

LUCAS ALMEIDA CAMPOS

**CORRELAÇÕES ENTRE CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS AJUSTADAS,
ESTUDO DE CASO EM MACIÇOS ROCHOSOS DO QUADRILÁTERO
FERRÍFERO - MINAS GERAIS, BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

C198c
2018
Campos, Lucas Almeida, 1991-
Correlações entre classificações geomecânicas ajustadas,
estudo de caso em maciços rochoços do Quadrilátero Ferrífero -
Minas Gerais, Brasil / Lucas Almeida Campos. – Viçosa, MG,
2018.

xviii, 151f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Eduardo Antônio Gomes Marques.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.140-142.

1. Mecânica de rochas. 2. Engenharia geotécnica.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.
II. Título.

CDD 22 ed. 624.15132

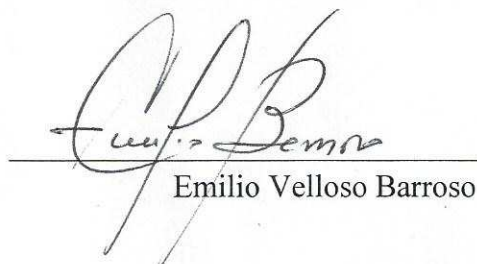
LUCAS ALMEIDA CAMPOS

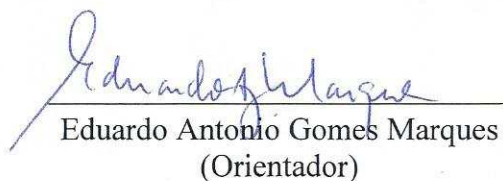
**CORRELAÇÕES ENTRE CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS AJUSTADAS,
ESTUDO DE CASO EM MACIÇOS ROCHOSOS DO QUADRILÁTERO
FERRÍFERO - MINAS GERAIS, BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 19 de fevereiro de 2018


Enivaldo Minette


Emilio Velloso Barroso


Eduardo Antonio Gomes Marques
(Orientador)

A Deus, família e amigos...

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por permitir a realização deste trabalho, a minha família pelo apoio e incentivo, a minha noiva Yanna por sempre estar ao meu lado, apoiando e incentivando.

Aos professores da UFV pelo ensinamento passado durante esse período, especialmente ao professor Eduardo Antonio Gomes Marques, que apoiou e orientou a realização desta dissertação.

A UFV e seus colaboradores pela infraestrutura e prestação de serviço de excelência fornecida.

A Vale S.A pela política de incentivo a pesquisa. Especialmente ao Teófilo Aquino e Flávio Ferreira pelas sugestões e ensinamentos.

Ao órgão de fomento a pesquisa Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, que incentivou financeiramente a realização deste trabalho.

**“Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que
você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo”.**
(Martin Luther King)

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vii
LISTA DE GRÁFICOS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Importância e Justificativa	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização do trabalho	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 Mecânica das Rochas em Engenharia	5
2.2 Classificações Geomecânicas de Maciços Rochosos	9
2.2.1 Classificação Geomecânica RMR (Rock Mass Rating)	10
2.2.1.1 Alterações no RMR sugeridas por Bieniawski (2011)	13
2.2.1.2 Alterações e melhorias no RMR sugeridos por Celada et al. (2014)- RMR14	14
2.2.1.3 Índice de Ajuste (A_w) proposto por Santos et al. (2012) para o RMR89	15
2.2.1.4 RMR adaptado por Vale (2008)	17
2.2.2 Rock Quality Designation (RQD)	20
2.2.3 “Critério de Hoek-Brown” e o Índice de Resistência Geológica – GSI	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 Caracterização da Área de Estudo	30
3.2 Classificações geomecânicas dos maciços rochosos	34
3.2.1 Rock Mass Rating – RMR	34
3.2.2 Índice de Resistência Geológica – GSI	38
4. RESULTADOS	40

4.1	<i>Classificações Geomecânicas</i>	40
4.1.1	<i>Quartzitos (QT)</i>	40
4.1.2	<i>Filitos</i>	46
4.1.2.1	<i>Filitos Sericíticos (FS)</i>	46
4.1.2.2	<i>Filitos Dolomíticos (FD)</i>	51
4.1.2.3	<i>Comparação entre os filitos presentes na mina do Tamanduá</i>	56
4.1.3	<i>Itabiritos</i>	56
4.1.3.1	<i>Itabiritos Compactos Silicosos (ICS)</i>	57
4.1.3.2	<i>Itabiritos Médios (IM) Silicosos (IMS) e Limoníticos (IML)</i>	62
4.1.3.3	<i>Itabiritos Friáveis Silicosos (IFS)</i>	67
4.1.3.4	<i>Itabiritos Friáveis Argilosos (IFA) e rico em Ferro (IFAR)</i>	72
4.1.3.5	<i>Comparação entre os itabiritos presentes na mina do Tamanduá</i>	77
4.1.4	<i>Hematitas</i>	78
4.1.4.1	<i>Hematitas Compactas (HC)</i>	78
4.1.4.2	<i>Hematitas Médias (HM)</i>	83
4.1.4.3	<i>Hematitas Friáveis (HF)</i>	87
4.1.5	<i>Básicas Intrusivas (BI)</i>	92
4.1.6	<i>Básicas Intrusivas Saprolitizadas (BIS)</i>	98
4.1.7	<i>Metavulcânicas (VU)</i>	102
4.2	<i>Comparativo entre o Grau de Alteração (GA) e o Grau de Consistência (GC) ...</i>	108
4.3	<i>Comparativo entre os resultados de RMR</i>	110
4.4	<i>Comparativo entre os métodos quantitativos e qualitativos de GSI</i>	118
4.4.1	<i>Itabiritos Compactos Silicosos (ICS) – Mina Sapecado</i>	118
4.4.2	<i>Itabiritos Médios (IM) – Mina Sapecado</i>	121
4.4.3	<i>Itabiritos Friáveis (IF) – Mina Sapecado</i>	124
4.5	<i>Correlações de GSI para diferentes ajustes de RMR</i>	130
5.	CONCLUSÕES	137
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140
	ANEXO A – GRÁFICO PARA ESTIMATIVA DE GSI (Maciços heterogêneos)	143

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Efeito escala e as recomendações para utilizar a classificação GSI. (Traduzido de HOEK <i>et al.</i> (2013)).	6
Figura 2 - Estruturas existentes nos maciços rochosos (ISRM, 2007).	7
Figura 3 - Perfis típicos de rugosidade e respectivas classificações (BARTON <i>et al.</i> 1974, <i>apud</i> ZACARIAS, 2003).	8
Figura 4 – Estimativa do tempo de auto suporte e vão livre segundo método RMR (Traduzido de BIENIAWSKI, 1989)	13
Figura 5 - Correlação entre RQD e Jv (PALMSTRÖM, 1982 modificado por, SANTOS, 2015).	21
Figura 6 - Correlação entre o RQD e o espaçamento das descontinuidades (BIENIAWSKI, 1989 modificado por, SANTOS, 2015).	22
Figura 8 – Mapa dos litotipos da cava atual da Mina do Tamanduá (Vale, 2008).	31
Figura 9 - Vista aérea da mina do Tamanduá, de Sul para Norte (OURO PRETO GEOLOGIA E PESQUISA MINERAL, 2004).	32
Figura 10 - Geologia local das minas do Complexo Itabiritos (BRAGA <i>et al.</i> , 2010)	33
Figura 11 - Vista aérea da mina de Sapecado (Retirado do Google Earth, 2017).	33
Figura 12 – Quartzito (QT) com níveis conglomeráticos S0, à esquerda, e acamamento S0, à direita (Vale, 2008).	41
Figura 13 – Talude em filito sericítico (OURO PRETO GEOLOGIA E PESQUISA MINERAL, 2004).	46
Figura 14 – Acamamento no filito dolomítico (Vale, 2008)	51
Figura 15 – Itabirito com típico bandamento de camadas escuras e claras (OURO PRETO GEOLOGIA E PESQUISA MINERAL, 2004)	57
Figura 16 – Talude de Itabiritos Compactos Silicosos (ICS) (Vale, 2008)	57
Figura 17 – Talude em itabiritos friáveis siliciosos - IFS. (VALE, 2008)	67
Figura 18 – Talude em Itabiritos Friáveis Argilosos (IFA) (VALE, 2008)	72
Figura 19 – Talude em Hematita Compacta (HC). (VALE, 2008)	78
Figura 20 – Hematita média (HM) com foliação e clivagem (VALE, 2008).	83
Figura 21 - Hematita Friável – HF (VALE, 2008)	88
Figura 22– Talude composto de básicas intrusivas (VALE, 2008)	93
Figura 23 – Talude composto de rochas metavulcânicas alteradas (VALE, 2008)	103
Figura 24 – Classificação RMR1989 para a mina do Tamanduá.	115
Figura 25 – Classificação RMR2011 para a mina do Tamanduá.	116
Figura 26– Classificação RMR Santos et al. 2012 para a mina do Tamanduá.	117
Figura 27 – Classificação RMR Vale 2008 para a mina do Tamanduá.	117

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Estimativa do GSI para maciços fraturados (traduzido de HOEK <i>et al.</i> 2013). ...	29
Gráfico 2 – Valores individuais do levantamento de campo dos quartzitos	41
Gráfico 3 – Histograma dos diferentes ajustes propostos de RMR para quartzitos	42
Gráfico 4 – Classificação dos maciços rochosos de quartzitos segundo diferentes ajustes	43
Gráfico 5 – Resumo da Classificação GSI dos quartzitos	44
Gráfico 6 – GSI para os quartzitos da Mina do Tamanduá (Adaptado e traduzido de HOEK <i>et al.</i> ,2013).....	45
Gráfico 7 – Valores individuais do levantamento de campo dos filitos sericíticos.....	47
Gráfico 8 – Histograma dos diferentes ajustes de RMR para filitos sericíticos	47
Gráfico 9 – Classificação para os diferentes ajustes de RMR para filitos sericíticos	48
Gráfico 10 – Valores de GSI para os filitos sericíticos	49
Gráfico 11 – Estimativa de GSI dos FS (Adaptado e traduzido de Hoek <i>et al.</i> ,2013)	50
Gráfico 12 – Valores individuais do levantamento de campo dos filitos dolomíticos.....	52
Gráfico 13– Histograma dos diferentes ajustes de RMR para filitos dolomítico.....	52
Gráfico 14 – Classificação para os diferentes ajustes de RMR para filitos dolomítico.	53
Gráfico 15 – Valores de GSI para os filitos dolomíticos.....	54
Gráfico 16 – Estimativa de GSI dos FD. (Adaptado e traduzido de HOEK <i>et al.</i> , 2013).....	55
Gráfico 17 – Resultados do levantamento de campo dos Itabiritos Compactos Silicosos	58
Gráfico 18 – Histograma dos diferentes ajustes de RMR – ICS	59
Gráfico 19 – Classificações RMR ajustadas em Itabiritos Compactos Silicosos.....	60
Gráfico 20 - Valores de GSI para os itabiritos compactos silicosos – ICS.	61
Gráfico 21 – Estimativa de GSI para os ICS do QF. (Adaptado e traduzido de HOEK <i>et al.</i> ,2013).....	62
Gráfico 22 - Resultados do levantamento de campo dos itabiritos médios (IM, IMS e IML). 63	
Gráfico 23 - Histograma dos diferentes ajustes de RMR dos itabiritos médios.....	64
Gráfico 24 - Histograma dos diferentes ajustes de RMR dos itabiritos médios.....	65
Gráfico 25 – Valores de GSI para os itabiritos médios.	65
Gráfico 26– Estimativa de GSI para os IM. (Adaptado e traduzido de HOEK <i>et al.</i> ,2013)	66
Gráfico 27 - Resultados do levantamento de campo dos itabiritos friáveis silicosos	68
Gráfico 28 - Histograma dos diferentes ajustes de RMR dos itabiritos friáveis.	68
Gráfico 29 - Classificações RMR (ajustadas) para os itabiritos friáveis silicosos.	69
Gráfico 30 - Valores de GSI para os itabiritos friáveis silicosos.....	70
Gráfico 31 - Valores de GSI para os itabiritos friáveis silicosos (IFS). (Adaptado e traduzido de HOEK <i>et al.</i> ,2013).....	71
Gráfico 32 – Caracterização e classificação dos IFA e IFAR.	73
Gráfico 33 – Histograma para os diferentes ajustes de RMR, aplicados nos IFA e IFAR.....	74
Gráfico 34 – Classificação para os diferentes ajustes de RMR, aplicados nos IFA e IFAR.	74
Gráfico 35 – Valores de GSI para os IFA e IFAR.	75
Gráfico 36 – Regiões esperadas no GSI para os IFA e IFAR.	76
Gráfico 37 – Valores de RMR para as hematitas compactas	79
Gráfico 38 – Histograma para os diferentes ajustes de RMR para as HC.....	80

Gráfico 39 – Classes dos diferentes ajustes de RMR para as HC	80
Gráfico 40 – Classes dos diferentes ajustes de RMR para as HC	81
Gráfico 41 – Região esperada para o GSI nas hematitas compactas (HC) (Adaptado e traduzido de HOEK <i>et al.</i> ,2013).....	82
Gráfico 42 – Valores de RMR para as Hematitas Médias (HM).....	84
Gráfico 43 – Valores de RMR para os diferentes ajustes - Hematitas Médias (HM)	85
Gráfico 44 – Classes de RMR para os diferentes ajustes - Hematitas Médias (HM).....	85
Gráfico 45 – Estimativa de GSI para os diferentes ajustes - Hematitas Médias (HM)	86
Gráfico 46 – Região prevista de GSI para as Hematita média (HM) da mina do Tamanduá (Adaptado e traduzido de HOEK <i>et al.</i> ,2013)	87
Gráfico 47 – Resumo da caracterização e classificação RMR - Hematitas Friáveis (HF).....	89
Gráfico 48 – Histograma dos ajustes na classificação RMR – Hematitas Friáveis (HF).....	90
Gráfico 49 – Classes de RMR para os diferentes ajustes - Hematitas Médias (HF)	90
Gráfico 50 – Valores de GSI para as hematitas friáveis - HF.	91
Gráfico 51 – Região prevista de GSI para as Hematitas friáveis (HF) da mina do Tamanduá. (Adaptado e traduzido de HOEK <i>et al.</i> ,2013)	92
Gráfico 52 – Valores de RMR para as básicas intrusivas.....	94
Gráfico 53 – Histograma dos ajustes na classificação RMR – BI.....	94
Gráfico 54 – Classes de RMR para os diferentes ajustes – Básicas Intrusivas (BI)	95
Gráfico 55 – Classificação GSI das básicas intrusivas.....	96
Gráfico 56 – Região prevista de GSI para as básicas intrusivas (BI) da mina do Tamanduá. (Adaptado e traduzido de HOEK <i>et al.</i> ,2013)	97
Gráfico 57 – Caracterização e classificação RMR das básicas intrusivas saprolitizadas.....	98
Gráfico 58 – Histograma dos ajustes na classificação RMR – BIS.....	99
Gráfico 59 – Classes de RMR para os diferentes ajustes – Básicas Intrusivas Saprolitizada	100
Gráfico 61 – Região prevista de GSI para as básicas intrusivas saprolitizadas (BIS).....	102
Gráfico 62 – Caracterização e classificação RMR das metavulcânicas.	104
Gráfico 63 – Histograma dos ajustes na classificação RMR – Metavulcânicas (VU).	104
Gráfico 64 – Classe de RMR para diferentes ajustes - Metavulcânicas (VU).	105
Gráfico 66 – Região prevista de GSI para as metavulcânicas – VU (Adaptado e traduzido de HOEK <i>et al.</i> ,2013).....	107
Gráfico 67- Relação entre o Grau de Alteração (GA) e a Litologia.....	108
Gráfico 68 - Relação entre o Grau de Consistência (GC) e as Litologias	109
Gráfico 69 – Classificação RMR segundo Bieniaswki (1989).....	110
Gráfico 70 – Classificação RMR <i>apud</i> Bieniawski (2011)	111
Gráfico 71 – Classificação RMR segundo Santos <i>et al.</i> (2012)	112
Gráfico 72 – Classificação RMR para a mina do Tamanduá segundo Vale (2008).....	113
Gráfico 73 – GSI quantitativo de itabiritos compactos silicosos da mina Sapecado.	119
Gráfico 74 – GSI qualitativo para itabiritos compactos silicosos da mina Sapecado.	120
Gráfico 75 – Estimativa de GSI para os ICS, à esquerda pelo método quantitativo e, à direita pelo método qualitativo.	121
Gráfico 76 - GSI quantitativo de itabiritos médios da mina Sapecado.	122
Gráfico 77 - GSI qualitativo para itabiritos médios da mina Sapecado.	123

Gráfico 78 – Estimativa de GSI para os IM, à esquerda, pelo método quantitativo e, à direita, pelo método qualitativo.	124
Gráfico 79 - GSI quantitativo para itabiritos friáveis da mina Sapecado.....	125
Gráfico 80 - GSI qualitativo para itabiritos friáveis.....	126
Gráfico 81– Estimativa de GSI para os IF, à esquerda, pelo método quantitativo e, à direita, pelo método qualitativo.	127
Gráfico 82 – Correlação entre os métodos quantitativos e qualitativos de GSI em itabiritos	128
Gráfico 83 – Correlação entre os métodos quantitativos e qualitativos de GSI em IF.....	129
Gráfico 84 – Correlação GSI para as litologias de consistência friável da Mina do Tamanduá	130
Gráfico 85– Correlação GSI para o RMR adaptado pela Vale para a Mina do Tamanduá....	131
Gráfico 86– Correlação GSI para o RMR ajustado pelos fatores de Santos <i>et al.</i> (2012) para a Mina do Tamanduá.....	132
Gráfico 87 – Correlação GSI para o RMR ajustado por Santos <i>et al.</i> (2012) para maciços W2 da Mina do Tamanduá.....	133
Gráfico 88 – Correlação GSI para o RMR ajustado por Santos <i>et al.</i> (2012) para maciços W3 da Mina.....	134
Gráfico 89 – Correlação GSI para o RMR ajustado por Santos <i>et al.</i> (2012) para maciços W4 da Mina do Tamanduá.....	135
Gráfico 90 – Correlação entre GSI e RMR14	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Projetos comuns da mecânica das rochas na engenharia	5
Tabela 2 - Classificação do espaçamento das descontinuidades	7
Tabela 3 - Descrição da persistência das descontinuidades	8
Tabela 4 - Descrição da presença de água nas descontinuidades	9
Tabela 5 - Determinação do valor associado com os parâmetros de Bieniawski.....	11
Tabela 6 - Condição das Descontinuidades por parâmetro	12
Tabela 7 - Efeito da orientação das descontinuidades em obras sobre maciços rochosos	12
Tabela 8 - Classificação segundo o Rock Mass Rating.....	13
Tabela 9 – Critérios para calcular o RMR 14 básico.....	15
Tabela 10 – Possíveis valores máximos de RMR versus o grau de intemperismo	16
Tabela 11 – Índices de ajuste obtidos para cada grau de intemperismo.....	17
Tabela 12- Pesos adotados para GC e GA e RU no RMR adaptado pela Vale (2008).	18
Tabela 13 – Pesos adotados no RMR adaptado pela Vale (2008).....	19
Tabela 14 - Classificação da qualidade do maciço rochoso segundo valores de RQD.....	20
Tabela 15- Diretrizes para estimar o fator de perturbação D.	26
Tabela 16 – Estruturação do banco de dados geotécnicos da Mina do Tamanduá	35
Tabela 17 – Valores estimados para o preenchimento.	37
Tabela 18 – Comparação entre os itabiritos da Mina do Tamanduá	77
Tabela 19 – Relação entre o Grau de Alteração (GA) e o Grau de Consistência (GC)	109
Tabela 20 - Resultados encontrados entre os diferentes ajustes de RMR	114
Tabela 21 - Valores de GSI para os Itabiritos da mina do Sapecado.	127

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB	Abertura
AP	Alteração da Parede
Aw	Índice de ajuste
BI	Básica Intrusiva
BIS	Básicas Intrusivas Saprolitizadas
ENE	Este - Nordeste
FD	Filito Dolomíticos
FS	Filitos Sericíticos
GA	Grau de Alteração
GC	Grau de Consistência
GF	Grau de Fraturamento
GSI	<i>Geological Strength Index</i>
HC	Hematita Compacta
HF	Hematita Friável
HM	Hematita Média
ICS	Itabirito Compacto Silicoso
IF	Itabirito Friável
IFA	Itabirito Friável Argiloso
IFAR	Itabirito Friável Argiloso rico em Ferro
IM	Itabirito Médio

ISRM	Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas
Jv	Somatória do número de descontinuidades por volume, para um conjunto de famílias
NE	Nordeste
NWN	Noroeste - Norte
Q	<i>Tunelling Quality Index</i>
QF	Quadrilátero Ferrífero
QT	Quartzitos
RMR	<i>Rock Mass Rating</i>
RQD	<i>Rock Quality Designation</i>
RU	Rugosidade
S	Espaçamento das descontinuidades
SE	Sudeste
<i>Si</i>	Espaçamento das descontinuidades em metros para uma referida família de descontinuidades.
SW	Sudoeste
TD	Tipo de descontinuidade
TP	Tipo de preenchimento
VU	Metavulcânica
W	Intensidade do grau de intemperismo
w	Condição de percolação da água subterrânea
WSW	Oeste-Sudoeste

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
σ_1	Tensão principal maior de ruptura
σ_3	Tensão principal menor aplicada
σ_{ci}	Resistência à compressão uniaxial do material rochoso
σ_c	Compressão uniaxial
Σ	Somatório
e	Exponencial
$\sqrt{\quad}$	Raiz quadrada
®	Registrado
R^2	Coefficiente de determinação

RESUMO

CAMPOS, Lucas Almeida, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Correlações entre classificações geomecânicas ajustadas, estudo de caso em maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais, Brasil.** Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques.

O conhecimento das caracterizações e classificações geomecânicas dos maciços rochosos são de grande interesse e importância para o projeto de obras civis e mineração, já que a estabilidade de taludes e escavações subterrâneas está diretamente relacionada às propriedades geomecânicas dos maciços. As classificações geomecânicas surgiram com o intuito de ajudar a prever o comportamento dos maciços rochosos susceptíveis à solicitações de obras de engenharia ou mineração, na fase de projeto. Algumas das principais classificações atualmente utilizadas são o RMR (*Rock Mass Rating*), proposta por Bieniawski (1989), o índice de qualidade Q (*Tunnelling Quality Index*), de Barton *et al.* (1974) e o GSI (*Geological Strength Index*), proposta por Hoek (1994). Em 2011, Bieniawski apresentou uma explicação sobre a forma exata de como usar os pesos adotados pelo seu método, uma vez que os usuários do RMR tiveram, na opinião do autor, um entendimento errôneo na hora de atribuir esses valores, já que os pesos adotados não eram mínimos, como estavam sendo utilizados, e sim valores médios. Nesse contexto, Celada *et al.* (2014) realizaram atualizações e melhorias no RMR_{89} . Em sua nova versão, além de acrescentar um parâmetro referente a alterabilidade dos maciços, foram unificados e substituídos os parâmetros RQD e espaçamento das descontinuidades, pelo número de descontinuidades por metro. Devido à grande dificuldade encontrada por alguns profissionais em classificar maciços rochosos altamente intemperizados usando o RMR_{89} , Santos *et al.* (2012) propuseram uma correção dos pesos ao considerar o grau de intemperismo no RMR_{89} . Também com dificuldades em classificar os maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero pela classificação RMR_{89} , a mineradora Vale (2008) atribuiu alguns ajustes no RMR_{89} . Neste contexto, o presente trabalho verificou, para os maciços rochosos do Quadrilátero de Ferrífero, Brasil, a eficácia dos ajustes utilizados na classificação RMR_{89} , propostas por Santos *et al.* (2012), Bieniawski (2011) e Vale (2008). Além disso, na tentativa de estimar os valores de GSI, através da classificação RMR_{89} , Hoek apresentou uma correlação entre as classificações como sendo $GSI = RMR_{89} - 5$. Porém, como essa correlação foi estimada somente para a situação do RMR_{89} , a fórmula não deve ser utilizada para versões posteriores de RMR. Por isso, em busca de encontrar valores de GSI para os diferentes ajustes propostos, foram realizadas correlações

entre os valores de GSI e os valores ajustados de RMR . Como Hoek *et al.* (2013) possibilitaram a quantificação do GSI por meio de parâmetros encontrados na classificação RMR, o presente trabalho também verificou os resultados encontrados para os métodos quantitativo e qualitativo nos maciços rochosos de itabiritos de diferentes consistências da mina Sapecado. Apesar da explicação dada por Bieniawski (2011), a classificação RMR_{89} apresentou certa dificuldade em classificar os maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero, sendo, por isso, recomendado a utilização de outros ajustes para encontrar resultados mais fidedignos, como as apresentadas por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008). As correlações de GSI com os RMR ajustados apresentaram resultados satisfatórios, podendo auxiliar em tomada de decisão em trabalhos que envolvam classificações geomecânicas em minas com maciços rochosos compostos por litotipos e graus de intemperismo semelhantes. Apesar das formas qualitativas e quantitativas de encontrar valores de GSI terem sido agrupadas regiões semelhantes, o GSI apresentou dificuldades em aplicar as quantificações nos maciços rochosos de baixa qualidade.

ABSTRACT

CAMPOS, Lucas Almeida, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Correlations between adjusted geomechanical stations, for rock mass of the Iron Quadrangle of Minas Gerais, Brazil.** Adviser: Eduardo Antonio Gomes Marques.

The knowledge of the geomechanical characterizations and geomechanical classifications of the rock masses are of great interest and importance for the design of civil and mining works on rocks, as slope and underground excavations stability are directly related to the mechanical properties of each rock mass class. Geomechanical classifications have been developed to help predict the behavior of rock masses susceptible to requests for engineering works during the design phase. Some of the most common geomechanical rock mass classifications currently used are the RMR (Rock Mass Rating) proposed by Bieniawski (1989), the Tuning Quality Index (Q) by Barton et al. (1974) and the GSI (Geological Strength Index) proposed by Hoek (1994). On 2011, Bieniawski presented a new study in which the author points that an erroneous understand by some of the RMR user related to weights adopted for some parameters, as the proposed values were average values and not minimum values by the method. On this context, Celada et al. (2014) made updates and improvements on RMR89. In its new version, besides adding a parameter referring to the alterability of the masses, the parameters RQD and the spacing of the discontinuities were unified and replaced by the number of discontinuities per meter. Due to the great difficult found by some professionals to classify highly weathered rock masses by using the RMR_{89} , Santos et al. (2012) have proposed a correction of these weights by considering weathering degree on RMR_{89} . Additionally, Vale mining company (2008) have also attributed some a adjusts on RMR_{89} throughout a method already under development and testing. On this context, the present work has the aim of verifying, for rock masses from Inron Quadrangle, Minas Gerais, Brazil, the effectiveness of the proposed adjusts on RMR_{89} proposed by Santos et al. (2012), by Bieniawski (2011) and by Vale (2008). In addition, in an attempt to estimate the GSI values, through the classification RMR_{89} , Hoek presented a correlation between the classifications as $GSI = RMR_{89} - 5$. However, since this correlation was estimated only for the RMR_{89} , the formula should not be used for any other RMR version. Therefore, in order to find GSI values for the different proposed adjustments, correlations were made between the GSI values and the adjusted RMR values. As Hoek et al. (2013) made possible the quantification of the GSI by means of parameters found in the RMR classification, the present work also verified the results found for both quantitative and qualitative rocks proposed by hoek et al. (1994, 2013)

for itabirites rock masses of different coherence of the Sapecado mine. Despite the explanation given by Bieniawski (2011), an RMR classification presented some difficulty in classifying the rocks masses of the Iron Quadrangle, and it is therefore recommended to use adjustments to find more reliable results. As correlations of GSI with the adjusted RMR presented satisfactory results, it can help in decision making in works that involve the geomechanical ranking in mines with rocky masses composed of lithotypes and degrees of weathering. The GSI it was difficult to find good correlations for low quality rock masses.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Importância e Justificativa

Os estudos relacionados às características geomecânicas do maciço rochoso são de grande importância para as mineradoras, já que indicam as classes de maciço existentes na mina, que são subsídios para as análises de estabilidade e do projeto dos taludes das cavas. Portanto, a não realização destes estudos pode trazer graves problemas de engenharia, segurança e meio ambiente.

A estabilidade de taludes rochosos está diretamente ligada aos estudos das propriedades mecânicas do maciço rochoso, que são fundamentais para a realização de projetos de estabilidade. Caso ocorra falha nos projetos, poderão ocorrer escorregamentos de diferentes proporções, podendo comprometer a segurança dos envolvidos. Além disso, vale ressaltar que a viabilidade de um empreendimento está intimamente relacionada com o projeto dos taludes finais, ou seja, pequenas modificações no ângulo dos taludes podem alterar, em grande proporção, a quantidade de estéril a ser removido da cava).

Uma característica importante que deve ser analisada em maciços rochosos está relacionada à influência das descontinuidades na qualidade e resistência dos maciços rochosos, dado que as propriedades geotécnicas encontradas em um maciço rochoso são diferentes das propriedades geotécnicas das rochas intactas ensaiadas em laboratório. Em função disso, foram propostas classificações geomecânicas em busca de estimar as propriedades de resistência dos maciços e das descontinuidades, para que fosse possível avaliar a qualidade e prever possíveis movimentos de massa em taludes (ÁVILA, 2012).

Algumas das principais classificações geomecânicas utilizadas atualmente para maciços rochosos são o índice RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1989) e o índice GSI (*Geological Strength Index*) de Hoek *et al.* (1994). O sistema de classificação desenvolvido por Bieniawski (1974) fornece uma avaliação geral da qualidade do maciço que possibilita estimar, para cinco categorias, o tempo de auto-suporte, o vão desejado e o tipo de suporte mais adequado, além de definir valores de coesão e ângulo de atrito interno do maciço rochoso. Já o GSI (*Geological Strength Index*), criado por Hoek (1994), tem o objetivo de estimar parâmetros de resistência do maciço rochoso em diferentes condições geológicas, por meio de um exame visual do maciço em afloramento ou em superfície de escavação.

Em 2011, Bieniawski apresentou uma explicação sobre a forma exata de como se usar os pesos adotados pelo método, uma vez que os usuários do RMR tiveram, na opinião do autor, um entendimento errôneo na hora de atribuir esses valores. O autor alegou que os pesos adotados não eram valores mínimos, como estavam sendo usados, e sim valores médios.

Essa alteração modifica principalmente as classificações encontradas para os maciços rochosos de baixa qualidade, uma vez que o valor mínimo encontrado nas classificações de maciços rochosos, na condição seca, passa de 23 para 15 pontos, já que o parâmetro “espaçamento das descontinuidades” passa a ter valor mínimo de 0 em vez de 5 pontos, e o RQD passa a ter valor mínimo de 0 pontos em vez de 3 pontos.

Com essa nova atribuição dos pesos fica possível classificar, na condição seca, maciços rochosos de baixa qualidade (classe V), tornando o método mais próximo da realidade dos maciços rochosos susceptíveis ao elevado grau de intemperismo provocado pelo clima tropical. Devido à grande dificuldade encontrada pelos profissionais em classificar os maciços rochosos altamente intemperizados pelo método RMR_{89} , Santos *et al.* (2012) propuseram a utilização de uma correção dos pesos levando em consideração o grau de intemperismo no sistema RMR_{89} . Já Chaves *et al.* (2014) verificaram que, mesmo com as alterações propostas por Bieniawski, o RMR ainda mostrava problemas de aplicabilidade para maciços rochosos de qualidade intermediária, sendo ainda necessário utilizar os ajustes propostos por Santos *et al.* (2012).

Recentemente, a Vale atribuiu seus ajustes no método RMR_{89} por uma metodologia que se encontra em fase de desenvolvimento e ainda não divulgada no meio científico.

Na mais recente alteração sugerida para o RMR_{89} , Celada *et al.* (2014) realizaram atualizações e melhorias no RMR. Em sua nova versão, além de acrescentar um parâmetro referente à alterabilidade dos maciços, foram unificados e substituídos os parâmetros “RQD” e “espaçamento das descontinuidades” pelo parâmetro “número de descontinuidades por metro”.

1.2 Objetivos

O presente trabalho visou verificar, para os maciços rochosos pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero, a eficácia dos ajustes utilizados no RMR_{89} , por Santos *et al.* (2012), Bieniawski (2011) e pela Vale (2008), além de verificar qual ajuste melhor descreve as condições dos

maciços rochosos. Ainda, Verificar se os resultados de GSI, por correlação com RMR_{89} , são fidedignos com as condições dos maciços rochosos estudados. Bem como apurar se a quantificação do GSI (HOEK, 2013) é satisfatória quando comparado com a forma qualitativa (HOEK, 1994).

