilidade no teto segundo acamamento com abertura maior de 5 mm; b) Processo de deslocamento no teto segundo o acamamento do itabirito.

Foram realizadas 59 medidas de fraturas no interior da cavidade, tanto no itabirito como no xisto, divididas em seis famílias principais (Figura 7.10,

Tabela 7.7 abaixo e Tabela 2 em apêndice). No setor A as discontinuidades são descontínuas com aberturas de 1 a 5 mm preenchidas com material argiloso mole, provavelmente resultante do intemperismo da própria rocha. Apresentam-se, ainda, com superfície rugosa, sendo comum a presença de água intersticial causando ligeira alteração das paredes.

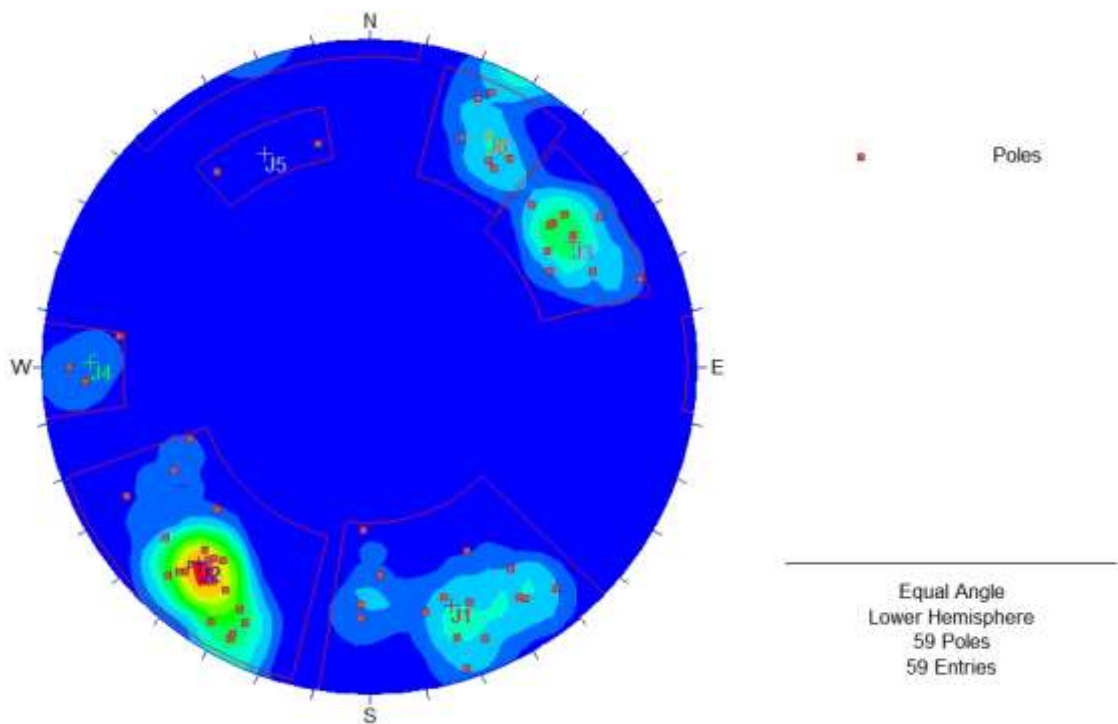


Figura 7.10 – Estereograma mostrando as seis famílias de fraturas encontradas na cavidade SPB65 (J1, J2, J3, J4, J5 e J6).

Tabela 7.7 – Atitude média de cada família de fratura.

Tipo de estrutura	Direção	Mergulho
J1	341	74
J2	41	76
J3	239	71
J4	90	80
J5	153	71
J6	207	76

O setor B apresenta descontinuidades ligeiramente rugosas e contínuas, com aberturas maiores que 5 mm. Normalmente, encontram-se preenchidas por material de oxidação, sendo ligeiramente alteradas pela percolação de água (Figura 7.12a e Figura 7.12b). As famílias de fratura cortam o acamamento em diversas direções, formando cunhas e blocos isolados. Observa-se ainda, uma zona de falha normal de atitude média 37/70, que corta transversalmente o desenvolvimento principal da cavidade (Figura 7.12c). Esse setor apresenta, ainda, uma ampla área com diversos indícios de deslocamentos, sendo observado um grande bloco colapsado. Tal região de instabilidade pode estar associada ao descalçamento do pacote de itabirito provocado pelas escavações, além da presença de uma zona de falha semelhante a existente na porção intermediária da cavidade (Figura 7.12d e Figura 7.11).

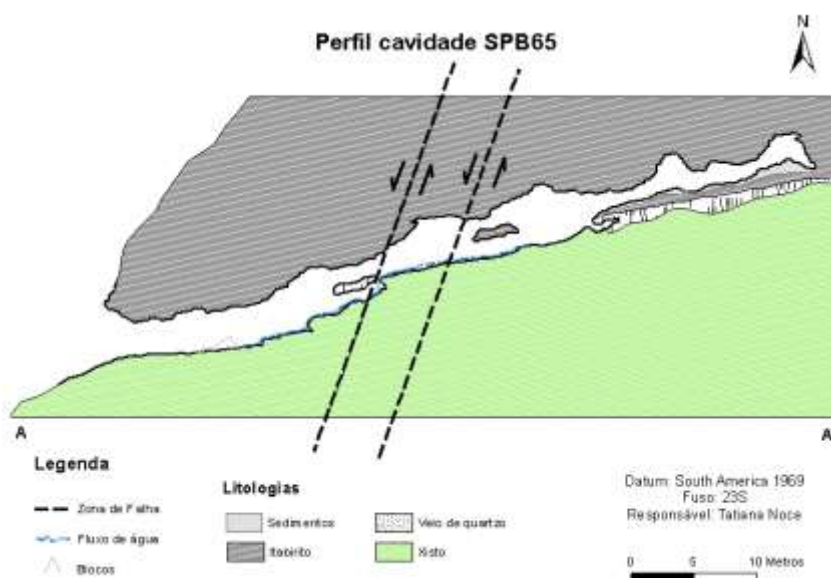


Figura 7.11 – Perfil cavidade SPB65 mostrando as duas zonas de falha normal em sua porção intermediária.

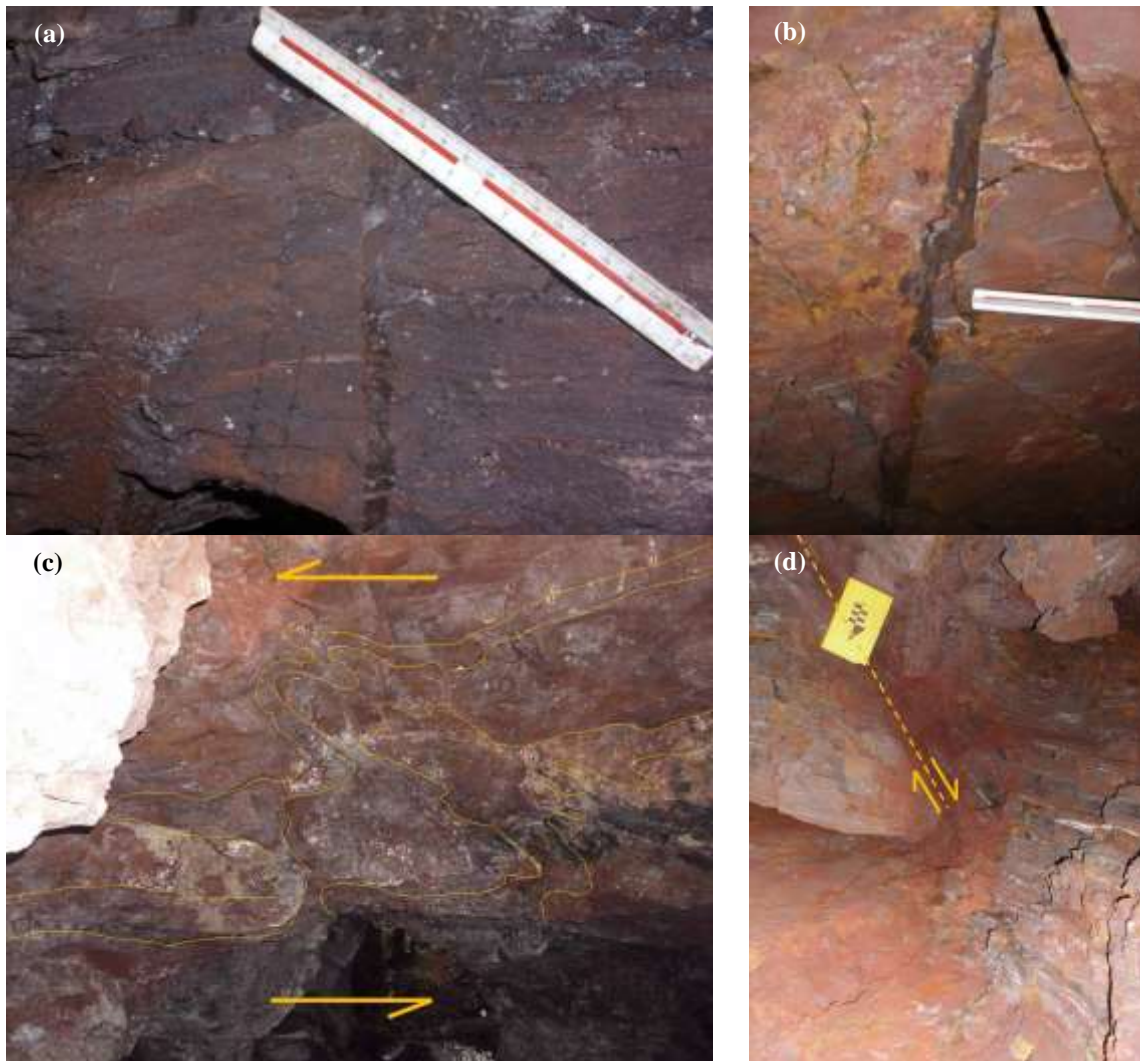


Figura 7.12 – a) Fratura de cerca de 1cm preenchida por material duro; b) Fratura aberta preenchida por material de oxidação; c) Zona de cisalhamento cortando a cavidade; d) Zona de falha localizada no setor C da cavidade SPB65.

O setor D é caracterizado por uma maior continuidade das fraturas, alcançando persistências de até 20 m. Elas se cruzam em diversas direções e algumas apresentam aberturas maiores que 5 mm sem nenhum preenchimento, causando ampla instabilidade (Figura 7.13a e Figura 7.14a). Esse nível não apresenta nenhuma influência de água, sendo a superfície das fraturas com pouca alteração, caracterizadas como rugosas planas.

São observadas ainda duas zonas de cisalhamento que se cruzam com atitudes de $92/64$ e $107/61$, provavelmente responsáveis pelos deslocamentos comuns no último salão da porção superior da galeria (Figura 7.13b e c). Possivelmente, a ampliação do salão dessa porção até sua conformidade atual ocorreu por processos contínuos de deslocamento do teto, causados pelo encontro das zonas de fraturamento aliada à decompressão

devido à escavação de galerias nos condutos inferiores (Figura 7.14a).

Ocorrem ainda, inflexões do acamamento próximo às zonas de fratura, causadas pelo movimento relativo entre as paredes formando dobras angulares do tipo *kink* (Figura 7.13d). Tal zona de cisalhamento possui um caráter rúptil, com cinemática dextral e paredes, por vezes afastadas, semelhantes à fraturamentos gerados por tração. Esse efeito pode estar associado a uma movimentação sinistral em direção à encosta íngreme, seguida de uma acomodação recente do maciço em função do decapeamento da encosta onde a cavidade está inserida. Pequenos fraturamentos de alívio de tensão também são observados em meio ao maciço rochoso, corroborando com esse sistema de descolamento e decompressão (Figura 7.14b).

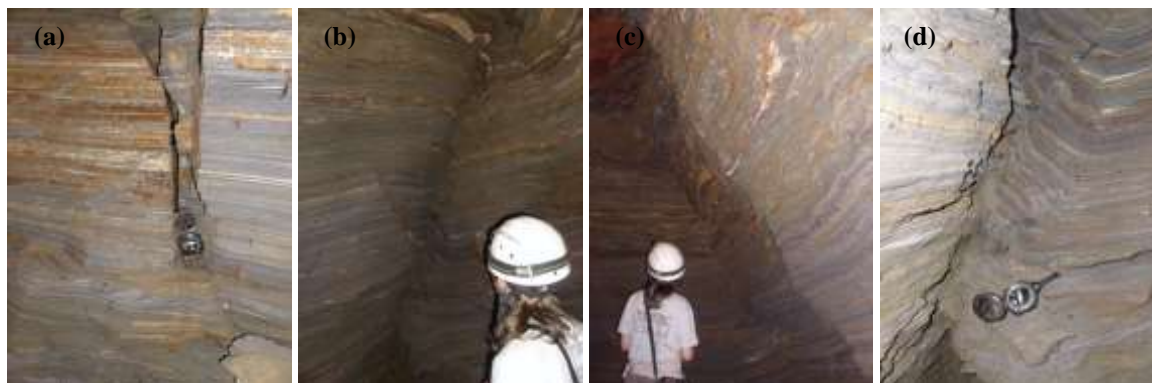


Figura 7.13 – a) Fratura com abertura de 1cm sem preenchimento cortando o acamamento; b) Zona de fraturamento mostrando rejeito de até 50 cm; c) Zona de fraturamento de atitude 107/61; d) Inflexão do acamamento no fraturamento.

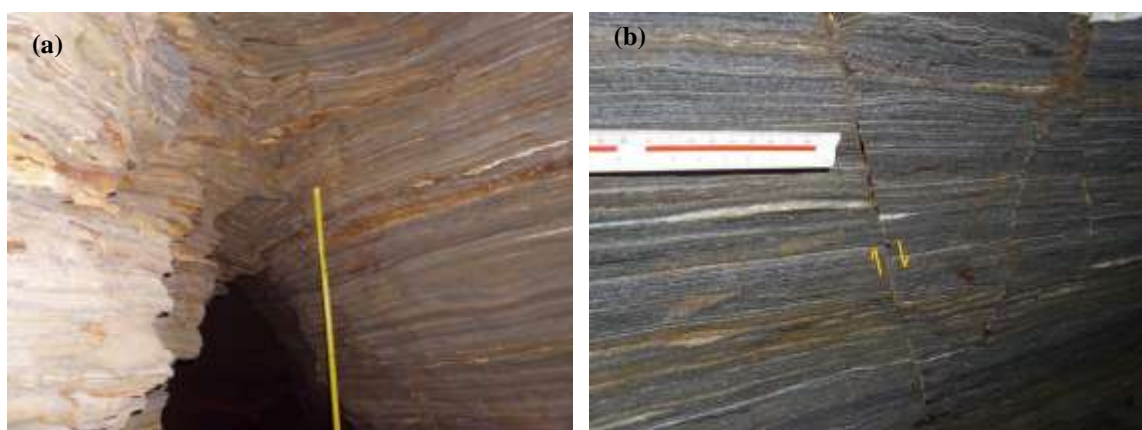


Figura 7.14 – a) Teto imbricado na passagem do penúltimo para o último salão causado pela decompressão; b) Rejeito dextral em fratura no itabirito.

Os veios e *boudans* foram classificados do ponto de vista geotécnico como rocha triturada em virtude das suas diversas descontinuidades, com espaçamento inferior a 6 cm e persistência menor que 1 m. Além disso, as fraturas apresentam-se quase lisas, sem preenchimento e de leve a moderadamente alteradas. Essas características podem

ser explicadas pela entrada de água comumente observada através das discontinuidades. Muitas vezes, os veios de quartzo encontram-se extremamente dobrados e boudinados, acompanhando o dobramento principal observado na cavidade, fato explicado pelo regime dúctil durante a sua gênese. Atualmente, esses veios apresentam um regime rúptil, responsável pelo seu alto grau de faturamento. Foram medidas 21 atitudes de faturamento nessas rochas, sendo comum a semelhança desses fraturamentos com as famílias de discontinuidades observadas nos xistos e itabiritos. Foram aferidas estruturas com atitudes semelhantes as famílias de fraturas J1, J2, J3 e J6, além do acamamento principal (S0) e de uma sétima família de fraturas com atitude média 205/43 (Figura 7.15).

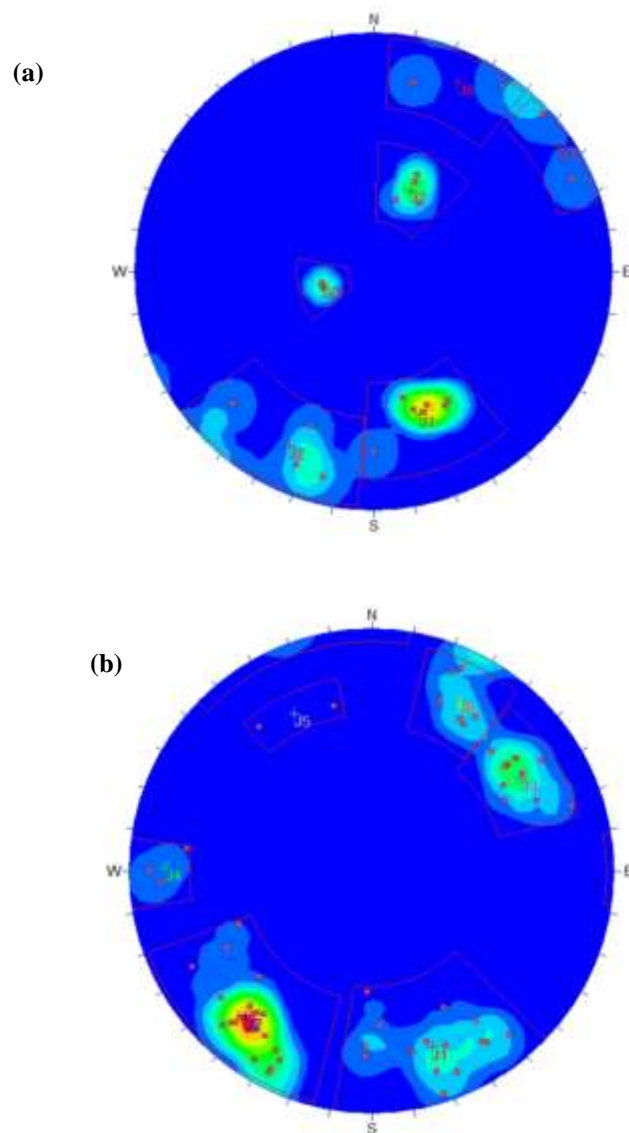


Figura 7.15 – a) Estereograma com atitudes estruturas aferidas nos veios; b)) Estereograma com atitudes estruturas aferidas nos itabiritos e xistos.

A Figura 7.16 apresenta o mapa estrutural da cavidade com as famílias de fraturas observadas, assim como as zonas de cisalhamento e fraturamento e os acamamentos relativos a cada local. Nota-se uma variação do acamamento entre NNE e NEE indicando a dobra principal observada na galeria. Além disso, no mapa é possível observar que a família de fraturas J5 é observada apenas em uma região da cavidade, provavelmente devido a sua localização entre as duas zonas de falha.

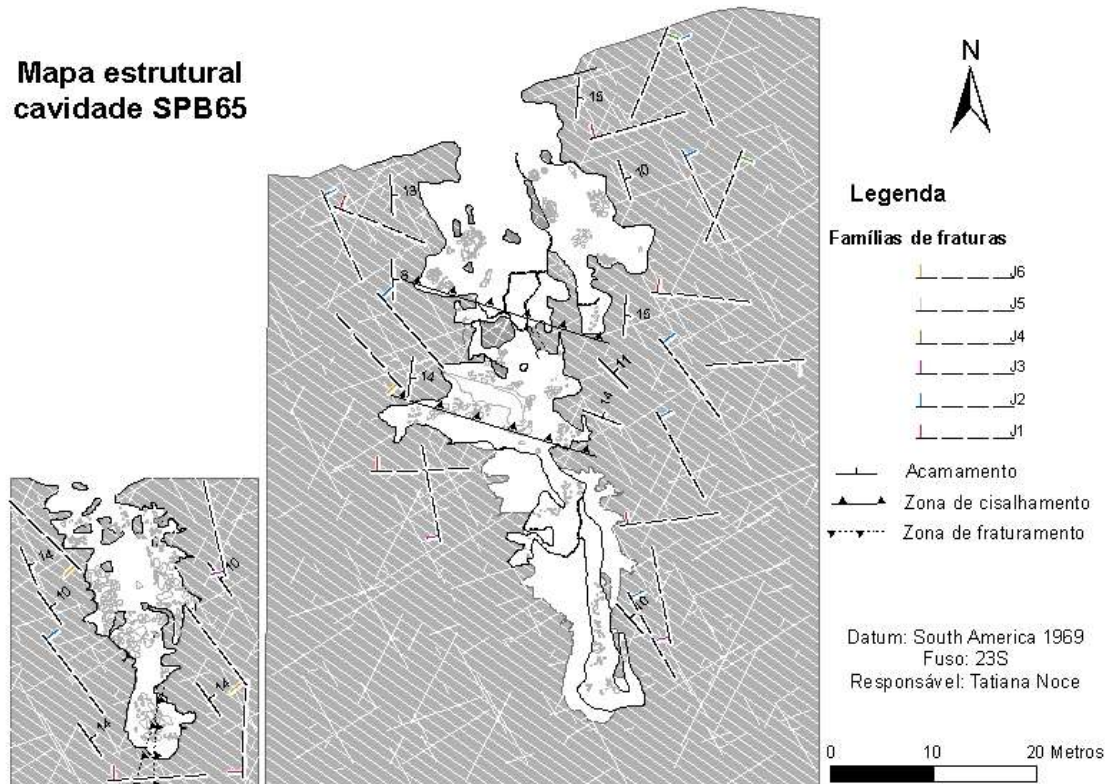


Figura 7.16 – Mapa estrutural cavidade SPB65 com as principais estruturas observadas.

7.3 - Qualidade do Maciço Rochoso

Para identificar as variações da qualidade do maciço rochoso ao longo da cavidade foram distribuídos 14 pontos de amostragem no seu interior (Figura 7.17).

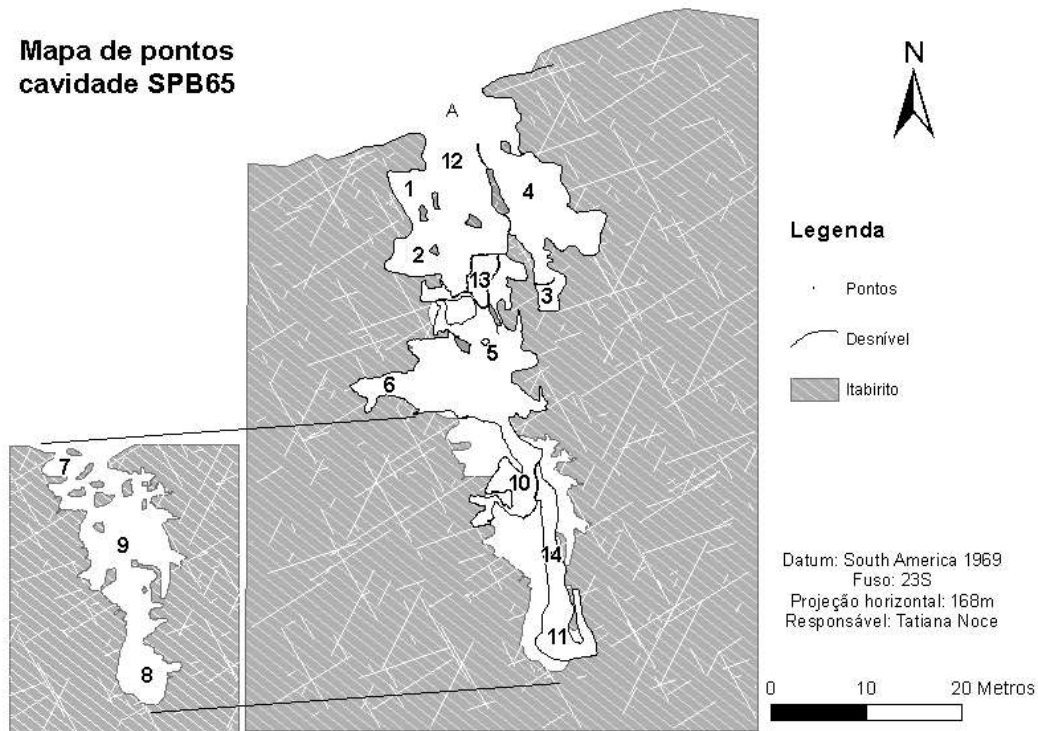


Figura 7.17 – Mapa de pontos cavidade SPB65.

O espaçamento (S) e o número de descontinuidades por metro linear (λ) de cada família de fraturas encontradas em cada ponto são descritos na Tabela 7.8, assim como o valor de J_v e RQD. Este último foi dado como nulo em sete pontos, explicado pelos valores de J_v superiores a 35. Na maioria dos pontos analisados foi observada a presença de três famílias de descontinuidades, entretanto em três dos pontos foi constatada a ocorrência de quatro famílias e em um ponto a presença de apenas duas famílias. Os dois pontos inseridos em veios de quartzo apresentaram-se totalmente fraturados, com RQD igual a zero.

Tabela 7.8 – Valores de S , λ , J_v e RQD no interior da cavidade SPB65.

Ponto	Litologia	S0		J1		J2		J3		Jv	RQD Palmstrom (1982)
		S (m)	λ	S (m)	λ	S (m)	λ	S (m)	λ		
1	Itabirito	0,10	10,00	0,12	8,33	0,11	9,09	-----	-----	27,42	24,50
2	Itabirito	0,08	12,50	0,15	6,47	0,11	9,33	-----	-----	28,30	21,60
3	Itabirito	0,07	15,00	0,13	7,50	0,14	7,00	-----	-----	29,50	17,65
4	Itabirito	0,07	15,00	0,25	4,00	0,16	6,15	-----	-----	25,15	31,99
5	Itabirito	0,10	10,00	0,05	20,00	0,06	17,14	-----	-----	47,14	0,00
6	Itabirito	0,03	31,25	0,08	12,50	0,10	10,00	-----	-----	53,75	0,00
7	Itabirito	0,05	20,00	0,08	12,22	-----	-----	-----	-----	32,22	8,67
8	Itabirito	0,03	30,00	0,17	5,83	0,23	4,29	0,17	6,00	46,12	0,00
9	Itabirito	0,04	23,75	0,18	5,71	0,31	3,18	-----	-----	32,65	7,27
10	Veio	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,00

Ponto	Litologia	S0		J1		J2		J3		Jv	RQD Palmstrom (1982)
		S (m)	λ	S (m)	λ	S (m)	λ	S (m)	λ		
11	Veio	----	----	----	----	----	----	----	----	----	0,00
12	Itabirito	0,07	15,38	0,15	6,67	0,30	3,33	0,25	4,00	29,38	18,03
13	Xisto	0,03	31,25	0,08	12,00	0,10	10,00	----	----	53,25	0,00
14	Xisto	0,03	30,00	0,12	8,33	0,12	8,18	0,15	6,67	53,18	0,00

7.3.1 - Rock Mass Rating (RMR)

O formulário com a caracterização de cada ponto segundo esse sistema de classificação de maciços está no Apêndice II e as pontuações atribuídas a cada característica são indicadas na Tabela 7.9. O menor valor de RMR no interior da cavidade foi 29, em um ponto inserido no veio de quartzo, valor explicado pela presença de água fluente, além de ter sido caracterizado como rocha triturada em virtude da grande quantidade de descontinuidades. O maior valor, ainda baixo, foi de 45, em uma porção superior inserida inteiramente no itabirito, explicado por ser um local completamente seco com descontinuidades rugosas preenchidas por material duro.

Tabela 7.9 – Pontuação relativa às características de cada ponto da cavidade SPB65 segundo o sistema de classificação RMR.

Pontos	RCU (MPA)	RQD	Influência da água	Descontinuidades						
				Esp.	Pers.	Ab.	Rug.	Preench.	Alt.	
1	2	3	7	8	6	4	3	2	3	
2	2	3	10	10	2	0	3	6	5	
3	2	3	10	10	4	0	5	2	5	
4	2	8	10	10	4	1	5	2	3	
5	4	3	7	8	4	1	5	4	5	
6	4	3	10	8	2	1	3	4	5	
7	4	3	10	10	4	1	3	4	5	
8	2	3	15	8	1	0	3	4	5	
9	2	3	15	8	2	1	5	4	5	
10	4	3	4	5	6	1	1	6	5	
11	4	3	0	5	6	1	1	6	3	
12	2	3	7	10	2	1	5	2	3	
13	2	3	7	8	4	1	1	2	3	
14	2	3	7	8	4	1	1	2	3	

Dos 14 pontos caracterizados, 7 foram classificados como rocha de má qualidade e 7 como rocha de qualidade razoável (Figura 7.18 e Figura 7.19). Esses baixos valores

podem ser explicados pela própria escavação da cavidade, gerando inúmeras fraturas de alívio com abertura considerável, provocando alteração da rocha e das paredes das discontinuidades. Outro fator é a própria geologia regional, uma vez que a cavidade está inserida em um contato tectônico entre dois supergrupos, favorecendo o desenvolvimento de inúmeras estruturas geológicas. Pode-se citar ainda a presença de água no maciço desde a porção intermediária até a boca da cavidade, reduzindo bastante à classificação do maciço nesses pontos.

Nota-se que os pontos inseridos na porção superior, mesmo apresentando uma menor resistência e maior friabilidade, são caracterizados como de qualidade razoável, acima da maioria dos pontos situados no nível principal. Isso ocorre principalmente porque esse sistema de classificação impõe uma variação de pontuação muito alta quando se trata da influência da água no maciço. Sabe-se que os pontos do nível superior são caracterizados como completamente seco, recebendo uma pontuação em 15 unidades nesse quesito, enquanto que os outros pontos recebem apenas de 0 a 10.

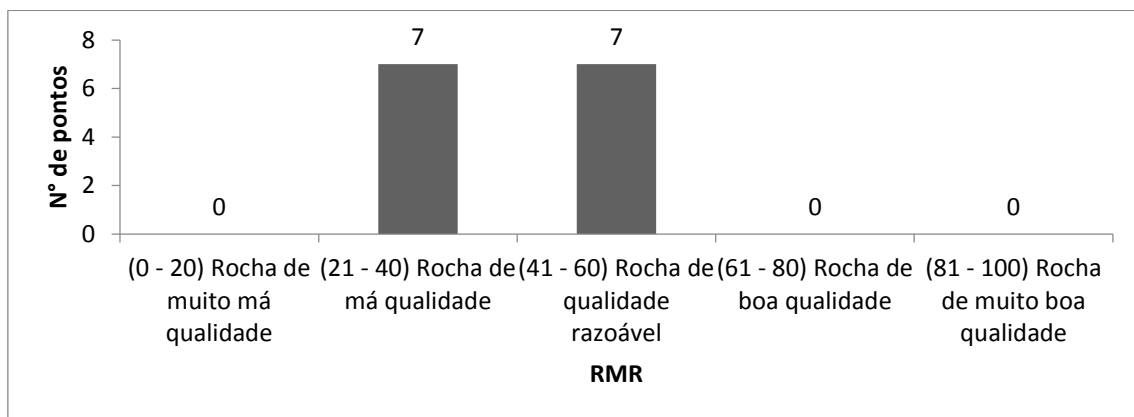


Figura 7.18 – Histograma mostrando a frequência de pontos da cavidade SPB65 por classe de RMR.

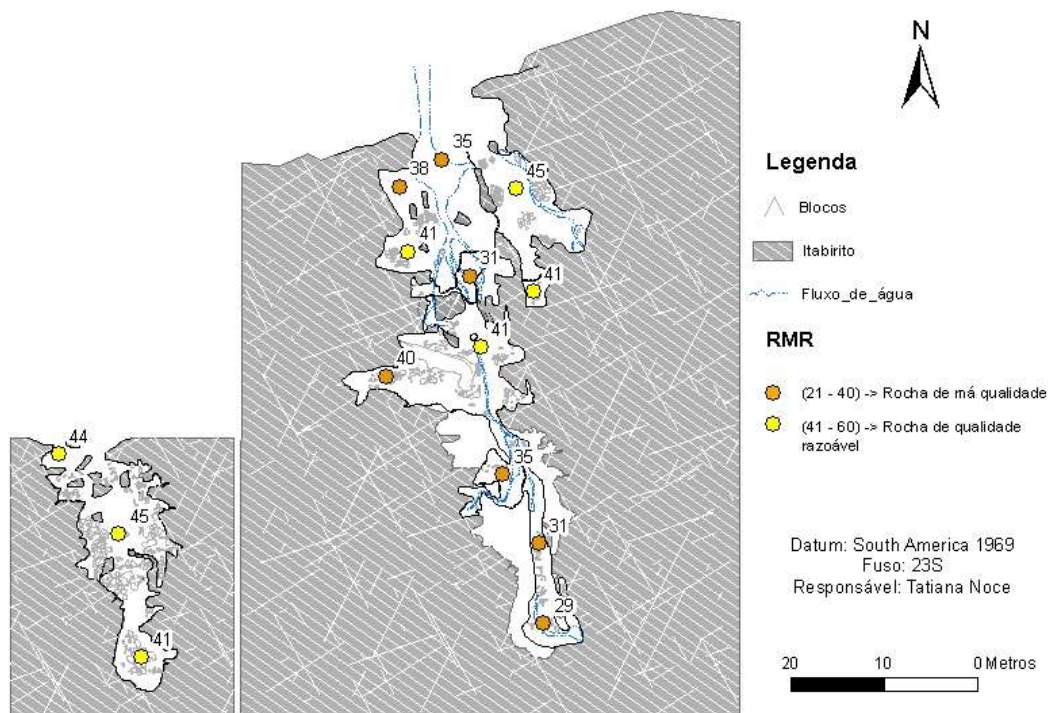


Figura 7.19 – Mapa de qualidade do maciço rochoso da cavidade SPB65 segundo o índice RMR.

7.3.2 - Rock Tunneling Quality Index (Q)

O formulário utilizado em campo com a caracterização de cada ponto segundo esse sistema de classificação de maciços está no apêndice II. Todos os pontos obtiveram uma pontuação baixa, classificando o maciço como ruim, muito ruim e extremamente ruim, nas classes VI, VII e VIII de Barton *et al.* (1974) (Figura 7.20). Esse sistema de classificação indicou um padrão geomecânico ainda mais baixo que o sistema RMR, fato explicado principalmente pela maior influência dos valores de RQD e pela inclusão das condições de tensão do maciço, dadas pelo índice SRF. Em geral, os pontos inseridos no itabirito se encontram na classe VII, com padrão geomecânico muito ruim, com exceção do ponto 4, que foi inserido na classe VI, com padrão geomecânico ruim. Fato explicado principalmente pelo maior valor de RQD neste ponto, além da alta rugosidade e baixa continuidade das descontinuidades. Os pontos inseridos nos veios e no xisto estão na classe VIII, com padrão geomecânico extremamente ruim, explicado pelo baixo índice RQD e pelo grande número de descontinuidades, sendo que estas se apresentam em geral lisas.

A partir da Figura 7.21 é possível notar um índice Q mais baixo na porção mais distal do nível principal. Nessa porção são observados principalmente xistos e veios além de

um grande escoamento de água, assim como no ponto 5, aumentando as condições de tensão no maciço e reduzindo sua classificação segundo o sistema Q.

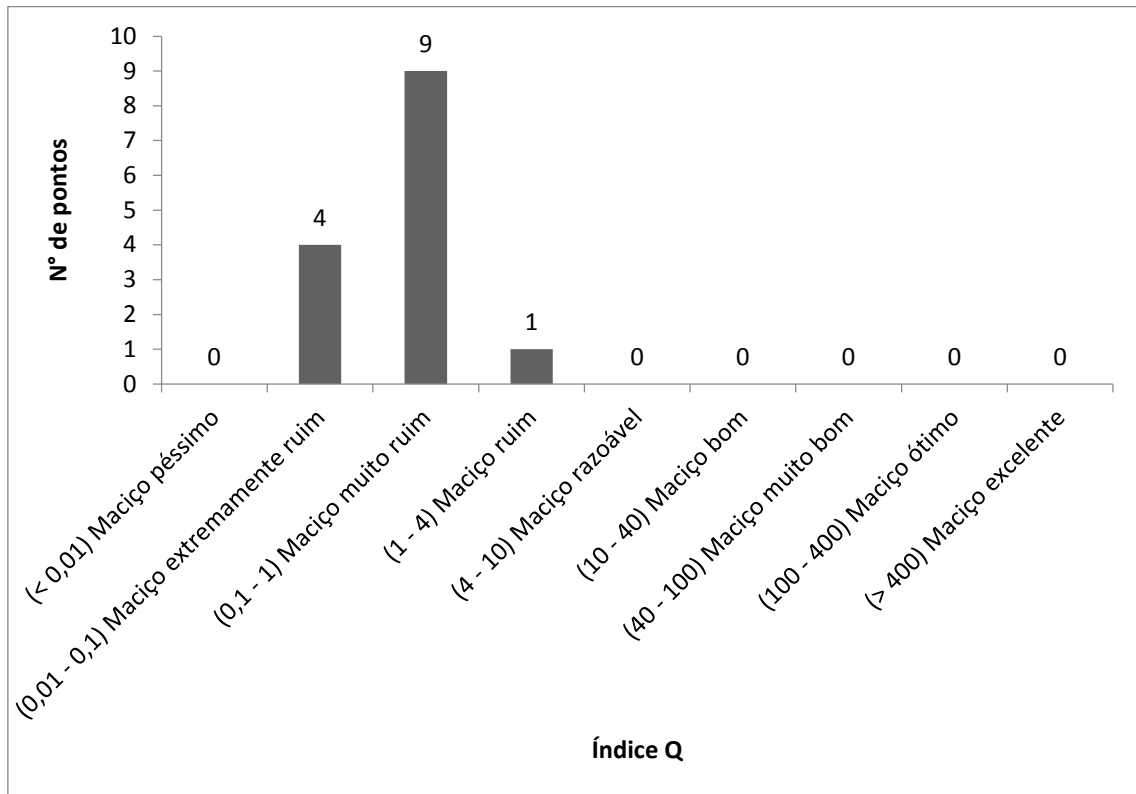


Figura 7.20 – Histograma mostrando a frequência de pontos da cavidade SPB65 por classe de Q.

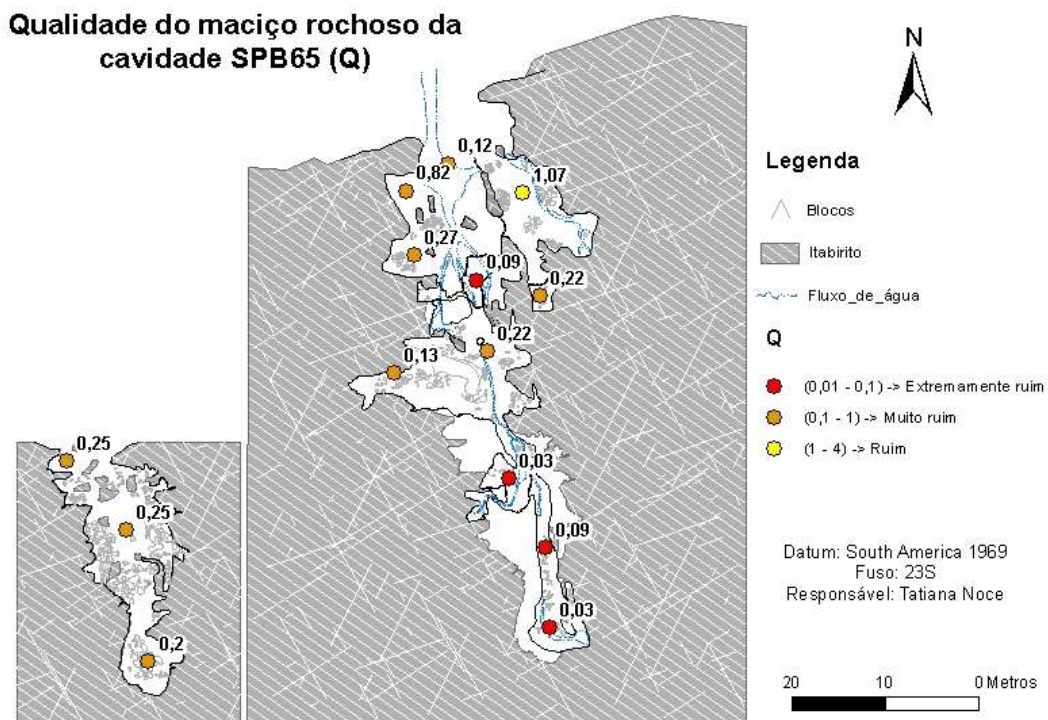


Figura 7.21 – Mapa de qualidade do maciço rochoso da cavidade SPB65 segundo o índice RMR.

7.3.3 - Rock Mass Index (RMi)

As devidas classificações de cada ponto em campo de acordo com esse sistema para rugosidade (jR), fator de alteração das juntas (jA) e continuidade das descontinuidades (jL) estão no Apêndice II. A Tabela 7.10 apresenta os aspectos analisados para o cálculo do volume do bloco em cada ponto. Não foi possível calcular o volume dos blocos dos pontos 10 e 11, uma vez que eles estão inseridos em veios de quartzo classificados em campo como rocha muito fraturada, com espaçamento (S) extremamente baixos. Dessa forma, o volume do bloco desses pontos é extremamente baixo, e foi dado como igual a 0,0001 de modo a não zerar o índice RMi deste litotipo. No caso do ponto 7, onde só foram identificadas duas famílias principais de descontinuidades com um comprimento médio de 2 m, utilizou-se a Equação 1.1, definida por Palmstrom (1996).

$$Vb = S1 * S2 * L = 0,050 * 0,082 * 2 = 0,00818 \quad \text{Equação 7.1}$$

Tabela 7.10 – Tabela contendo as características utilizadas para o cálculo do volume do bloco (Vb) de cada ponto a partir do espaçamento entre as descontinuidades (S1, S2, S3).

Pontos	S1	S2	S3	$\gamma1$	$\gamma2$	$\gamma3$	sen($\gamma1$)	sen($\gamma2$)	sen($\gamma3$)	Vb (m ³)
1	0,100	0,120	0,110	61,108	42,606	63,928	0,876	0,677	0,898	0,00248
2	0,080	0,155	0,107	75,823	153,981	78,193	0,970	0,439	0,979	0,00318
3	0,067	0,133	0,143	73,079	44,937	68,092	0,957	0,706	0,928	0,00203
4	0,067	4,000	0,163	70,101	47,810	77,388	0,940	0,741	0,976	0,06374
5	0,100	0,050	0,058	62,554	107,529	83,862	0,887	0,954	0,994	0,00035
6	0,032	0,080	0,100	70,377	92,744	61,667	0,942	0,999	0,880	0,00031
7	0,050	0,082	-----	156,513	-----	-----	0,399	-----	-----	0,00818
8	0,033	0,171	0,233	76,558	120,084	86,998	0,973	0,865	0,999	0,00159
9	0,042	0,175	0,314	72,006	144,150	81,240	0,951	0,586	0,988	0,00421
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00001
11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00001
12	0,065	0,150	0,300	83,440	80,624	63,769	0,993	0,987	0,897	0,00333
13	0,032	0,120	0,122	73,400	66,237	66,271	0,958	0,915	0,915	0,00058
14	0,032	0,120	0,122	73,400	66,237	66,271	0,958	0,915	0,915	0,00058

O valor de RMi foi calculado a partir dos valores e pontuações apresentados no Apêndice II, bem como o índice final RMi. O ponto 4 obteve a maior classificação, atingindo um RMi de 1,7, classificando o maciço como forte em termos de resistência, com RMi alto, explicado sobretudo, pelo maior volume dos blocos neste ponto. Os pontos 10 e 11, inseridos no veio de quartzo, também foram classificados com RMi alto, igual a 1,288, uma vez que mesmo apresentando um volume do bloco extremamente

baixo, os veios apresentam uma resistência a compressão uniaxial relativamente alta. O menor valor foi obtido no ponto 8, localizado no itabirito da porção mais distal superior da cavidade, onde foram observados um maior número de famílias de fraturas e uma resistência (σ_c) do maciço mais baixa. Esse ponto foi classificado com resistência fraca e R_{Mi} baixo. A partir da Figura 7.22 nota-se que oito pontos foram classificados como moderadamente forte em termos de resistência, com R_{Mi} moderadamente alto. Apenas três apresentaram-se com resistência fraca e R_{Mi} baixo, e três com R_{Mi} alto e forte em termos de resistência.

Da Figura 7.23 nota-se que a maioria dos pontos apresenta um R_{Mi} moderadamente alto, caracterizados principalmente pelo volume dos blocos. Os pontos de menor classificação continuam sendo os situados na porção mais distal do nível principal, neste caso devido ao alto grau de faturamento.

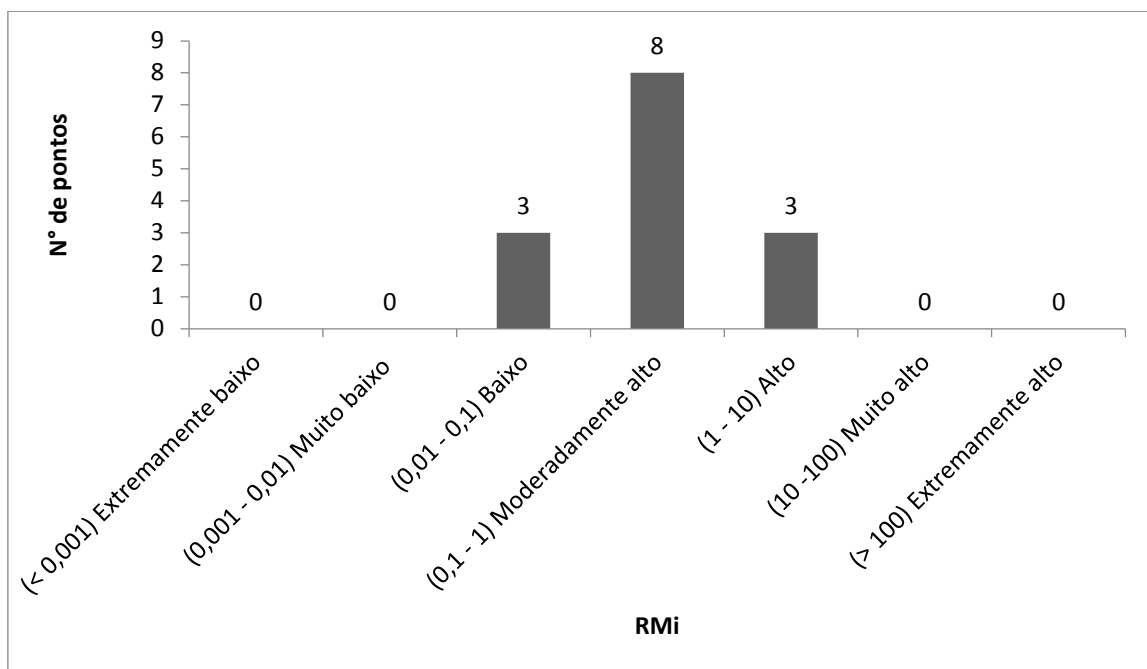


Figura 7.22 – Histograma mostrando a frequência de pontos da cavidade SPB65 por classe de R_{Mi}.

