

Proposição de Adequação da Equação de Correlação RMR-Q para o Quadrilátero Ferrífero

Alberto Ferreira Amaral Junior

VOGBR Recursos Hídricos e Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, aamaral@vogbr.com.br

Yan Lucas de Oliveira Pereira dos Santos

VOGBR Recursos Hídricos e Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, ysantos@vogbr.com.br

Jhoan Panitz Paredes

TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Brasil, jpanitz@tec3engenharia.com.br

Sandro Sander Chaves

Anglo Gold Ashanti, Belo Horizonte, Brasil, sschaves@anglogoldashanti.com.br

Ângelo Almeida Zenóbio

F&Z Consultoria e Projetos, Belo Horizonte, Brasil, azenobio@fzprojetos.com.br

RESUMO: O presente artigo tem por objetivo principal apresentar uma proposição de ajuste da equação de correlação $RMR \times Q'$, para utilização em maciços do Quadrilátero Ferrífero (QF). Além de avaliar a correlação clássica $RMR_{89} \times Q'$, avalia adicionalmente duas outras correlações com Q' (Barton *et al*, 1974), sejam elas, o RMR_{89} ajustado pelo índice A_w (Santos *et al*, 2012) e a atualização RMR_{2011} de Bieniawski. Para este fim, realizou-se a classificação geomecânica por ambas as metodologias, utilizando-se dados de onze minas localizadas no QF, sendo avaliado um total de 1.950 pontos onde foram levantados os parâmetros requeridos por estes sistemas, tais como espaçamento de descontinuidades, RQD entre outros. Nestes pontos, em sua grande maioria, os resultados indicam classes geomecânicas de baixa qualidade (muito pobres), onde a classificação original de Bieniawski não apresenta boa aderência na tentativa de definir horizontes constituídos por classes de maciço muito pobre. Sendo assim, foi aplicado o tratamento pelo índice de ajuste A_w e também, alternativamente, a classificação de RMR_{2011} , na tentativa de se obter resultados mais coerentes com as classes de maciço que foram observadas na etapa de caracterização em campo. Em termos de classificação geomecânica, somente a RMR_{89} não obteve bons resultados. Os resultados das correlações indicaram uma boa aderência para as metodologias testadas (acima de 86%), inclusive RMR_{89} . As regressões de melhor ajuste foram às baseadas em equações de potência, pois as logarítmicas não conseguem descrever com uma assertividade aceitável o comportamento de maciços são e alterados por uma mesma equação. Os maciços muito fraturados a fraturados apresentaram as maiores dispersões, pois em todas as metodologias analisadas são atribuídas elevadas possibilidades de variações nas pontuações às características das juntas. Devido ao fato do índice Q' não levar em consideração características da matriz rochosa, e consequentemente a alteração intempérica, os resultados da correlação com $RMR_{89_{A_w}}$ foram os que obtiveram maior dispersão ($R^2=92\%$) entre as metodologias de classificação avaliadas.

PALAVRAS-CHAVE: Classificação Geomecânica, Índice de Ajuste, $RMR \times Q$.

1 INTRODUÇÃO

A classificação geomecânica de maciços é de suma importância na mineração para a definição dos diferentes comportamentos geomecânicos dos materiais envolvidos nas lavras, sejam elas a céu aberto ou subterrânea. Estes diferentes tipos de comportamentos implicam em diferentes dimensionamentos, seja em termos de ângulos dos taludes ou de aberturas subterrâneas, podendo assim influenciar diretamente na relação estéril-minério e por consequência na viabilidade do empreendimento.

Uma das principais metodologias utilizadas para a classificação de maciços e particularmente para taludes de cava a céu aberto é o Sistema RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski (1976, 1989 e 2011), sendo também muito utilizada o sistema Q (Barton *et al.*, 1974) para definição de tratamentos a serem empregados em aberturas subterrâneas.

Hoje, a maioria das minas do Quadrilátero Ferrífero (QF) é a céu aberto, onde se lavram rochas brandas (de baixa resistência geomecânica), sendo mais frequentemente empregada a classificação RMR. Porém, estão cada vez mais em foco os estudos para as escavações subterrâneas, utilizadas como método de lavra (para atingir maiores profundidades onde a lavra a céu aberto fica economicamente inviável), como também alternativas para despressurização de maciços saturados ou como galerias de vertedouros de barragens, onde a metodologia de Barton é bastante empregada.

