

**ÍNDICE GEOTÉCNICO DE CAVERNAS (IGC). NOVO SISTEMA DE
CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DA ESTABILIDADE ESTRUTURAL DE
VÃOS EM CAVERNAS FERRÍFERAS**

***CAVE GEOTECHNICAL INDEX (CGI). A NEW CLASSIFICATION SYSTEM
FOR STABILITY ASSESSMENT OF IRON CAVES.***

Iuri Viana Brandi

Vale S.A.

Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos

E-Mail: iuri.brandi@vale.com

Marcelo Roberto Barbos

Vale S.A.

Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos

E-Mail: Marcelo.roberto.barbosa@vale.com

Airton Barata da Silva

Vale S.A.

Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos

E-Mail: airton.barata@vale.com

Juliana Barbosa Timo

Vale S.A.

Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos

E-Mail: juliana.spelayon@gmail.com

RESUMO

Este trabalho de pesquisa propõe uma nova metodologia para análise dos níveis de suscetibilidade a instabilidade estrutural das cavernas em litologias ferríferas. A metodologia proporciona a identificação de parâmetros utilizados na estimativa de riscos geotécnicos de cavidades, favorecendo a classificação dos diversos vãos que compõem as cavernas segundo um índice geotécnico de cavernas (IGC), a qual passa a representar o estado de equilíbrio dos respectivos vãos das cavernas estudadas. Como resultados, a classificação dos vãos segundo o IGC permite uma efetiva antecipação da possibilidade de impactos irreversíveis sobre as cavidades protegidas por lei. Com a aplicação deste novo índice geotécnico será possível qualificar o estado de equilíbrio das cavernas em litologias ferríferas e agir com medidas que atenuem os esforços da mineração sobre as cavidades subterrâneas naturais.

PALAVRAS-CHAVE: Cavernas ferríferas, previsibilidade de impactos, geotecnia.

ABSTRACT

This study proposes a new methodology for the analysis of susceptibility to impacts associated with geotechnical problems in caves with iron lithologies. The methodology provides for the identification of parameters used for the estimation of geotechnical risks of cavities, favoring a geotechnical classification of various cavities according to a geotechnical index of caves (GIC). This approach describes the state of equilibrium of the respective spans in the studied caves. As a result, the classification of cavities or sectors according to indicators of susceptibility allows for effective anticipation of actions

that may have irreversible impacts on cavities protected by law. With the application of the new geotechnical index for speleological structures, it is possible to qualify the steady state of the caves in iron formations and to act according to measures that attenuate the effects of mining efforts on natural underground structures.

KEYWORDS: Iron caves; predictability of impacts; geotechnics.

1. INTRODUÇÃO

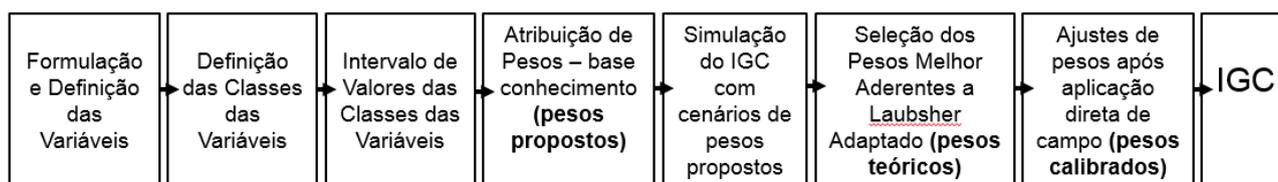
As cavidades naturais subterrâneas ou simplesmente cavernas são protegidas pela legislação federal brasileira e objeto de inúmeros estudos técnico-científicos requeridos nos processos de licenciamento ambiental que regulamentam a preservação do patrimônio espeleológico brasileiro. As cavernas são abundantes em ambientes de minério de ferro e por isso pesquisas têm se intensificado em anos recentes para promover a evolução do conhecimento acerca da manutenção do equilíbrio mineração e preservação ambiental.

A maioria das cavernas ferríferas no Brasil são encontradas nos dois grandes geossistemas ferruginosos, o Quadrilátero Ferrífero (MG) e Carajás (PA) (VALENTIM; OLIVITO, 2011). Atualmente, de acordo com pesquisas realizadas no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) e no Anuário Estatístico do Patrimônio Espeleológico Brasileiro, 2019, também do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), efetuando-se o cruzamento dos dados com mapas geológicos regionais, os registros somam mais de 2000 cavidades em litologias ferríferas em todo o território nacional. A maior parte dessas cavidades foram cadastradas a partir do esforço de prospecção em áreas correlatas a processos de licenciamento ambiental de novos projetos de mineração de ferro, o que demonstra o forte vínculo da evolução do conhecimento da espeleologia nacional com a indústria de mineração.

Conforme o Decreto 6.640/08 as cavernas devem ser classificadas segundo 11 atributos de cunho físico, biológico, ecológico, e/ou histórico-cultural, para que se estabeleça seu grau de relevância, os quais regulamentarão a possibilidade de impactos e consequentes compensações (BRASIL, 2008). Também por orientação legal (MMA CONAMA 347, 2004), deve-se resguardar uma área de 250 m no entorno de cada caverna, para que ela não sofra impactos irreversíveis, até que se defina sua real área de influência em processos de licenciamento ambiental. Essa condição interfere diretamente nas operações minerárias, uma vez que essas áreas não são licenciadas até que estudos específicos de espeleologia, comumente de longo prazo, sejam feitos e aprovados pelos órgãos ambientais.

Portanto, pelo aspecto físico, é premente a motivação da indústria mineral em conhecer bem os mecanismos da geotecnia que regem as questões de estabilidade estrutural das cavernas em regiões de minas, além de buscar definir as principais variáveis que regem os processos físicos envolvidos na manutenção da integridade física e estabilidade das cavernas.

Este trabalho apresenta o Índice Geotécnico de Cavernas (IGC), um inédito sistema de classificação geomecânica de vãos de cavernas ferríferas que subsidia a avaliação da suscetibilidade à instabilidade estrutural. Este índice teve como referência, conceitualmente, o sistema de classificação geomecânica de qualidade de maciços de Bieniawski (1989), porém, é mais abrangente e voltado exclusivamente para aplicação na espeleologia, considerando outras variáveis imprescindíveis para a análise de estabilidade dos vãos espeleológicos que compõem as cavernas. O fluxo de construção do IGC é demonstrado na Figura 1.



O IGC foi aplicado em 63 vãos de 27 cavernas estrategicamente selecionadas nas proximidades das minas de N4 e N5 em Carajás, que serviram para a construção, ajustes e calibrações durante os anos de 2015 a 2018, cujos resultados serão apresentados e discutidos no presente trabalho.

1.1 Cavernas Ferríferas

Cavernas ferríferas, em geral, possuem teto pouco espesso, e desenvolvimento de perfil concordante com o mergulho da encosta. Seus salões são pequenos e com morfologia irregular, apresentando controle estrutural e descontinuidades observadas nas paredes e nos tetos (PILÓ et al., 2015). Dutra (2017) relata que devido a evolução natural das cavernas e à ruptura das descontinuidades é comum observar fragmentos e blocos de material rochoso nos seus pisos. O mesmo autor também atribui a gênese das cavernas ferríferas a quatro processos principais de geração de vazios nos maciços rochosos, quais sejam a erosão, lixiviação, dissolução e biogênese. Esses processos, responsáveis também por mecanismos de ruptura estrutural, são analisados juntamente às formas de evolução dos ambientes cavernícolas, favorecendo a compreensão dos estudos geotécnicos e análise de estabilidade de vãos de cavernas.

1.2 Geotecnia Aplicada à Espeleologia

A maioria da literatura abordando estudos sobre estabilidade de cavernas é para terrenos carbonáticos. Nesse tipo de litologia, Carter; Miller (1995) observaram existir alguma relação entre o teto e a largura na estabilidade das cavernas. Critérios baseados na classificação de Bieniawski (1989) também foram utilizados em mapeamento geotécnico dessas áreas (SIEGEL; MCCRACKIN, 2001).

Diversos fatores podem contribuir para instabilidade de cavernas em ambientes carbonáticos, dos quais é possível destacar: ação antrópica, percolação de água, deslocamento de rocha que suporta o arco, e movimentos tectônicos (SZUNYOGH, 2010). Zhou; Beck (2011) destacam que o colapso do teto de cavernas depende diretamente das descontinuidades e das suas relações espaciais. Além disso, a elevada variabilidade dessas estruturas e as formas de dissolução também podem contribuir para essa instabilidade (DUTRA, 2017).

Outros estudos estão relacionados à avaliação da aplicabilidade de métodos tradicionais de avaliação de estabilidade amplamente empregados na engenharia em cavernas naturais subterrâneas. Portanto, há um grupo de pesquisadores dedicados ao entendimento dos processos e fatores que influenciam a estabilidade de cavernas naturais subterrâneas com foco na previsão de impactos negativos irreversíveis ao patrimônio espeleológico (ARAÚJO et al., 2016; BRANDI et al., 2015; DUTRA, 2017; LACERDA et al., 2017; RENÓ, 2016; SÁNCHEZ et al., 2007; SANTOS JÚNIOR, 2017; VALENTIM, 2016).

Para cavernas mais profundas, notifica-se que o aumento da carga na superfície do terreno é irrelevante na instabilidade dos tetos e paredes dessas cavernas, sendo essa observação muito pertinente para cavernas em rochas calcárias. Entretanto, este acréscimo de carga pode induzir ao colapso de cavernas rasas, como é o caso das cavernas em litologias de ferro, boa parte situadas em alta vertente, como também as paleotocas.

A determinação precisa da geologia das cavernas, definição dos contatos e delimitação das estruturas geotécnicas muitas vezes requer profunda especialização nas análises, conforme descrito por Barbosa (2018). Pois, as cavernas são espaços individuais que muitas vezes não correspondem à descrição geológica-geotécnica regional, e por isso, deve ser dado ênfase a sua geologia local. Dessa forma, esse autor menciona os trabalhos de geofísica rasa aplicada à caracterização geoestrutural com foco na estabilidade dos salões e vãos, objetos da análise de estabilidade.

Noce (2016) apresentou uma proposta de zoneamento geográfico de cavernas para suporte aos estudos geotécnicos. A partir dessa abordagem, elaborou-se uma análise geotécnica dos vãos de algumas cavernas ferríferas com base em sistemas de classificação geomecânica tradicionais da literatura e adaptados para cavernas. Em consonância com essa pesquisa, os trabalhos de Araújo (2016) e Valentim (2016) corroboraram para evolução do tema geotecnia aplicada à espeleologia em cavernas ferríferas a partir, respectivamente, do levantamento de parâmetros geomecânicos com laser scanner 3D, e da proposição da classificação geomecânica de uma caverna situada em São Gonçalo do Rio Abaixo/MG, através do método de classificação geomecânica de maciços adaptado para cavernas.

Dutra (2017) avaliou a suscetibilidade geotécnica de duas cavernas na região da Serra do Gandarela a partir do mapeamento de descontinuidades; classificação geomecânica do maciço pelos sistemas RMR de Bieniawski e Q de Barton; mapa de espessura de teto; mapa de pontos de aporte de água (gotejamentos, espeleotemas, bacias), cones de sedimentos e incidência de raízes; procedendo também a caracterização da pluviometria e infiltração das águas nas cavernas estudadas.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no sudeste do Estado do Pará na Serra dos Carajás, nas minas de ferro N4 e N5. A seleção das cavernas foi feita considerando-se a sua representatividade no ambiente espeleológico da Província Mineral de Carajás, e a proximidade com áreas de operação das 3 minas em atividade (N4EN, N4WS e N5S), de forma que abrangesse todo o conjunto de platôs da região. Foram selecionadas 27 cavernas as quais foram monitoradas entre 2015 e 2018 (Figura 2). A Tabela 1 traz os dados de relevância, litologia e espeleometria das 27 cavernas deste estudo.

