

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/772

# Correlação Entre Diferentes Métodos de Classificação de Maciços Rochosos no Contexto do Quadrilátero Ferrífero

Alice Ferreira Franco dos Santos  
Geóloga, Tractebel, Belo Horizonte, Brasil, [aliceffranco2@gmail.com](mailto:aliceffranco2@gmail.com)

Marcio Fernandes Leão  
Geólogo-Geotécnico, Tractebel/UFV, Belo Horizonte, Brasil, [marciotriton@hotmail.com](mailto:marciotriton@hotmail.com)

Jorge Roncato  
Geólogo, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, [roncato@ufmg.br](mailto:roncato@ufmg.br)

**RESUMO:** A classificação de maciços rochosos é uma das atividades fundamentais para o estudo de viabilidade de qualquer obra de engenharia que exigem competência geotécnica desses materiais. O Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski, introduzido em 1973 e refinado em 1989, é um método amplamente utilizado para essa classificação. No entanto, é altamente discutível quanto a sua validade para maciços brandos, e por isso, ao longo dos anos, foram propostos diferentes ajustes à sua aplicação. Entretanto, já houve adaptações da classificação RMR quanto ao grau de intemperismo (RMR Aw e Weak Rocks), crucial em regiões tropicais e que geram produtos altamente intemperizados. O artigo objetiva analisar a aplicabilidade dos supracitados ajustes ao RMR 89 para taludes em rochas intemperizadas, por utilizando como estudo de caso uma cava de mineração, localizada no estado de Minas Gerais. Foram calculadas as classes geomecânicas a partir de quatro sistemas em litotipos aflorantes na região, sendo elaborados mapas geomecânicos a fim de se comparar a distribuição espacial das classes na área da cava. Esse estudo salienta a importância da análise crítica dos profissionais envolvidos para ajustes no método RMR, diante das distintas condições geotécnicas e geológicas, particularmente crucial em ambientes tropicais e em maciços rochosos brandos.

**PALAVRAS-CHAVE:** RMR, Quadrilátero Ferrífero, Weak Rocks, Intemperismo

**ABSTRACT:** The classification of rock masses is one of the fundamental activities for studying predictions of any engineering work that unlocks the geotechnical competence of these materials. Bieniawski's Rock Mass Rating (RMR), introduced in 1973 and refined in 1989, is a widely used method for this classification. However, the method is highly debatable regarding its validity for soft masses, and therefore, over the years, different adjustments to its application have been proposed. However, there have already been adaptations of the RMR classification regarding the degree of weathering (RMR Aw and Weak Rocks), crucial in tropical regions and which generate highly weathered products. The objective article analyzes the applicability of the aforementioned adjustments to RMR 89 for slopes in weathered rocks, using a mining pit, located in the state of Minas Gerais, as a case study. The geomechanical classes were calculated from four systems in lithotypes outcropping in the region, and geomechanical maps were prepared in order to compare the spatial distribution of the classes in the pit area. This study highlights the importance of critical analysis by the professionals involved to adjust the RMR method, given the different geotechnical and geological conditions, particularly crucial in tropical environments and soft rock masses.

**KEYWORDS:** RMR, Quadrilátero Ferrífero, Weak Rocks, Weathering

## 1 INTRODUÇÃO

A exploração das jazidas de ferro em Minas Gerais começou após o declínio da mineração de ouro, no século XIX e hoje é uma das principais atividades econômicas do estado, representando 60% de toda a

extração de ferro do Brasil. Para tal, a compreensão dos maciços rochosos alvos dessas explorações são fundamentais para que a lavra seja ao mesmo tempo economicamente viável e segura.

A província metalogenética do Quadrilátero Ferrífero (QF), que é o maior produtor nacional de minério de ferro, está localizada ao sul do Cráton do São Francisco (ALMEIDA, 1977) e compreende um embasamento granítico-gnáissico coberto por um greenstone belt Arqueano, pertencente ao Supergrupo Rio das Velhas, e metassedimentos de plataforma proterozóica pertencentes ao Supergrupo Minas (DORR, 1969). Sobretudo as formações ferríferas da Formação Cauê (Grupo Itabira, Supergrupo Minas; DORR, 1969), abrigam um conjunto de jazidas de minério de ferro de classe mundial, que representam grande importância econômica para a região, sendo exploradas por diversas mineradoras (ROSIÈRE ET AL., 2008).