Diante da perspectiva de maior utilização do Sistema Q, a equação de correlação entre as

classificações RMR e a Q torna-se bastante importante, pois traz a possibilidade de utilização da grande gama de informações que foram levantadas com base no sistema RMR.

Originalmente, na tentativa de estabelecer uma correlação entre as duas metodologias, Bieniawski (1989) propôs uma equação de correlação, a qual foi posteriormente revisada por Barton em 1995. Na Figura 1 são apresentadas as duas equações correlacionadas aos suportes necessários (Barton, 2002).

Palmstrom & Broch (2006), comentam que muitas vezes os engenheiros estão tão interessados em usar expressões matemáticas em seu trabalho que eles facilmente se esquecem de restrições ou limitações ligadas à equação real.

Nos trabalhos de Palmstrom (2008), o autor apresenta (Figura 2) a baixa correlação da equação original para maciços alterados.

Deste modo justifica-se a pertinência deste trabalho, uma vez que ambas as equações de correlação estão baseadas em casos avaliados em regiões da Europa, América do Norte, África do Sul, Austrália, (entre outros), regiões de climas predominantemente temperados, o que difere muito do clima tropical predominante no Brasil, que tende a produzir, pela ação do intemperismo, pacotes espessos de rochas brandas e transições entre solo-rocha (saprolito), de difícil classificação considerando-se estes sistemas, pois nenhum deles considera o intemperismo e as baixas resistências da matriz da rocha de forma adequada dentre dos parâmetros de caracterização.