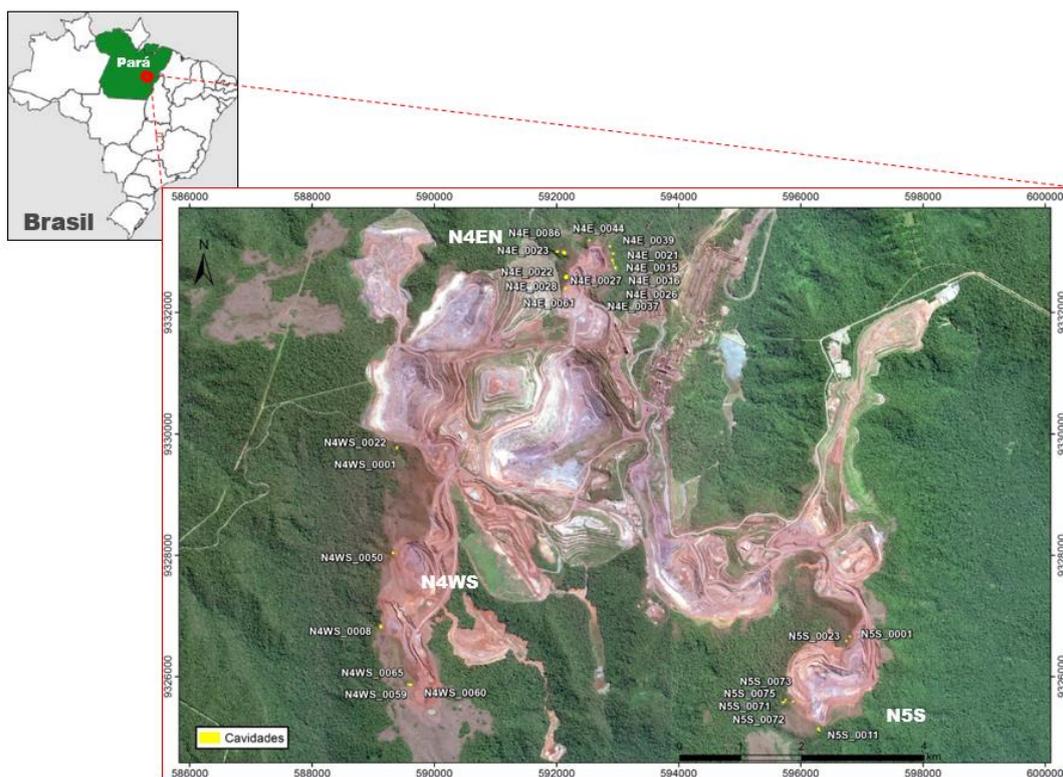


Figura 2 – Área de estudo nas minas N4EN, N4WS e N5S na Serra dos Carajás - PA.

Tabela 1 – Dados litológicos e espeleométricos das 27 cavernas do estudo.

Caverna	Relevância	Litotipo	PH (m)	Desnível (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
N4E_0015	Alta	FFB e Canga	65	6	253	547
N4E_0016	Alta	FFB	30	3,2	113	114
N4E_0021	Alta	FFB	41	6,6	164	330
N4E_0022	Máxima	FFB e Canga	175	12,4	1082	750
N4E_0023	Máxima	FFB e Canga	65	5,6	274	222
N4E_0026	Alta	FFB e Canga	162	18	451	695
N4E_0027	Alta	FFB e Canga	14	3,5	24	29
N4E_0028	Alta	FFB	25	2,5	81	113
N4E_0037	Alta	FFB e Canga	11,2	1,2	19	18
N4E_0039	Alta	FFB	30,6	3,6	69	67
N4E_0044	Alta	FFB e Canga	23,1	1,1	48	31
N4E_0061	Alta	FFB e Canga	35	1	112	134
N4E_0086	Alta	FFB e Canga	15,5	1,7	32	37
N4WS_0001	Alta	FFB	13	4,4	64	68
N4WS_0008	Alta	FFB e Canga	79	9,2	445	876
N4WS_0022	Alta	FFB	10,5	2,9	31	91
N4WS_0050/51	Alta	FFB e Canga	20,5	4,8	178	207
N4WS_0059	Alta	FFB e Canga	16	3,2	52	67
N4WS_0060	Alta	FFB	12,5	1,7	15	8
N4WS_0065	Alta	FFB	13,5	1,8	15	12
N5S_0001	Alta	FFB e Canga	16	3	31	40
N5S_0011	Alta	FFB e Canga	104	11	471	898
N5S_0023	Alta	FFB	26,5	2,9	32	19

Caverna	Relevância	Litotipo	PH (m)	Desnível (m)	Área (m²)	Volume (m³)
N5S_0071	Alta	FFB e Canga	8,3	1,6	17	19
N5S_0072	Alta	FFB e Canga	25	2	71	82
N5S_0073	Alta	FFB, Máfica e Canga	20	0,6	43	28
N5S_0075	Alta	FFB e Canga	32	3	76	59

(FFB = Formação Ferrífera Bandada)

2.1 Aspectos Geológicos

A geologia da área é caracterizada por depósitos de ferro distribuídos ao longo de uma estrutura conhecida como sinclínrio ou dobra de Carajás, que se agrupa em conjuntos denominados Serra Norte, Serra Sul, Serra Leste e São Félix. De forma mais específica, as cavernas alvo do presente estudo se desenvolvem em litologias ferríferas da Formação Carajás, que representa parte de um *greenstone belt* do Domínio Carajás. Nessa unidade estratigráfica estão incluídas formações ferríferas bandadas de fácies óxido com jaspilitos interdigitados a pacotes de metabasaltos e metavulcânicas ácidas, moderadamente a fortemente deformadas, metamorfisadas em fácies subxisto verde a anfíbolito (JUSTO; LOPES, 2014).

Os altos teores de Fe das litologias da Formação Carajás propiciam a formação de coberturas concrecionárias ferruginosas comumente denominadas “cangas”. Esses depósitos de idade cenozoica ocorrem na forma residual quando formados *in situ* pela lixiviação das bandas de chert dos jaspilitos ou de outros minerais/constituintes de outras rochas com teor expressivo de Fe; ou se estabelecem na forma detrítica quando a rocha de origem (rica em Fe) é desagregada, transportada e posteriormente cimentada. Essas coberturas podem constituir carapaças de alta rigidez que se constituem excelentes elementos de sustentação para vazios subterrâneos. A Figura 3 é uma representação simplificada da Província Mineral de Carajás, evidenciando os grandes lineamentos estruturais regionais.

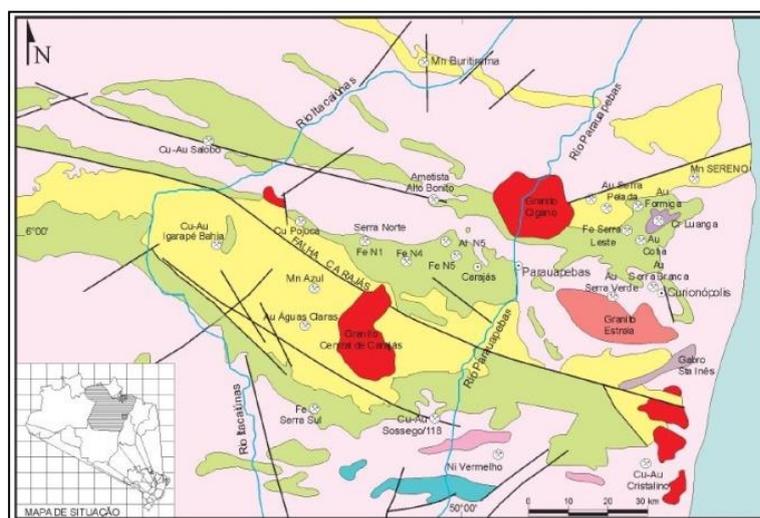


Figura 3 – Província Mineral de Carajás. Adaptado de Dardenne; Schobbenhaus (2001).

3. ÍNDICE GEOTÉCNICO DE CAVERNAS (IGC)

3.1 Formulação e Definição das Variáveis

A iniciativa de desenvolver o Índice Geotécnico de Cavernas (IGC) deu-se pela necessidade observada pelos autores de se ter um sistema de classificação geotécnica unicamente voltado para a ciência espeleológica, no trato exclusivo de vãos de cavernas ferríferas próximas a áreas de mineração, com o intuito de manter suas integridades físicas preservadas. Apesar do significativo avanço, nos últimos anos, dos estudos do meio físico aplicados às questões estruturais de cavernas ferríferas, a sua maioria faz uso de consagrados sistemas de classificação geomecânica de maciços, com o foco na estabilidade de pontos determinados das cavernas objeto de análise.

O modelo de construção do IGC foi inspirado na metodologia de classificação geomecânica de Bieniawski (1989), com o somatório de classes de variáveis ponderadas segundo faixas ou intervalo de análise e cujo resultado indicasse a qualidade geotécnica do material avaliado. As variáveis selecionadas para o IGC e suas classes contemplam diversas disciplinas (geomecânica, geotecnia, hidrogeologia, engenharia de minas, espeleologia), e foram baseadas na experiência e conhecimento adquirido pelos autores em estudos e monitoramentos espeleológicos contínuos, desde 2014, em cavernas localizadas próximo às áreas operacionais de minas de ferro em Carajás - PA e no Quadrilátero Ferrífero - MG, bem como fundamentado na literatura científica.

Foram interrelacionadas quatro variáveis, a saber: (1) Rock Mass Rating (RMR), base Bieniawski (1989), variável Geomecânica que classifica a qualidade do maciço rochoso onde cada vão da caverna está contido, além das suas características

geoestruturais; (2) Raio Hidráulico (RH), variável da engenharia que considera a razão entre a área e o perímetro de uma seção típica de um vão; (3) Forma do Teto (FT), variável da espeleologia que indica se a geometria de teto é favorável ou desfavorável à deformação (colapso); e (4) Espessura do Teto (ET), variável da geotecnia que caracteriza a profundidade do teto do vão em relação à superfície do terreno.

Buscou-se, então, a partir da seleção dessas variáveis principais relacionadas às deformações dos vãos espeleológicos, construir um sistema de classificação simples e de fácil aplicação. O sistema é regido por uma equação que considera a somatória de classes de variáveis ponderadas cujo resultado leva a uma classificação da qualidade estrutural dos vãos de cavernas, medindo sua suscetibilidade a instabilidade estrutural. A fórmula do IGC é demonstrada na Equação 1:

$$IGC = \alpha RMR + \beta RH + \gamma FT + \delta ET \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: α RMR = Peso atribuído à classificação Rock Mass Rating (BIENIAWSKI, 1989); β RH = Peso atribuído ao Raio Hidráulico (LAUBSHER, 1990); γ FT = Peso atribuído à Forma do Teto; e δ ET = Peso atribuído à Espessura do Teto.

A soma dos pesos das 4 variáveis foi definida com o valor máximo 100 (cem), que representa o melhor cenário do vão de muito baixa suscetibilidade a instabilidade estrutural, e por outro lado, o pior cenário é o valor mínimo 0 (zero), indicando muito alta suscetibilidade a instabilidade estrutural. A Tabela 2 traz as cinco classes do IGC e os respectivos intervalos de níveis de suscetibilidade a instabilidade estrutural dos vãos.

Tabela 2 – Faixas de classificações da suscetibilidade do IGC a instabilidade estrutural dos vãos e respectivos intervalo de pesos.