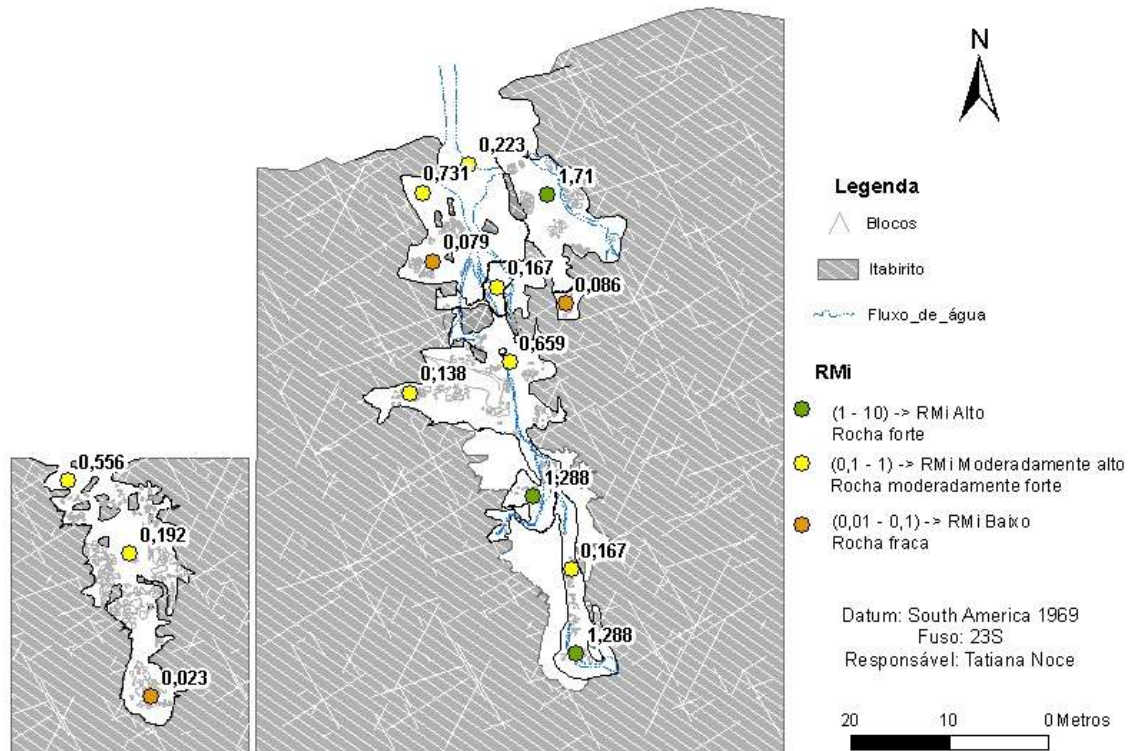


Figura 7.23 – Mapa de qualidade do maciço rochoso da cavidade SPB65 segundo o índice RMI.

7.4 - Dinâmica hídrica

Ferreira & Bacellar (2010) descrevem oito sistemas aquíferos principais na região do Anticlinal de Mariana, estando dois deles presentes no Gogo. Os xistos encontrados na galeria estariam inseridos no sistema aquífero do Grupo Nova Lima, descrito pelos autores como pouco poroso e pouco permeável, não sendo considerados bons armazenadores e transmissores de água.

Os veios de quartzo, devido ao alto grau de faturamento, são bons transmissores de água, sendo comumente observados pequenos fluxos nessas fraturas. A porção inferior mais distal da cavidade está inserida em meio a estes veios, e apresenta amplo gotejamento advindo de suas fraturas.

Os itabiritos, por sua vez, estão inseridos no sistema aquífero do Grupo Itabira, considerado um importante reservatório de águas subterrâneas. O itabirito possui porosidades significativas nos níveis quartzosos podendo ser classificado como um material que permite a formação de aquíferos porosos. Além disso, por ser uma rocha metamorfizada, apresenta uma grande quantidade de estruturas, podendo gerar também

aquíferos fissurais. A estrutura acamadada desse material proporciona um fluxo preferencial da água em seu interior, entretanto os fraturamentos de diversas direções fazem a interligação entre os níveis porosos.

Como a cavidade encontra-se encaixada no contato entre os Grupos Nova Lima e Itabira, espera-se que o aporte de água para seu interior seja pelo pacote de itabiritos e pelos fraturamentos existentes nos veios de quartzo. Sabe-se que o nível superior da galeria, totalmente inserido em itabirito, encontra-se completamente seco, mesmo em épocas chuvosas. Dessa forma, conclui-se que o principal aporte de água ocorre a partir do seu contato com os veios de quartzo e pelos fraturamentos existentes nestes (Figura 7.24).

A cavidade apresenta um fluxo de água perene em direção a entrada, sentido de sul para norte, com ocorrência de empoçamentos. Este fluxo encontra o córrego canelas, uma vez que a galeria se encontra bem próxima a sua margem direita. Dessa forma, a cavidade funciona como uma captação que direciona a água presente no maciço rochoso de seu entorno para a drenagem próxima, ajudando a manter o aporte de água do sistema à jusante.

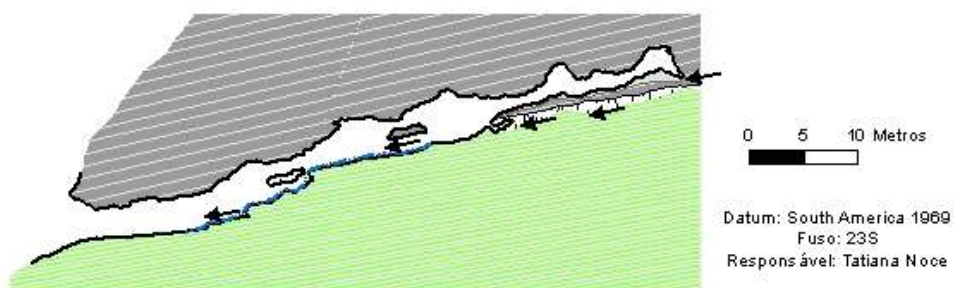
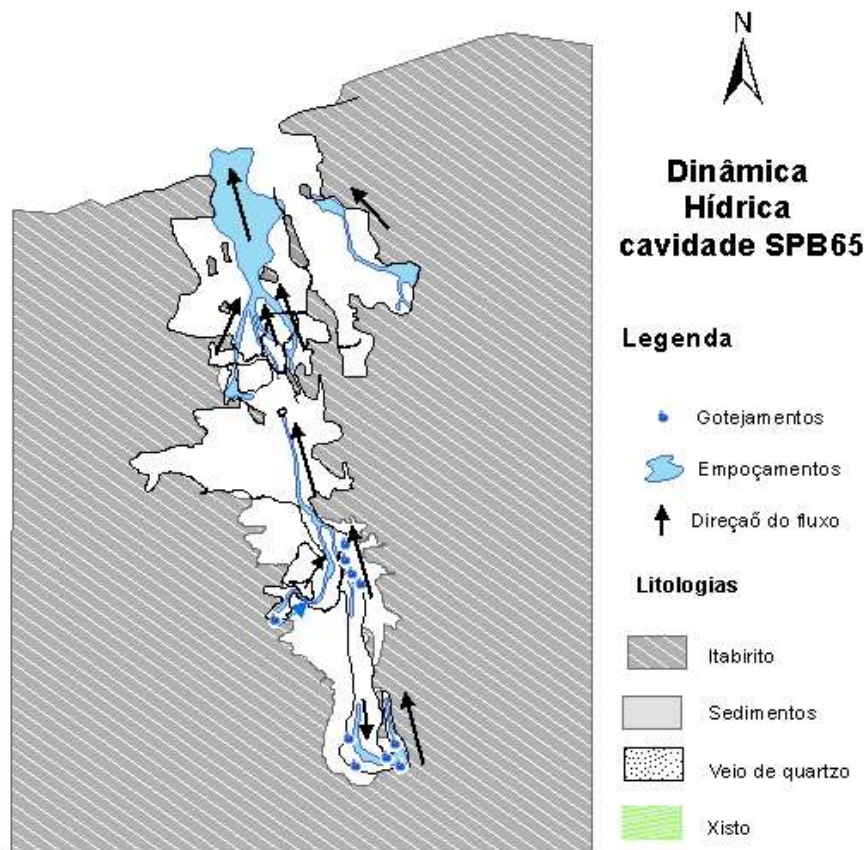


Figura 7.24 – Mapa e perfil mostrando o fluxo de água no interior da cavidade SPB65.

7.5 - Dinâmica dos sedimentos

O local com maior quantidade de geração e depósitos de sedimentos ocorre no setor D, onde processos de abatimentos da parede e do teto de itabirito são claramente observados. Nesse local, o piso é dado por um cone de sedimentos oriundos dos constantes deslocamentos do teto devido ao sistema geral de relaxamento do maciço e do encontro de duas grandes superfícies de fraturamento. Esses sedimentos apresentam uma coloração cinza claro, sendo compostos principalmente por grãos de quartzo,

itabirito e minerais de óxido de ferro, todos de granulometria variando de média a grossa, além de blocos deslocados do itabirito. São lentamente movimentados em direção à entrada da galeria em virtude da sua inclinação geral ou, a partir da porção intermediária, alcançando o fluxo perene de água em direção à boca.

O setor C também apresenta um depósito sedimentar considerável, nesse caso composto principalmente por sedimentos mais finos de granulometria média a argila e coloração cinza esverdeada. Esses sedimentos são, em sua maioria lixiviados do xisto subjacente, sendo sua movimentação principal dada pela dinâmica hídrica da caverna, em direção à boca. São observados ainda, blocos de quartzo caídos dos veios, principalmente no último salão do setor. Esse tipo de sedimento também ocorre na porção leste do setor A, entretanto, com blocos de itabirito oriundos do teto além dos fragmentos de quartzo de veio.

O setor B apresenta depósitos significativos de sedimentos, com uma zona preferencial de carreamento pelo fluxo hídrico em direção à entrada. Ocorrem fluxos secundários gravitacionais oriundo das laterais em direção ao fluxo principal. É caracterizada por sedimentos mistos compostos por fragmentos de itabirito e fragmentos de quartzo de veio em meio a uma matriz argilo-arenosa. Trata-se de sedimentos mal selecionados, com grãos angulosos de granulometria desde argila até blocos métricos e uma coloração em tons de marrom. Esse depósito também é observado na porção oeste do setor A da cavidade.

A porção central do setor A apresenta depósitos sedimentares com maior concentração de argilominerais devido a superfície de menor inclinação favorecer a deposição de partículas mais finas, além de matéria orgânica, com uma coloração mais escura avermelhada e granulometria desde cascalho até argila. Os sedimentos mais finos são direcionados a drenagem juntamente com o fluxo de água, sobretudo em épocas chuvosas. É comum a presença de blocos e seixos de rochas dispersos em meio a esses sedimentos.

Todos os sedimentos observados são gerados na própria cavidade, sem evidências de aporte externo além da matéria orgânica comumente encontrada nas proximidades da boca. O sentido geral de fluxo é a saída da cavidade, sendo seu transporte regido

principalmente pela movimentação de água e pela gravidade (Figura 7.25). Além disso, são comuns áreas com empilhamento antrópico de blocos, remobilização de sedimentos e escavações, principalmente nos salões principais, próximo à boca.

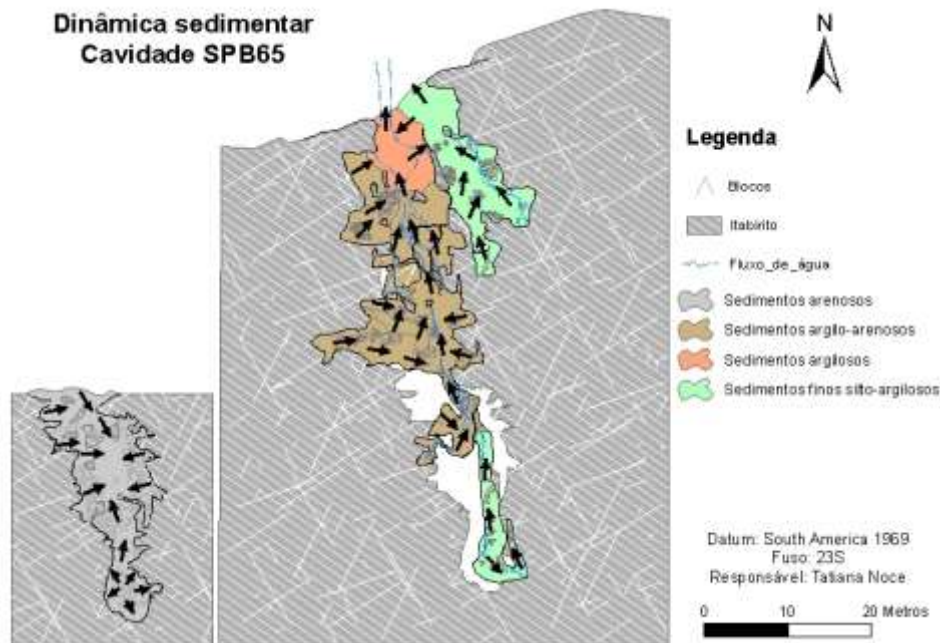


Figura 7.25 – Mapa mostrando a dinâmica sedimentar da caverna SPB65.

7.6 - Análise Cinemática

A partir das direções médias das estruturas observadas em cada ponto da caverna, aliado a sua morfologia geral, realizou-se uma análise da geometria dos principais mecanismos de ruptura que podem ser gerados em cada porção. Ressalta-se que cunhas geradas no piso e cunhas muito encaixadas, conforme apresentado na Figura 7.26, não foram consideradas nas análises, pois apresentam as possibilidades de movimentação reduzidas. Outro fator que deve ser mencionado é a influência dos pilares existentes, assim como a morfologia irregular das laterais da caverna, que delimitam a dimensão máxima das cunhas. Ressalta-se que esta análise é restrita a apenas verificar a geometria das cunhas com as possíveis combinações de estruturas e suas prováveis movimentações. A orientação principal da caverna, de direção aproximadamente S-N foi inserida nas análises.



Figura 7.26 – Cunha encaixada gerada no salão principal da cavidade SPB65.

O setor A apresenta cinco famílias de descontinuidades principais, dadas pelo acamamento S0 e pelas famílias de fraturas J1, J2, J4 e J6. Foram geradas um total de 10 possibilidades de cunhas a partir das descontinuidades mencionadas, todas gerando uma zona de fraqueza preferencial NW-SE. Três possibilidades, dadas pelas combinações entre as famílias S0/J2/J6, J1/J2/J4 e J1/J4/J6 foram descartadas por se tratarem de cunhas muito encaixadas, com possibilidades muito baixas de movimentação.

O principal mecanismo de ruptura observado nesse setor é dado por quedas de blocos do teto, com uma geometria geral em forma de lajes (Figura 7.27). Este tipo de mecanismo foi observado nas combinações entre as famílias S0/J1/J2, S0/J1/J4, S0/J1/J6, S0/J2/J4 e S0/J4/J6. Nota-se a ampla influência do acamamento nesse tipo de ruptura, estando presente em todas as cunhas citadas (Figura 7.28).

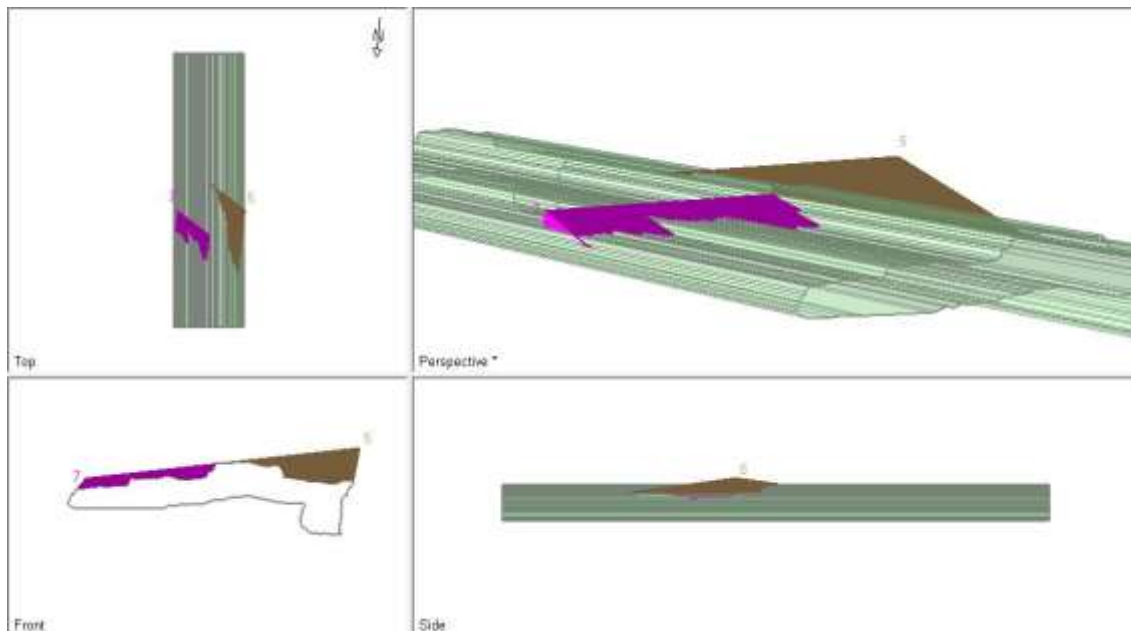


Figura 7.27 – Ruptura em laje salão principal cavidade SPB65.

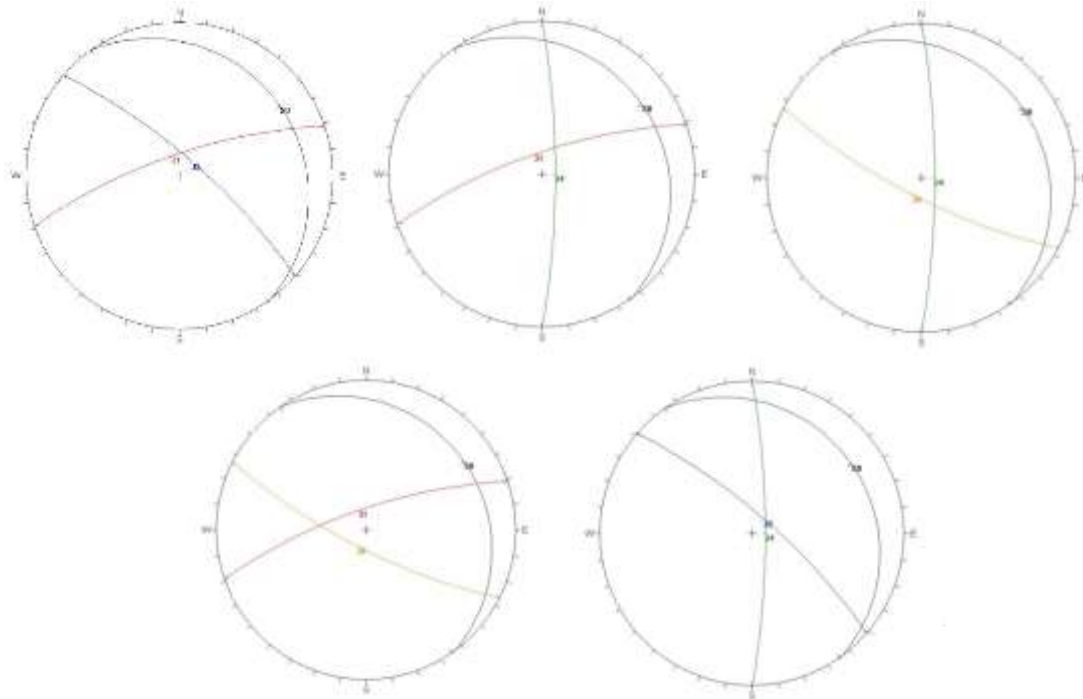


Figura 7.28 – Estereogramas mostrando as conformações das cunhas em forma de laje.

Outro tipo de cunha formada nesses salões são as resultantes de descontinuidades com traços sub-paralelos, gerando pequenas capelas alongadas segundo NW-SE (Figura 7.29). Apenas duas possibilidades geraram esse tipo de estrutura, J1/J2/J6 e J2/J4/J6 (Figura 7.30). Essas capelas também se apresentam bastante encaixadas em suas conformações maximizadas, tornando a possibilidade de movimentação relativamente baixa, entretanto podem gerar zonas de fraquesa com direção preferencial.

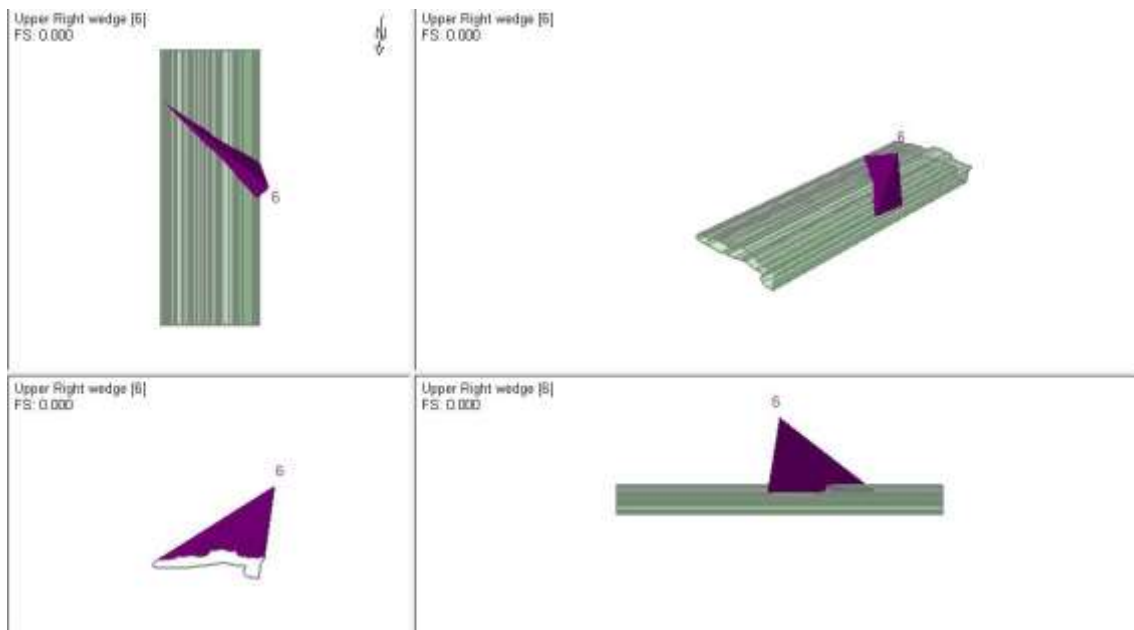


Figura 7.29 – Ruptura em forma de capela alongada salão principal cavidade SPB65

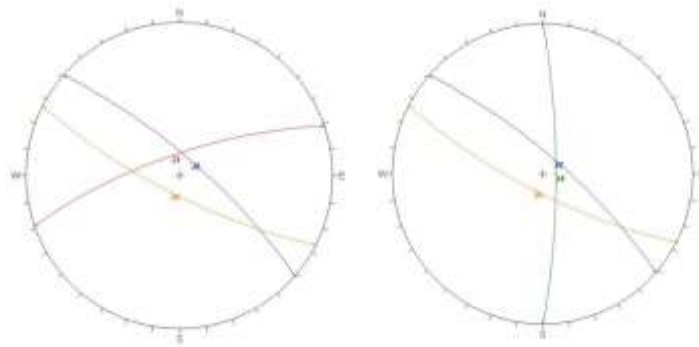


Figura 7.30 – Estereogramas mostrando as conformações das cunhas alongadas com direção NW-SE.

O setor B também é composto por cinco famílias de discontinuidades principais, se diferenciando do salão principal pela ausência das famílias de fraturas J4 e J6, e a presença das famílias J3 e J5. Duas combinações mostraram uma cunha em forma de capela alongada na direção NW-SE, resultante das discontinuidades sub-paralelas J2 e J3, e J1 e J5 (Figura 7.31 e Figura 7.32). As combinações J1/J2/J5 e J1/J3/J5, por outro lado, geraram uma zona de fraqueza alongada no sentido SWW-NEE, conforme apresentado na Figura 7.33 e na Figura 7.34. As quatro combinações apresentam-se encaixadas, com ápice muito alto em relação ao teto da galeria, gerando cunhas com uma possibilidade de movimentação relativamente baixa, entretanto a existência dessas estruturas podem gerar zonas de fraqueza com direções preferenciais.

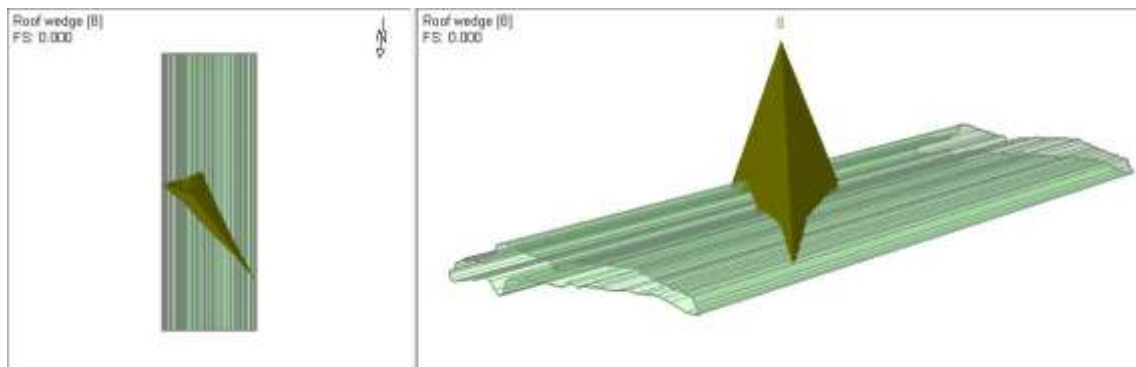


Figura 7.31 – Cunha em forma de capela alongada segundo NW – SE observada na porção intermediária.

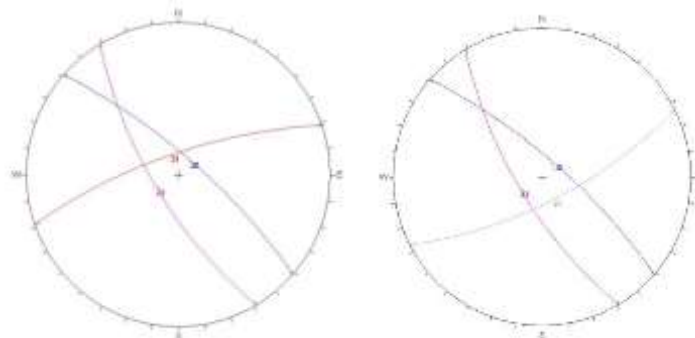


Figura 7.32 – Estereogramas mostrando as conformações das cunhas alongadas com direção NW-SE na porção intermediária.

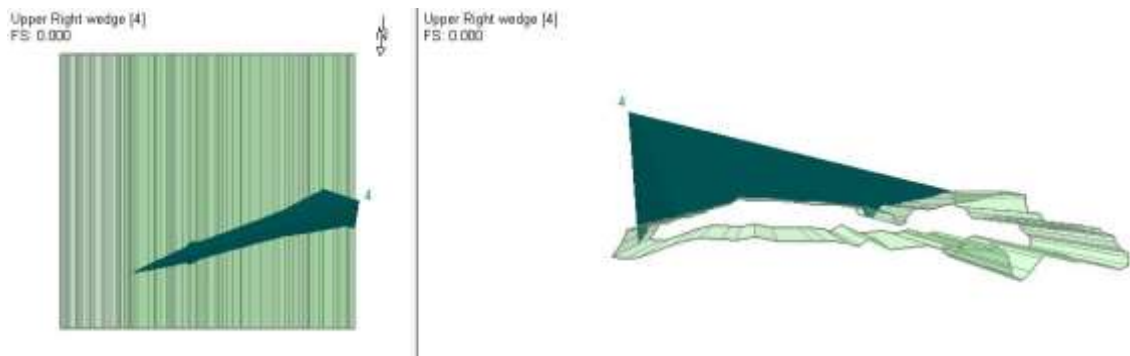


Figura 7.33 – Cunha em forma de capela alongada segundo NWW – SEE observada na porção intermediária.

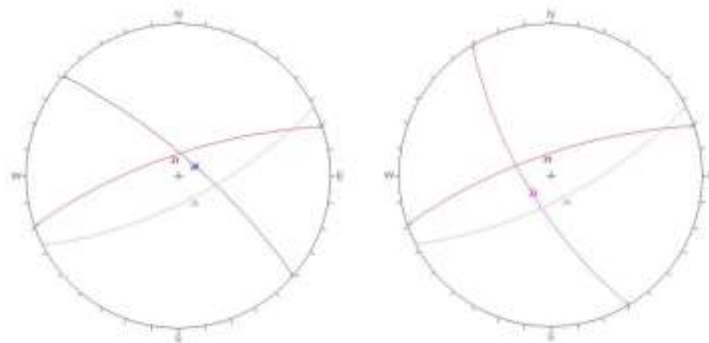


Figura 7.34 – Estereogramas mostrando as conformações das cunhas alongadas com direção NWW-SEE na porção intermediária

Assim como nos salões da entrada, o principal mecanismo de ruptura observado no setor B da cavidade é dado pela queda de blocos do teto, causada pelas cunhas com geometria em forma de laje. Essas lajes apresentam-se alongadas na direção NW-SE, sendo a principal direção de fraqueza nessa porção da caverna (Figura 7.35). Sabe-se que o acamamento, devido ao seu baixo mergulho, é a principal estrutura responsável por esse tipo de ruptura. Dessa forma, das seis combinações de descontinuidades com a presença do acamamento, cinco apresentaram cunhas com geometria em forma de lajes (Figura 7.36).

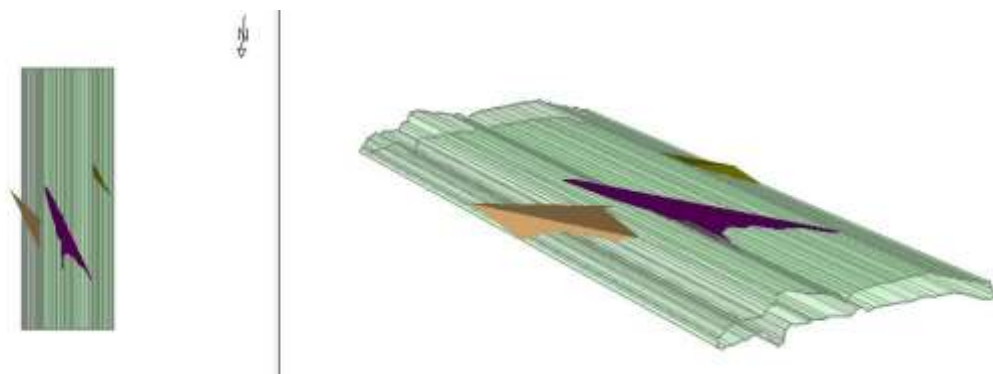


Figura 7.35 – Cunhas em lajes alongadas na direção NW-SE formadas na porção intermediária.

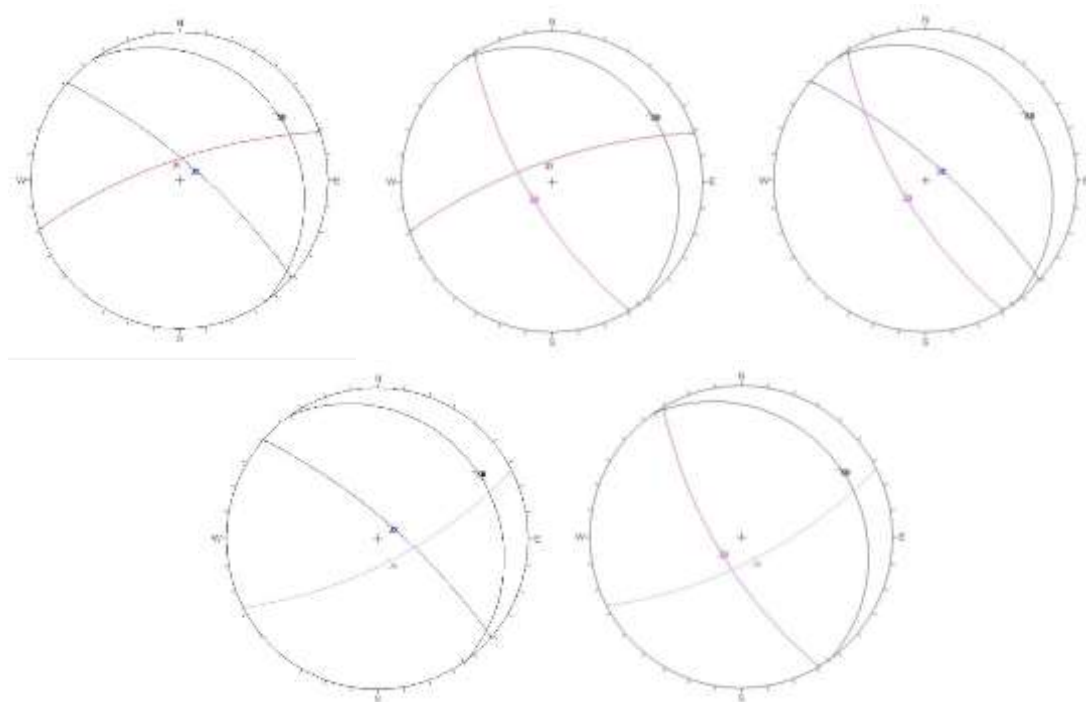


Figura 7.36 – Estereogramas mostrando as conformações das cunhas em forma de laje alongada formadas na porção intermediária.

O setor C apresenta diversos fatores desfavoráveis a formação de cunhas, tais como o tamanho reduzido das seções e o contexto litológico, comumente formada por xistos no piso e proximidades, e veios de quartzo nas paredes e teto. Dessa forma, não foram realizadas análises cinemáticas via *unwedge* nessa porção.

Foram analisados dois cortes no setor D da galeria, um inserido no ponto 8 e outro no ponto 9. As estruturas inseridas em ambas as análises foram S0, J1, J2, J3 e J6. Ao analisarmos o corte próximo ao ponto 9, nota-se a predominância de uma zona de fraqueza preferencial NW-SE, assim como no restante da cavidade. Nessa região, muitas combinações demonstraram uma possibilidade de movimentação pequena, com geração de cunhas muito encaixadas no teto em itabirito. Entre elas, podem-se citar as geradas a partir das famílias de fraturas J1, J2, J3 e J6, que resultaram em cunhas na forma de capelas alongadas com direção preferencial NW-SE (Figura 7.37 e Figura 7.38).

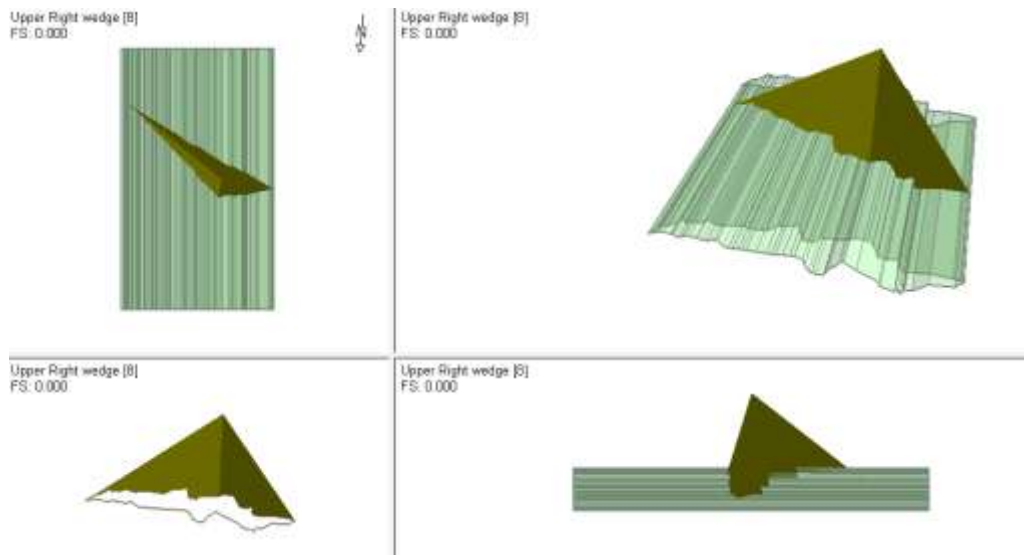


Figura 7.37 – Cunha em forma de capela porção superior da cavidade SPB65.

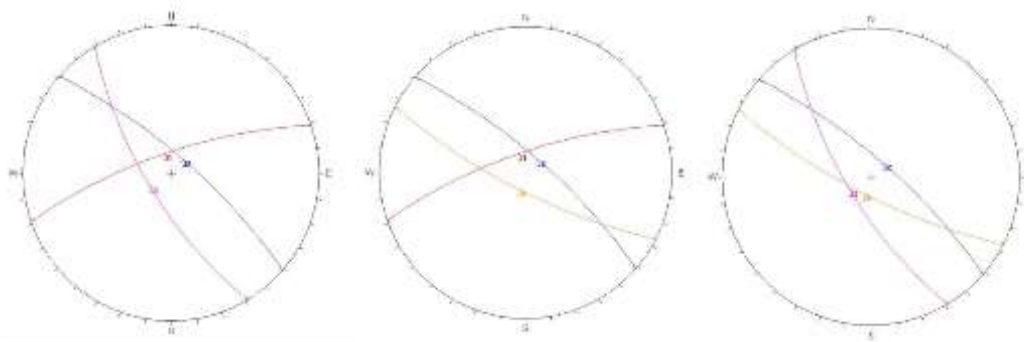


Figura 7.38 – Estereogramas mostrando as conformações das cunhas alongadas em forma de capela na porção superior.

As combinações com maiores possibilidades de movimentação nessa região são as formadas pelo acamamento (S0), gerando possíveis quedas de blocos do teto da galeria. Essas cunhas encontram-se em forma de lajes delimitadas comumente por estruturas com uma direção geral NW-SE, assim como as maiores possibilidades de ruptura em outras regiões da cavidade (Figura 7.39 e Figura 7.40).

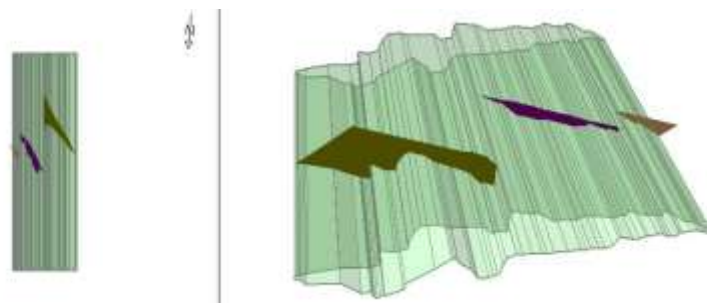


Figura 7.39 – Cunhas na forma de lajes alongadas nível superior.

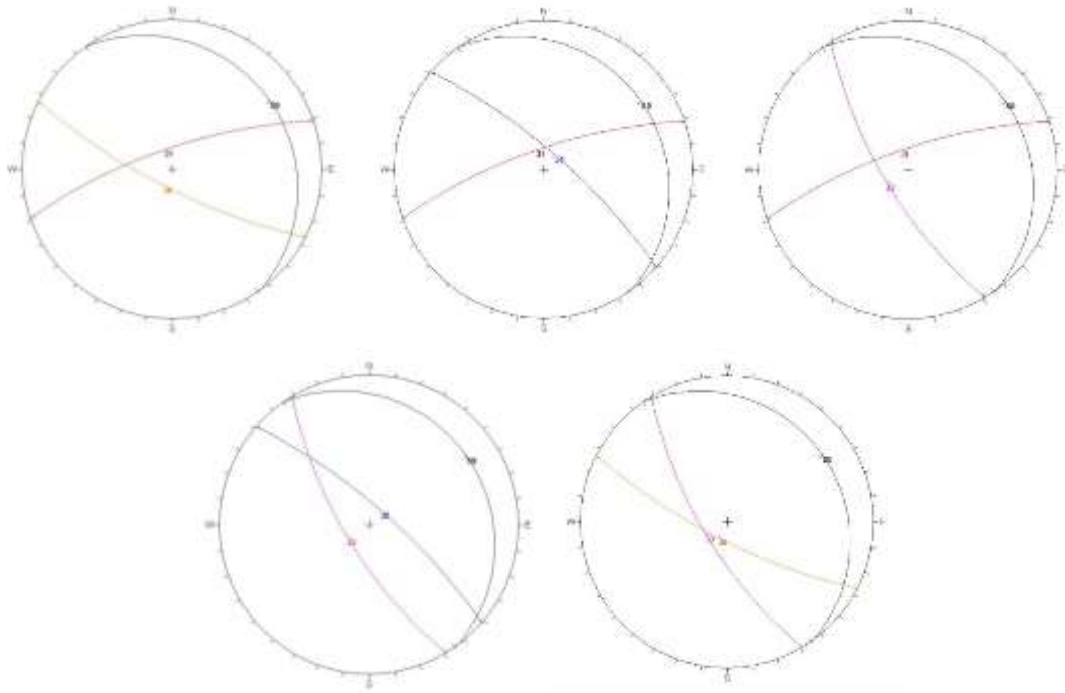


Figura 7.40 – Estereogramas mostrando as conformações das cunhas em forma de laje alongada formadas na porção superior.

O ponto 8 tem características que o colocam como a região mais instável da cavidade, principalmente devido as duas zonas de fraturamento existentes nele, aliadas ao acamamento e as famílias de fraturas J1, J2, J3 e J6. Além disso, o corte utilizado na análise para essa região apresenta uma morfologia triangular, favorecendo a geração de cunhas nas laterais inclinadas da cavidade. Como as zonas de fraturamento são únicas, sem geração de famílias, elas não foram utilizadas na análise das cunhas.

As combinações entre as famílias de fraturas, em geral subparalelas entre si, podem gerar cunhas em forma de capela alongadas na direção NW-SE nas paredes da galeria, conforme apresentado na Figura 7.41. Ao combinarmos essas famílias com o acamamento são geradas cunhas em forma de lajes, resultantes da relativa horizontalidade deste, que podem causar queda de blocos para o interior da galeria (Figura 7.42). Nos casos de famílias de fraturas com traços subparalelos combinadas ao acamamento também é comum a geração de cunhas muito encaixadas com ápice muito alto e baixa possibilidade de movimentação.

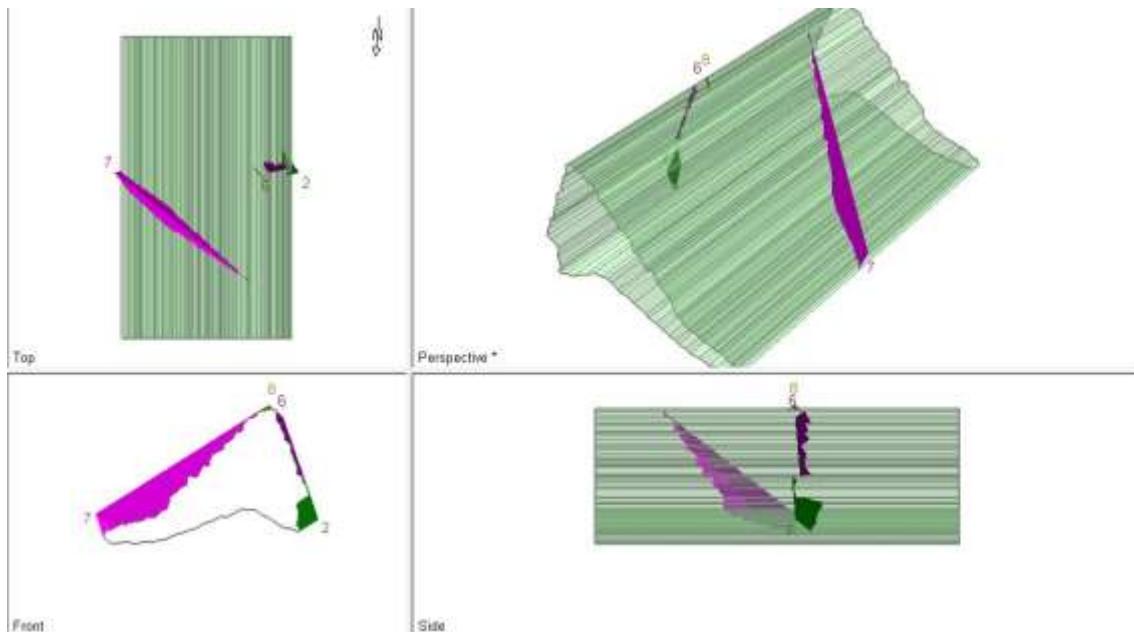


Figura 7.41 – Cunhas em forma de capela alongada geradas no ponto 8.