$$RMR \approx 9 \ln Q + 44 \quad (\text{Bieniawski, 1989})$$

$$Q \approx e^{\frac{(RMR-44)}{9}} \quad [1]$$

$$RMR \approx 15 \log Q + 50 \quad (\text{Barton, 1995})$$

$$Q \approx 10^{\frac{(RMR-50)}{15}} \quad [2]$$

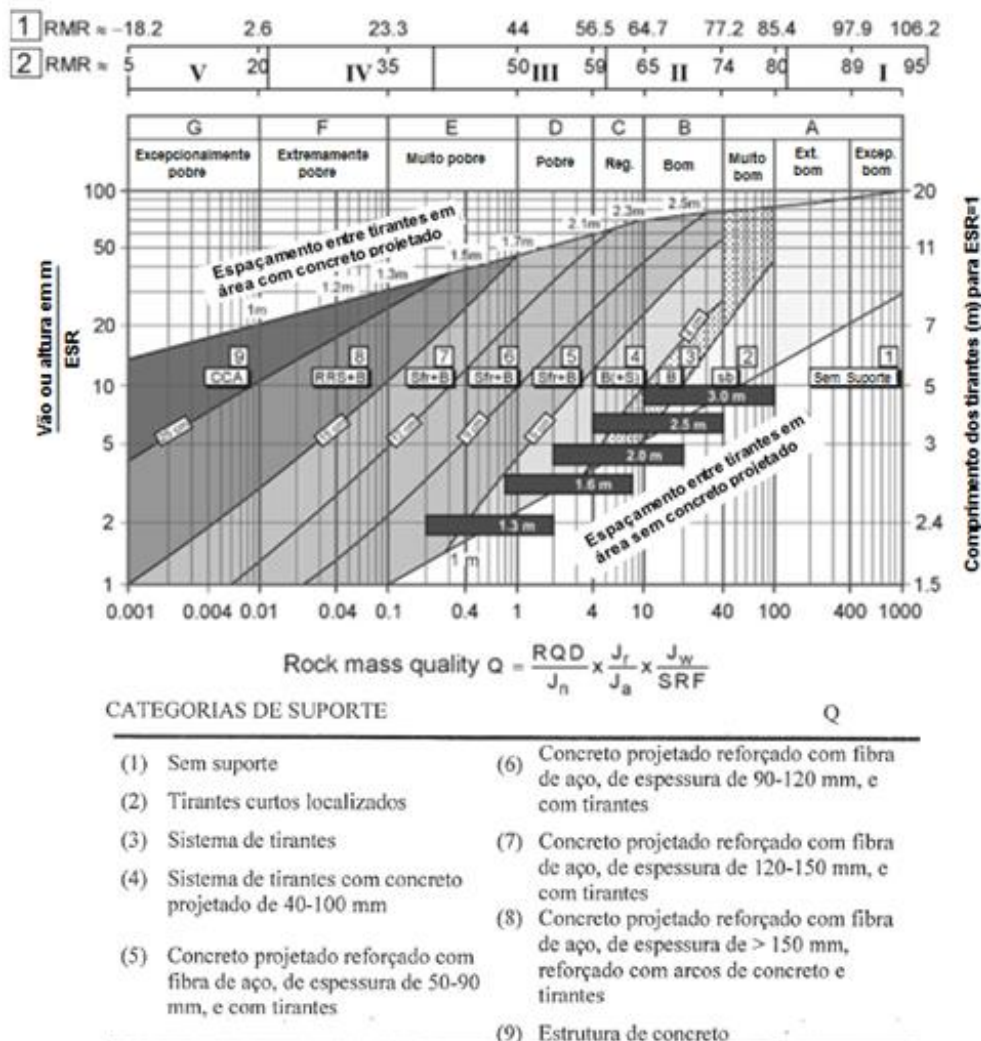


Figura 1. Gráfico para seleção do suporte, associado aos sistemas de classificação RMR e Q (Modificado de Barton, 2002).

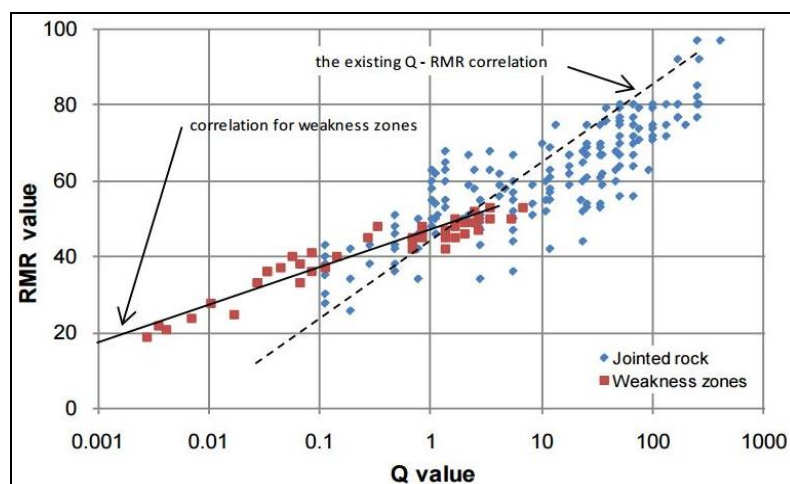


Figura 2. Comparação entre RMR e sistema Q, Palmstrom (2008).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Durante seis anos de trabalhos foram levantados 1.950 pontos, em um total de onze minas (em dez municípios) no Quadrilátero Ferrífero (QF).

Na Figura 3 são apresentadas as localizações onde ocorreram os levantamentos, bem como o contexto geológico estratigráfico associado.