Suscetibilidade a Instabilidade Estrutural do Vão da Caverna	IGC
Muito Baixa	IGC > 80
Baixa	60 < IGC < 80
Moderada	40 < IGC < 60
Alta	20 < IGC < 40
Muito Alta	IGC < 20

3.2 Definição das Classes das Variáveis

3.2.1 Rock Mass Rating (RMR)

Desde a década de 40, diversos autores convergiram seus esforços para a concepção de índices geotécnicos que permitissem prever o comportamento dos maciços rochosos, especialmente quando expostos a esforços de origem antrópica, como mineração e escavações para túneis (EDELBRO et al., 2006). Estes autores ainda fazem uma compilação de sistemas de classificação geomecânica aplicados às obras de engenharia.

Para a composição do IGC, foram testados 3 sistemas considerados como os mais apropriados pelas suas abordagens de qualidade de maciço e aplicação em ambientes subterrâneos, como é o caso das cavernas ferríferas rasas da área de estudo. Foram testados os Sistemas Q de Barton (1974), RMR de Bieniawski (1989) e o MRMR de Laubsher (1990). Os testes foram realizados com a aplicação direta dos sistemas sobre as 27 cavernas selecionadas para este estudo, fazendo-se uma correlação com a realidade observada nos mapeamentos geoestruturais de campo. Os resultados apresentaram similaridades, porém o Sistema RMR de Bieniawski foi percebido como o mais aderente (DE PAULA, 2018) e o que ofereceu um melhor detalhamento dos contatos para compor o IGC.

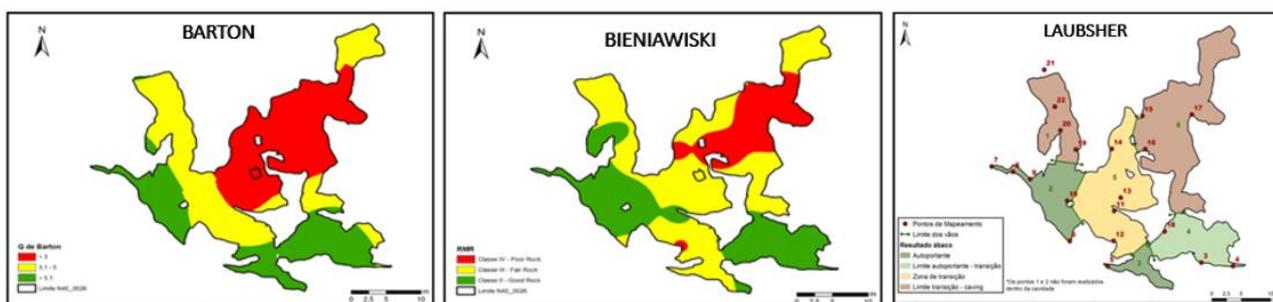


Figura 4 mostra um exemplo do resultado do mapeamento nos 3 sistemas para a cavidade N4E_0026.

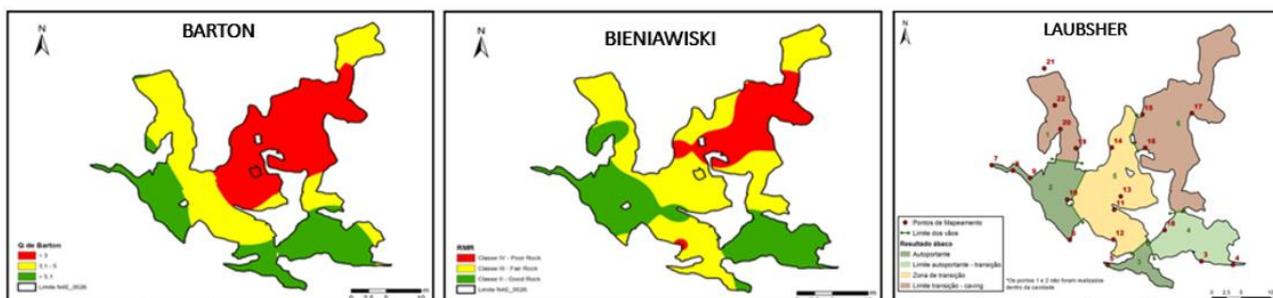


Figura 4 - Mapas de classificação geomecânica da cavidade N4E_0026 pelos Sistemas Q de Barton (1974), RMR de Bieniawski (1989) e Laubsher (1990).

Bieniawski propôs este sistema em 1973, e desde lá ele vem sendo aprimorado até a última revisão do autor, em 1989. É composto pela análise de nove parâmetros relativos ao maciço rochoso e às descontinuidades nele contidas, sendo que a cada parâmetro é atribuído um peso e o somatório é o resultado do sistema de classificação.

Antes de ser aplicado, o maciço rochoso deve ser dividido em setores estruturais com características semelhantes, e a classificação se aplica a cada um desses setores. Após obtidos os valores dos pesos para os nove parâmetros relativos à qualidade geomecânica do maciço rochoso e às descontinuidades, Bieniawsk (1989) sugere realizar uma correção relacionada à orientação das descontinuidades de acordo com sua influência na estabilidade da estrutura. O resultado desse sistema de classificação de qualidade geomecânica do maciço foi dividido em cinco classes com intervalos específicos, tendo sido integralmente aproveitado para a composição do IGC, sendo: Muito Bom (100 a 81), Bom (80 a 61), Regular (60 a 41), Ruim (40 a 21), e Muito Ruim (20 a 0) (Tabela 4).

Tabela 4 - Resultados do sistema de classificação geomecânica (RMR) do maciço. Adaptado de Bieniawski (1989) e incorporado ao IGC.

Somatório	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Número da classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito Bom	Bom	Regular	Ruim	Muito Ruim

3.2.2 Raio Hidráulico (RH)

Em termos de geometria de seções horizontais, diversos pesquisadores propuseram índices/parâmetros a serem levados em consideração na avaliação de estabilidade de espaços subterrâneos. Dentre esses, destacam-se dois:

- Largura do Vão ou *Span Width*, estudado por Barton et al. (1974) e Hutchinson; Diederichs (1996), entre outros.
- Raio Hidráulico, estudado por Laubscher (1990); e Villaescusa (1996), entre outros.

Largura do Vão ou *Span Width*

Milne (1997) relata que a abordagem que relaciona a condição de suporte à largura do vão é empregada há décadas e um dos registros mais antigos remonta a Terzaghi, (1949). Esse método é empregado, principalmente, em projetos de túneis e pode ser

efetivamente relacionado à estabilidade, já que a largura da abertura define a distância entre os principais elementos de suporte de um túnel, que são as paredes laterais.

Raio Hidráulico

O termo “Raio Hidráulico” ou, em alguns casos, “Fator Forma” tem sido empregado na avaliação de estabilidade de estruturas subterrâneas desde 1977, sendo o pesquisador D. H. Laubscher o primeiro a aplicar essa metodologia. Milne (1997) destaca que este termo foi inicialmente aplicado na dinâmica de fluidos para comparar o fluxo em tubos de seção quadrada com o fluxo em tubos de seção circular. Esse pesquisador esclarece o motivo pelo qual um parâmetro inicialmente aplicado na hidráulica apresenta relação com a estabilidade de escavações subterrâneas.

O Raio Hidráulico é obtido pela razão entre a área e o perímetro da seção analisada. Essa razão pode expressar também a distância entre o centro do espaço subterrâneo às estruturas de suporte, além da abordagem pertinente quando se trata de escavações com formas irregulares, e quando o comprimento da estrutura é até três vezes maior que a largura, já que, diferentemente de outros, esse parâmetro considera todas as faces da escavação como capazes de oferecer suporte efetivo, conforme menciona Milne (1997).

De acordo com a classificação do maciço proposta por Laubscher (1990), é sugerida a relação entre o Raio Hidráulico, também denominado Índice de Estabilidade, e o seu índice de classificação geomecânica, Mining Rock Mass Rating – MRMR, para análise de auto portabilidade de vãos em minas subterrâneas. Baseado em dados de 11 minas em quatro países, foi gerado um ábaco, classificando pontos como estáveis, transicionais ou instáveis. Jordá-Bordehore (2017) avalia a estabilidade de uma amostra de 137 cavernas naturais com amplos vãos com base na abordagem empírica, baseada no Q de Barton (1974), e na largura do vão. Esse pesquisador propõe também uma curva de estabilidade.

No caso dessa variável, as rugosidades das paredes e a presença frequente de reentrâncias nas cavernas naturais foram desprezadas, considerando-se apenas o “vão efetivo”. Como essa variável está sendo adquirida a partir do escaneamento a laser, essas feições já estão de alguma forma representadas. Para a composição do IGC, essa variável geométrica será incorporada segundo 3 classes (Pequeno, Médio e Grande), que irão representar seus respectivos tamanhos na unidade métrica. Para cada uma das 27 cavernas estudadas foi elaborado um mapa com a divisão de vãos considerados no cálculo do

respectivo Raio Hidráulico. Como exemplo, tem-se o mapa de vãos da caverna N4E_0026, conforme a Figura 5 - Mapa de vãos da caverna N4E_0026.

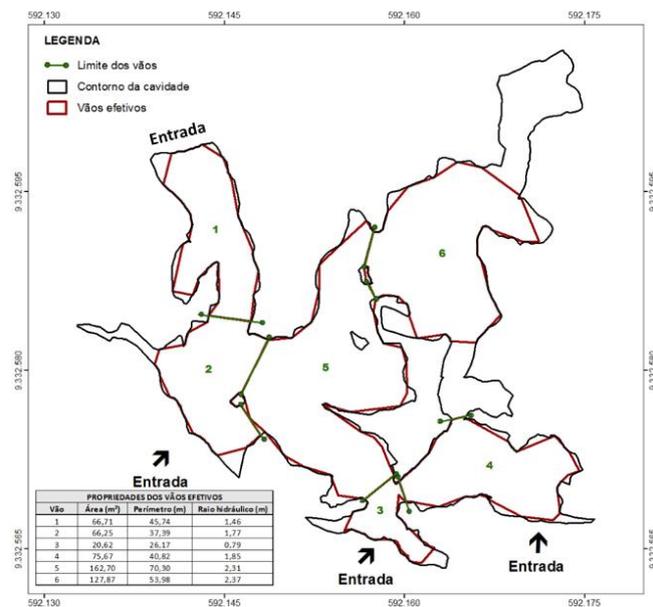


Figura 5 - Mapa de vãos da caverna N4E_0026.

3.2.3 Forma do Teto (FT)

Peck et al. (2013) afirmam que a forma do teto é um fator chave para a avaliação de estabilidade de uma escavação subterrânea, juntamente com as características geológicas e as condições gerais do terreno. Esses pesquisadores comparam a performance de formas retas (planas) e arqueadas (abóbadas) em escavações rasas, concluindo que áreas de instabilidade estão normalmente associadas às geometrias planas, salientando que as formas de teto estáveis são similares à configuração pós-ruptura - abóbadas. Parise & Lollino (2011) avaliaram os mecanismos de falha em uma mina de calcarenito abandonada e registraram os resultados das rupturas, observando que os mecanismos de falha também podem promover formas arqueadas. Diederichs; Kaiser (1999, *apud* Peck et al. 2013) sugerem que a ocorrência de interseções reduz a capacidade de rocha de formar um arco estável; estendendo a zona de deformação, o que equivale a relaxar os suportes de uma seção do túnel, indicando, novamente, que a forma do teto que

apresenta maior estabilidade é a abobadada. De forma similar, Fiore et al. (2018) avaliam a suscetibilidade à ruptura de minas subterrâneas de calcarenito em uma região na Itália, apontando a geometria do teto como um fator importante.