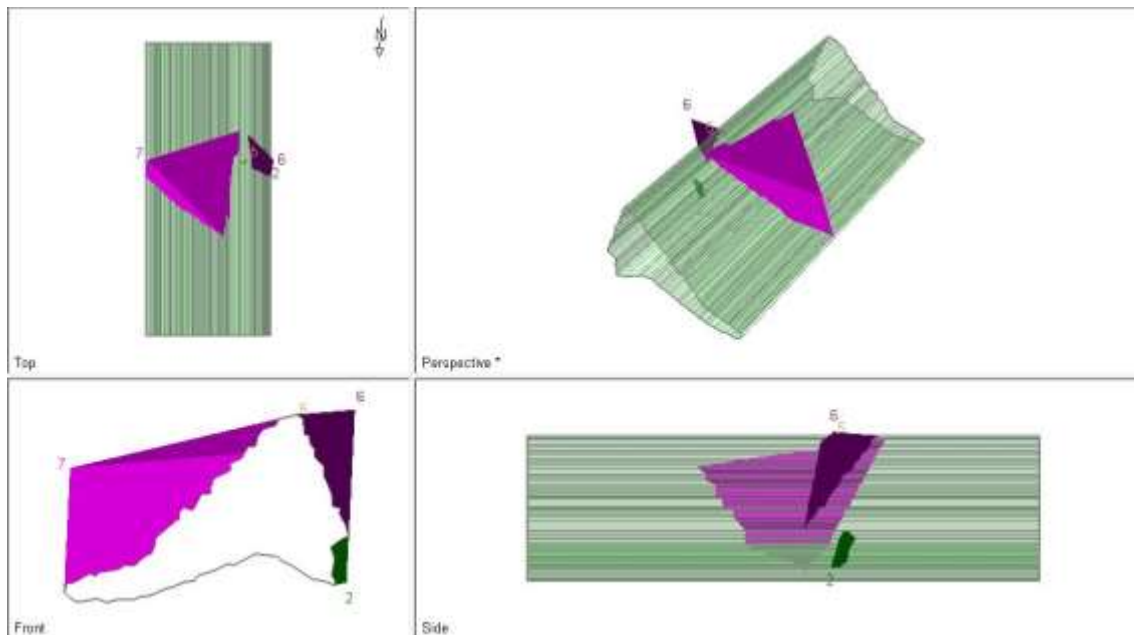


Figura 7.42 – Cunhas em forma de lajes geradas no ponto 8.

7.7 - Espeleogênese e Evolução

A cavidade está inserida em meia encosta de uma área de escarpa íngreme de direção E-W, escavada pelo Córrego Canelas, afluente do Ribeirão do Carmo, na base de uma grande serra com topografia em aclave para N. Encontra-se no contato entre o itabirito (topo) e o xisto (base) através de um contato tectônico dos Supergrupos Rio das Velhas e Minas, com caimento geral para N e a ocorrência de um dobramento sinistral amplo ao longo de todo o eixo N-S da cavidade.

Com esse fluxo preferencial natural de água no interior do maciço a lixiviação dos níveis quartzosos do itabirito fica cada vez mais intensa na região do eixo da dobra, iniciando a formação de um primeiro conduto de direção S-N. Em um processo constante esse fluxo de água alargou e ampliou esse conduto primário.

Devido a conformação geral da escarpa, são esperados esforços induzidos pela serra sobrejacente no sentido de relaxamento do maciço em direção à escarpa. Esse comportamento natural propicia a abertura de diversos planos de descontinuidades preexistentes que, em conformidade com o conduto primário, geram zonas preferenciais de alargamento da cavidade.

Em um processo cíclico a presença das descontinuidades é responsável pela liberação de blocos do teto que perdem a estabilidade em função dos alargamentos constantes, gerando sedimentos que uma vez no piso são carregados para fora da cavidade, gerando mais espaço para os processos de alargamento.

Entretanto, a cavidade SPB65 teve sua maior parte escavada pelo homem, seguindo o veio de quartzo em busca de ouro. Devido aos veios de quartzo hospederios da mineralização estarem comumente na zona de contato, as escavações das galerias seguiram esse horizonte. Ao alcançar uma porção inserida inteiramente no itabirito a escavação foi paralisada, um pouco acima da porção intermediária da cavidade.

O alívio de pressão causado pelas escavações abriu diversas descontinuidades ao longo das porções superiores da cavidade, formando cunhas no itabirito, além de duas zonas de cisalhamento. Essas estruturas geraram um processo de abatimento de blocos e sedimentos ao longo da cavidade, que soterraram parte das galerias escavadas, uma vez que são observados condutos preenchidos por sedimentos não penetráveis nas laterais da porção superior da cavidade. Em algumas porções os processos de instabilidade gerados pelas escavações são bloqueados por pilares deixados durante a própria escavação.

No último salão do nível superior, local onde a escavação avançou mais sobre o itabirito, são observados cones de sedimentos e o teto em capela gerado pela queda

constante de blocos. Esse fato evidencia que os processos de relaxamento e expansão do maciço ainda são atuantes. A formação tanto natural quanto escavada da cavidade segue o contato entre os Supergrupos Minas e Rios das Velhas em uma direção N-S, com ramificações laterais geradas por estruturas secundárias e galerias escavadas. Sendo assim, é possível dividir a evolução da cavidade em estágios conforme listado abaixo, buscando um melhor entendimento da sua evolução:

- 1- Circulação de água através do contato entre o Grupo Nova Lima e o Grupo Itabira com um fluxo preferencial em direção N causando a dissolução e o carreamento no itabirito;
- 2- Alargamento contínuo da zona de contato concomitante com a dissolução e alargamento das outras estruturas secundárias existentes no itabirito, aliado à queda de blocos instáveis do teto e carreamento dos sedimentos gerados;
- 3- Escavação seguindo os veios de quartzo, deixando pilares de sustentação, marcas de escavação, blocos e outros vestígios ao longo da galeria;
- 4- Paralisação da escavação e continuidade dos processos naturais de cavernamento acelerados pelas instabilidades geradas pelas escavações.

7.8 - Estabilidade dos vãos

.O ábaco apresentado na Figura 7.43 mostra que todos os pontos da galeria se encontram na zona de instabilidade, com alguns mais estáveis e próximos da zona de transição entre estabilidade e instabilidade. A Figura 7.44 apresenta os círculos que circunscrevem a morfologia da galeria para averiguação da estabilidade de acordo com as dimensões dos vãos

As regiões centrais do setor A apresentam maior tamanho dos vãos, com o diâmetro dos círculos igual a 5,5 m, 6,7 m e 8,3 m, e menores índices Q, iguais a 0,09 e 0,12, caracterizando essa porção como a mais instável da galeria de acordo com esse parâmetro. As adjacências do setor A apresentam menores dimensões dos vãos, entre 2,6 m e 6,0 m, e maiores índices Q, entre 0,22 e 1,07, resultando em uma maior estabilidade.

O setor B também apresenta regiões de maior e menor estabilidade de acordo com o tamanho dos vãos. Os círculos localizados no ponto 7, na porção superior da galeria, apresentam visivelmente as menores dimensões, variando de 1,5 a 2,1, e o maior índice Q, igual a 0,25. Esse ponto representa a região mais estável da galeria, principalmente devido ao grande número de pilares, que reduzem o tamanho dos vãos e aumentam a estabilidade. Os círculos inseridos no ponto 6, ainda no setor B, apesar de apresentarem índice Q inferior aos inseridos no ponto 5, igual a 0,13, apresentam um diâmetro bem inferior, de 1,5 m e 2,5 m, sendo a segunda região mais estável desse setor. O ponto 5 apresenta as maiores dimensões, alcançando até 6,3 m de diâmetro, sendo caracterizado como o ponto menos estável do setor B.

O setor C apresenta características bastante variadas. Os círculos de menor diâmetro estão no ponto 14, no conduto que liga o ponto 10 ao ponto 11, sendo ainda a região de maior índice Q desse setor. Nota-se sua inserção na zona de transição entre estabilidade e instabilidade, explicado principalmente pelo tamanho dos vãos muito reduzidos. Ainda nesse setor, têm-se os pontos 10 e 11, inseridos em veios de quartzo, que além de apresentarem maior dimensão dos vãos, tem um índice Q igual a 0,013, reduzindo bastante sua estabilidade.

O setor D apresenta-se instável, sendo a diferença de estabilidade provocada pela variação de diâmetro dos círculos, uma vez que o índice Q de todo o setor é igual a 0,2.

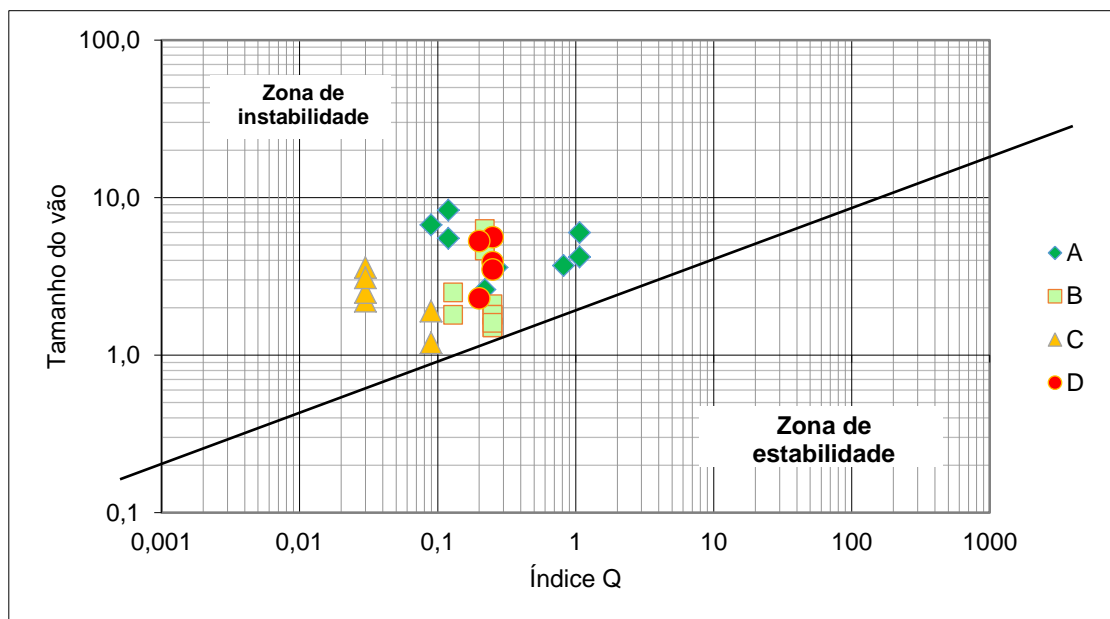


Figura 7.43 - Relação de estabilidade entre tamanho dos vãos e índice Q dividido em setores. Fonte: Adaptado de Barton *et al.* 1974.

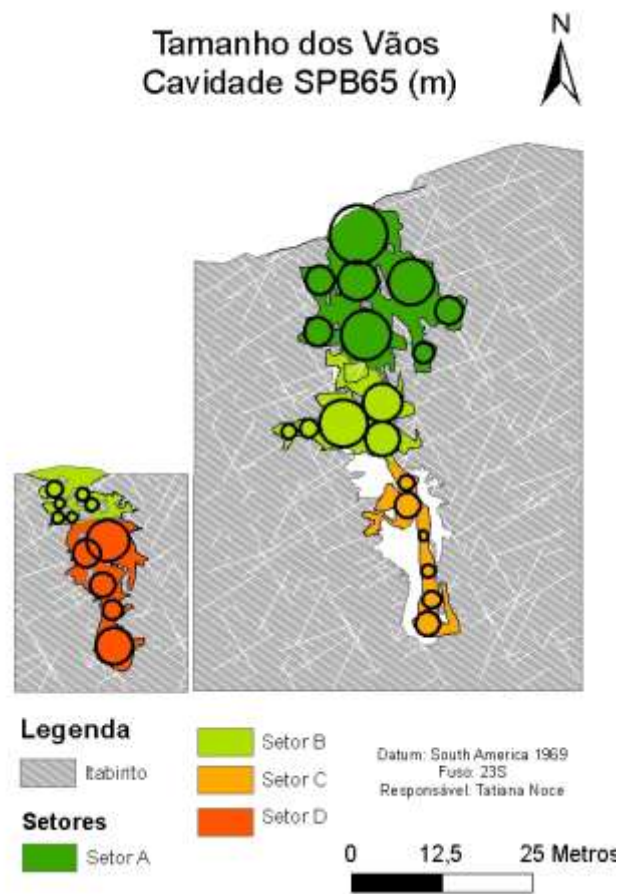


Figura 7.44 – Mapa da cavidade SP65 mostrando os círculos que circunscrevem sua morfologia em cada setor.

8- CAVIDADE SPB10

8.1 - Caracterização da Rocha Intacta

A cavidade SPB10 está inteiramente inserida em canga detrítica de coloração amarronzada a ocre e textura granular (Figura 8.1a). A canga apresenta uma granulometria muito grossa a cascalho com seixos mal selecionados, desde arredondados a angulosos, de itabirito, quartzo, hematita e sílexito. Os seixos apresentam dimensões de até 30 cm, sendo a maior parte composta por grãos menores, como pode ser observado na Figura 8.1b. A matriz expõe granulometria fina a grossa composta por quartzo e argilominerais, cimentados por óxido de ferro. Aparentemente, existe uma granodecrescência ascendente que pode evidenciar uma movimentação desse material durante a sua deposição, oxidação e cimentação, entendido como um material coluvionar.

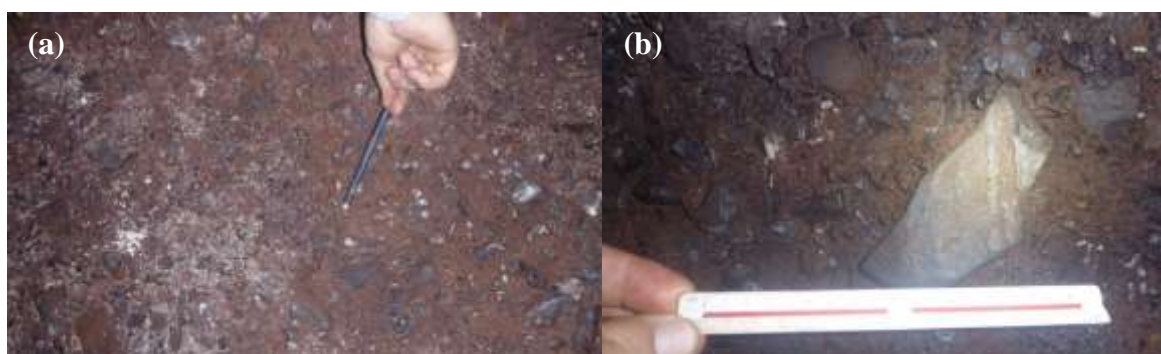


Figura 8.1 – a) Canga detrítica de coloração amarronzada e textura granular. b) Seixo maior em meio a seixos menores.

Apresenta minerais totalmente alterados, tornando o material intensamente descolorido, gradando para cores de solo, o que a classifica como rocha completamente alterada (W5). A coerência, por sua vez, é relativamente alta, quebrando com dificuldade ao golpe do martelo, classificando-a como rocha mediamente coerente (C2).

A galeria apresenta um amplo deslocamento com grandes blocos de canga em meio a sedimentos de origem externa e interna, advindos da claraboia e da própria canga (Figura 8.2a). Nas porções expostas dos blocos existe uma cobertura ferruginosa de aspecto liso e um pouco brilhante, provavelmente resultante de recristalização amorfa de óxido de ferro (Figura 8.2b).

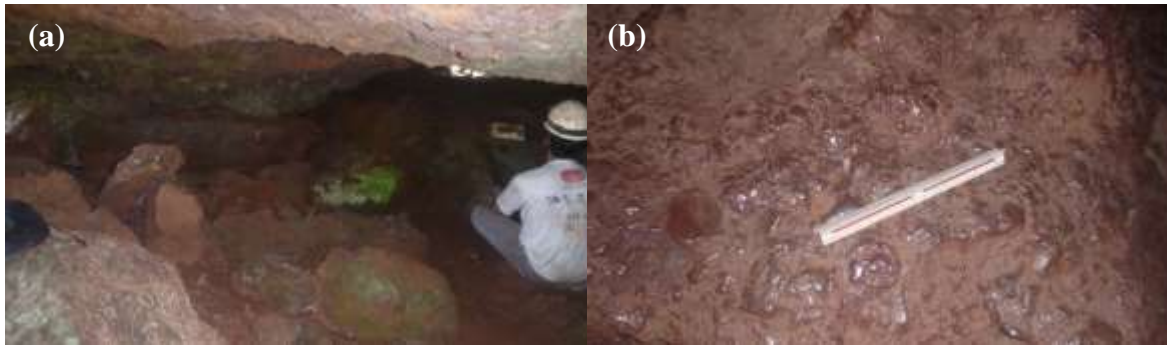


Figura 8.2 – a) Blocos de canga no interior da cavidade. b) Cobertura ferruginosa de aspecto liso sobre grande bloco de canga.

A Figura 8.3 apresenta o mapa e os perfis litológicos da cavidade, mostrando sua total inserção em canga, sendo comum a presença de blocos em meio a sedimentos no piso.

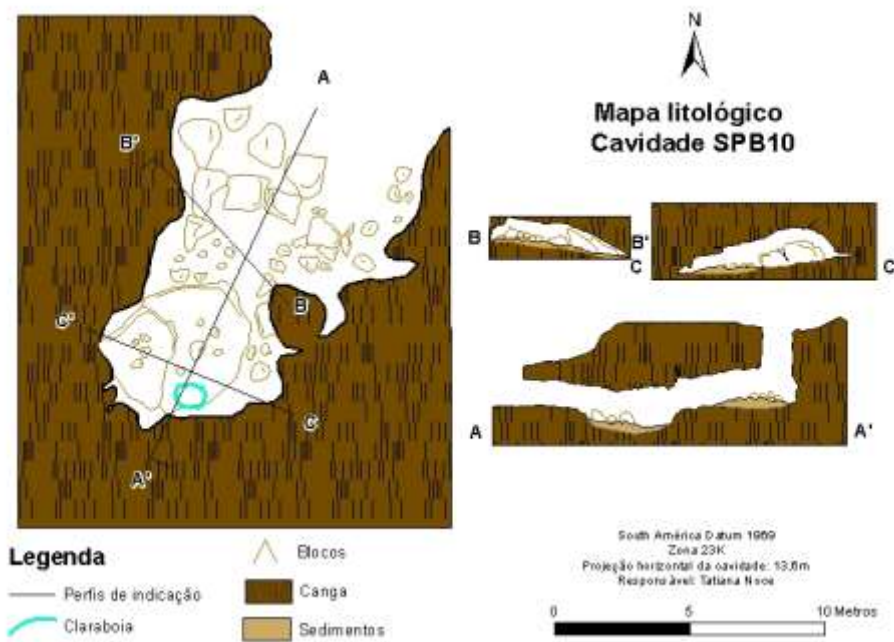


Figura 8.3 – Mapa e perfis litológicos da cavidade SPB10.

8.1.1 - Ensaios de Resistência

Por se tratar de uma cavidade inteiramente inserida em canga detrítica, os ensaios foram reunidos em um único grupo, sendo possível a partir de testes com o martelo de geólogo, a canga foi classificada como rocha medianamente resistente (R3), com resistência à compressão uniaxial entre 25 e 50 MPa. A rocha quebra-se pelo golpe firme com o martelo do geólogo e sua superfície é apenas riscável com lâmina de aço. Foram realizados 10 ensaios de carga pontual, sendo descartados o maior e o menor valor do índice de carga ($I_{s(50)}$), conforme indicado pelas normas da ISRM (2007) (Tabela 8.1). Os $I_{s(50)}$ obtidos foram inferiores ao indicado pelos testes com o martelo de geólogo, provavelmente devido ao alto grau de alteração do material e a maior

precisão e força do aparelho utilizado para os ensaios de carga pontual.

Tabela 8.1 – Características dos ensaios de carga pontual realizados na canga da cavidade SPB10.

Cavidade	Ensaio	Litologia	P (N)	De (mm)	Is(50) (MPa)
SPB10	1	Canga	320	33,473	0,238
SPB10	2	Canga	470	34,225	0,338
SPB10	3	Canga	1090	41,367	0,585
SPB10	4	Canga	840	41,505	0,448
SPB10	5	Canga	840	41,043	0,456
SPB10	6	Canga	730	37,729	0,452
SPB10	7	Canga	1160	44,625	0,553
SPB10	8	Canga	670	48,821	0,278
SPB10	9	Canga	1120	51,264	0,431
SPB10	10	Canga	890	44,781	0,422

A partir dos dados apresentados obteve-se um $I_{s(50)}$ médio de 0,422 MPa, o qual foi inserido nas equações indicadas pela metodologia, aplicadas diversos tipos de rochas para obtenção dos respectivos valores de σ_c : 10,128 MPa e 13,058MPa. Assim como na galeria SPB65, para dar continuação aos trabalhos foi utilizada a resistência a compressão uniaxial obtida a partir da equação de Broch & Franklin (1972), igual a 10,128 MPa.

8.2 - Caracterização Estrutural

Não foi realizado o teste do magnetismo da cavidade, uma vez que a canga não apresenta estruturas passíveis de medição utilizando a bússola de geólogo. Nesse material é possível identificar apenas fraturas e juntas delimitadas por superfícies bastante irregulares, com mecanismo de ruptura por tração (Figura 8.4a). Essas fraturas apresentam superfícies muito rugosas com aberturas maiores que 5 mm, na maioria das vezes sem preenchimento. Sua continuidade é variável podendo ser tanto muito pouco contínuas quanto com continuidades alcançando toda a extensão da cavidade. Em alguns locais, essas fraturas apresentam-se abertas por gravidade, delimitando blocos suspensos no teto (Figura 8.4b).

Próximo à claraboia existe um grande bloco, colapsado a partir de uma zona de fraturamento com mergulho próximo a 90^0 , que corta a cavidade em uma direção quase perpendicular a sua direção principal (Figura 8.4c e d). No mapa apresentado na Figura 8.5 é possível visualizar este bloco, assim como a fratura vertical pela qual ele se

movimentou.

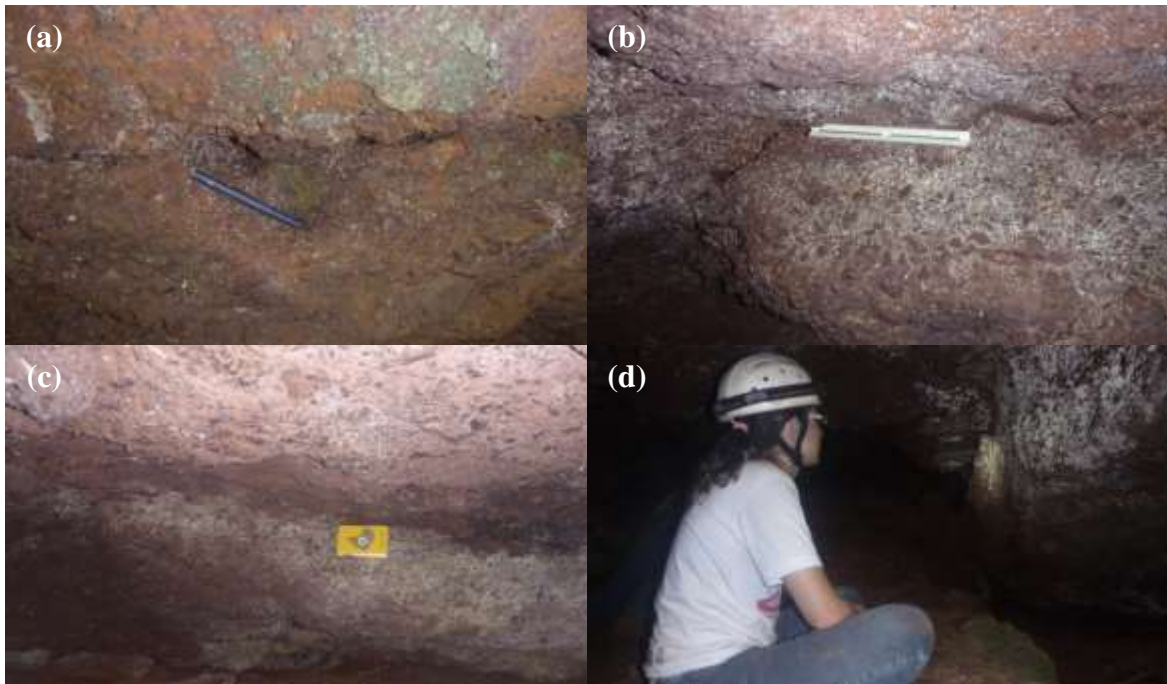


Figura 8.4 – a) Fratura irregular aberta por tração. b) Fratura aberta por gravidade. c) Zona de falha com mergulho de 90^0 cortando a cavidade. d) Zona de falha a direita e grande bloco despencado abaixo.



Figura 8.5 – Mapa estrutural mostrando fraturamentos na cavidade SPB10.

8.3 - Qualidade do Maciço Rochoso

O RQD da canga é difícil de ser calculado devido à ausência de famílias definidas de descontinuidades, sendo observadas apenas juntas de alívio esparsas. Dessa forma,

como o espaçamento entre essas juntas é geralmente maior que 2 metros, o índice volumétrico de juntas (J_v) apresenta valores muito baixos, gerando um RQD muito alto, próximo a 100. Tal fato pode ser facilmente comprovado ao se analisar o mapa apresentado na Figura 8.6, onde se observa uma distância média entre as juntas de alívio superior a 2 metros.

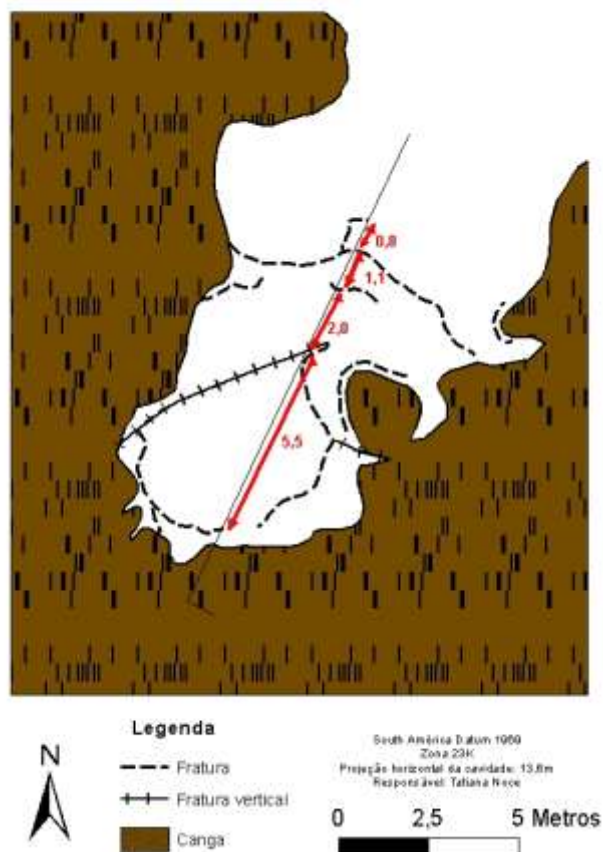


Figura 8.6 – Mapa mostrando a distância média entre as juntas ao longo do perfil A da cavidade.

8.3.1 - Rock Mass Rating (RMR)

Classificando o maciço rochoso onde se insere a cavidade SPB10 de acordo com o sistema de classificação RMR obteve-se um peso total de 72, classe II, sendo descrita como rocha de boa qualidade. Esse valor pode ser explicado a partir da Tabela 8.2, principalmente por se tratar de um ambiente completamente seco, com alto índice RQD e espaçamento entre as descontinuidades maior que 2 metros, além de serem descontinuidades sem preenchimento e muito rugosas. Os fatores considerados desfavoráveis de acordo com esse sistema é a alta abertura das juntas, muitas vezes sem contato rocha rocha entre as paredes, além do seu alto grau de alteração, classificadas como muito alterado.

Tabela 8.2 – Características da canga onde se insere a cavidade SPB10 de acordo com o sistema de classificação RMR.

	Descrição	Pontuação	
RCU (MPA)	5 a 25	2	
RQD	90 a 100	20	
Influência da água	Completamente seco	15	
Espaçamento (m)	> 2	20	
Persistência (m)	3 a 10	2	
Abertura (mm)	> 5	0	
Descontinuidades	Rugosidade	Muito rugoso	6
	Preenchimento	Nenhum	6
	Grau de alteração	Muito alterado	1
Valor de RMR	72	61 a 80	
Classe	II		
Descrição	Rocha de boa qualidade		

8.3.2 - Rock Tunneling Quality Index (Q)

A caracterização do maciço segundo esse sistema de classificação está apresentada na Tabela 8.3, sendo classificado com padrão geomecânico regular, classe V. Essa classificação é explicada pelo valor de RQD muito alto sobreposto a um valor de Jn muito baixo, gerando um baixo grau de fraturamento, o que aumenta o padrão geomecânico da canga. Em contrapartida, as juntas encontram-se abertas e preenchidas por argila ou rocha decomposta quimicamente, reduzindo assim a resistência ao cisalhamento das descontinuidades, assim como a qualidade do maciço.

Tabela 8.3 - Características da canga onde se insere a cavidade SPB10 de acordo com o sistema de classificação Q.

	Descrição	Pontuação
RQD	100	100
Jn	Descontinuidades aleatórias	1
Jr	Superfície rugosa ondulada	3
Já	Preenchimento argiloso pouco consolidado	8
Jw	Escavação seca ou pequena influência de água	1
SRF	Zonas de fraqueza individuais contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades < 50m)	5
Q	4 a 10	7,5
Classe	V	
Padrão Geomecânico	Regular	

8.3.3 - Rock Mass Index (RMi)

O RMi é calculado a partir da multiplicação entre a resistência compressão uniaxial do maciço (σ_c) e os parâmetros relativos as descontinuidades (jP). O principal parâmetro é

o volume dos blocos (Vb), que foi calculado a partir da eq 2.14 descrita no item 2.3.3, uma vez que não foi possível medir a atitude das descontinuidades devido as suas irregularidades. Para o cálculo utilizou-se um espaçamento médio de 2 metros, um comprimento médio de 4 metros e um n_j igual a 1 (Eq 8.2 e Eq 8.1)

$$\beta = 20 + 21 * 4/2 * 1 = 52,5 \quad \text{Eq 8.1}$$

$$Jv = \frac{1}{2} = 0,5 \quad Vb = 52,5 * 0,5^{-3} = 420 \text{ m}^3 \quad \text{Eq 8.2}$$

As características utilizadas para o cálculo do R_{Mi} estão apresentadas na Tabela 8.4, chegando a um valor de R_{Mi} muito alto com resistência muito forte. Ressalta-se que como o valor de j_P obtido foi superior a um, utiliza-se j_P igual a 1, sendo o índice R_{Mi} dado pela resistência a compressão uniaxial da canga (σ_c). A principal explicação para esses altos valores é a alta dimensão dos blocos, caracterizando a canga como rocha intacta de acordo com esse sistema de classificação..

Tabela 8.4 – Características da cavidade SPB10 utilizadas para o cálculo do R_{Mi}.

	Descrição	Pontuação
σ_c (MPa)	10,128	10,128
Vb	420	420
jL	Descontinuidades médias descontínuas	2
jR	Descontinuidades muito rugosa e fortemente ondulada	6
já	As superfícies das descontinuidades encontram-se muito mais alteradas que a rocha intacta	4
jC	3	3
D	0,297	0,297
jP	1,000	1,000
R_{mi}	10,128	10 a 100
Termo para R_{mi}	Muito alto	
Termo para resistência do maciço	Muito forte	

8.4 - Dinâmica hídrica

A canga apresenta uma estrutura formada por blocos de diversos tamanhos imersos em uma matriz mal selecionada, que associada ao processo de lixiviação permite a geração de diversos vazios interconectados em seu meio. Embora seja um material impermeável, a existência desses vazios interconectados proporciona a movimentação de água em seu interior com ou sem uma direção preferencial.

Durante os trabalhos de campo não foi observada presença de água no interior da galeria. Entretanto, podem-se observar indícios de sua presença na cavidade em certas circunstâncias. Este fluxo provavelmente ocorre pela ação pluvial em épocas chuvosas, entrando na galeria tanto pela boca e claraboia, quanto pelos vazios interconectados observados na canga. Em seu interior, ele é comumente direcionado a porção central, onde é observado uma maior quantidade de sedimentos argilosos (Figura 8.7). Essa água provavelmente continua o processo de infiltração, alcançando o fluxo geral para norte do sistema aquífero do Grupo Itabira, subjacente à capa laterítica.

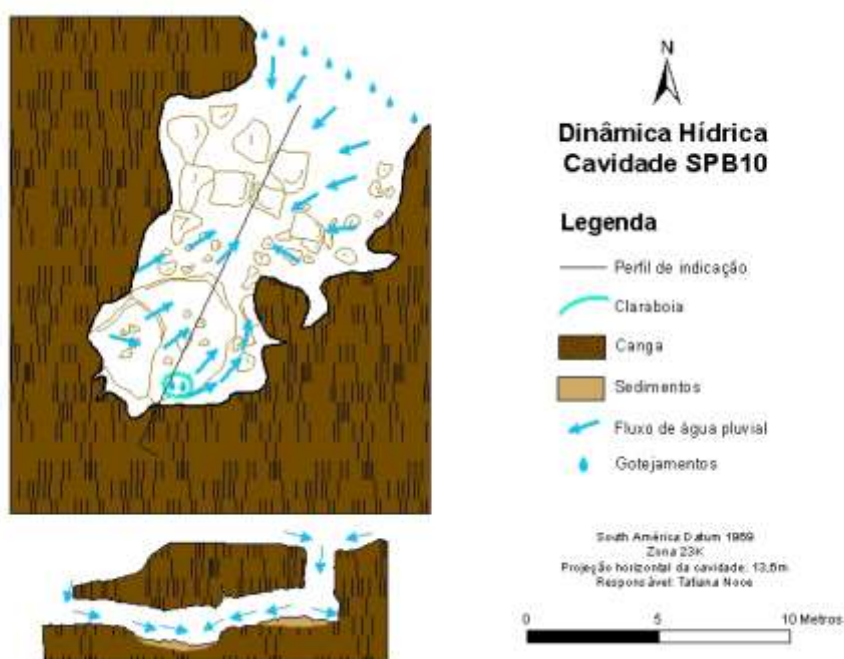


Figura 8.7 – Mapa e perfil mostrando o fluxo de água pluvial no interior da cavidade SPB10.

8.5 - Dinâmica dos sedimentos

São observados processos de abatimento do teto em toda a extensão da cavidade, gerando sedimentos e blocos abatidos oriundos da canga. Além disso, observa-se um aporte externo de sedimentos advindos da boca e da claraboia, bem como uma remobilização deles próximo à claraboia, provavelmente devido a ação da água (Figura 8.8a).

A caverna apresenta uma leve inclinação em direção a sua porção central, onde se observa seu maior depósito sedimentar (Figura 8.8b). São encontrados nessa região desde argilominerais e matéria orgânica até cascalho, todos direcionados pela ação da água pluvial e da gravidade.



Figura 8.8 – a) Blocos e sedimentos remobilizados abaixo da claraboia. b) Cascalho observado na porção central da cavidade.

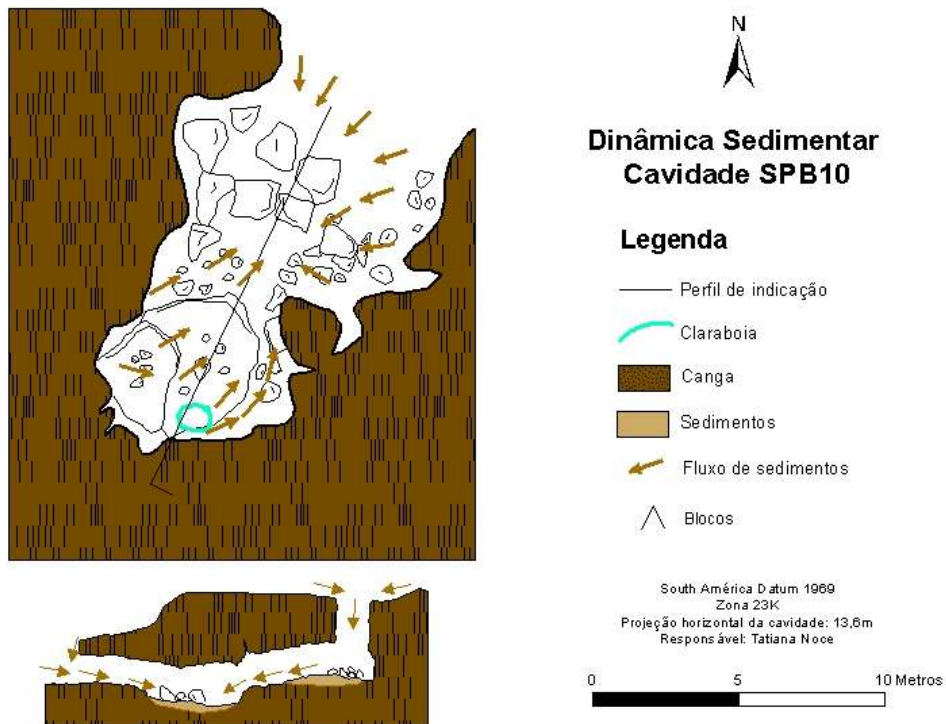


Figura 8.9 – Mapa e perfil mostrando a dinâmica dos sedimentos no interior da cavidade SPB10.

8.6 - Espeleogênese e Evolução

A cavidade SPB10 encontra-se a SW de uma pequena escarpa de direção NW-SE. Devido ao fluxo de água no aquífero e na superfície serem preferencialmente para N, houve um favorecimento no processo de lixiviação da canga, assim como do itabirito logo abaixo nesse sentido. O processo de lixiviação gera vazios isolados em meio ao substrato que continuamente se comunicam e ficam cada vez maiores. Com a ampliação desses vazios, a canga perde estabilidade solapando no piso devido a gravidade, gerando grandes blocos delimitados por fraturamentos de tração bastante irregulares. Esses fraturamentos, na maioria das vezes estão relacionados a juntas de alívio de pressão

geradas pelo espaço vazio subjacente. Esse processo gerou a comunicação da cavidade com o exterior através de uma dolina de colapso que compõe a sua entrada.

A claraboia apresenta um formato retangular, indicando provável escavação antrópica (Figura 8.10). Dessa forma, a cavidade apresenta uma evolução natural a partir do processo de incasão e abatimento de blocos, seguida da abertura antrópica da claraboia.



Figura 8.10 – Clarabóia retangular encontrada na cavidade SPB10.

8.7 - Estabilidade dos vãos

Obteve-se uma dimensão média dos vãos a partir dos diâmetros dos círculos que circunscvem a galeria, apresentados na Figura 8.6. Ao se relacionar esses valores com o índice Q, conforme a Figura 8.12, nota-se que todas as regiões se encontram na zona de transição de estabilidade. Como a qualidade do maciço é a mesma em toda a extensão da cavidade, nota-se uma relação direta entre o tamanho do vão e a estabilidade da galeria. Assim, na proximidade da boca, ocorre um tamanho do vão maior, resultando em uma menor estabilidade, e a porção mediana na galeria apresenta uma estabilidade maior, em virtude do menor tamanho do vão.

O fato de toda a extensão cavidade alocada no gráfico em uma zona de transição de estabilidade pode ser justificado por se tratar de uma cavidade inserida em canga, com evolução condicionada principalmente por queda de blocos.

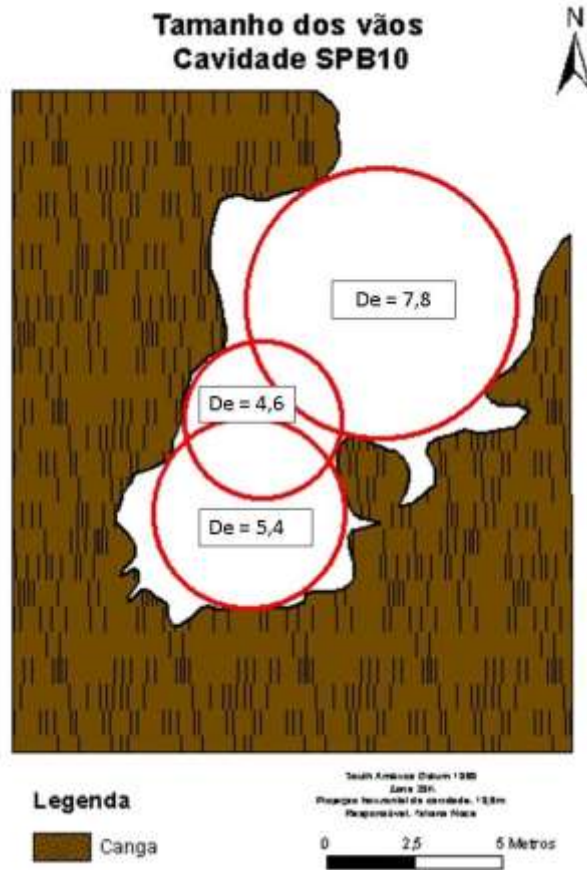


Figura 8.11 – Mapa da cavidade SPB10 mostrando o tamanho dos vãos e respectivos diâmetros equivalentes (De).

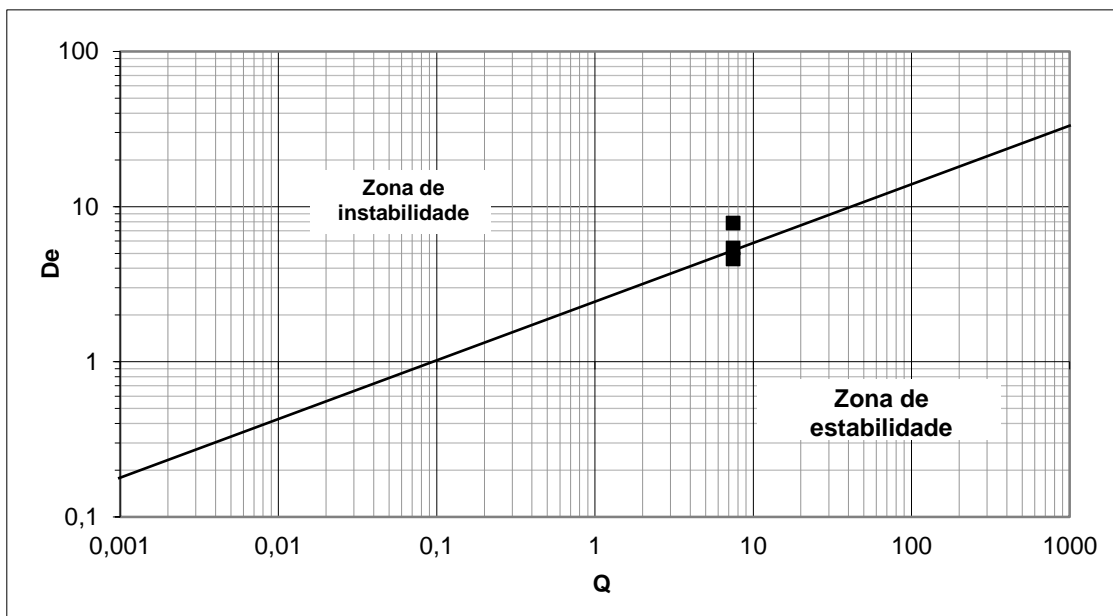


Figura 8.12 – Relação de estabilidade entre tamanho dos vãos e índice Q . Fonte: Adaptado de Barton *et al.* 1974.

9- CAVIDADE SPD10

9.1 - Caracterização da rocha intacta

Encontra-se inserida no contato entre as formações ferríferas bandadas do tipo lago superior, do Grupo Itabira e a canga (Figura 9.1). O itabirito apresenta uma textura granular acamadada, com granulometria muito fina a fina, e bandamento centimétrico a milimétrico de camadas silicáticas e ferruginosas, sendo estas com maior concentração. A mineralogia básica é hematita, sílica e anfibólio em ordem decrescente de concentração. É classificado como rocha moderadamente alterada (W3), por ser consideravelmente descolorida com minerais mediantemente alterados. Ela também é classificada como mediantemente coerente (C2), uma vez que apresenta superfície riscável com lâmina de aço, mas dificilmente quebrada ao golpe do martelo (Figura 9.1a).

A canga apresenta características semelhantes às analisadas na cavidade SPB10, com coloração de amarronzado a ocre e seixos de até 30 cm de itabirito, quartzo, hematita e sílexita. Os seixos encontram-se mais angulosos, com blocos de itabirito relativamente bem preservados em meio à canga. A matriz é fina a grossa, composta por quartzo e argilominerais, cimentada por óxido de ferro. Trata-se de uma canga detrítica completamente alterada (W5) e coerente (C1) (Figura 9.1b).

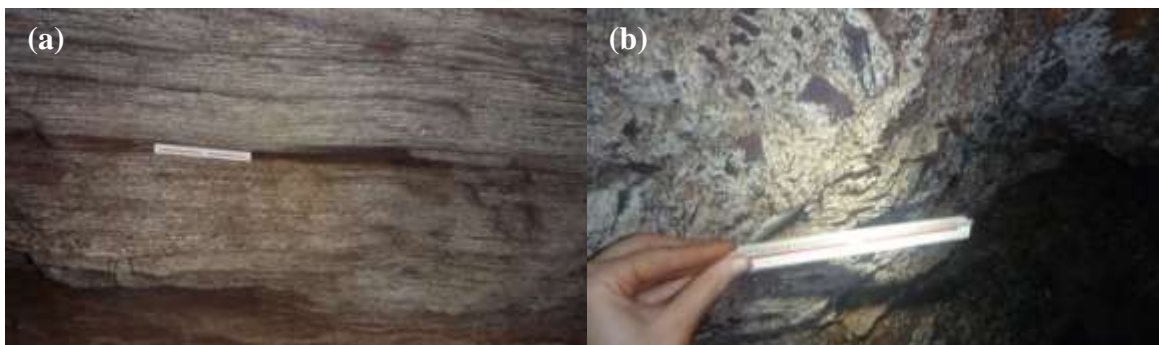


Figura 9.1 – a) Itabirito descolorido mediantemente alterado b) Canga detrítica mediantemente alterada.

A galeria não apresenta blocos no chão, apenas sedimentos finos e cascalho, fato provavelmente explicado pela pequena dimensão da boca e pelo processo de abatimento da canga ainda estar em fase inicial.

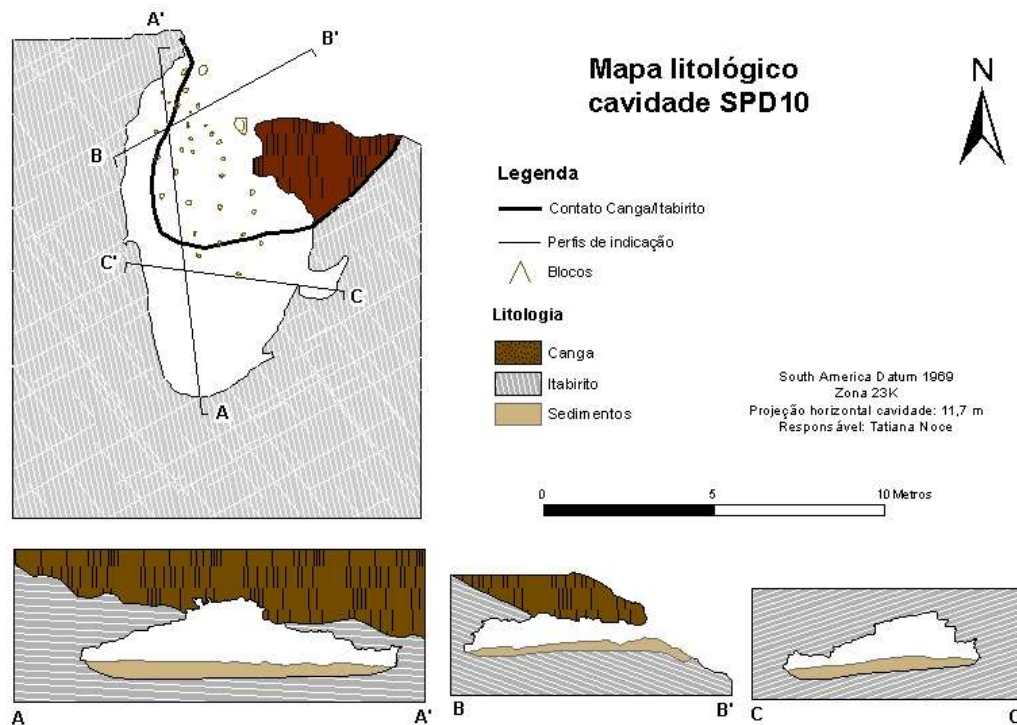


Figura 9.2 – Planta baixa, perfil e cortes litológicos cavidade SPD10.