Como objetivos secundários, destacam-se:

- Tratamento e consolidação de dados já existentes para duas minas (Tamanduá e Sapecado) localizadas no Quadrilátero Ferrífero;
- Classificação dos maciços rochosos constituintes da Mina do Tamanduá, conforme os ajustes propostos para o sistema de classificação geomecânica RMR;
- Verificação e correlação dos diferentes ajustes propostos para o RMR com o GSI e comparação dos resultados;
- Comparação entre os métodos qualitativos e quantitativos de GSI, para os itabiritos da mina de Sapecado;

1.3 Organização do trabalho

Para um melhor entendimento, este trabalho foi organizado em capítulos. No presente capítulo apresenta-se uma introdução ao tema desenvolvido, mostrando as importâncias e justificativas da pesquisa, os objetivos e a sequência em que o trabalho será apresentado.

No capítulo 2 são apresentadas, por meio da revisão de literatura, as principais teorias necessárias para o entendimento das classificações geomecânicas dos maciços rochosos. Mostra a importância da mecânica das rochas na engenharia, bem como as metodologias empregadas nas classificações geomecânicas RMR e GSI. Faz, ainda, uma abordagem das principais características encontradas na área de estudo do presente trabalho.

No Capítulo 3 é abordada a metodologia aplicada no trabalho, ou seja, a forma em que foram realizados os tratamentos dos dados disponíveis e as classificações geomecânicas.

No Capítulo 4 apresenta-se os resultados obtidos com as interpretações das análises de campo realizadas, além de apresentar as discussões deste trabalho.

Já no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões desta pesquisa.

No Capítulo 6 são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas como fonte de pesquisa e, nos anexos, são apresentadas as tabelas e gráficos utilizados nos métodos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Mecânica das Rochas em Engenharia

É de conhecimento comum que a utilização de maciços rochosos para a realização de diversas obras geotécnicas é histórica. Hoek (2007) cita as cavernas subterrâneas feitas para as tumbas dos faraós egípcios (2.700 aC), o túnel da Babilônia sob o rio Eufrates, que ligava o palácio com o templo de Belos (2.000 aC), o túnel para condução de água de 1.036 metros de comprimento na ilha grega Samos (700 aC.), dentre outras diversas obras que, usualmente, foram pensadas e construídas para trazer benefício e desenvolvimento para a população.

A mecânica das rochas está envolvida em diversos projetos (túneis, mineração, petróleo, sondagens etc.). O Quadro 1 mostra as diversas aplicações da mecânica das rochas em projetos de engenharia.

Tabela 1 - Projetos comuns da mecânica das rochas na engenharia

Campos de aplicação	Tipo de estruturas e áreas de projeto
Mineração	Minas subterrâneas de carvão: geometria salão-pilares ou a técnica <i>Longwall</i> de lavra
	Minas subterrâneas de metais: direção e sentido das galerias, colapso/fragmentação do corpo, melhoria no controle de <i>rock burst</i> (explosão de rochas)
	Minas a céu aberto: estabilidade de taludes rochosos
Transporte	Túneis: para rodovias, estradas de ferro, linhas e estações do transporte urbano ágil (metrô)
Geração de energia	Estações hidroelétricas e nucleares subterrâneas, armazenamento subterrâneo de óleo e gás, armazenamento de ar comprimido, depósitos subterrâneos para resíduos nucleares, aproveitamento de energia geotérmica
Exploração petrolífera	Processos de perfuração e sondagem, fraturamento hidráulico, extração de betume (óleo do xisto betuminoso)
Serviços	Transmissão subterrânea de água, tratamento (filtração) de efluentes industriais e municipais
Militar	Bases estratégicas profundas para armazenamento e lançamento de mísseis, instalações de defesa e profundidade
Habitação	Abrigos subterrâneos, armazenamento subterrâneo de alimentos e biotecnologia;
Aplicações recentes	Exploração espacial, previsão de terremotos, túneis abaixo do oceano (Ex: transporte de óleo; Canal da Mancha), câmaras subterrâneas de grande dimensão (no mínimo 100 m de vão) para projetos na área de defesa

Fonte: Bieniawski, 1984.

Ainda é muito comum, na prática diária, a confusão entre os termos rocha e maciço rochoso. Rocha ou matriz rochosa são definidas como materiais sólidos consolidados, constituídos por minerais que se apresentam em grandes massas ou fragmentos (blocos), é um material componente do maciço rochoso (AZEVEDO; MARQUES, 2006). Já o maciço rochoso é formado por um conjunto de porções de rochas, justapostos e articulados, formado pela matriz

rochosa e pelas discontinuidades que o atravessam. Estas discontinuidades são estruturas como juntas e falhas, presentes no maciço rochoso, tendo contribuição, ou não, para a integridade global da encosta (WYLLIE; MAH, 2004).

Os mecanismos de ruptura em rochas são controlados de três maneiras, podendo ser pela matriz rochosa, pelas discontinuidades ou pelo maciço rochoso, na dependência do tamanho dos blocos e das características das discontinuidades da área de estudo. Por isso, um efeito importante a ser considerado na análise é a escala entre o tamanho do volume e a intensidade de fraturamento do maciço rochoso. Em geral, quanto maior a escala, maior será a utilização das classificações, já que o efeito escala influenciará no tamanho dos blocos. É por isso que autores como Hoek *et al.* (2013) não recomendam a utilização das classificações em maciços rochosos intactos, uma vez que são esperados comportamentos mais próximos das análises realizadas em laboratório. A Figura 1 mostra o efeito escala e as recomendações em relação à utilização da classificação GSI.

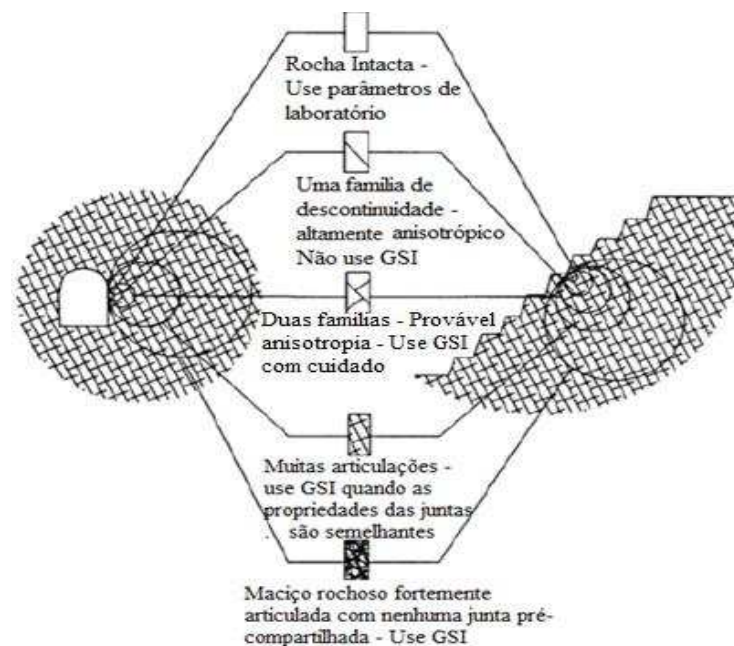


Figura 1 – Efeito escala e as recomendações para utilizar a classificação GSI. (Traduzido de HOEK *et al.* (2013)).

Nas investigações práticas em mecânica das rochas é necessária a investigação geológica para estabelecer as litologias e as camadas existentes das rochas envolvidas. Em seguida, deve-se estabelecer um perfil detalhado do fraturamento e determinar as propriedades físicas, mecânicas e petrológicas das rochas e dos produtos de seu intemperismo por meio de amostras obtidas por sondagens e escavação de exploração (JAEGER; COOK, 1979).

A Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas - ISRM (2007) propôs a classificação das principais características das descontinuidades importantes para o comportamento mecânico dos maciços rochosos (Figura 2), sendo elas: orientação, espaçamento, persistência, rugosidade, preenchimento, abertura, influência da percolação da água nas descontinuidades e o estado de alteração do maciço rochoso.

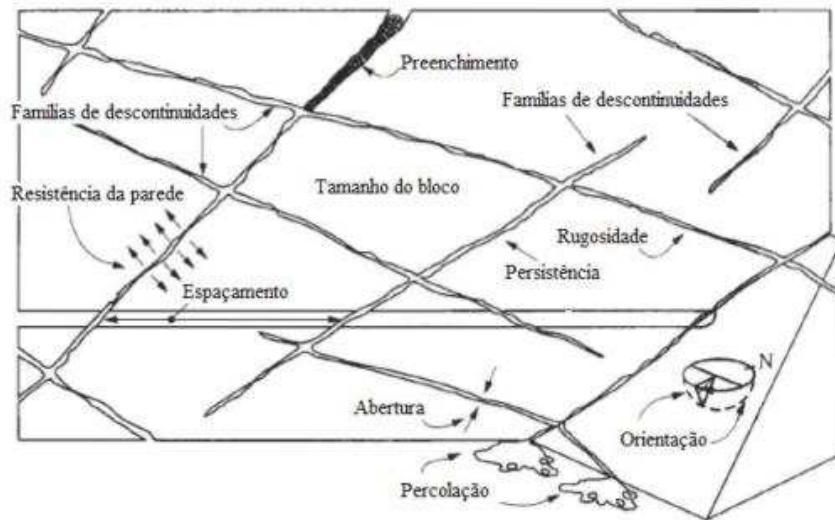


Figura 2 - Estruturas existentes nos maciços rochosos (ISRM, 2007).

A orientação das descontinuidades pode ser compreendida como a direção e o mergulho que ela faz em relação a atitude. Por isso, é possível afirmar que existe uma relação direta entre a orientação e a estabilidade de um maciço, já que são elas as responsáveis pela formação de blocos passíveis de escorregamento (HOEK; CARRANZA; CORKUM, 2002).

O espaçamento consiste na distância média perpendicular entre as descontinuidades de uma mesma família, tendo influência direta no tamanho dos blocos gerados, na fragmentação, na escavabilidade e na permeabilidade do maciço, influenciando o comportamento do maciço rochoso. Na Tabela 2 a seguir apresenta-se a classificação do espaçamento das descontinuidades sugerida pela ISRM (2007).

Tabela 2 - Classificação do espaçamento das descontinuidades

Descrição	Espaçamento (mm)
Extremamente Próximas	< 20
Muito próximas	20 – 60
Próximas	60 – 200
Moderadamente próximas	200 – 600
Afastadas	600 – 2000
Muito afastadas	2000 – 6000
Extremamente afastadas	> 6000

Fonte: ISRM, 2007

Outra característica importante que deve ser observada na descontinuidade é a persistência, ou seja, a extensão contínua da fratura. Um grande problema para quantificar essas fraturas acontece quando estas descontinuidades se desenvolvem para o interior do maciço. A ISRM (2007) descreveu a persistência conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Descrição da persistência das descontinuidades

Persistência	Comprimento
Muito baixa persistência	< 1m
Baixa persistência	1 - 3m
Persistência média	3 - 10m
Alta persistência	10 - 20m
Muito alta persistência	> 20m

Fonte: ISRM, 2007

Para as descontinuidades também deve ser levado em consideração as irregularidades e ondulações presentes na superfície, ou seja, a rugosidade. A rugosidade entre as superfícies da descontinuidade apresentam diversas formas, que condicionam diferentes atritos entre as paredes da descontinuidade e, conseqüentemente, variadas resistências ao cisalhamento.

Existem vários métodos para a determinação da rugosidade em uma descontinuidade do maciço rochoso. De acordo com a ISRM (2007), uma maneira prática de se obter este parâmetro é utilizando perfis típicos de rugosidade, nos quais se tem duas escalas de observações, a pequena e a intermediária. A pequena é utilizada para a determinação da irregularidade da superfície em pequena escala (centímetro), definindo se é rugosa, lisa ou polida. Já a intermediária é em uma escala maior (metros), que define se é recortada, ondulada ou plana. A combinação destes perfis típicos resulta em uma combinação de nove classes. Na Figura 3 ilustra-se os perfis típicos de rugosidade.

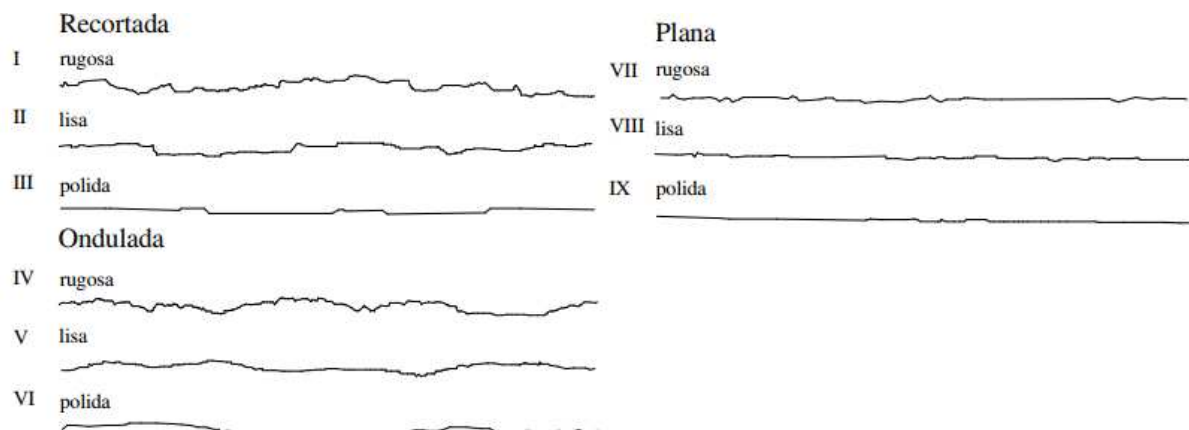


Figura 3 - Perfis típicos de rugosidade e respectivas classificações (BARTON *et al.* 1974, *apud* ZACARIAS, 2003).

A abertura de uma descontinuidade, que é a distância perpendicular entre as paredes, pode estar ou não preenchida com um material no interior das descontinuidades (GIANI, 1992). A grande variação das características físicas e mecânicas destes materiais e a abertura condicionam o comportamento das descontinuidades.

Outro aspecto importante a ser considerado nas descontinuidades está relacionado com a percolação. A água é um dos agentes mais importantes na alteração das rochas e na erosão dos solos. Além disso, as condições de estabilidade de um talude rochoso também são influenciadas pelas pressões hidráulicas ao longo da descontinuidade (GIANI, 1992). Por isso, a ISRM (2007) descreveu e classificou a presença de água nas descontinuidades conforme a Tabela 4 apresentada a seguir.

Tabela 4 - Descrição da presença de água nas descontinuidades

Classe	Descontinuidade sem Preenchimento	Descontinuidade com Preenchimento
I	Fratura muito plana e fechada, descontinuidades aparecem secas e sem possibilidade de circulação de água	Preenchimento muito consolidado e seco. Não é possível a circulação de água
II	Fratura seca e sem evidências de percolação de água	Preenchimento muito consolidado e seco. Não é possível a circulação de água
III	Fratura seca e com evidências de percolação de água	Preenchimento úmido e com a presença de gotas ocasionais
IV	Fratura úmida, sem circulação de água livre	Preenchimento que mostra evidências de lavagem e com fluxo de água contínua
V	Fratura, ocasionalmente gotejando, mas sem fluxo contínuo	Preenchimento localmente lavado e com fluxo considerável
VI	Fratura com fluxo contínuo de água	Preenchimento completamente lavado e com pressões de água elevadas

Fonte: adaptado de ISRM, 2007.

2.2 Classificações Geomecânicas de Maciços Rochosos

As classificações geomecânicas são métodos teóricos e empíricos que buscam estimar o comportamento do maciço rochoso, visando fornecer informações e ferramentas necessárias para o dimensionamento de projetos conceituais de engenharia executados em maciços rochosos. Estas classificações foram originadas por meio do acúmulo de experiências obtidas por seus autores anteriormente. Por isso, o conhecimento de cada método é fundamental, uma

vez que a origem e as limitações impostas pelo método nem sempre condizem com as condições do maciço rochoso estudado.

Terzarghi, em 1946, foi o primeiro a atribuir o uso de classificações geomecânicas aos maciços rochosos (*apud* HOEK; BROWN, 1980). Na classificação de Terzarghi, que era utilizada para suporte de túneis ferroviários e escavações, os maciços eram descritos de forma qualitativa e divididos de acordo com seus comportamentos.

As classificações geomecânicas comumente utilizadas atualmente para maciços rochosos são o índice de qualidade Q (*Tunnelling Quality Index*) de Barton *et al.* (1974), o índice RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1989) e o índice GSI (*Geological Strength Index*) de Hoek (1994). Enquanto os sistemas de classificação RMR e Q buscam recomendar soluções de engenharia (Comprimento do vão autossustentável, tipo de suportes, método de escavação etc.), a classificação GSI de Hoek (1994), visa estimar parâmetros de resistência e deformabilidade para o maciço rochoso, em busca de prever o comportamento do maciço para que a obra fique estável.

Jaques (2014), em sua pesquisa, realizou comparações entre resultados das classificações RMR e Q para maciços rochosos situado no Quadrilátero Ferrífero, na qual foi verificado que o método RMR apresenta resultados mais uniformes e confiáveis para os maciços rochosos da área de estudo. Por isso, neste trabalho optou-se por não realizar a classificação do maciço rochoso pelo método Q de Barton *et al.* (1974).

2.2.1 Classificação Geomecânica RMR (*Rock Mass Rating*)

O sistema de classificação RMR (*Rock Mass Rating*) foi proposto por Bieniawski (1974), baseado com experiências em túneis. Inicialmente, foi desenvolvido para determinar o tempo de sustentação sem suporte em relação ao vão livre de túneis, o que possibilitava o dimensionamento de túneis escavados em rochas a pouca profundidade e pouco fraturadas, mas depois sofreram algumas modificações que possibilitaram estimar a coesão e o ângulo de atrito de maciços rochosos, possibilitando a utilização em várias outras aplicações (estabilidade de taludes, estruturas subterrâneas de mineração e diversas escavações) (BIENIAWSKI, 1989; BRADY e BROWN, 1994; SERRA e OJIMA, 1998).

Com o passar do tempo, diversas modificações foram realizadas na classificação, destacando-se principalmente as de 1975, 1976, 1979 e 1989. Recentemente, Bieniawski (2011)

apresentou um novo artigo no qual aponta ter ocorrido um entendimento errôneo por parte dos usuários do RMR em relação aos pesos adotados pelo método.

O sistema de classificação desenvolvido por Bieniawski (1974) fornece uma avaliação geral da qualidade do maciço por meio de uma escala de 0 a 100, que está relacionada com seis parâmetros, constituídos pela análise da resistência à compressão uniaxial (σ_c), do RQD (*Rock Quality Designation*), do espaçamento das descontinuidades (S), da condição das descontinuidades (abertura, rugosidade, preenchimento, intemperismo e resistência das paredes), da condição de percolação da água subterrânea (w) e pela orientação das descontinuidades.

Em classificações com objetivo de se determinar os parâmetros de resistência da rocha, é utilizado o RMR básico na condição seca. Para cada parâmetro, existe uma avaliação específica, sendo o valor final dado pela soma dos parâmetros citados, obtendo-se o RMR geral. Somente em casos de obras específicas como túneis, fundações, minas e barragens, que é considerado o sexto parâmetro, que tem a função de verificar a influência das descontinuidades (direção e mergulho) (BIENIAWSKI, 1989). As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam os parâmetros sugeridos por Bieniawski (1989).

Tabela 5 - Determinação do valor associado com os parâmetros de Bieniawski.

Parâmetros			Coeficientes				"continua"		
1	Resistência da rocha intacta (σ_c)	Point Load (MPa)	> 10	4-10	2-4	1-2	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	< 1
	Pesos	15	12	7	4	2	1	0	
2	R.Q.D	90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25 %			
	Pesos	20	17	13	8	3			
3	Espaçamento das descontinuidades (s)	>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm			
	Pesos	20	15	10	8	5			
4	Condição das descontinuidades (ver Tabela)	Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alterada	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes ligeiramente alterada	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura < 5 mm ou juntas contínuas com separação 1-5 mm	Enchimento mole com espessura > 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5 mm			
		Pesos	30	25	20	10	0		
Parâmetros			Coeficientes				"conclusão"		
5	Presença de água (w)	Caudal por 10 metros de comprimento	Nenhum	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min		

	do túnel					
	Relação da pressão da água vs tensão principal máxima	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5
	Condições gerais	Completamente seco	Água intersticial	Úmido	Escorrimentos	Entrada de água
	Pesos	15	10	7	4	0

Fonte: Bieniawski, 1989

Tabela 6 - Condição das Descontinuidades por parâmetro

Persistência	1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20 m	> 20 m
Valor associado	6	4	2	1	0
Abertura	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 a 1,0 mm	1 a 5 mm	> 5 mm
Valor associado	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Levemente Rugosa	Lisa	Estriada
Valor associado	6	5	3	1	0
Preenchimento	Preenchimento duro			Preenchimento Macio	
	Nenhuma	< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm
Valor associado	6	4	2	2	0
Alteração	Não alterada	Ligeiramente	Moderadamente	Muito alterada	Decomposta
Valor associado	6	5	3	1	0

Fonte: Bieniawski, 1989

Tabela 7 - Efeito da orientação das descontinuidades em obras sobre maciços rochosos

Direção (<i>strike</i>) perpendicular em relação ao eixo do túnel (P6)					
Na direção de mergulho			Contra a direção de mergulho		
45° a 90°	20° a 45°	45° a 90°	20° a 45°		
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável		
Direção (<i>strike</i>) paralela em relação ao eixo do túnel			Independente da direção (<i>strike</i>)		
20° a 45°	45° a 90°		0° a 20°		
Razoável	Muito desfavorável		Razoável		
Orientações da direção e mergulho	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Túneis e Minas	0	- 2	- 5	- 10	- 12
Valor Fundações	0	- 2	- 7	- 15	- 25
Taludes	0	- 5	- 25	- 50	- 60

Fonte: Bieniawski, 1989

Segundo Bieniawski (1989), a orientação das descontinuidades pode ser compreendida como a direção e o mergulho que ela faz em relação ao maciço. Por isso, é possível afirmar que existe uma relação direta entre a orientação e a estabilidade de um maciço, já que são elas as responsáveis pela formação de blocos passíveis de escorregamento.

Com o resultado do índice RMR é possível estimar, para cinco categorias, o tempo de auto suporte para cada classe de maciço, o vão desejado e o tipo de suporte mais adequado, além de definir valores de coesão e ângulo de atrito interno do maciço rochoso. A Tabela 8 e a

Figura 4 são estimativas conservadoras, feitas por Bieniawski, em busca de obter o vão livre e o tempo de auto suporte da escavação subterrânea (BIENIAWSKI, 1989).

Tabela 8 - Classificação segundo o Rock Mass Rating

Somatória dos pesos (índice RMR)	100-81	80-61	60-41	40-21	< 21
Classes	1	2	3	4	5
Qualidade do maciço	Muito bom	Bom	Razoável	Pobre	Muito pobre
Coesão da massa rochosa (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Ângulo de atrito da massa rochosa	>45	35-45	25-35	15-25	<15

Fonte: Bieniawski, 1989

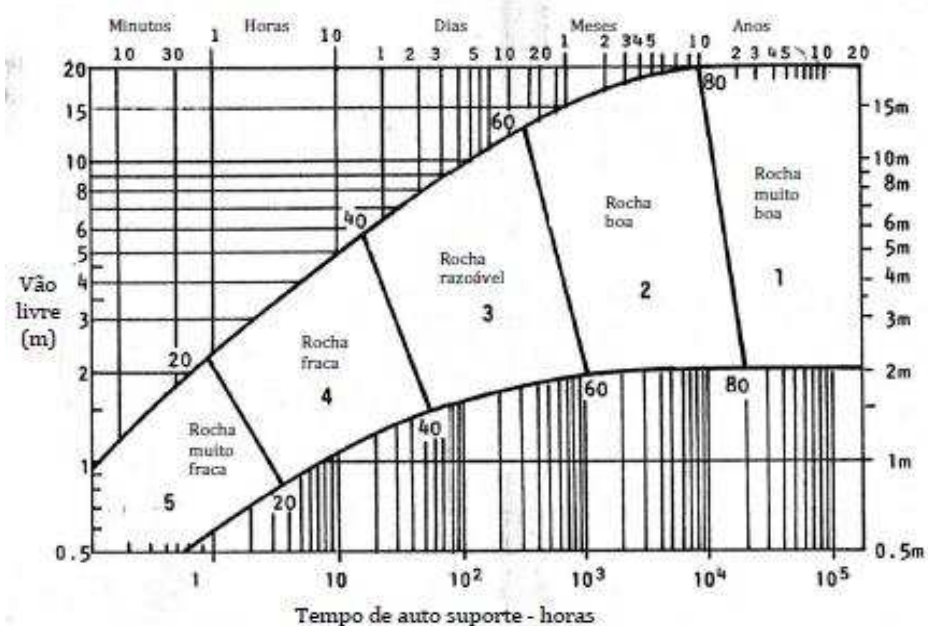


Figura 4 – Estimativa do tempo de auto suporte e vão livre segundo método RMR (Traduzido de BIENIAWSKI, 1989)

O acúmulo de experiência ao longo dos anos fez com que a classificação geomecânica RMR viesse sofrendo, desde 1974, adaptações em seus parâmetros (SERRA; OJIMA, 1998). Constatada essa necessidade da realização de alguns ajustes nos parâmetros da classificação, principalmente para maciços rochosos com elevado grau de intemperismo, alguns autores sugeriram algumas adaptações, como as descritas a seguir.

2.2.1.1 Alterações no RMR sugeridas por Bieniawski (2011)

Em 2011, Bieniawski apresentou uma explicação sobre a forma exata de como se usar os pesos adotados pelo método, uma vez que os usuários do RMR tiveram, na opinião do autor, um entendimento errôneo na hora de atribuir esses valores. O autor explica ainda que os pesos adotados não eram valores mínimos, como estavam sendo usados, e sim valores médios.

Essa alteração dada por Bieniawski altera principalmente as classificações encontradas para os maciços rochosos de baixa qualidade, uma vez que o valor mínimo encontrado nas classificações desses maciços, na condição seca, passa de um valor mínimo de 23 para 15 pontos ou menos, já que o parâmetro “espaçamento das descontinuidades” passa a ter valor mínimo de 0 em vez de 5 pontos, e o RQD passa a ter valor mínimo de 0 pontos em vez de 3 pontos.

Com essa nova atribuição dos pesos fica possível classificar, na condição seca, maciços rochosos de baixa qualidade (classe V), tornando o método mais próximo da realidade dos maciços rochosos susceptíveis ao elevado grau de intemperismo provocados pelo clima tropical.

2.2.1.2 Alterações e melhorias no RMR sugeridos por Celada *et al.* (2014)- RMR14

Devido à explicação dada por Bieniawski (2011) e das dificuldades encontradas para determinar valores de RQD nas frentes de escavações, Celada *et al.* (2014) apresentaram o RMR14. Nesta atualização, os critérios de avaliações do RMR básico foram modificados, incorporando os efeitos da alterabilidade da matriz rochosa pela água.

Com isso, no RMR14 foram mantidos três dos parâmetros que integravam o RMR89, a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, o número de descontinuidades por metro (LAWSON; BIENIAWSKI, 2013) e o efeito da água, sendo os valores destes parâmetros os mesmos do RMR89.

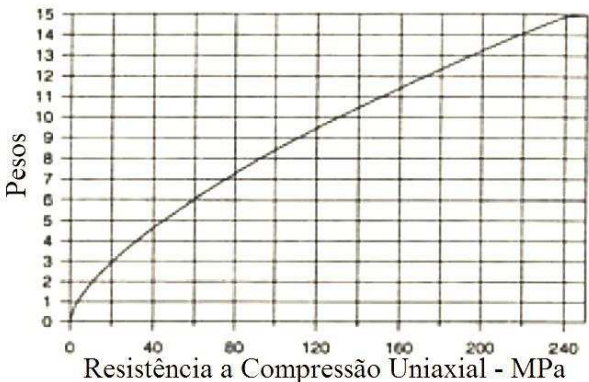
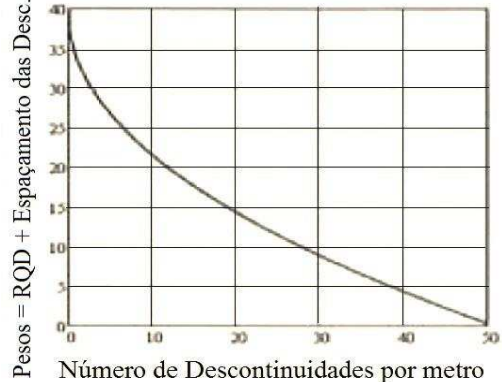
Com relação à pontuação do parâmetro resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, Celada *et al.* (2014) inseriram, desta vez, os gráficos apresentados por Bieniawski (1989). Para o número de descontinuidades por metro, Celada *et al.* (2014) mantiveram as recomendações de Lawson e Bieniawski (2013), ou seja, a substituição dos parâmetros “RQD” e “espaçamento das descontinuidades” pelo parâmetro “número de descontinuidades por metro”. Lawson e Bieniawski (2013) afirmaram que o uso do RQD era de difícil determinação frente aos maciços, sendo, por isso, necessário a substituição dos parâmetros por um de melhor uso prático.

Os dois novos parâmetros incluídos no RMR14 são a resistência das descontinuidades e a alterabilidade pelo efeito da água. Com relação às características das descontinuidades, são

considerados quatro aspectos, a persistência, a rugosidade (medida pelo Coeficiente de Rugosidade das Juntas – JRC), o tipo de preenchimento e o grau de alteração. Já a alterabilidade é avaliada de acordo com os resultados obtidos com o Slake Durability Test, definido pela norma ASTM D4644-87.

Com isso, Celada *et al.* (2014) apresentaram os critérios para o cálculo dos cinco parâmetros que compõem o RMR14 na condição básica, como podem ser visualizados na Tabela 9.

Tabela 9 – Critérios para calcular o RMR 14 básico

1. Resistência da Rocha Intacta		2. Número de descontinuidades			
					
3. Condições das Descontinuidades					
Persistência	<1m	1-3m	3-10m	>10m	
	5	4	2	0	
Rugosidade	Muito Rugosa	Rugosa	Lisa	Estriada	
	5	3	1	0	
Preenchimento	Hard		Soft		
	<5mm	>5mm	<5mm	>5mm	
	5	3	1	0	
Alteração	Não alterado	Moderadamente alterado	Muito alterado	Decomposto	
	5	3	1	0	
4. Presença de água					
Condição Geral	Seco	Pouco úmido	úmido	Escorrimentos	Fluxo de água
	15	10	7	4	0
5. Alterabilidade I_{d2} (%)					
>85	60-85	30-60		<30	
10	8	4		0	

Fonte: Traduzido de Celada *et al.*, 2014.

2.2.1.3 Índice de Ajuste (A_w) proposto por Santos *et al.* (2012) para o RMR89

Santos *et al.* (2012) apresentaram uma proposta de contribuição metodológica ao sistema RMR levando em consideração o grau de intemperismo no sistema, uma vez que o método

tradicional de classificação RMR não considera um parâmetro direto relacionado às ações provocadas pelos climas tropicais aos maciços rochosos.

Santos *et al.* (2012) afirmaram que os sistemas de classificação de maciços rochosos existentes foram elaborados em locais com contextos geológicos e climatológicos diferentes das regiões de clima tropical, em que ocorrem intensas precipitações que provocam horizontes de intemperismo bem desenvolvidos, com grandes espessuras. Por conta disso, o grau de intemperismo é um parâmetro importante a ser considerado na caracterização da qualidade dos maciços nestas regiões.

Nesse contexto, Santos *et al.* (2012) sugeriram um novo índice de ajuste (A_w) para a classificação de Bieniawski. Este novo índice está baseado na intensidade do grau de intemperismo (W) ou alteração que afeta o maciço rochoso. A metodologia consistiu em inserir um fator de redução na classificação RMR_{89} , obtido por meio dos valores máximos que poderiam ser alcançados para cada parâmetro a depender do grau de intemperismo do maciço. Com estes valores, foi elaborada uma razão entre os valores máximos e a classe em que geralmente os graus de intemperismo se encaixavam para a região do Quadrilátero Ferrífero. Na Tabela 10 mostra-se os possíveis valores máximos de RMR versus o grau de intemperismo.