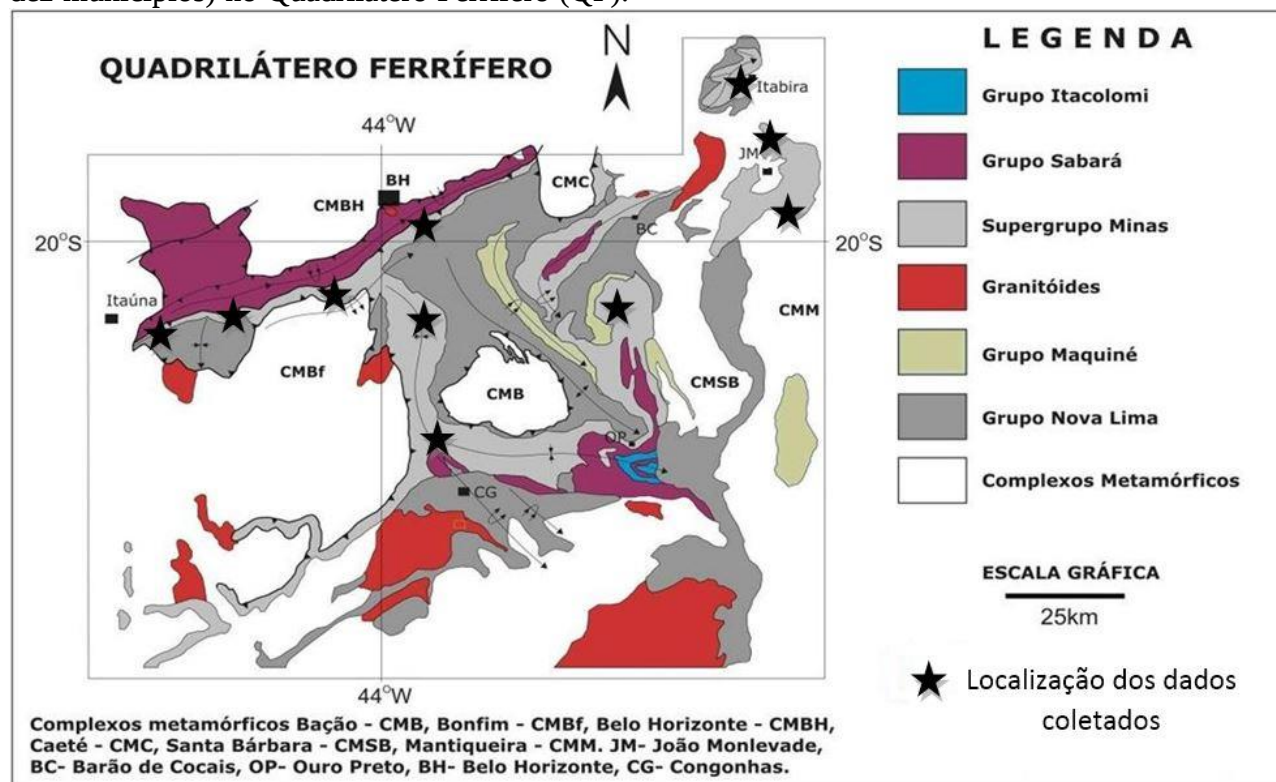


Figura 3. Localização dos dados coletados para análise (adaptado de Endo *et al.* 2007).

Na Tabela 1 é apresentada a relação dos quantitativos de pontos por mina e ano de levantamento.

Tabela 1. Resumo dos pontos levantados.

Município	Número de Pontos	Ano
Itabira	100	2009
João Monlevade	193	2011
Mariana	87	2012
Itatiaçu	225	
Brumadinho	129	
Igarapé	654	
Sabará	50	2013
Itabirito	162	2015
Congonhas	284	
Rio Piracicaba	66	

Nestes levantamentos foram obtidos parâmetros para realização das classificações geomecânicas pelas metodologias RMR e Q, tais como: resistência, RQD (*Rock Quality Designation*), espaçamento de descontinuidade,

condição de descontinuidade, condição de saturação, Jr (rugosidade da junta), Ja (alteração da junta), Jn (número de famílias de descontinuidades).

Da mesma forma geral como ocorre no QF, a maioria dos taludes levantados neste trabalho é, em termos de resistência, de natureza branda, de baixa qualidade geomecânica, onde a classificação original de Bieniawski não apresenta boa aderência na tentativa de definir as ocorrências de classes de maciço muito pobre. Sendo assim, foi aplicado o índice de ajuste Aw de Santos *et al.* (2012), na tentativa de se obter resultados mais coerentes com as classes de maciço que foram observados na etapa de caracterização.