As classificações de maciços rochosos são ferramentas cruciais em estudos prévios em maciços rochosos devendo ser atualizados conforme o nível de conhecimento aumenta. Essas classificações utilizam metodologias que buscam identificar os parâmetros que influenciam o comportamento dos maciços, dividindo-os em classes com comportamentos similares. O Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski, proposto em 1973 e refinado em 1989, é o método mais utilizado para essa classificação, embora seja limitado para rochas brandas e por esse motivo desde a sua criação passou por diversos ajustes.

De acordo com International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1981) o termo rochas fracas ou brandas (Weak Rocks) refere-se às rochas que variam de extremamente fracas, com grau de resistência R0 a rochas fracas, com grau de resistência R2.

Nesse contexto, o presente artigo visou analisar a aplicabilidade de diferentes Classificações Geomecânicas na avaliação geológico-geotécnica de um talude composto por rochas em distintos graus de intemperismo, comparando classificações geomecânicas. Para isso, foram consideradas as seguintes classificações: RMR de Bieniawski (1989); a versão ajustada RMR (2011); a adaptação em relação ao grau de intemperismo, RMR Aw, proposta por Santos et al. (2012); e a classificação Weak Rocks por Martin & Stacey (2018).

## 2 METODOLOGIA

A fim de obter uma comparação da aplicabilidade dos Sistemas de Classificação de maciço rochoso para as rochas de uma cava no Quadrilátero Ferrífero, foram utilizados o método RMR Básico (89) e três dos ajustes propostos a ele, ou seja: o RMR (2011), o RMR Aw (2012) e o mais recente dentre eles, o método adicional para classificação de rochas brandas, Weak Rocks (2018). O presente trabalho foi desenvolvido em quatro etapas principais, explanadas a seguir.

### 2.1 Levantamento e tratamento dos dados prévios

A partir dos dados obtidos através do mapeamento de campo realizado na área de estudo, tem-se informações coletadas em 748 pontos (Santos, 2022). A partir desses dados, foram feitas interpretações litológicas, com uma estratigrafia bem definida sabe-se que a cava em análise é composta por rochas pertencentes ao Supergrupo Minas, contudo nas adjacências são descritas também rochas do Grupo Nova Lima Indiviso.

Na porção leste/nordeste da cava, são encontrados quartzitos sericíticos de granulometria variada da Formação Moeda. Em contato gradual, as rochas da Formação Batatal aparecem caracterizadas por filitos sericíticos e dolomíticos, ambas as formações pertencente ao Grupo Caraça. Já na porção centro-leste, em contato discordante com as rochas da Formação Batatal, ocorrem itabiritos e hematititos da Formação Cauê.

Rochas de natureza ígnea também são observadas, no entanto, de forma restrita, alinhadas a condicionantes estruturais, as metavulcânicas ocorrem paralelamente ao bandamento regional dos itabiritos e hematititos da Formação Cauê e as máficas intrusivas em formas de diques, perpendiculares às hospedeiras (SUCKAU ET AL., 2005).

Foram realizadas ainda medidas de estruturas geológicas em micro e macro escala (lineações minerais, foliações, dobras e fraturas), além de dados geomecânicos provenientes de análise tátil visual, incluindo resistência, intemperismo, índice Jv, espaçamento e condições das descontinuidades, saturação do maciço, anisotropia, erodibilidade e textura. A caracterização dos pontos de campo foi feita usando o método sugerido por Martin & Stacey (2018), adaptando as classificações do ISMR (1981) propostas pela BVP

(2012) (Figura 1). As rochas com grau de resistência igual ou superior a R2+ foram analisadas com base nos parâmetros da classificação RMR de Bieniawski, enquanto para as rochas brandas, com resistência inferior à R2+, foram considerados parâmetros como textura, erodibilidade, anisotropia, resistência da rocha, grau de alteração e porosidade.