Para a composição desta variável no IGC, cada um dos 63 vãos das 27 cavernas do estudo foi analisado em suas formas de teto em seções 3D a laser, confirmados nos levantamentos de campo e nos perfis dos mapas espeleométricos. Foram consideradas 3 classes (Abóbada, Planar e Abóbada Invertida). A Figura 6 contempla as seções tipo (contornos) dessas classes.

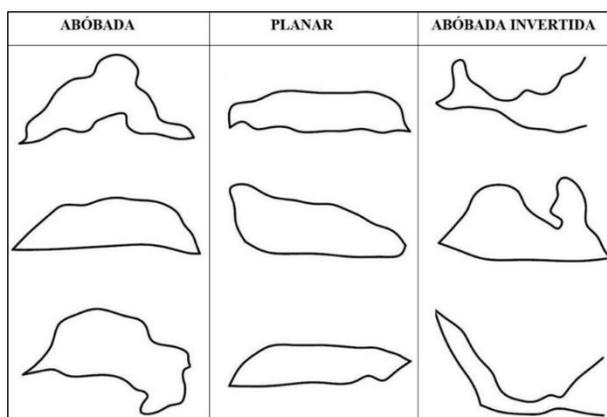


Figura 6 - Seções tipo das 3 classes da variável Forma do Teto, extraídas das seções 3D *laser* das cavernas de estudo.

3.2.4 Espessura do Teto (ET)

Diversos pesquisadores sugerem que, em se tratando de escavações rasas, quanto mais próximas à superfície, menor estabilidade essas estruturas apresentam (CARTER, 2014). Yardimci et al. (2016) relatam a tentativa para a avaliação de estabilidade a partir do método *Crown Pillar*. Basicamente, esse método estabelece uma relação entre sistemas de classificação geomecânica, como o RMR (BIENIAWSKI, 1973) e o Q (BARTON et al., 1974) e a geometria dos espaços subterrâneos, levando em consideração a espessura do teto. Carter; Miller (1995) propuseram diretrizes aceitáveis de exposição ao risco, dividindo seções de minas subterrâneas em classes de qualidade. Trata-se de um método prático dependente de retro análises de casos históricos de falhas. Carter (2014) apresenta uma equação que correlaciona fatores geométricos e espessura de teto para calcular o fator C_s (*Scaled Span*). Dessa forma, pequenas espessuras de teto geram altos valores de C_s , o que implica instabilidade. Parise; Lollino (2011) também relacionam a espessura de teto com a estabilidade de espaços subterrâneos. Fiore et al., (2018) acreditam que a variável espessura de teto é fundamental para a avaliação de estabilidade de espaços subterrâneos quando se trata de estruturas rasas.

Vale ressaltar que a *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 2014) endossa as técnicas de laser scanner 3D como geradoras de imagens associadas de alta velocidade e precisão para serviços geotécnicos. Para a composição desta variável no IGC, foi utilizado escaneamento a laser para aquisição dos dados topográficos. Além disso, os serviços com a tecnologia LIDAR também fazem o georreferenciamento de precisão das cavernas à topografia local; fazem o levantamento da superfície do terreno de entorno das cavernas; e geram mapas 3D (internos e externos às cavernas). A partir da nuvem de pontos foi gerado um modelo de elevações do teto das cavernas e subtraído do modelo digital de elevação de terreno, obtendo-se os valores de espessura de teto. Por meio de análise estatística ponto a ponto foi possível calcular o valor médio para espessura de teto de cada vão. A Figura 7 mostra a espessura de teto para a cavidade N4E_0026 em um modelo 3D.

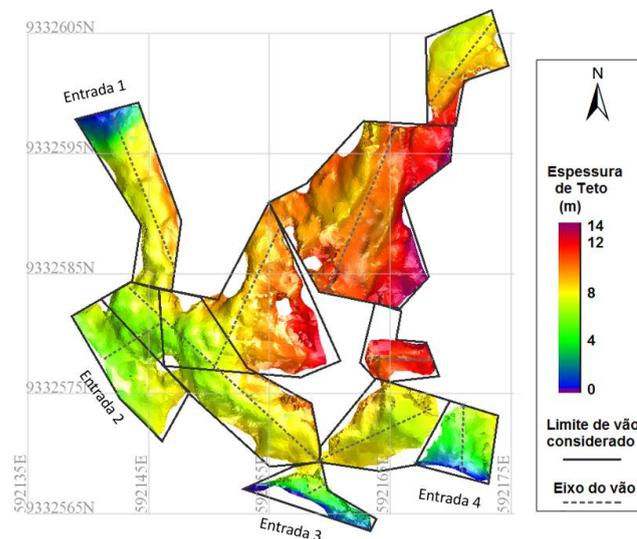


Figura 7 - Mapa de espessura de teto para a cavidade N4E_0026.

3.3 Intervalos de valores das classes das variáveis (tratamento estatístico)

Para definir com precisão o intervalo de valores das classes das 4 variáveis do IGC foi desenvolvido um tratamento estatístico no software MiniTab a partir dos dados levantados nos 63 vão das 27 cavernas do estudo, conforme Figura 8.

Caverna	Vão (identificação)	RMR (Bieniawski, 1989)	Raio Hidráulico (m)	Morfologia do Teto	Espessura do Teto (m)
N4E_0015	1	50	1,78	Abóbada Invertida	6,62
	2	12	2,85	Abóbada	4,59
N4E_0016	1	61	1,95	Planar	7,76
	2	62	1,08	Planar	10,51
N4E_0021	1	66	1,52	Planar	6,22
	2	39	2,44	Planar	8,32
N4E_0022	1	57	1,33	Planar	6,4
	2	50	2,52	Planar	6,16
	3	61	1,04	Abóbada	4,68
	4	37	2,35	Abóbada Invertida	7,97
	5	34	1,11	Abóbada	8,4
	6	48	2,42	Abóbada Invertida	5,64
N4E_0023	1	44	2,38	Abóbada Invertida	9,71
	2	39	1,82	Abóbada	10,39
N4E_0026	1	29	1,46	Abóbada	7,11
	2	42	1,77	Planar	6,54
	3	64	0,79	Abóbada	5,2
	4	36	1,85	Planar	6,31
	5	32	2,31	Abóbada	8,89
	6	25	2,37	Abóbada Invertida	10,67
N4E_0027	1	66	0,9	Planar	4,82
N4E_0028	1	44	1,54	Abóbada Invertida	3
N4E_0037	1	78	0,79	Abóbada	2,7
	1	58	0,62	Abóbada	4,73
N4E_0039	2	68	0,96	Abóbada Invertida	3,51
	3	68	1,4	Abóbada	3,79
	1	68	1,26	Abóbada Invertida	2,05
N4E_0044	2	52	0,76	Planar	2,96
	1	21	1,87	Abóbada	3,5
N4E_0061	1	22	1,12	Abóbada	3,74
N4E_0086	1	22	1,12	Abóbada	3,74
N4wS_0001	1	66	1,65	Abóbada Invertida	6,77
	1	65	1,35	Planar	7,64
	2	30	2,6	Abóbada	8,56
	3	41	0,97	Planar	11,07
	4	30	2,44	Abóbada	7,64
N4wS_0008	5	28	1,64	Planar	8,77
	1	73	0,66	Planar	2
	1	75	0,92	Planar	2,96
	2	68	1,96	Abóbada Invertida	4,26
	3	64	1,09	Planar	5,49
N4wS_0050/51	4	83	0,73	Planar	6,66
	5	64	0,38	Abóbada Invertida	6,93
	1	65	0,95	Planar	1,77
	1	53	0,81	Planar	1,54
N4wS_0060	1	51	0,78	Abóbada	5,48
N4wS_0065	1	61	0,87	Planar	3,4
	2	71	0,43	Abóbada	4,33
	3	55	0,6	Abóbada	3,31
N5S_0001	1	75	1,15	Planar	2,03
	2	75	3,27	Abóbada	4,21
	3	60	1,2	Abóbada	7,28
	4	42	1,3	Planar	7,02
	5	59	0,91	Planar	8,17
	6	58	1,74	Planar	8,89
	7	42	0,86	Planar	9,36
	8	63	0,91	Planar	2,47
N5S_0023	1	69	0,42	Abóbada	3,18
	2	64	0,5	Planar	3,5
N5S_0071	1	53	0,92	Abóbada	0,96
N5S_0072	1	39	1,69	Abóbada Invertida	2,54
N5S_0073	1	39	1,28	Planar	2,11
N5S_0075	1	40	1,45	Planar	3,91
	2	55	1,1	Planar	4,24

Figura 8 - Dados levantados das 4 variáveis do IGC para os 63 vãos das 27 cavernas deste estudo.

A Tabela 5 mostra os resultados dos intervalos para cada uma das 4 classes do IGC após tratamento estatístico.

Tabela 5 - Intervalos de classe para cada uma das 4 variáveis do IGC.

Rock Mass Rating (RMR)	Raio Hidráulico (RH)	Forma do Teto (FT)	Espessura do Teto (ET)
---------------------------	-------------------------	-----------------------	---------------------------

• **Muito Bom (81 - 100)**

- **Bom (61-89)** • **Pequeno (0,0-0,91m)** • **Abóboda** • **Grande (7,65-10m)**
- **Regular (41-60)** • **Médio (0,92-1,82m)** • **Planar** • **Média (3,32-7,64m)**
- **Ruim (21-40)** • **Grande (1,83-3,0m)** • **Abóboda Invertida** • **Pequena (0,0-3,31m)**
- **Muito Ruim (0-20)**

Legenda: **Melhor Classe** **Média Classe** **Pior Classe**

3.4 Ponderação das variáveis

3.4.1 Pesos propostos – atribuição base conhecimento

Entende-se como peso, um maior ou menor valor influenciador a ser atribuído a cada variável, que, após somatório, será revelador da pior ou melhor qualidade geotécnica do vão, ou seja, da sua suscetibilidade a instabilidade estrutural.

Para fundamentar a proposição dos pesos foram primeiramente definidos quatro cenários com os maiores valores de pesos que representassem sua preponderância de uma variável sobre as demais, em acordo com as condições reais observadas nas cavernas deste estudo e no tratamento estatístico realizado. A Tabela 6 mostra essa distribuição dos maiores pesos para as melhores classes de cada variável do IGC nos 4 cenários que serão simulados.

Tabela 6 - Distribuição dos maiores pesos para as melhores classes de cada variável do IGC nos 4 cenários simulados.

Variável IGC (peso proposto)	Cenário			
	1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Rock Mass Rating (RMR)	25	50	60	60
Raio Hidráulico (RH)	25	28	20	25
Espessura do Teto (ET)	25	5	5	5
Forma do Teto (FT)	25	17	15	10
<i>Soma</i>	100	100	100	100

Legenda: Melhor Classe

Uma análise da Figura 9 demonstra que, excluindo-se o Cenário 1 de igualdade entre os pesos para todas as variáveis, nota-se que a variável Rock Mass Rating (RMR) possui um peso preponderante sobre as demais variáveis, uma vez que ela é a única que revela a qualidade geotécnica do maciço rochoso do vão, envolvendo as questões estruturais e hidrológicas do meio físico. As demais variáveis IGC são igualmente importantes, porém com distribuição de ponderações menores. Com base nessas premissas, a Figura 9 mostra a distribuição completa dos pesos propostos para todas as classes das variáveis IGC para a simulação dos cenários.