A metodologia de Santos *op. cit* foi elaborada com objetivo de adequar a classificação de maciços rochosos de Bieniawski (1989) aos contextos geológicos e climatológicos em regiões de clima tropical,

onde se enquadra a região de estudo. Nesta metodologia é utilizada a intensidade do grau de intemperismo (proposto por Brown (1981), e adotada pela ISRM) por ser considerado como um parâmetro externo aos utilizados no cálculo do RMR, e determinante na qualidade do maciço. Para os diferentes níveis de intemperismo foram avaliadas quais as

pontuações máximas possíveis de se obter para cada parâmetro de Bieniawski, sendo esta ponderação realizada a partir dos dados históricos dos trabalhos realizados pelos autores. Na tabela 2 são apresentadas as razões entre os pesos de RMR e o índice de ajuste proposto.

Tabela 2 – Índices de ajuste obtidos para cada grau de intemperismo (adaptado de Santos *et al*, 2012; Chaves *et al*. 2014).

Grau de Intemperismo	Pesos máximos obtidos	Classe de maciço máxima esperada (RMR)*	Valores do RMR máximo esperado	Razão	Índice de ajuste
W1	100	I	100	100/100	1
W2	96	II	80	80/96	0,83
W3	89	III	60	60/89	0,67
W4	76	IV	40	40/76	0,53
W5	33	V	20	20/33	0,61
W6	24	V	20	20/24	0,83

* Classe de maciço máxima esperada segundo o grau de intemperismo seguindo os critérios de avaliação propostos pelos autores.

Foram objeto de análise também os resultados das classificações geomecânicas conforme a atualização sugerida por Bieniawski (2011), que realizou modificações em seu sistema de classificação com o objetivo de mostrar que houve um entendimento errôneo por parte dos usuários do RMR no que diz respeito aos pesos médios dados aos parâmetros. Essas modificações e esclarecimentos na distribuição de pesos de alguns parâmetros de seu sistema de classificação foram feitas com o objetivo de se obter melhores resultados para maciços alterados, principalmente nos que se encaixam na Classe V, caracterizando-se assim um excelente objeto de análise para o objetivo proposto neste trabalho.

Devido à classificação Q de Barton levar em consideração características de tensões de maciço, considerou-se na classificação apenas a obtenção do índice Q' (Hoek *et al*, 1995), uma vez que para uma mesma pontuação de classe de maciço RMR se obteriam diferentes valores de Q em função das profundidades dos maciços estudados, gerando assim dispersões muito elevadas. O índice Q' considera a relação entre saturações de água nas juntas e as tensões no

maciço (J_w/SRF) igual 1.

Após a realização das classificações geomecânicas por Q', RMR89, RMR89_{Aw} e RMR2011, foram elaborados gráficos de correlação entre estes sistemas, a fim de avaliar as aderências entre as metodologias e a equação resultante de conversão para maciços do QF.

3 RESULTADOS

3.1 Classificações Geomecânicas

As maiorias dos pontos coletados foram em formações ferríferas pertencentes a Fm. Cauê (Grupo Itabira – Supergrupo Minas) em variados níveis de qualidade geomecânica, predominando os maciços de qualidade ruim para maciços classificados pela metodologia RMR89 e Q', e de qualidade muito ruim tanto para o RMR89 ajustado por Aw quanto para o RMR2011. Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas, de forma resumida, as distribuições destas categorias.

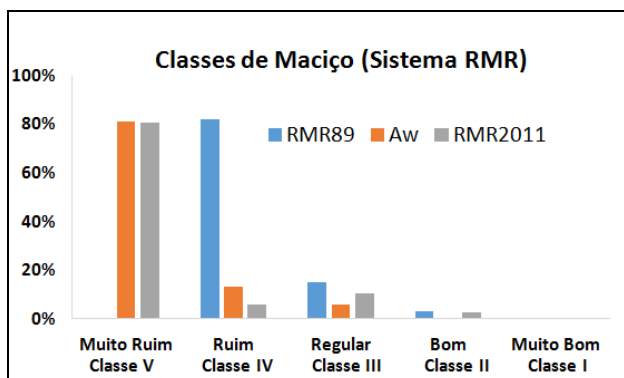


Figura 4. Resumo da distribuição de classes de maciço avaliadas pelo sistema RMR (89, 89_{Aw} e 2011).