Adapted from ISRM

Strength	Description	UCS (MPa)		Field assessment						
		(MPa)	(MPa)	Hammer	p-knife scratch	p-knife blow	p-knife blade scratch	Nail scratch	Finger pressure	
R6	Extremely strong	>250	>10	Chipped	No	No	No	No	No	
R5	Very strong	250–100	4–10	Breaks with difficulty after several blows	No	No	No	No	No	
R4	Strong	100–50	2–4	Breaks after several blows	Superficial scratch	–	No	No	No	
R3	Moderately strong	50–25	1–2	Breaks with difficulty after one blow	–	–	Very difficult	No	No	
R2	R2+ (concrete)	25–10	–	Breaks after one blow	Scratches	Small point	Difficult	No	No	
	R2- (soil-cement)	10–5	–	Fragments with one blow	–	Large point	Produces powder	Superficial scratch	No	
R1	R1+ (brick)	5–3	–	–	Deep scratch	–	Easily produces powder in great amount	Scratches	Breaks locally	
	R1- (saprolite)	3–1	–	Crumbles	Cuts apart	Penetrates	Peels	Penetrates	Break corners	
R0	Extremely soft	1.0–2.5	–	–	–	Penetrates	–	Cuts	Crumbles	

**Consistence field test method**

- 1– Reaction to the geologist + hammer blow
- 2– Reaction to scratch with pocket knife tip
- 3– Reaction to blow with pocket knife tip
- 4– Reaction to scratch with pocket knife blade
- 5– Reaction to scratch with finger nail
- 6– Reaction to finger pressure

**Reaction index**

	High
	Medium
	Low

Figura 1. Classificação de resistência modificado do ISRM (Fonte: BVP, 2012)

O valor do RQD para os maciços com resistência inferiores a R2+ foi obtido a partir da correlação proposta por Palmstrom (1982). Os espaçamentos das discontinuidades foram obtidos em termos absolutos (em centímetros) a partir da média dos espaçamentos de cada família de discontinuidade. Outros parâmetros foram obtidos conforme recomendações do ISRM (1981), Bieniawski (1989) e Martin e Stacey (2018).

Por esse motivo, para esse trabalho, as rochas com resistência inferiores a R2+, que não tinham informações suficientes para o cálculo do RMR 89, 11 e Aw, foram atribuídos os parâmetros mais baixos de acordo com a classificação de Bieniawski, visando obter os menores valores possíveis de RMR e, conseqüentemente, as menores classes. Quanto ao grau de saturação do maciço, considerou-se completamente seco para todos esses pontos, dado que a maioria dos pontos de campo apresentava essa condição.



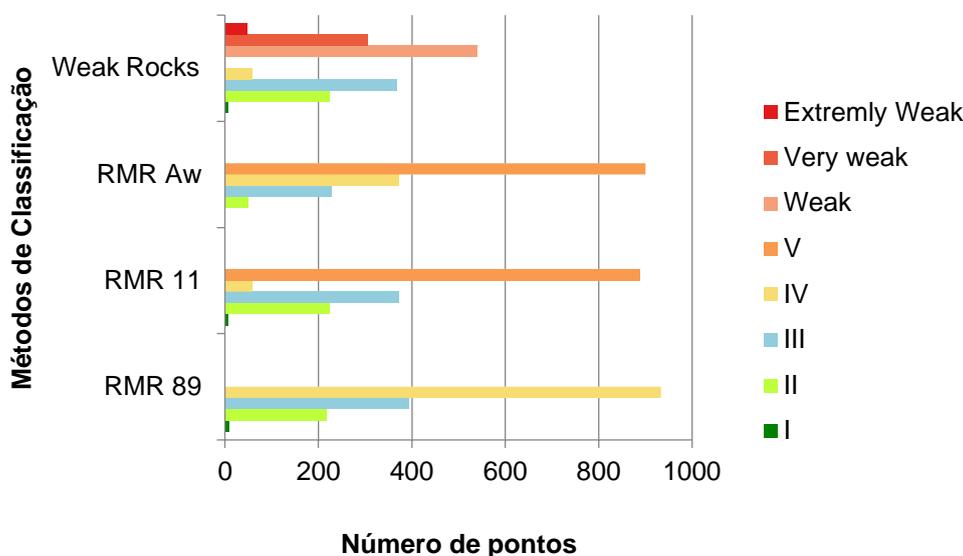


Figura 3. Gráfico em barras com o quantitativo de cada classe aflorante na Cava Tamanduá de acordo com cada um dos quatro métodos utilizados.