Tabela 10 – Possíveis valores máximos de RMR versus o grau de intemperismo

Grau de Intemperismo do Maciço		Parâmetros					Total RMR
		Resistência (MPa)	RQD (%)	Espaçamento das descontinuidades (cm)	Condição da descontinuidade	Condição de saturação	
W1	Faixa de valores	>250	90 – 100	> 200	-	Seco	
	Pesos	15	20	20	30	15	100
W2	Faixa de valores	100 – 250	90 – 100	> 200	-	Seco	
	Pesos	12	20	20	29	15	96
W3	Faixa de valores	50 – 100	90 – 100	> 200	-	Seco	
	Pesos	7	20	20	27	15	89
W4	Faixa de valores	25 – 50	75 – 90	60 – 200	-	Seco	
	Pesos	4	17	15	25	15	76
W5	Faixa de valores	5 – 25	25 – 50	6 – 20	-	Seco	
	Pesos	2	8	8	0	15	33
W6	Faixa de valores	1 – 5	< 25	6	-	Seco	
	Pesos	1	3	5	0	15	24

Fonte: Santos *et al.* (2012)

Tendo os valores máximos de pontuação para cada grau de intemperismo, Santos *et al.* (2012), por meio das suas experiências em classificação de maciços intemperizados, determinaram o índice de ajustes por meio da razão entre os possíveis valores máximos de RMR e os pesos esperados para cada grau de intemperismo, correspondente ao limite superior dos valores máximos de RMR. Na Tabela 11 apresenta-se os valores dos índices de ajustes (Aw) do RMR obtidos pela metodologia desenvolvida pelos autores.

Tabela 11 – Índices de ajuste obtidos para cada grau de intemperismo

Grau de Intemperismo	Pesos máximos obtidos	Classe de maciços 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

Fonte: Santos *et al.* (2012)

2.2.1.4 RMR adaptado por Vale (2008)

Devido à grande dificuldade de encontrar resultados satisfatórios na classificação RMR em maciços rochosos comumente encontrados nas minas da Vale, especialmente nas minas da borda leste do Quadrilátero Ferrífero, a empresa adaptou o RMR_{89} inserindo correções nos parâmetros, com o objetivo de ajustar a classificação de maciços rochosos à ação prejudicial dos climas tropicais e subtropicais e dos danos provocados por explosivos e alívios de tensão. Embora isso não tenha sido divulgado para a comunidade científica, nos trabalhos de Costa (2009) e Cruz (2017), são amplamente mostrados alguns resultados dessas classificações adaptadas de RMR.

O nível de saturação e a orientação das descontinuidades não são considerados nesta adaptação, uma vez que estes parâmetros são avaliados nas análises de estabilidade, segundo Hoek e Brown (1988). A adaptação realizada por Vale (2008) considera nove parâmetros adaptados das tabelas de Brown (1981) e da ISRM (2007), com quatro desses parâmetros relacionados à qualidade dos maciços rochosos (Grau de Alteração - GA, Grau de Consistência - GC, Grau de Fraturamento (GF) e RQD), e cinco relacionados a descontinuidades (Tipo de Descontinuidade (TD), Alteração das Paredes (AP), Abertura (AB), Tipo de Preenchimento (TP) e a Rugosidade (RU)) avaliados individualmente.

A resistência à compressão uniaxial (σ_c) é definida pela combinação com das tabelas de graus de consistência (GA) e grau de intemperismo (GA) da ISRM (2007). O espaçamento das descontinuidades são definidas pela combinação de RQD e grau de fratura (GF), também retirados da tabela da ISRM (2007), já que existe uma relação entre estes parâmetros. Todos os outros cinco parâmetros, que estão relacionados às características de descontinuidades (TD, AP, AB, RU e TP), são avaliados individualmente. Considerando esta abordagem, esperava-se uma melhor avaliação para o mapeamento de campo devido ao dano por explosão e alívio de tensão.

Além disso, no método sugerido pela Vale (2008) também foram realizadas algumas alterações nos pesos de alguns parâmetros do RMR, como mostrado na Tabela 12. Nesta modificação, o Grau de Alteração (GA) é analisado associadamente com o Grau de Consistência (GC). Com isso, espera-se reduzir a dupla contagem imposta pelos pesos das descontinuidades na resistência da rocha intacta na classificação RMR.

Tabela 12- Pesos adotados para GC e GA e RU no RMR adaptado pela Vale (2008).

GRAU DE CONSISTÊNCIA	GRAU DE ALTERAÇÃO	PESO	GRAU DE CONSISTÊNCIA	GRAU DE ALTERAÇÃO	PESO
Extremamente macia	Fresca	3	Média	Altamente alterada	9
Extremamente macia	Levemente alterada	3	Média	Completamente	7
Extremamente macia	Moderadamente alterada	0	Média	Solo residual	7
Extremamente macia	Altamente alterada	0	Média dura	Fresca	23
Extremamente macia	Completamente alterada	0	Média dura	Levemente	23
Extremamente macia	Solo residual	0	Média dura	Moderadamente	17
Macia	Fresca	5	Média dura	Altamente alterada	17
Macia	Levemente alterada	5	Média dura	Completamente	14
Macia	Moderadamente alterada	3	Média dura	Solo residual	14
Macia	Altamente alterada	3	Dura	Fresca	35
Macia	Completamente alterada	3	Dura	Levemente	35
Macia	Solo residual	3	Dura	Moderadamente	28
Média macia	Fresca	7	Dura	Altamente alterada	28
Média macia	Levemente alterada	7	Dura	Completamente	21
Média macia	Moderadamente alterada	5	Dura	Solo residual	21
Média macia	Altamente alterada	5	Extremamente	Fresca	35
Média macia	Completamente alterada	3	Extremamente	Levemente	35
Média macia	Solo residual	3	Extremamente	Moderadamente	35
Média	Fresca	17	Extremamente	Altamente alterada	35
Média	Levemente alterada	17	Extremamente	Completamente	33
Média	Moderadamente alterada	9	Extremamente	Solo residual	33
RUGOSIDADE (RU)					PESO
Extremamente rugosa; áspera e irregular; s1.					6
Rugosa; lisa e irregular; s2.					5
Levemente rugosa; lisa e regular; s3.					3
Superfície lisa; s4.					1
Superfície com <i>slickenside</i> ; lisa estriada; s5.					0

Fonte: adaptado de Vale, 2008.

Já na Tabela 13 são apresentados os pesos atribuídos para o Grau de Fraturamento (GF) associado com o RQD e dos pesos para TD, AP, AB e o Tipo de Preenchimento.

Tabela 13 – Pesos adotados no RMR adaptado pela Vale (2008).

RQD	GRAU DE FRATURAMENTO		TIPO DE DESCONTINUIDADE	
	(GF)	PESO	(TD)	PESO
Muito pobre (q1)	Desagregado (0)	3	Junta	3
Muito pobre (q1)	Maciço (1)	5	Acamamento	0
Muito pobre (q1)	Pouco fraturado (2)	5	Lamina	3
Muito pobre (q1)	Moderadamente fraturado (3)	4	Lente	3
Muito pobre (q1)	Muito fraturado (4)	4	Xistosidade	0
Muito pobre (q1)	Intensamente fraturado (5)	3	Fratura	3
Muito pobre (q1)	Fragmentado (6)	3	Foliação	0
Pobre (q2)	Desagregado (0)	7	Veio	6
Pobre (q2)	Maciço (1)	12	Falha	0
Pobre (q2)	Pouco fraturado (2)	12	Zona de cisalhamento	0
Pobre (q2)	Moderadamente fraturado (3)	10		
Pobre (q2)	Muito fraturado (4)	10	ALTERAÇÃO DAS PAREDES	PESO
Pobre (q2)	Intensamente fraturado (5)	8	Fresca	6
Pobre (q2)	Fragmentado (6)	8	Levemente alterada	5
Regular (q3)	Desagregado (0)	11	Moderadamente alterada	3
Regular (q3)	Maciço (1)	16	Altamente alterada	1
Regular (q3)	Pouco fraturado (2)	16	Completamente alterada	1
Regular (q3)	Moderadamente fraturado (3)	15		
Regular (q3)	Muito fraturado (4)	15	ABERTURA	PESO
Regular (q3)	Intensamente fraturado (5)	12	Fechada	6
Regular (q3)	Fragmentado (6)	12	Pequena	1
Bom (q4)	Desagregado (0)	16	Moderada	0
Bom (q4)	Maciço (1)	19	Larga	0
Bom (q4)	Pouco fraturado (2)	19	Cavernosa	0
Bom (q4)	Moderadamente fraturado (3)	18		
Bom (q4)	Muito fraturado (4)	18	TIPO DE PREENCHIMENTO	PESO
Bom (q4)	Intensamente fraturado	17	Argila (ag)	0
Bom (q4)	Fragmentado (6)	17	Mica (mi)	0
Excelente (q5)	Desagregado (0)	18	Talco (tc)	0
Excelente (q5)	Maciço (1)	20	Carbonato (cb)	2
Excelente (q5)	Pouco fraturado (2)	20	Hidroxidos (hi)	2
Excelente (q5)	Moderadamente fraturado (3)	20	Oxidos (ox)	4
Excelente (q5)	Muito fraturado (4)	20	Canga (cg)	4
Excelente (q5)	Intensamente fraturado (5)	19	Quartzo (qt)	6
Excelente (q5)	Fragmentado (6)	19	-	6

Fonte: Vale, 2008.

As descrições dos parâmetros utilizados pela Vale podem ser visualizadas no ANEXO deste trabalho.

2.2.2 Rock Quality Designation (RQD)

O índice RQD (*Rock Quality Designation*) foi introduzido por Deere e Miller (1966) com a finalidade de quantificar a qualidade dos maciços rochosos obtidos por meio de testemunhos de furos de sondagem.

O RQD foi definido como a soma dos fragmentos maiores ou iguais a 10 centímetros, separados por fraturas naturais, em relação ao comprimento total da manobra, ou seja:

$$RQD = \frac{\Sigma \text{ rochas intactas maiores ou iguais a } 10 \text{ cm}}{\text{comprimento total da manobra}} \times 100 \quad (\text{eq.1})$$

De acordo com os valores obtidos pelo índice RQD, é possível correlacionar o resultado com a qualidade do maciço rochoso por meio da Tabela 14.

Tabela 14 - Classificação da qualidade do maciço rochoso segundo valores de RQD

RQD (%)	QUALIDADE DO MACIÇO ROCHOSO
0 – 25	Muito fraco
25 - 50	Fraco
50 – 75	Razoável
75 – 90	Bom
90 – 100	Excelente

Fonte: Deere; Miller, 1996.

Apesar de o RQD ser um método considerado simples e de baixo custo, nem sempre é possível ter acesso aos testemunhos de sondagens, por isso, muitos pesquisadores desenvolveram métodos de estimativa do índice de qualidade da rocha. Um destes métodos foi proposto por Pamstrom (1982), no qual o autor desenvolveu uma correlação entre o índice de qualidade da rocha com o número de descontinuidades por metro cúbico, sendo expressa por:

$$RQD = 115 - 3,3Jv \quad (\text{eq.2})$$

Em que,

Jv – somatória do número de descontinuidades por unidade de volume, para um conjunto de famílias.

Em que,

$$Jv = \sum \frac{1}{S_i} \quad (\text{eq.3})$$

S_i é o espaçamento das descontinuidades em metros para uma referida família de descontinuidades.

A equação de Palmström (1982), que correlaciona o RQD com o número de descontinuidades por metro cúbico (J_v), foi obtida empiricamente e ilustrada segundo o ábaco representado pela Figura 5.

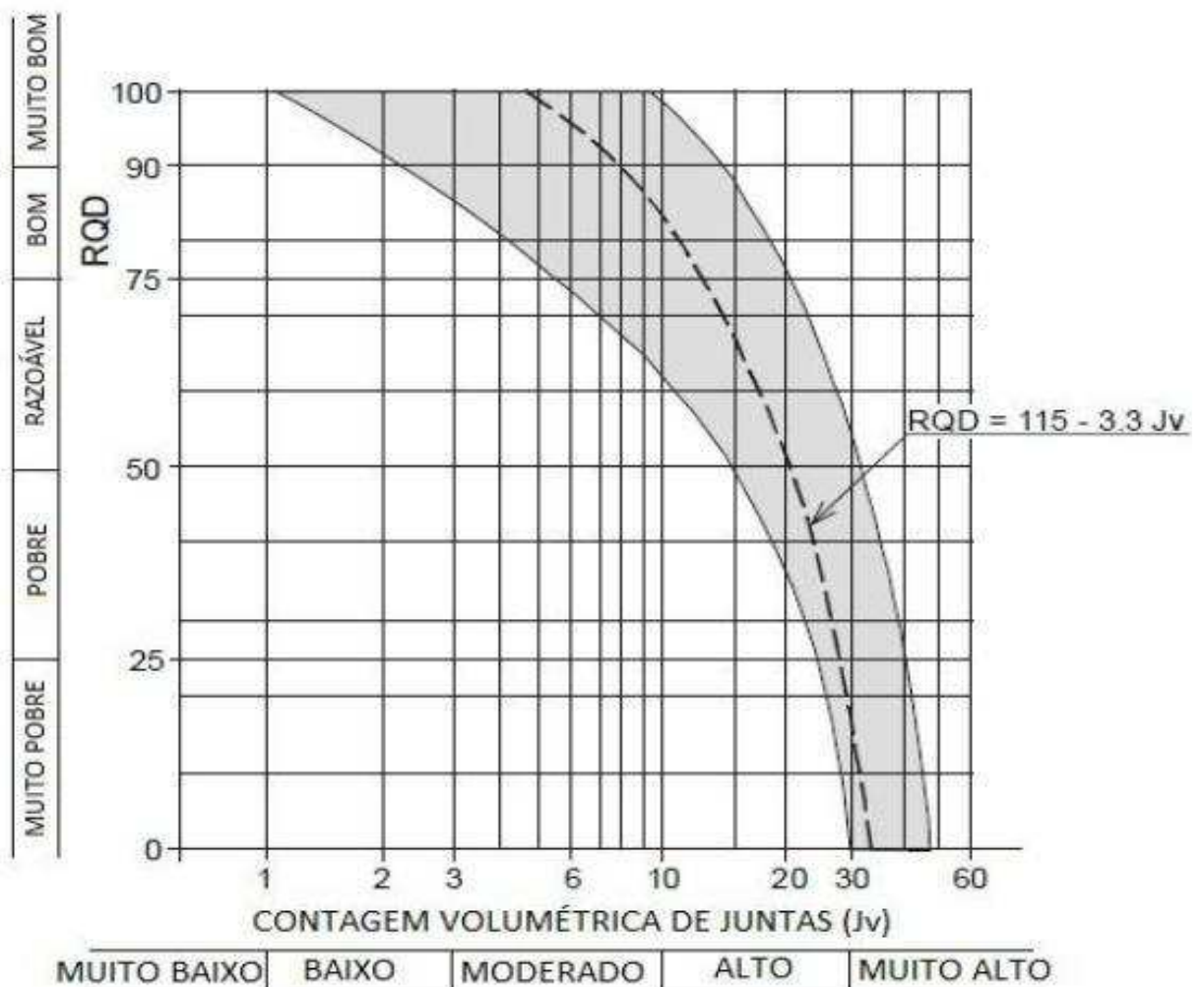


Figura 5 - Correlação entre RQD e J_v (PALMSTRÖM, 1982 modificado por, SANTOS, 2015).

Outro método de encontrar o RQD também foi proposto por Bieniawski (1989), no qual é realizada uma correlação entre o espaçamento das descontinuidades e o valor do RQD. Para cada espaçamento é atribuído um RQD máximo, mínimo e médio, conforme pode ser observado pela Figura 6.

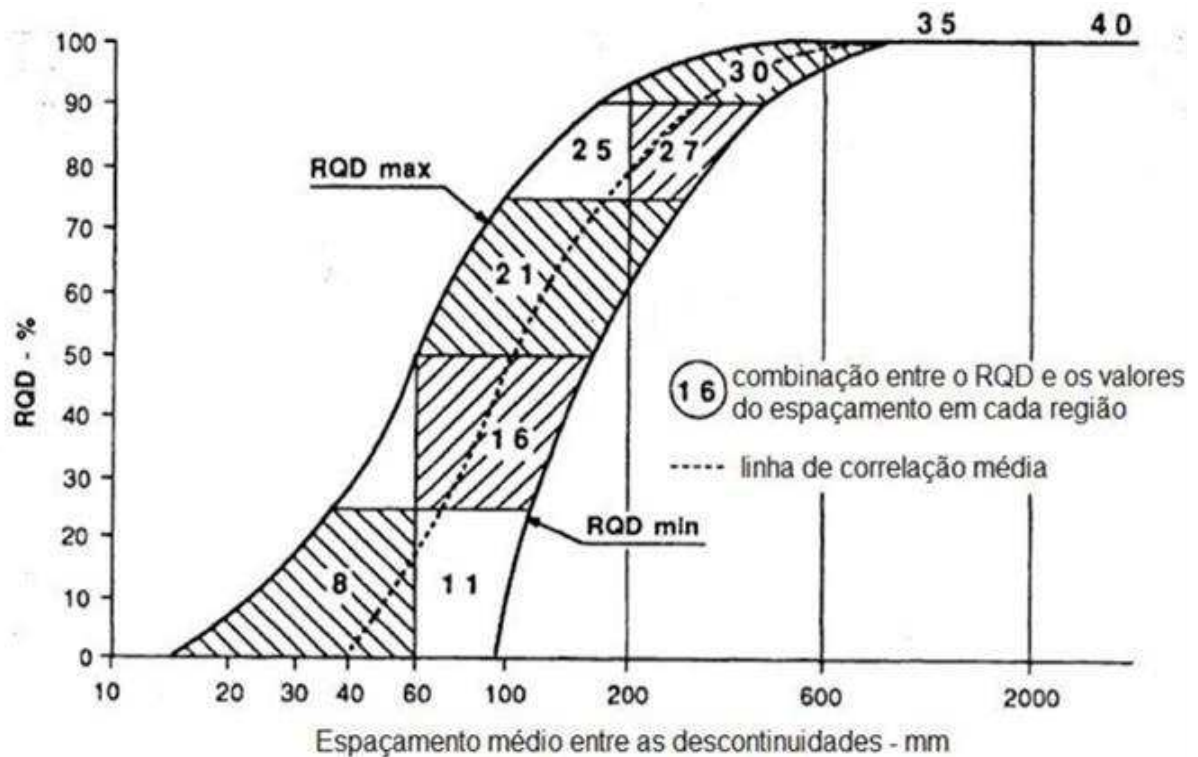


Figura 6 - Correlação entre o RQD e o espaçamento das descontinuidades (BIENIAWSKI, 1989 modificado por, SANTOS, 2015).

Mais recentemente, Palmström (2005) ao ampliar sua análise incluindo blocos de diferentes tamanhos e formas. Uma nova correlação entre os parâmetros RQD e J_v foi encontrada em busca de aperfeiçoar os resultados encontrados pela fórmula de 1982. Ele propôs que a relação (equação 2) dada em seu artigo de 1982 deveria ser modificada para:

$$RQD = 110 - 2,5 J_v \quad (\text{eq.4})$$

2.2.3 “Critério de Hoek-Brown” e o Índice de Resistência Geológica – GSI

Ao contrário da determinação das propriedades das rochas, que pode ser realizada em laboratório, a determinação das propriedades provenientes dos maciços rochosos é de difícil estimativa, uma vez que ensaios em campo dessa magnitude os tornam inviáveis tecnicamente e financeiramente. Por isso, em busca de preencher essa dificuldade, surgiram várias relações matemáticas, conhecidas como “critérios de resistência”. Estes critérios estimam as tensões correspondentes à ruptura do maciço rochoso (COSTA, 2009). Dentre os principais critérios de resistência utilizados em maciços rochosos estão o “critério de Mohr-Coulomb”, o “critério de Barton e Choubey” desenvolvido em 1977 e o “critério de Hoek e Brown”, apresentado em 1980.

O critério de resistência de Mohr-Coulomb é o critério mais conhecido atualmente e o mais simples. Sua aplicação é geralmente para solos e materiais intemperizados, algumas rochas intactas e para descontinuidades lisas e planas ou quando controladas pelo preenchimento. Neste critério, a resistência ao cisalhamento é composta pela coesão e pelo ângulo de atrito. O critério de Barton e Choubey é direcionado para os maciços fraturados em que as descontinuidades são as principais responsáveis pelas deformações. Já o critério de Hoek e Brown sugeriu uma curva σ_1 versus σ_3 para a ruptura de maciços rochosos e rocha intacta (COSTA, 2009), sendo este o critério utilizado na classificação GSI.

Hoek e Brown (1980) apresentaram um novo método para estimar a resistência do maciço rochoso, na busca de fornecer dados para análise associada à concepção de escavações subterrâneas em maciços rochosos, conhecido como “Critério de Hoek-Brown”. Este critério de ruptura foi fundamentado a partir de investigações feitas por Hoek (1968) sobre rupturas frágeis de rochas intactas e de um método de estudo sobre comportamentos de maciços rochosos de Brown (1970). Em 1980, Hoek e Brown conseguiram desenvolver uma correlação empírica que correlacionava a tensão principal à resistência da rocha intacta, sendo definida pela seguinte fórmula:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0,5} \quad (\text{eq.5})$$

Em que:

σ'_1 = a tensão principal maior de ruptura;

σ'_3 = a tensão principal menor aplicada;

σ_{ci} = a resistência à compressão uniaxial do material rochoso;

m e s = constantes dependentes das propriedades da rocha e da medida na qual ocorre o fraturamento submetido a σ_1 e σ_3 .

Com isso, pode-se obter a equação a seguir:

$$y = m\sigma_c \cdot x + s\sigma_{ci}^2 \quad (\text{eq.6})$$

Em que,

$$y = (\sigma_1 - \sigma_3); \quad (\text{eq.7})$$

$$x = \sigma_3. \quad (\text{eq.8})$$

No caso de rocha intacta, a constante s deve ser igual a 1 (um), devendo a resistência à compressão uniaxial, σ_{ci} , e a constante da rocha m serem dadas pelas seguintes equações:

$$\sigma_c^2 = \frac{\sum y_i}{n} - \left[\frac{\left(\frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \right)}{\right] \frac{\sum x_i}{n} \quad (\text{eq.9})$$

e,

$$m = \frac{1}{\sigma_c} \left[\frac{\left(\frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \right)}{\right] \quad (\text{eq.10})$$

Em que x_i e y_i são sucessivos pares de dados e n é o número total de pares.

Diferentemente das classificações tradicionais, que buscam recomendar soluções para problemas de engenharia, o *Geological Strength Index* (GSI) ou Índice de Resistência Geológica, foi criado com o objetivo de estimar parâmetros de resistência do maciço rochoso em diferentes condições geológicas, uma vez que o uso de ensaios *in situ* para a obtenção dos parâmetros de Hoek-Brown é inviável do ponto de vista técnico e econômico.

Com isso, o índice GSI traz várias versões do critério de Hoek - Brown em um simplificado critério generalizado, que engloba a grande maioria dos tipos de rochas encontrados normalmente em engenharia subterrânea. A classificação é realizada por meio de um exame visual do maciço em afloramento ou em superfície da escavação, nos quais se descrevem minuciosamente as características litológicas, estruturais e das condições das discontinuidades existentes. Essa descrição da condição das juntas e do tamanho e forma dos blocos são as principais condicionantes que agem sobre o comportamento do maciço rochoso.

Hoek sugeriu que os índices RMR e Q fossem corrigidos, retirando os parâmetros responsáveis pelas ações externas do maciço rochoso (pressão da água e a orientação das discontinuidades) para, em seguida, o GSI ser calculado. Como esses parâmetros devem ser considerados nos projetos, a desconsideração não deve afetar os parâmetros do maciço. Por

isso, o GSI pode ser calculado por meio do RMR (1976), ou pelo RMR (1989) menos 5 pontos, ou seja:

$$GSI = RMR_{76} \quad (\text{eq.11})$$

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (\text{eq.12})$$

Devido à dificuldade encontrada pelo RMR em classificar maciços rochosos abaixo de 18 para o RMR_{76} e, abaixo de 23 para o RMR_{89} , Hoek recomendou a utilização do sistema Q de Barton, não considerando o SRF e nem o efeito da água subterrânea (J_w), ou seja:

$$Q' = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \quad (\text{eq.13})$$

Sendo, por isso, o GSI calculado como:

$$GSI = 9 \ln Q' + 44 \quad (\text{eq.14})$$

As estimativas de GSI, propostas por Marinós e Hoek (2000), para maciços rochosos heterogêneos e fraturados, podem ser visualizadas no Anexo A deste trabalho.

Segundo Hoek *et al.* (2002), estimado o índice GSI, é possível determinar a resistência do maciço rochoso por meio da equação generalizada do critério de Hoek-Brown (equação 15). Este critério foi uma das adaptações sugeridas por Hoek, no qual a forma do gráfico de tensão principal poderia ser ajustada por meio de um coeficiente variável a em substituição da raiz quadrada na equação 5.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (\text{eq.15})$$

Em que m_b é um valor reduzido do material constante m_i , e é dado por:

$$m_b = m_i * \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (\text{eq.16})$$

Quando se tem $GSI < 25$, ou seja, maciços rochosos com elevado grau de alteração, a constante a para o critério de Hoek- Brown generalizado é aplicável com a seguinte fórmula:

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (\text{eq.17})$$

Ainda, para determinar a resistência à compressão simples, basta substituir $\sigma'_3 = 0$ na equação generalizada do critério de Hoek-Brown:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} * S^a \quad (\text{eq.18})$$

Se considerado a condição de tensão $\sigma'_1 - \sigma'_3 = \sigma_t$, determina-se, para a resistência à tração da rocha, a seguinte equação:

$$\sigma_t = \frac{S^a \sigma_{ci}}{m_b} \quad (\text{eq.19})$$

O parâmetro D é um indicador que depende do grau de integridade e do relaxamento do maciço rochoso após escavação ou detonação, podendo variar de 0 (zero) (para maciços submetidos a poucos distúrbios) a 1 (um) (para os maciços submetidos a muitos distúrbios *in situ*).

Hoek *et al.* (2002) também sugeriram uma expressão para o módulo de deformabilidade para maciços rochosos compostos por rochas com resistência menor do que 100 MPa, em que:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2} \right) * \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} * 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (\text{eq.20})$$

Para rochas acima de 100 MPa, o módulo de deformabilidade pode ser obtido pela seguinte equação:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2} \right) * 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (\text{eq.21})$$

A Tabela 15 a seguir mostra as diretrizes para estimar o fator de perturbação D a partir da aparência do maciço rochoso.

Tabela 15- Diretrizes para estimar o fator de perturbação D.

Aparência da massa rochosa	Descrição da massa rochosa	Valor sugerido de D
	Excelente qualidade controlada de explosão ou escavação por tuneladora resulta em perturbação mínima para a massa de rocha confinada em torno de um túnel.	D=0
	A escavação mecânica ou manual em massas rochosas de baixa qualidade (sem jateamento) resulta em perturbações mínimas na massa rochosa circundante. Nos casos em que os problemas de esmagamento resultam em elevação significativa do piso, a perturbação pode ser grave, a menos que seja colocado um inversor temporário, como mostrado na fotografia.	D=0 D=0,5 Sem inversor
	A qualidade muito ruim de um túnel de rocha dura resulta em danos locais graves, estendendo-se 2 ou 3 m, na massa rochosa circundante.	D = 0,8
	A explosão em pequena escala em furos de engenharia civil resulta em danos modestos em massa de rocha, particularmente se a explosão controlada é usada como mostrado no lado esquerdo da fotografia. No entanto, o alívio da tensão resulta em alguma perturbação.	D = 0,7 Explosão boa D= 1,0 Explosão fraca
	As minas de mina a céu aberto muito grandes sofrem distúrbios significativos devido à explosão de produção pesada e também devido ao alívio de tensão da remoção de sobrecarga. Em algumas rochas mais macias, a escavação pode ser realizada por escarificação e o grau de dano aos taludes é menor.	D = 1,0 Detonação D = 0,7 Escavação mecânica

Fonte: Traduzido de Hoek *et al.* (2002).

Hoek *et al.* (2002) mostrou também ser possível, por meio da equação generalizada do Critério de Hoek-Brown, estimar o ângulo de atrito e a coesão dos maciços rochosos. O procedimento utiliza o critério de Mohr-Coulomb, no qual determina-se a relação linear média da equação generalizada a uma faixa de valores da tensão principal menor, definida por $\sigma_t = \sigma_3 = \sigma_{max}$. Fundamentada nas envoltórias de Mohr-Coulomb, as equações a seguir estipulam o ângulo de atrito (ϕ') e coesão efetiva (c') do maciço rochoso.

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (\text{eq.22})$$

$$c' = \frac{\sigma'_{ci}[(1+a)(2+a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{(6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a))}}} \quad (\text{eq.23})$$

Em que,

$$\sigma'_{3n} = \frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_{ci}} \quad (\text{eq.24})$$

Nas envoltórias de Mohr-Coulomb, a equação de cisalhamento (τ) é dada em função da tensão normal (σ), em que:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (\text{eq.25})$$

A relação entre os esforços provocados pela tensão principal maior e menor pode ser encontrada pela seguinte equação:

$$\sigma'_1 = \frac{2c' \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} * \sigma'_3 \quad (\text{eq.26})$$

Segundo Hoek *et al.* (2013) o Índice de Resistência Geológica (GSI) original foi desenvolvido pressupondo que a classificação seria feita por geólogos ou engenheiros geólogos, uma vez que a mesma é realizada por meio de uma descrição visual e qualitativa do maciço rochoso. Contudo, a grande utilização da classificação por engenheiros, tornava, para esses usuários, a classificação menos confortável devido à necessidade de descrições geológicas qualitativas.

Por isso, visando tornar a classificação GSI mais quantitativa, Hoek *et al.* (2013) propuseram um novo gráfico no qual é possível quantificar o GSI em função de dois parâmetros que são utilizados na classificação RMR de Bieniawski (1989): a condição das descontinuidades e o RQD.

Com a alteração sugerida por Hoek *et al.* (2013) a estrutura do maciço pode ser estimada seguindo os valores de RQD, bastando somente dividir o seu valor pela metade. Já a condição da superfície pode ser estimada pela condição das descontinuidades, bastando somente aumentar o seu valor em cinquenta por cento. O Gráfico 1 ilustra a nova proposta apresentada por Hoek *et al.* (2013).

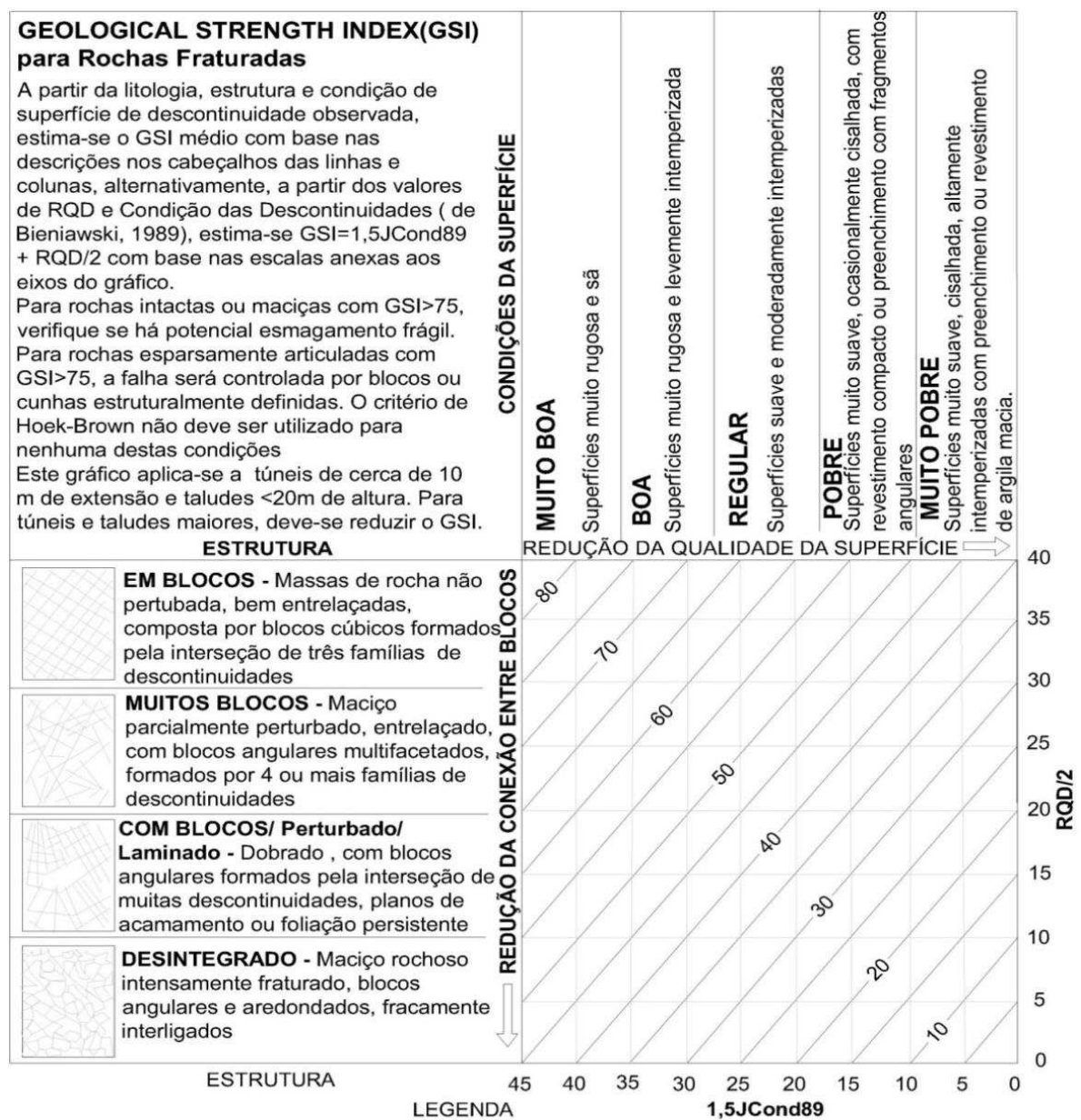


Gráfico 1 - Estimativa do GSI para maciços fraturados (traduzido de HOEK *et al.* 2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização da Área de Estudo

A mina do Tamanduá, pertencente à Vale, apresenta uma área de lavra de aproximadamente 2 km² (2000m x 1000m), e é parte integrante do Complexo Vargem Grande, constituído pelas minas de Tamanduá a Norte, e Capitão do Mato a Sul. A mina está localizada no município de Nova Lima, em Minas Gerais - Brasil, situada a aproximadamente 25 Km da capital do estado, Belo Horizonte.