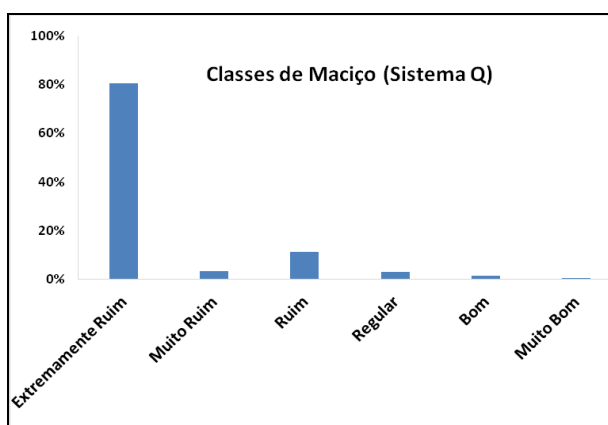


Figura 5. Resumo da distribuição de classes de maciço avaliadas pelo sistema Q'. Não foram obtidas as classes: péssima, extremamente bom e excelente.

Os resultados das classificações mostraram que no sistema RMR89 não há possibilidade se obter como resultado maciço muito ruins (Classe V), estando assim, em desacordo qualitativamente com a realidade do QF, corroborando com as avaliações feitas por Santos *et al.* (2012).

Já na atualização do RMR2011, os resultados estão mais coerentes com o identificado em campo para maciços pobres, obtendo resultados similares ao ajuste Aw, como preconizado por Chaves *et al.* (2014).

Em concordância com os autores citados, para maciços de qualidade intermediária (Classe IV e III) e boa (Classe II) os resultados mostraram a tendência a pontuações mais altas que o esperado, para a atualização do RMR2011, pois esta foca na modificação dos valores mínimos, iniciando da pontuação 0, sem alteração para características intermediárias.

Em termos de sistema Q, os resultados mostram um comportamento semelhante ao RMR2011 e RMR89_{Aw} para maciços muito

pobres, indicando que apesar de não considerar a resistência da matriz, apresentou resultados bons para os pontos levantados.

Tendo vista que a maioria dos trabalhos realizados no QF toma por base a metodologia de Bieniawski (1989), com poucos tratamentos pelos sistemas Q, RMR89_{Aw} e/ou RMR2011. Portanto, torna-se de extrema importância a verificação da representatividade dos levantamentos realizados por esta metodologia.

3.2 Correlações RMRxQ'

Neste trabalho foram testados ajustes para definições de tendências tanto logarítmicas (conforme estudos anteriores) quanto de potências (de melhor ajuste de linearidade para os dados). Nas figuras 6, 7 e 8 são apresentadas as distribuições da classificação RMR89xQ', RMR89_{Aw}xQ' e RMR2011xQ', respectivamente.

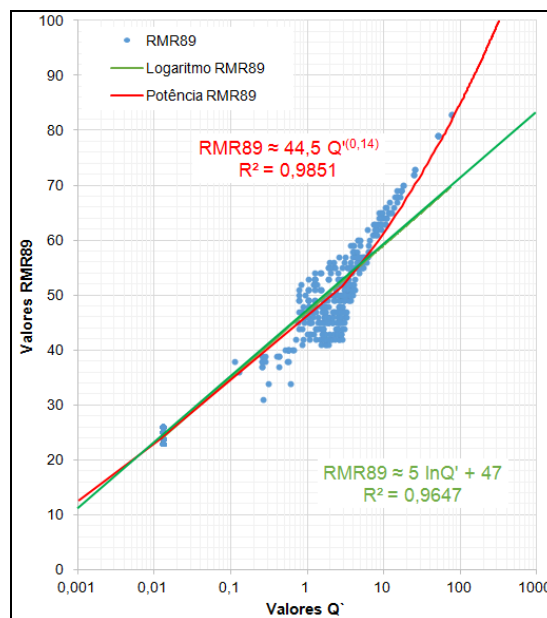


Figura 6. Correlação RMR89 x Q', para maciços no Quadrilátero Ferrífero.