Valores de Pesos Propostos para as Classes das Variáveis IGC para Simulação dos 4 Cenários					
Variável IGC	Classe	Cenário 1 (peso proposto)	Cenário 2 (peso proposto)	Cenário 3 (peso proposto)	Cenário 4 (peso proposto)
Rock Mass Rating (RMR)	Muito Ruim	0	0	0	0
	Ruim	6,25	12,5	21	21
	Regular	12,5	25	39	39
	Bom	18,75	37,5	54	54
	Muito Bom	25	50	60	60
Raio Hidráulico (RH)	Pequeno	25	28	20	25
	Médio	12,5	14	12	15
	Grande	0	0	0	0
Espessura do Teto (ET)	Pequeno	0	0	0	0
	Médio	12,5	2,5	3	3
	Grande	25	5	5	5
Forma do Teto (FT)	Abóbada	25	17	15	10
	Planar	12,5	8,5	9	6
	Abóbada Invertida	0	0	0	0

Legenda: Melhor Classe Média Classe Pior Classe

Figura 9 - Distribuição dos pesos propostos para todas as classes das variáveis IGC nos 4 cenários que serão simulados.

3.4.2 Pesos teóricos - melhor aderência ao ábaco de estabilidade de Laubsher adaptado

O Sistema IGC foi simulado com os pesos dos 4 cenários para os 63 vãos das cavernas em estudo, e os resultados foram inseridos e analisados no ábaco de estabilidade/instabilidade de Laubsher, 1990. Este ábaco é uma ferramenta consagrada na geotecnia mundial dividida em três classificações de estabilidade: Instável, Transição e Estável, que avaliam, de forma empírica, a estabilidade de áreas subterrâneas. Com isso, procura-se associar o novo IGC a ferramentas similares, maduras e largamente citadas na literatura, buscando rigor científico.

A partir dos resultados do IGC dos vãos inseridos no ábaco de Laubsher, foi então possível inferir as curvas das 5 classificações de suscetibilidade a instabilidade do IGC, criando um ábaco combinado denominado “Laubsher Adaptado”. A Figura 10 mostra

como ficou essa inferência no ábaco adaptado e como os valores dos pesos IGC ficaram coerentemente distribuídos. As classificações IGC dos vãos de muito alta suscetibilidade a instabilidade estrutural ficaram dentro da zona instável de Laubsher; os vãos com classificações muito alta a alta suscetibilidade IGC, ficaram dentro da zona transição de Laubsher, e por fim, as classificações IGC dos vãos, moderada, baixa e muito baixa, ficaram dentro da zona estável de Laubsher.

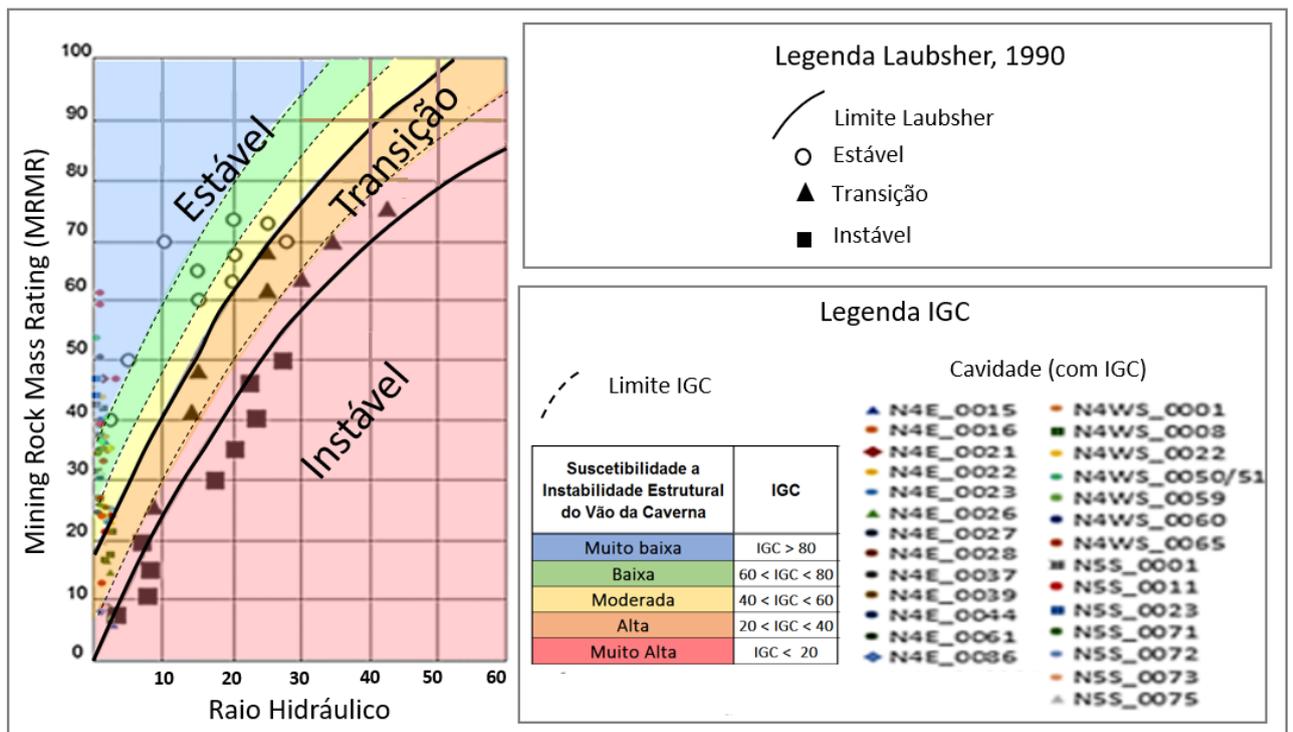


Figura 10 - Ábaco de estabilidade/instabilidade de Laubsher adaptado. Com a adaptação foi possível inferir as curvas das 5 classificações de suscetibilidade a instabilidade do IGC.

Esta checagem da aderência dos pesos propostos através do ábaco de Laubsher adaptado faz parte do fluxo de construção do IGC para a definição dos pesos teóricos a serem efetivamente utilizados. Dos 4 cenários simulados, o cenário 4 foi o mais aderente ao ábaco adaptado, resultando que, dos 63 vãos classificados com o IGC, 29 vãos, ou 46%, ficaram na zona de mesma classificação quando inseridas no ábaco (Tabela 7).

Tabela 7 – Número de vãos classificados com o IGC (pesos propostos) por cenário simulado, e sua aderência ao ábaco de Laubsher adaptado. Notar o cenário 4 como o mais aderente.

Aderência da Laubsher (total 63 vãos)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Nº de vãos aderentes	17	24	26	29

Com a aderência verificada para o cenário 4 os pesos propostos passam a ser considerados pesos teóricos que serão utilizados na continuidade da construção do IGC. A Figura 11 mostra a listagem das cavernas simuladas, comparando as classificações do IGC e de Laubsher. A aderência de 46% entre o IGC e Laubsher adaptado foi considerada como extremamente satisfatória, uma vez que ambas têm a mesma função de classificação de estabilidade, e utilizam o índice RMR de Bieniawski, 1989, porém incluem outras diferentes variáveis específicas e peculiares e, portanto, não se deveria esperar uma aderência mais elevada.

Nº	Cavidade	Vão	Classificação IGC (peso teórico)	Classificação Laubsher
1	N4E_0015	1	Moderada	Baixa
	N4E_0015	2	Muito alta	Muito alta
2	N4E_0016	1	Baixa	Baixa
	N4E_0016	2	Baixa	Baixa
3	N4E_0021	1	Baixa	Muito baixa
	N4E_0021	2	Alta	Moderada
4	N4E_0022	1	Baixa	Baixa
	N4E_0022	2	Moderada	Baixa
	N4E_0022	3	Muito baixa	Muito baixa
	N4E_0022	4	Alta	Alta
	N4E_0022	5	Moderada	Moderada
	N4E_0022	6	Moderada	Baixa
5	N4E_0023	1	Moderada	Moderada
	N4E_0023	2	Alta	Moderada
6	N4E_0026	1	Moderada	Muito alta
	N4E_0026	2	Baixa	Moderada
	N4E_0026	3	Muito baixa	Baixa
	N4E_0026	4	Alta	Alta
	N4E_0026	5	Alta	Alta
	N4E_0026	6	Alta	Muito alta
7	N4E_0027	1	Muito baixa	Baixa
8	N4E_0028	1	Moderada	Moderada
9	N4E_0037	1	Muito baixa	Muito baixa
	N4E_0039	1	Baixa	Baixa
10	N4E_0039	2	Baixa	Muito baixa
	N4E_0039	3	Muito baixa	Baixa
11	N4E_0044	1	Baixa	Baixa
	N4E_0044	2	Baixa	Moderada
12	N4E_0061	1	Alta	Muito alta
13	N4E_0086	1	Moderada	Muito alta
14	N4WS_0001	1	Baixa	Baixa
15	N4WS_0008	1	Baixa	Muito baixa
	N4WS_0008	2	Alta	Alta
	N4WS_0008	3	Baixa	Moderada
	N4WS_0008	4	Alta	Alta
	N4WS_0008	5	Moderada	Alta
16	N4WS_0022	1	Muito baixa	Muito baixa
17	N4WS_0050/51	1	Baixa	Muito baixa
	N4WS_0050/51	2	Moderada	Baixa
	N4WS_0050/51	3	Baixa	Muito baixa
	N4WS_0050/51	4	Muito baixa	Muito baixa
	N4WS_0050/51	5	Muito baixa	Muito baixa
18	N4WS_0059	1	Baixa	Baixa
19	N4WS_0060	1	Baixa	Baixa
20	N4WS_0065	1	Baixa	Moderada
21	N5S_0001	1	Baixa	Baixa
	N5S_0001	2	Muito baixa	Baixa
	N5S_0001	3	Muito baixa	Muito baixa
22	N5S_0011	1	Baixa	Moderada
	N5S_0011	2	Moderada	Moderada
	N5S_0011	3	Moderada	Moderada
	N5S_0011	4	Moderada	Baixa
	N5S_0011	5	Moderada	Baixa
	N5S_0011	6	Moderada	Baixa
	N5S_0011	7	Baixa	Moderada
	N5S_0011	8	Baixa	Moderada
23	N5S_0023	1	Muito baixa	Muito baixa
	N5S_0023	2	Muito baixa	Muito baixa
24	N5S_0071	1	Baixa	Moderada
25	N5S_0072	1	Alta	Muito alta
26	N5S_0073	1	Moderada	Muito alta
27	N5S_0075	1	Moderada	Alta
	N5S_0075	2	Baixa	Baixa

Figura 11 - Listagem das cavernas com a classificação IGC com os pesos mais aderentes ao ábaco de Laubsher adaptado que passam a ser considerados pesos teóricos.

Por fim a Figura 12 resume como ficaram os pesos teóricos após a análise, visando a próxima etapa, de aplicação em campo, no mapeamento das 27 cavernas deste estudo,

realizando o último processo na construção do IGC para definição dos pesos calibrados, aqueles que irão compor a formulação oficial do novo índice.

Valores de Pesos Teóricos para as Classes das Variáveis IGC				
Variável IGC	Classe	Intervalo de Classe		Peso IGC (peso teórico)
Rock Mass Rating (RMR)	Muito Ruim	0	20	0
	Ruim	21	40	21
	Regular	41	60	39
	Bom	61	80	54
	Muito Bom	81	100	60
Raio Hidráulico (RH)	Pequeno	0 m	0,91 m	25
	Médio	0,92 m	1,82 m	15
	Grande	1,83 m	3 m	0
Espessura do Teto (ET)	Pequeno	0 m	3,31m	0
	Médio	3,32 m	7,64 m	3
	Grande	7,65 m	10 m	5
Forma do Teto (FT)	Abóbada			10
	Planar			6
	Abóbada Invertida			0

Legenda: Melhor Classe Média Classe Pior Classe

Figura 12 - Listagem das cavernas com a classificação IGC com os pesos mais aderentes ao ábaco de Laubsher adaptado que passam a ser considerados pesos teóricos.