De maneira geral, a Classe I ocorre de forma restrita em todos os quatro métodos analisados, sendo mais prevalente no RMR (89), abrangendo 0,05% de toda a área, e menos representativa no RMR (Aw), com 0,01%. Tanto o RMR (11) quanto o Weak Rocks totalizam 0,04% para essa classe. Os mapas geomecânicos destacam a baixa representatividade desses maciços na área da cava, sugerindo que eles poderiam ser tratados junto com a Classe II.

Já a Classe II apresenta discrepância entre os métodos, ocupando aproximadamente 9,00% da área da cava Tamanduá nos métodos RMR (89), RMR (11) e Weak Rocks, mas apenas 2,98% no RMR (Aw). Esses corpos estão geralmente localizados na porção centro-leste da cava, em formas estiradas na direção NE-SW, coincidindo com as posições das rochas intrusivas.

A Classe III, de forma semelhante à Classe II, mostra pequenas variações entre os métodos RMR (89), RMR (11) e Weak Rocks, ocupando respectivamente 17,88%, 16,31% e 21,76% da área, enquanto no RMR (Aw) essa classe ocupa apenas 9,00%. Os maciços Classe III apresentam-se mais dispersos ao longo da cava, com concentrações maiores nas porções leste e oeste, próximas dos quartzitos e das rochas ferríferas.

A Classe IV apresenta grandes variações entre os métodos, sendo predominante em toda a área no RMR (89), ocupando cerca de 73% da cava. No entanto, no RMR (Aw), as rochas de Classe IV limitam-se ao entorno das classes superiores, totalizando cerca de 17% da área. Nos métodos RMR (11) e Weak Rocks, a área correspondente é de apenas 4%, restrita a pequenas porções associadas à Classe II.

A Classe V ocorre de forma variada entre os sistemas de classificação. No RMR (89) e no Weak Rocks, é praticamente inexistente, ocupando uma área de 0,08% da cava em ambos os métodos. Já no RMR ajustado por Bieniawski em 2011 e no RMR (Aw), a Classe V predomina na cava, representando, respectivamente, 71,11% e 71,35% da área, distribuída ao longo de toda a área.

O método adicional proposto por Martin & Stacey (2018) subdivide os litotipos aflorantes na Cava Tamanduá em mais três domínios: Weak, Very Weak e Extremely Weak, que juntos representam a maior parte da área de estudo, totalizando aproximadamente 70%. As rochas classificadas como Weak predominam, ocupando 43,43% da cava, seguidas das Very Weaks com 18,81% e Extremely Weak, restritas a apenas 3,38%, localizadas principalmente na porção NE, coincidindo com as rochas filíticas da Formação Batatal.