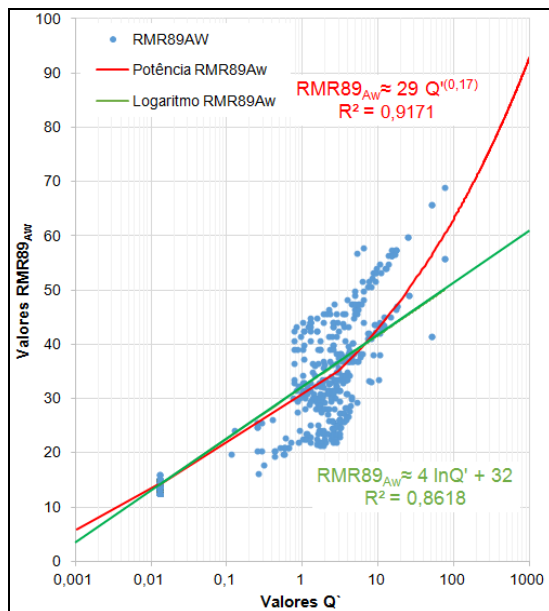


Figura 7. Correlação $RMR89_{Aw} \times Q'$, para maciços no Quadrilátero Ferrífero.

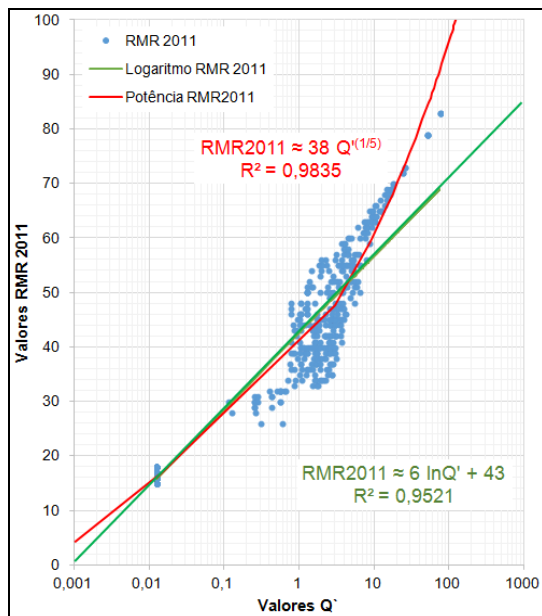


Figura 8. Correlação $RMR2011 \times Q'$, para maciços no Quadrilátero Ferrífero.

Como poderia se supor, em todas as correlações, as maiores dispersões encontram-se na região de maciços muito fraturados a fraturados, pois em todas as metodologias analisadas são atribuídas elevadas possibilidades de variações nas pontuações às características das juntas.

Dispersões podem ser atribuídas, também, para maciços de boa qualidade, pois os sistemas RMR pontuam distintamente as características da matriz, não consideradas no sistema Q' , sendo mais facilmente evidenciada esta

dispersão na correlação $RMR89_{Aw} \times Q'$, pois neste além da resistência são levados em consideração aspectos de alteração da matriz.

Em todas as correlações ocorrem hiatos entre os valores de Q' entre 0,01 e 0,1, sendo justificado pela dificuldade de caracterização da transição em maciços alterados, por esta metodologia.

O coeficiente de determinação (R^2) para tendências descritas por regressões logarítmicas e de potência obtiveram valores de acima 86%, sendo considerado satisfatório do ponto de vista estatístico, porém os resultados mostraram que as verificações de tendências logarítmicas não conseguem descrever o comportamento de maciços sãos e alterados por uma mesma equação, estando em consonância com as observações feitas por Palmstrom (2008).

Desta forma recomenda-se a utilização das equações obtidas por regressões de potência, ressaltando que em todos os casos esta obteve aderência acima de 90% (em destaque $RMR89 \times Q'$ com R^2 de 98,5%), além de conseguir abranger o comportamento para maciços sãos e alterados por uma única equação de correlação para cada sistema avaliado.