3.4.3 Pesos calibrados - ajuste após aplicação direta de campo

Este é o último processo do fluxo de construção do IGC, quando se parte para a aplicação direta em campo no mapeamento das cavernas e a classificação dos vãos. O objetivo é checar se com os pesos teóricos definidos até esse estágio da pesquisa conseguem coerência com a realidade, ou precisam ainda ser ajustados.

O mapeamento executado nos 63 vãos das 27 cavernas do estudo mostrou que houve coerência entre a realidade mapeada e as classificações IGC para a maioria das cavernas. Entretanto, foi observado que em 26 vãos de 17 cavernas, o IGC poderia ter sido mais rigoroso em função de aspectos estruturais de fragilidade observados, os quais não refletiram a classificação do índice, ou seja, as classificações ficaram melhores do que deveriam ser.

Em função da necessidade de aumento do rigor da classificação do IGC, foram testadas diversas reduções nos pesos de todas as classes até que os novos resultados das classificações estivessem compatíveis com a realidade do mapeamento de campo (relembrando, que, por definição, baseado em Bieniawski, 1989, a classificação tende a ser pior quanto menor o peso atribuído).

A Figura 13 apresenta a melhor alternativa implementada para os pesos calibrados, tendo sido feita uma pequena redução (entre 15 a 30%) nos valores dos pesos das variáveis RMR, Espessura do Teto e Forma do Teto. A variável Raio Hidráulico não

teve seus pesos alterados devido às reduções testadas não terem contribuído para melhorias na classificação final do IGC e, dessa maneira, essa variável não foi alterada em seus pesos.

Valores de Pesos Teóricos e Calibrados após o mapeamento IGC para as Classes das Variáveis IGC				
Variável IGC	Classe	Peso IGC (peso teórico)	Peso IGC (peso calibrado)	Variação (%)
Rock Mass Rating (RMR)	Muito Ruim	0	0	
	Ruim	21	15	29
	Regular	39	30	23
	Bom	54	45	17
	Muito Bom	60	60	
Raio Hidráulico (RH)	Pequeno	25	25	
	Médio	15	15	
	Grande	0	0	
Espessura do Teto (ET)	Pequeno	0	0	
	Médio	3	2	33
	Grande	5	5	
Forma do Teto (FT)	Abóbada	10	10	
	Planar	6	4	33
	Abóbada Invertida	0	0	
Legenda: Melhor Classe Média Classe Pior Classe				

Figura 13 - Redução nos valores das classes dos pesos teóricos para as variáveis RMR, Espessura do Teto e Forma do Teto, definindo-se o peso calibrado do IGC (linhas em destaque amarelo).

Após a definição dos pesos calibrados, todas as 27 cavernas foram novamente mapeadas e classificadas pelo Sistema IGC, demonstrando uma maior assertividade entre os resultados das classificações e a realidade mapeada. A Figura 14 traz a listagem das 17 cavernas cujas classificações iniciais das suscetibilidades dos vãos não haviam se mostrado adequadas, confirmando o aumento do nível de rigor do IGC, levando todas as classificações para um nível pior do que anteriormente classificado, notando-se inclusive dois vãos realmente críticos do ponto de vista de fragilidade estrutural mapeados, que saíram de uma classificação de alta para muito alta suscetibilidade a instabilidade estrutural.

Nº	Cavidade	Vão	Classificação IGC (peso teórico)	Classificação IGC (peso calibrado)
1	N4E_0016	1	Baixa	Moderada
2	N4E_0022	1	Baixa	Moderada
	N4E_0022	2	Moderada	Alta
	N4E_0022	3	Muito baixa	Baixa
	N4E_0022	4	Alta	Muito alta
	N4E_0022	6	Moderada	Alta
3	N4E_0023	1	Moderada	Alta
4	N4E_0026	2	Baixa	Moderada
	N4E_0026	6	Alta	Muito alta
5	N4E_0027	1	Muito baixa	Baixa
6	N4E_0037	1	Muito baixa	Baixa
7	N4E_0039	3	Muito baixa	Baixa
8	N4E_0044	1	Baixa	Moderada
	N4E_0044	2	Baixa	Moderada
9	N4WS_0008	3	Baixa	Moderada
	N4WS_0008	5	Moderada	Alta
10	N4WS_0022	1	Muito baixa	Baixa
11	N4WS_0050/51	5	Muito baixa	Baixa
12	N4WS_0060	1	Baixa	Moderada
13	N5S_0001	3	Muito baixa	Baixa
14	N5S_0023	1	Muito baixa	Baixa
	N5S_0023	2	Muito baixa	Baixa
15	N5S_0071	1	Baixa	Moderada
16	N5S_0073	1	Moderada	Alta
17	N5S_0075	1	Moderada	Alta
	N5S_0075	2	Baixa	Moderada

Figura 14 - Relação dos 26 vãos das 17 cavernas classificadas dos pesos teóricos sem coerência com a realidade e a classificação com os novos pesos calibrados mais próximos da realidade.

Em resumo, utilizando-se os pesos definitivos calibrados, das 27 cavernas do estudo, 63% tiveram aumento na sensibilidade do índice, e dos 63 vãos classificados, 41% aumentaram seu nível de suscetibilidade a instabilidade estrutural, mais aderente a realidade observada no mapeamento de campo (Figura 15).

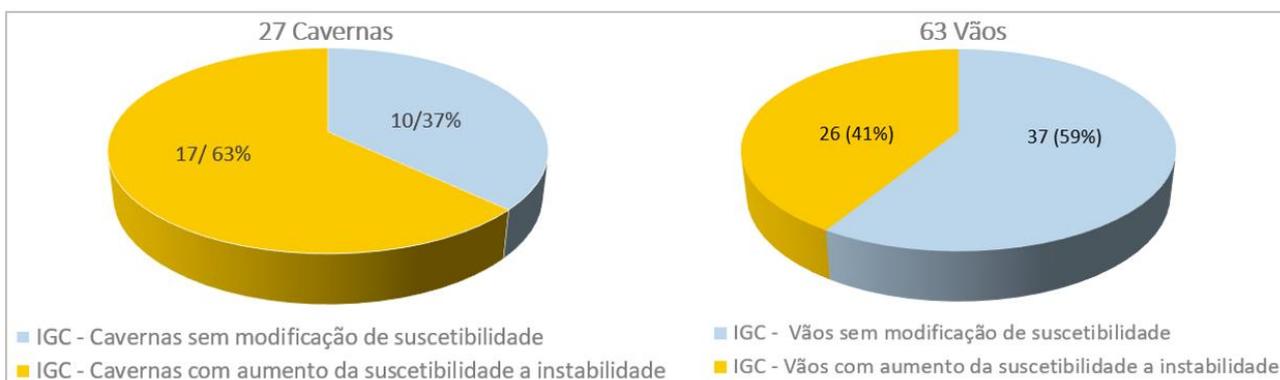


Figura 15 - Com o uso dos pesos calibrados, das 27 cavernas estudadas, 63% tiveram aumento na sensibilidade do índice, e dos 63 vãos classificados 41% aumentaram seu nível de suscetibilidade a instabilidade estrutural, mais coerente com a realidade de campo.

3.5 Fluxograma de Construção do IGC

A Figura 16 mostra o diagrama completo do fluxo de processos utilizado para a construção do IGC e descrita neste capítulo.

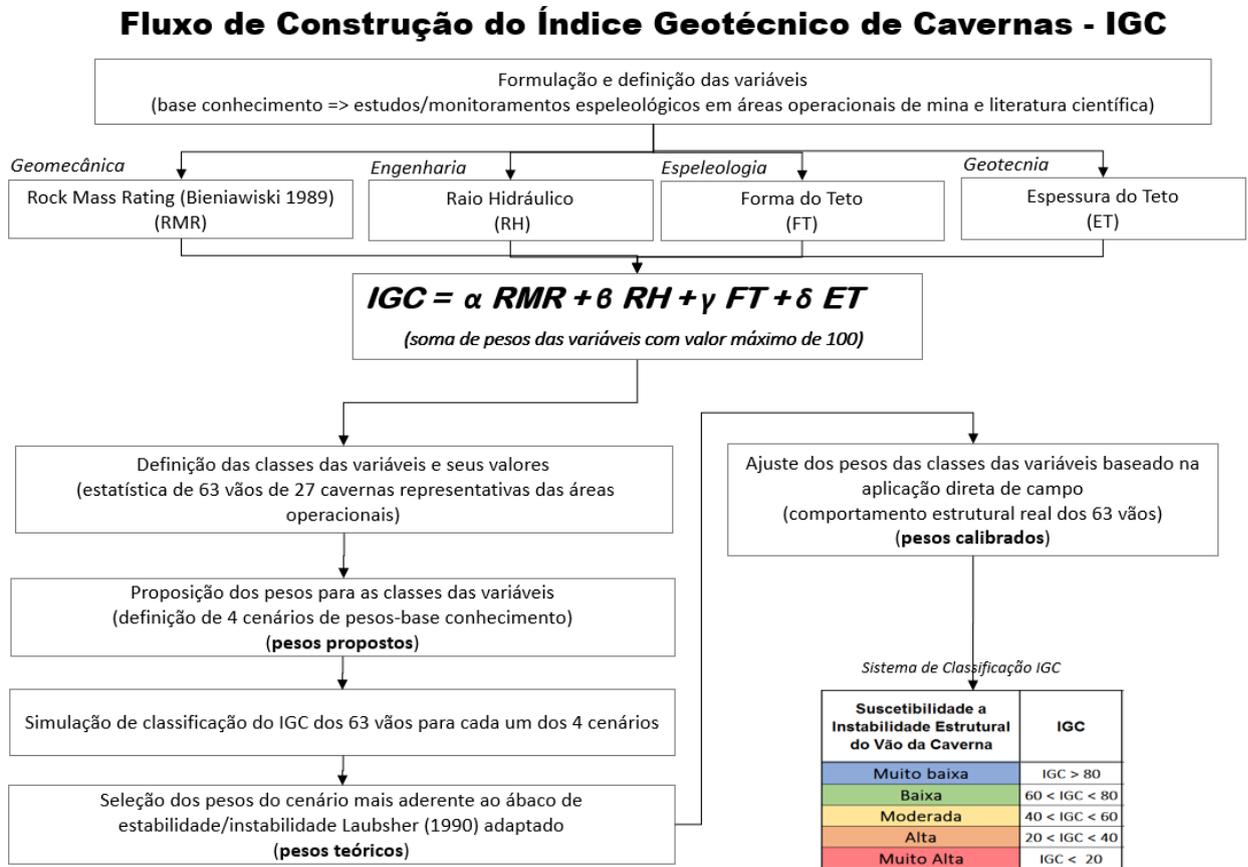


Figura 16 – Fluxo de Construção do Índice Geotécnico de Cavernas – IGC

4. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Para medir o grau de eficiência do índice, todas as 27 cavernas de estudo com seus 63 vãos foram classificadas com o IGC e tiveram acompanhamento de campo contínuo ao longo da pesquisa entre os anos 2015 e 2018, durante regime regular de lavra das minas ao entorno das cavernas. O acompanhamento do meio físico das cavernas foi executado através de monitoramentos fotográficos, sismográficos e principalmente o geoestrutural, sendo este último utilizado para medir o grau de eficiência do IGC, através da observação das alterações físicas das cavernas antes dos colapsos. Importante registrar que o colapso dos vãos objeto de análise dessa pesquisa foram devidamente autorizados pelo IBAMA, os quais passaram a servir de referência para os estudos de geotecnia e mecânica de rochas aplicados a espeleologia. Considera-se, a partir do estudo, que as cavernas da Província de Carajás têm a mesma gênese e características geoestruturais semelhantes. Da mesma forma, a metodologia já vem sendo aplicada a cavidades ferríferas do Quadrilátero Ferrífero – MG, obtendo resultados satisfatórios em termos de eficácia na previsibilidade de deformações geomecânicas.