Já a mina de Sapecado apresenta uma área de lavra de aproximadamente 1 Km² (2000m x 500m) e pertence ao Complexo Itabirito, que constitui as minas do Pico, Galinheiros, Sapecado e Fábrica. A mina estudada está localizada no município de Itabirito, em Minas Gerais – Brasil, situado a aproximadamente 55 Km da capital do estado, Belo Horizonte.

Geologicamente, encontram-se no flanco leste do Sinclinal Moeda, na porção Centro-Norte do Quadrilátero Ferrífero (QF) (Figura 7), que está inserida no domínio geológico do Supergrupo Minas, representado pelos quartzitos da Formação Moeda e filitos da Formação Batatal (Grupo Caraça) e formações ferríferas da Formação Cauê (Grupo Itabira).

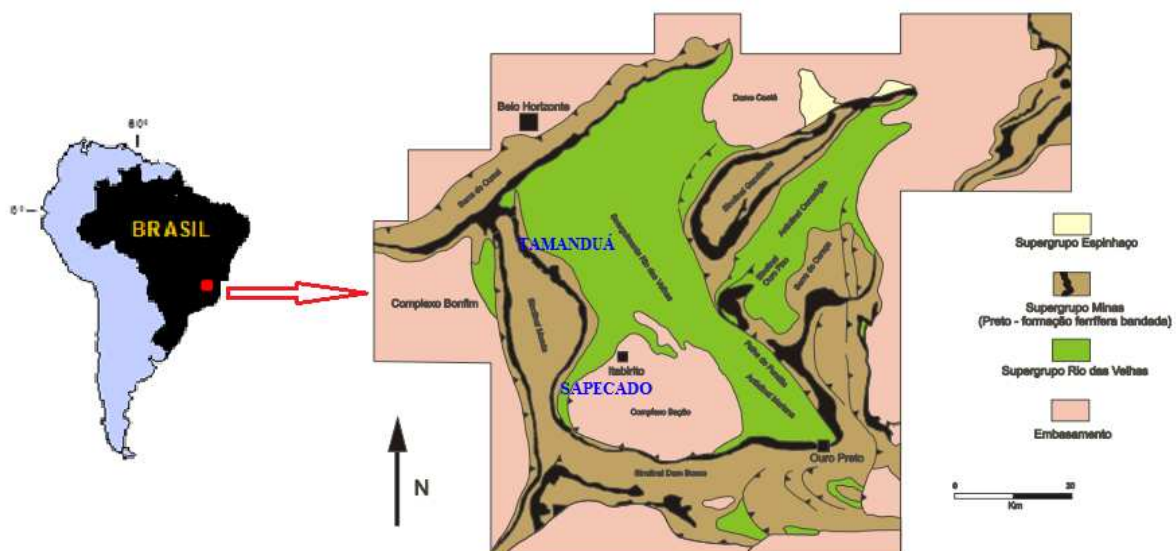


Figura 7 - Localização da Mina do Tamanduá e Sapecado no QF (Adaptado de ALKMIN; MARSHAK, 1998).

O sinclinal Moeda é uma megaestrutura transamazônica de direção aproximadamente Norte-Sul, sendo determinada pela superfície de acamamento dos metassedimentos do supergrupo

Minas. No flanco leste do supergrupo Minas, acontecem diversas falhas e arqueamentos por várias dobras. Os eixos agrupam-se em duas direções principais, Nordeste - Noroeste, tendo um mergulho das camadas de alto ângulo, geralmente invertido para oeste junto ao Complexo Metamórfico Bação (COSTA, 2009).

O mapeamento geológico estrutural realizado pela Vale apresentou um arcabouço complexo, produto da superposição de diversos eventos tectônicos, que resultaram numa grande quantidade de estruturas e litologias que induziram a mineralização ferrífera e as condicionantes geotécnicas. Por isso, as minas são formadas por minério de ferro de caráter tectônico e supergênico, com itabiritos e corpos de hematita de variadas geometrias, compacidade e teores, encaixados em filitos e quartzitos, cortados e intercalados por rochas metamáficas (Vale, 2008). A Figura 8 mostra o mapa dos litotipos da cava atual da mina do Tamanduá.

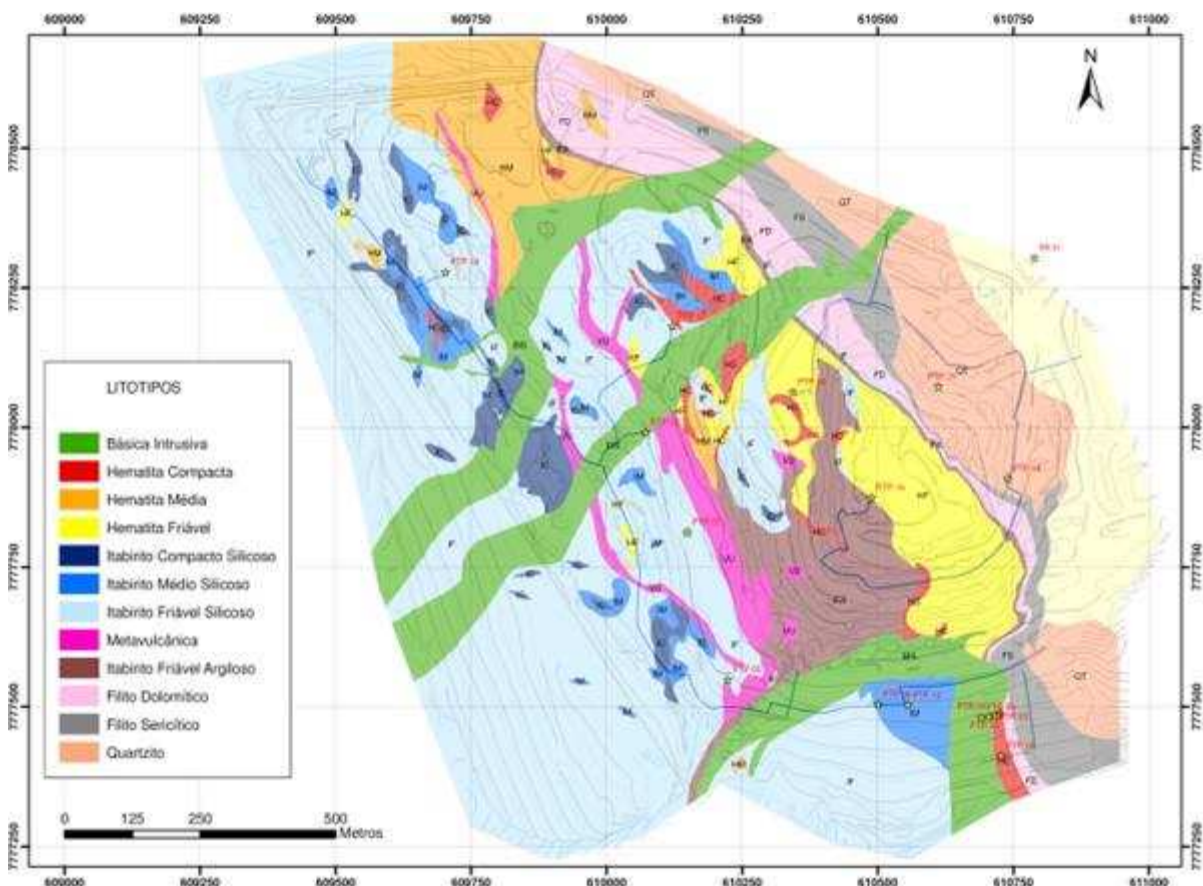


Figura 8 – Mapa dos litotipos da cava atual da Mina do Tamanduá (Vale, 2008). A mina do Tamanduá tem sua formação na direção Noroeste – Sudeste. O nome da mina é derivado da mesoestrutura sinformal em que ela está localizada, chamada “Sinforme do Tamanduá”, de eixo também NW-SE (Vale, 2008). A Figura 9 mostra a vista aérea da mina do Tamanduá.



Figura 9 - Vista aérea da mina do Tamanduá, de Sul para Norte (OURO PRETO GEOLOGIA E PESQUISA MINERAL, 2004).

A lavra do minério de ferro na mina ocorre nas formações ferríferas da Formação Cauê (Grupo Itabira), constituídas por hematitas compactas, médias, macias, bem como itabiritos silicosos de consistência também compacta, média ou macia.

As hematitas compactas que predominam a região central da mina, são circundadas por hematitas médias a macias e às vezes por itabiritos. A origem das hematitas macias da mina do Tamanduá pode ser devido ao confinamento da formação ferrífera, a leste do dique de rocha metamáfica e a oeste dos filitos da Formação Batatal. As hematitas compactas têm sua ocorrência e forma condicionante aos eixos das dobras F1, ou seja, do primeiro evento tectônico, provavelmente relacionado ao evento Transamazônico, que originou corpos de direção leste- oeste. (FERREIRA FILHO; DIAS, 2004).

A mina de Sapecado também se encontra no flanco leste do Sinclinal Moeda. Na Figura 10 a seguir a geologia das minas do Complexo Itabiritos podem ser visualizadas.

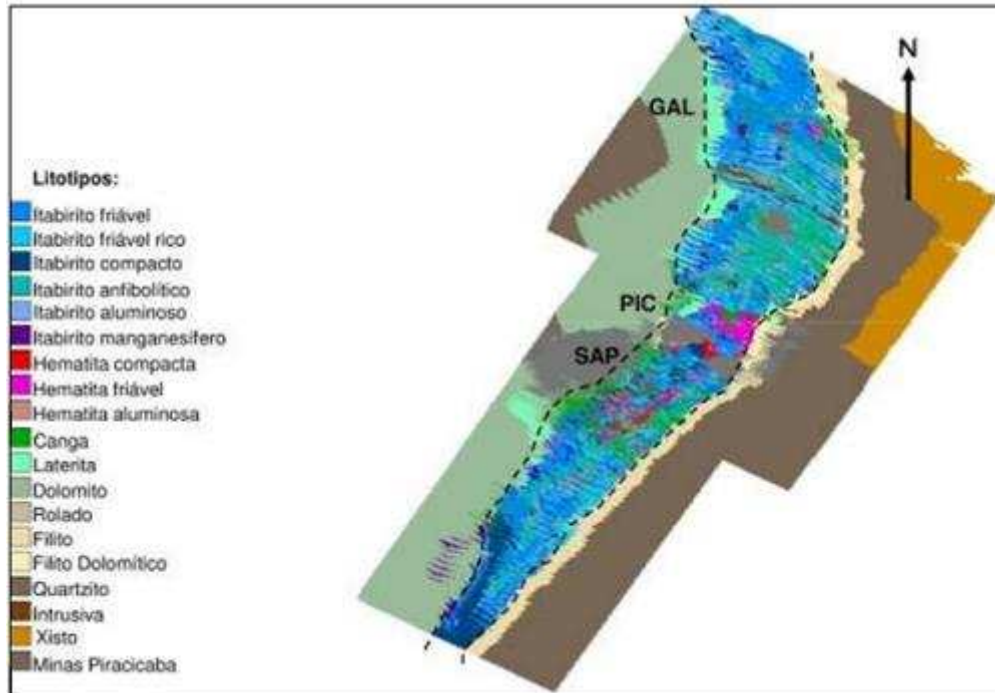


Figura 10 - Geologia local das minas do Complexo Itabiritos (BRAGA *et al.*, 2010)

Na Figura 10 fica perceptível a predominância de itabiritos, seguidos de filitos, quartzitos, cangas e hematitas nas minas do Complexo Itabiritos. A Figura 11 mostra a vista aérea da mina de Sapecado.



Figura 11 - Vista aérea da mina de Sapecado (Retirado do Google Earth, 2017).

3.2 Classificações geomecânicas dos maciços rochosos

Para a realização deste trabalho, a Vale colaborou com o fornecimento de dados geomecânicos de levantamentos de campo realizados na Mina do Tamanduá e na Mina de Sapecado, ambas pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero.

Inicialmente, foi realizada uma análise dos dados preexistentes coletados pela Vale e, posteriormente, todos os dados foram tratados e consolidados para serem utilizados para fins de classificações de maciços rochosos.

Em se tratando das realizações das classificações geomecânicas dos maciços rochosos, o presente trabalho deu continuidade aos estudos já realizados pela Vale (2008).

Neste trabalho foram utilizadas as classificações *Rock Mass Rating* (RMR) de Bieniawski (1989) e *Geological Strength Index* (GSI) de Hoek (2013).

3.2.1 *Rock Mass Rating – RMR*

O RMR foi calculado por quatro métodos diferentes: Bieniawski (1989), Bieniaswski (2011), Santos *et al.* (2012) e Vale (2008). O primeiro consiste na proposta original sugerida por Bieniawski (1989), considerando um RMR mínimo de 23 pontos, sendo 15 devido aos maciços drenados, 3 ao RQD e 5 ao espaçamento das descontinuidades. O segundo método refere-se à aplicação da revisão proposta por Bieniawski (2011), que pode resultar em um RMR mínimo igual a 15, considerando o valor para RQD e espaçamento das descontinuidades iguais a 0. No terceiro método foram utilizados os fatores de correção sugeridos por Santos *et al.* (2012) e, por fim, no quarto método, foram utilizados os ajustes propostos por Vale (2008).

Neste trabalho, somente foi possível a determinação do RMR14 a partir das correlações sugeridas por Celada *et al.* (2014) com o RMR89. O método tradicional de determinar o RMR14 não foi possível, uma vez que não foi realizado o *Slake Durability Test*. Além disso, este trabalho é voltado para os ajustes de RMR aplicados aos maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero que, em geral, apresentam maior grau de intemperismo devido ao clima tropical da região. Como o objetivo do RMR14 não foi determinar valores de RMR condizentes com os maciços altamente intemperizados, esta modificação ainda apresenta dificuldades em classificar adequadamente os maciços do Quadrilátero Ferrífero, já que esse

novo RMR aumenta a pontuação do RMR89, em vez de diminuir. Por isso, no presente estudo somente foram realizadas correlações entre os valores de GSI e RMR14.

Para determinar as classes geomecânicas dos diversos tipos de rochas encontrados na mina do Tamanduá, foram considerados os dados coletados em 1464 estações geológico-geotécnicas (ponto) a partir do banco de dados fornecido pela Vale. A partir dessas estações, foram analisados os seguintes parâmetros geotécnicos: grau de alteração (GA), grau de consistência (GC), grau de faturamento (GF) e RQD, bem como todos os parâmetros relacionados à descontinuidade (Tipo de descontinuidade (TD), espaçamento (ES), abertura (AB), alteração da parede (AP), rugosidade (RU) e o tipo de preenchimento (TP)).

De modo a facilitar as análises, os dados foram organizados em uma planilha no aplicativo *Excel*® com a estrutura apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 – Estruturação do banco de dados geotécnicos da Mina do Tamanduá

<i>Coluna</i>	<i>Campo</i>	<i>Descrição</i>
A	Ponto	Nome da estação geotécnica
B	E	Coordenadas Longitude
C	N	Coordenadas Latitude
D	GA	Grau de Alteração da rocha
E	GC	Grau de Consistência da rocha
F	GF	Grau de Fraturamento da rocha
G	TD	Tipo de Descontinuidade analisada
H	AP	Alteração da Parede
I	AB	Abertura da descontinuidade
J	RU	Rugosidade
K	TP	Tipo de Preenchimento da descontinuidade
L	RQD	Qualidade da rocha
M	LITO_C	Litologia ou tipologia da formação ferrífera
N	LITOLOGIA	Prioridade entre as estruturas analisadas
P	RMR_Vale	Valores para RMR
Q	CLASSE	Classe RMR
U	R.INTACTA	Peso referente a Rocha Intacta no RMR
V	RQD	Peso atribuído ao RQD no RMR
W	ESP.DESCONT	Peso atribuído ao Espaçamento das Descontinuidades no RMR
X	PERSISTÊNCIA	Peso atribuído a Persistência no RMR
Y	ABERTURA	Peso atribuído a Abertura no RMR
Z	RUGOSIDADE	Peso atribuído referente à Rugosidade no RMR
Aa	PREENCHIMENTO	Peso referente ao Preenchimento no RMR
Ab	ALTERAÇÃO	Peso referente a Alteração no RMR
Ac	ÁGUA	Peso referente a Condição de Drenagem do maciço no RMR

Fonte: Vale, 2008.

Nem todos os dados coletados em campo estavam de acordo com as sugestões da ISRM (2007) e, por isso, foram feitas as seguintes adaptações para determinar os pesos relativos a serem usados na classificação RMR.

a) Resistência da Rocha Intacta (P1)

A resistência da rocha intacta é usualmente estimada por meio da compressão uniaxial, carga pontual ou, ainda, através da utilização do martelo de Schmidt, conforme sugere a ISRM (*International Society of Rock Mechanics*).

Contudo, no levantamento de campo, utilizou-se a tabela de grau de consistência da rocha (GC) sugerida pela ISRM (2007), uma vez que a mesma estima os valores de resistência da rocha intacta.

b) Índice de Qualidade da Rocha - RQD (P2)

Em testemunhos de sondagem, o RQD foi estimado utilizando o mesmo procedimento sugerido por Deere e Miller (1966). Em campo, o RQD foi avaliado junto ao talude, considerando-se, principalmente, as recomendações por Pamström (2005).

c) Espaçamento das descontinuidades (P3)

Seguindo as descrições geotécnicas sugeridas pela ISRM (2007), para determinar o grau de fraturamento da rocha (GF), é necessário determinar o espaçamento das descontinuidades, que é o mesmo sugerido por Bieniawski (1989). Portanto, a determinação do espaçamento das descontinuidades para o RMR foi feita com base nos dados referentes ao grau de fraturamento (GF), já que as descrições apresentadas para os parâmetros são semelhantes.

d) Condição das descontinuidades (P4)

Em se tratando das condições das descontinuidades, que envolve persistência, abertura, rugosidade, preenchimento e o grau de alteração das paredes foram necessárias considerações em relação à persistência e ao preenchimento.

Para a persistência, todas as descontinuidades observadas apresentaram valores maiores que 20 m para estruturas contínuas e inferiores a 1 m para as descontínuas, sendo utilizando os mesmos pesos sugeridos por Bieniawski (1989).

Para o material de preenchimento, a classificação foi baseada nos dados apresentados na Tabela 17. Materiais de preenchimento moles observados no campo foram argila, minerais micáceos, talco, carbonatos e hidróxidos. Os materiais de preenchimento duros encontrados foram principalmente óxidos, quartzo e óxido de ferro (canga).

Tabela 17 – Valores estimados para o preenchimento.

<i>Tipo de preenchimento</i>	<i>Peso na classificação de Bieniawski</i>
Sem preenchimento	06
Preenchimento duro > 5 mm	02
Preenchimento macio > 5mm	00

Fonte: Vale, 2008.

O valor final para a condição da descontinuidade foi obtido de acordo com as sugestões de Bieniawski (1989), ou seja, pelo somatório dos parâmetros persistência, abertura, tipo de preenchimento, rugosidade e alteração das paredes.

e) Condição de saturação do maciço

Neste trabalho foi considerado o RMR básico na condição seca, uma vez que o objetivo da classificação realizada foi determinar os parâmetros de resistência da rocha.

f) Ajustes relacionados à orientação das descontinuidades

O parâmetro relacionado à orientação das descontinuidades também não foi considerado, uma vez que nenhuma avaliação de estabilidade de talude foi realizada.

Após o cálculo do índice RMR para cada estação, o RMR foi computado obedecendo as sugestões de Santos *et al.* (2012), Bieniawski (2011) e Vale (2008).

Nas condições sugeridas por Bieniawski (2011), os espaçamentos das descontinuidades e o RQD dos maciços rochosos friáveis foram estimados como sendo zero. Na proposta de Santos

et al. (2012) foram aplicados os fatores de correção e, nos ajustes da Vale (2008) foram aplicados os ajustes nos parâmetros e pesos de acordo com a metodologia proposta.

Com posse de todas as classificações realizadas, os resultados foram tratados e analisados estatisticamente para, em seguida, serem verificados e comparados entre os diferentes métodos de ajustes propostos. Com os resultados, foi possível realizar correlações entre os resultados encontrados e elaborar mapas de classes geomecânicas.

3.2.2 Índice de Resistência Geológica – GSI

Hoek (1994) definiu o GSI como sendo cinco pontos inferiores ao RMR_{89} . Como o RMR vem sofrendo ajustes por diferentes autores, a atribuição da correlação sugerida por Hoek não é recomendada em RMR ajustados. Como os ajustes geralmente penalizam a classificação de Bieniawski (1989), a atribuição da correlação penalizaria ainda mais os maciços, o que resultaria em respostas não condizentes com a realidade encontrada em campo.

Nesse contexto, o presente trabalho realizou um estudo de definição de correlações para encontrar valores de GSI para alguns diferentes ajustes propostos para a classificação RMR de Bieniawski (1989).

Para tal, o GSI foi calculado por meio da proposta sugerida por Hoek *et al.* (2013), já que o banco de dados fornecia as características necessárias para a realização da classificação dessa forma. Portanto, para encontrar a localização das classificações no gráfico, foram utilizados os valores encontrados pela somatória dos parâmetros referentes às condições das descontinuidades e o valor estimado por meio da correlação de GSI para RMR. Não foi possível à utilização dos dados referentes ao RQD, uma vez que os dados fornecidos apresentavam somente o resultado das classes para esse parâmetro.

Após o processo de classificação, foi possível validar, “*in situ*”, a veracidade das informações encontradas na classificação de Hoek. Dessa maneira, foi possível verificar e comparar os resultados encontrados pelas correlações e pelos valores mapeados em campo, permitindo assim, verificar a aplicabilidade das correlações sugeridas por Hoek (2013) nos maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero.

De posse dos dados encontrados, foi possível correlacionar os valores de GSI com as modificações apresentadas por Bieniawski (2011), os ajustes propostos por Santos *et al.*

(2012) e as alterações realizadas por Vale (2008). Para encontrar as correlações de GSI para as diferentes adaptações sugeridas, foi utilizado o programa estatístico Minitab17®.

4. RESULTADOS

Os resultados encontrados para as classificações de RMR e GSI serão descritos a seguir. Primeiro, serão descritos os resultados de acordo com cada litologia para, em seguida, serem realizadas as verificações e comparações entre os resultados.

Ainda, são mostradas verificações entre as formas de se obter o GSI, qualitativamente ou quantitativamente. Para isso, foram analisados os maciços rochosos de itabirito da mina Sapecado.

4.1 *Classificações Geomecânicas*

A seguir são descritos os resultados de RMR considerando os diferentes ajustes propostos para os maciços rochosos da Mina do Tamanduá, bem como suas estimativas de correlações com o GSI.

4.1.1 *Quartzitos (QT)*

Os quartzitos sericíticos da Formação Moeda aparecem na porção leste da mina do Tamanduá, com direção geral NWN e mergulhos elevados para NE ou SW. Ao analisar 113 estações geológico-geotécnicas, as caracterizações mostraram uma granulometria média a muito grossa, tendo intercalações frequentes de filmes, lentes e camadas de metapelitos (sericita – xistos, quartzo – sericita – xistos).

Além disso, os maciços se encontram entre levemente alterados (2) a altamente alterados (4), com consistência média macia (2) a dura (5), podendo estar entre moderadamente fraturados (3) até intensamente fraturados (5) e com um RQD muito pobre (1), pobre (2) ou regular (3). Ainda, foram observadas, xistosidades (5), fraturas (6) e foliações (7), apresentando aberturas entre fechadas (1) e pequenas (2) e superfícies rugosa, lisa e irregular (2) ou levemente rugosa, lisa e regular (3). Portanto, os quartzitos da mina do Tamanduá apresentam-se, em geral, muito foliados e fraturados com porções moderadamente intemperizadas.

Na Figura 12 é possível perceber que a variação volumétrica é observada em alguns pontos, onde se define o acamamento S0.

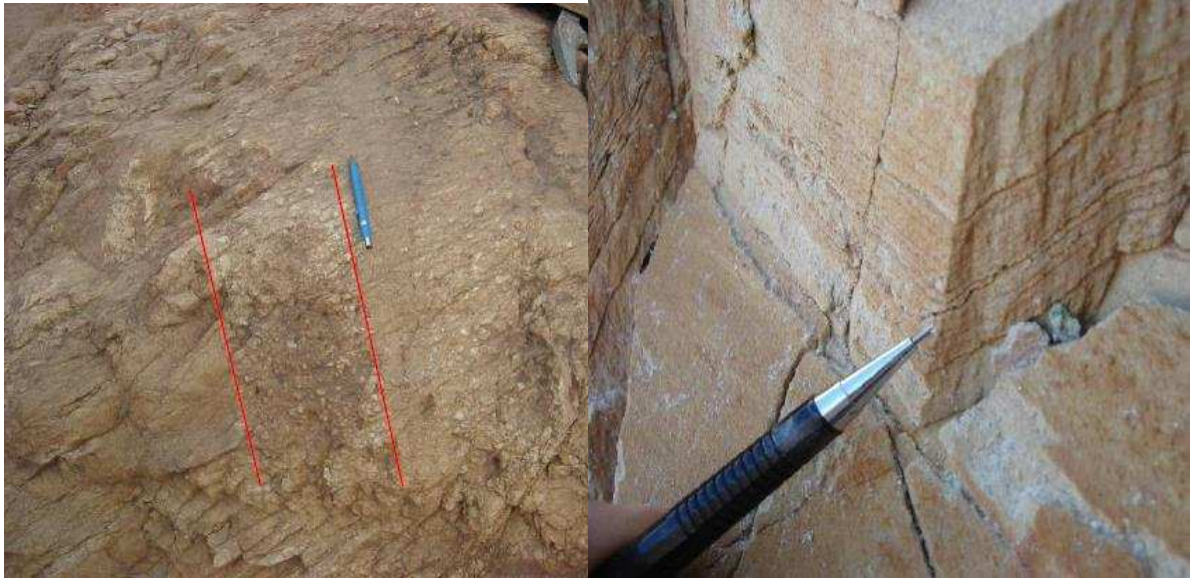


Figura 12 – Quartzito (QT) com níveis conglomeráticos S0, à esquerda, e acamamento S0, à direita (Vale, 2008).

Para o RMR_{89} foram encontrados valores entre 41 e 71, tendo média de 53 pontos. Para um intervalo de confiança de 95%, os resultados esperados ficaram entre 51 e 54 pontos. Portanto, a classificação mais esperada para o RMR_{89} foi a classe III. Essas observações podem ser verificadas no Gráfico 2.

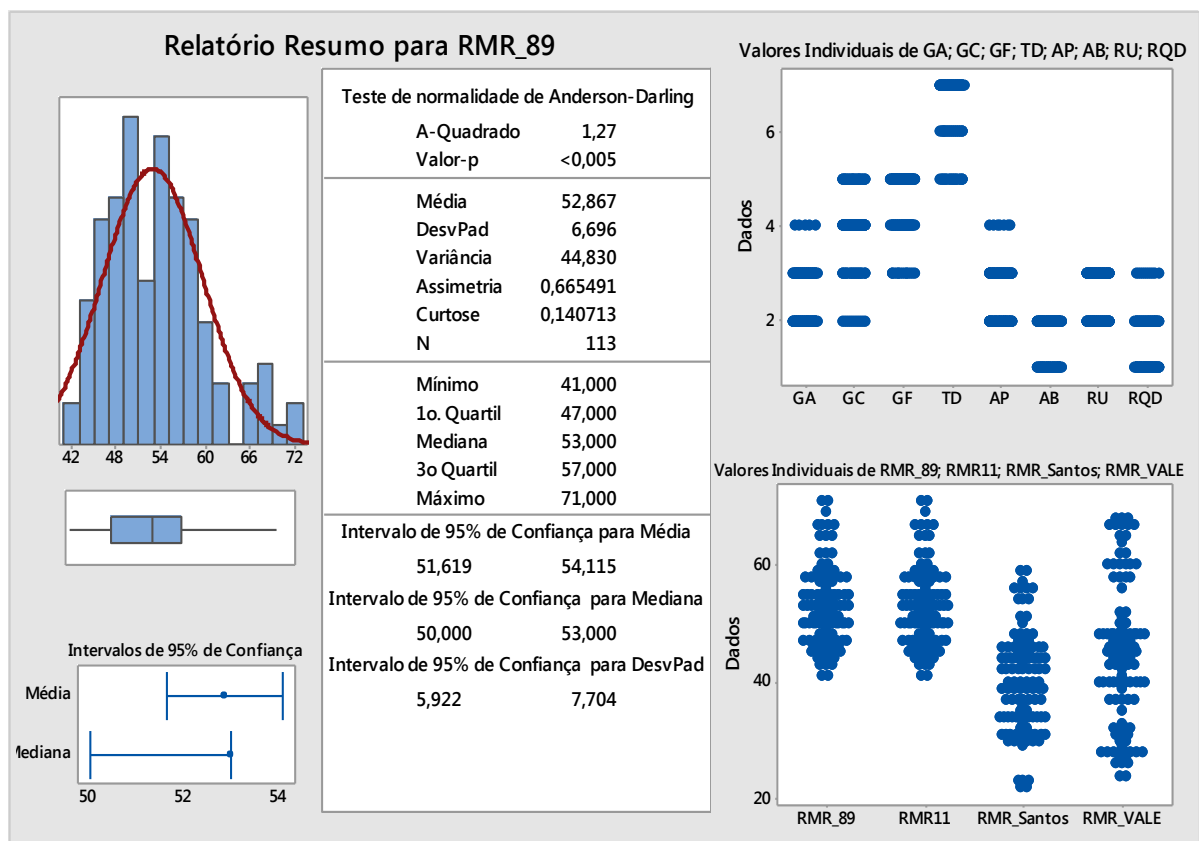


Gráfico 2 – Valores individuais do levantamento de campo dos quartzitos

Os histogramas apresentados no Gráfico 3 mostrou as distribuições de dados para os diferentes ajustes de RMR.