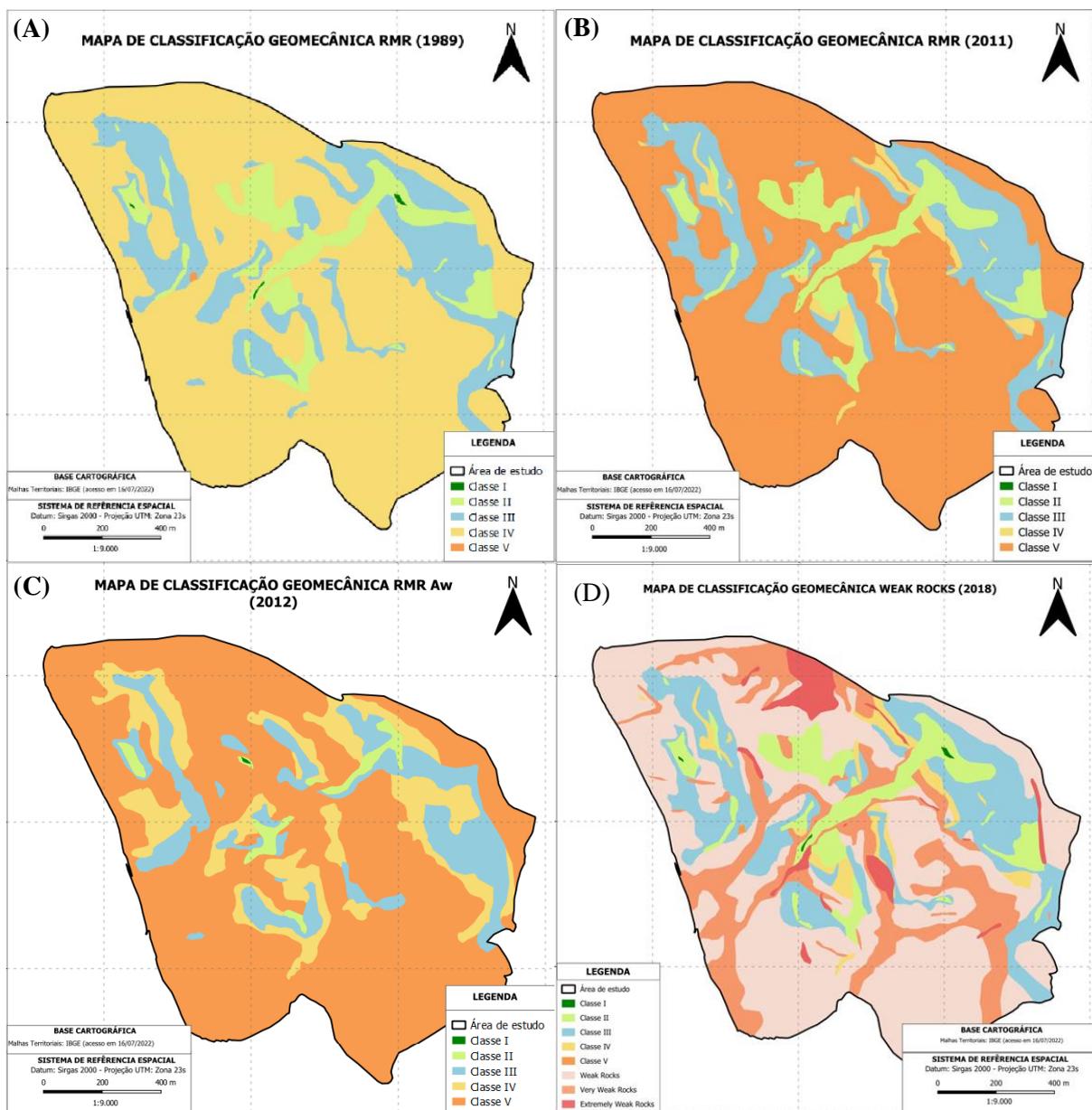


Figura 4. – Mapas de classificação geomecânica (A) RMR 1989, (B) RMR 2011, (C) RMR Aw 2012 e (D) Weak Rocks (2018)

Ao analisar os ajustes sugeridos ao método de classificação de maciços proposto por Bieniawski (1989), aplicados à realidade das rochas intemperizadas presentes na cava de estudo, foi possível observar que o método pioneiro, proposto por Bieniawski em 1989, de fato, apresenta-se pouco condizente com a realidade das rochas da região, sobretudo das rochas brandas. O que respalda a importância de utilizá-lo com cautela e da necessidade dos ajustes a depender do tipo de rocha e do empreendimento a ser realizado.

Para os ajustes utilizando dados contínuos de espaçamento e RQD, como proposto por Bieniawski (2011), nota-se uma melhor distribuição das classes ao longo dos pontos analisados, mostrando-se como um método intermediário entre todos os outros analisados. Em alguns pontos, o RMR 2011, mostrou-se bastante semelhante ao RMR ajustado segundo o grau de intemperismo, proposto por Santos et. al (2012), principalmente quando aplicado a rochas com parâmetros geomecânicos inferiores. No entanto, o RMR Aw penaliza drasticamente os valores dos maciços de melhores qualidades, apresentando as menores porcentagens de Classe I e Classe II dentre todos os analisados, mostrando-se altamente conservador.