9.1.1 - Ensaios de Resistência

A partir de testes feitos com o martelo de geólogo, o itabirito encontrado em toda a extensão da cavidade foi classificado como rocha mediamente resistente (R3), com superfície apenas riscável por lâmina de aço e quebrável a partir de um golpe firme com o martelo. A resistência a compressão uniaxial (σ_c) estaria, dessa forma, inserida entre 25 e 50 MPa.

Foram realizados 14 ensaios de carga pontual nesses itabiritos, com apenas uma invalidação. Sete ensaios foram feitos perpendiculares a principal zona de fraqueza da rocha e sete paralelos (Tabela 9.1).

Tabela 9.1 – Características utilizadas para o cálculo do índice de carga pontual ($Is_{(50)}$) do itabirito na cavidade SPD10.

Cavidade	Ensaio	Direção	Litologia	P (N)	De (mm)	$Is_{(50)}$ (Mpa)
SPD10	1	Perpendicular a S0	Itabirito	4390	42,341	2,272
SPD10	2	Perpendicular a S0	Itabirito	–	–	–
SPD10	3	Perpendicular a S0	Itabirito	4960	43,760	2,439
SPD10	4	Perpendicular a S0	Itabirito	5840	47,446	2,534
SPD10	5	Perpendicular a S0	Itabirito	2040	48,821	0,847
SPD10	6	Perpendicular a S0	Itabirito	2340	41,796	1,236
SPD10	7	Perpendicular a S0	Itabirito	5350	45,135	2,508
SPD10	8	// a S0	Itabirito	1680	32,704	1,298

Cavidade	Ensaio	Direção	Litologia	P (N)	De (mm)	Is(50) (Mpa)
SPD10	9	// a S0	Itabirito	1170	31,915	0,939
SPD10	10	// a S0	Itabirito	1050	41,689	0,557
SPD10	11	// a S0	Itabirito	1310	30,130	1,149
SPD10	12	// a S0	Itabirito	1240	34,907	0,866
SPD10	13	// a S0	Itabirito	540	27,640	0,541
SPD10	14	// a S0	Itabirito	850	28,635	0,807

Excluindo-se os valores indicados pela ISRM (2007), obtém-se um índice de carga pontual médio de 2,11 MPa para esforços perpendiculares a principal zona de fraqueza, e 0,86 MPa para esforços paralelos. Inserindo esse valor nas equações de correlação entre $I_{s(50)}$ e σ_c obtém-se os valores de resistência de 50,73 MPa e 27,29 MPa para esforços perpendiculares e 20,73 MPa e 16,77 MPa para esforços paralelos.

A canga também foi classificada como rocha mediantemente resistente (R3) a partir de testes com o martelo de geólogo, apresentando resistência à compressão uniaxial (σ_c) entre 25 e 50 MPa. Foram realizados 5 ensaios de carga pontual nessas rochas, chegando a um $I_{s(50)}$ médio de 0,465 MPa (Tabela 9.2).

Tabela 9.2 – Características utilizadas para o cálculo do índice de carga pontual da canga.

Cavidade	Ensaio	Litologia	P (N)	De (mm)	Is(50) (Mpa)
SPD10	1	Canga	1090	41,367	0,585
SPD10	2	Canga	1160	44,625	0,553
SPD10	3	Canga	1120	51,264	0,431
SPD10	4	Canga	890	42,220	0,463
SPD10	5	Canga	1390	60,671	0,412
SPD10	6	Canga	650	40,762	0,357

Utilizando as equações de correlação chega-se às seguintes resistências a compressão uniaxial (σ_c) para a canga encontrada na cavidade SPD10: 11,16 MPa e 13,42 MPa. Para dar continuidade aos trabalhos foram utilizados os valores obtidos a partir da equação de Brock & Franklin (1972) conforme as demais cavidades, sendo igual a 50 MPa para o itabirito e 11,16 MPa para a canga. No caso do itabirito foi utilizada a resistência obtida a partir dos ensaios perpendiculares ao acamamento, uma vez que trata-se de uma estrutura sub-horizontalizada com a maior pressão sofrida a partir do peso da camada de rochas sobrejacentes.

9.2 - Caracterização estrutural

Após a realização do teste com o barbante e a bússola de geólogo, notou-se uma alta influência magnética no interior da cavidade. Dessa forma, os traços mostrando a direção das estruturas foram plotados, com o auxílio de um transferidor, na planta baixa da galeria, e o mergulho foi medido utilizando a bússola do geólogo. O itabirito apresenta um acamamento (S0) bem definido com uma atitude média de 078/21 dado, sobretudo pela intercalação entre níveis mais silicáticos e níveis mais ferruginosos (Figura 9.3). Essa estrutura apresentou-se com espaçamentos inferiores a 6 cm e persistências de até 10 m. Além disso, o acamamento mostra aberturas maiores que 5 mm, muitas vezes sem preenchimento e em processo de deslocamento (Figura 9.4a e b).

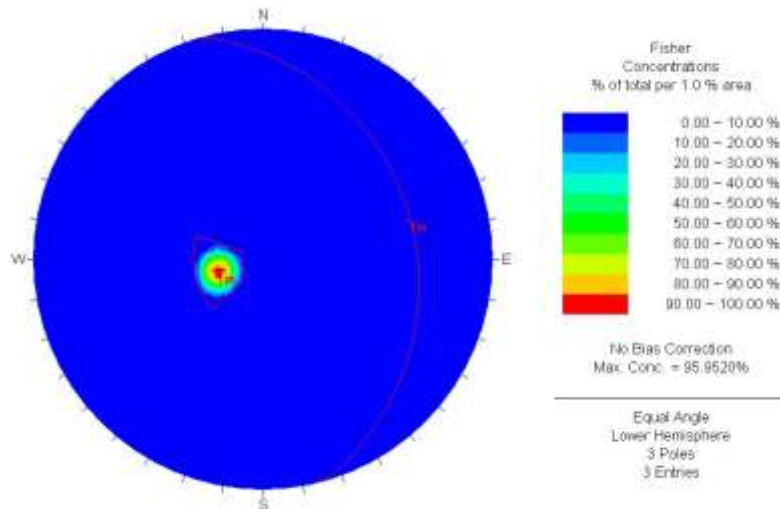


Figura 9.3 – Estereograma mostrando atitude média do acamamento (S0) na cavidade SPD10.

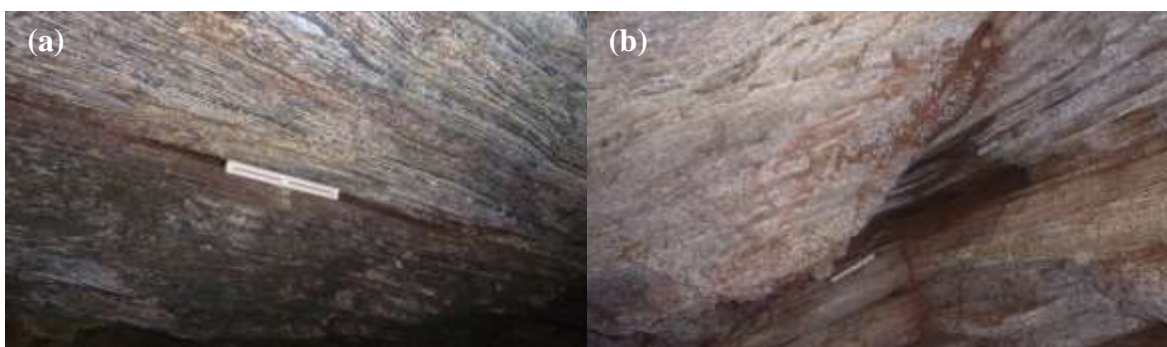


Figura 9.4 – a) Acamamento com abertura superior a 5mm sem preenchimento. b) Processo de deslocamento no itabirito segundo acamamento.

Foram aferidas duas famílias de fraturas diferentes na cavidade SPD10, J1 e J2, sendo comum a observação de pequenas cunhas no cruzamento destas com o acamamento (Figura 9.5a). A atitude média dessas famílias é de 332/79 e 039/82 respectivamente,

sendo relativamente coincidentes com as famílias J1 e J2 observadas na cavidade SPB65 (Figura 9.6). As fraturas apresentam características bem semelhantes do ponto de vista geotécnico, com persistências geralmente inferiores a 3 m e espaçamentos variando entre 10 e 20 cm. Assim como o acamamento, tratam-se de descontinuidades moderadamente alteradas, sem influência de água e com aberturas superiores a 5 mm.

A canga, por sua vez, apresenta apenas juntas de tração, com superfícies irregulares e descontínuas. Essas juntas apresentam-se muito rugosas, com um espaçamento médio de 60 cm e continuidades de até 4 metros. É comum a presença de buracos em meio a canga, provavelmente resultantes do colapso de pequenos blocos próximo ao contato com o itabirito (Figura 9.5b). O mapa estrutural apresentado na Figura 9.7 mostra essas juntas, além das estruturas descritas no itabirito.

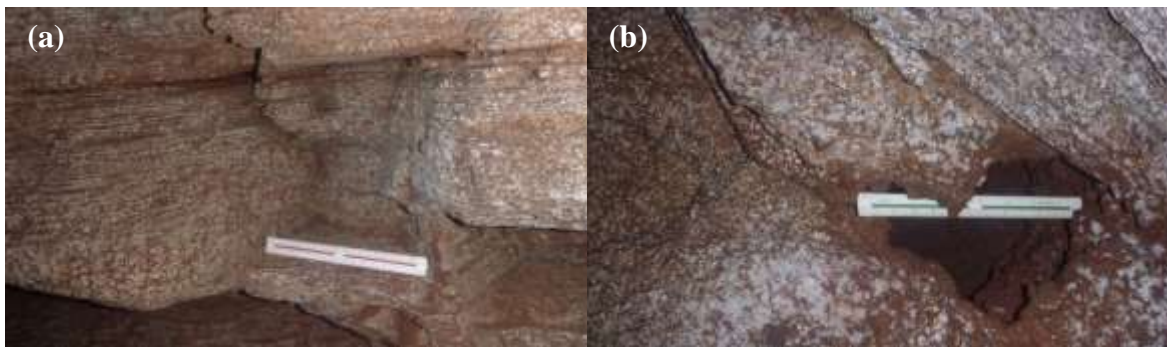


Figura 9.5 – a) Cunha formada pela combinação S0/J1/J2. b) – Buraco comum na canga.

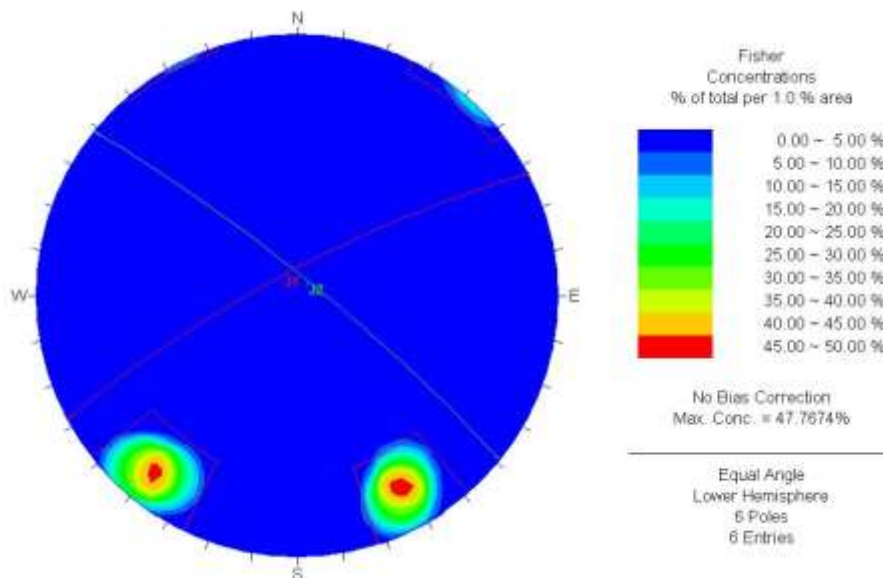


Figura 9.6 – Estereograma mostrando as famílias de fraturas J1 e J2 observadas na cavidade SPD10.

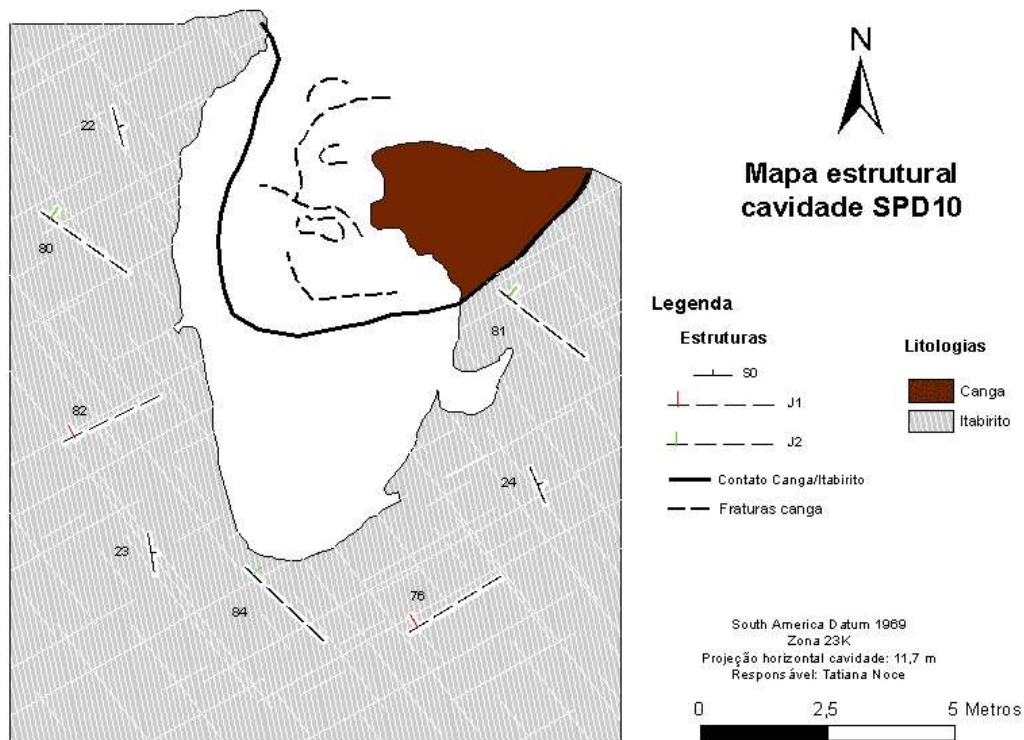


Figura 9.7 – Mapa estrutural cavidade SPD10.

9.3 - Qualidade do Maciço Rochoso

Como se trata de uma cavidade de dimensões bem reduzidas, foram feitos apenas cinco pontos de classificação em seu interior, três no itabirito e dois na canga (Figura 9.8). Além disso, a qualidade do maciço dos três pontos inseridos no itabirito foi relativamente a mesma em quase todos os sistemas de classificação, assim como nos dois pontos inseridos na canga. Fato explicado pelas dimensões bem reduzidas da galeria, impossibilitando uma grande variação litológica e estrutural em seu interior.

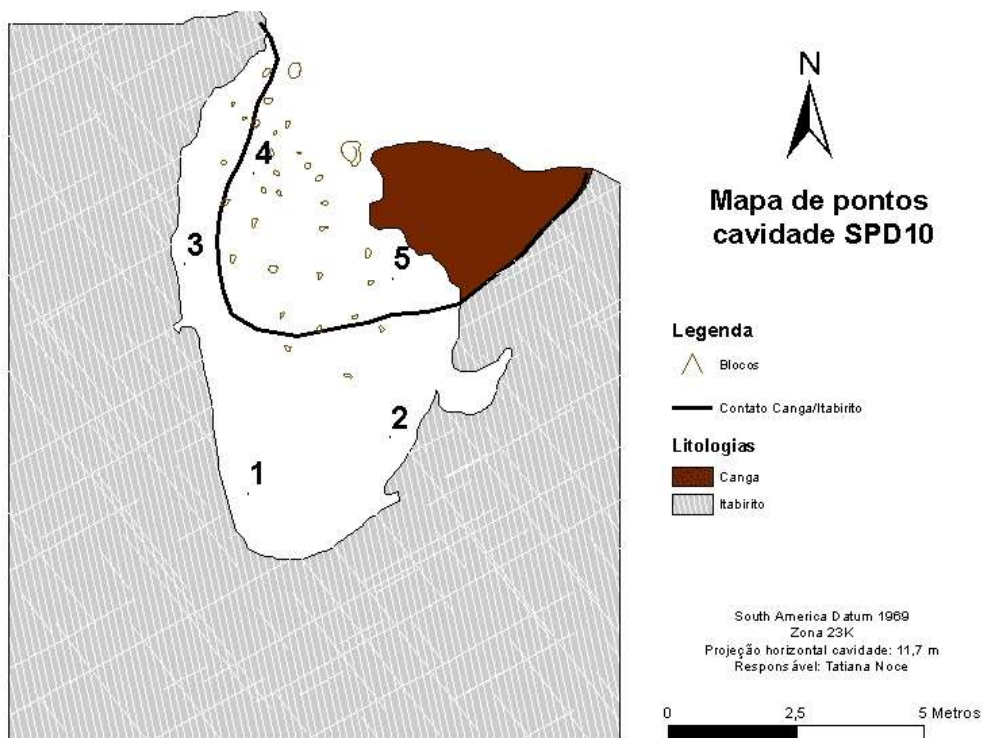


Figura 9.8 – Mapa de pontos cavidade SPD10.

Para o cálculo do índice volumétrico de juntas (J_v) no itabirito, utilizou-se a soma do número de discontinuidades por metro (λ). Os resultados foram superiores a 35, o que, de acordo com Palmstrom (1982), gera um RQD igual a zero conforme apresentado na Tabela 9.3.

Tabela 9.3 – Características e valor de RQD para os pontos em itabirito da cavidade SPD10.

Ponto		1	2	3
S0	Número	26,00	48,00	38,00
	L (m)	1,10	0,90	1,00
	S (m)	0,04	0,02	0,03
	λ	23,64	53,33	38,00
J1	Número	6,00	6,00	8,00
	L (m)	1,00	0,70	1,00
	S (m)	0,17	0,12	0,13
J2	λ	6,00	8,57	8,00
	Número	5,00	7,00	8,00
	L (m)	0,60	0,90	0,90
	S (m)	0,12	0,13	0,11
	λ	8,33	7,78	8,89
	J_v	37,97	69,68	54,89
RQD Palmstrom (1982)		0	0	0

A canga, por sua vez, por apresentar apenas descontinuidades irregulares e esparsas com espaçamentos relativamente grandes entre elas, foi classificada com um índice Jv muito próximo de zero e um RQD igual a 100.

9.3.1 - *Rock Mass Rating* (RMR)

Como as características do itabirito analisadas pelo *Rock Mass Rating* são as mesmas ao longo da cavidade, sua descrição foi unificada nessa litologia. Ele obteve uma pontuação igual a 40, segundo o sistema de classificação de maciços RMR devido, principalmente, ao seu baixo espaçamento e baixo RQD. Foi classificado na classe IV como uma rocha de má qualidade em toda a extensão da cavidade SPD10 (Figura 9.9). As características utilizadas para esta caracterização e suas respectivas pontuações estão devidamente apresentadas na Tabela 9.4.

Tabela 9.4 – Características do itabirito encontrado na cavidade SPD10 segundo o sistema de classificação de maciços RMR.

	Descrição	Pontuação
Litologia	Itabirito	
RCU (MPA)	25 a 50	4
RQD	< 25	3
Influência da água	Completamente seco	15
Espaçamento (m)	0,06 a 0,2	8
Persistência (m)	3 a 10	2
Descontinuidades	Abertura (mm)	>5
	Rugosidade	Ligeiramente rugoso
	Preenchimento	Mole < 5
Grau de alteração	Moderadamente Alterado	3
RMR	40	
Classe	IV	21 a 40
Descrição	Rocha de má qualidade	

A canga, por sua vez, obteve uma pontuação igual a 69, de classe II, sendo descrita como rocha de boa qualidade (Figura 9.9). Suas características são relativamente as mesmas analisadas na cavidade SPB10, com espaçamento e persistência um pouco menor. Diferente do itabirito, ela apresenta um maior espaçamento entre as descontinuidades, um maior RQD e uma maior rugosidade, elevando consideravelmente a sua pontuação (Tabela 9.5).

Tabela 9.5 – Características aferidas para a caracterização da canga segundo o sistema RMR.

	Descrição	Pontuação
RCU (MPA)	5 a 25	2
RQD	90 a 100	20
Influência da água	Completamente seco	15

	Descrição	Pontuação
Descontinuidades	Espaçamento (m)	0,6 a 2
	Persistência (m)	1 a 3
	Abertura (mm)	> 5
	Rugosidade	Muito rugoso
	Preenchimento	Nenhum
	Grau de alteração	Muito alterado
RMR	69	
Classe	II	61 a 80
Descrição	Rocha de boa qualidade	

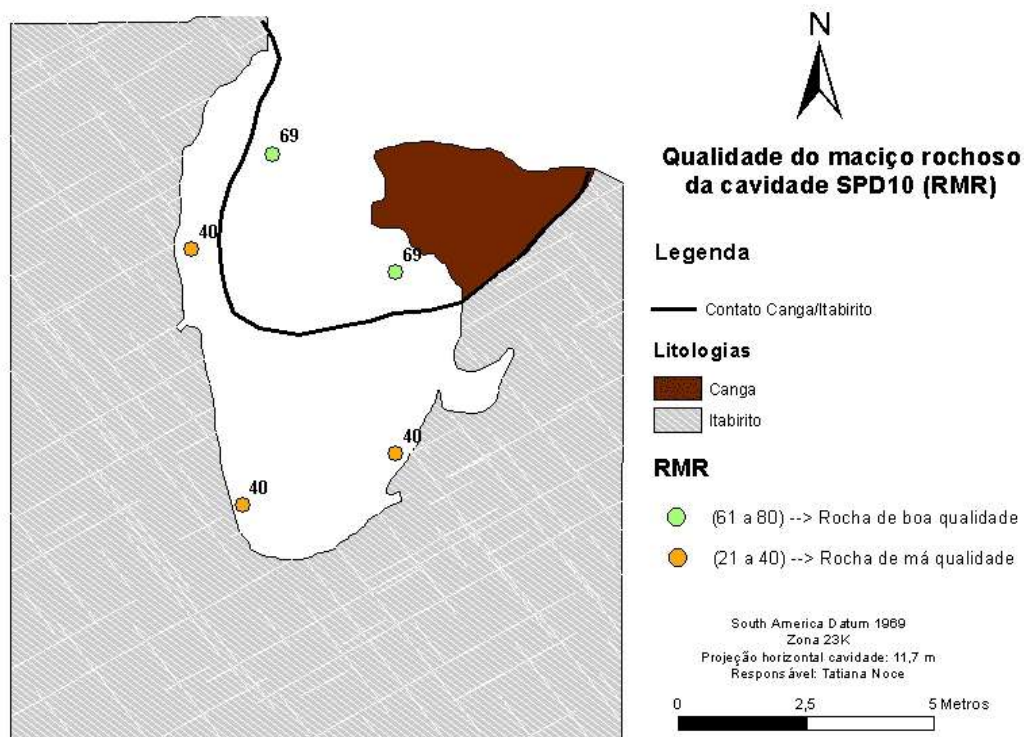


Figura 9.9 – Mapa mostrando a qualidade do maciço segundo o índice RMR.

9.3.2 - Rock Tunneling Quality Index (Q)

Conforme recomendado por Barton *et al.* (1974) utilizou-se um índice RQD igual a 10 para os cálculos de Q do itabirito, uma vez que o índice RQD igual a zero inviabilizaria a equação. Assim, obteve-se um valor final de Q igual a 0,125, classificando o maciço com padrão geomecânico muito ruim, de classe VII (Figura 9.10). As características utilizadas para tal classificação estão descritas na Tabela 9.6. Esse baixo valor se deve, sobretudo ao alto grau de faturamento do itabirito e baixa resistência ao cisalhamento das suas descontinuidades.

Tabela 9.6 – Características utilizadas para a classificação do itabirito encontrado na cavidade SPD10 segundo o sistema Q.

	Descrição	Pontuação
Litologia	Itabirito	
RQD	10	10
Jn	Três famílias mais descontinuidades aleatórias	12
Jr	Superfície rugosa plana	1,5
Ja	Paredes levemente alteradas, preenchimento com materiais abrasivos	2
Jw	Escavação seca ou com pequena influência de água	1
SRF	Juntas abertas, rocha muito fraturada e descomprimida (todas as profundidades)	5
Q	0,1 - 1	0,125
Classe	VII	0,1 - 1
Padrão Geomecânico	Muito ruim	0,1 - 1

Ao se analisar as características da canga segundo o sistema de classificação de maciços Q, é possível observar características extremamente semelhantes às analisadas na cavidade SPB10. Dessa forma, a galeria SPD10 apresenta um índice Q igual a 7,5, com um padrão geomecânico regular, classe V (Figura 9.10). Esse valor se deve ao baixo grau de fraturamento da canga, que aumentou a qualidade da rocha. Por outro lado, esse material apresentou uma baixa resistência ao cisalhamento, principalmente devido à abertura das juntas e seu preenchimento argiloso pouco consolidado (Tabela 9.7).

Tabela 9.7 - Características utilizadas para a classificação da canga encontrado na cavidade SPD10 segundo o sistema Q.

	Descrição	Pontuação
RQD	100	100
Jn	Descontinuidades aleatórias	1
Jr	Superfície rugosa ondulada	3
Ja	Preenchimento argiloso pouco consolidado	8
Jw	Escavação seca ou pequena influência de água	1
SRF	Zonas de fraqueza individuais contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades < 50m)	5
Q	4 a 10	7,5
Classe	V	
Padrão Geomecânico	Regular	

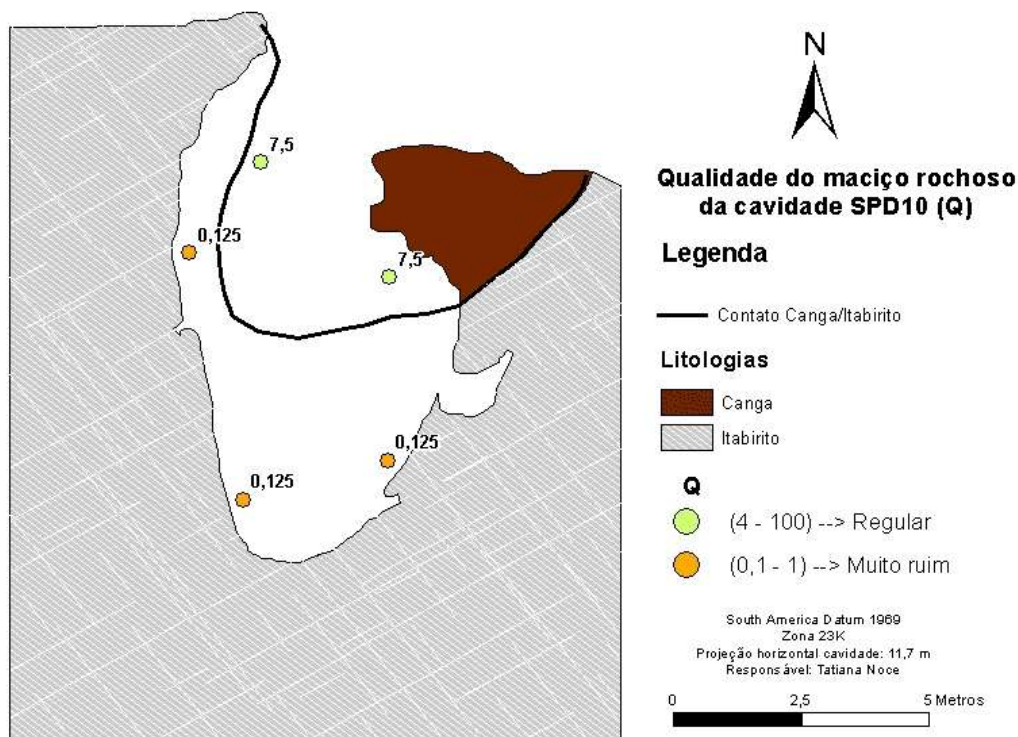


Figura 9.10 – Mapa mostrando a qualidade do maciço segundo o índice Q.

9.3.3 - Rock Mass Index (RMi)

Na cavidade SPD10, os três pontos inseridos no itabirito apresentaram um volume dos blocos variando de $0,0004 \text{ m}^3$ até $0,0010 \text{ m}^3$ (Tabela 9.8).

Tabela 9.8 – Dados utilizados para o cálculo do volume do bloco (V_b) nos pontos em itabirito da cavidade SPD10.

Pontos	1	2	3
S1	0,0400	0,0200	0,0300
S2	0,1700	0,1200	0,1300
S3	0,1200	0,1300	0,1100
γ_1	80,4399	89,1415	86,2826
γ_2	73,0659	60,2006	67,0771
γ_3	62,2879	64,7135	65,8216
sen(γ_1)	0,9861	0,9999	0,9979
sen(γ_2)	0,9566	0,8678	0,9210
sen(γ_3)	0,8853	0,9042	0,9123
V_b	0,0010	0,0004	0,0005

Ao se analisar as características das discontinuidades do itabirito a partir do sistema de classificação de maciços *Rock Mass Index*, observa-se que são relativamente as mesmas ao longo da cavidade. Estas características e suas respectivas pontuações estão apresentadas na Tabela 9.9. O cálculo do índice RMi, assim como os valores utilizados

estão apresentados na Tabela 9.10. Todos os pontos foram classificados com RMI moderadamente alto e resistência moderadamente forte, principalmente devido ao alto valor de resistência a compressão uniaxial dos itabiritos nessa cavidade. Os pontos 2 e 3, localizados mais próximo a boca e a zona de contato apresentaram valores mais baixos devido ao maior volume do bloco e maior espaçamento entre as descontinuidades na porção mais distal da cavidade, com menos interferência da zona de contato com a canga (Figura 9.11).

Tabela 9.9 – Características das descontinuidades do itabirito da cavidade SPD10 a partir do RMI.

		Descrição	Pontuação
jL	Comprimento da descontinuidade (m)	1 a 10	1
	Continuidade	Contínua	
jR	Pequena Escala	Levemente rugosa	2
	Larga Escala	Levemente ondulada	
	jA	Contato parcial entre as paredes. Preenchimento mole não compactado.	8

Tabela 9.10 – Valores utilizados no cálculo do RMI no itabirito.

Pontos	1	2	3
σc (MPa)	50	50	50
Vb	0,0010	0,0004	0,0005
jL	1	1	1
jR	2	2	2
Ja	8	8	8
jC	0,25	0,25	0,25
D	0,48822	0,48822	0,48822
jP	0,00339	0,00219	0,00247
Rmi	0,16959	0,10935	0,12366
Termo para Rmi	Moderadamente alto	Moderadamente alto	Moderadamente alto
Termo para resistência	Moderadamente forte	Moderadamente forte	Moderadamente forte

A canga, conforme já mencionado, não apresenta famílias de descontinuidades definidas, tornando difícil o cálculo do volume do bloco. Assim como na cavidade SPB10, o cálculo de Vb foi feito utilizando a Equação 2.15, nesse caso adotando o comprimento médio das descontinuidades (Lm) de 2 m, um espaçamento médio (Sm) de 0,5 m e um nj igual a 1 (Equação 9.1 e Equação 9.2).

$$\beta = 20 + 21 * 2/0,5 * 1 = 104 \quad \text{Equação 9.1}$$

$$Jv = \frac{1}{0,5} = 2 \quad Vb = 104 * 2^{-3} = 13 \text{ m}^3 \quad \text{Equação 9.2}$$

As características, de acordo com esse sistema de classificação de maciços, da canga encontrada na galeria SPD10 estão apresentadas na Tabela 9.11. Utilizou-se a resistência a compressão uniaxial (σ_c) da canga igual a 11,16 MPa, medida a partir dos testes de carga pontual. Os valores utilizados para o cálculo do índice R_{Mi} da canga estão exibidos na Tabela 9.12. Obteve-se um R_{Mi} alto, com resistência da canga caracterizada como forte, resultantes de um índice R_{Mi} igual a 8,28 (Figura 9.11).

Tabela 9.11 – Características da canga encontrada na cavidade SPD10 segundo o sistema R_{Mi}.

	Descrição	Pontuação
jL	Comprimento da descontinuidade (m)	1 a 10
	Continuidade	Descontínua
jR	Pequena Escala	Muito Rugosa
	Larga Escala	Fortemente ondulada
jA	As superfícies das descontinuidades encontram-se muito mais alteradas que a rocha intacta	4

Tabela 9.12 – Valores utilizados e cálculo do R_{Mi} da canga encontrada na cavidade SPD10.

Litologia	Canga
σ_c (MPa)	11,16
V_b	13,00
jL	2
jR	6
jA	4
jC	3
D	0,30
jP	0,74
R_{Mi}	8,28
Termo R_{Mi}	Alto
Termo para resistência	Forte

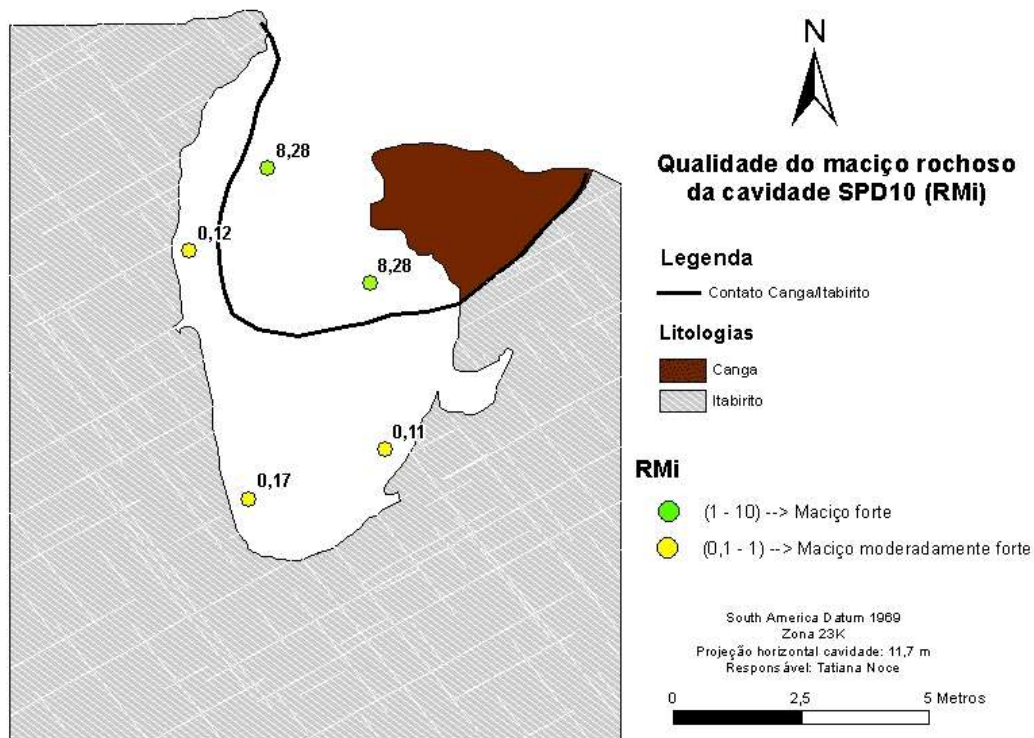


Figura 9.11 – Mapa mostrando a qualidade do maciço segundo o índice RMI.

9.4 - Dinâmica hídrica

A cavidade apresentou-se seca durante os trabalhos de campo, com provável escoamento pluvial advindo da boca em direção ao seu interior em épocas chuvosas. Este escoamento pluvial também pode ocorrer através dos vazios interconectados comuns na camada de canga sobrejacente por gotejamentos.

A porção mais distal da caverna apresenta uma camada de sedimentos argiloarenosos, provavelmente resultantes do processo de escoamento e infiltração da água pluvial. Além disso, a inclinação das camadas de itabirito em direção a NEE causa uma leve inclinação do piso da galeria nessa direção, causando um fluxo preferencial no interior da cavidade para SE (Figura 9.12). O processo de infiltração leva essa água para o sistema aquífero do Grupo Itabira e posteriormente para a drenagem localizada cerca de 100 m a frente da galeria.

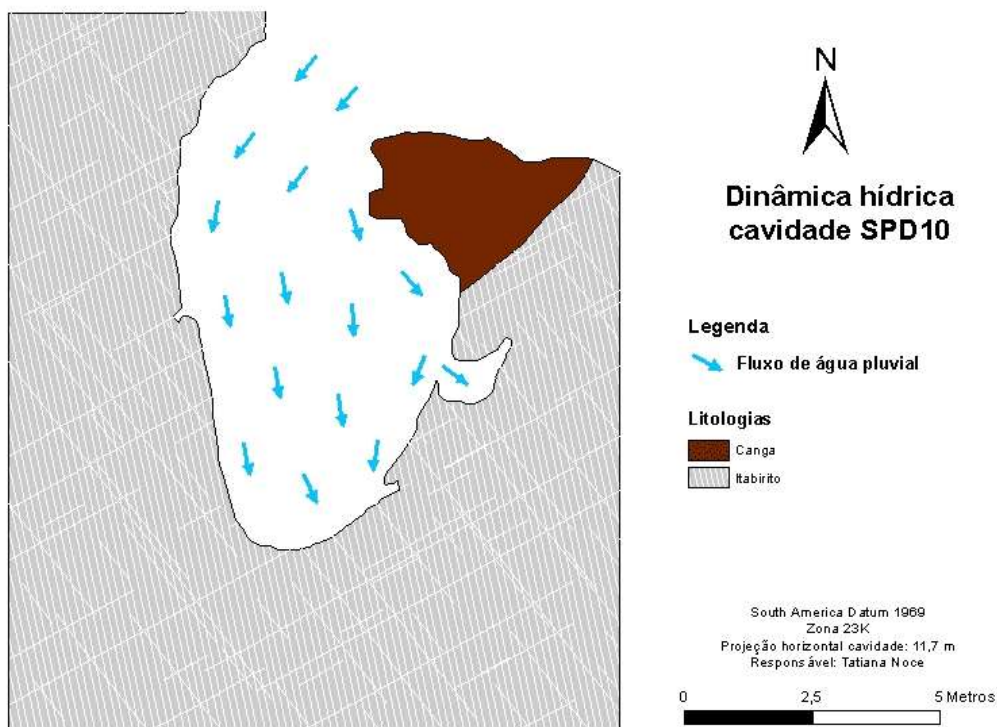


Figura 9.12 – Mapa mostrando o fluxo de água pluvial no interior da cavidade SPD10.

9.5 - Dinâmica dos sedimentos

Os sedimentos da cavidade SPD10 são direcionados para a sua porção mais distal por fluxos gravitacionais secos e com o auxílio da água. Observa-se nessa região uma camada de sedimentos argiloarenosos, que são depositados enquanto a água é infiltrada em direção ao aquífero do Grupo Itabira (Figura 9.13). Esses sedimentos são observados, em menor quantidade, ao longo de toda a cavidade, comumente recobertos por seixos esparsos de hematita, quartzo e itabirito desagregados principalmente da canga, e secundariamente do itabirito. A coloração dos sedimentos é, em geral, avermelhada com granulometria de cascalho a silte, sendo irregulares e pouco selecionados.

Os sedimentos observados têm um aporte misto, advindos tanto da erosão e deslocamento das rochas que compõe a cavidade, quanto do seu exterior a partir da boca. Os sedimentos da cavidade SPD10 apresentam uma direção preferencial para S, em sentido a sua porção mais distal.



Figura 9.13 – Depósito de sedimentos argiloarenosos na porção distal da cavidade SPD10.

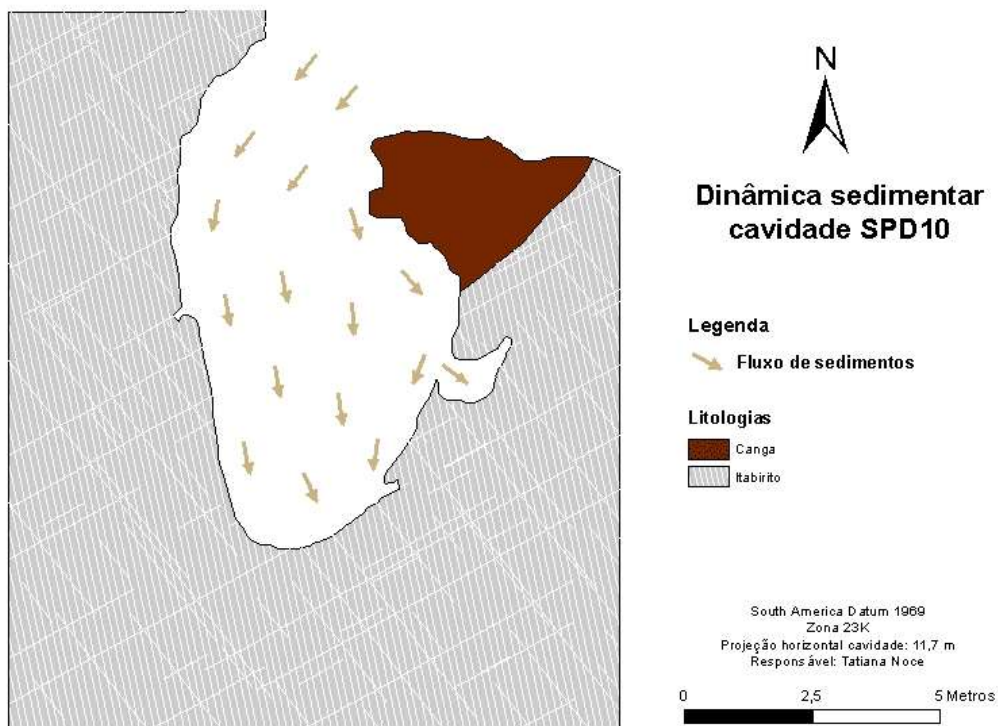


Figura 9.14 – Demonstração do fluxo de sedimentos na cavidade SPD10.

9.6 - Investigação Estrutural e Análise Cinemática

Conforme já mencionado, a cavidade SPD10 apresenta inúmeras pequenas cunhas formadas pelas famílias de fraturas J1 e J2 em combinação com o acamamento S0, sendo essas as estruturas formadoras de cunhas encontradas em toda a extensão da galeria (Figura 9.15).

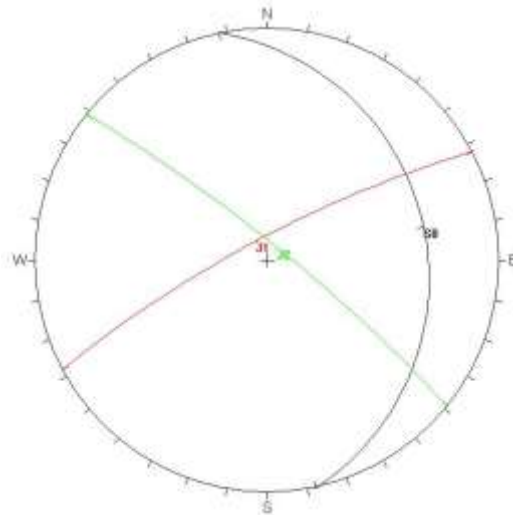


Figura 9.15 – Estereograma mostrando a conformação da cunha encontrada na cavidade SPD10.

Foi analisada a possibilidade de geração de cunhas em um corte e no perfil da cavidade, obtendo-se um padrão de cunhas com ápices baixos, uma vez que logo acima está o contato do itabirito com a canga. Sabe-se que este contato já representa uma ampla zona de fraqueza, com ampla possibilidade de deslocamento e queda de blocos tanto do itabirito quanto da canga.

O perfil apresenta o teto da porção intermediária inserido em canga, litologia que não favorece a formação de cunhas, sendo possível a formação de cunhas apenas nas porções frontal e distal da cavidade. Tratam-se nesse caso, de cunhas no teto em formato de capelas alongadas na direção NW-SE (Figura 9.16).

Apesar de totalmente inserido no itabirito, o corte apresentado possui canga menos de um metro acima do teto, reduzindo a possibilidade de geração de cunhas. O lado W pode apresentar cunhas com o ápice um pouco maior nas paredes e porção do teto da galeria, podendo provocar o deslizamento de blocos em direção ao seu interior. O teto permite a formação de cunhas em forma de lajes com o ápice bem baixo, provavelmente dado pelo contato entre a canga e o itabirito. A porção leste possibilita a formação de cunhas menos representativas em formatos tetraédricos, sendo mais regulares e encaixadas, com menor possibilidade de movimentação. Uma justificativa seria as menores dimensões da cavidade neste local. (Figura 9.17).