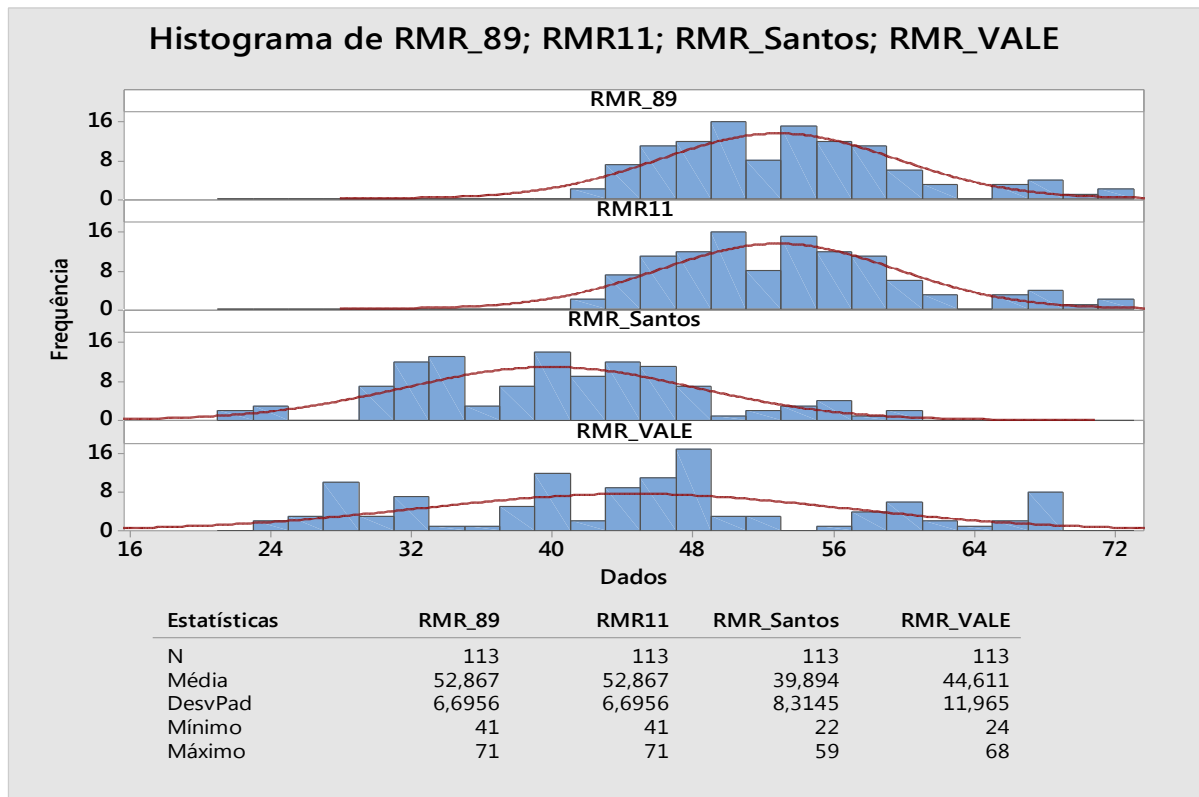


Gráfico 3 – Histograma dos diferentes ajustes propostos de RMR para quartzitos

Ao analisar o desvio padrão de cada ajuste nos histogramas apresentados no Gráfico 3, fica claro que a classificação sugerida por Santos *et al.* (2012) apresentou melhores resultados quando comparado com o ajuste proposto por Vale (2008). Apesar do ajuste proposto pela Vale ter apresentado um valor médio entre as opções, o histograma apresentou um grande desvio padrão. Vale destacar que a modificação apresentada por Bieniawski (2011) não resultou em alterações nos quartzitos, já que eles não considerados de baixa qualidade.

A queda na pontuação das propostas ficou evidente, sendo que o ajuste sugerido por Santos *et al.* (2012) foi o que teve maior impacto em relação ao RMR original, tornando o ajuste mais conservador quando comparado com os demais, ou seja, é o ajuste que geraria um maior fator de segurança e uma menor economia.

Para o RMR_{89} foram encontradas as classes II e III, com maiores frequências para a classe III. Com o ajuste proposto por Santos *et al.* (2012), os maciços passaram a ser classificados entre III e IV, com frequências pouco maiores para a classe IV. Na classificação proposta pela Vale (2008), os maciços foram classificados como classe II, III e IV, tendo maiores frequências

para a classe III. No Gráfico 4, é possível verificar a frequência absoluta das classes para os diferentes ajustes.

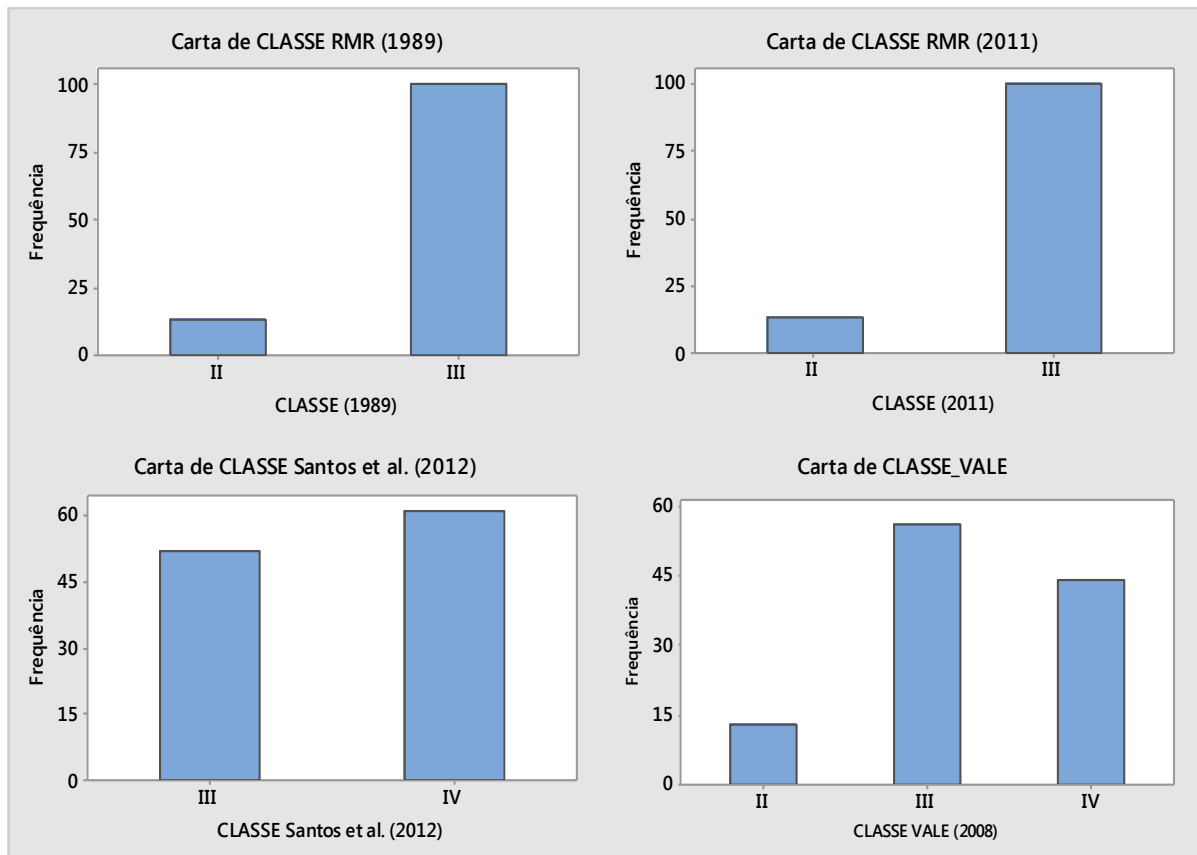


Gráfico 4 – Classificação dos maciços rochosos de quartzitos segundo diferentes ajustes

Os ajustes mostraram diferentes resultados quando comparado com o RMR_{89} . No ajuste sugerido por Santos *et al.* (2012) houve uma penalização para todos os pontos. Na classificação proposta por Vale (2008) 40% dos maciços rochosos classificados como classe III passaram a ser classificados como classe IV, não tendo alteração para os maciços classificados como classe II. Apesar de ambos os ajustes esperarem penalizações nos quartzitos pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero, os ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012) esperam penalizações nos maciços classe II do RMR_{89} . Já os ajustes realizados pela Vale (2008), consideram que os maciços classe II do RMR_{89} encontraram resultados satisfatórios, não modificando os resultados encontrados pela classificação original.

Para o GSI realizado quantitativamente, os quartzitos foram classificados entre 36 e 66, tendo como média 48. Se considerado o intervalo de confiança de 95% para a média, encontram-se valores entre 46 e 49 e, se considerar-se os quartis do histograma, são encontrados valores entre 42 e 52. Com relação às condições das superfícies, elas se apresentavam entre “boa” e

“regular” e, para as estruturas, a maior parte se encontravam entre “muitos blocos” e “com blocos”. O Gráfico 5 mostra os resultados encontrados para a estimativa de GSI dos quartzitos pertencentes a Mina do Tamanduá.

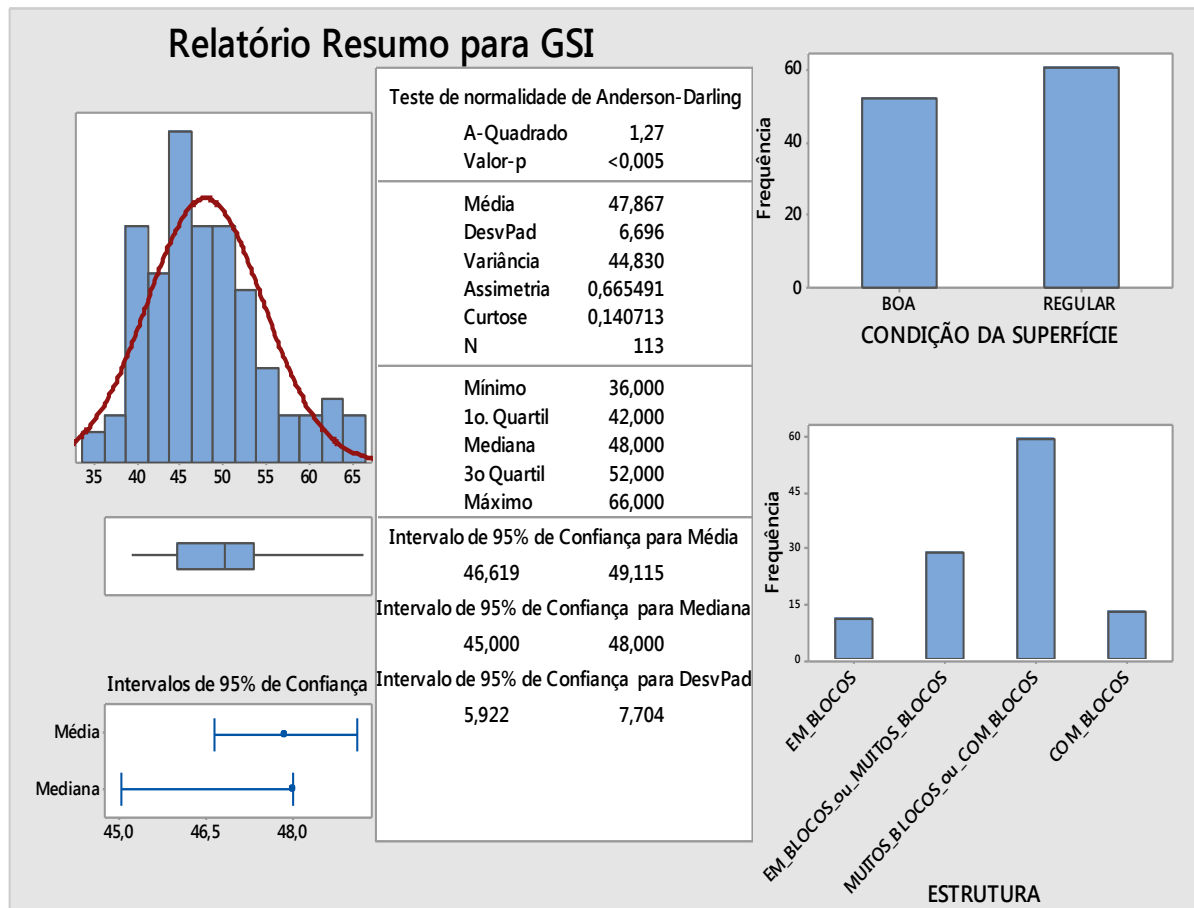


Gráfico 5 – Resumo da Classificação GSI dos quartzitos

Ao verificar os resultados encontrados para as condições das superfícies e para as estruturas dos maciços, constata-se que, para as condições de superfícies boa e regular, diferentes conexões entre blocos podem existir, ou seja, a estrutura do maciço é a principal responsável pela alteração nos valores de GSI e conseqüentemente, nos parâmetros da rocha.

Com os resultados, foi possível determinar a região dos quartzitos na carta de Hoek *et al.* (2013). No Gráfico 6, a região mais clara representa a amplitude encontrada pela correlação e, a região mais escura, representa a maior frequência encontrada pela correlação, ou seja, a região com maior probabilidade de concentração dos quartzitos.

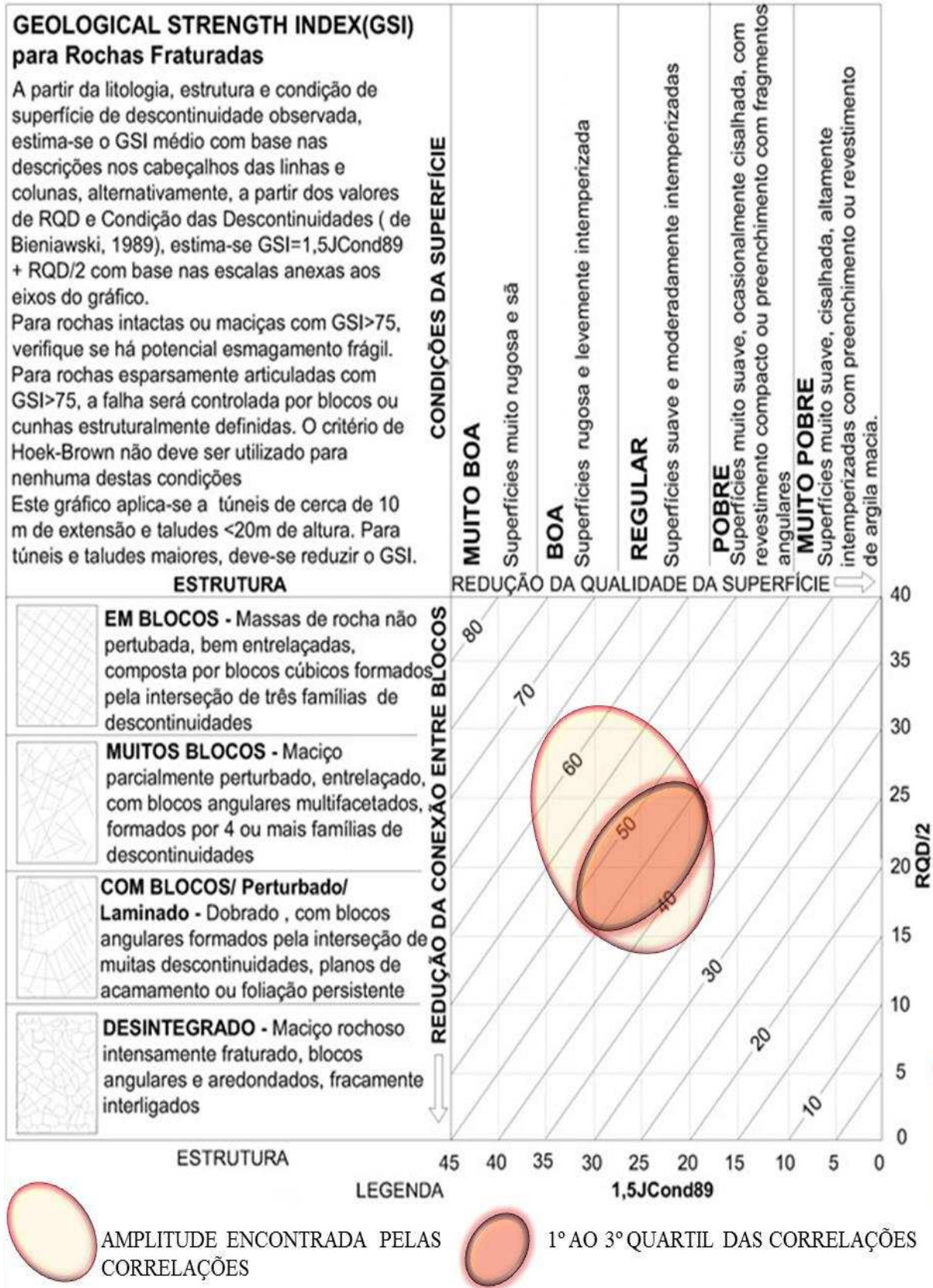


Gráfico 6 – GSI para os quartzitos da Mina do Tamanduá (Adaptado e traduzido de HOEK *et al.*,2013)

Sendo assim, a correlação sugerida por Hoek (1994) e as estimativas propostas por Hoek *et al.* (2013) atenderam os valores esperados para o GSI. Os valores encontrados em campo confirmaram os resultados encontrados pelas correlações propostas por Hoek, sendo, portanto, recomendadas para o uso neste caso.

4.1.2 *Filitos*

De acordo com a caracterização realizada por Vale (2008), os filitos foram divididos em duas categorias, sericíticos (FS) ou dolomíticos (FD), ambos da Formação Batatal. Da mesma forma que os quartzitos, os filitos também afloram na porção leste da mina, com direção NWN, fazendo contato com os quartzitos Moeda, a leste, e com os itabiritos argilosos e hematitas, a oeste, ambos da Formação Cauê. A seguir são descritos os resultados e as comparações encontradas para essa litologia.

4.1.2.1 *Filitos Sericíticos (FS)*

Ao analisar 36 estações geológico-geotécnicas, foi constatado que os filitos sericíticos possuem bandas de coloração cinza-esverdeada e amarela, às vezes contendo filmes ou camadas quartzosas. Os maciços se encontravam entre levemente alterados (2) a altamente alterados (4), com consistência (GC) entre macia (1) a média (3) e grau de fraturamento (GF) intensamente fraturado (5) ou muito fraturado (4). O RQD se encontrava entre muito pobre (1) e pobre (2). Com relação às condições das discontinuidades, foram observadas foliações (7), com aberturas (AB) fechadas (1) e rugosidades (RU) rugosa, lisa e irregular (2). A Figura 13 ilustra um talude em filito sericítico mostrando foliação para ENE.



Figura 13 – Talude em filito sericítico (OURO PRETO GEOLOGIA E PESQUISA MINERAL, 2004)

Para a classificação RMR_{89} foram encontrados valores entre 42 e 55, tendo uma média de 46 pontos. Quando inserido um intervalo de confiança de 95 % são encontrados valores entre 44 e 47 pontos. Portanto, o RMR_{89} espera maciços classificados como classe III. No Gráfico 7 são relatados os resultados encontrados para as caracterização e classificação.

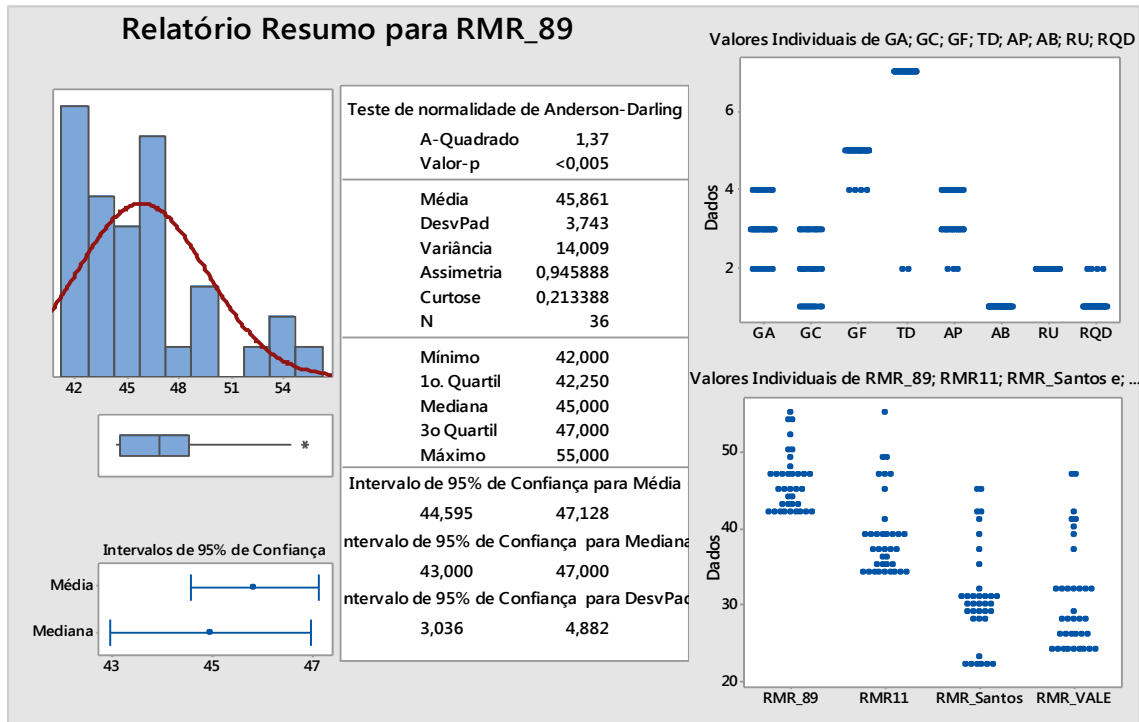


Gráfico 7 – Valores individuais do levantamento de campo dos filitos sericíticos

Os histogramas apresentados no Gráfico 8 mostra a distribuição do dados do levantamento considerando os diferentes ajustes de RMR.

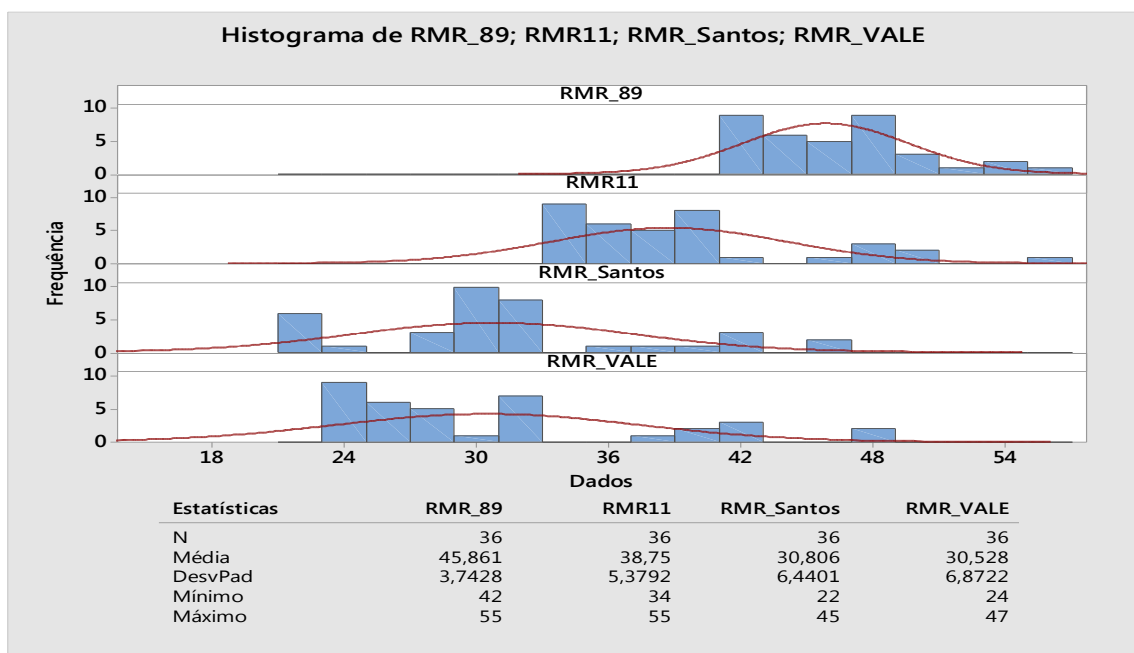


Gráfico 8 – Histograma dos diferentes ajustes de RMR para filitos sericíticos

Ao analisar o Gráfico 8, fica perceptível uma semelhança entre os resultados encontrados por Santos *et al.* (2012) e pela Vale (2008). Mesmo com a explicação dada por Bieniawski (2011), verifica-se que, tanto Santos *et al.* (2012) como Vale (2008) esperam penalizações ainda maiores quando comparado com os resultados atribuídos pelo RMR corrigido por Bieniawski (2011), já que ambos os ajustes penalizaram, em média, 8 pontos com relação a classificação RMR_{2011} . Por isso, nos filitos sericíticos, o RMR mostra ainda precisar de ajustes quando aplicado em regiões susceptíveis a elevado grau de intemperismo.

No RMR_{89} todos os pontos coletados se enquadraram como classe III. Quando realizado os ajustes sugeridos por Bieniawski (2011) na classificação, os maciços rochosos de filitos sericíticos foram classificados como classe III e IV, com predominância da classe IV. Portanto, a utilização do RMR_{89} da forma que vinha sendo utilizada pode trazer classificações errôneas, sendo, por isso, necessário à realização de ajustes.

Apesar dos ajustes propostos por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008) terem penalizações maiores quando comparados com a retificação dada por Bieniawski (2011), a classificação final entre os métodos ajustados apresentaram resultados próximos. Como a classificação RMR é dividida em cinco classes de 20 pontos, a diferença entre as penalizações não foram suficientes para encontrar classes diferentes entre essas duas propostas. As classes encontradas podem ser visualizadas no Gráfico 9.

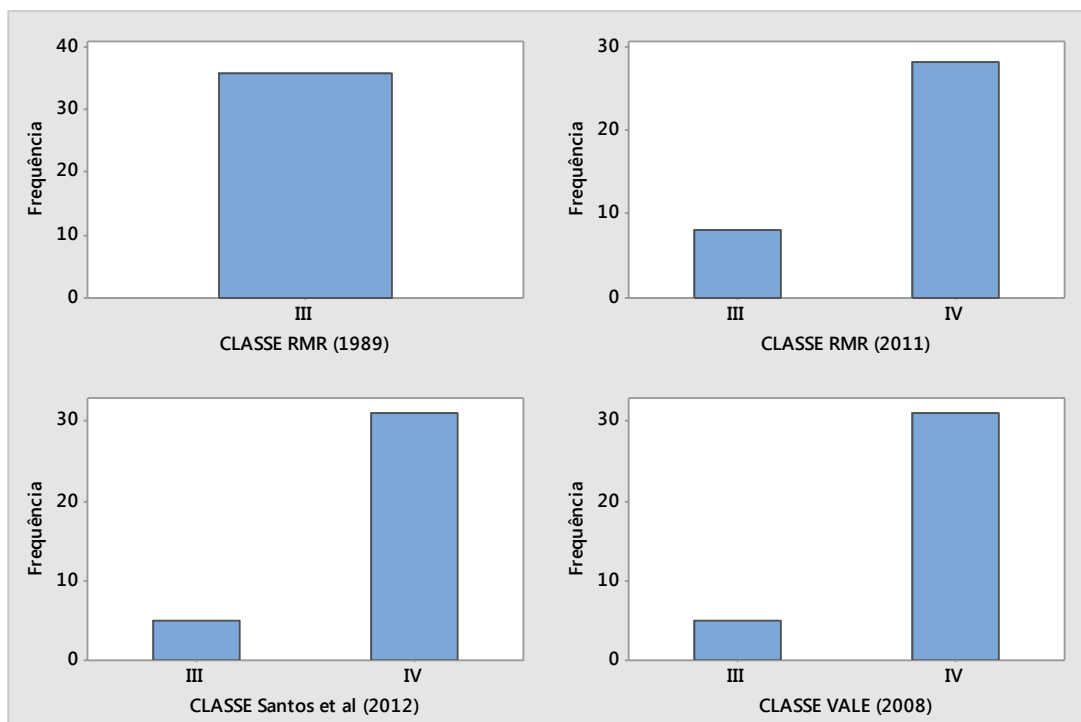


Gráfico 9 – Classificação para os diferentes ajustes de RMR para filitos sericíticos

Com relação ao índice GSI, foi constatado que os filitos sericíticos apresentaram valores entre 37 e 50, tendo uma média de 41. Se considerado o intervalo de confiança de 95% são esperado valores entre 39 e 42 e, para o primeiro e terceiro quartil, os valores ficaram entre 37 e 42. As condições das superfícies previstas ficaram entre “boa” e “regular”, tendo maior frequência para “boa”. Para as estruturas dos maciços, o método mostrou classificações entre “muitos blocos” e “com blocos”. O Gráfico 10 mostra os resultados encontrados.

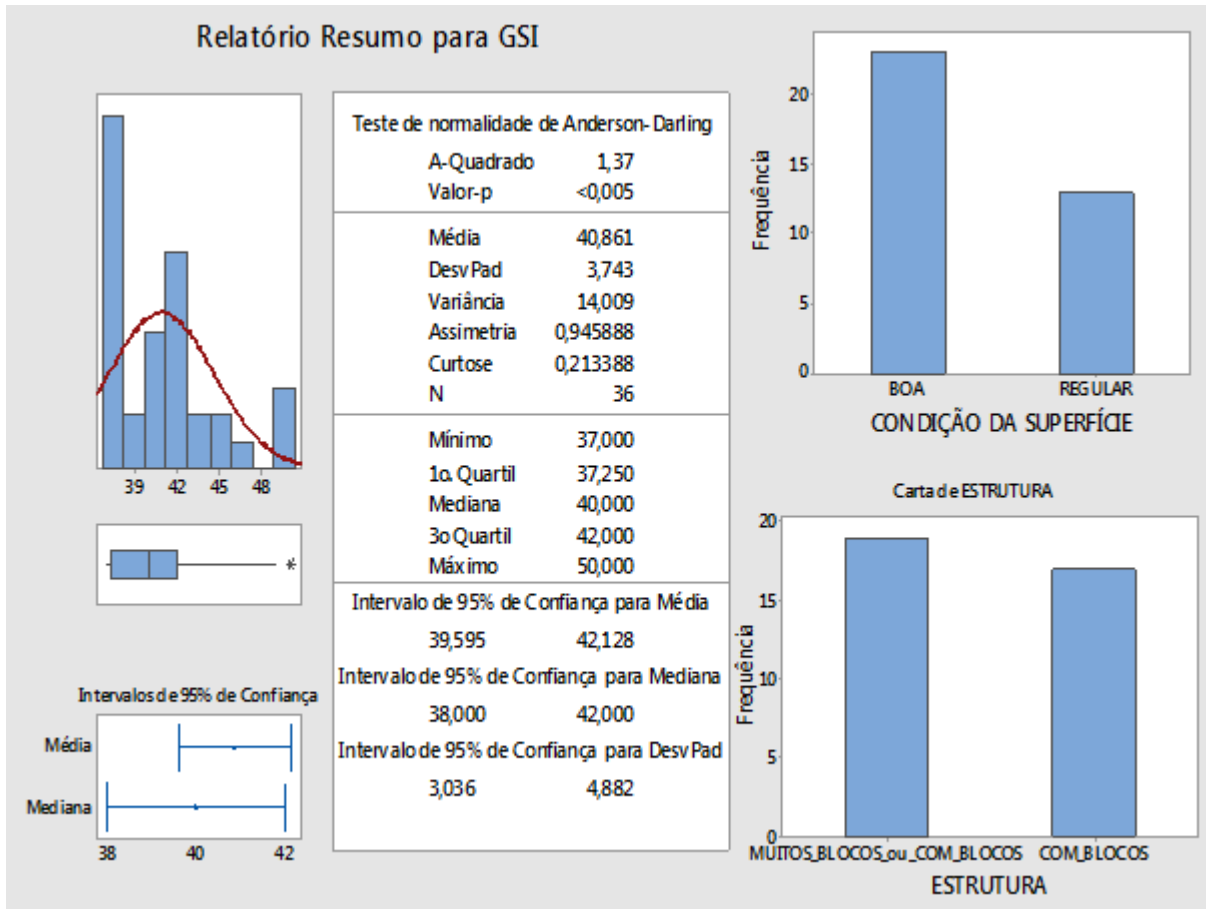


Gráfico 10 – Valores de GSI para os filitos sericíticos

Determinados os valores de GSI e as condições de superfície dos filitos sericítico, foi possível determinar a região (Gráfico 11) em que os maciços se enquadravam no gráfico sugerido por Hoek *et al.* (2013).