Por fim, o método adicional proposto dos Martin & Stacey (2018), evidenciam ser o mais condizente com a realidade da cava, uma vez que por meio de uma distribuição mais heterogênea entre as classes aflorantes na área, permite uma maior discretização dos maciços brandos, subdividindo-os em três novas

classes, as quais possibilitam melhor uma caracterização e, conseqüentemente, melhores soluções de engenharia, de modo a garantir a segurança da obra.

#### 4 CONCLUSÕES

De forma geral, nota-se que o talude estudado apresenta rochas com elevados graus de alteração e de intemperismo, sendo conseqüentemente, penalizado em classificações geomecânicas que não consideram, em maior amplitude, o efeito do intemperismo.

O método de classificação de maciços de Bieniawski (1989) revelou que não representa adequadamente as condições locais, especialmente para as rochas brandas. O RMR ajustado por Bieniawski (2011) proporcionou uma melhor distribuição das classes, mostrando-se intermediário entre os métodos analisados, com bons resultados para rochas resistentes. No entanto, o RMR Aw (2012) penaliza severamente os maciços de melhor qualidade, mostrando-se conservador e apresentando as menores porcentagens de Classe I e II. Por fim, o método de Martin & Stacey (2018) foi o mais condizente com a realidade da cava, permitindo uma melhor discretização dos maciços brandos e proporcionando soluções de engenharia mais seguras.

Ressalta-se que para melhor análise e compreensão dos dados, sobretudo nessa área, mais trabalhos com esse propósito devem ser considerados, ou seja, com novos métodos de obtenção de dados, podem incrementar a pesquisa de forma a tornar mais representativo a realidade aflorante no local. Apesar da boa aderência do método Weak Rocks esse ainda possui dificuldade na obtenção de parâmetros principalmente quanto a influência da cimentação e durabilidade, por exemplo.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F. F. M. et al. (1977) *Províncias Estruturais Brasileiras*. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, Campina Grande. Atas. Campina Grande: Sgn, p. 363-391.
- Bieniawski, Z. T. (2011) *Misconceptions in the applications of Rock Mass Classifications and their Corrections*. ADIF Seminar on Advanced Geotechnical Characterization for Tunnel Design, Madrid, Espanha.
- Bieniawski, Z. T. (1989) *Engineering Rock Mass Classification*. New York: John Wiley. 248p.
- Bieniawski, Z. T. (1973) *Engineering Classification of Jointed Rock Masses*. The Civil Engineer in South Africa, p. 335-343.
- BVP. (2012) *Modelo Geomecânico da Porção Oeste da Cava Norte da Mina de Fábrica Nova – Complexo Mariana*. Mariana-MG. VL119.15-10-E-CA-RT-07-003, Setembro, Vale.
- Dorr, II J.V.N., Gair J.E., Pomerene J.G., Rynearson G.A. (1957) *Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero*. v. 81. Brasília, Divisão de Fomento da Produção Mineral.
- International Society for Rock Mechanics. Rock characterization testing & monitoring – ISRM suggested methods. London: Ed. E. T. Brown, Pergamon Press, 1981. 211 p apud AZEVEDO, I.C.D.; MARQUES, E.A.G. Introdução à Mecânica das Rochas. Ed. UFV, 2001.
- Martin D., Stacey p. (2018) *Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks*. CSIRO, A Balkema Book (ed).p.415.
- Palmstrom, A. (1982) *The volumetric joint count-a useful and simple measure of the degree of jointing*. In: Proceedings of the Fourth International Congress IAEG, New Delhi, vol. V, p. 221-229.
- Santos, Y.L. et al. (2012) *Proposta de índice de ajuste (Aw) utilizando o grau de intemperismo no sistema RMR (Rock Mass Rating) de classificação do maciço rochoso*. CBMINA.
- Suckau, V.E., Suíta, M.T.F., Zapparolli, A.C.; Spier, C.A., Ribeiro, D.T. (2005) *Transitional Pyroclastic, Volcanic-Exhalative rocks to iron ores in the Cauê formation, Tamanduá and Capitão do Mato Mines: an overview of metallogenetic and tectonic aspects*. Simpósio sobre o Craton do São Francisco, Anais. SBG.