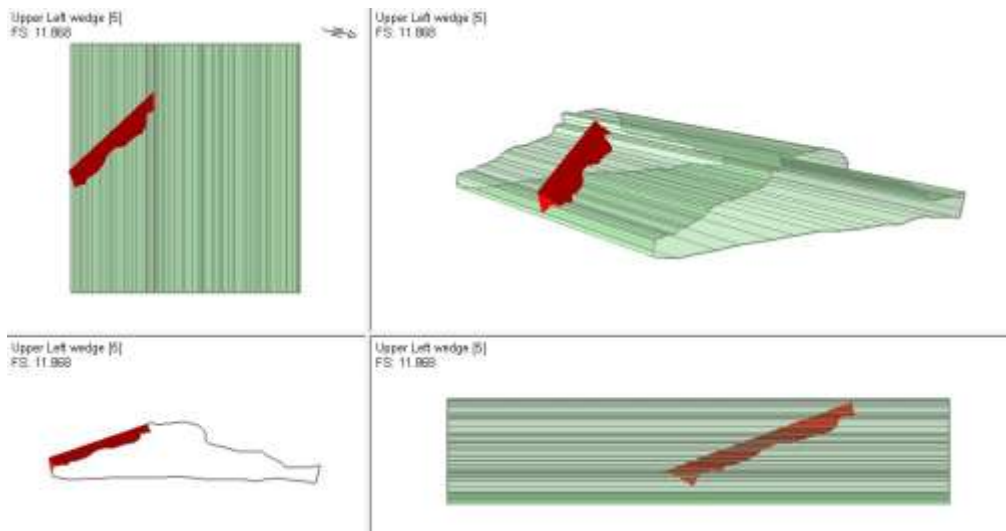


Figura 9.16 – Possibilidade de geração de cunhas no teto da cavidade SPD10.

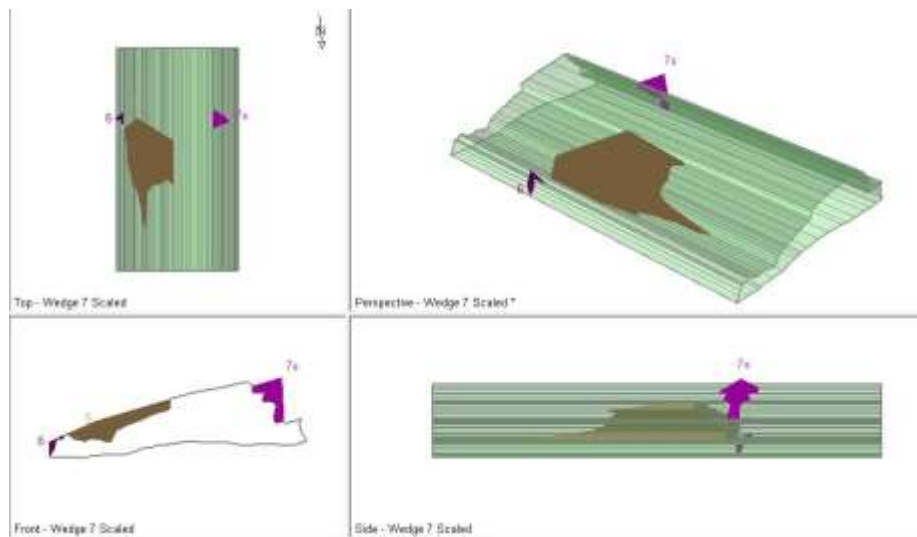


Figura 9.17 – Possibilidade de geração de cunhas no teto e paredes da cavidade SPD10.

9.7 - Espeleogênese e Evolução

O maior desenvolvimento da cavidade SPD10 ocorre a partir da zona de contato entre o itabirito e a canga. Assim, provavelmente houve um fluxo preferencial causando a dissolução e lixiviação do substrato de itabirito, mais friável que a canga. Posteriormente, a cavidade foi ampliada por pequenos processos de incisão no itabirito, em que os blocos foram desagregados e carreados pelo fluxo hidrológico e sedimentar. Tais processos foram favorecidos no itabirito pela presença de descontinuidades liberando pequenos blocos. Com a ampliação das galerias pelo fluxo constante, pequenos canais se interconectaram ampliando os vazios presentes no itabirito, até a exposição da canga no teto. A partir dos vazios cada vez maiores a canga perde a estabilidade liberando blocos e se desagregando em processos gravitacionais.

Suas pequenas dimensões e sua boca estreita indicam gênese por erosão, uma vez que sua formação principal se deu a partir da erosão do itabirito subjacente, sendo a capa de canga dada pelo teto da cavidade em sua maior extensão. É comum observar ainda, cunhas estruturais no itabirito, geradas pela intersecção entre o acamamento e duas famílias de fraturas. Essas cunhas causam o deslizamento de placas de itabirito, ampliando a cavidade em uma direção SE-NE, seguindo o caimento principal do acamamento (Figura 9.18).



Figura 9.18 – Processo de deslizamento de placas de itabirito segundo o acamamento (S0).

9.8 - Estabilidade dos vãos

Para a análise do tamanho dos vãos da cavidade SPD10 foram utilizados três círculos circunscritos em sua morfologia, com diâmetros de 3,1 m, 3,4 m e 4,9 m (Figura 9.19). Tais valores foram utilizados para correlacionar o diâmetro equivalente à qualidade do maciço em cada local fazendo referência à estabilidade dos locais. A área de maior vão, ou seja, a de maior diâmetro equivalente e menor estabilidade é observada na porção mediana da galeria, com parte inserida em itabirito, com índice Q igual a 0,125, e parte inserida em canga, com índice Q igual a 7,5. Nota-se na Figura 9.20 que as porções dos vãos inseridas em itabirito estão em uma zona de instabilidade, diferente da canga, que recaem sobre uma zona de transição devido a maior qualidade do maciço.

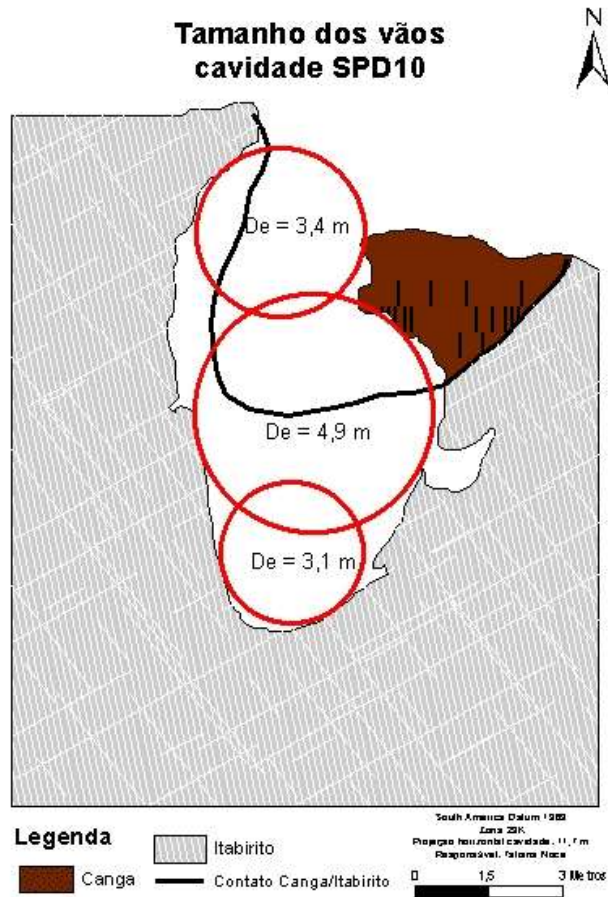


Figura 9.19 – Mapa da cavidade SPD10 mostrando o tamanho dos vãos e respectivos diâmetros equivalentes (D_e).

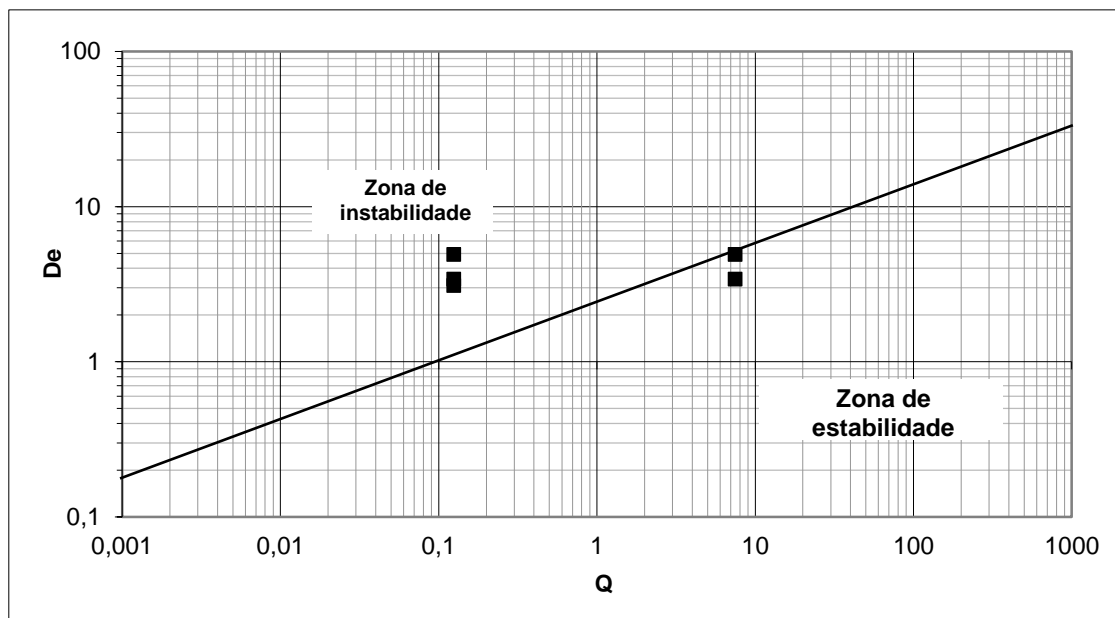


Figura 9.20 – Estabilidade dos vãos em relação ao índice Q . Fonte: Adaptado de Barton *et al.* 1974.

10- CAVIDADE SPD11

10.1 - Caracterização da rocha intacta

A caverna SPD11 apresenta características semelhantes à SPD10, uma vez que são cavernas adjacentes encontradas no mesmo maciço. Também inserida no contato entre o itabirito e a canga, a cavidade apresenta leve inclinação em direção à boca, resultando na presença de sedimentos e blocos autóctones, advindos de seu interior (Figura 10.1a). O processo de deslocamento da canga encontra-se em um estágio relativamente mais avançado que na cavidade SPD10, com presença de blocos de canga e itabirito no piso. Além disso, os processos de intemperismo e alteração também se encontram em estágio mais avançado, principalmente devido às maiores dimensões da boca, que permite uma maior influência de agentes externos no interior da cavidade.

O itabirito apresenta textura granular com bandamento milimétrico de camadas mais ferruginosas e mais silicosas, sendo a mineralogia básica composta principalmente por minerais de óxido de ferro, seguida de quartzo e anfibólio. A rocha é classificada como muito alterada (W4), apresentando, por vezes, minerais pulverulentos ou friáveis, e pouco coerente (C3), sendo facilmente quebrável com o martelo do geólogo (Figura 10.1b).

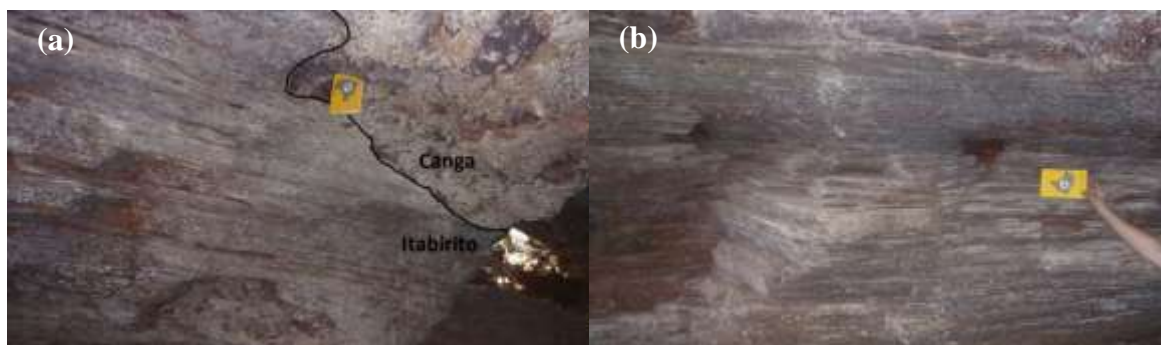


Figura 10.1 – a) Contato canga/itabirito. b) Itabirito bandado e alterado no interior da cavidade.

A canga apresenta coloração de amarronzado a ocre, com seixos angulosos de itabirito, quartzo, hematita e silexita, além de blocos de itabirito relativamente bem preservados em meio à canga (Figura 10.2a). Além disso, observa-se um contato bastante irregular entre a canga e o itabirito, indicando uma gênese provavelmente associada a um material coluvionar (Figura 10.2b). A matriz é fina a grossa, composta por quartzo e argilominerais, cimentados por óxido de ferro. Trata-se de uma canga detrítica completamente alterada (W5) e coerente (C1). A Figura 10.3 mostra o mapa e os cortes

indicando a litologia básica da cavidade.



Figura 10.2 – a) Seixos angulares na canga detrítica. b) Contato irregular entre canga e itabirito.

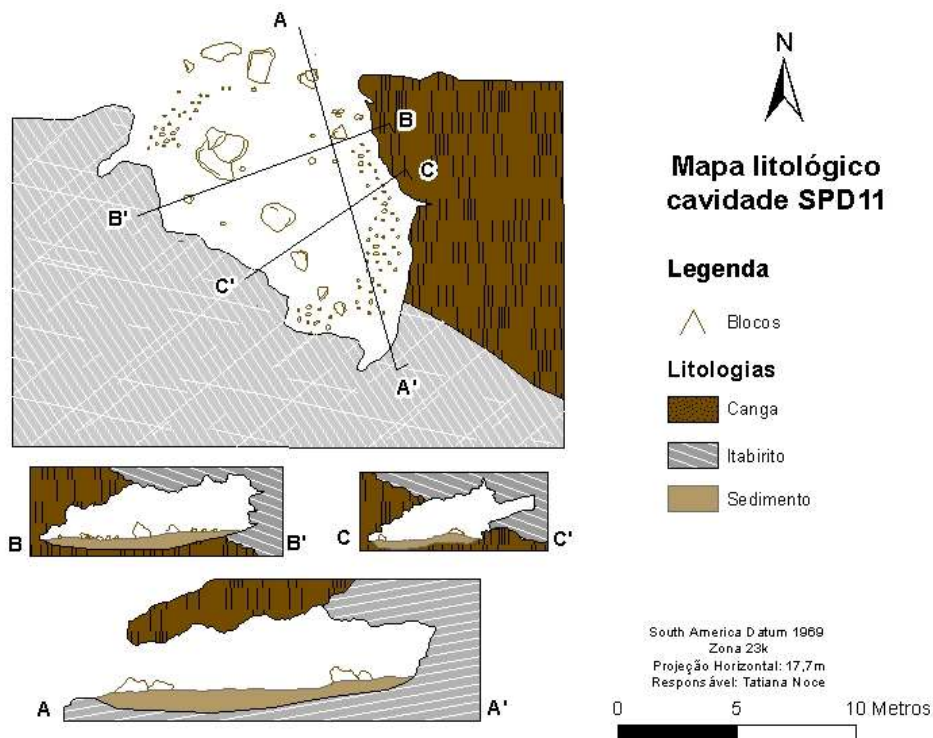


Figura 10.3 – Mapa, perfil e cortes litológicos da cavidade SPD11.

10.1.1 - Ensaios de Resistência

Testes com o martelo de geólogo nos itabiritos encontrados na cavidade SPD11 o classificaram como rocha branda, quebrando-se com um único golpe do martelo. Dessa forma, sua resistência à compressão uniaxial (σ_c) estaria entre 5 e 25 MPa. Foram realizados 13 ensaios de carga pontual nesses itabiritos com uma invalidação, 7 ensaios perpendiculares a principal zona de fraqueza e 5 paralelos (Tabela 10.1).

Tabela 10.1 – Características utilizadas para o cálculo do índice de carga pontual ($Is_{(50)}$) do itabirito na cavidade SPD11.

Cavidade	Ensaio	Direção	Litologia	P (N)	De (mm)	$Is_{(50)}$ (Mpa)
SPD11	1	Perpendicular a S0	Itabirito	1060	45,079	0,498
SPD11	2	Perpendicular a S0	Itabirito	820	44,137	0,398

Cavidade	Ensaio	Direção	Litologia	P (N)	De (mm)	Is(50) (Mpa)
SPD11	3	Perpendicular a S0	Itabirito	650	34,076	0,471
SPD11	4	Perpendicular a S0	Itabirito	–	–	–
SPD11	5	Perpendicular a S0	Itabirito	770	43,071	0,388
SPD11	6	Perpendicular a S0	Itabirito	720	37,134	0,457
SPD11	7	Perpendicular a S0	Itabirito	850	37,897	0,522
SPD11	8	Perpendicular a S0	Itabirito	850	36,703	0,549
SPD11	9	// a S0	Itabirito	560	32,547	0,436
SPD11	10	// a S0	Itabirito	570	52,442	0,212
SPD11	11	// a S0	Itabirito	570	31,514	0,466
SPD11	12	// a S0	Itabirito	550	25,332	0,631
SPD11	13	// a S0	Itabirito	530	27,362	0,540

Ao serem excluídos os valores de pico, chega-se a um índice de carga pontual ($Is_{(50)}$) médio de 0,47 MPa para esforços perpendiculares ao acamamento e 0,48 MPa para esforços paralelos. A partir desse valor, obtêm-se uma resistência à compressão uniaxial (σ_c) igual a 11,26 MPa para esforços perpendiculares e 11,54 para esforços paralelos ao ser aplicado a equação de correlação de Broch & Franklin (1972), e de 13,45 MPa para esforços perpendiculares e 13,55 MPa para esforços paralelos pela equação de Kahraman (2001). Para as classificações geomecânicas foi utilizado o valor de 11,26 MPa, dado pela resistência a compressão uniaxial obtida a partir de esforços perpendiculares ao acamamento e pela equação de Broch & Franklin (1972).

No caso da canga, os ensaios feitos com o martelo do geólogo mostram a necessidade de um golpe firme para quebrar a rocha, além de ser dificilmente riscável por lamina de aço. Dessa forma, ela seria caracterizada como rocha mediantemente coerente, com resistência à compressão uniaxial (σ_c) variando entre 25 e 50 MPa. Os ensaios de compressão pontual, por sua vez, indicam valores menores, chegando a um ($Is_{(50)}$) médio de 0,329 MPa.

Tabela 10.2 - Características utilizadas para o cálculo do índice de carga pontual ($Is_{(50)}$) da canga na cavidade SPD11.

Cavidade	Ensaio	Direção	Litologia	P (N)	De (mm)	Is(50) (Mpa)
SPD11	1	–	Canga	1390	60,671	0,412
SPD11	2	–	Canga	650	43,395	0,324
SPD11	3	–	Canga	280	35,682	0,189
SPD11	4	–	Canga	420	39,088	0,246
SPD11	5	–	Canga	620	47,271	0,271
SPD11	6	–	Canga	1050	46,250	0,474
SPD11	7	–	Canga	830	44,781	0,394

A partir dos dados apresentados, obteve-se resistências a compressão uniaxial para a canga de 7,9 MPa e 12,3 MPa, sendo utilizado o primeiro valor. Nota-se que tanto a resistência do itabirito quanto a da canga nesta cavidade apresentaram-se bem inferiores as demais. Isso provavelmente acontece devido aos ensaios serem feitos em blocos alóctones coletados no piso da caverna, que deviam estar mais alterados e intemperizados que os demais. Outra justificativa seria a maior dimensão da boca da cavidade, que permite a entrada de luz solar em toda a sua extensão, causando maiores variações de temperatura e umidade, e aumentando assim o processo de intemperismo e alteração em seu interior.

10.2 - Caracterização estrutural

Assim como na cavidade SPD10, foi observada uma alta influência magnética a partir de testes com o barbante e a bússola do geólogo na cavidade SPD11, sendo as estruturas aferidas a partir do seu traço plotado na planta baixa da galeria. Foi observado um acamamento médio de 43/23, bastante fraturado, contínuo e com espaçamentos inferiores a 0,06 m (Figura 10.4). Essa estrutura apresenta-se bastante instável, com muitos deslocamentos, provocados principalmente pela formação de cunhas com as duas famílias de fraturas encontradas na cavidade. A superfície do acamamento se encontra rugosa plana, moderadamente alterada e sem a presença de água, com aberturas comumente superiores a 5 mm.

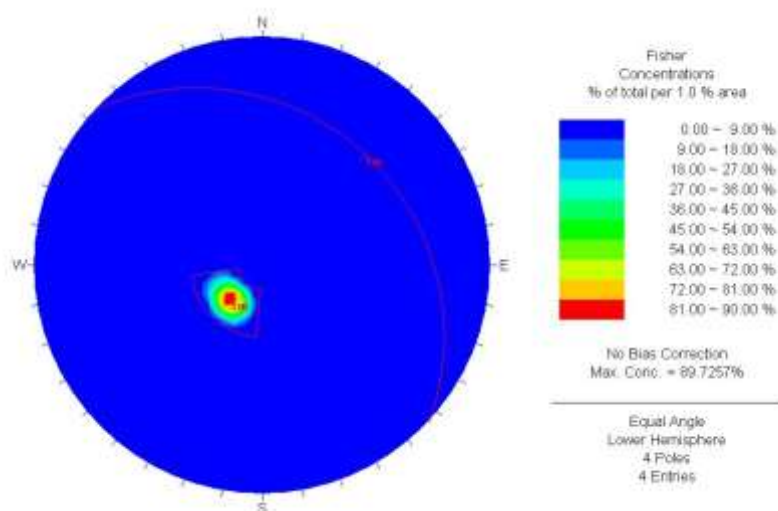


Figura 10.4 – Estereograma mostrando a média das medidas de acamamento na cavidade SPD11.

Foram aferidas duas famílias de fraturas no itabirito: J1 e J2, com atitudes de 320/85 e 13/85 respectivamente (Figura 10.5). Essas famílias apresentam características

semelhantes ao acamamento, com espaçamentos maiores, de até 20 cm, e continuidades menores, comumente inferiores a 3 metros. São observadas inúmeras cunhas formadas pelo cruzamento entre as duas famílias de fratura e o acamamento, desde pequenas até alcançando toda a dimensão da cavidade (Figura 10.6 a e b). Algumas dessas cunhas formam reentrâncias nas paredes, além de outros processos de deslocamentos (Figura 10.6c).

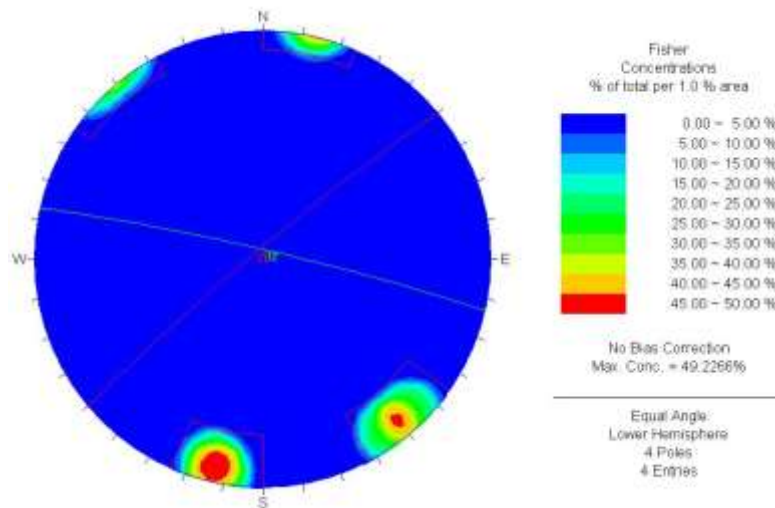
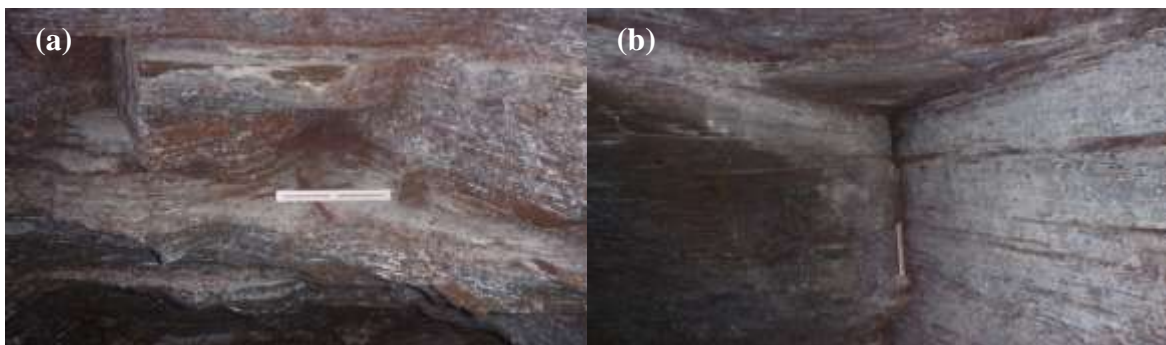


Figura 10.5 – Estereograma mostrando as atitudes das famílias de fraturas encontradas na cavidade SPD11.

A canga, que ocorre por todo o teto e a porção leste da galeria, apresenta diversas juntas de tração descontínuas (Figura 10.6d). Essas juntas são caracterizadas como muito rugosas e muito alteradas, com aberturas geralmente superiores a 5 mm e espaçamento médio superior a 2 metros. Também são comuns reentrâncias e irregularidades geradas pelo deslocamento de blocos nessa litologia. O mapa na Figura 10.7 mostra as principais estruturas aferidas, tanto no itabirito na porção oeste da cavidade, quanto na canga, com as juntas representadas principalmente no teto da galeria. Ressalta-se que a cavidade apresenta uma inclinação geral para NE, resultante do acamamento principal (S0).



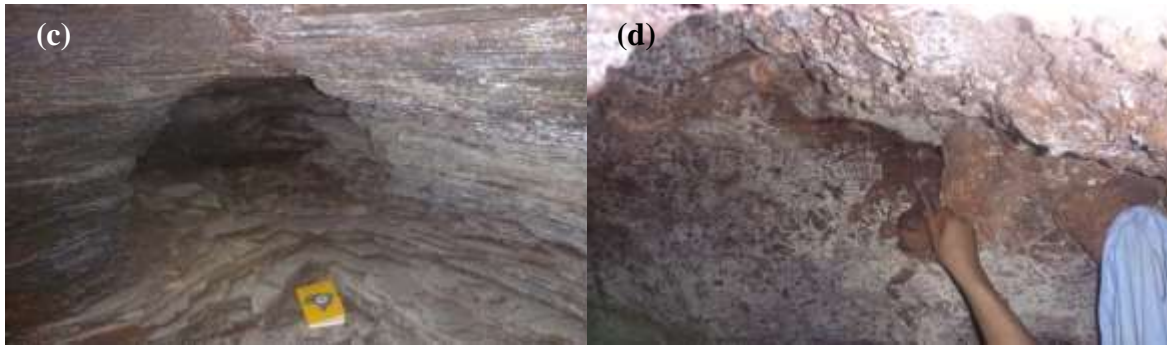


Figura 10.6 – a) Cunha formada pelo acamamento (S0) e as famílias de fratura J1 e J2. b) Grande cunha formada pelo acamamento (teto) e pelas famílias de fraturas (parede). c) Buraco na parede formado pela junção das três famílias de descontinuidades. d) Junta de tração observada na canga.

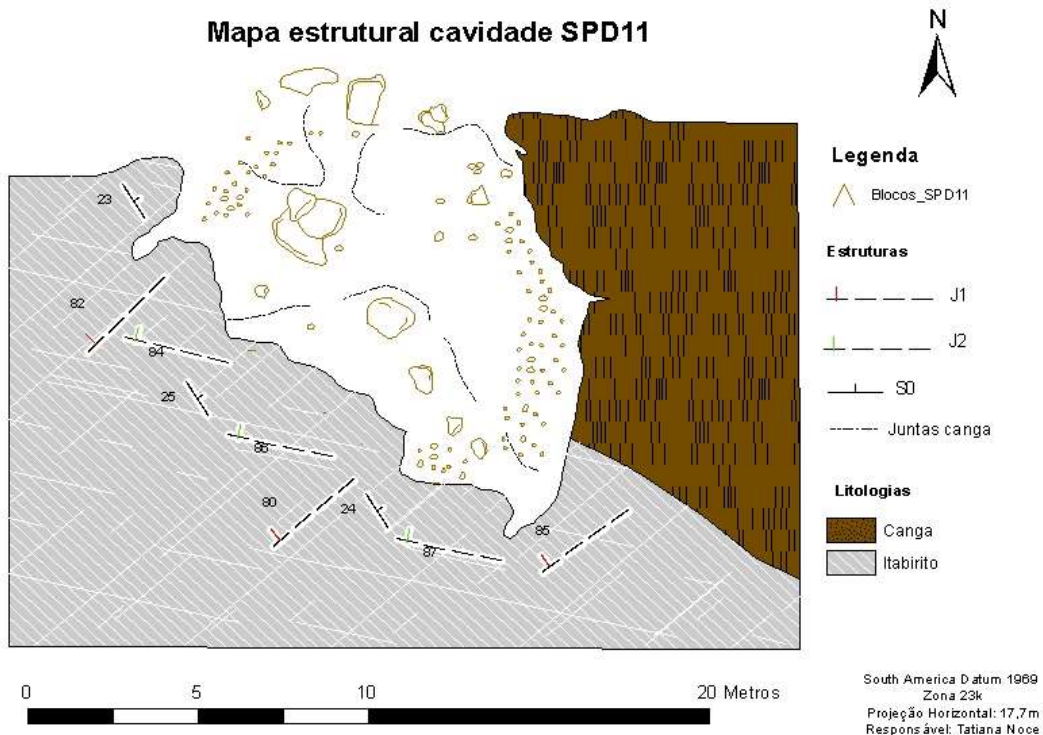


Figura 10.7 – Mapa mostrando principais estruturas aferidas na cavidade SPD11.

10.3 - Qualidade do Maciço Rochoso

Foram realizados dois pontos de classificação no itabirito e três na canga, uma vez que esta ocupa todo o teto e a porção oriental da cavidade. O itabirito é observado apenas nas paredes do lado oeste. Assim como a cavidade SPD10, esta cavidade apresenta um índice RQD igual a zero em todos os pontos no itabirito. Tal fato é explicado pelo índice volumétrico de juntas (J_v) superior a 35, como pode ser observado na Tabela 10.3.

Tabela 10.3 – Características e valor de RQD para os pontos em itabirito da cavidade SPD11.

Ponto		1	2
S0	Número	30,00	50,00

Ponto		1	2	
J1	L (m)	0,90	1,20	
	S (m)	0,03	0,02	
	λ	33,33	41,67	
	Número	10,00	15,00	
	L (m)	1,40	1,60	
	S (m)	0,14	0,11	
	λ	7,14	9,38	
	Número	8,00	9,00	
	J2	L (m)	1,50	1,90
		S (m)	0,19	0,21
λ		5,33	4,74	
Jv		45,81	55,78	
RQD Palmstrom (1982)		0	0	

A canga, por outro lado, apresenta um índice Jv muito baixo, devido ao amplo espaçamento entre as juntas de alívio observadas, gerando um RQD igual a 100.

10.3.1 - Rock Mass Rating (RMR)

Ao se analisar a família de descontinuidades mais desfavorável do itabirito, verificam-se características muito semelhantes nos dois pontos inseridos nessa litologia. A análise desses pontos segundo o sistema de classificação de maciços RMR está apresentada na Tabela 10.4. Obteve-se um índice RMR igual a 35, caracterizando a rocha como de má qualidade, classe IV (Figura 10.8). Esse baixo índice baseia-se nos baixos valores do índice RQD, na resistência à compressão uniaxial (σ_c) e no espaçamento entre as descontinuidades, aliados ao alto grau de alteração e grande abertura entre as juntas.

Tabela 10.4 – Características do itabirito encontrado na cavidade SPD11 segundo o sistema de classificação de maciços RMR.

	Descrição	Pontuação	
RCU (σ_c)	5 a 25	2	
RQD	< 25	3	
Influência da água	Completamente seco	15	
Espaçamento (m)	< 0,06	5	
Persistência (m)	3 a 10	2	
Descontinuidades	Abertura (mm)	>5	0
	Rugosidade	Ligeiramente rugoso	3
	Preenchimento	Mole < 5	2
	Grau de alteração	Moderadamente Alterado	3
RMR	35		
Classe	IV	21 a 40	
Descrição	Rochá de má qualidade		

A canga apresenta um índice RQD muito maior que o itabirito, elevando consideravelmente o valor de RMR. Outro fator que deve ser mencionado é o maior espaçamento entre as descontinuidades e a maior rugosidade destas (Tabela 10.5). A canga apresentou um índice RMR igual a 72, classificada como classe II, de boa qualidade (Figura 10.8).

Tabela 10.5 – Características da canga encontrada na cavidade SPD11 segundo o sistema de classificação de maciços RMR.

	Descrição	Pontuação
σ_c (MPA)	5 a 25	2
RQD	90 a 100	20
Influência da água	Completamente seco	15
Descontinuidades		
Espaçamento (m)	> 2	20
Persistência (m)	3 a 10	2
Abertura (mm)	> 5	0
Rugosidade	Muito rugoso	6
Preenchimento	Nenhum	6
Grau de alteração	Muito alterado	1
Valor de RMR	72	
Classe	II	61 a 80
Descrição	Rocha de boa qualidade	

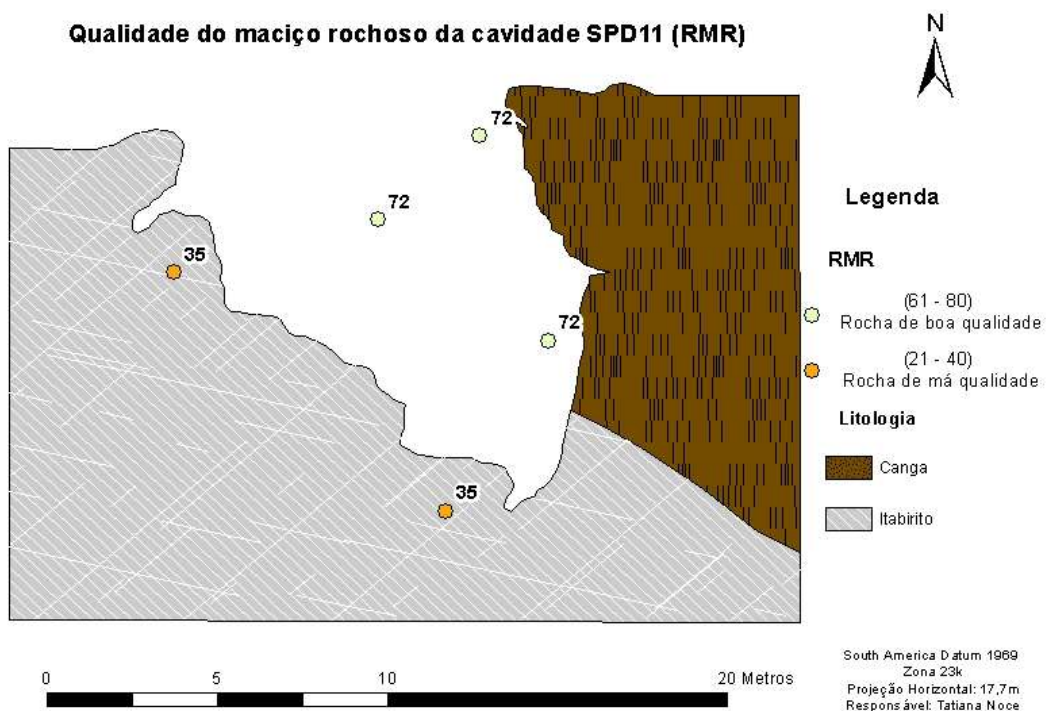


Figura 10.8 – Mapa de qualidade do maciço da cavidade SPD11 segundo o índice RMR.

10.3.2 - Rock Tunneling Quality Index (Q)

Ao se analisar a Tabela 10.6 nota-se que o itabirito é classificado como classe VII, com padrão geomecânico muito ruim segundo esse sistema de classificação de maciços. Assim como no RMR, o baixo valor se deve principalmente ao baixo RQD e alto grau de faturamento destes itabiritos.

Tabela 10.6 - Características do itabirito encontrado na cavidade SPD11 segundo o sistema de classificação de maciços Q.

RQD	10	10
Jn	Três famílias mais descontinuidades aleatórias	12
Jr	Superfície rugosa plana	1,5
Ja	Paredes levemente alteradas, preenchimento com materiais abrasivos	2
Jw	Escavação seca ou com pequena influência de água	1
SRF	Juntas abertas, rocha muito fraturada e descomprimida (todas as profundidades)	5
Q	0,1 - 1	0,125
Classe	VII	0,1 - 1
Padrão Geomecânico	Muito ruim	0,1 - 1

Da Tabela 10.7, nota-se a classificação da canga com um padrão geomecânico regular, com índice Q igual a 7,5 e classe V. Tal fato pode ser explicado pela presença de material argiloso pouco consolidado comumente preenchendo suas fraturas abertas, reduzindo assim sua resistência ao cisalhamento. Dessa forma, mesmo com o alto índice RQD e baixo grau de fraturamento dessa litologia, esse sistema de classificação impede que sua classificação seja muito alta, se considerados outros fatores desfavoráveis.

Tabela 10.7 – Características da canga encontrada na cavidade SPD11 segundo o sistema de classificação de maciços Q.

	Descrição	Pontuação
RQD	100	100
Jn	Descontinuidades aleatórias	1
Jr	Superfície rugosa ondulada	3
Ja	Preenchimento argiloso pouco consolidado	8
Jw	Escavação seca ou pequena influência de água	1
SRF	Zonas individuais de corte em rocha competente (profundidades da escavação <= 50 m)	5
Q	4 a 10	
Classe	V	7,5
Padrão Geomecânico	Regular	

O mapa apresentado na Figura 10.9 mostra a qualidade do maciço rochoso da cavidade SPD11 segundo o índice Q para os pontos na canga e no itabirito.

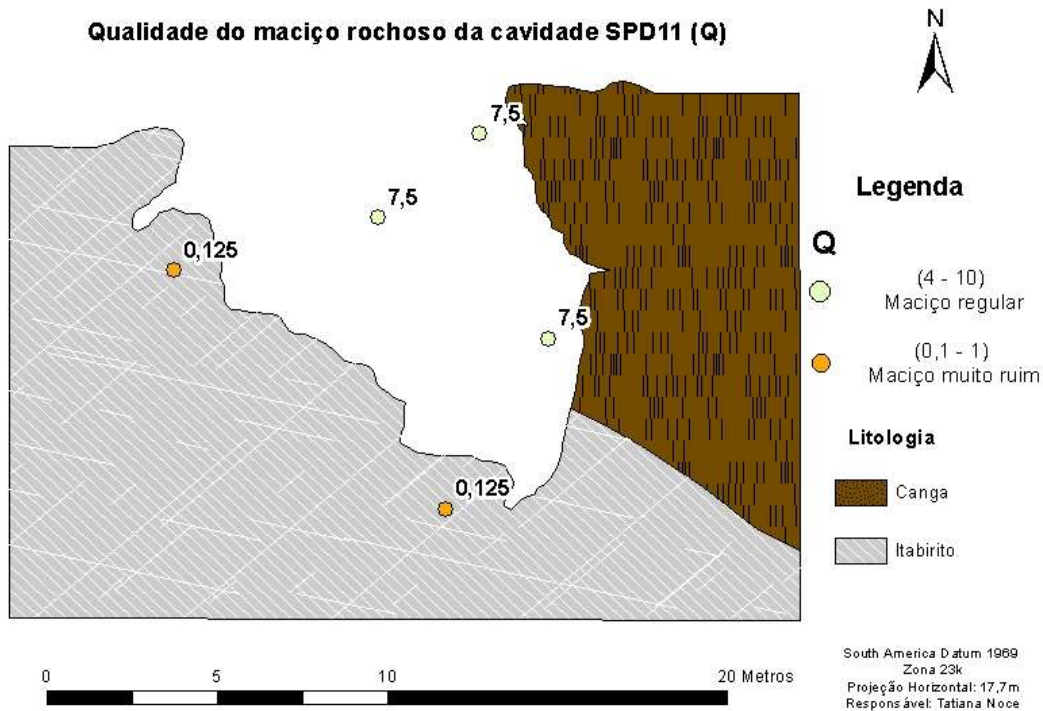


Figura 10.9 – Mapa de qualidade do maciço da cavidade SPD11 segundo o índice Q.

10.3.3 - Rock Mass Index (RMi)

O cálculo do volume de blocos no itabirito obteve valores médios de $0,0011 \text{ m}^3$ para o ponto 1 e $0,0006 \text{ m}^3$ para o ponto 2 (Tabela 10.8). Os dois pontos são muito semelhantes, tanto que são classificados juntos nos sistemas de classificação Q e RMR, assim como na descrição das descontinuidades deste sistema (Tabela 10.9). Nota-se ainda, que as características das descontinuidades do itabirito são relativamente as mesmas que na cavidade SPD10.

Tabela 10.8 – Dados utilizados para o cálculo do volume do bloco a partir do espaçamento (VbS) e a partir do J_y (VbJy) nos pontos em itabirito da cavidade SPD11.

Pontos	1	2
S1	0,0300	0,0200
S2	0,1400	0,1100
S3	0,1900	0,2100
$\gamma 1$	86,6512	89,6587
$\gamma 2$	47,9150	57,7157
$\gamma 3$	70,4260	67,6405
sen($\gamma 1$)	0,9983	1,0000
sen($\gamma 2$)	0,7422	0,8454

Pontos	1	2
sen(γ_3)	0,9422	0,9248
Vb	0,0011	0,0006

Tabela 10.9 – Características das descontinuidades do itabirito da cavidade SPD10 a partir do R_{Mi}.

	Descrição	Pontuação
jL	Comprimento da descontinuidade (m)	1 a 10
	Continuidade	Contínua
jR	Pequena Escala	Levemente rugosa
	Larga Escala	Levemente ondulada
ja	Contato parcial entre as paredes. Preenchimento mole não compactado.	8

Os dois pontos analisados no itabirito foram classificados com R_{Mi} baixo e maciço fraco em termos de resistência, conforme pode ser observado na Tabela 10.10 e na Figura 10.10. Eles apresentam alta influência do ambiente externo, sendo mais intemperizados e alterados que os caracterizados na cavidade SPD10, portanto classificados com valores inferiores de R_{Mi}.

Tabela 10.10 – Cálculo do R_{Mi} no itabirito da cavidade SPD11.

Pontos	1	2
σ_c (MPa)	11,26	11,26
Vb	0,0011	0,0006
jL	1	1
jR	2	2
jA	8	8
jC	0,25	0,25
D	0,48822	0,48822
jP	0,00366	0,00265
R _{mi}	0,04123	0,02988
Termo para R _{mi}	Baixo	Baixo
Termo para resistência	Fraco	Fraco

Por não apresentar famílias definidas de descontinuidades, o cálculo do volume do bloco na canga foi feito a partir do espaçamento médio (S_m) e do comprimento médio (L_m) entre as juntas de alívio. No caso da cavidade SPD11, utilizou-se um L_m de 4 m e um S_m de 1,5 m, aferidos a partir das juntas apresentadas na Figura 10.7. O n_j da canga foi definido como 1, gerando as Equação 10.1 Equação 10.2 para o volume do bloco da canga encontrada na cavidade SPD11.

$$\beta = 20 + 21 * 4/1,5 * 1 = 76 \quad \text{Equação 10.1}$$

$$Jv = \frac{1}{1,5} = 0,666 \quad Vb = 76 * 0,666^{-3} = 256,5 \text{ m}^3 \quad \text{Equação 10.2}$$

As características das juntas encontradas nesta canga são as mesmas apresentadas nas cavidades SPB10 e SPD10, como pode ser observado na Tabela 10.11. Assim como na cavidade SPB10, obteve-se um valor de jP superior a 1, igualando o índice Rmi a resistência a compressão uniaxial (σ_c) da canga. Dessa forma, a canga é dada como rocha intacta, com jP igual ao valor máximo indicado pelo autor. Obteve-se então, um valor alto de Rmi, igual a 7,9, sendo utilizado o termo forte quando se trata da resistência deste maciço (Tabela 10.12 e Figura 10.10).

Tabela 10.11 – Características das juntas de alívio observadas na canga.

		Descrição	Pontuação
jL	Comprimento da descontinuidade (m)	1 a 10	2
	Continuidade	Descontínua	
jR	Pequena Escala	Muito Rugosa	6
	Larga Escala	Fortemente ondulada	
jA		As superfícies das descontinuidades encontram-se muito mais alteradas que a rocha intacta	4

Tabela 10.12 – Valores utilizados e cálculo do Rmi da canga encontrada na cavidade SPD11.

Litologia	Canga
σ_c (MPa)	7,9
Vb	256,5000
jL	2
jR	6
jA	4
jC	3
D	0,29701
jP	1,00000
Rmi	7,9
Termo Rmi	Alto
Termo para resistência	Forte

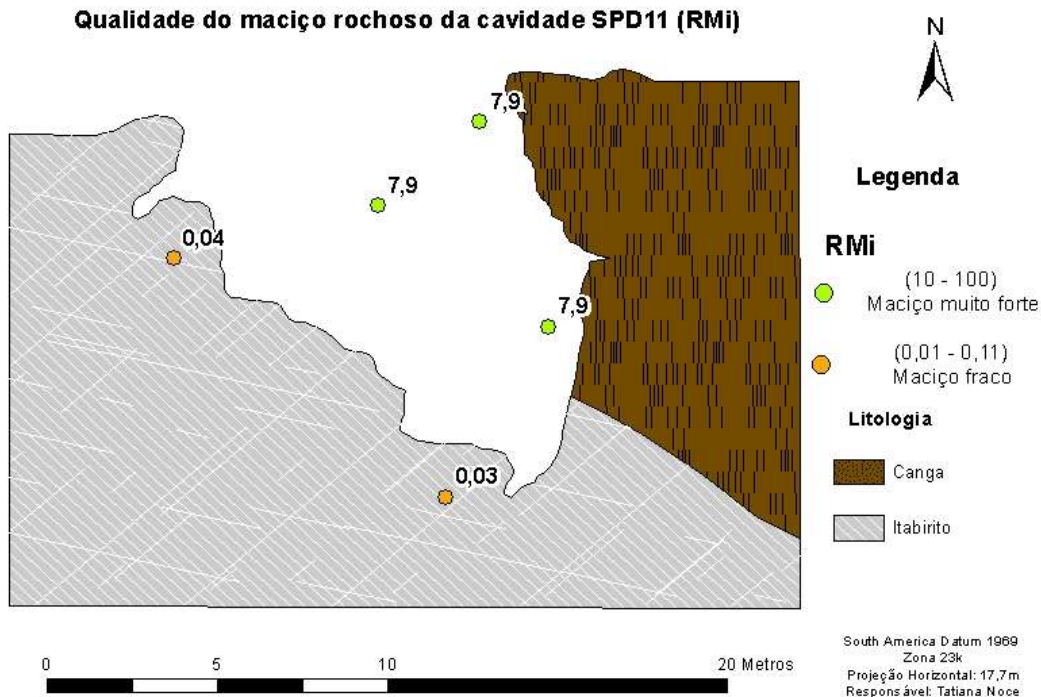


Figura 10.10 – Mapa de qualidade do maciço da cavidade SPD11 segundo o índice RMi.