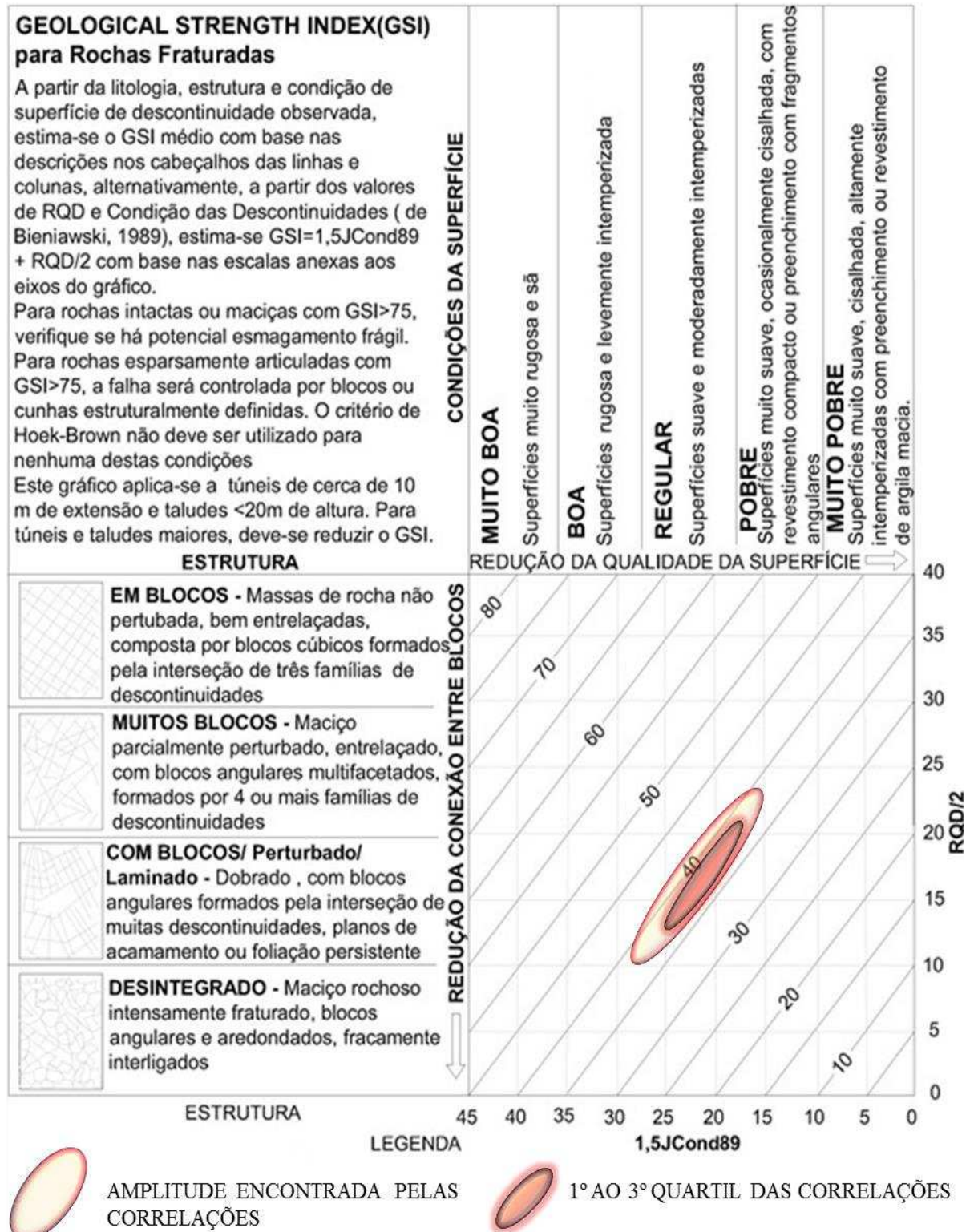


Gráfico 11 – Estimativa de GSI dos FS (Adaptado e traduzido de Hoek *et al.*,2013)

Após verificar as regiões encontradas qualitativamente, ou seja, “*in situ*”, constatou-se que as estimativas apresentadas por Hoek (1994) e Hoek *et al.* (2013) atenderam as regiões esperados para o GSI.

4.1.2.2 Filitos Dolomíticos (FD)

Foram analisados um total de 28 estações geológico-geotécnicas (pontos) de filitos dolomíticos ao longo da mina do Tamanduá. Em geral, apresentam coloração rósea ou amarela, com filmes ou bandas *metachert* (rocha composta essencialmente por quartzo). As caracterizações mostraram que os maciços rochosos se apresentavam entre moderadamente alterados (3) a altamente alterados (4), com consistência macia (1) e sempre intensamente fraturados (5). O RQD foi classificado como muito pobre (1). Além disso, estão presentes acamamentos (2) e foliações (7), com aberturas fechadas (1) e rugosidade rugosa, lisa e irregular (2). A Figura 14 ilustra o acamamento observado no filito dolomítico.



Figura 14 – Acamamento no filito dolomítico (Vale, 2008)

Para o RMR_{89} os maciços foram classificados como classe III, tendo valores entre 42 e 45 e uma média de 42 pontos. O Gráfico 12 ilustra os resultados encontrados para os filitos dolomíticos.

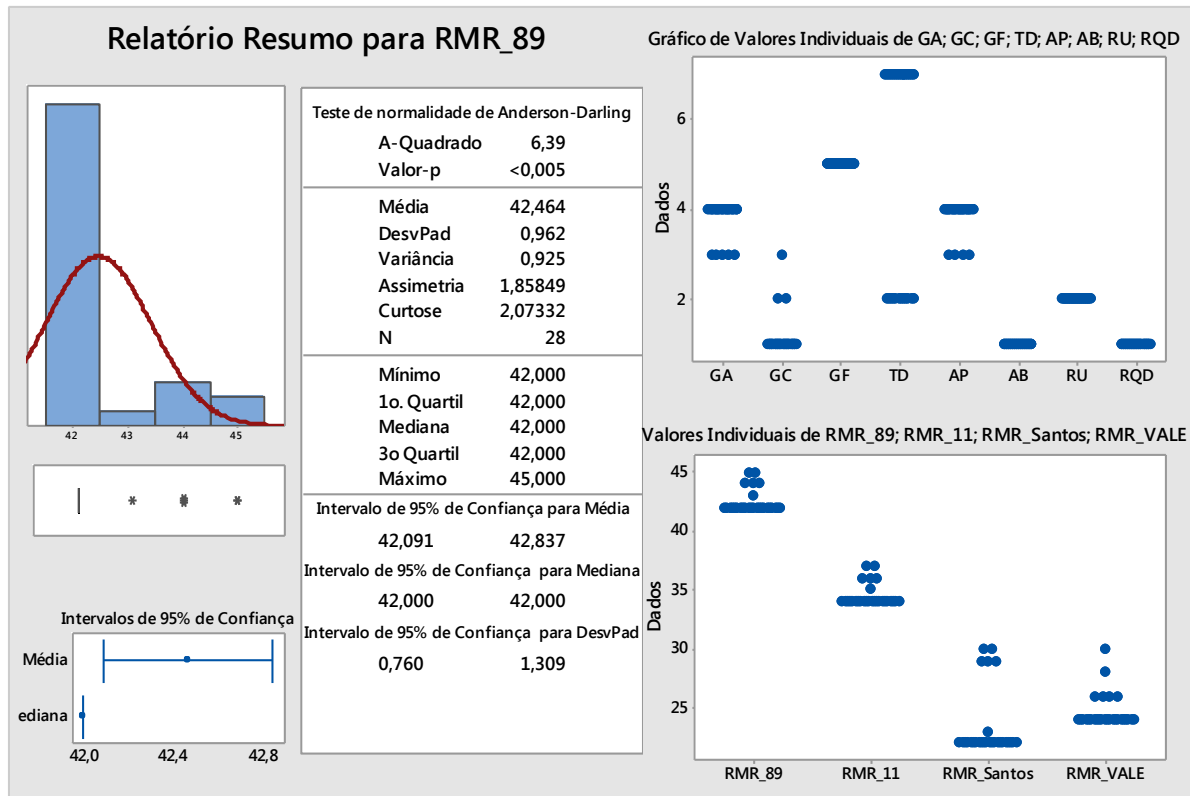


Gráfico 12 – Valores individuais do levantamento de campo dos filitos dolomíticos

Já o Gráfico 13 mostra a distribuição dos diferentes ajustes de RMR para os filitos dolomíticos, ou seja, a frequência encontrada para os ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012), Bieniawski (2011) e Vale (2008).

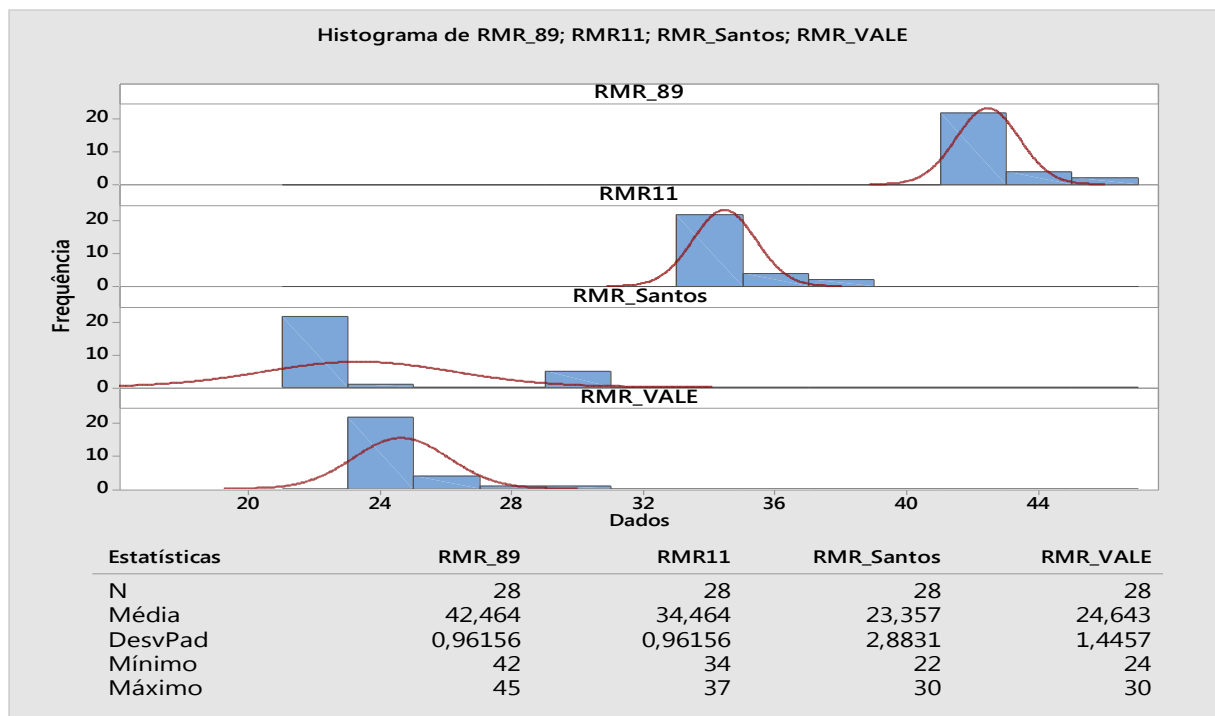


Gráfico 13– Histograma dos diferentes ajustes de RMR para filitos dolomítico.

Ao analisar o desvio padrão apresentado pelos métodos no histograma do Gráfico 13, verifica-se que, o ajuste sugerido por Bieniawski (2011) encontrou o mesmo desvio padrão da classificação RMR_{89} . Isso aconteceu devido às caracterizações de todas as estações de filitos dolomíticos apresentarem, para o RQD e para o espaçamento das descontinuidades, valores mínimos, apresentando por isso, penalizações de oito pontos para todas as estações mapeadas. Apesar da proposta de Santos *et al.* (2012) e Vale (2008) terem maiores variabilidades em seus processos, elas encontraram as mesmas faixas de valores, ou seja, diferentes autores acreditam que os maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero ainda necessitam de penalizações na classificação RMR_{2011} , mesmo quando considerado os pesos da classificação como sendo médias.

Ao analisar os resultados das classificações, verifica-se que, no RMR_{89} , todos os pontos coletados se enquadraram como classe III. Quando realizado os ajustes na classificação segundo Bieniawski (2011), os maciços foram classificados, em geral, como classe IV. Porém, apesar dos ajustes sugeridos por Bieniawski (2011) terem classificado a maior parte dos filitos dolomíticos como classe IV, a classificação ainda necessita de ajustes, já que uma parte continuou sendo classificado como classe III, o que não é esperado nem por Santos *et al.* (2012) nem pela Vale (2008). O gráfico 14 mostra as classes encontradas para os diferentes ajustes.

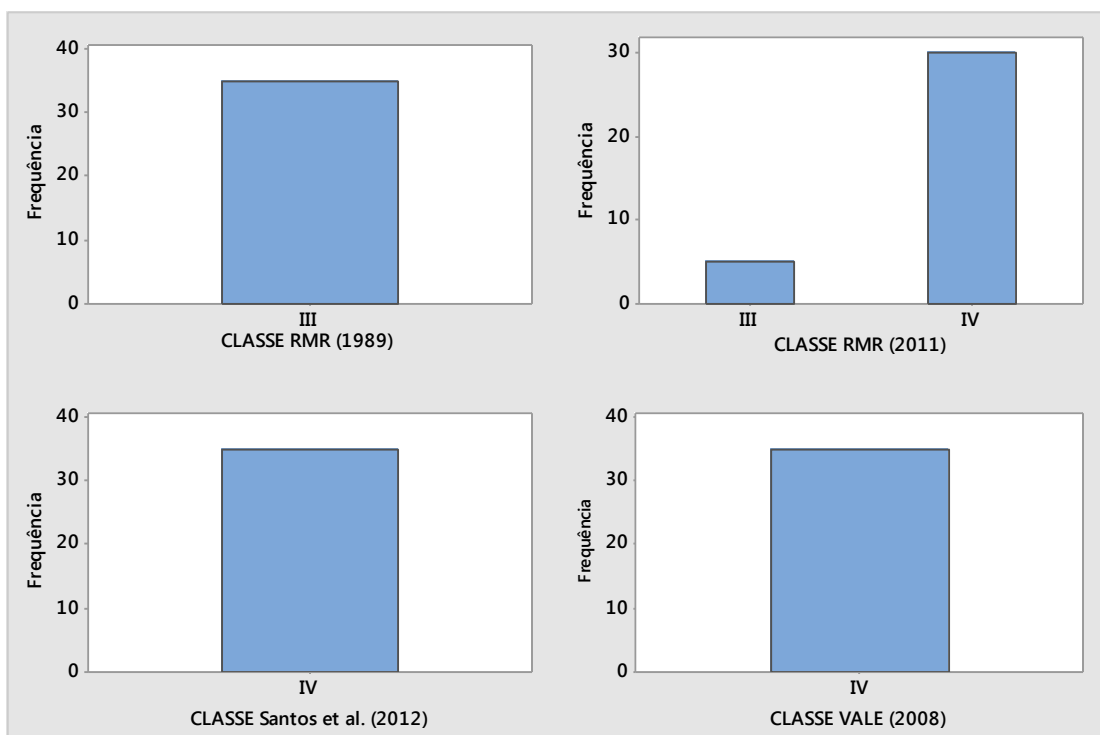


Gráfico 14 – Classificação para os diferentes ajustes de RMR para filitos dolomítico.

Para a classificação GSI, os filitos dolomíticos foram classificados entre 37 e 40, tendo uma média de 37. Se considerado um intervalo de confiança de 95 %, espera-se valores de GSI entre 37 e 38. Com relação às condições das discontinuidades e estrutura, o método quantitativo proposto por Hoek *et al.* (2013) encontrou condições de superfície boa e regular, tendo frequências maiores para superfícies regulares. Já para as estruturas, foram estimadas regiões entre “muitos blocos” e “com blocos”. O Gráfico 15 mostra os resultados encontrados para a estimativa de GSI.

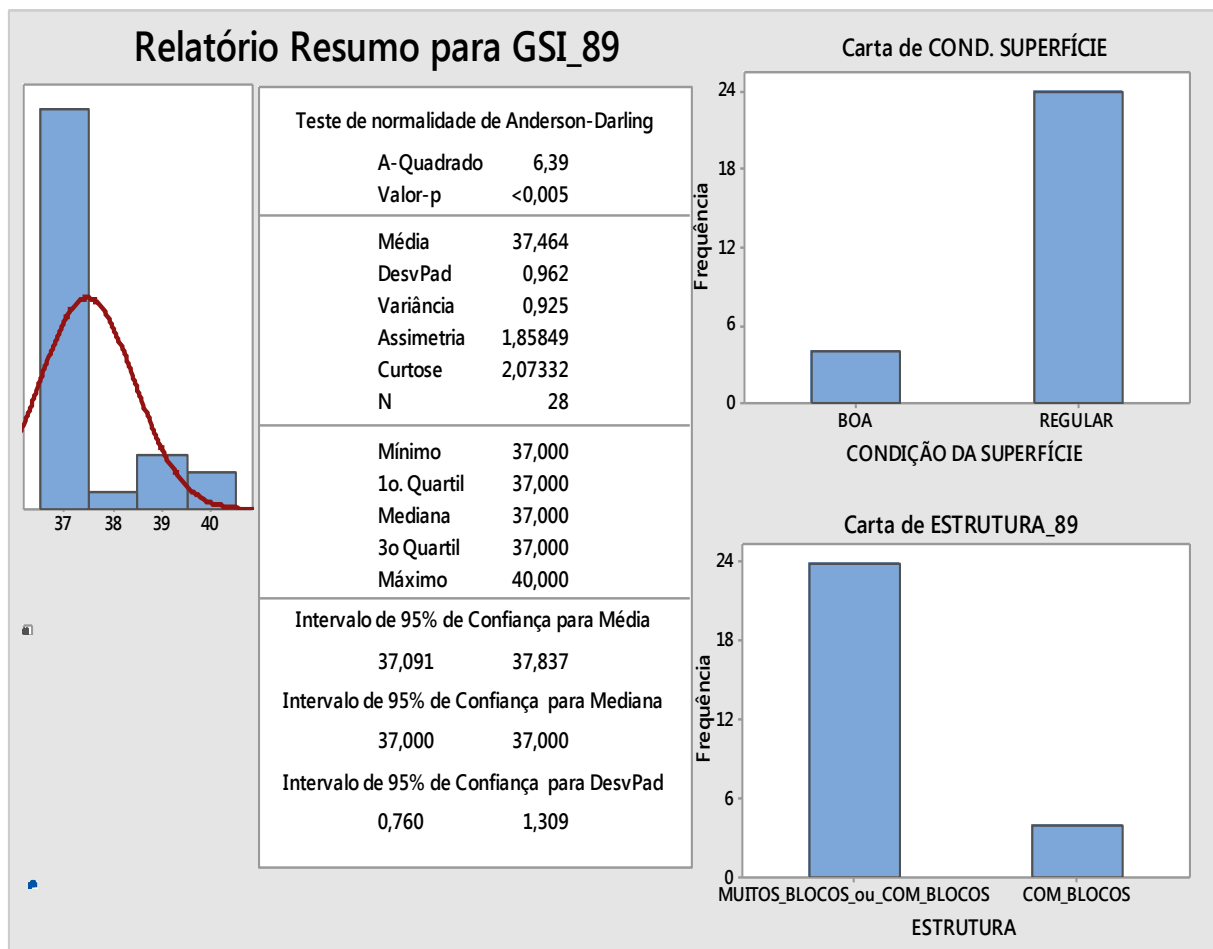


Gráfico 15 – Valores de GSI para os filitos dolomíticos.

Como a maior parte dos filitos dolomíticos encontraram GSI igual a 37 e condição de superfície sendo regular, estima-se, por meio do gráfico de GSI, que a estrutura apresente características de “com blocos/perturbados/Laminado/Dobrado”, ou seja, com blocos angulares formados pela interseção de muitas discontinuidades, apresentando planos de acamamento ou foliações persistentes. A estimativa apresenta as mesmas características apresentadas pelas caracterizações segundo a metodologia proposta pela ISRM (2007). O Gráfico 16 mostra a região estimada de GSI para os filitos dolomíticos da mina do Tamanduá.

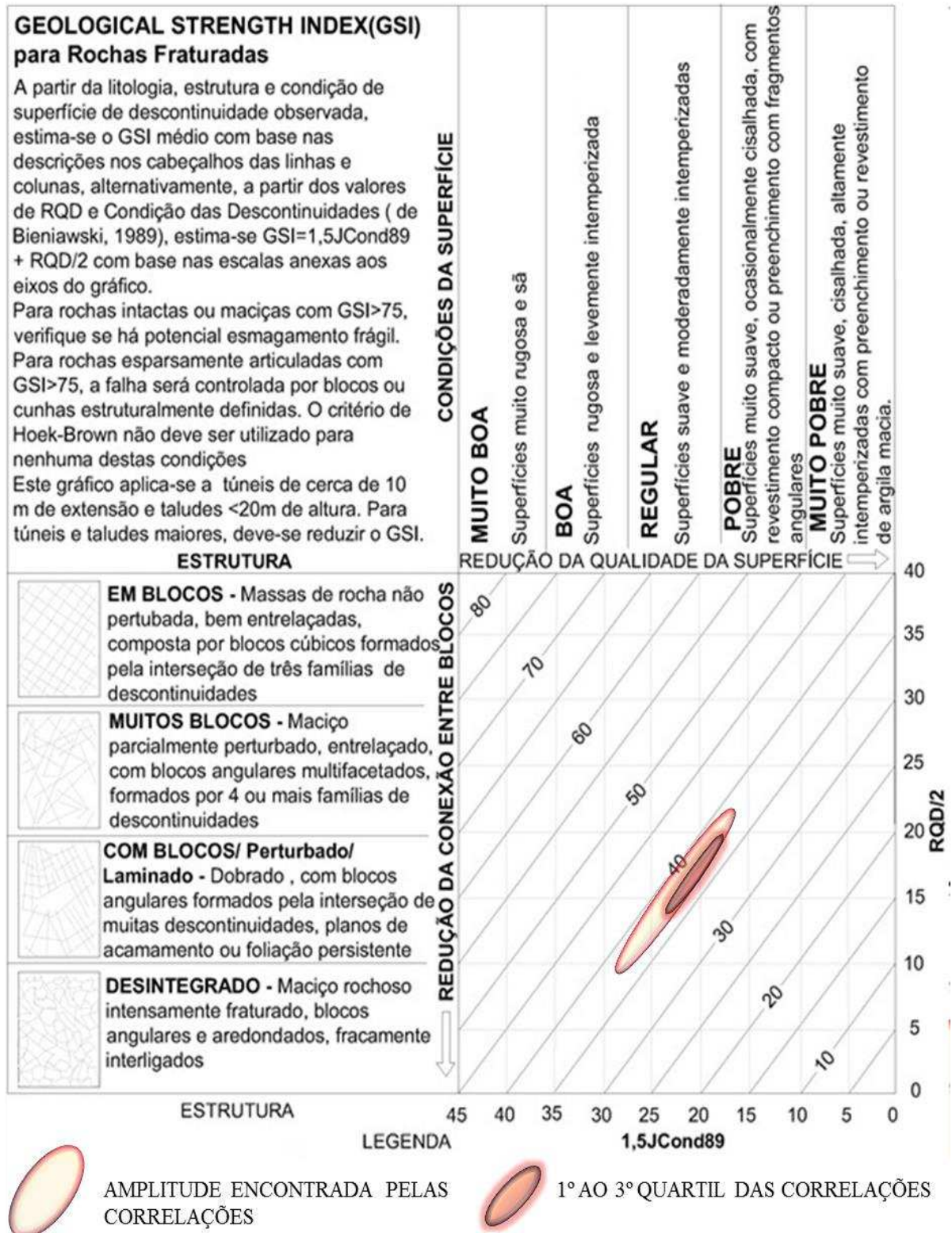


Gráfico 16 – Estimativa de GSI dos FD. (Adaptado e traduzido de HOEK *et al.*, 2013)

Ao verificar as informações encontradas, “*in situ*”, certifica-se que as estimativas propostas por Hoek (1994) e Hoek *et al.* (2013) também encontraram regiões esperadas de GSI para os filitos dolomíticos do Quadrilátero Ferrífero.

4.1.2.3 Comparação entre os filitos presentes na mina do Tamanduá

Tanto os filitos sericíticos (FS) como os filitos dolomíticos (FD) apresentaram como estruturas principais o acamamento e a foliação penetrativa. Além disso, os filitos dolomíticos apresentavam maiores alterações em relação aos filitos sericíticos. Enquanto os sericíticos se encontravam moderadamente alterados a levemente alterados, podendo estar muito alterados; os dolomíticos apresentavam estar moderadamente alterados voltados para altamente alterados. Estes resultados podem ser confirmados ao se verificar que os dolomíticos se encontravam com uma consistência macia, enquanto os sericíticos, que podiam estar macios, mas também apresentaram consistência média. Além disso, para o RQD, os FS se encontravam entre pobre e muito pobre, enquanto os FD só foram caracterizados como muito pobre. Enquanto valores de RMR_{89} entre 42 e 47 são esperados para os filitos sericíticos, os filitos dolomíticos esperam somente RMR_{89} igual a 42 pontos.

Com relação aos valores estimados quantitativamente de GSI, foram encontrados valores entre 37 e 50 para os FS e 37 e 40 para os FD. Estatisticamente, podem ser considerados para os FS valores entre 37 e 42, e 37 para os FD.

Em ambos os casos, as condições das superfícies dos maciços estavam entre boa e regular, porém, nos FS, as superfícies tiveram maiores frequências para a condição boa, enquanto nos FD as superfícies estavam mais para regular. Para a estrutura dos blocos são esperados resultados entre “muitos blocos” e “com blocos”, tendo maior frequência de “com blocos” para os FS e “muitos blocos” para os FD.

4.1.3 Itabiritos

Os itabiritos da mina do Tamanduá possuem composições silicosas, limoníticas ou argilosas/manganesíferas. São observados nítidos bandamentos composicionais, marcados pela intercalação rítmica entre bandas de níveis claros (ricas em quartzo) e escuros (ricas em óxidos/hidróxidos de ferro como hematita e magnetita), apresentando espessuras milimétricas a centimétricas (Vale, 2008). A figura 17 mostram os típicos bandamentos de camadas escuras e claras dos itabiritos da mina do Tamanduá.



Figura 15 – Itabirito com típico bandamento de camadas escuras e claras (OURO PRETO GEOLOGIA E PESQUISA MINERAL, 2004)

4.1.3.1 Itabiritos Compactos Silicosos (ICS)

Os itabiritos silicosos ocorrem nas consistências friáveis, médias ou compactas. Os compactos são relativamente restritos na mina do Tamanduá, e afloram na forma de corpos lenticulares alongados na direção NWN, concentrados na porção oeste e na porção centro-norte da mina. Na figura 16 pode ser observado um talude de itabirito compacto silicoso.



Figura 16 – Talude de Itabiritos Compactos Silicosos (ICS) (Vale, 2008)

Os resultados apresentados pela classificação de 63 estações geológico-geotécnicas mostraram maciços moderadamente alterados (3), com consistência média dura (4) ou dura (5) e estruturas muito fraturadas (4) ou intensamente fraturadas (5), tendo RQD muito pobre (1) ou pobre (2). Também foram observados acamamentos (2) e fraturas (6) com aberturas fechadas (1) e paredes podendo ter superfícies regulares, lisas e irregulares (2) ou levemente rugosas, lisas e regulares (3).

Para o RMR_{89} , foram encontrados valores entre 48 e 63, tendo média de 51 pontos. Porém, ao analisar o histograma apresentado no Gráfico 17 a seguir, são verificadas maiores frequências para as pontuações 48 e 50. Em vista disso, é possível afirmar que, para o RMR_{89} , os itabiritos compactos silicosos foram classificados como classe III.

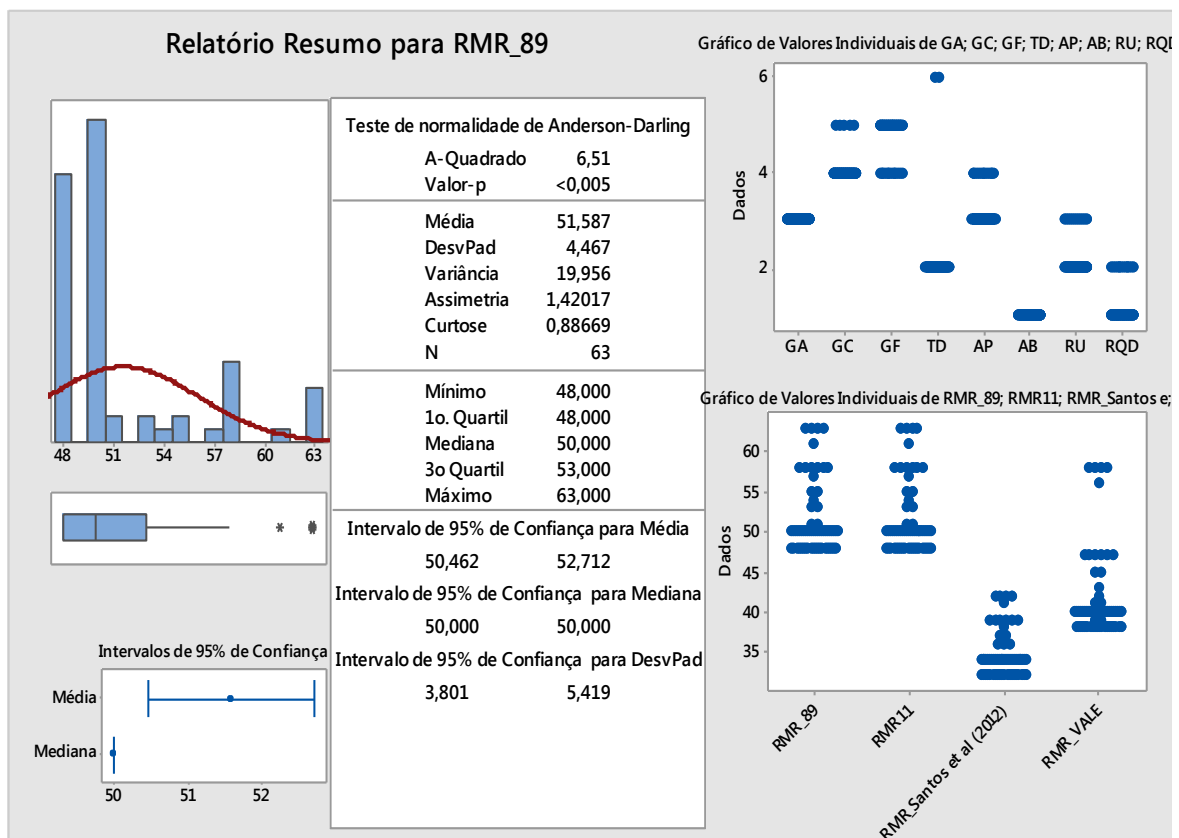


Gráfico 17 – Resultados do levantamento de campo dos Itabiritos Compactos Silicosos (ICS)

No Gráfico 18 são apresentados os resultados encontrados para os diferentes ajustes propostos para o RMR_{89} .

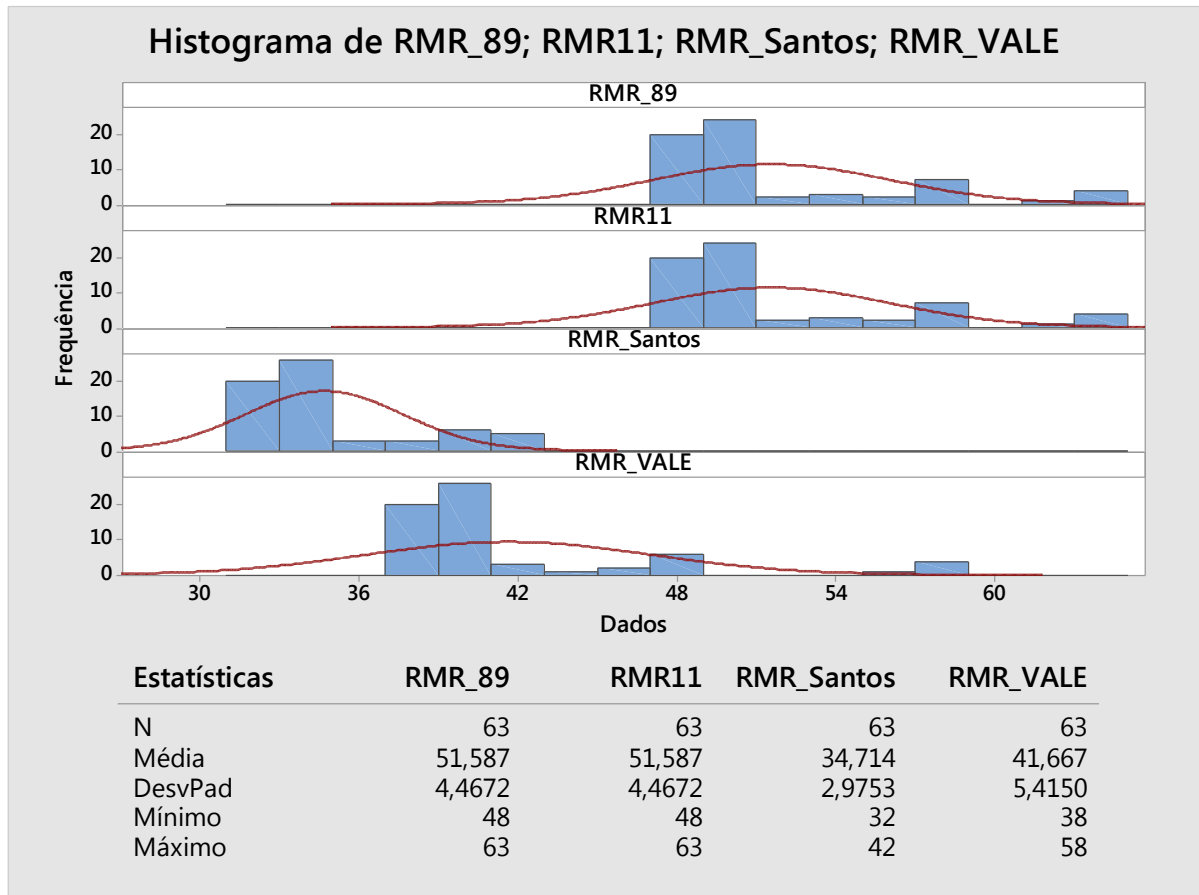


Gráfico 18 – Histograma dos diferentes ajustes de RMR – ICS

O histograma apresentado no Gráfico 18 mostra que os ajustes sugeridos por Santos *et al.*(2012) pontuaram os maciços entre 32 e 42, tendo média de 35 pontos. Para a metodologia empregada pela Vale (2008) foram encontrados valores entre 38 e 58, tendo média de 42 pontos. Com relação ao desvio padrão, os ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012) obtiveram os melhores resultados. Porém, assim como os resultados apresentados para os quartzitos, novamente os resultados encontrados por Santos *et al.* (2012) tiveram maiores penalizações nos itabiritos compactos silicosos.