Nas equações 1, 2 e 3 são apresentadas as correlações resultantes de $RMR89 \times Q'$, $RMR89_{Aw} \times Q'$ e $RMR2011$, respectivamente.

$$Q' \approx \left(\frac{RMR89}{44,5} \right)^{7,14} \quad (1)$$

$$Q' \approx \left(\frac{RMR89_{Aw}}{29} \right)^{5,88} \quad (2)$$

$$Q' \approx \left(\frac{RMR2011}{38} \right)^5 \quad (3)$$

A pesar da dificuldade de caracterização de maciços muito pobre inerente a metodologia RMR89, após a conversão ao sistema Q' pela equação proposta (equação 1) é possível atenuar esta limitação.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos pelas classificações de todas as minas apoiam a afirmativa que a sistema RMR89 precisa de tratamentos para que os resultados sejam coerentes com as realidades identificadas no QF.

As correlações apresentadas neste trabalho indicaram boa aderência para todas as metodologias analisadas, podendo então ser consideradas como uma ferramenta para estudos envolvendo aberturas subterrâneas no QF.

Ressalta-se, também, que após a conversão ao sistema Q' pela equação proposta (equação 1) é possível atenuar a limitação referente ao RMR89 para maciços brandos.

Sugere-se a utilização de equações baseadas em tendências mais similares ao comportamento amostral, sendo elas: equação 1 para correlação RMR89xQ', equação 2 para correlação RMR89_{Aw}xQ' e equação 3 para correlação RMR2011xQ'.

Em etapas futuras do estudo, pretende-se fazer avaliações da aderência do índice Qc (Barton, 2002) aos maciços do QF, até então pouco empregado. Este índice possibilita incluir na avaliação do sistema Q também questões relativas à matriz rochosa. Assim, acredita-se que se possa obter correlações mais apuradas devido a maioria dos maciços do QF terem sua qualidade geomecânica diretamente relacionada à resistência da matriz.

A partir destes estudos, também, poderão ser realizadas correlações do sistema RMR com o índice Qc de Barton (2002).

5 REFERÊNCIAS

Barton, N.; Lien, R.; Lunde, J. (1974). *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel suport*. Rock Mech. Rock Eng., v.6, n.4, p.189-236.

Barton, N. (2002). *Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Nr. 39, 185–216.

Barton, N. (1995). *The influence of joint properties in modelling jointed rock masses*. Keynote Lecture, Proceedings of the 8th ISRM Congress, Tokyo. Balkema, Rotterdam, pp. 1023–1032.

Bieniawski, Z. T. (1976). *Rock mass classifications in rock engineering*. Exploration For Rock Engineering, A.A. Balkema, Cape Town, 97-106.

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classification*. New York: John Wiley. 248p.

Bieniawski, Z. T. (2011). *Misconceptions in the*

Applications of Rock Mass Classifications and their Corrections. Seminar on Advanced Geotechnical Characterization for Tunnel Design. ADIF. Madrid, Spain, 29 June, 2011.

Brown, E. T. (1981). *Suggested Methods for Rock Characterization Testing and Monitoring: ISRM suggested methods*. Oxford: Pergamon Press.

Chaves, S. S.; Santos, Y. L. O. P.; Paredes, J. P.; Zenóbio, A. A. (2014). *Avaliação de aderência do índice de ajuste (Aw) utilizando o grau de intemperismo no sistema RMR comparando com as alterações de Bieniawski (2011)*. In: Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, 2014 – Conferência Especializada ISRM 2014, Goiania. Anais.

Endo, I. (1997) *Regimes tectônicos do arqueano e do proterozóico no interior da placa sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais*. 243p. Tese (Doutorado em Geotectônica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Hoek E, Kaiser P.K, Bawden W.F. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*, A.A. Balkema: Rotterdam, pp.215.

Palmström, A. e Broch, E. (2006). *Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system* (2006) Tunnelling and Underground Space Technology, 21, p. 575–593

Palmström A. (2008). *Comparing the RMR, Q, and RMI classification systems*. reference: www.rockmass.net March 2008

Santos, Y. L. O. P.; Chaves, S. S.; Paredes, J. P.; Zenobio, A. A. (2012). *Proposta de Índice de Ajuste (Aw) Utilizando o Grau de Intemperismo no Sistema RMR (Rock Mass Rating) de Classificação do Maciço Rochoso*. In: VII Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e Mina Subterrânea, 2012, Belo Horizonte. Anais.