10.4 - Dinâmica hídrica

Não foi observada presença de água durante os trabalhos de campo, sendo o escoamento pluvial, diferente da cavidade SPD10, provavelmente em direção à entrada da cavidade. O fluxo preferencial no interior da galeria seria inicialmente em direção a sua porção leste, em virtude da maior inclinação proporcionada pelo mergulho do acamamento, e em seguida em direção a boca, também devido à inclinação do piso (Figura 10.11). O fluxo também pode ser direcionado por infiltração, na porção E da cavidade, até o sistema aquífero do Grupo Itabira.

Essa água adentra o ambiente cavernícola pelos vazios interconectados existentes na camada de canga, pela zona de contato entre esta e o itabirito e pelas fraturas comuns nas formações ferríferas. Como está situada em uma ruptura de relevo, com uma drenagem cerca de 100 metros a frente e abaixo da caverna, o escoamento provavelmente é direcionado a drenagem, contribuindo para o seu aporte de água.

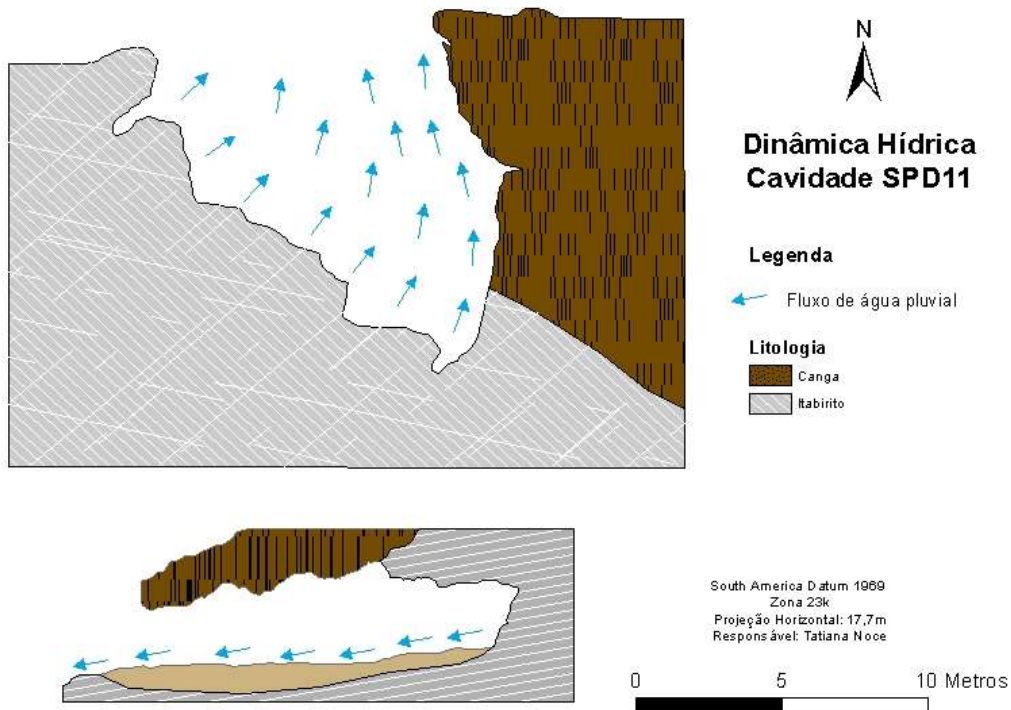


Figura 10.11 – Mapa mostrando o fluxo de água pluvial no interior da cavidade SPD11.

10.5 - Dinâmica dos sedimentos

Os sedimentos encontrados na cavidade SPD11 são, em sua maioria de origem autóctone, uma vez que a maior inclinação da cavidade se encontra em direção a boca, para o sul. Trata-se de sedimentos frutos do processo de deslocamento da canga, que já se encontra em um estágio avançado que o observado na cavidade SPD10, e da própria desagregação do itabirito. Devido às inúmeras cunhas existentes nestes itabiritos, é comum o processo de deslocamento, causando pequenos depósitos sedimentares placóides em meio a sedimentos finos (Figura 10.12).



Figura 10.12 – Processo de deslocamento com geração e transporte de sedimentos na cavidade SPD11.

Além disso, essa cavidade apresenta diversos blocos de canga no piso, desde cascalhos até dimensões métricas. Os sedimentos são direcionados pela ação pluvial e da gravidade tanto para a boca da cavidade quanto para a sua porção leste, seguindo o mergulho do acamamento principal (Figura 10.13).

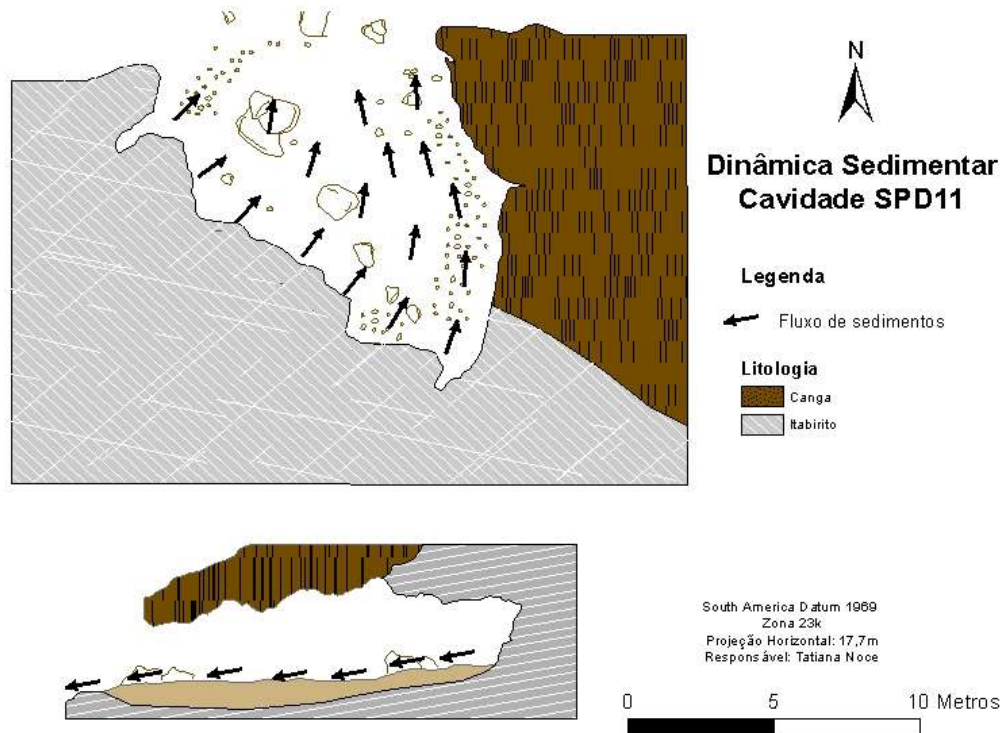


Figura 10.13 – Mapa mostrando a dinâmica dos sedimentos na cavidade SPD11.

10.6 - Investigação estrutural e análise cinemática

A formação de cunhas nessa cavidade é proporcionada pelo cruzamento entre as famílias de fraturas J1 e J2 com o acamamento (Figura 10.14). Como é observado itabirito somente na porção oeste da galeria, só é possível a formação de cunhas neste lado (Figura 10.15). São observadas cunhas tetraédricas na parede oeste da cavidade, com possível deslizamento de blocos para o seu interior. Também podem ser formadas cunhas entre o teto e a parede desta porção, próximo ao contato com a canga, causando queda de blocos. Outra cunha comum nesse tipo de cavidade, também observada na cavidade SPD10, ocorre no teto, em forma de laje com ápice muito baixo, provavelmente dado pelo contato entre a canga e o itabirito (Figura 10.16).

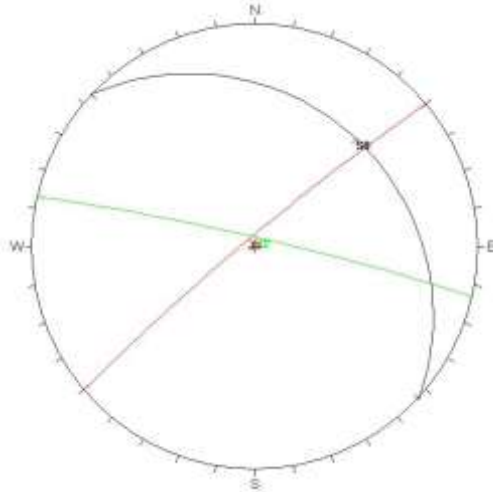


Figura 10.14 – Estereograma mostrando a conformação das cunhas existentes na cavidade SPD11.

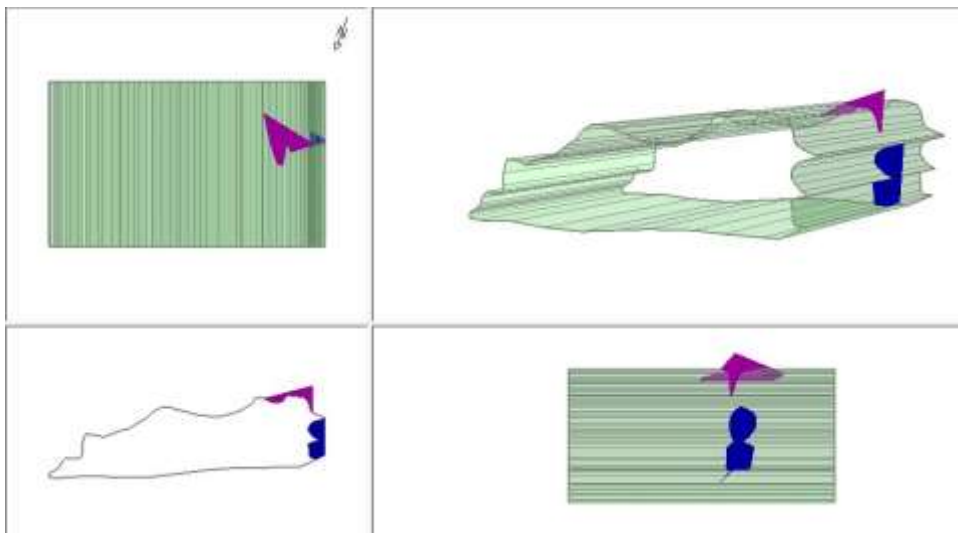


Figura 10.15 – Possível formação de cunhas na porção W da cavidade SPD11.

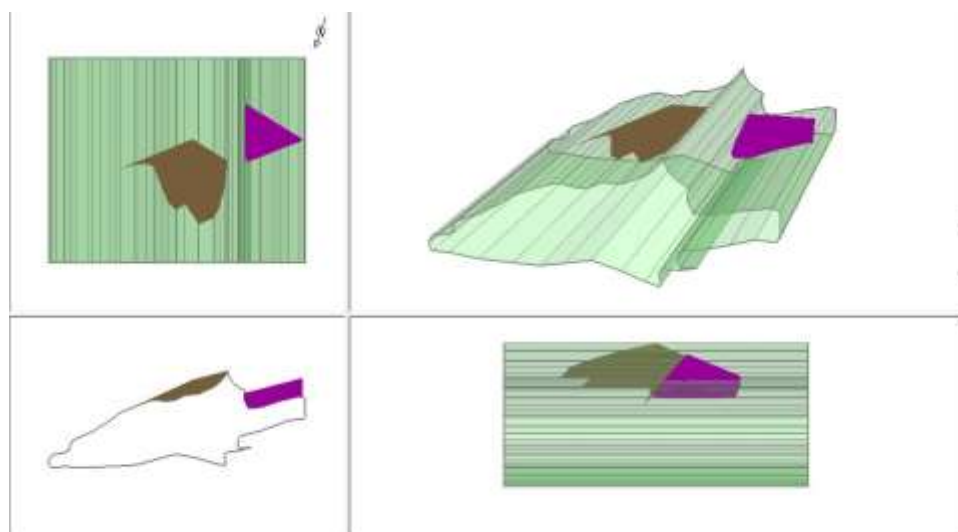


Figura 10.16 – Possibilidade de formação de cunhas no teto da cavidade SPD11.

10.7 - Espeleogênese e Evolução

Assim como na cavidade SPD10, o desenvolvimento principal se dá na zona de contato entre a canga e o itabirito, seguindo o modelo principal de espeleogênese desse tipo de caverna. Todo o teto desta cavidade está inserido em canga com uma inclinação de atitude semelhante ao acamamento principal, indicando uma gênese por erosão e dissolução do substrato friável de itabirito, restando a capa de canga mais resistente como teto da caverna.

Dessa forma, a cavidade SPD11 foi formada em basicamente três etapas principais:

1. Circulação de água através do acamamento principal S0 na interface do itabirito com a canga, com um fluxo preferencial de Az 5°. Assim, promoveu-se a dissolução e o carreamento dos fragmentos de itabirito.
2. Alargamento e dissolução das estruturas existentes no itabirito, principalmente do acamamento principal, além do deslocamento gerado pelas cunhas entre as famílias de fraturas e o acamamento.
3. Colapso do teto composto de canga devido ao aumento gradativo dos vãos, aliado à formação da boca a partir do colapso de grandes blocos de canga (Figura 10.17).



Figura 10.17 – Boca da cavidade SPD11 com teto de canga e grandes blocos deslocados do teto no piso.

10.8 - Estabilidade dos vãos

A cavidade SPD11 apresenta uma redução do tamanho dos vãos em direção ao seu interior, consistindo em uma seção basicamente triangular. Foram utilizados dois

círculos circunscritos em sua morfologia para uma análise quantitativa do tamanho dos vãos e sua variação (Figura 10.18). Como a cavidade apresenta dois materiais com índice Q distintos (canga:7,5 e itabirito:0,125) foram plotados quatro limites de estabilidade no ábaco. A porção em que o teto é composto por itabirito apresenta-se sob a região de característica instável em relação ao ábaco, tanto para os maiores quanto para os menores vãos. Já no caso do teto composto por canga, os pontos recaem na zona de transição entre instável e estável no caso do menor vão, de 5,1m. No caso com maior vão, de 9,5m, mesmo a porção inserida na canga apresenta condições relativamente instáveis (Figura 10.19).

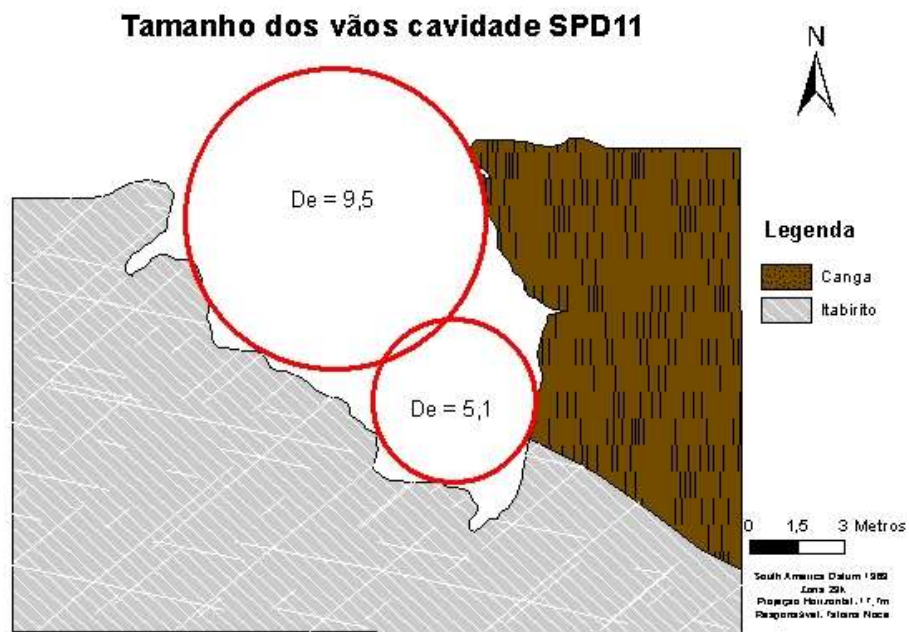


Figura 10.18 – Mapa da cavidade SPD10 mostrando o tamanho dos vãos e respectivos diâmetros equivalentes (De).

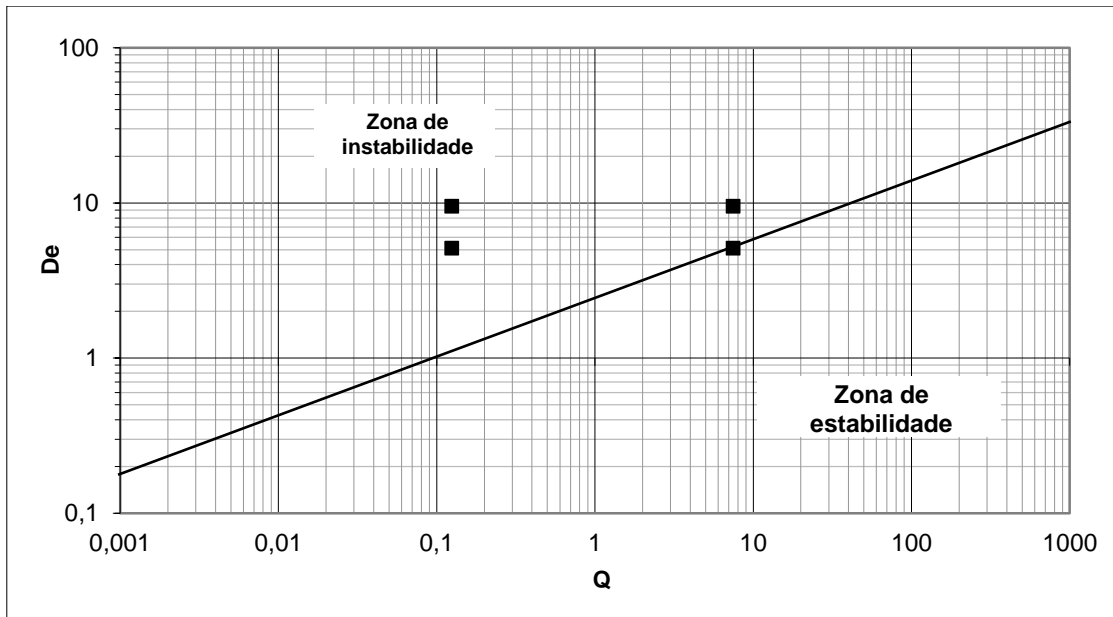


Figura 10.19 – Estabilidade dos vãos em relação ao índice Q . Fonte: Adaptado de Barton *et al.* (1974).

11- ZONEAMENTO GEOTÉCNICO

Esse capítulo descreve as análises realizadas para definição de um zoneamento da fragilidade geotécnica das cavidades estudadas. As informações levantadas em campo foram tratadas e analisadas espacialmente possibilitando a setorização dos aspectos geotécnicos semelhantes. Sabe-se que os locais de maior fragilidade são os que provavelmente responderiam primeiro aos impactos sofridos nas galerias por agentes externos.

Os aspectos analisados para o zoneamento da cavidade foram:

- a qualidade do maciço rochoso, que inclui a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, grau de alteração e coerência, além das principais características das descontinuidades;
- os sinais de instabilidades observados;
- os prováveis mecanismos de ruptura;
- a influência da água;
- a influência da dinâmica dos sedimentos;
- o tamanho dos vãos livres.

Para cada aspecto adotou-se uma escala de pontuação e do somatório desses parâmetros foi possível definir um zoneamento da fragilidade geotécnica das cavidades. Ressalta-se que a atribuição de valores ocorreu de forma comparativa, resultando em um zoneamento apenas qualitativo, de modo a definir as áreas mais susceptíveis a possíveis impactos.

Foi utilizada uma escala de pontuação de 0 a 100 no zoneamento, onde os valores mais baixos representam as áreas de menor fragilidade. Aos parâmetros foram atribuídos um máximo de 40 pontos para a qualidade do maciço rochoso; 15 pontos para os mecanismos de ruptura; 15 pontos para a influência de água, 15 pontos para a influência dos sedimentos; e 15 pontos para o tamanho relativo dos vãos. Locais que apresentavam sinais de instabilidade foram penalizados em 15 pontos.

Por englobar várias características geotécnicas do maciço rochoso, atribuiu-se uma pontuação maior para o aspecto de qualidade do maciço, dividida conforme apresentado

na Tabela 11.1. Optou-se por utilizar o sistema *Rock Mass Index* (R_{Mi}), por se tratar de um sistema mais atual, que envolve mais parâmetros quantitativos, além de dar mais atenção à resistência a compressão uniaxial da rocha (σ_c), parâmetro considerado fundamental na análise da qualidade de um maciço. Outra vantagem desse sistema é a sua variação mesmo em ambientes pequenos, conforme observado nas cavidades SPD10 e SPD11. O sistema *Rock Tunneling Quality Index* (Q) não considera resistência à compressão uniaxial como parâmetro, desfavorecendo sua utilização. Além disso, é fácil notar a semelhança desse sistema com o R_{Mi}, que basicamente o aperfeiçoou. O *Rock Mass Rating* (RMR), por sua vez, é um sistema muito subjetivo, o que o desfavorece ao ser utilizado em cavidades em formações ferríferas, que normalmente apresentam pequenas dimensões e características semelhantes em toda a sua extensão, resultando em índices iguais quando se trata da mesma litologia.

Tabela 11.1 – Pontuação utilizada para o zoneamento a partir da qualidade do maciço.

Classificação do maciço	R_{Mi}	Pontuação
Extremamente fraco	< 0,001	0
Muito fraco	0,001 - 0,01	7
Fraco	0,01 - 0,1	14
Moderadamente forte	0,1 - 1	21
Forte	1 - 10	28
Muito forte	10 - 100	35
Extremamente forte	> 100	40

Para o zoneamento de acordo com os mecanismos de ruptura, a influência de água, a influência na dinâmica dos sedimentos e o tamanho dos vãos foram utilizados os aspectos e pontuações apresentados na Tabela 11.2.

Com base nas informações estruturais e de análise cinemática foi possível definir os possíveis mecanismos de ruptura que podem atuar em cada área da cavidade. Dessa forma, considerou-se locais com baixa susceptibilidade a ocorrência de queda e deslizamento de blocos, como menos frágeis. Locais que apresentam alta susceptibilidade a ocorrência de movimentação de blocos, tanto por deslizamento quanto por queda, foram considerados como de alta fragilidade. A um local com susceptibilidade de ocorrência de apenas um tipo de ruptura, foi atribuída uma pontuação menor para queda de blocos, uma vez que esse tipo de movimentação é menos controlada pelo atrito, além de ser mais evidente nas galerias.

Como a metodologia de avaliação da qualidade do maciço rochoso do sistema RMi não considera a presença e a quantidade de água no maciço e no interior da cavidade, optou-se por incluir na análise da fragilidade geotécnica o parâmetro hidrologia. Assim, foi utilizada uma metodologia semelhante à adotada no sistema de classificação de maciços RMR para avaliação de água no maciço. As características hidrológicas foram divididas em cinco categorias, sendo a que apresenta água fluente a mais frágil. A menos frágil, por outro lado é representada por um maciço completamente seco.

O zoneamento da influência dos sedimentos foi feito com base na possibilidade de movimentação destes. Assim, locais com maiores concentrações de sedimentos arenosos, com maior granulometria e menor coesão, apresentam uma maior probabilidade de movimentação, tornando a região com uma maior fragilidade geotécnica. Por outro lado, locais com sedimentos mais argilosos e siltosos, que apresentam maior coesão, foram classificados com uma menor possibilidade de movimentação e, conseqüentemente, uma menor fragilidade geotécnica. Adicionalmente, utilizou-se como critério a inclinação do terreno e o fluxo de água, considerando-se os locais mais planos, menos frágeis que os mais inclinados.

O tamanho dos vãos em ambientes subterrâneos está diretamente relacionado ao grau de estabilidade de um maciço rochoso. Dessa forma, as cavidades foram setorizadas em função da similaridade do tamanho dos vãos sem apoio. Áreas com vãos menores são mais estáveis, portanto, menos frágeis, ao contrário de áreas com vãos maiores, que são menos estáveis e mais frágeis.

Tabela 11.2 – Pontuações utilizada para o zoneamento a partir de cada aspecto geotécnico.

	Aspecto	Pontuação
Mecanismos de ruptura	Baixa susceptibilidade a ocorrência de rupturas	15
	Susceptibilidade a ocorrência de deslizamento de blocos	10
	Susceptibilidade a ocorrência de queda de blocos	5
	Susceptibilidade a ocorrência de deslizamento e queda de blocos	0
Hidrologia	Completamente seco	15
	Ligeiramente úmido	12
	Úmido	9
	Gotejante	6
	Fluente	3

Aspecto		Pontuação
Probabilidade de movimentação de sedimentos	Baixa	15
	Média	10
	Alta	5
Tamanho dos vãos (metros)	< 2,5	15
	2,5 a 5	10
	> 5	5

Foram atribuídas, ainda, faixas de pontuação por nível de fragilidade geotécnica de modo a facilitar a classificação de áreas mais susceptíveis, conforme apresentado na Tabela 11.3

Tabela 11.3 – Faixa de pontuação por nível de fragilidade geotécnica utilizados.

Fragilidade geotécnica	Pontuação
Muito alta	< 20
Alta	21 a 40
Média	41 a 60
Baixa	61 a 80
Muito baixa	> 81

11.1 - Cavidade SPB65

Os mapas de zoneamento de acordo com cada aspecto utilizado para o zoneamento geotécnico final da cavidade SPB65 estão apresentados nas Figura 11.1, Figura 11.2 e Figura 11.3. A Figura 11.1b apresenta os locais da galeria que já apresentam sinais claros de instabilidades.

O zoneamento geotécnico final da cavidade SPB65 indicando suas principais zonas de fragilidade está apresentado na Figura 11.4. Nota-se que as regiões mais instáveis estão próximas aos pontos 6 e 8, em porções dos setores B e D da galeria, sendo coincidentes com os locais onde foram observados sinais de instabilidades durante os trabalhos de campo. Estes locais também são coincidentes com a maior probabilidade de queda de blocos do teto e com as maiores dimensões dos vãos, fatores desfavoráveis para a manutenção da estabilidade da cavidade. Além disso, algumas regiões com fluxo contínuo de água também apresentam alta fragilidade e estão representadas no mapa pelos pontos 12 e 13, também coincidentes com as maiores dimensões dos vãos e com maior susceptibilidade a ocorrência de quedas de blocos do teto.

Os pontos 4, 7, 10, 11 e 14 representam as porções mais estáveis da cavidade, sendo coincidentes com os maiores índices R_{Mi} e menores dimensões dos vãos. O ponto 4 também é favorecido pela baixa probabilidade de movimentação dos sedimentos, que são mais argilosos e mais finos, além de se tratar de uma região com inclinação menor quando comparada ao restante da galeria. Os pontos 10, 11 e 14, inseridos no setor C da galeria, representam a região mais estável, explicado pelo índice R_{Mi} relativamente alto, pela baixa probabilidade de ruptura e de movimentação de sedimentos, além da menor dimensão dos vãos da galeria.

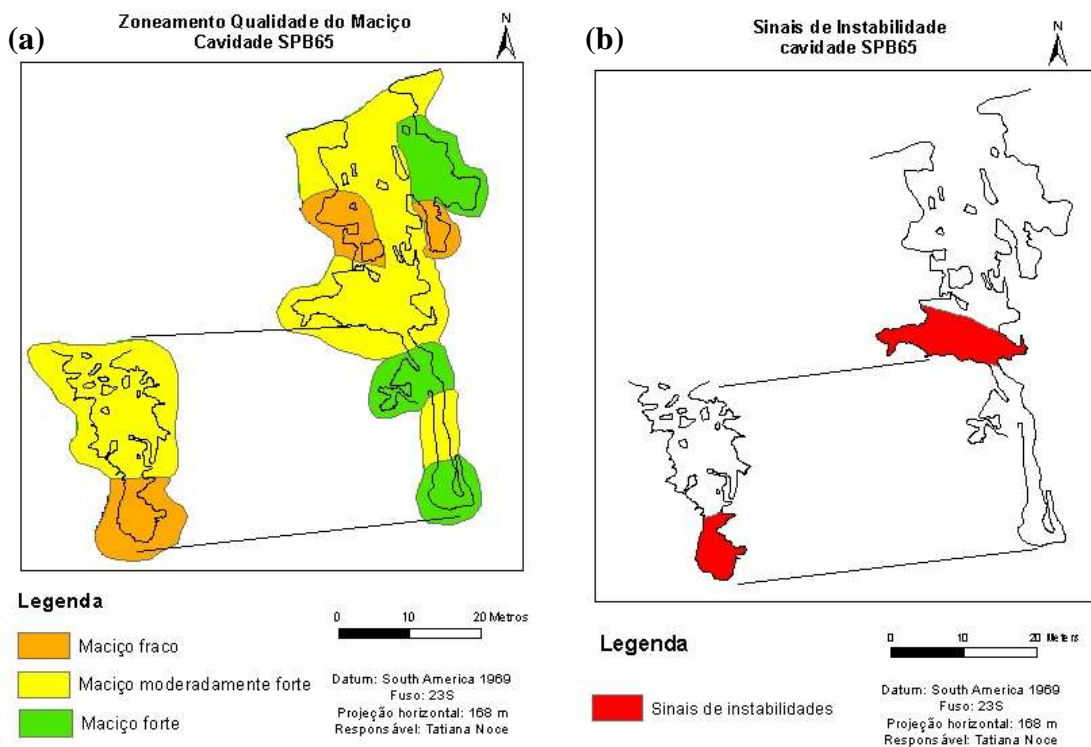


Figura 11.1 – a) Zoneamento de qualidade do maciço; b) Mapa da caverna SPB65 mostrando os sinais de instabilidade.

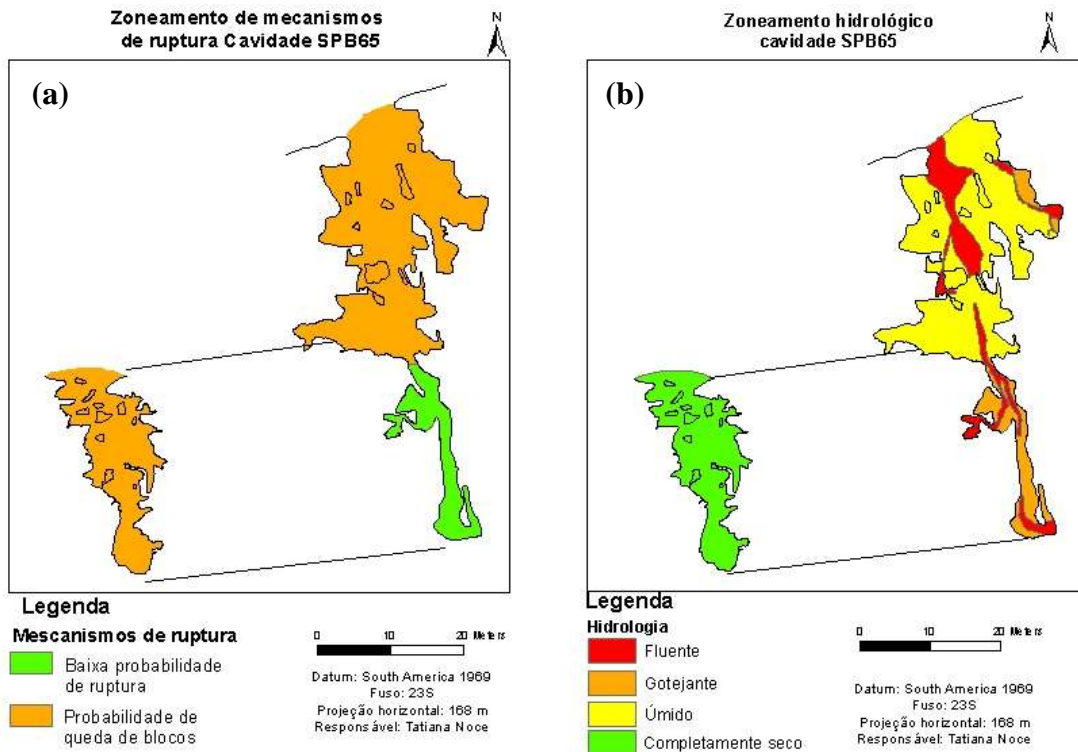


Figura 11.2 – a) Zoneamento de possíveis mecanismos de ruptura; b) Zoneamento da influência da água.

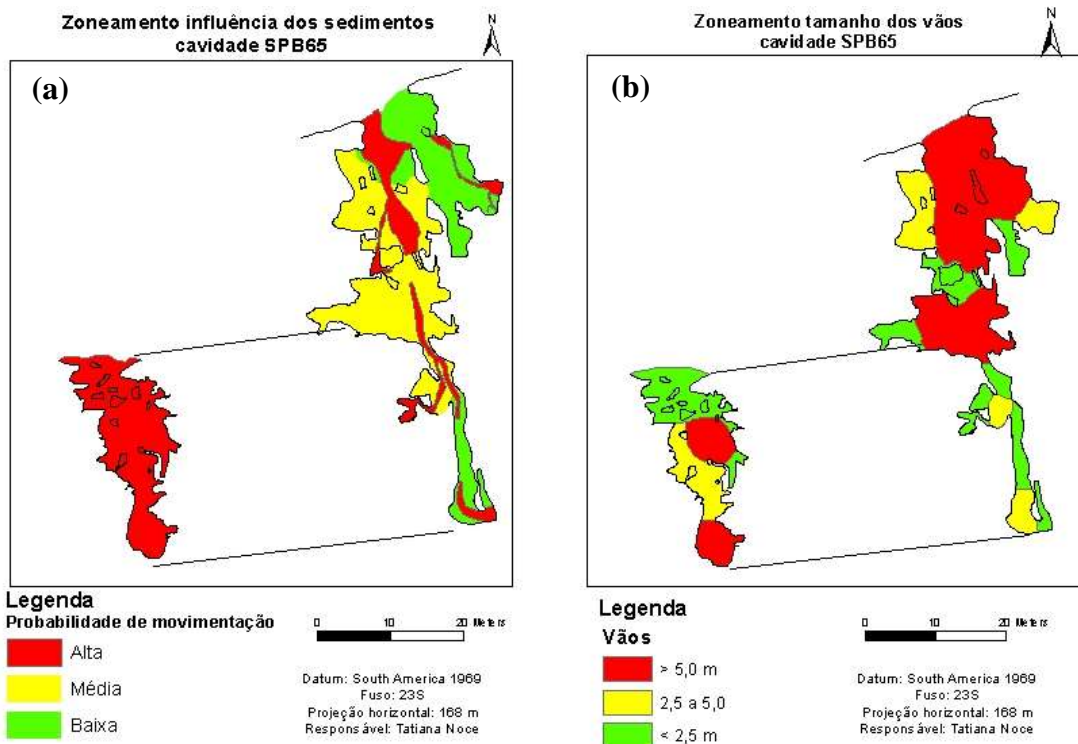
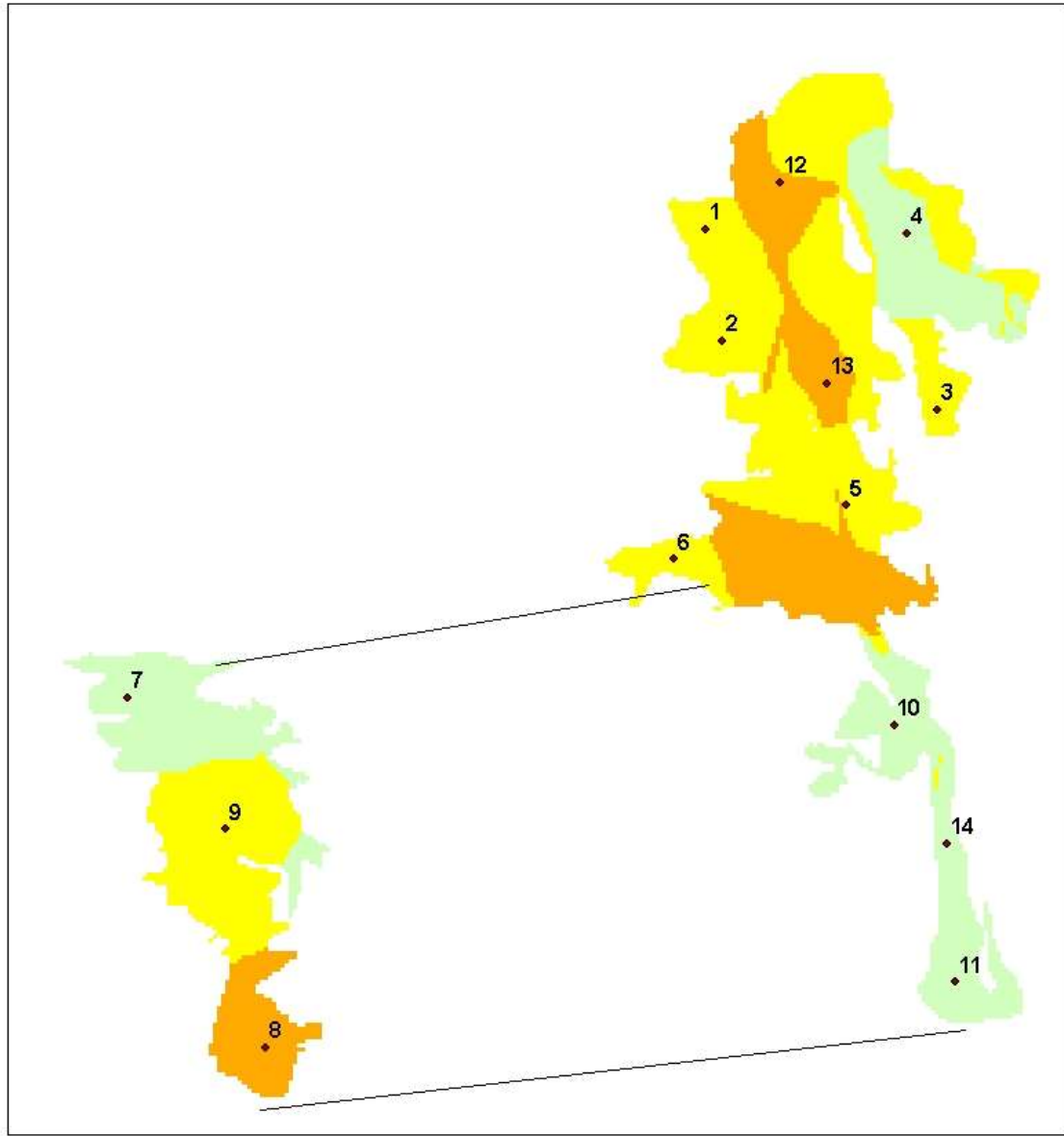


Figura 11.3 – a) Zoneamento da influência dos sedimentos; b) Zoneamento do tamanho dos vãos.

Zoneamento Geotécnico Cavidade SPB65



Legenda

• Pontos

Fragilidade geotécnica

-  Alta
-  Baixa
-  Média

Datum: South America 1969
Fuso: 23S
Projeção horizontal: 168 m
Responsável: Tatiana Noce

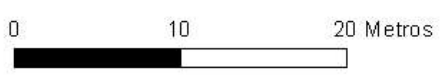


Figura 11.4 – Zoneamento geotécnico cavidade SPB65.

11.2 - Caverna SPB10

Nesta seção estão apresentados os mapas de acordo com cada aspecto geotécnico utilizado para o zoneamento de fragilidade da caverna SPB10 (Figura 11.5, Figura 11.6 e Figura 11.7). A Figura 11.5b apresenta os locais da galeria que apresentam sinais claros de instabilidades observados no campo. Nota-se que como se trata de uma caverna com pequenas dimensões, inteiramente inserida em canga, muitos dos aspectos analisados apresentam-se invariáveis ao longo da galeria.

O mapa contendo o zoneamento de fragilidade geotécnica da caverna está na Figura 11.8. As zonas de maior fragilidade observadas também são coincidentes com as regiões que apresentaram sinais de instabilidade durante os trabalhos de campo, assim como as que apresentam maior movimentação de sedimentos.

As regiões mais estáveis, por outro lado, foram as que apresentaram menor movimentação de sedimentos e menor dimensão dos vãos. Trata-se de uma caverna, no geral, mais estável do que a caverna SPB65, principalmente devido à melhor qualidade do maciço e suas dimensões reduzidas, além da ausência de água em seu interior.

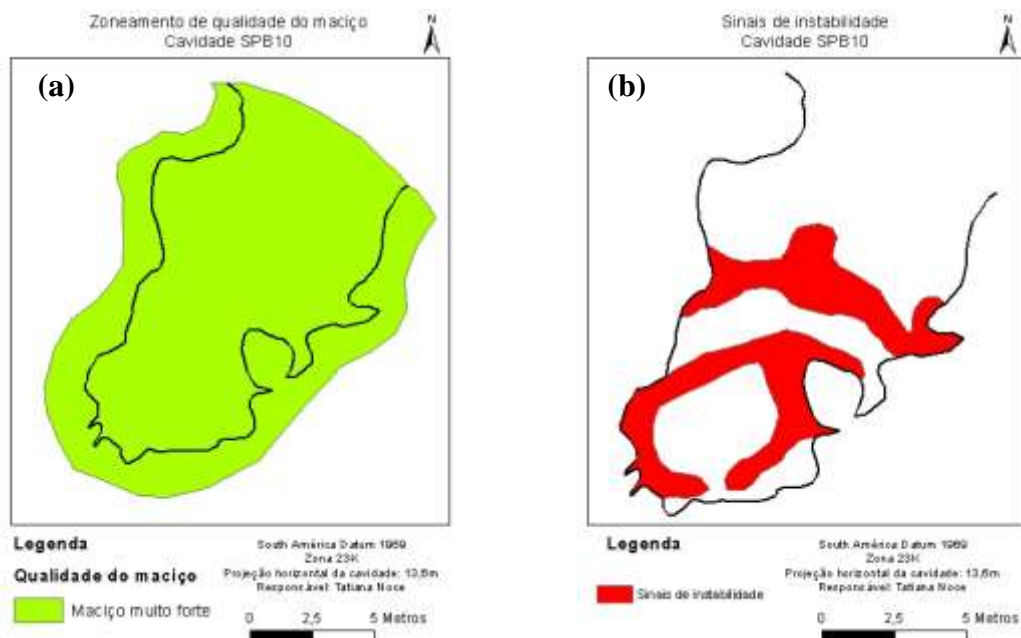


Figura 11.5 – a) Zoneamento de qualidade do maciço; b) Mapa da caverna SPB10 mostrando os sinais de instabilidade.

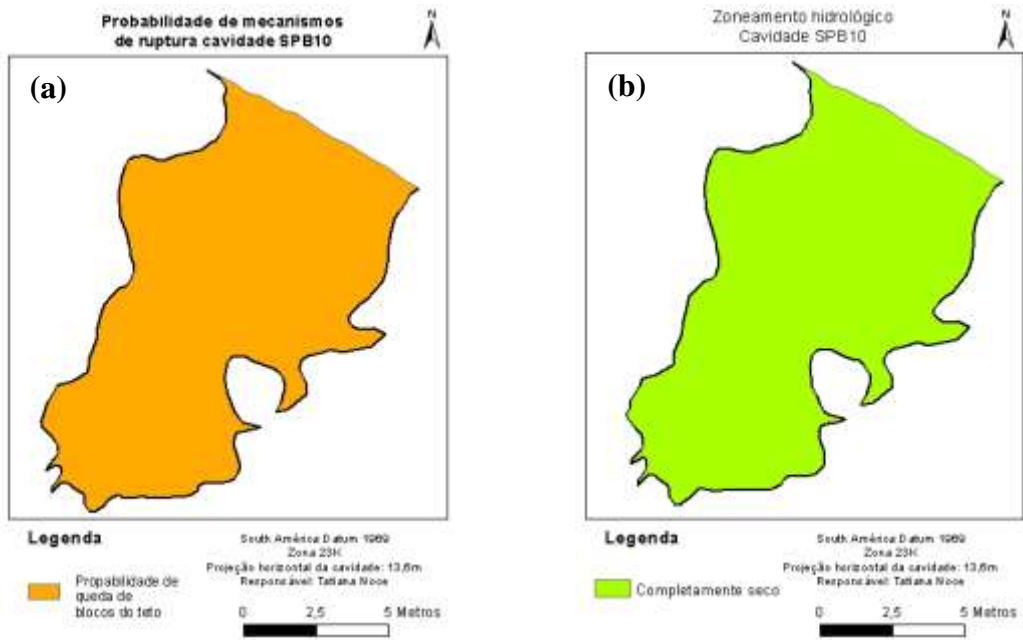


Figura 11.6 – a) Zoneamento de possíveis mecanismos de ruptura; b) Zoneamento da influência da água.

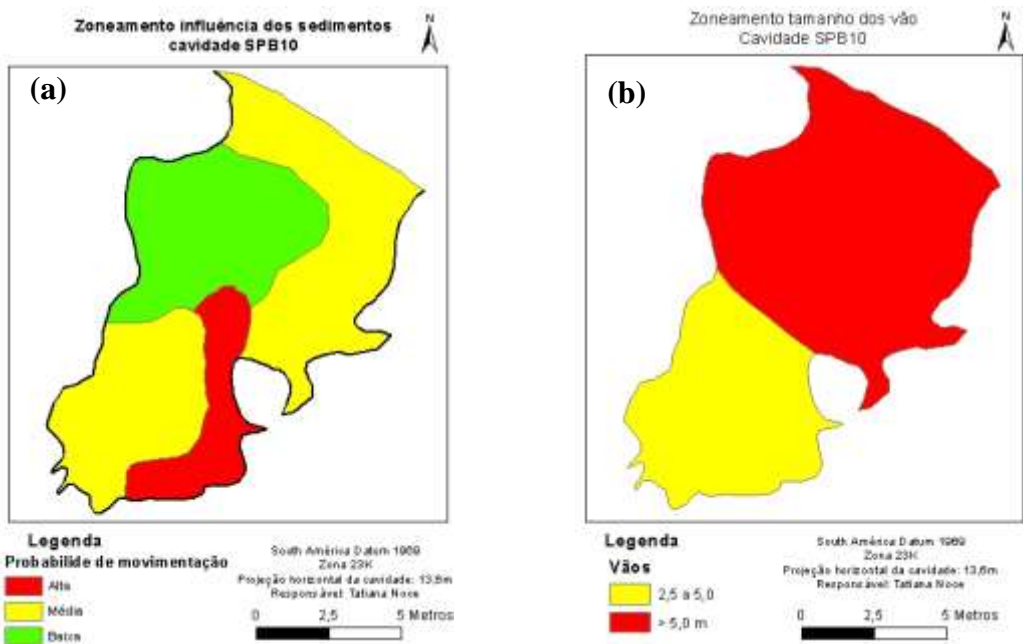


Figura 11.7 – a) Zoneamento da influência dos sedimentos; b) Zoneamento do tamanho dos vãos.