Apesar da Vale (2008) encontrar média de 42 pontos, a caracterização mostrou frequências maiores para valores abaixo de 40 pontos sendo, por isso, encontradas classificações com maiores frequências para a classe IV. O Gráfico 19 mostra as classificações encontradas para os ICS considerando os diferentes ajustes de RMR.

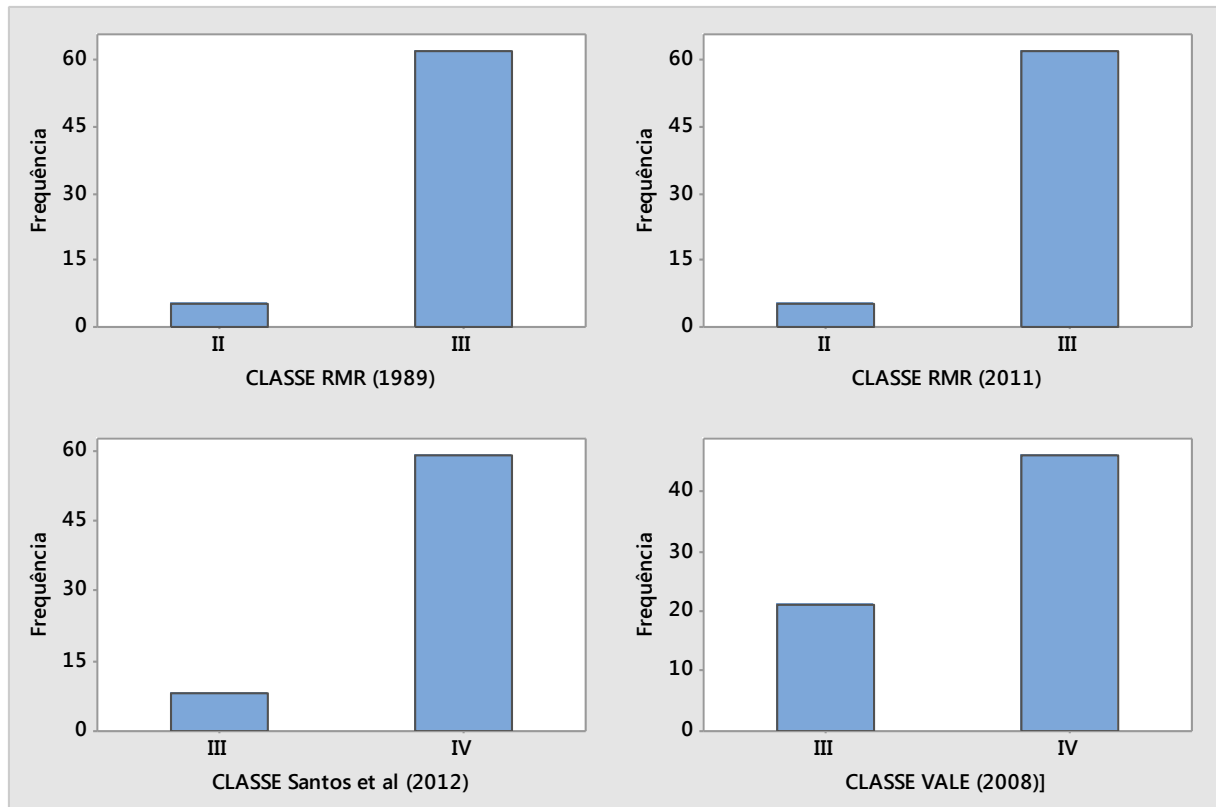


Gráfico 19 – Classificações RMR ajustadas em Itabiritos Compactos Silicosos.

Os resultados apresentados no Gráfico 19 mostram que ambos os ajustes (Santos et al. e Vale) classificaram os maciços como sendo, em maior parte, classe IV. Portanto, ambos os autores esperam para os itabiritos compactos silicosos pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero, classificações mais conservadoras que as propostas por Bieniawski, já que, a classificação original encontrou, em maior parte, maciços classe III. A metodologia proposta por Santos *et al.* (2012) apresentou menores desvios, porém, novamente apresentou maiores penalizações para os maciços rochosos mais resistentes.

Com relação ao índice GSI, foram estimados valores de GSI entre 43 e 58, tendo uma média de 46. Se considerado um intervalo de confiança de 95%, espera-se valores entre 45 e 48 e, se considerado os intervalos entre o primeiro e terceiro quartil são esperados valores entre 43 e 48. Para a condição da superfície foram encontradas superfícies “regulares” e “pobres”, tendo maior frequência para as condições “regulares”. Com relação à estrutura, são esperados maciços “em blocos”, “muitos blocos” e “com blocos”, sendo mais esperados maciços com “muitos blocos” ou “com blocos”. Essas informações podem ser visualizadas no Gráfico 20 a seguir.

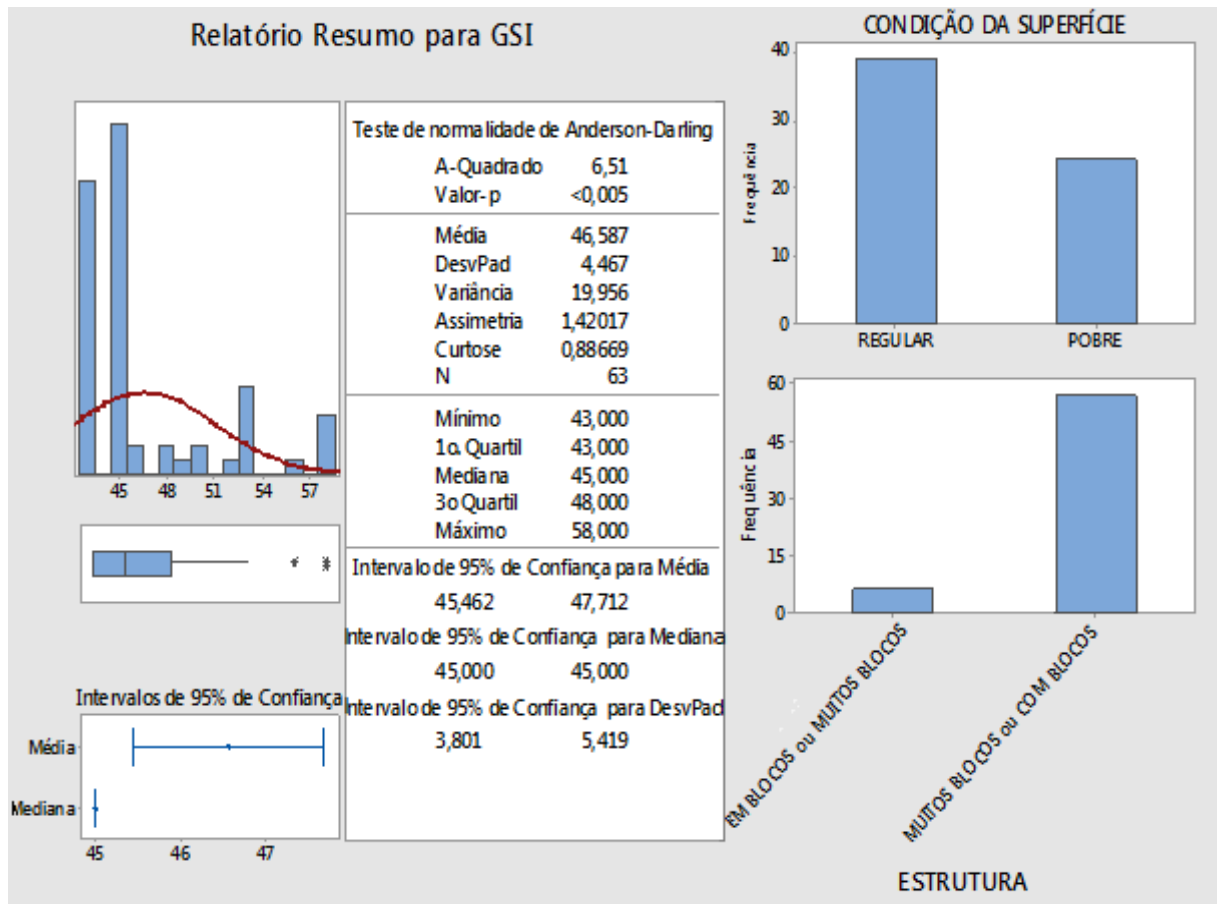


Gráfico 20 - Valores de GSI para os itabiritos compactos silicosos – ICS.

Apesar da quantificação do GSI apresentar valores entre 43 e 58, maiores incidências foram observadas entre 43 e 45.

Ao analisar os maciços de forma qualitativa, ou seja, “*in situ*”, foi constatado que as estimativas propostas por Hoek (1994) e Hoek *et al.* (2013) apresentaram regiões semelhantes às encontradas em campo. Portanto, as correlações de Hoek também apresentaram boas estimativas para os itabiritos compactos silicosos do Quadrilátero Ferrífero.

De posse dos resultados encontrados para o GSI, foi possível introduzir (Gráfico 21) as regiões esperadas para os itabiritos compactos silicosos no gráfico de Hoek *et al.* (2013).

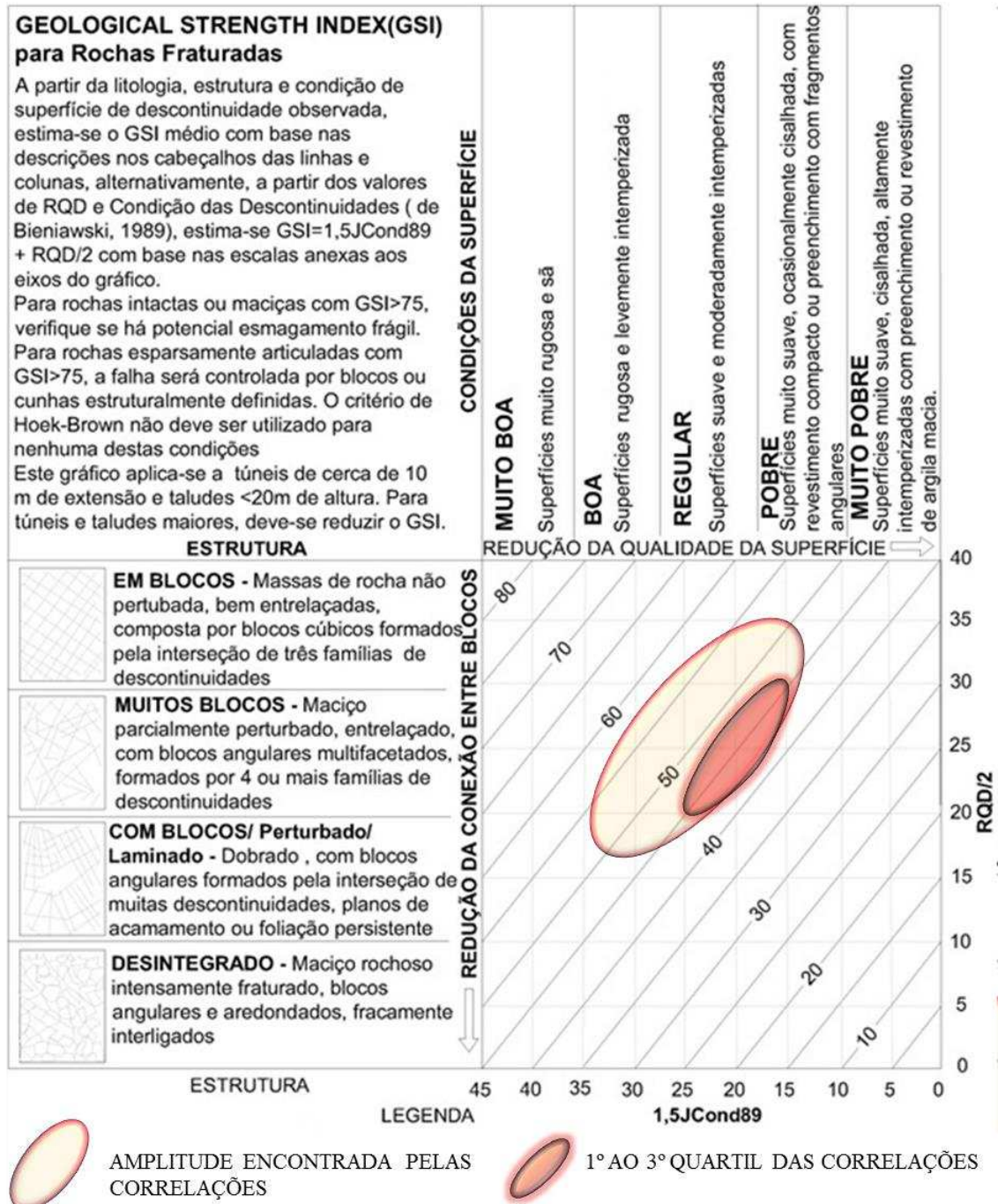


Gráfico 21 – Estimativa de GSI para os ICS do QF. (Adaptado e traduzido de HOEK *et al.*,2013)

4.1.3.2 Itabiritos Médios (IM) Silicosos (IMS) e Limoníticos (IML)

Graças a semelhança entre os resultados encontrados para os diferentes itabiritos médios, foram analisados, em conjunto, um total de 83 pontos de itabiritos médios, silicosos ou limoníticos (ocre) ao longo da mina do Tamanduá. Os itabiritos médios (IM) se encontram restritamente nas porções oeste, centro-norte e sul da mina, associados aos corpos de itabiritos compactos e friáveis. Os bandamentos são milimétricos a centimétricos e com bandas de

hematita mais consistente. De modo geral, se encontravam moderadamente alterados (3) e com consistência média macia (2) a média dura (4), além de se encontrarem muitos fraturados (4) ou até mesmo intensamente fraturados (5). O RQD foi classificado como muito pobre (1).

Para as descontinuidades foram encontrados acamamentos (2), com aberturas praticamente fechadas (1) e rugosidades rugosa, lisa e irregular (2) ou levemente rugosa, lisa e regular (3).

Considerando a classificação RMR_{89} , foram encontrados valores entre 43 e 51 pontos, tendo uma média de 46. Com isso, a classificação RMR_{89} encontrou para os IM a classe III. Essas informações podem ser visualizadas no Gráfico 22 a seguir.

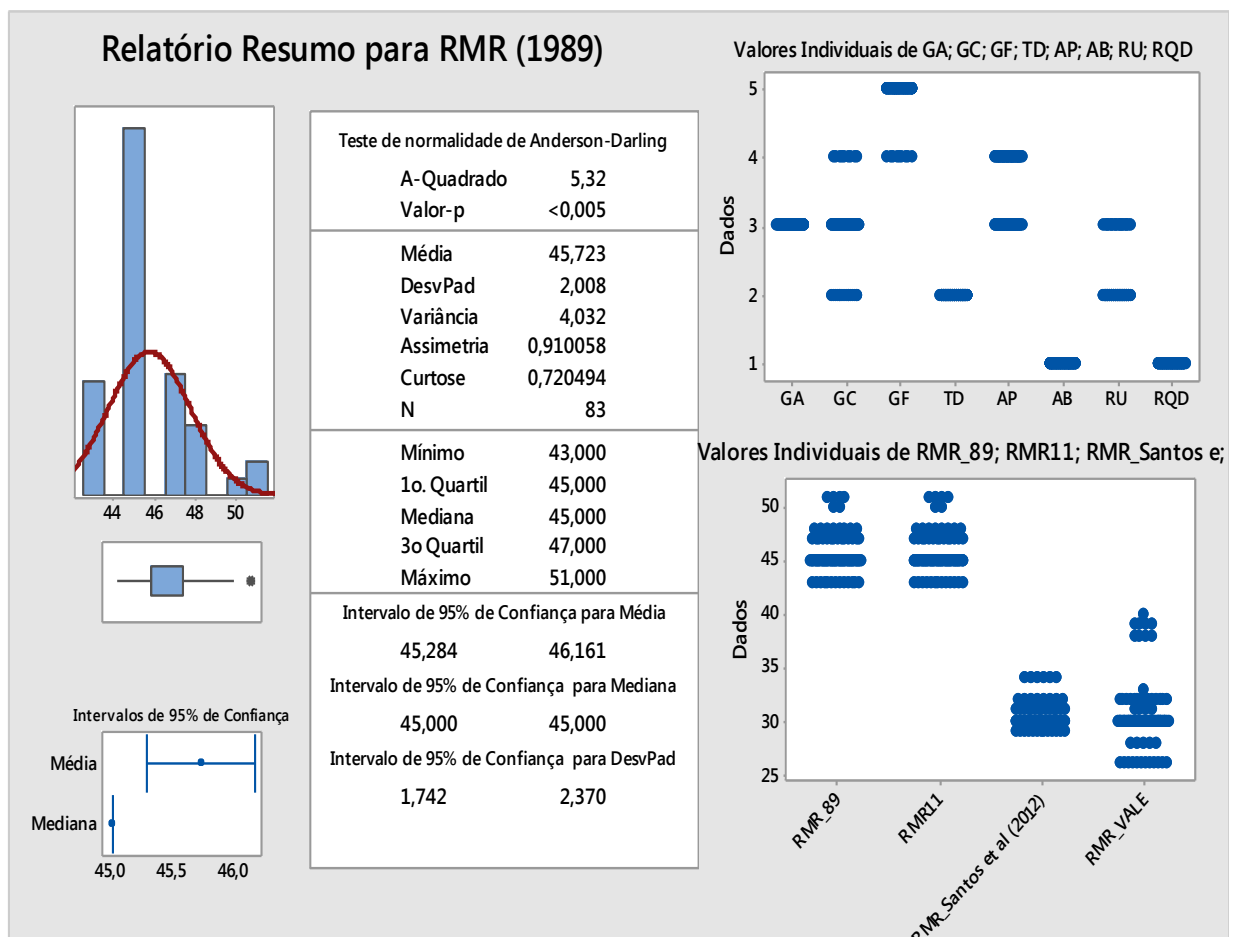


Gráfico 22 - Resultados do levantamento de campo dos itabiritos médios (IM, IMS e IML).

Como o ajuste sugerido por Bieniawski (2011) afetam somente maciços rochosos de consistência friáveis, as modificações não foram consideradas nos IM. Para os ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012) e pela Vale (2008), o histograma apresentado no Gráfico 23 mostra a diferença encontrada entre os diferentes métodos.

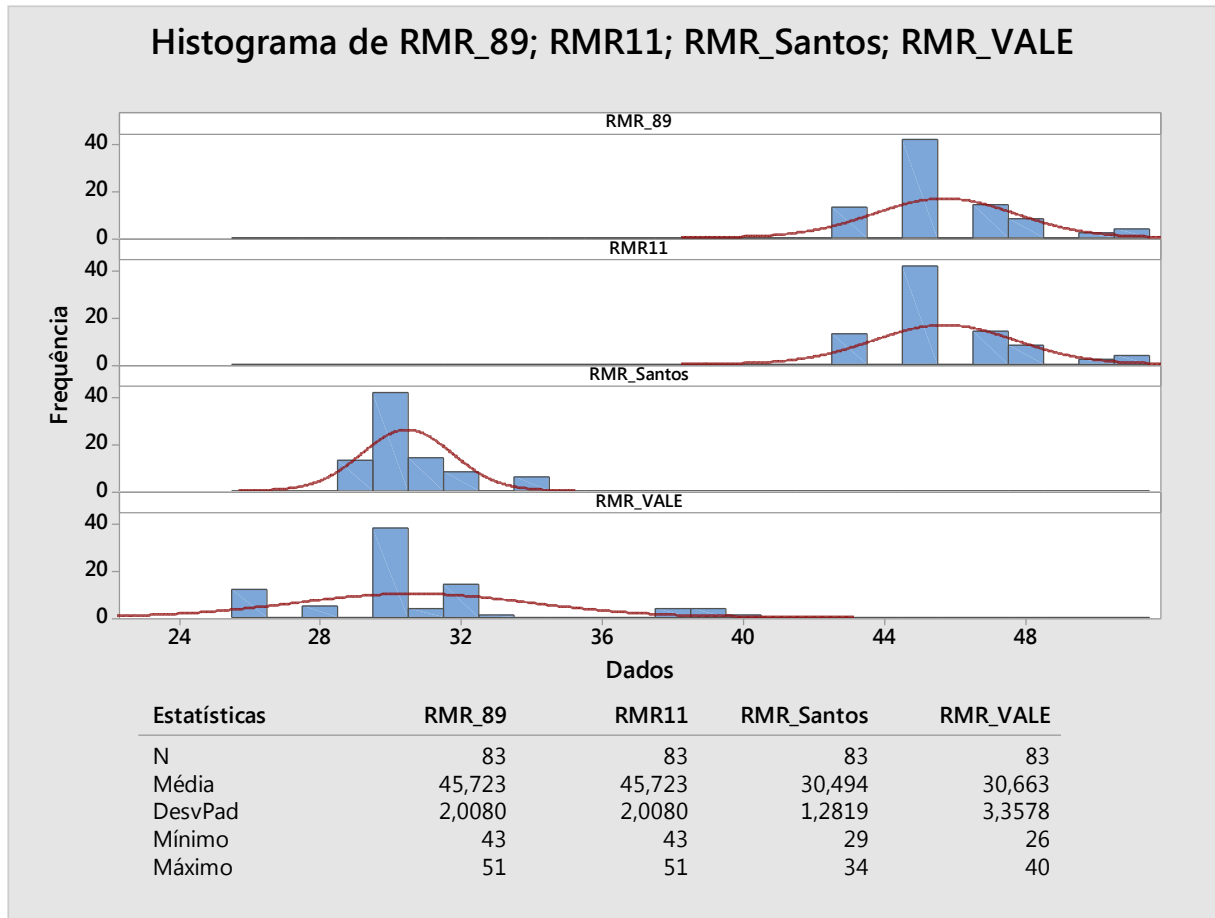


Gráfico 23 - Histograma dos diferentes ajustes de RMR dos itabiritos médios.

Tanto Santos *et al.* (2012) como Vale (2008) encontraram valores médios semelhantes. Enquanto o RMR_{89} encontrou valores na faixa de 46 pontos, as classificações ajustadas esperam valores próximos de 30 pontos. Portanto, a penalização da classificação original em aproximadamente 35 % pelos autores, mostra a dificuldade que o RMR vem apresentando em classificar os maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero. Com relação aos ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008), nota-se uma melhor distribuição dos resultados no método proposto por Santos *et al.* (2012).

No RMR_{89} , todos os pontos coletados se enquadraram como classe III. Ao realizar os ajustes na classificação segundo Santos *et al.* (2012) e Vale (2008), os maciços foram classificados como classe IV. Por isso, como os resultados encontrados pela classificação RMR_{89} não condizem com a realidade esperada para os maciços do Quadrilátero Ferrífero, recomenda-se a utilização dos ajustes para encontrar resultados mais fidedignos. O Gráfico 24 a seguir mostra a diferença encontrada entre as classificações.

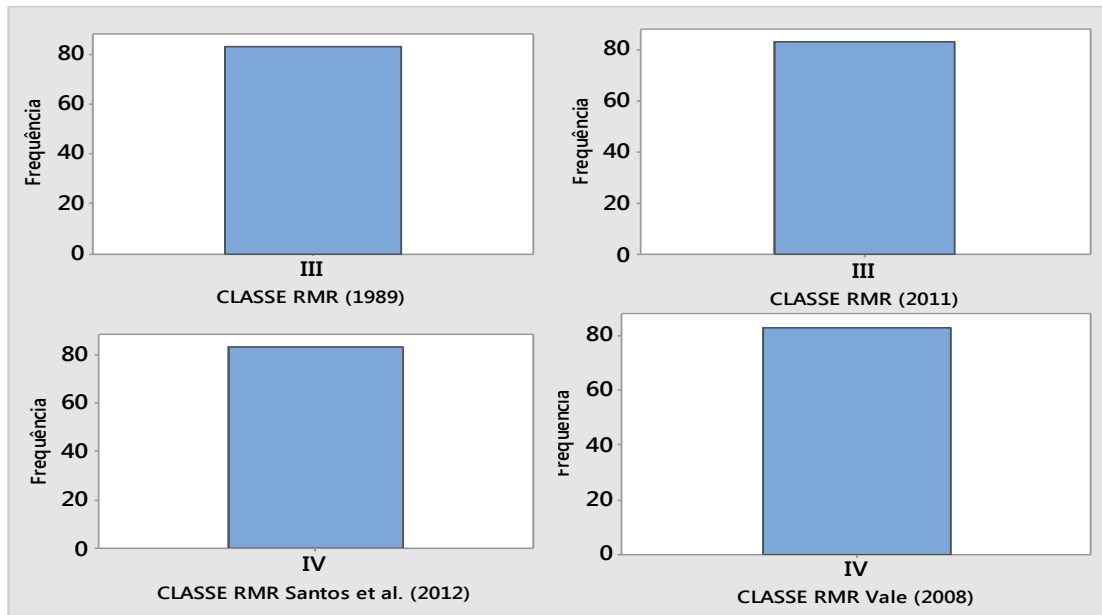


Gráfico 24 - Histograma dos diferentes ajustes de RMR dos itabiritos médios.

Para as classificações GSI, foram estimados valores entre 38 e 46, tendo média de 41. Se considerado um intervalo de confiança de 95%, espera-se valores de GSI entre 40 e 41 e, se considerado os quartis, espera-se valores entre 40 e 42 para o primeiro e terceiro quartil. A pontuação com maior frequência encontrada foi 40 pontos, seguido de 42 e 38 pontos. As condições das superfícies mapeadas se encontravam entre boa e regular, tendo maior frequência para regular. Já as estruturas dos maciços se encontravam entre “muitos blocos” e “com blocos”. As informações descritas acima podem ser visualizadas no Gráfico 25 a seguir.

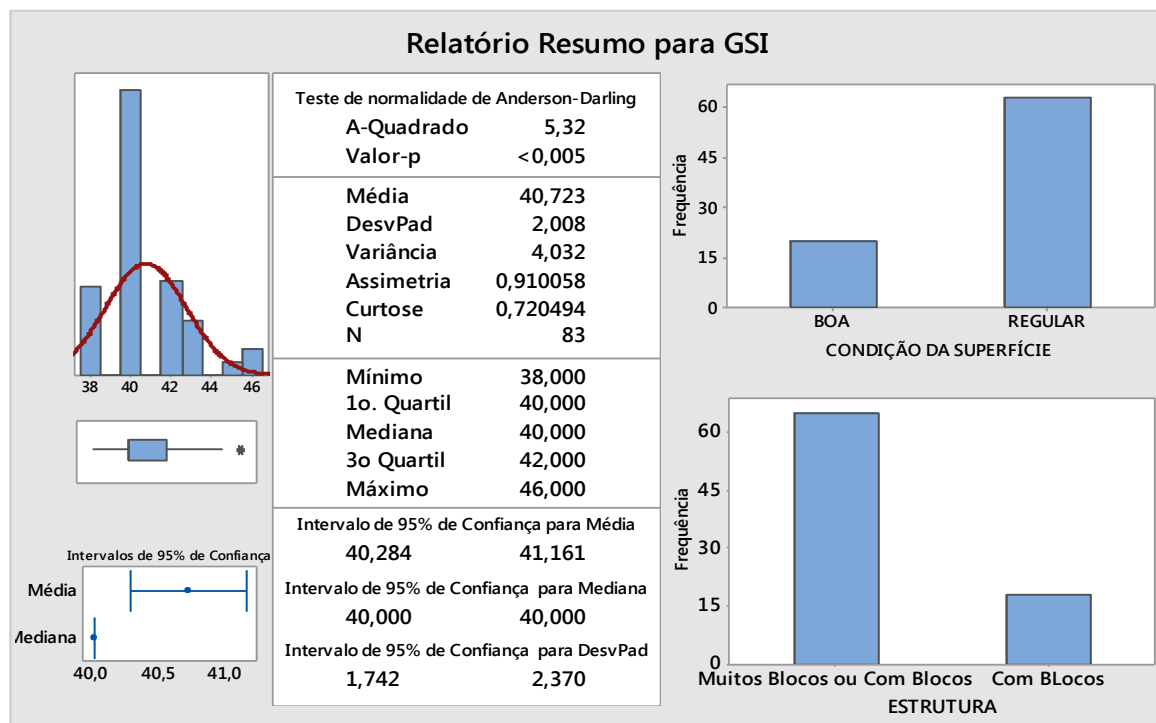


Gráfico 25 – Valores de GSI para os itabiritos médios.

Os métodos utilizados para encontrar o valor de GSI possibilitaram estimar as regiões esperadas no gráfico de GSI para os IM presentes no Quadrilátero Ferrífero, especificamente na mina do Tamanduá. O Gráfico 26 ilustra as regiões encontradas no GSI de forma quantitativa.

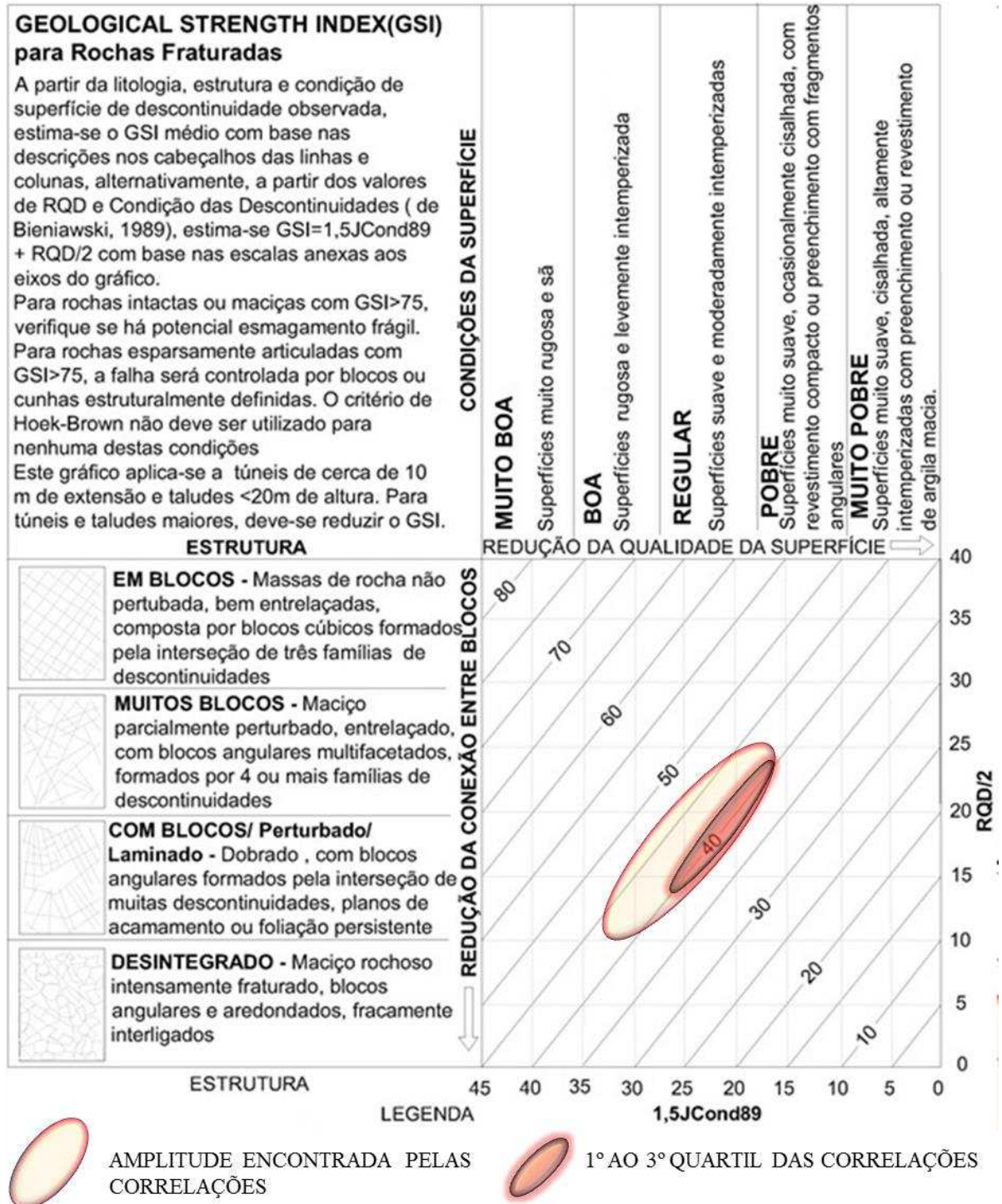


Gráfico 26– Estimativa de GSI para os IM. (Adaptado e traduzido de HOEK *et al.*,2013)

As regiões encontradas pela quantificação do GSI no gráfico de Hoek *et al.* (2013) mostraram bons resultados quando comparado com observações qualitativas dos maciços rochosos de IM. Além disso, é observado que, da mesma forma que as caracterizações do ISRM (2007) classificaram os maciços como moderadamente intemperizados e com muitas fraturas, o GSI apresentou superfícies regulares e com blocos formados pela interseção de muitas descontinuidades.