Durante o processo de aproximação da lavra sobre as cavernas foram registradas alterações físicas, que nesse trabalho são representadas por abatimentos de fragmentos ou blocos, geralmente de forma localizada, ou ainda abertura de fraturas. O conjunto de atividades realizadas nessa fase da pesquisa foram momentaneamente denominadas de supressões assistidas, as quais permitiram avaliar *in loco* e em tempo real o comportamento geotécnico das estruturas físicas espeleológicas submetidas a esforços até o limite de ruptura.

Das 27 cavernas estudadas, os resultados foram os seguintes:

- 8 cavernas (30%) não apresentaram qualquer alteração física e permaneceram estáveis e em monitoramento;
- 11 cavernas (40%) apresentaram colapso direto, ou seja, não mostraram alteração física ou qualquer comprometimento da estabilidade até o momento do colapso, quando as operações ou estavam bem próximas ou por cima da caverna, e;
- 8 cavernas (30%) apresentaram alterações físicas sendo que 2 permaneceram estáveis e em monitoramento e 6 colapsaram ao longo do tempo com a maior aproximação da lavra.

A Figura 17 traz a relação das 27 cavernas estudadas e o gráfico com os respectivos status das alterações físicas frente à aproximação da lavra ao longo da pesquisa. Notar que apenas 8 cavernas apresentaram alterações físicas.

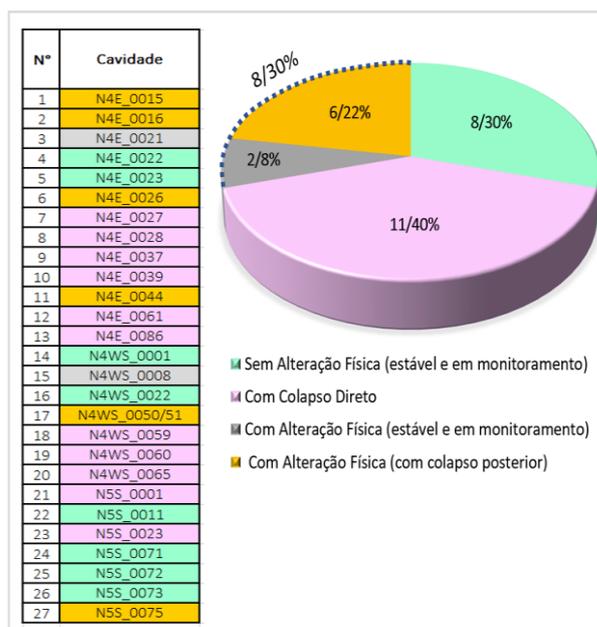


Figura 17 - Relação das 27 cavernas estudadas e o gráfico com os respectivos status das alterações físicas frente à aproximação da lavra.

Na análise do gráfico da Figura 17, chama a atenção o fato de 11 cavernas (40%) terem sofrido colapso direto sem terem apresentado alterações físicas durante a aproximação da lavra, e só foram colapsadas quando as operações estavam em cima da caverna, o que confirma que cavernas ferríferas são, de uma forma geral, muito resistentes. Caso esse montante seja somado aos 30% de cavernas que não sofreram qualquer alteração física, teremos 70% das cavernas mostrando-se altamente resistentes e estáveis, embora se apresentem com operações de lavra em seus entornos.

Para estimar o grau de eficiência do IGC, nesse caso, observou-se que as 11 cavernas com colapso direto detinham 16 vãos. Deste total de vãos, apenas 1 havia sido classificado como de alta suscetibilidade a instabilidade estrutural pelo IGC, porém 15 vãos foram acertadamente classificados como de moderada a muito baixa suscetibilidade, ou seja, a eficiência do índice foi de 94%, indicando, no mapeamento, a baixa possibilidade de ocorrerem alterações físicas nos respectivos vãos (Figura 18).

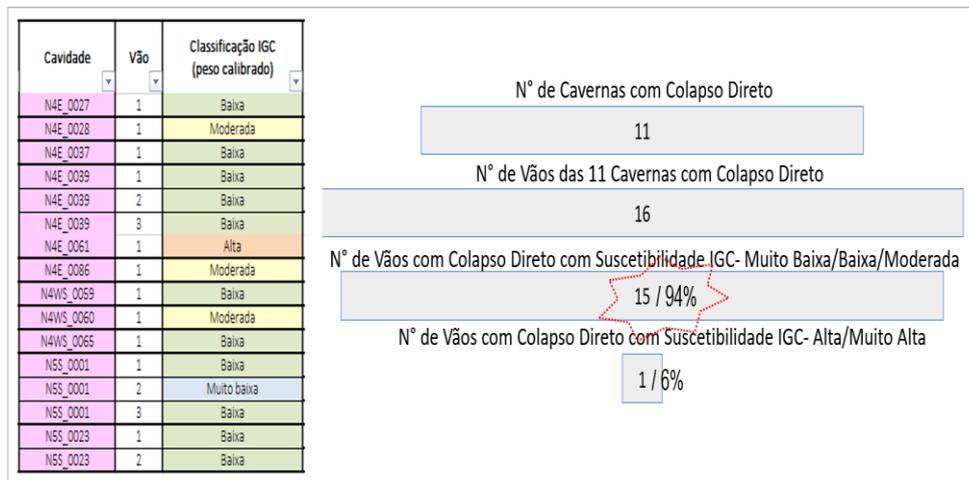


Figura 18 - Relação dos 16 vãos que tiveram colapso direto sem mostrar alteração física durante o avanço da lavra (o que indica alta resistência).

Fazendo-se outra análise, agora levando-se em consideração o total de 63 vãos estudados, os resultados foram os seguintes:

- 27 vãos (43%) não apresentaram qualquer alteração física e permaneceram estáveis e em monitoramento;
- 16 vãos (25%) apresentaram colapso direto, e;
- 20 vãos (32%) apresentaram alterações físicas.

A Figura 19 traz a relação dos 63 vãos estudados e o gráfico com os respectivos status das alterações físicas frente à aproximação da lavra ao longo da pesquisa. Notar que no interior de algumas cavernas nem todos os seus vãos sofreram alterações físicas.

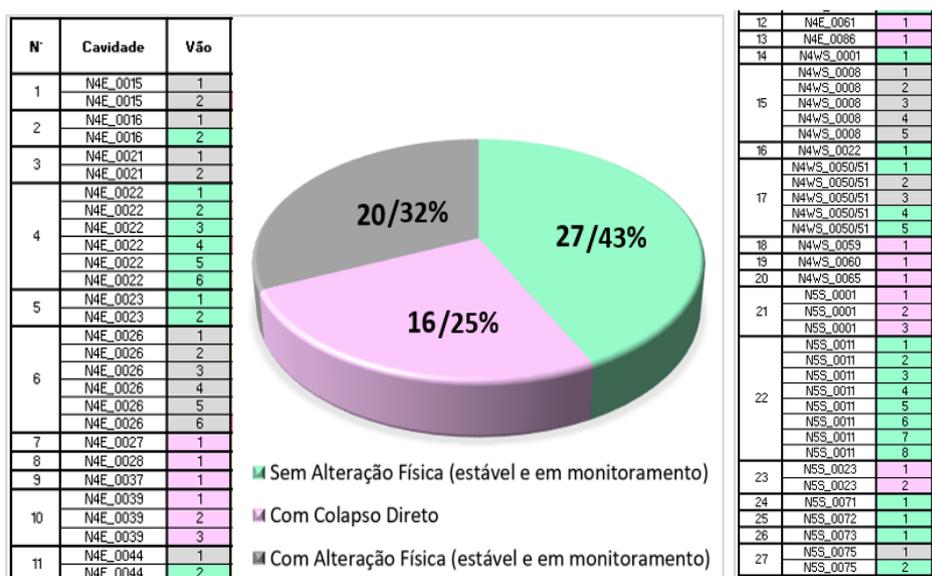


Figura 19 - Relação dos 63 vãos estudados e o gráfico com os respectivos status das alterações físicas frente à aproximação da lavra ao longo da pesquisa.

Para estimar o grau de eficiência, nesse caso, observou-se que as 8 cavernas que apresentaram alteração física possuem um total de 26 vãos, e desses, 20 sofreram efetivamente alterações. Essas alterações físicas, quando contabilizadas, somam um total de 68 registros, ou seja, foram 68 vezes que essas alterações ocorreram repetidamente no interior dos vãos. Desse total de registros, 76% ocorreram em vãos acertadamente classificados com o IGC de Alta a Muito Alta suscetibilidade a instabilidade estrutural, atestando a confiabilidade e o grau de eficiência do método (Figura 20).

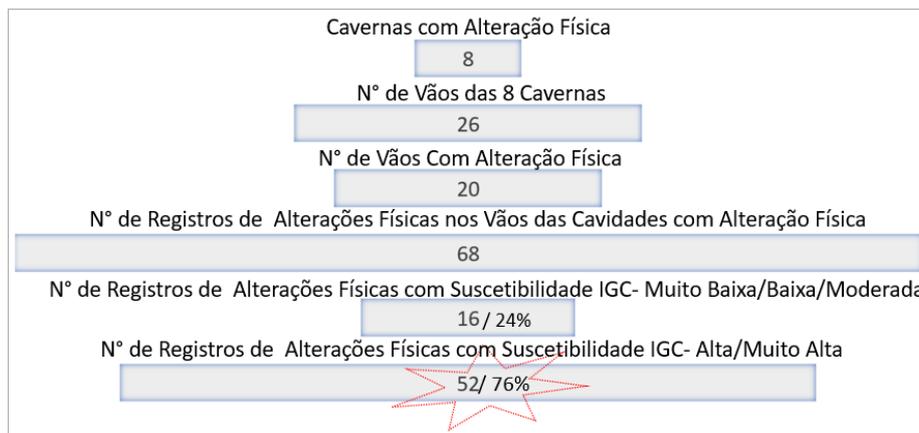


Figura 20 - Gráfico demonstrando que dos 68 registros de alterações físicas que ocorreram em vãos das cavernas do estudo, 76% ocorreram em vãos acertadamente classificados com um IGC de Alta a Muito Alta suscetibilidade a instabilidade estrutural.

A Figura 21 mostra os mapas com a classificação IGC das 8 únicas cavernas que apresentaram alterações físicas do conjunto total de 27 cavernas desse estudo. Os mapas trazem em detalhe a separação dos vãos e os locais onde cada alteração ocorreu.