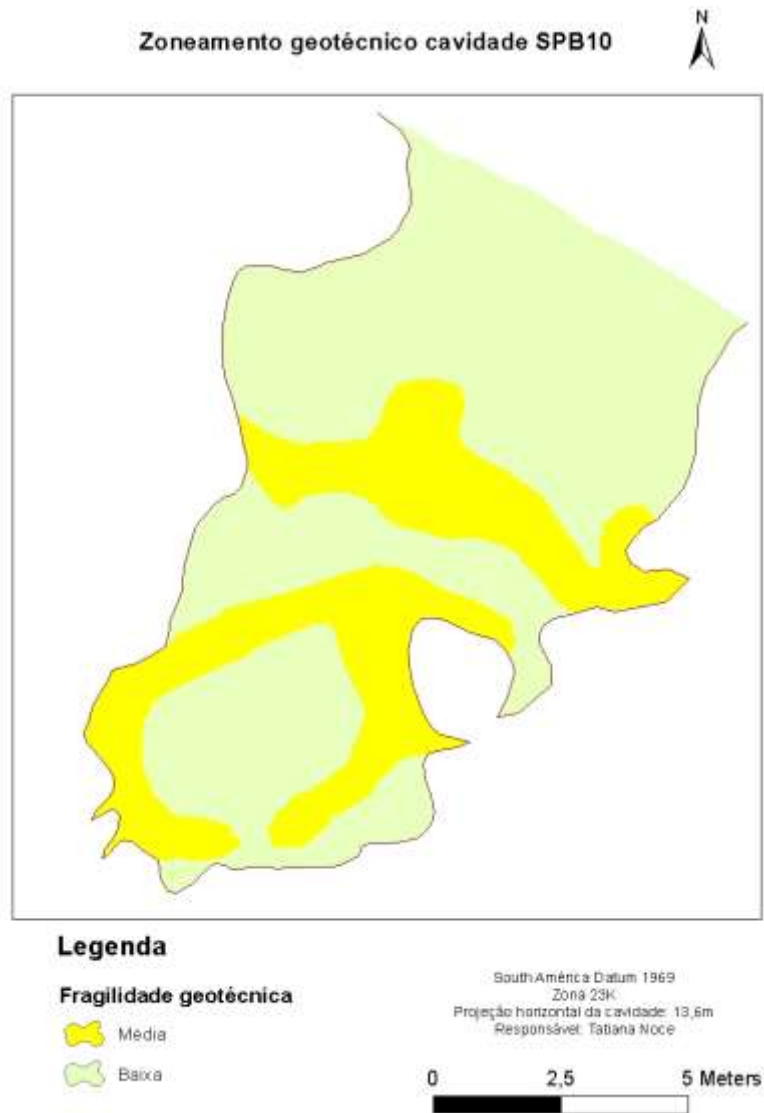


Figura 11.8 – Zoneamento geotécnico cavidade SPB10.

11.3 - Cavidade SPD10

Os mapas de zoneamento de acordo com cada aspecto utilizado para o zoneamento da fragilidade geotécnica da cavidade SPD10 estão nas Figura 11.9, Figura 11.10 e Figura 11.11. A Figura 11.9b mostra os locais da galeria que já apresentam sinais claros de instabilidades, dados principalmente pelas fraturas de alívio, abertas, presentes na carapaça de canga, além da zona de contato entre a canga e o itabirito.

O zoneamento geotécnico da cavidade está apresentado na Figura 11.12, onde se observa claramente que a maior fragilidade é coincidente com uma das áreas de instabilidades, composta pela zona de contato entre as duas litologias encaixantes da galeria.

A canga apresenta as zonas menos frágeis, explicadas, sobretudo, pelo maior índice RMI da rocha. O itabirito, por outro lado, apresenta zonas menos frágeis na porção mais distal da galeria, explicado pela baixa probabilidade de movimentação de sedimentos, menores dimensões dos vãos e índices RMIs intermediários.

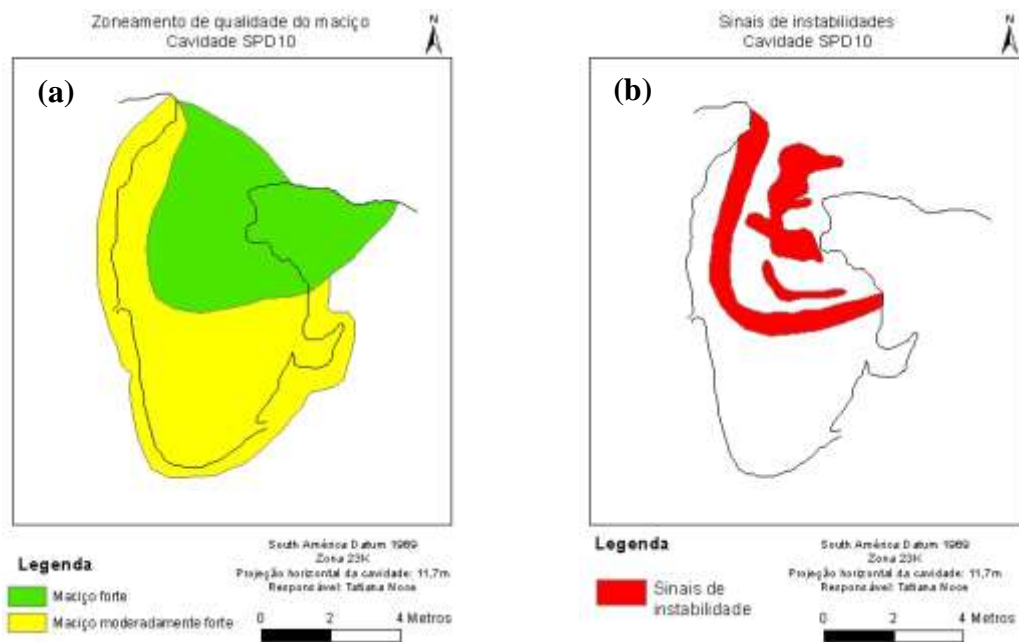


Figura 11.9 – a) Zoneamento de qualidade do maciço; b) Mapa da cavidade SPD10 mostrando os sinais de instabilidade

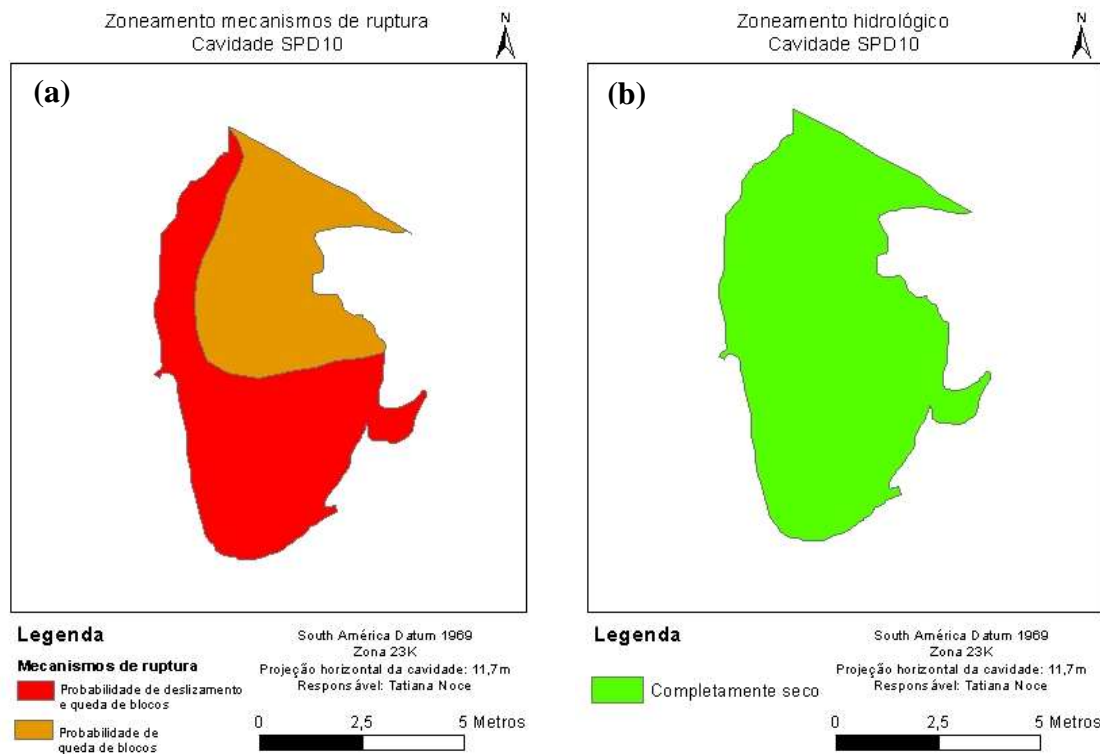


Figura 11.10 a) Zoneamento de possíveis mecanismos de ruptura; b) Zoneamento da influência da água.

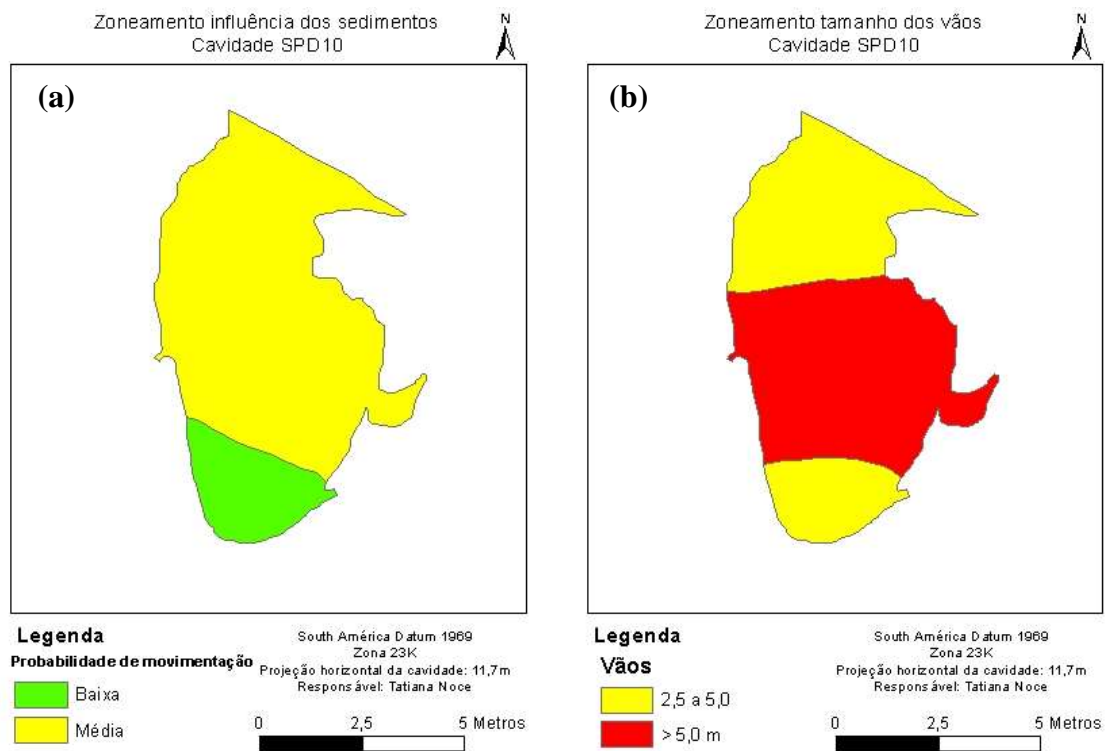


Figura 11.11 – a) Zoneamento da influência dos sedimentos; b) Zoneamento do tamanho dos vãos.

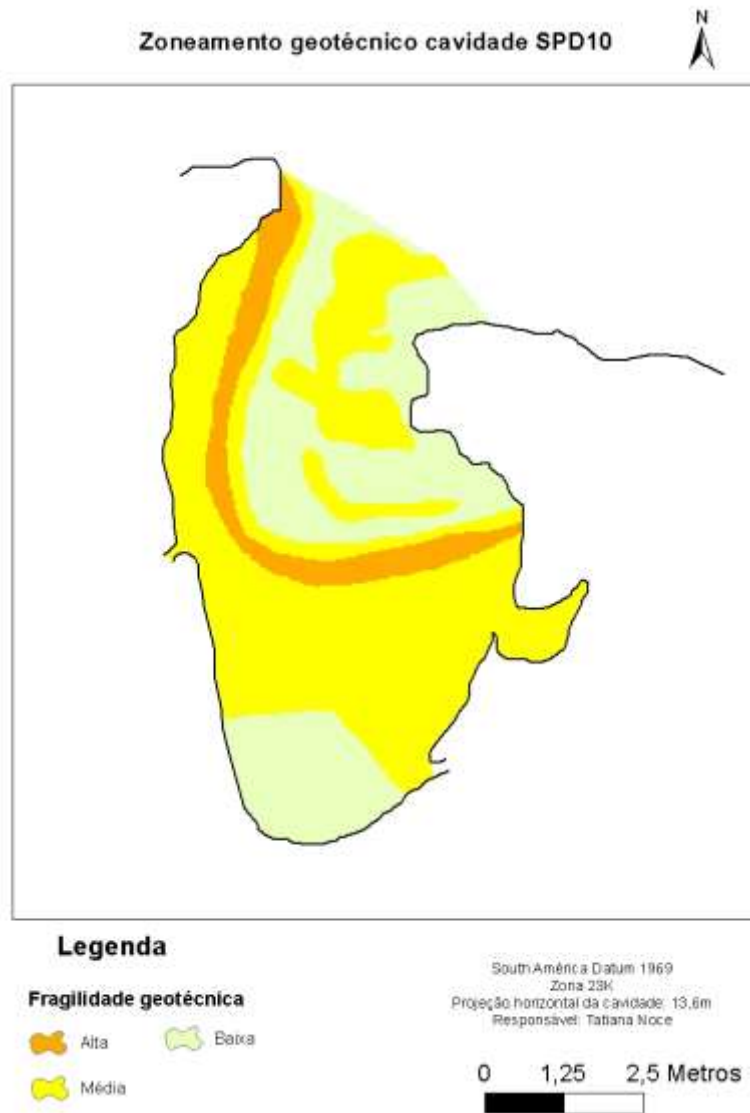


Figura 11.12 – Zoneamento da fragilidade geotécnica da cavidade SPD10.

11.4 - Cavidade SPD11

O zoneamento da qualidade do maciço que envolve a cavidade SPD11, as instabilidades observadas, as probabilidades de geração de mecanismos de ruptura, o zoneamento da influencia da água e dos sedimentos e o zoneamento das dimensões dos vãos estão apresentados nas Figura 11.13, Figura 11.14 e Figura 11.15.

Assim como nas demais cavidades, as zonas de maior fragilidade são relativamente coincidentes com as principais instabilidades observadas *in loco*. No geral, a cavidade SPD11 apresenta uma fragilidade geotécnica inferior às demais, principalmente nas porções inseridas em itabirito, que mostram um menor índice RM_i e maior probabilidade de ocorrência de mecanismos de ruptura. As porções próximas à zona de

contato e da entrada da galeria também apresentam baixas fragilidades, explicadas pelas características estruturais e de alteração da rocha. As zonas menos frágeis estão inseridas na canga, principalmente onde não existem fraturas de alívio com aberturas e continuidades consideráveis.

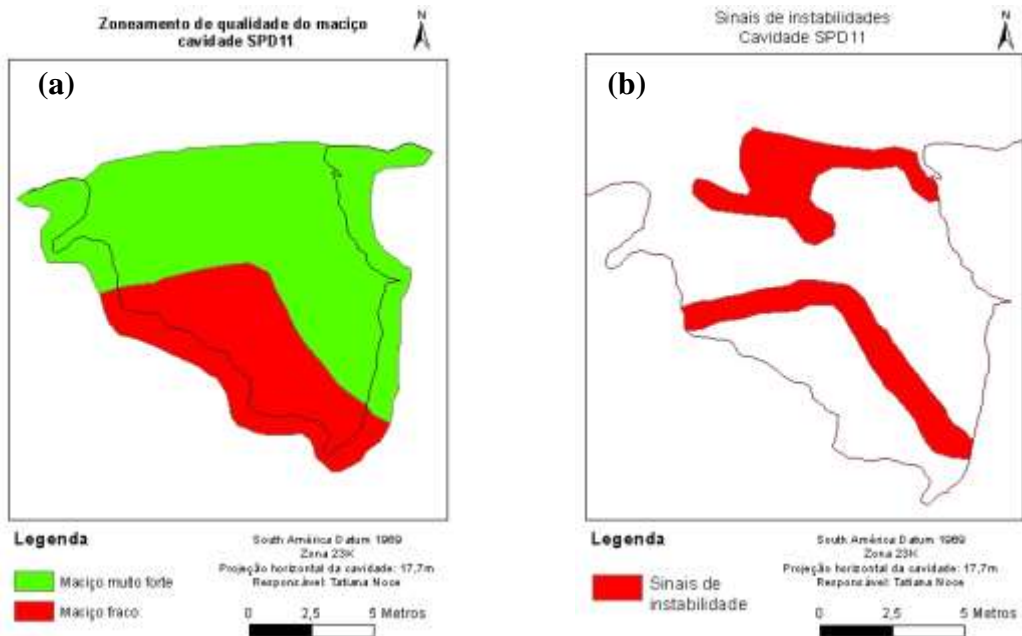


Figura 11.13 – a) Zoneamento de qualidade do maciço; b) Mapa da cavidade SPD11 mostrando os sinais de instabilidade

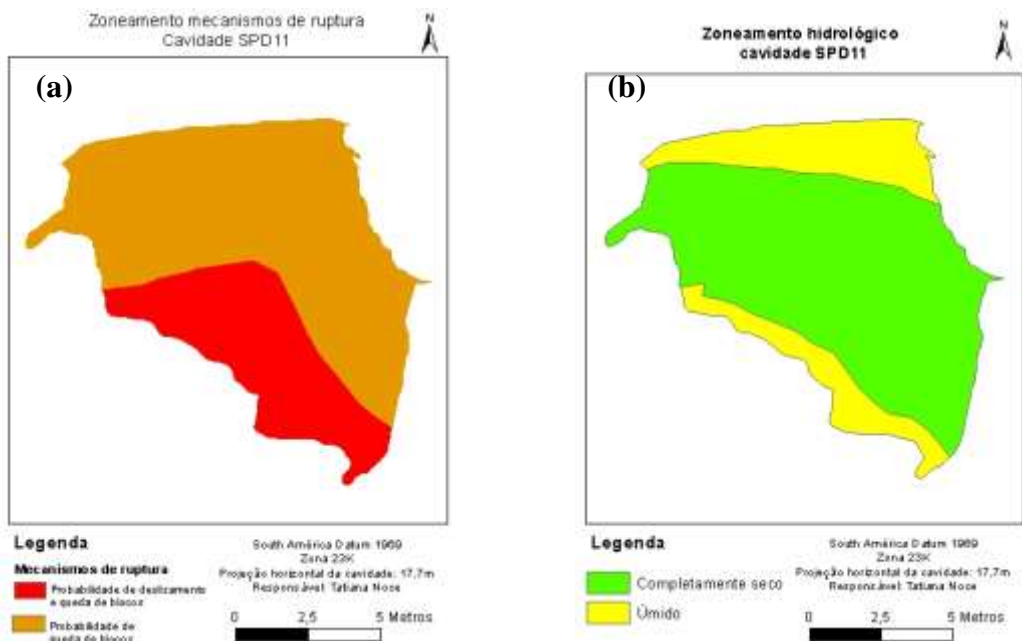


Figura 11.14 – a) Zoneamento de possíveis mecanismos de ruptura; b) Zoneamento da influência da água.

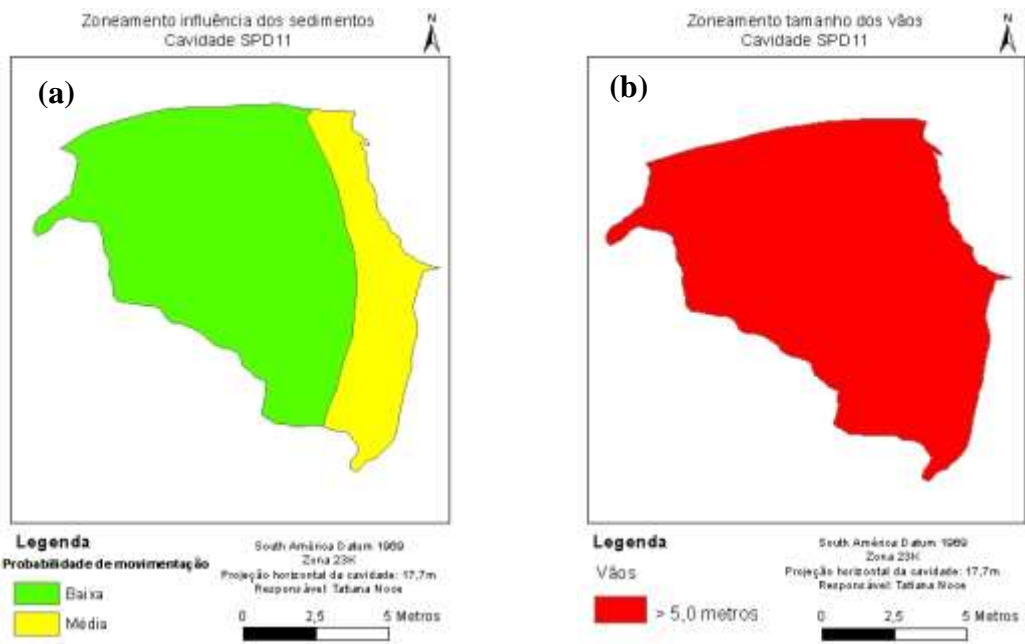


Figura 11.15 – a) Zoneamento da influência dos sedimentos; b) Zoneamento do tamanho dos vãos.

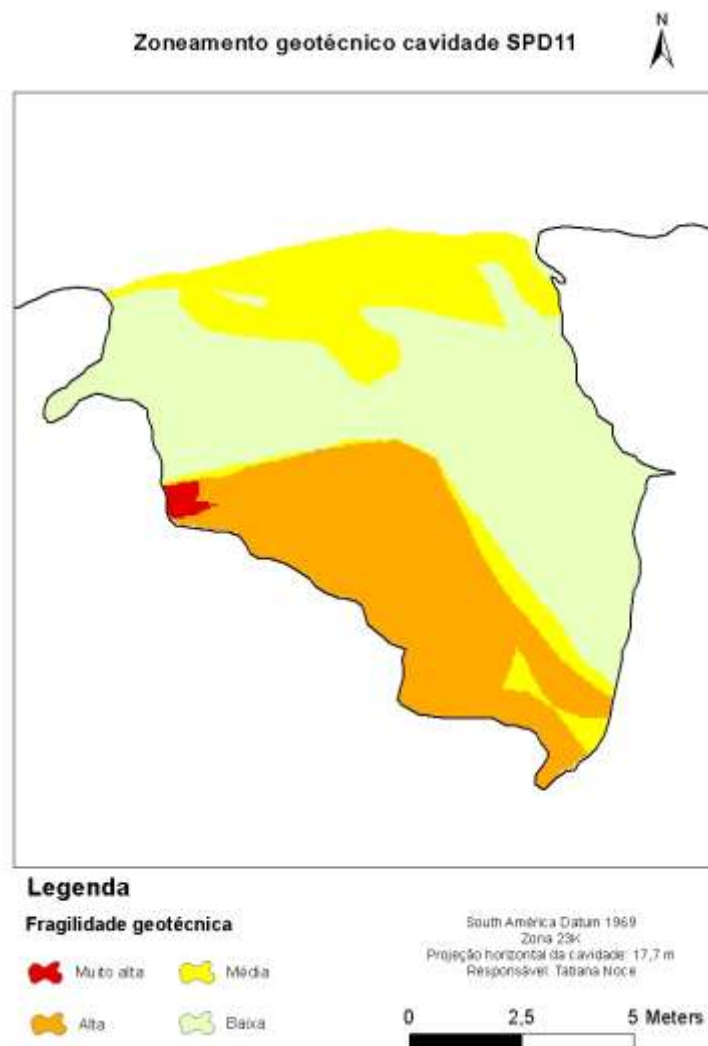


Figura 11.16 – Zoneamento da fragilidade geotécnica caverna SPD11.

12- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O zoneamento geotécnico das cavidades foi realizado com sucesso, indicando as zonas de maiores e menores fragilidades no interior de cada uma. Nota-se que os locais inseridos em formações ferríferas bandadas apresentam, no geral, baixa qualidade do maciço e fragilidade geotécnica relativamente alta em todas as cavidades, explicado pelo alto grau de fraturamento e alteração dessas rochas, além dos baixos valores de resistência a compressão uniaxial. Além disso, itabiritos com maiores concentrações de camadas silicáticas apresentam uma granulometria mais grosseira, resultando em uma maior porosidade, tornando-se conseqüentemente mais friável e menos coerente, indicando zonas de instabilidade com maior fragilidade geotécnica. Os locais inseridos em canga, por sua vez, apresentam no geral um baixo grau de fraturamento e alta coerência devido a cimentação, elevando a qualidade do maciço rochoso e gerando zonas de menor fragilidade geotécnica.

As cavidades estudadas apresentaram-se comumente com diversas zonas de alta fragilidade geotécnica, explicadas pelo próprio processo de formação das galerias. O alargamento dos condutos acaba instabilizando o teto e gerando fraturas de alívio com aberturas consideráveis, seguidas por deslocamentos, tanto na canga quanto no itabirito. Como se tratam, no geral, de cavidades com pequenas dimensões e grandes porções inseridas na zona fótica, elas também sofrem influência climática considerável, causando maiores variações de temperatura e umidade, e aumentando assim o processo de intemperismo e alteração em seu interior.

O zoneamento geotécnico foi realizado a partir do somatório de pontuações atribuídas a qualidade do maciço rochoso, aos sinais de instabilidade observados, aos prováveis mecanismos de ruptura, a influência da água, a influência da dinâmica dos sedimentos e a dimensão dos vãos livres, aspectos que foram considerados principais a partir da caracterização de cada galeria.

O sistema Rock Mass Index (RMi) foi o que se mostrou mais aplicável, por se tratar de um sistema mais atual, que envolve mais parâmetros quantitativos, além de dar mais atenção à resistência a compressão uniaxial da rocha (σ_c), parâmetro considerado fundamental na análise da qualidade de um maciço. Outra vantagem desse sistema é a sua variação mesmo em ambientes pequenos, conforme observado nas cavidades

SPD10 e SPD11.

Em todas as cavidades as maiores fragilidades foram coincidentes com os locais onde foram observados sinais claros de instabilidades durante os trabalhos de campo. Esses locais são dados principalmente pelas fraturas de alívio presentes na carapaça de canga, além da zona de contato entre a canga e o itabirito. Em seguida, as zonas mais frágeis são as inseridas nos itabiritos, devido ao menor índice R_{Mi} dessas rochas. As zonas menos frágeis são as inseridas na canga, nos locais onde não foram observadas fraturas de alívio.

Observou-se que as maiores instabilidades e fragilidades foram, em sua maioria, coincidentes com o próprio processo de evolução das galerias, dado, sobretudo pela lixiviação do substrato de itabirito friável no contato deste com a canga, além do colapso dos blocos de canga a partir das juntas de alívio. Assim, a cavidade SPD11 apresentou-se mais instável que as demais, explicado pelo seu estágio mais avançado de formação.

Todas as galerias apresentam abatimentos relativamente recentes advindos ou da canga ou do itabirito, sendo estes processos comuns, independente de intervenções antrópicas próximas, uma vez que constituem os processos de evolução natural desse tipo de cavidade. Possivelmente, uma intervenção na área da cavidade poderia causar a reativação precoce desses processos.

O presente estudo trata do passo inicial para futuros monitoramentos de cavidades naturais de modo a definir seu real raio de influência. Para subsidiar esse tipo de estudo, é fundamental o monitoramento contínuo de cavidades que tenham permissão de redução do raio de influência ou mesmo de supressão. Assim, é possível obter uma maior aplicabilidade, além de uma melhor definição da pontuação e classes de fragilidade sugeridas. Por se tratar de uma análise apenas comparativa e qualitativa são necessários outros estudos mais detalhados de zoneamento para a definição de uma escala de pontuação mais quantitativa e objetiva, com diversos estudos de casos em cavidades inseridas em ambientes diferentes. Estudos dessa magnitude poderiam gerar parâmetros replicáveis para vários ambientes, auxiliando na preservação efetiva do patrimônio espeleológico, além do máximo aproveitamento econômico de jazidas

minerais.

REFERÊNCIAS

- AQUINO, I. B. **Retrospectiva da Legislação Espeleológica Brasileira**. 2011. 69f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Minas) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.
- ALKMIM, F. F. de ; MARSHAK, S. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, v. 90, n.1-2, p.29-58, jun. 1998.
- AULER, A. S. O legado espeleológico de George Simmons. **Revista O Carste**, Belo Horizonte, MG, v. 17, n. 3, p. 73 – 77, 2005.
- AULER, A. S.; PILÓ, L. B. Introdução às cavernas em minério de ferro e canga. **Revista O Carste**, Belo Horizonte, MG, v. 17, n. 3, p. 70-72, 2005.
- AULER, A. S. *et al.* **Projeto Gogo – Espeleologia: Diagnóstico e Análise de Relevância**: relatório técnico. Belo Horizonte: Carste Consultores Associados Ltda, 2012.
- AULER, A. et al. Hypogene cave patterns in iron ore caves: convergence of forms or processes? **Karst Waters Institute. Special Publication**, Leesburg, Virgínia, v. 18, p. 15-19, 2014.
- AYDIN, A.; BASU, A. The Schmidt hammer in rock material characterization. **Engineering Geology**. v. 81, p.1 –14, 2005.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of rock support. **Rock Mechanics and Rock Engineerin**, Vienna, v. 6, p. 189-236, 1974.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering**. Canada, 1989. 251p.
- BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. **Rock Mechanics for underground mining**. 3rd ed. .Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2005, 647p.
- BRANDI, I.; BARBOSA, M.; GUIMARÃES, R.. Uso do esclerômetro de Schmidt na avaliação da resistência geomecânica de cavidades naturais subterrâneas em terrenos ferríferos, Carajás- PA. In: RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2015. Eldorado, SP. **Anais...** Campinas: SBE, 2015. p.627-634. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_627-634.pdf>. Acesso em: 24 abr 2015.
- BRANDI, I; BARBOSA, M.; CALUX, A.; ARAUJO, R.N.. Geotecnia aplicada à previsibilidade de impactos na integridade física de cavidades naturais subterrâneas, Carajás - PA. In: RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (orgs.) CONGRESSO

- BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2015. Eldorado. **Anais...** Campinas: SBE, 2015. p.533-541. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_533-541.pdf>. Acesso em: 16 jun 2016.
- BROCH, E., FRANKLIN, J.A. Point-load strength test. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** v. 9, n.6, p. 669–697, 1972.
- BRASIL. **Constituição (1988)**. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado, 1988. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaocompilado.htm. Acesso em: 30 abr. 2015.
- BRASIL. Decreto nº 99.556, de 1 de outubro de 1990. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional, e dá outras providências. Brasília, DF, 1 de outubro de 1990. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1990-1994/D99556.htm>. Acesso em: 30 abr. 2015.
- BRASIL. Decreto no 6.640, de 7 de novembro de 2008. Dá nova redação aos arts. 1o, 2o, 3o, 4o e 5º e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto nº 99.556, de 1 de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Brasília, DF, 7 de novembro de 2008. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ Ato2007-2010/2008/Decreto/D6640.htm. Acesso em: 30 abr. 2015.
- CAVALCANTI, J. A. D. **Mineralização aurífera de Lajes Antônio Dias, Ouro Preto – MG, Controles litoestratigráficos e estruturais**. 1999. 125f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1999.
- CHAU, K. T.; WONG, R. H. C. Uniaxial Compressive Strength and Point Load Strength of Rocks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 33, n. 2, p. 183 – 188, 1996.
- COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero, integração e correção cartográfica em SIG**. Minas Gerais: CODEMIG, 2005. Disponível em <http://www.codemig.com.br/site/content/home/download.asp>. Acessado em 21 jun 2013
- ENDO, I.; FONSECA, M. A. Sistema de Cisalhamento Fundão Cambotas no Quadrilátero Ferrífero, MG: geometria e cinemática. **REM - Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, MG, v. 45 1/2, p. 15-17, 1992.
- DEERE, D. U. Geological considerations. In: STAGG, R. G.; ZIENKIEWICZ, D. C. **Rock Mechanics in Engineering Practice**. New York, 1968. p. 1-20.
- DORR, J. V. N. **Physiographic, Stratigraphic and Estructural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. Geological Survey Professional

Paper, 641p, 1969.

DUTRA, G.. Síntese dos processos de gênese de cavidades em litologias de ferro. In: RASTEIRO, M. A.; MORATO, L. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 32, 2013. Barreiras, BA. **Anais...** Campinas: SBE, 2013. p. 415-426. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais32cbe/32cbe_415-426.pdf>. Acesso em: 12 jan 2015.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: EMBRAPA. Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 9 jun. 2015.

FERREIRA Q. C. G.; BACELLAR L. A. P. Avaliação preliminar das condições hidrogeológicas na área do município de Ouro Preto, MG. **Geonomos**, Belo Horizonte, MG, v. 18, n. 1, p. 13 – 21, 2010.

FRANKLIN, J. A. Suggested method for determining point load strength. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 22, n. 2, p. 51-60, 1985.

GENIS, M.; COLAK B. Stability Assessment of the Gokgol Karstic Cave (Zonguldak, Turkey) by Analytical and Numerical Methods. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 48, p. 2383-2403, 2015.

ISRM, 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, 1981.

ISRM, 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, 1978.

ISRM, International Society for Rock Mechanics. Suggested Method for Point Load Strength . **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 325, n. 89, p. 53-60, 2007.

KAHRAMAN, S. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 38, p. 981-994, 2001.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. Resolução CONAMA n° 009, de 24 de janeiro 1986. Dispõe sobre a criação de Comissão Especial para estudos do Patrimônio Espeleológico. Diário Oficial da União, 7 de abril de 1986. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=32>. Acesso em: 30abr. 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. Resolução CONAMA n° 005, de 06 de agosto 1987. Dispõe sobre o Programa Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeleológico, e dá outras providências. Diário Oficial da União, 22 de outubro de 1987. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=56> . Acesso em: 30abr. 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. Resolução CONAMA n° 347, de 10 de setembro 2004. Dispõe sobre a proteção do Patrimônio Espeleológico. Diário Oficial da União, 13 de setembro de 2004. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=452>> . Acesso em: 30abr. 2015.

MUNARO, P. Estudo espeleológico comparativo em cavidades naturais subterrâneas, impactadas e antrópicas em formações ferríferas. In: RASTEIRO, M. A.; MOSS, D. F.; PONTES, F. S.(orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 31, 2011. Ponta Grossa, PR. **Anais...** Campinas: SBE, 2011. p. 507-502. Disponível em: <http://www.sbe.com.br/anais31cbe/31cbe_507-514.pdf>. Acesso em: 22 set 2014.

NALINI, H. A. *et al.* Sobre a geologia estrutural do Anticlinal de Mariana, região sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais – Uma revisão. **REM - Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 45 1/2, p. 18 – 20, 1992.

OLIVEIRA, O. A. B. *et al.* Aspectos geológicos relacionados às cavernas no Quadrilátero Ferrífero – MG. In: RASTEIRO, M. A.; MOSS, D. F.; PONTES, F. S.(orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 31, 2011. Ponta Grossa, PR. **Anais...** Campinas: SBE, 2011. p. 103 - 109. Disponível em: <http://www.sbe.com.br/anais31cbe/31cbe_103-109.pdf>. Acesso em: 12 jan 2015.

OLIVEIRA, O, A. B. Caracterização da unidade espeleológica e das unidades geomorfológicas da região do Quadrilátero Ferrífero – MG. **Revista Espeleo-Tema**, Campinas, SP, v.22, n. 1, 2011.

PALMSTROM, A. The volumetric joint count – a useful and simple measure of the degree of jointing. In IV CONGRESS INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 1982, New Delhi. **Proceedings...** IAEG, 1982. p.221-228.

PALMSTROM, A. RMi – a system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering. **Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology**, Oslo, Norway, v. 1, n. 2, p. 69-108, 1996.

PALMSTROM, A. Characterizing rock masses by the RMi for use in Practical Rock Engineering. Part 1: The development of the Rock Mass Index (RMi). **Tunnelling and Underground Space Technology**, Great Britain, v. 11, n. 2, p. 175-188, 1996.

PARKER, C.W. *et al.* Microbial iron cycling and biospeleogenesis: cave development in the Carajás Formation, Brazil. In: 16 International Congress of Speleology, 2013, Czech Republic, Brno. **Proceedings...** Prague, 2013. p. 442-446.

PEREIRA, M. C. **Aspectos genéticos e morfológicos das cavidades naturais da Serra da Piedade – Quadrilátero Ferrífero, MG.** 2012. 150f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2012.

- PILÓ, L. B.; AULER, A. Cavernas em minério de ferro e canga de Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero, MG. **Revista O Carste**, Belo Horizonte, MG, v. 17, n. 3, p. 92-105, 2005.
- PILO, L. B.; AULER, A. Geospeleologia das cavernas em rochas ferríferas da região de Carajás, Pa. In: RASTEIRO, M. A.; SARMENTO, L. S.(orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30, 2009. Montes Claros, MG. **Anais...** Campinas: SBE, 2009. p. 181 - 186. Disponível em: <http://cavernas.org.br/anais30cbe/30cbe_181-186.pdf>. Acesso em: 12 jan 2015.
- PILÓ, L. B. et al. Geospeleologia em rochas ferríferas: Cenário atual e conservação. In: CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y. **Geossistemas Ferruginosos do Brasil**. Belo Horizonte, 2015. p. 125-148.
- PRIEST, S. D.; HUDSON, J. A. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scan line surveys. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 18, p. 183- 197, 1976.
- SERRA, E. J.; OJIMA, L. M. Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos. In: SANTOS, A. M.; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. cap. 13, p. 211-226.
- SZUNYOGH, G. Stability Assessment of Caves and its Results. **Óbuda University e Bulletin**, v.1, n.1, p.243-252, 2010.
- TIMO, M. B. *et al.* **Relatório de topografia e geospeleologia de cavidades naturais subterrâneas situadas na área do Projeto GOGO – Mariana – MG**. Relatório técnico. Belo Horizonte: Spelayon Consultoria, 2014.
- VALENTIM, R. F.; OLIVITO, J. P. R. Unidade espeleológica carajás: Delimitação dos enfoques regional e local, conforme metodologia da IN-02/2009 MMA. **Revista Espeleo-tema**, Campinas, SP, v. 22, n. 1, p. 41-60, 2011.

**ANEXO I – PADRONIZAÇÕES SISTEMAS DE
CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA**

Tabela A.1 – Pesos relativos ao parâmetro de resistência a compressão uniaxial segundo a classificação geomecânica RMR. Fonte: adaptado de Bieniawski (1989)

Parâmetro		Intervalo de variação de valores						
Resistência do material rochoso intacto	Ensaio de carga pontual (MPa)	> 10	4 a 10	2 a 4	1 a 2	Aconselha-se o uso do ensaio de resistência a compressão uniaxial		
	Resistência a Compressão Uniaxial (MPa)	> 250	100 a 250	50 a 100	25 a 50	5 a 25	1 a 5	< 1
Peso		15	12	7	4	2	1	0

Tabela A.2 – Pesos relativos ao parâmetro RQD segundo a classificação geomecânica RMR. Fonte: adaptado de Bieniawski (1989)

Parâmetro		Intervalo de variação de valores				
RQD (%)		90 a 100	75 a 90	50 a 75	25 a 50	<25
Peso		20	17	13	8	3

Tabela A.3 – Pesos relativos as condições das descontinuidades segundo a classificação geomecânica RMR. Fonte: adaptado de Bieniawski (1989).

		Intervalo de variação de valores				
Espaçamento das descontinuidades (m)		> 2	0,6 a 2	0,2 a 0,6	0,06 a 0,2	< 0,6
Peso		20	15	10	8	5
Comprimento / persistência (m)		< 1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	> 20
Peso		6	4	2	1	0
Abertura (mm)		Nenhuma	< 0,1	0,1 a 1	1 a 5	> 5
Peso		6	5	4	1	0
Rugosidade		Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Macio	Liso
Peso		6	5	3	1	0
Enchimento		Nenhum	Enchimento duro < 5mm	Enchimento duro > 5mm	Enchimento mole < 5mm	Enchimento mole > 5mm
Peso		6	4	2	2	0
Grau de alteração		Inalterado	Ligeiramente alterado	Moderadamente alterado	Muito alterado	Decomposto
Peso		6	5	3	1	0

Tabela A.4 – Pesos relativos às condições hidrogeológicas segundo a classificação geomecânica RMR. Fonte: adaptado de Bieniawski (1989).

Parâmetro		Intervalo de variação de valores				
Água Subterrânea	Caudal por 10m de túnel (l/m)	Nenhum	< 10	10 a 25	25 a 125	> 125
	Pressão de água nas diaclases, tensão principal máxima	0	< 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,5	> 0,5

Parâmetro	Intervalo de variação de valores					
	Condições gerais	Completamente seco	Ligeiramente úmido	Úmido	Gotejante	Fluente
Peso		15	10	7	4	0

Tabela A. 5 - Índice Jn do Sistema Q. Fonte: adaptado de Barton *et al.* 1974.

Condições de compartimentação do maciço	Valores de Jn
Descontinuidades aleatórias ou ausentes	0,5 a 1
Uma família de descontinuidades	2
Uma família mais descontinuidades aleatórias	3
Duas famílias de descontinuidades	4
Duas famílias mais descontinuidades aleatórias	6
Três famílias de descontinuidades	9
Três famílias mais descontinuidades aleatórias	12
Quatro ou mais famílias de descontinuidades	15
Rocha completamente fragmentada	20

Tabela A.6 – Índice Jr do Sistema Q. Fonte: adaptado de Barton *et al.* 1974.

(a) - Descontinuidades sem deslocamento relativo.

(b) - Descontinuidades com deslocamento relativo < 10cm.

Condições das descontinuidades	Jr
A - Superfície rugosa descontínua	4
B - Superfície rugosa ondulada	3
C/D - Superfície lisa ondulada	2
E - Superfície rugosa plana	1,5
F - Superfície lisa plana	1
G - Superfície estriada plana	0,5
(c) - Descontinuidades com deslocamento relativo >10cm. Sem contato rocha-rocha entre as paredes.	
H - Preenchida com minerais argilosos	1
I - Preenchida por areia, cascalho ou zonas esmagadas	1

Tabela A.7 – Índice Ja do Sistema Q. Fonte: adaptado de Barton *et al.* 1974.

(a) - Descontinuidades sem deslocamento relativo. Contato rocha-rocha entre as paredes das descontinuidades.

Condição de alteração das paredes	Já	φr (graus)
A - Paredes duras, compactas, preenchimento com materiais impermeáveis	0,75	
B - Paredes sem alteração, pigmentação superficial incipiente	1	25 - 35
C - Paredes levemente alteradas, preenchimento com materiais abrasivos	2	25 - 30
D - Paredes com películas siltosas ou areno-argilosas	3	20 - 25
E - Paredes com películas de materiais moles ou com baixo ângulo de atrito e pequena quantidade de minerais expansivos.	4	8 - 16
(b) - Descontinuidades com deslocamento relativo <10cm. Contato rocha-rocha entre as paredes das descontinuidades.		
F - Paredes com partículas de areia, sem argila	4	25 - 30
G - Descontinuidades com preenchimento argiloso bem consolidado	6	16 - 24
H - Descontinuidades com preenchimento argiloso pouco consolidado	8	12 - 16
I - Descontinuidades com preenchimento argiloso expansivo.	8 - 12	6 - 12
(c) - Descontinuidades com deslocamento relativo >10cm. Não há contato entre as paredes das descontinuidades.		
J - Zonas com rochas desintegradas ou fragmentadas com argila.	6-8 ou 8-12	6 - 24
K - Zonas siltosas ou areno-argilosas com pequenas frações de argila	5	

Tabela A.8 – Índice J_w do Sistema Q. Fonte: adaptado de Barton *et al.* 1974.

Condição	Pressão da água (MPa)	J_w
A - Escavação seca ou com pequena influência de água	< 0,1	1
B - Influência média de água com eventual carreamento do preenchimento	0,1 - 0,25	0,66
C - Influência elevada de água em rochas competentes com descontinuidades não preenchidas	0,25 - 1	0,5
D - Influência elevada de água com carreamento significativo do preenchimento	0,25 - 1	0,33
E - Influência excepcionalmente elevada de água (ou jatos de pressão), com decaimento com o tempo	>1	0,2 - 0,1
F - Influência excepcionalmente elevada de água (ou jatos de pressão), sem decaimento com o tempo	>1	0,1 - 0,05

Tabela A.9 – Índice SRF do Sistema Q. Fonte: adaptado de Barton *et al.* 1974.

Condição	SRF
(a) Zonas de fraqueza intersectando as escavações, o que pode causar a decompressão do maciço rochoso durante a abertura	
A - Zonas de fraqueza frequentes contendo argila ou rocha decomposta quimicamente; maciço rochoso envolvente muito descomprimido (todas as profundidades)	10
B - Zonas de fraqueza individuais contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades da escavação ≤ 50 m)	5
C - Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades da escavação > 50 m)	2,5
D - Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)	7,5
E - Zonas individuais de corte em rocha competente, sem argila (profundidades da escavação ≤ 50 m)	5
F - Zonas individuais de corte em rocha rígida, sem argila (profundidades da escavação > 50 m)	2,5
G - Juntas abertas, rocha muito fracturada e descomprimida (todas as profundidades)	5
(b) Rocha competente, problemas de tensões na rocha	
H - Tensões baixas, próximo da superfície	2,5
I - Tensões médias	1
J - Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade; pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	5 - 2
L - Explosões moderadas de rochas (rocha maciça)	5-10
M - Explosões intensas de rochas (rocha maciça)	10-20
(c) Rocha esmagada: plastificação de rochas incompetentes sob a influência de altas pressões de rocha	
N - Pressão moderada da rocha esmagada	5-10
O - Pressão elevada da rocha esmagada	10-20
(d) Rochas expansivas: actividade química expansiva devida à presença da água	
P - Pressão de expansão moderada	5-10
Q - Pressão de expansão elevada	10-20

Tabela A. 10 – Classificação do tamanho e continuidade das descontinuidades (jL). Fonte: Adaptado de Palmstrom (1996).

Comprimento da descontinuidade (m)	Termo	jL	
		Descontinuidades contínuas	Descontinuidades descontínuas
< 0,5	Muito curta	3	6
0,1 - 1	Curta	2	4
1 - 10	Média	1	2
10 - 30	Comprida	0,75	1,5
> 30	Muito comprida	0,5	1

Tabela A. 11- Classificação da rugosidade das juntas (jR). Fonte: Adaptado de Palmstrom 1996.

Pequena escala	Larga escala				
	Planar	Levemente onduladas	Fortemente onduladas	Em degraus	Intertravado
Muito rugosa	3	4	6	7,5	9
Rugosa	2	3	4	5	6
Levemente rugosa	1,5	2	3	4	4,5
suave	1	1,5	2	2,5	3
polida	0,75	1	1,5	2	2,5
Estrias de fricção*	0,6 - 1,5	1 - 2	1,5 - 3	2 - 4	2,5 - 5

Para juntas preenchidas: jR=1

* Para estrias de fricção, o valor de jR depende do grau de evidência das estrias. O maior valor ocorre quanto maior a evidência.

Tabela A. 12 – Classificação do fator de alteração das juntas (jA). Fonte: Adaptado de Bieniawski 1973 apud Palmstrom 1996.

A. Contato rocha-rocha entre as paredes das descontinuidades.			
Termo	Descrição	jA	
Descontinuidades em preenchimento			
Sem abertura/"soldado"	Descontinuidade sem preenchimento ou totalmente selada por material impermeável.	0,75	
Paredes sem alteração	Descontinuidades sem nenhum tipo de preenchimento.	1	
Alteração das paredes			
1. Alterado	As superfícies das descontinuidades encontram-se mais alteradas que a rocha intacta.	2	
2. Muito alterado	As superfícies das descontinuidades encontram-se muito mais alteradas que a rocha intacta.	4	
Descontinuidades com preenchimento pouco espesso			
Areia, silte, calcita, etc...	Revestimento áspero sem argila	3	
Lama, clorita, talco, etc...	Revestimento mole	4	
B. Descontinuidades sem contato rocha-rocha entre as paredes.			
Material de preenchimento	Descrição	Contato parcial entre as paredes das descontinuidades	Sem contato entre as paredes das descontinuidades

Areia, silte, calcita, etc...	Descontinuidades com preenchimento duro sem argila	4	8
Lama compactada	Descontinuidades com preenchimento mole compactado.	6	10
Lama não compactada	Descontinuidades com preenchimento mole não compactado.	8	12
Lama expansiva	Descontinuidades com preenchimento argiloso expansivo	8 - 12	12 - 20

**ANEXO II – MAPAS, PERFIS E CORTES BASE
CAVIDADES SELEZIONADAS**

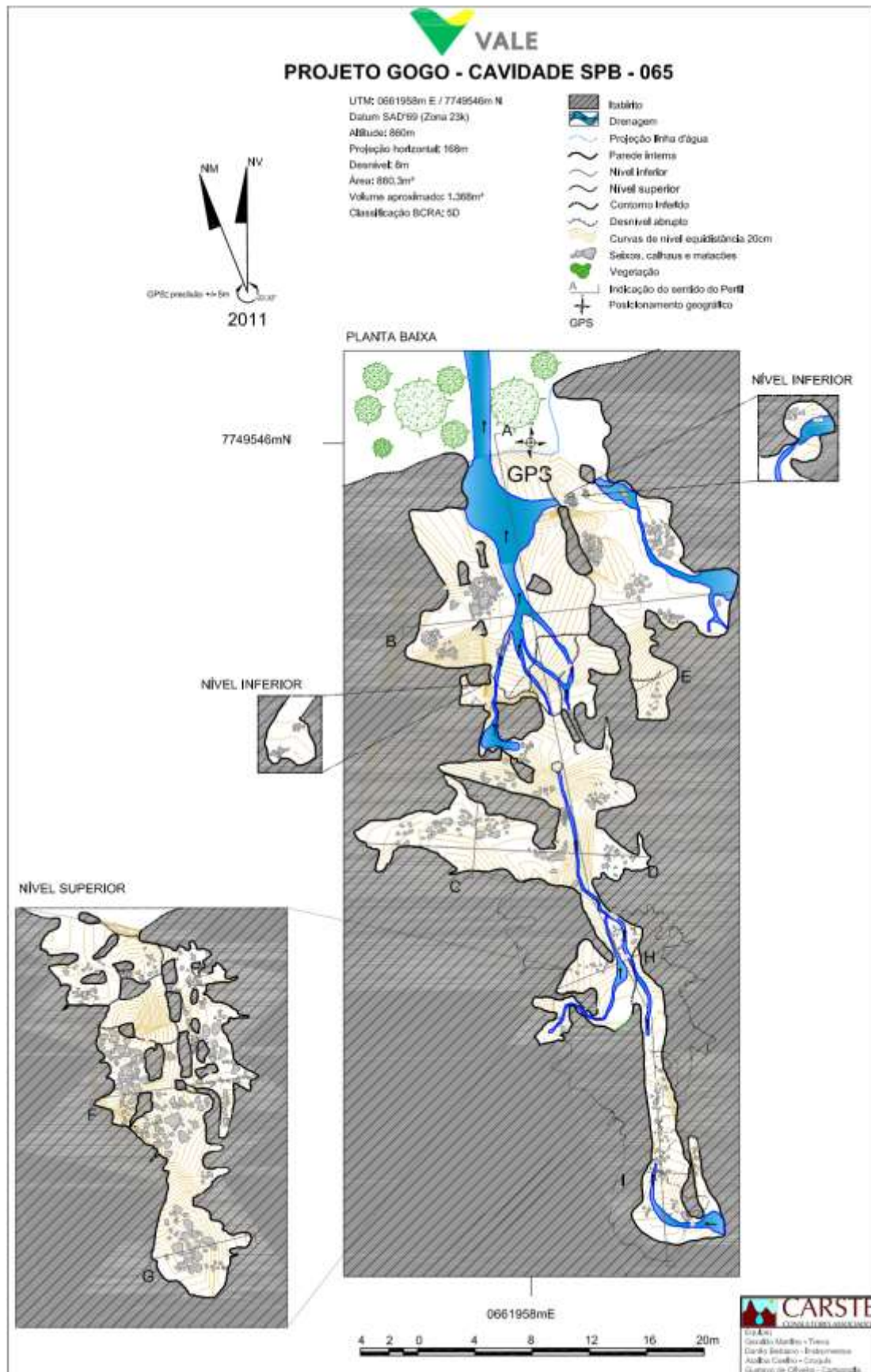
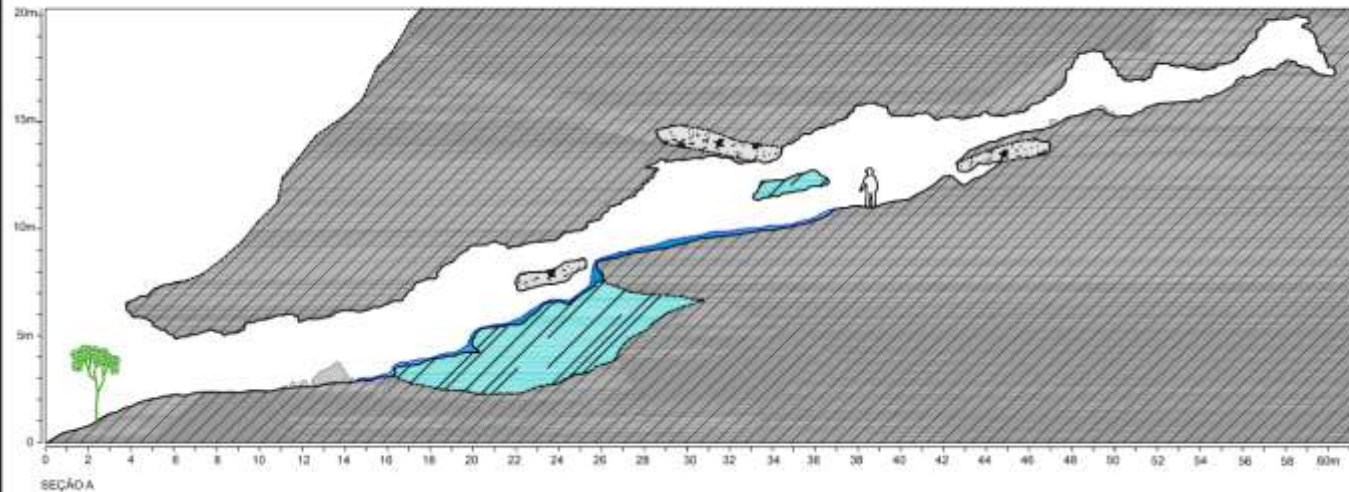


Figura A.1 – Planta baixa da cavidade SPB65. Fonte: Auler *et al.* 2012



PROJETO GOGO - CAVIDADE SPB - 065



UTM: 0661958m E / 7749546m N
Datum SAD'69 (Zona 23k)
Altitude: 860m
Projeção horizontal: 168 m
Desnível: 16,3m
Área: 860,3m²
Volume aproximado: 1.368m³
Classificação BCRA: 5D

- Itabirito
- Quartzito
- Xisto
- Sedimento
- Drenagem
- Parede interna
- Contorno inferido
- Seixos, calhaus e matacões
- Vegetação

h: 1,00m
 h: 1,75m

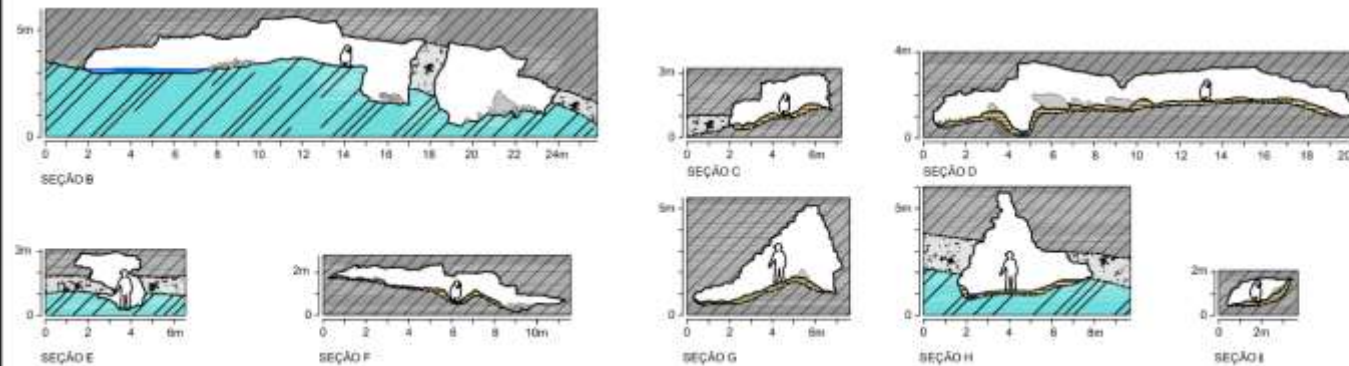


Figura A.2 – Perfil e cortes cavidade SPB65. Fonte: Auler *et al.* 2012.

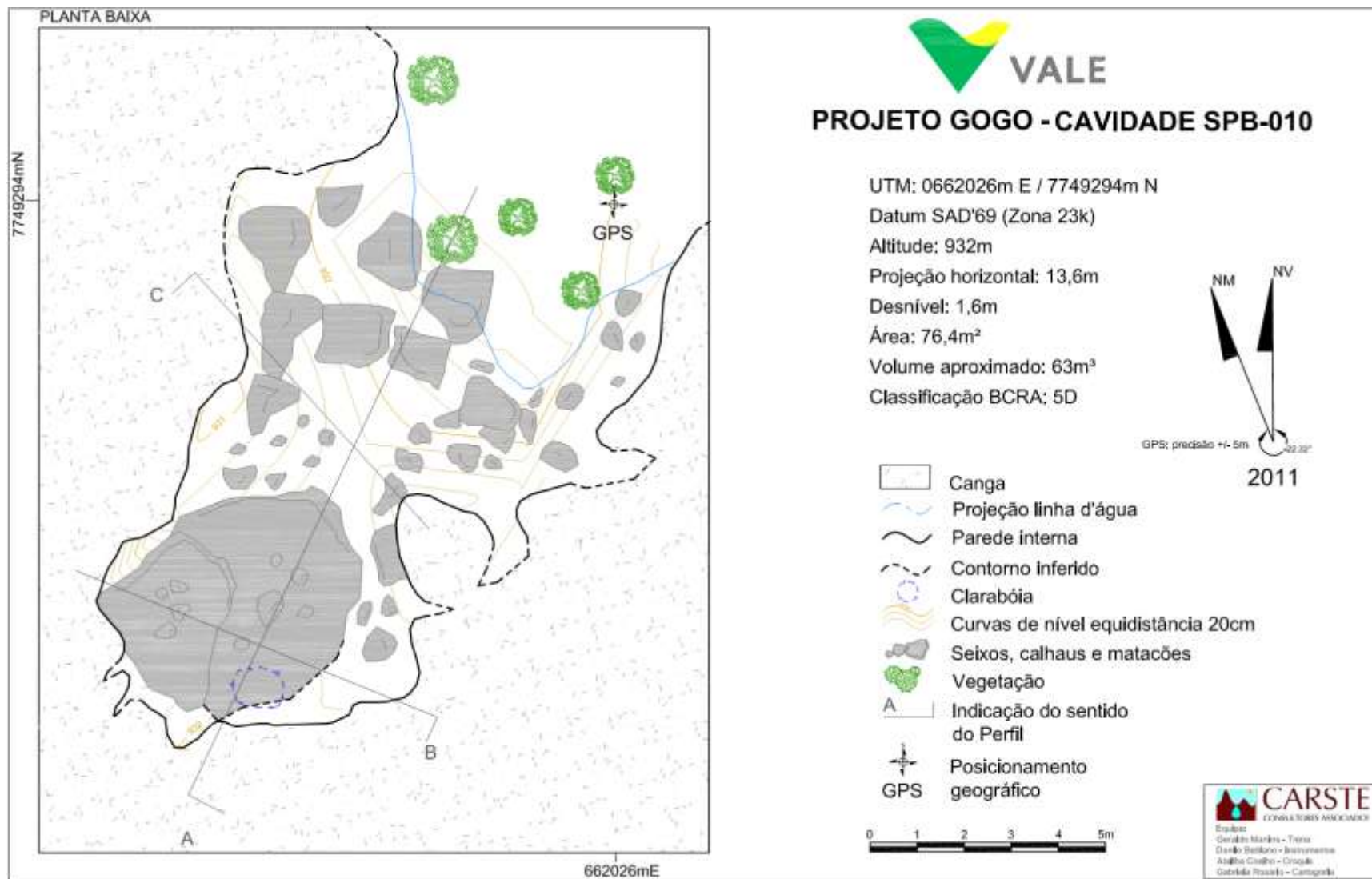
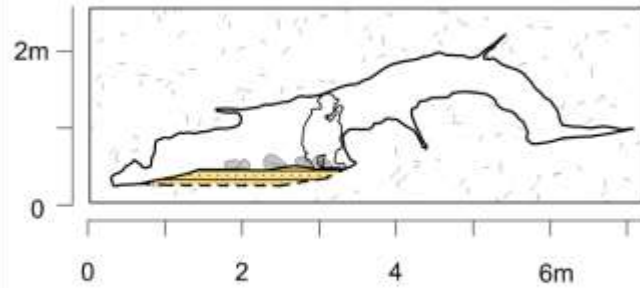


Figura A.3 – Planta baixa da cavidade SPB10. Fonte: Auler *et al.* 2012

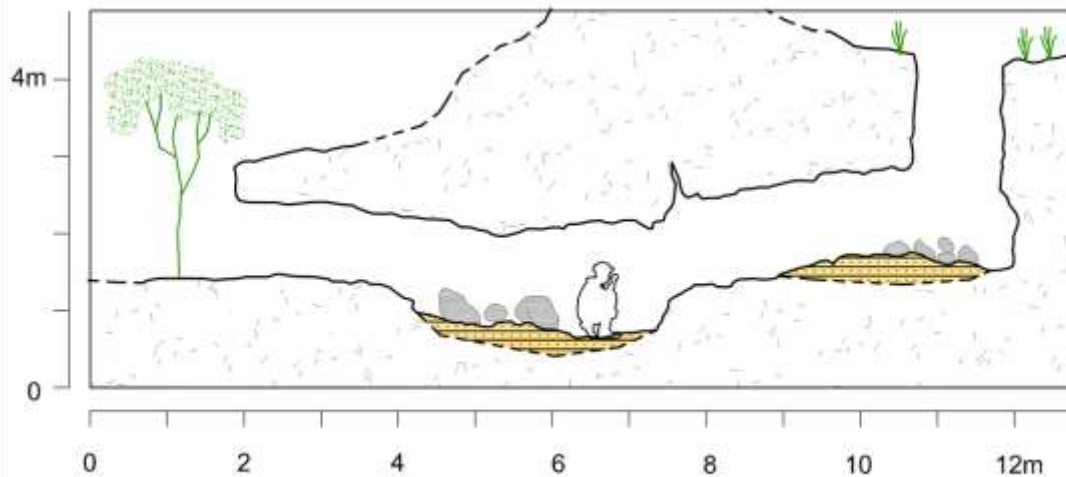
PROJETO GOGO - CAVIDADE SPB-010

UTM: 0662026m E / 7749294m N
 Datum SAD'69 (Zona 23k)
 Altitude: 932m
 Projeção horizontal: 13,6m
 Desnível: 1,6m
 Área: 76,4m²
 Volume aproximado: 63m³
 Classificação BCRA: 5D

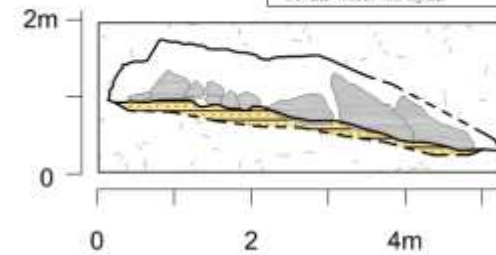
-  Canga
-  Sedimento
-  Parede interna
-  Contorno inferido
-  Seixos, calhaus e matacões
-  Vegetação
-  h: 1,00m



SEÇÃO B



SEÇÃO A



SEÇÃO C

 **CARSTE**
 CONSULTORES ASSOCIADOS
 Equipe:
 Gabriela Martins - Trieno
 Danilo Botelho - Instrumentos
 Alaila Coelho - Carga
 Gabriela Rosário - Cartografia

Figura A.4 – Perfil e cortes cavidade SPB10. Fonte: Auler *et al.* 2012.

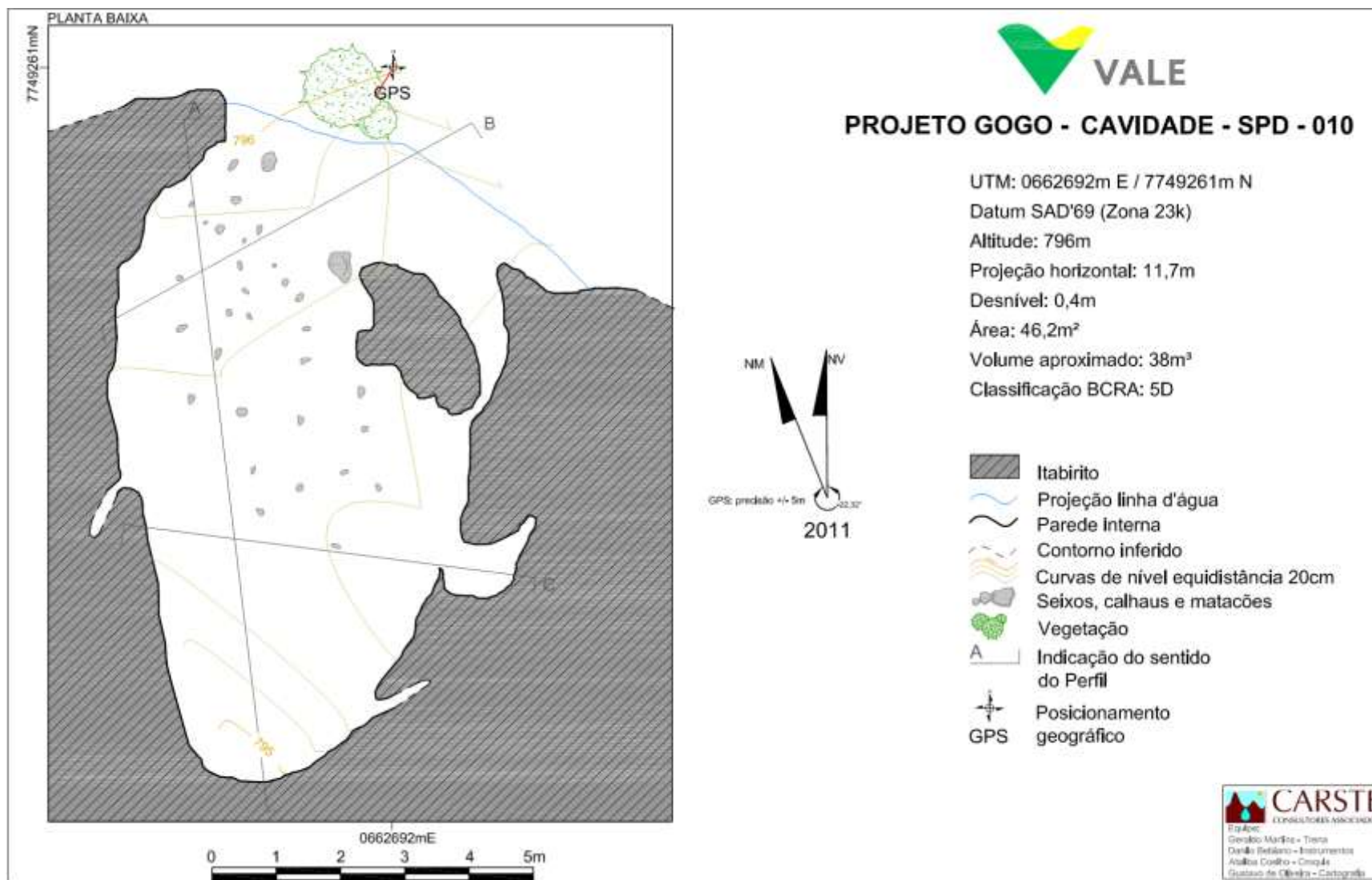
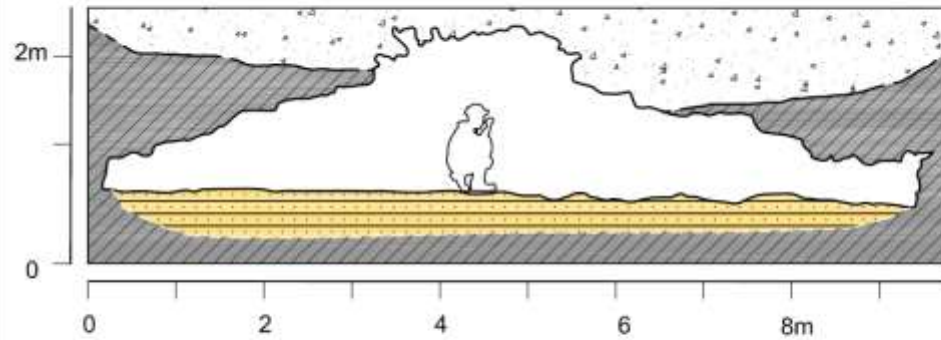


Figura A.5 – Planta baixa da cavidade SPD10. Fonte: Auler *et al.* 2012

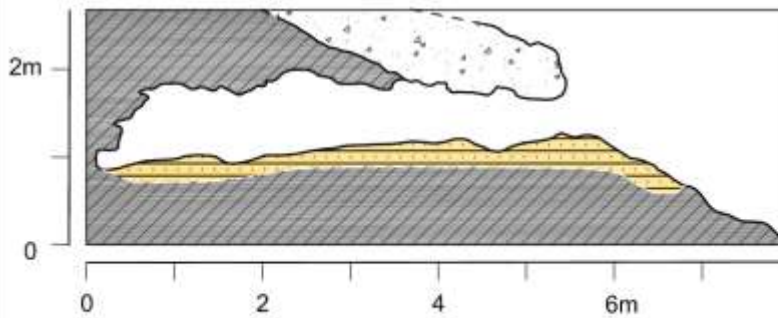


PROJETO GOGO - CAVIDADE - SPD - 010

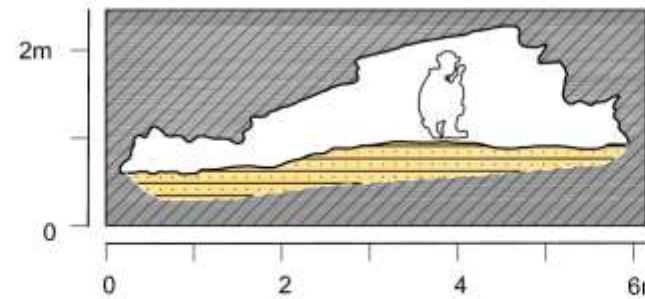


SEÇÃO A

UTM: 0662692m E / 7749261m N
Datum SAD'69 (Zona 23k)
Altitude: 796m
Projeção horizontal: 11,7m
Desnível: 0,4m
Área: 46,2m²
Volume aproximado: 38m³
Classificação BCRA: 5D



SEÇÃO B



SEÇÃO C



Figura A.6 – Perfil e cortes cavidade SPD10. Fonte: Auler *et al.* 2012.

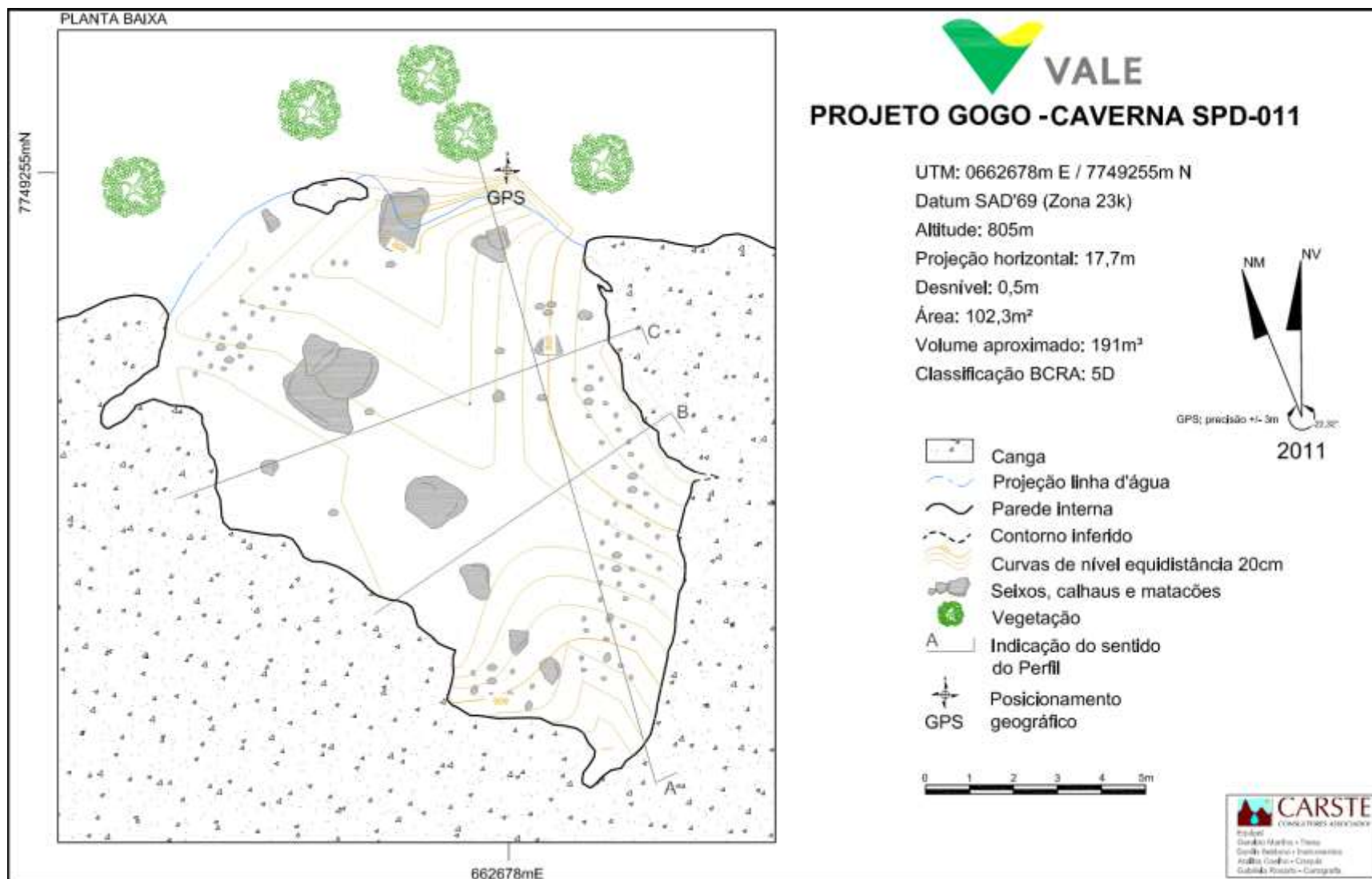
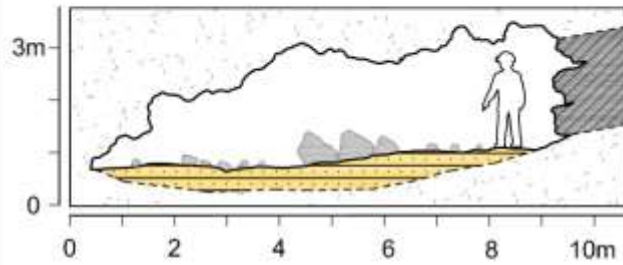


Figura A.7 – Planta baixa da cavidade SPD11. Fonte: Auler *et al.* 2012

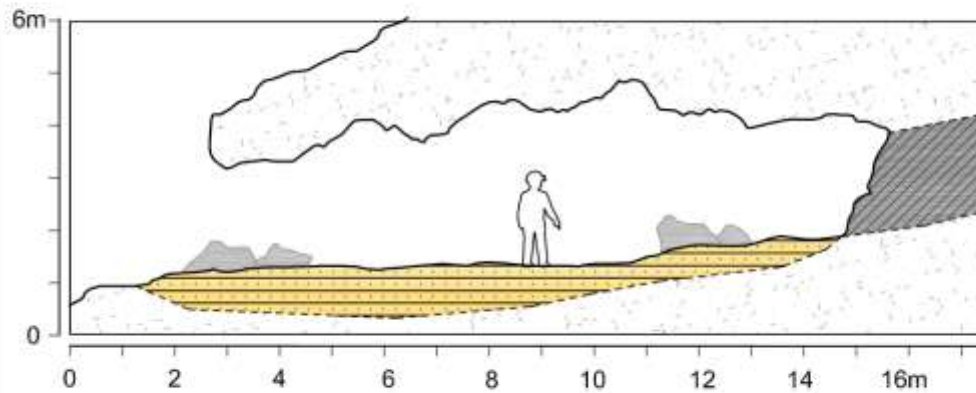


PROJETO GOGO -CAVERNA SPD-011

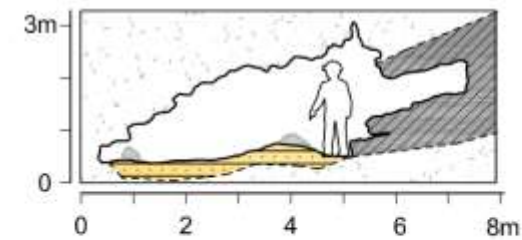
UTM: 0662678m E / 7749255m N
Datum SAD'69 (Zona 23k)
Altitude: 805m
Projeção horizontal: 17,7m
Desnível: 0,5m
Área: 102,3m²
Volume aproximado: 191m³
Classificação BCRA: 5D



SEÇÃO C



SEÇÃO A



SEÇÃO B



Figura A.8 – Perfil e cortes cavidade SPD11. Fonte: Auler *et al.* 2012

APENDICE 1 – ATITUDES ESTRUTURAIS TOMADAS

Tabela A. 13 – Atitudes de acamamento cavidade SPB65.

Tipo de estrutura	Direção	Mergulho	Litologia
S0	57	16	Xisto
S0	34	10	Xisto
S0	27	12	Xisto
S0	37	12	Xisto/Itabirito
S0	22	16	Xisto/Itabirito
S0	117	11	Xisto
S0	57	18	Xisto
S0	77	21	Itabirito
S0	67	18	Itabirito
S0	72	10	Itabirito
S0	342	30	Itabirito
S0	52	10	Itabirito
S0	247	18	Itabirito
S0	256	12	Itabirito
S0	372	10	Itabirito
S0	97	21	Itabirito
S0	322	9	Itabirito
S0	332	23	Itabirito
S0	57	21	Itabirito
S0	32	17	Itabirito
S0	52	18	Itabirito
S0	62	10	Itabirito
S0	42	23	Itabirito
S0	52	15	Itabirito
S0	12	16	Itabirito
S0	2	20	Itabirito
S0	125	15	Itabirito
S0	72	15	Itabirito
S0	77	15	Itabirito
S0	47	18	Itabirito
S0	117	12	Itabirito
S0	122	12	Itabirito
S0	60	20	Itabirito
S0	72	20	Itabirito
S0	67	15	Itabirito
S0	32	10	Itabirito
S0	92	12	Itabirito

Tabela A. 14 – Atitudes das fraturas tomadas na cavidade SPB65.

Tipo de estrutura	Direção	Mergulho	Litologia
J1	2	75	Itabirito
J1	2	53	Itabirito
J1	2	72	Itabirito
J1	357	65	Itabirito
J1	342	73	Itabirito
J1	347	75	Itabirito
J1	332	65	Itabirito
J1	342	82	Itabirito
J1	327	80	Itabirito
J1	342	88	Itabirito
J1	337	84	Itabirito
J1	320	83	Itabirito
J1	325	74	Itabirito
J1	337	76	Xisto
J1	326	81	Xisto
J2	62	80	Itabirito
J2	62	68	Xisto
J2	68	61	Xisto
J2	40	75	Itabirito
J2	39	74	Itabirito
J2	37	78	Itabirito
J2	27	86	Itabirito
J2	28	80	Itabirito
J2	36	78	Itabirito
J2	26	82	Itabirito
J2	42	80	Itabirito
J2	42	74	Itabirito
J2	37	73	Itabirito
J2	33	78	Itabirito
J2	32	85	Itabirito
J2	27	85	Itabirito
J2	50	78	Itabirito
J2	44	83	Itabirito
J2	42	78	Itabirito
J2	47	65	Itabirito
J2	39	76	Xisto
J2	43	81	Xisto
J3	225	70	Xisto
J3	237	80	Itabirito
J3	232	74	Itabirito
J3	247	73	Itabirito
J3	237	66	Itabirito
J3	247	73	Itabirito
J3	252	82	Itabirito

Tipo de estrutura	Direção	Mergulho	Litologia
J3	237	73	Itabirito
J3	232	71	Itabirito
J3	232	70	Xisto
J3	242	64	Xisto
J4	90	85	Itabirito
J4	87	82	Itabirito
J4	97	75	Itabirito
J5	142	74	Itabirito
J5	167	70	Itabirito
J6	202	74	Itabirito
J6	212	71	Itabirito
J6	204	85	Itabirito
J6	202	83	Itabirito
J6	210	72	Itabirito
J6	214	75	Itabirito

**APENDICE II – CARACTERÍSTICAS UTILIZADAS PARA
CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO**

Tabela A. 15 – Descrição das características de cada ponto da cavidade SPB65 segundo o sistema de classificação RMR.

Pontos	Litologia	RCU (MPA)	RQD	Influência da água	Descontinuidades					Grau de alteração
					Espaçamento	Persistência	Abertura	Rugosidade	Preenchimento	
1	Itabirito	5 a 25	< 25	Húmido	0,2-0,06	< 1	0,1-1	Ligeiramente Rugoso	Mole com espessura < 5 mm	Moderadamente alterada
2	Itabirito	5 a 25	< 25	Ligeiramente úmido	0,6-0,2	3-10	> 5	Ligeiramente Rugoso	Nenhum	Ligeiramente alterada
3	Itabirito	5 a 25	< 25	Ligeiramente úmido	0,6-0,2	1-3	> 5	Rugoso	Duro com espessura > 5 mm	Ligeiramente alterada
4	Itabirito	5 a 25	25 a 50	Ligeiramente úmido	0,6-0,2	1-3	1-5	Rugoso	Mole com espessura < 5 mm	Moderadamente alterada
5	Itabirito	25 a 50	< 25	Ligeiramente úmido	0,2-0,06	1-3	1-5	Rugoso	Duro com espessura < 5 mm	Ligeiramente alterada
6	Itabirito	25 a 50	< 25	Ligeiramente úmido	0,2-0,06	3-10	1-5	Ligeiramente Rugoso	Duro com espessura < 5 mm	Ligeiramente alterada
7	Itabirito	25 a 50	< 25	Ligeiramente úmido	0,6-0,2	1-3	1-5	Ligeiramente Rugoso	Duro com espessura < 5 mm	Ligeiramente alterada
8	Itabirito	5 a 25	< 25	Completamente Seco	0,2-0,06	10-20	> 5	Ligeiramente Rugoso	Duro com espessura < 5 mm	Ligeiramente alterada
9	Itabirito	5 a 25	< 25	Completamente Seco	0,2-0,06	3-10	1-5	Rugoso	Duro com espessura < 5 mm	Ligeiramente alterada
10	Veio	25 a 50	< 25	Gotejante	< 0,06	< 1	1-5	Quase liso	Nenhum	Ligeiramente alterada
11	Veio	25 a 50	< 25	Fluente	< 0,06	< 1	1-5	Quase liso	Nenhum	Moderadamente alterada

Pontos	Litologia	RCU (MPa)	RQD	Influência da água	Descontinuidades					Grau de alteração
					Espaçamento	Persistência	Abertura	Rugosidade	Preenchimento	
12	Itabirito	5 a 25	< 25	Ligeiramente úmido	0,6-0,2	3-10	1-5	Rugoso	Duro com espessura > 5 mm	Moderadamente alterada
13	Xisto	5 a 25	< 25	Ligeiramente úmido	0,2-0,06	1-3	1-5	Quase liso	Mole com espessura < 5 mm	Moderadamente alterada
14	Xisto	5 a 25	< 25	Ligeiramente úmido	0,2-0,06	1-3	1-5	Quase liso	Mole com espessura < 5 mm	Moderadamente alterada

Tabela A. 16 – Descrição das características de cada ponto da cavidade SPB65 segundo o sistema de classificação Q.

Pontos	Litologia	RQD	Jn	Jr	Já
1	Itabirito	24,50	3 famílias + aleatórias	Superfície rugosa descontínua	Paredes levemente alteradas, preenchimento com material abrasivo
2	Itabirito	21,60	3 famílias + aleatórias	Superfície rugosa plana	Paredes levemente alteradas, preenchimento com material abrasivo
3	Itabirito	17,65	3 famílias + aleatórias	Superfície rugosa plana	Paredes levemente alteradas, preenchimento com material abrasivo
4	Itabirito	44,37	3 famílias + aleatórias	Superfície rugosa descontínua	Paredes levemente alteradas, preenchimento com material abrasivo
5	Itabirito	0,00	3 famílias + aleatórias	Superfície rugosa descontínua	Paredes levemente alteradas, preenchimento com material abrasivo
6	Itabirito	0,00	3 famílias + aleatórias	Superfície rugosa plana	Paredes levemente alteradas, preenchimento com material abrasivo
7	Itabirito	8,67	2 famílias + aleatórias	Superfície rugosa plana	Paredes levemente alteradas, preenchimento com material abrasivo
8	Itabirito	0,00	4 ou mais famílias (muito fraturado)	Superfície rugosa plana	Paredes sem alteração, pigmentação superficial incipiente
9	Itabirito	7,27	3 famílias + aleatórias	Superfície rugosa plana	Paredes sem alteração, pigmentação superficial incipiente
10	Veio	0,00	Rocha triturada	Superfície lisa plana	Paredes levemente alteradas, preenchimento com material abrasivo
11	Veio	0,00	Rocha triturada	Superfície lisa plana	Paredes levemente alteradas, preenchimento com material abrasivo
12	Itabirito	18,03	4 ou mais famílias (muito fraturado)	Superfície rugosa plana	Paredes levemente alteradas, preenchimento com material abrasivo
13	Xisto	0,00	4 ou mais famílias (muito fraturado)	Superfície lisa ondulada	Paredes levemente alteradas, preenchimento com material abrasivo
14	Xisto	0,00	4 ou mais famílias (muito fraturado)	Superfície lisa ondulada	Paredes levemente alteradas, preenchimento com material abrasivo

Pontos	Jw	SRF
1	Escavação seca ou pequena influência de água (5 l/min)	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)
2	Escavação seca ou pequena influência de água (5 l/min)	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)
3	Escavação seca ou pequena influência de água (5 l/min)	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)
4	Escavação seca ou pequena influência de água (5 l/min)	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)
5	Influência média de água com eventual carreamento do preenchimento	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)
6	Escavação seca ou pequena influência de água (5 l/min)	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)
7	Escavação seca ou pequena influência de água (5 l/min)	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)
8	Escavação seca ou pequena influência de água (5 l/min)	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)
9	Escavação seca ou pequena influência de água (5 l/min)	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)
10	Influência média de água com eventual carreamento do preenchimento	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)
11	Influência elevada de água em rochas competentes com descontinuidades não preenchidas	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)
12	Influência média de água com eventual carreamento do preenchimento	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)

Pontos	Jw	SRF
13	Influência média de água com eventual carreamento do preenchimento	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)
14	Influência média de água com eventual carreamento do preenchimento	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)

Tabela A. 17 – Descrição das características de cada ponto da cavidade SPB65 segundo o sistema de classificação RMI.

Pontos	jL		jR		já
	Comprimento da descontinuidade (m)	Continuidade	Pequena Escala	Larga Escala	
1	0,1 - 1	Descontínuas	Levemente rugosa	Levemente onduladas	Preenchimento pouco espesso mole
2	1 - 10	Contínuas	Levemente rugosa	Planar	Descontinuidade sem contato rocha rocha com preenchimento duro
3	1 - 10	Contínuas	Rugosa	Planar	Descontinuidade sem contato rocha rocha sem preenchimento
4	1 - 10	Descontínuas	Rugosa	Levemente onduladas	Preenchimento pouco espesso mole
5	1 - 10	Descontínuas	Rugosa	Levemente onduladas	Preenchimento pouco espesso duro
6	1 - 10	Contínuas	Levemente rugosa	Planar	Preenchimento pouco espesso duro
7	1 - 10	Contínuas	Levemente rugosa	Planar	Preenchimento pouco espesso duro
8	10 - 30	Contínuas	Levemente rugosa	Planar	Descontinuidade sem contato rocha rocha com preenchimento duro
9	1 - 10	Contínuas	Rugosa	Planar	Preenchimento pouco espesso duro
10	< 0,5	Descontínuas	Suave	Intertravado	Sem preenchimento com superfície mais alterada que a rocha
11	< 0,5	Descontínuas	Suave	Intertravado	Sem preenchimento com superfície mais alterada que a rocha
12	1 - 10	Contínuas	Rugosa	Planar	Descontinuidade sem contato rocha rocha com preenchimento duro
13	1 - 10	Descontínuas	Suave	Fortemente onduladas	Preenchimento pouco espesso mole
14	1 - 10	Descontínuas	Suave	Fortemente onduladas	Preenchimento pouco espesso mole

Tabela A. 18 – Valores e pontuações utilizados para o cálculo do Índice R_{Mi} de cada ponto na cavidade SPB65.

Pontos	σ_c (MPa)	V _b	j _L	j _R	já	j _C	D	j _P	R _{mi}
1	17,86	0,00248	4,00	2,00	4,00	2,00	0,322	0,041	0,731
2	17,86	0,00318	1,00	1,50	8,00	0,19	0,517	0,004	0,079
3	17,86	0,00203	1,00	2,00	8,00	0,25	0,488	0,005	0,086
4	17,86	0,06374	2,00	3,00	4,00	1,50	0,341	0,096	1,710
5	30,34	0,00035	2,00	3,00	3,00	2,00	0,322	0,022	0,659
6	30,34	0,00031	1,00	1,50	3,00	0,50	0,425	0,005	0,138
7	30,34	0,00818	1,00	1,50	3,00	0,50	0,425	0,018	0,556
8	10,56	0,00159	0,75	1,50	8,00	0,14	0,548	0,002	0,023
9	10,56	0,00421	1,00	2,00	3,00	0,67	0,401	0,018	0,192
10	33,4	0,00001	6,00	3,00	2,00	9,00	0,238	0,000	1,288
11	33,4	0,00001	6,00	3,00	2,00	4,50	0,274	0,000	1,288
12	17,86	0,00333	1,00	2,00	4,00	0,50	0,425	0,013	0,223
13	13,15	0,00058	2,00	2,00	4,00	1,00	0,370	0,013	0,167
14	13,15	0,00058	2,00	2,00	4,00	1,00	0,370	0,013	0,167

Tabela A. 19 – Termo utilizado para o índice R_{Mi} de cada ponto da cavidade SPB65.

Pontos	Litologia	R _{Mi}	Termo para R _{Mi}	Termo para resistência do maciço
1	Itabirito	0,731	Moderadamente alto	Moderadamente forte
2	Itabirito	0,079	Baixo	Fraco
3	Itabirito	0,086	Baixo	Fraco
4	Itabirito	1,710	Alto	Forte
5	Itabirito	0,659	Moderadamente alto	Moderadamente forte
6	Itabirito	0,138	Moderadamente alto	Moderadamente forte
7	Itabirito	0,556	Moderadamente alto	Moderadamente forte
8	Itabirito	0,023	Baixo	Fraco
9	Itabirito	0,192	Moderadamente alto	Moderadamente forte
10	Veio	1,288	Alto	Forte
11	Veio	1,288	Alto	Forte
12	Itabirito	0,223	Moderadamente alto	Moderadamente forte
13	Xisto	0,167	Moderadamente alto	Moderadamente forte
14	Xisto	0,167	Moderadamente alto	Moderadamente forte