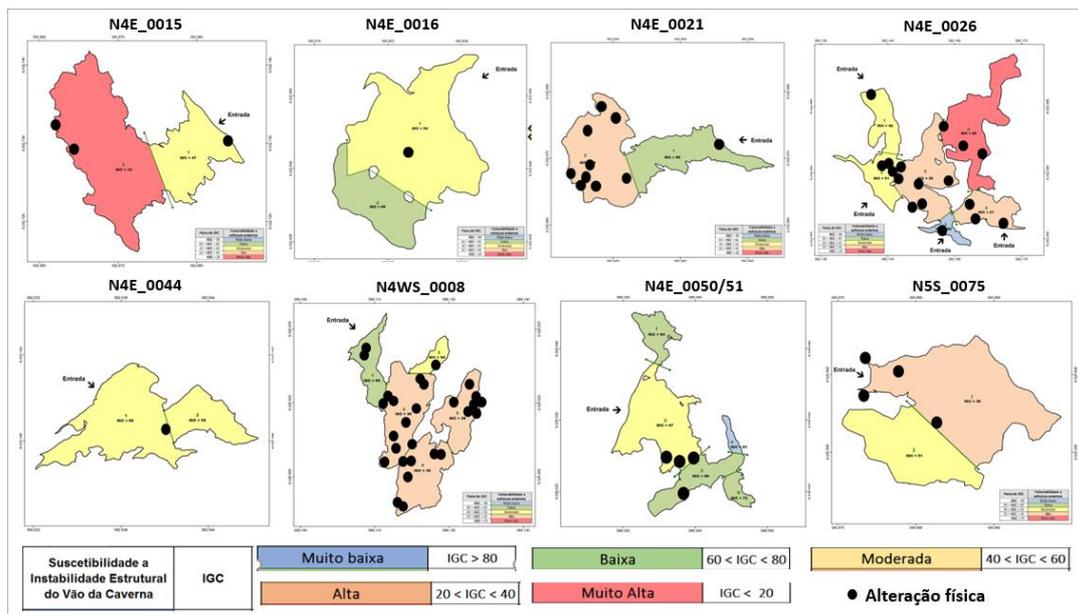


Figura 21 - Mapas com a classificação IGC das 8 únicas cavernas que apresentaram alterações físicas trazendo em detalhe a separação dos vãos e os locais onde cada alteração física ocorreu.

5. CONCLUSÕES

O novo índice de classificação geotécnica (IGC) apresentado nesse trabalho permite combinar conceitos de disciplinas como a geomecânica, engenharia, espeleologia e geotecnia com o empirismo da pesquisa que o tema espeleologia requer. A facilidade de elaboração e aplicação do índice na prática foram objetivos iniciais da pesquisa e alcançados como demonstrado através dos resultados obtidos.

A amostra de 63 vãos de 27 cavernas situadas no entorno das minas em operação permitiu o desenvolvimento de um modelo de avaliação geomecânica específico para cavidades em litologias ferríferas, bem como a otimização dos métodos de lavra e operações de mina, aprimorando os sistemas de previsibilidade de impactos em cavernas e as respectivas análises de riscos pertinentes. A permissão do IBAMA para supressão de 12 cavernas presentes na amostra da pesquisa possibilitou que o monitoramento trouxesse um caráter de ineditismo ao trabalho, facultando análises geotécnicas em tempo real durante as operações de supressão, ora denominadas de supressão assistida.

De uma forma geral, a alta eficiência do índice de classificação geotécnica alcançada tanto na aplicação para cavernas submetidas a esforços de deformação até os limites de ruptura (94%), caso das supressões assistidas, quanto para as cavernas que apresentaram deformações localizadas (76%), demonstraram a acurácia do método como sistema preditivo de análise de impactos e riscos geotécnicos e ambientais.

Dessa forma, a partir dos resultados positivos alcançados, os quais são extremamente motivadores, e pelo pioneirismo do método, é sensato reconhecer que o aprimoramento do IGC requeira o adensamento do banco de dados para sua evolução técnica e correspondente eficácia. Entende-se que, com a frequência de uso e sua aplicação em um maior número de cavernas situadas em áreas de minas em operação, uma abordagem mais específica no campo da geotecnia aplicada à espeleologia será requerida. Entretanto, considera-se para o momento, uma significativa contribuição para a espeleologia e a sustentabilidade na mineração, favorecendo a evolução dos estudos de estabilidade, previsibilidade de impactos e análise de segurança geotécnica de cavernas ferríferas.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Diretoria da Vale S.A. pela oportunidade de realizar esse trabalho, às empresas Tetratex e Spelayon pelas contribuições técnicas e trabalhos de campo, ao IBAMA pelas autorizações e confiança na forma de trabalho estabelecida para evolução do conhecimento e à Universidade Federal de Ouro Preto pelo suporte acadêmico e científico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, R. N.. *Levantamento de Parâmetros Geomecânicos de uma Caverna Natural Subterrânea Utilizando Tecnologias de Laser Scanner 3D e Realidade Virtual*. 2016. 130 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Pós-graduação em Geotecnia. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- AULER A. S., PILÓ, L. B.. Introdução às cavernas em minério de ferro e canga. *O Carste*, Vol. 17(3), p.70-72, 2005.
- BARBOSA, M. R.. *Geofísica Espeleológica - Metodologia para Aplicação de Eletrorresistividade na Investigação de Instabilidade Litoestrutural de Teto em Cavidades Ferríferas. Cavidade N4E-0026, Mina N4EN, Carajás, PA*. 2018. 92p. Tese (Pós-Doutorado), Centro de Pesquisa em Geofísica Aplicada – Departamento de Geologia - Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.
- BARTON, N.R., LIEN, R. and LUNDE, J.. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech*. Vol. 6(4), p. 189-239, 1974.
- BIENIAWSKI, Z. T.. Engineering classification of jointed rock masses. *Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs* 15, p. 335-344, 1973.
- BIENIAWSKI, Z. T.. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering. *John Wiley & Sons*, New York, USA, 251p, 1989.
- BRAGA, A. A. J., FIORI, A.P., GONÇALVES, D.F., DA COSTA, F.R.. Influência estrutural sobre cavernas em formações ferríferas, Carajás-Pa. *Geonomos*, 25(1), 24-39, 2017.

- BRANDI, I., BARBOSA, M., GUIMARÃES, R.. Uso do esclerômetro de Schmidt na avaliação da resistência geomecânica de cavernas naturais subterrâneas em terrenos feríferos, Carajás- PA. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 33, 2015. Eldorado, SP. *Anais*. Campinas: SBE, 2015. p. 627-634.
- BRANDI, I. V., BARBOSA, M. R., CALUX, A. S., ARAUJO, R. N.. Geotecnia aplicada à previsibilidade em Cavernas Naturais Subterrâneas Situadas na Área Afetada por Lavra, Carajás - PA. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 33, 2015. *Anais...* Eldorado, SBE, p. 533-541.
- 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 cavernas naturais subterrâneas existentes no território nacional. Brasília, DF, 7 de novembro de 2008.
- CANIE – Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV) / Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio).
- CARTER, T. G. & MILLER, R. I. Crown Pillar Risk Assessment – Cost Effective Measures for Mine Closure Remediation Planning. *Trans. Inst. Min. Metl*, Vol 104, p.41-57, 1995.
- DARDENNE, M. A.; SCHOBENHAUS, C.. *Metalogênese do Brasil*. Brasília: UnB, 2001. 392p.
- DE PAULA, A. Q.; PIRES, M. A.; CORREA, T. R.; BRANDI, I. V.; LIMA, H. M. Natural caves empirical stability assessments application of Laubscher's diagram and Barton's support graph. In: Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, 2018, Salvador. *Anais do Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas*, 2018.
- DUTRA, G. M. 2013. Síntese dos processos de gênese de cavernas em litologias de ferro. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 32. Barreiras. SBE. *Anais...* p. 415-426.
- DUTRA, G. M. 2017. *Análise de suscetibilidade de duas cavernas em litologia de ferro na Serra do Gandarela: Estudo de caso AP_0009 e AP_0038*. 2017. Dissertação de Mestrado, Departamento de Pós-graduação em Geotecnia. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 93 p.
- EDELBRO, C.; SJOBERG, J.; NORDLUND, E. A quantitative comparison of strength criteria for hard rock masses. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 22, p. 57-68, Abr. 2006.
- FIORE, A. et al. Evaluating the susceptibility to anthropogenic sinkholes in Apulian calcarenites, southern Italy. In: PARISE, M. et al. *Advances in Karst Research: Theory, Fieldwork and Applications (Special Publications)*. London: Geological Society, 4 Jan. 2018. v. 466, p. 381-396.
- HUTCHINSON, D. J.; DIEDERICHS, M. S. Cablebolting in Underground Mines. *Richmond: BiTech Publishers Ltd.*, 1996.
- IBAMA nº 887. Delibera sobre o patrimônio espeleológico nacional e delimita a área de influência das cavernas naturais. Brasília, 1990. Disponível em www.ibama.gov.br. Acesso em 23 Abril. 2018.
- ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. 2020. Anuário estatístico do patrimônio espeleológico brasileiro 2019.
- ISRM - International Society of Rock Mechanics. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 15 (6): p. 319-368, 1978.

- ISRM - International Society of Rock Mechanics. Basic geotechnical description of rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 18: 85- 110, 1981.
- JORDÁ-BORDEHORE, L. Stability assessment of natural caves using empirical approaches and rock mass classifications. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 50, n. 8, p. 2143-2154, Aug. 2017.
- JUSTO, A. P.; LOPES, E. S. Serra dos Carajás. Folha SB.22-Z-A-II., 2014.
- LACERDA, S. G. et al. Caracterização geomecânica do maciço rochoso da Gruta dos Viajantes, Parque Estadual do Ibitipoca, sudeste de Minas Gerais. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 34., 2017, Ouro Preto. *Anais...* Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2017. p. 261-275.
- LAUBSCHER, D. H. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 90, n. 10. P. 257-273, out. 1990.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. Resolução CONAMA n° 347, de 10 de setembro de 2004. Dispõe sobre a proteção do Patrimônio Espeleológico. Diário Oficial da União, 13 de setembro de 2004.
- MILNE, D. M. *Underground design and deformation based on surface geometry*. Thesis [Doctor of Philosophy] - University of British Columbia, Vancouver, Jun. 1997.
- NOCE, T. S.. *Proposta de Zoneamento Geotécnico de Cavernas Naturais em Litologias Ferruginosas*. 2016. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Minas, UFOP, Ouro Preto. 203p.
- PARISE, M.; LOLLINO, P.. A preliminary analysis of failure mechanisms in karst and man-made underground caves in Southern Italy. *Geomorphology*, v. 134, n. 1-2, p. 132-143, Jul. 2011.
- PECK, W. A.; SAINSBURY, D. P.; LEE, M. F. The importance of geology and roof shape on the stability of shallow caverns. *Australian Geomechanics Journal*, v. 48, n. 3, p. 1-14, Sep. 2013.
- PILÓ, L. B.; AULER, A.; MARTINS, F. Carajás National Forest: Iron ore plateaus and caves in southeastern Amazon. *Landscapes and Landforms of Brazil*. Springer, Dordrecht, 2015. p. 273-283.
- RENÓ, T. S. N. *Proposta de zoneamento geotécnico de cavidades naturais em formações ferríferas*. 2016. 203 f. Dissertação [Mestrado em Engenharia Mineral] - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- SÁNCHEZ, M. A. et al. Geological risk assessment of the area surrounding Altamira Cave: A proposed Natural Risk Index and Safety Factor for protection of prehistoric caves. *Engineering Geology*, v. 94, p. 180-200, 28 ago. 2007.
- SBE – Sociedade Brasileira de Espeleologia. 2018. CNC - Cadastro Nacional de Cavernas do Brasil. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/cnc/>. Acesso em 20 de Mar. 2018.
- SIEGEL T. C. e MCCRACKIN, D. W. 2001. Geotechnical characterization and modeling of a shallow karst bedrock site. *8th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*, Louisville KY, 2001.
- TERZAGHI, K. Rock Defects and loads on Tunnel Supports. Massachusetts: Harvard University, 1949.
- VALENTIM, R. F.. *Classificação geomecânica da Caverna Natural subterrânea BRU_0005, município de São Gonçalo do Rio Abaixo, MG*. 2016. Dissertação de Mestrado, Departamento de Pós-graduação em Geotecnia. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto. 152 p.

VALENTIM, R.F. & OLIVITO, J.P.R. (2011). Unidade Espeleológica Carajás: Delimitação dos Enfoques Regional e Local, conforme Metodologia da IN-02/2009 MMA. *Espeleo-Tema* Vol. 22(1), p.41-60. SBE, Campinas, SP.