4.1.3.3 Itabiritos Friáveis Silicosos (IFS)

Grande parte da mina do Tamanduá é formada por itabiritos friáveis silicosos (IFS). Eles são geralmente encontrados na região oeste e afloram nas porções centro-norte e sul da mina. Para a caracterização geomecânica 354 estações geológico-geotécnicas (pontos) foram avaliadas ao longo da mina. Em geral, as caracterizações mostraram maciços intensamente fraturados (5) a muito fraturados (4), moderadamente alterados (3) a altamente alterados (4), tendo consistência entre extremamente macia (0) à média macia (2) e o RQD sendo classificado como muito pobre (1). Além disso, as estruturas apresentavam acamamentos (2), tendo aberturas fechadas (1) e superfícies rugosas, lisas e irregulares (2) ou levemente rugosas, lisas e regulares (3). A Figura 17 mostra um talude em IFS pertencente da mina do Tamanduá.



Figura 17 – Talude em itabiritos friáveis silicosos - IFS. (VALE, 2008)

Para o RMR_{89} foram encontrados valores entre 36 e 46 pontos, com uma média e mediana de 42 pontos. Por isso, verifica-se uma tendência na classificação RMR em classificar os maciços como classe III. As informações mencionadas anteriormente podem ser visualizadas no Gráfico 27.

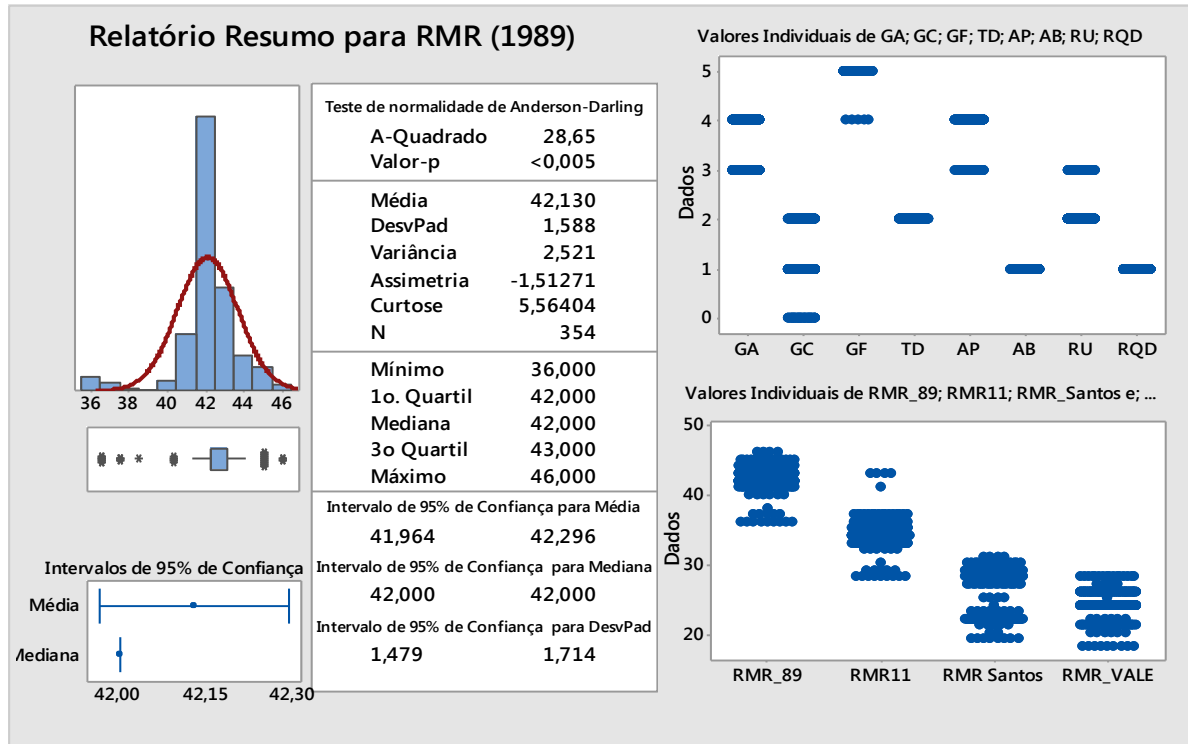


Gráfico 27 - Resultados do levantamento de campo dos itabiritos friáveis silicosos

No Gráfico 28 são apresentados os histogramas encontrados para os diferentes ajustes de RMR.

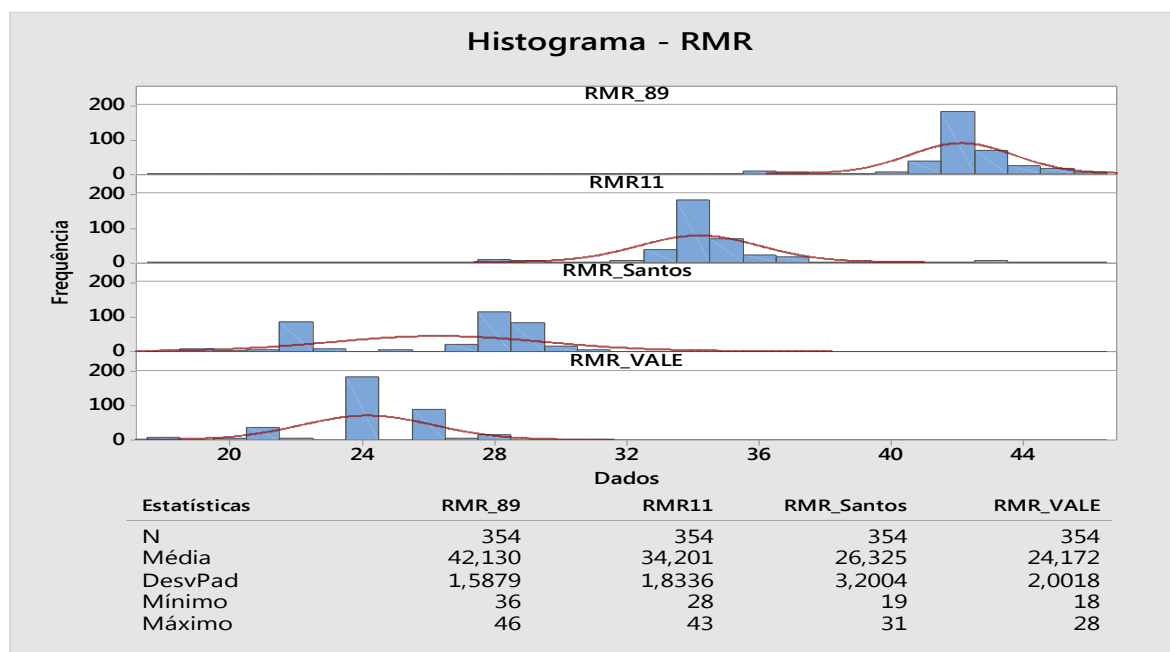


Gráfico 28 - Histograma dos diferentes ajustes de RMR dos itabiritos friáveis.

No Gráfico 28 é observado que os ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008) encontraram resultados bem próximos, tendo desvios padrões maiores para os ajustes de Santos *et al.* (2012). Ao analisar os dados da classificação ajustada por Santos *et al.* (2012) constatou-se que os maciços rochosos altamente alterados (4) representavam os classificados abaixo de 23 pontos, exatamente a região distante dos demais pontos do histograma apresentado no Gráfico 28. Isso ocorreu devido ao método proposto por Santos *et al.* (2012) inserir fatores de redução nos valores de RMR_{89} a partir dos diferentes grau de intemperismo. Como as penalizações são maiores para os maciços rochosos com maiores alterações, houve um distanciamento no histograma em relação ao outros maciços.

Apesar da explicação de Bieniawski (2011) reduzir os resultados do RMR_{89} , as propostas de Santos *et al.* (2012) e Vale (2008) ainda esperam penalizações maiores. Portanto, os resultados encontrados por esses autores continuam confirmando a necessidade de ajustes na classificação de Bieniawski (2011) quando utilizadas em regiões susceptíveis à elevada ação do intemperismo.

Na classificação original de Bieniawski (1989), a maior parte dos pontos foi classificada como classe III, tendo poucos pontos para a classe IV. Após a explicação de Bieniawski (2011), a classificação RMR inverteu os resultados, ou seja, a maior parte dos pontos foi classificada como classe IV. Com a realização dos ajustes na classificação segundo Santos *et al.* (2012) e Vale (2008), os maciços também foram classificados com maior frequência para a classe IV, tendo poucos pontos classificados como classe V. O Gráfico 29 ilustra a frequência para as classes encontradas.

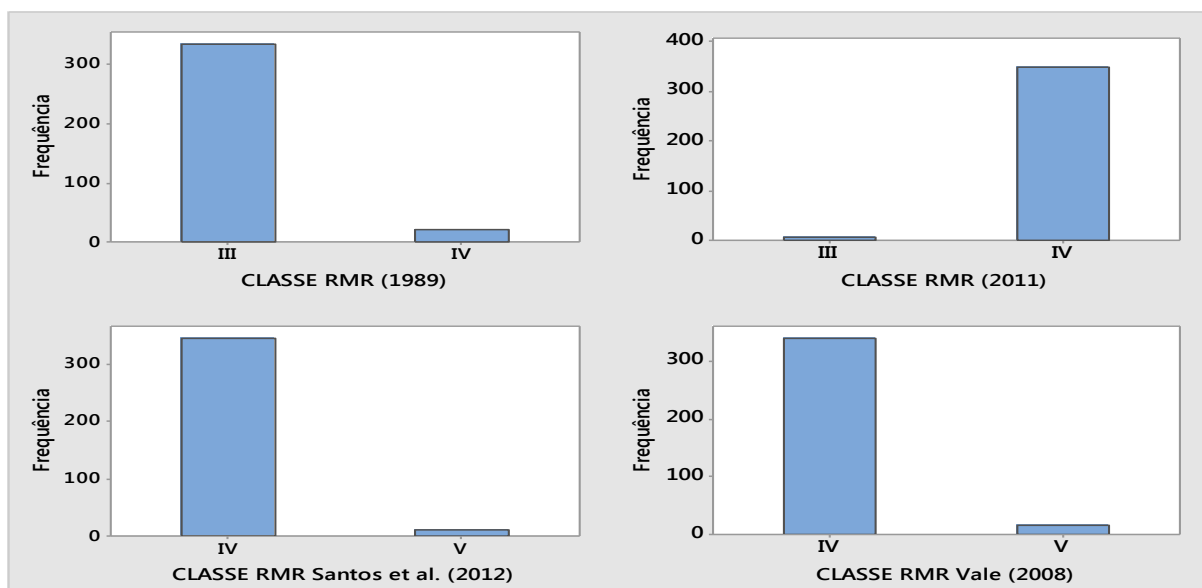


Gráfico 29 - Classificações RMR (ajustadas) para os itabiritos friáveis silicosos.

Com esses resultados é possível afirmar que, além da classificação RMR_{89} não apresentar resultados condizentes com a realidade encontrada em campo, mesmo ajustando o RMR seguindo as recomendações de Bieniawski (2011), o RMR ainda necessita de ajustes para classificar os IFS do Quadrilátero Ferrífero.

Ao determinar os resultados de GSI por meio da quantificação sugerida por Hoek *et al.* (2013), constatou-se que, valores entre 31 e 41 pontos são previstos, tendo uma média de 37 pontos. Se considerado o primeiro e o terceiro quartil da amostra, são esperados valores entre 37 e 38. Para as condições das descontinuidades, são previstas condições boa, regular e pobre, tendo maior frequência para as condições regulares. Para as estruturas, são esperados “em blocos”, “muitos blocos” e “com blocos”, tendo maiores frequências para as regiões entre “muitos blocos” e “com blocos”. Os dados apresentados de GSI podem ser visualizados no Gráfico 30.

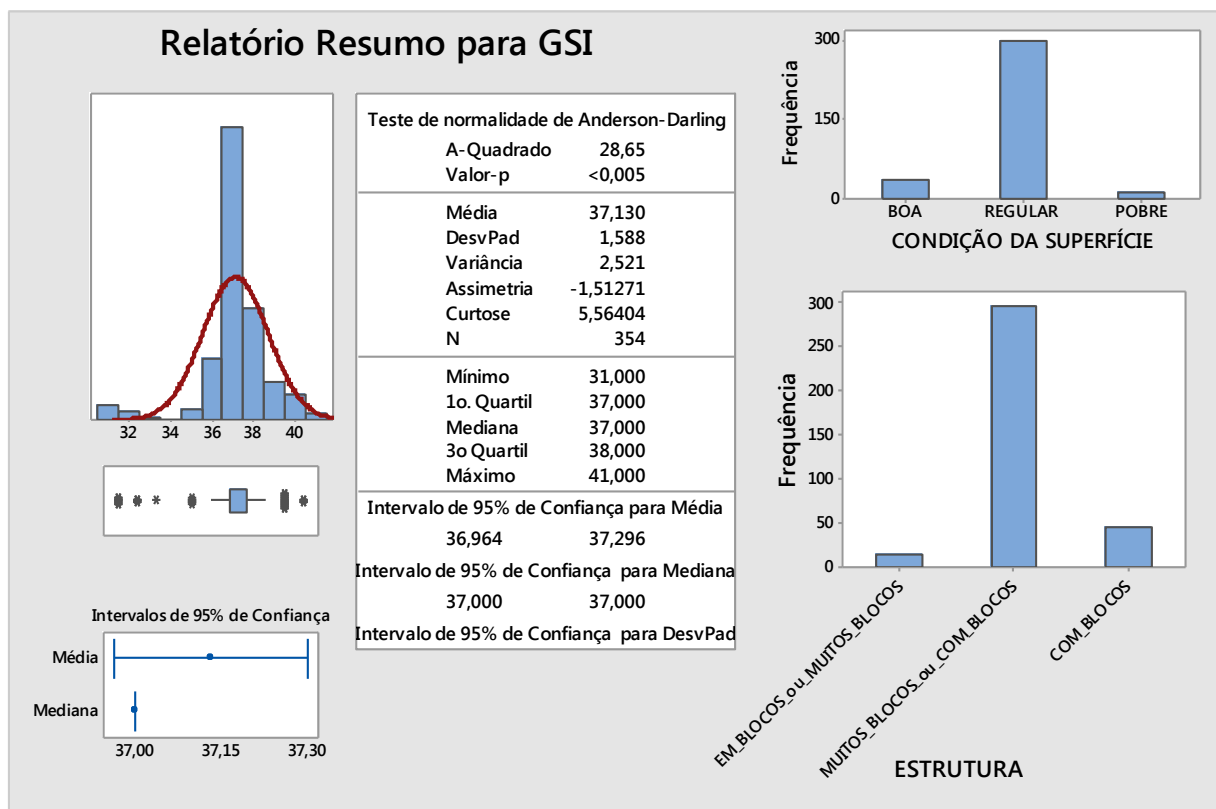


Gráfico 30 - Valores de GSI para os itabiritos friáveis silicosos.

Apesar de a correlação encontrar resultados entre 31 e 41, verifica-se que, a maior parte dos pontos coletados apresentaram GSI entre 36 e 38. Por isso, na Figura 22 apresentada a seguir existe uma grande probabilidade dos IFS estarem localizados próximos ao número 37, da condição de superfície regular, e da estrutura “com blocos”. Por isso, no Gráfico 31, o círculo

mais escuro representa a maior incidência de IFS, da mina do Tamanduá, no gráfico de GSI. Já a região mais clara, representa as regiões encontradas considerando todas as estações (pontos) coletadas na mina.

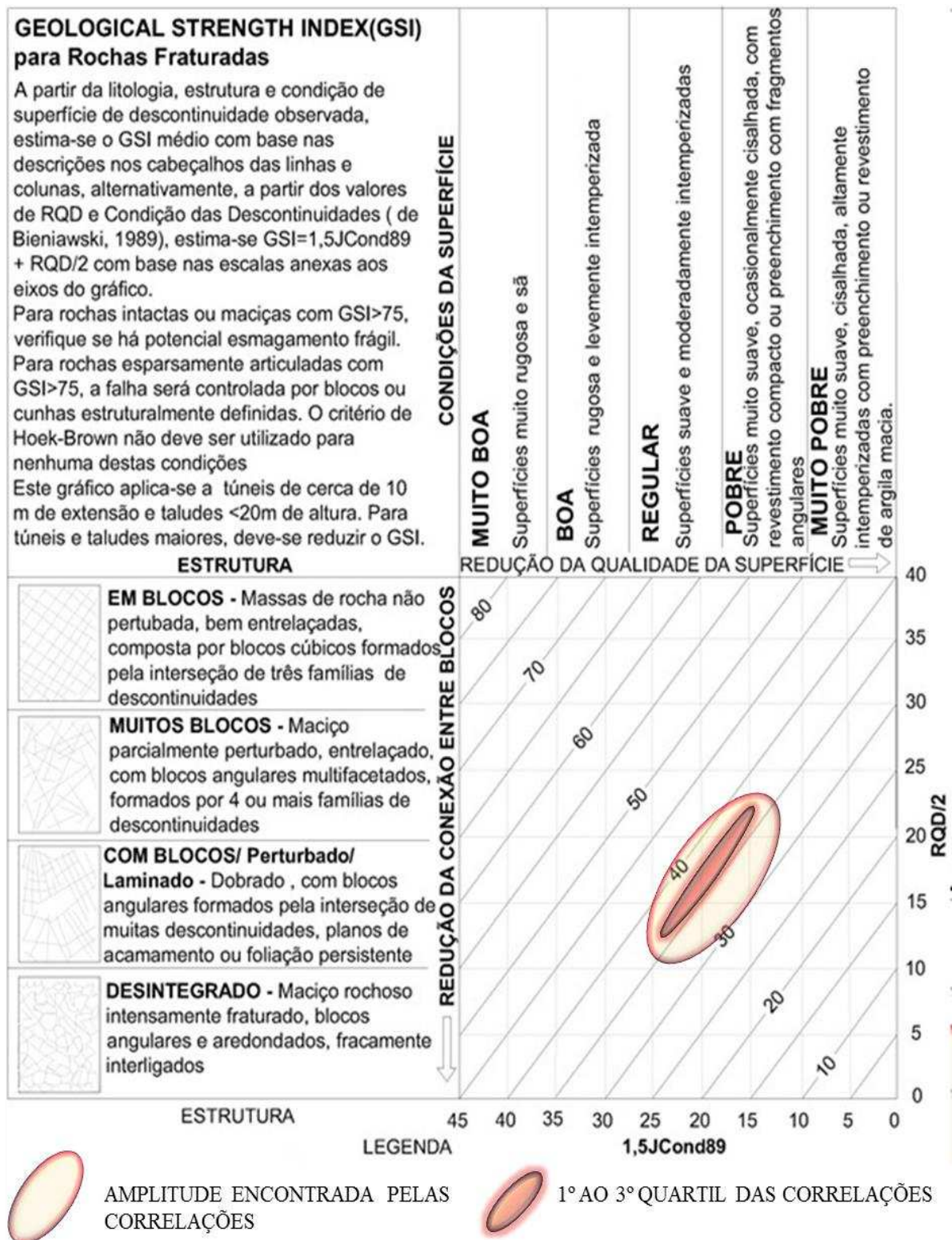


Gráfico 31 - Valores de GSI para os itabiritos friáveis silicosos (IFS). (Adaptado e traduzido de HOEK *et al.*,2013)

4.1.3.4 Itabiritos Friáveis Argilosos (IFA) e rico em Ferro (IFAR)

Nos itabiritos friáveis argilosos foram analisados um total de 216 estações geológico-geotécnicas (pontos) ao longo da mina do Tamanduá, sendo que, destes, apenas 74 estações não tinham concentrações elevadas de ferro (IFAR). As caracterizações mostraram maciços intensamente fraturados (5), com grau de alteração entre moderadamente alterados (3) a altamente alterados (4) e com consistência entre extremamente macia (0) a média (3). O RQD foi classificado como muito pobre (1). Com relação às descontinuidades presentes, foram encontrados acamamentos (2), com aberturas fechadas (1) e paredes rugosas, lisas e irregulares (2).

As principais diferenças observadas nas caracterizações entre os itabiritos friáveis argilosos estão relacionadas com as concentrações de ferro presente. Em geral, quando estes apresentam elevadas concentrações de ferro (IFAR), eles são encontrados com características mais resistentes. Quando pobres em ferro a consistência pode chegar a ser extremamente macia. A Figura 18 ilustra as características encontradas nos itabiritos friáveis argilosos.



Figura 18 – Talude em Itabiritos Friáveis Argilosos (IFA) (VALE, 2008)

Para o RMR_{89} foram encontrados valores entre 35 e 45 pontos, apresentando média de 39 pontos. Contudo, verificam-se maiores frequências para valores entre 36 e 38 e para 43. Com

isso, o RMR_{89} encontrou resultados entre as classes III e IV. Essas informações podem ser visualizadas no Gráfico 32 a seguir.

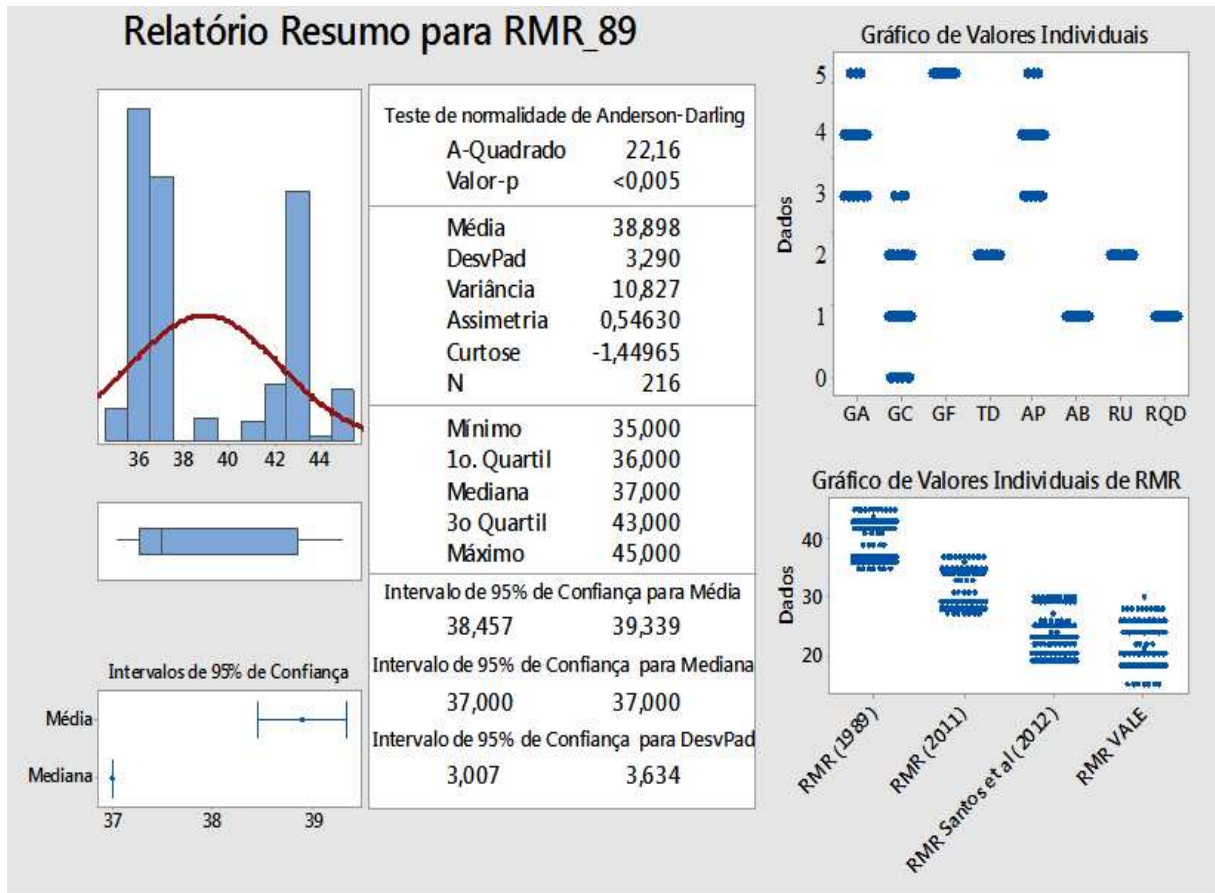


Gráfico 32 – Caracterização e classificação dos IFA e IFAR.

Ao analisar os histogramas apresentados no Gráfico 33 a seguir, verifica-se que os ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012), Bieniawski (2011) e Vale (2008) mostraram, novamente, semelhança entre os resultados obtidos por outras litologias. Apesar da explicação dada por Bieniawski (2011) penalizarem os resultados do RMR_{89} , Santos *et al.* (2012) e Vale (2008) ainda esperam, para os maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero, penalizações na classificação.

Ainda, foi constatado pouca diferença entre os ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012 e Vale (2008). Por isso, ambos os ajustes podem ser utilizados para encontrar resultados mais fiéis de RMR nos maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero.

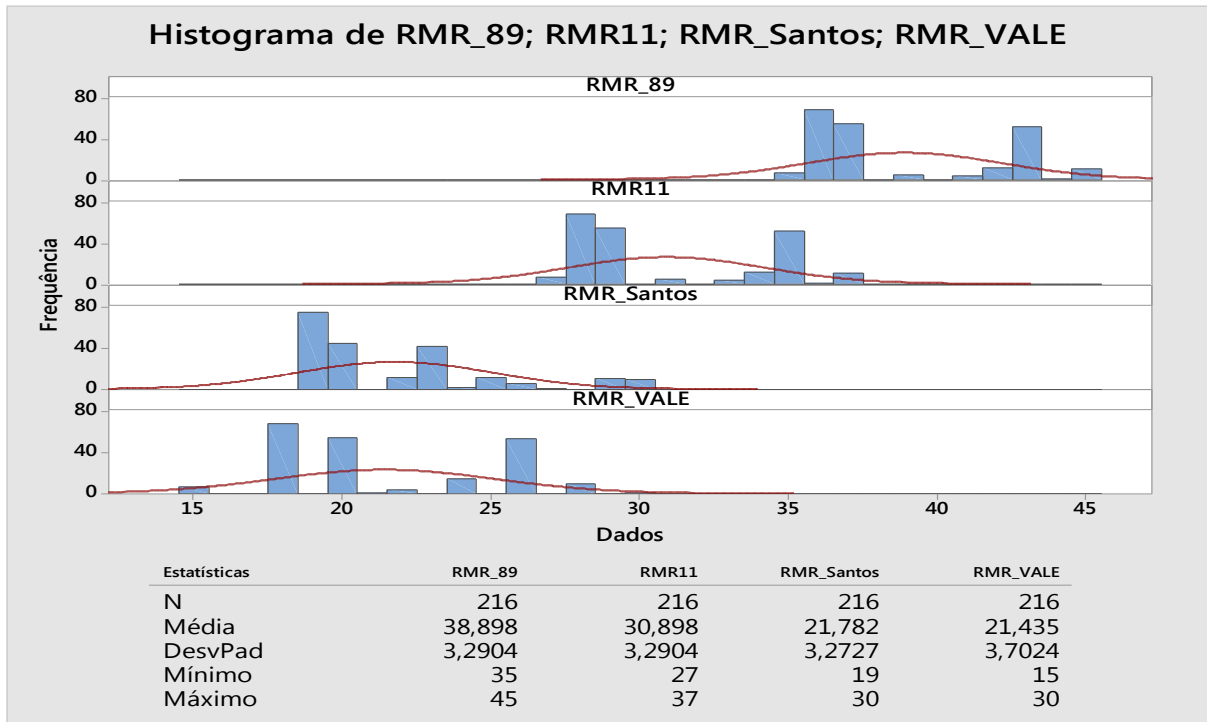


Gráfico 33 – Histograma para os diferentes ajustes de RMR, aplicados nos IFA e IFAR.

Com relação às classes encontradas pelos métodos, no RMR_{89} , os pontos foram classificados como classe III e IV, tendo uma representação maior para a classe IV. Com a explicação dada por Bieniawski (2011), os maciços passaram a ser classificados como classe IV. Para os ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008), os maciços foram classificados como classe IV e V, tendo, para ambos os casos, predominância maior para a classe V. O Gráfico 34 mostra as frequências encontradas para cada situação.

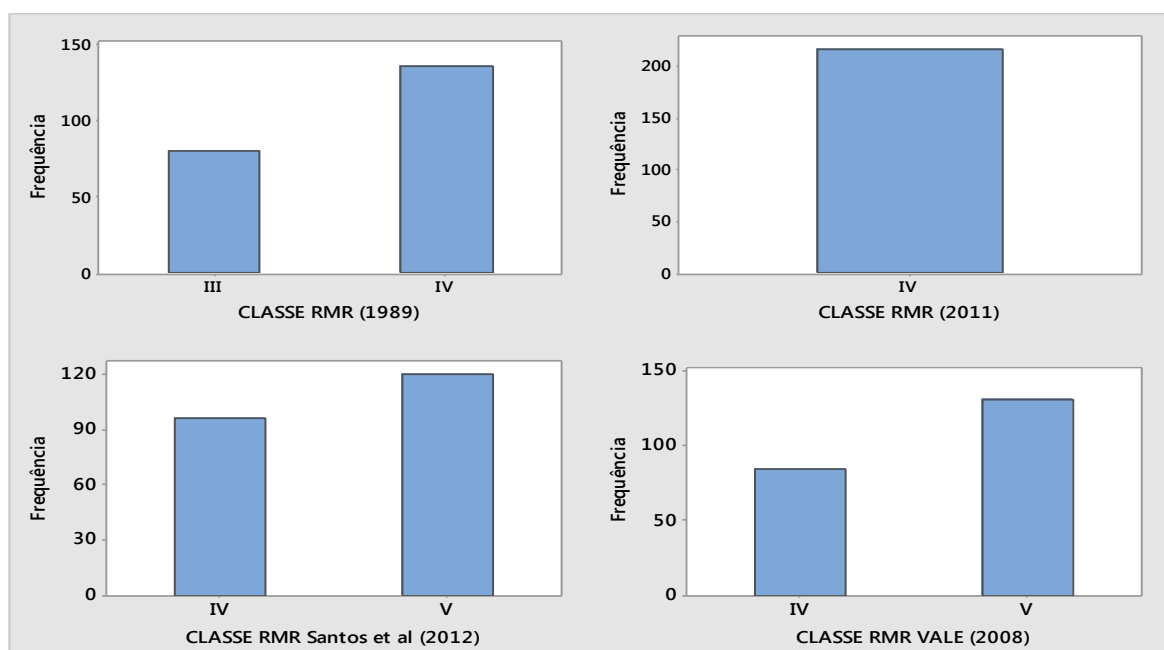


Gráfico 34 – Classificação para os diferentes ajustes de RMR, aplicados nos IFA e IFAR.

Em vista disso, mesmo ajustando o RMR_{89} de acordo com Bieniawski (2011), a classificação ainda mostra a necessidade de ajustes para conseguir melhores resultados para os itabiritos friáveis argilosos pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero, sendo, por isso, recomendado a utilização dos ajustes propostos por Santos *et al.* (2012) ou Vale (2008).

Com relação à classificação GSI, os resultados podem ser visualizados no Gráfico 35 a seguir.

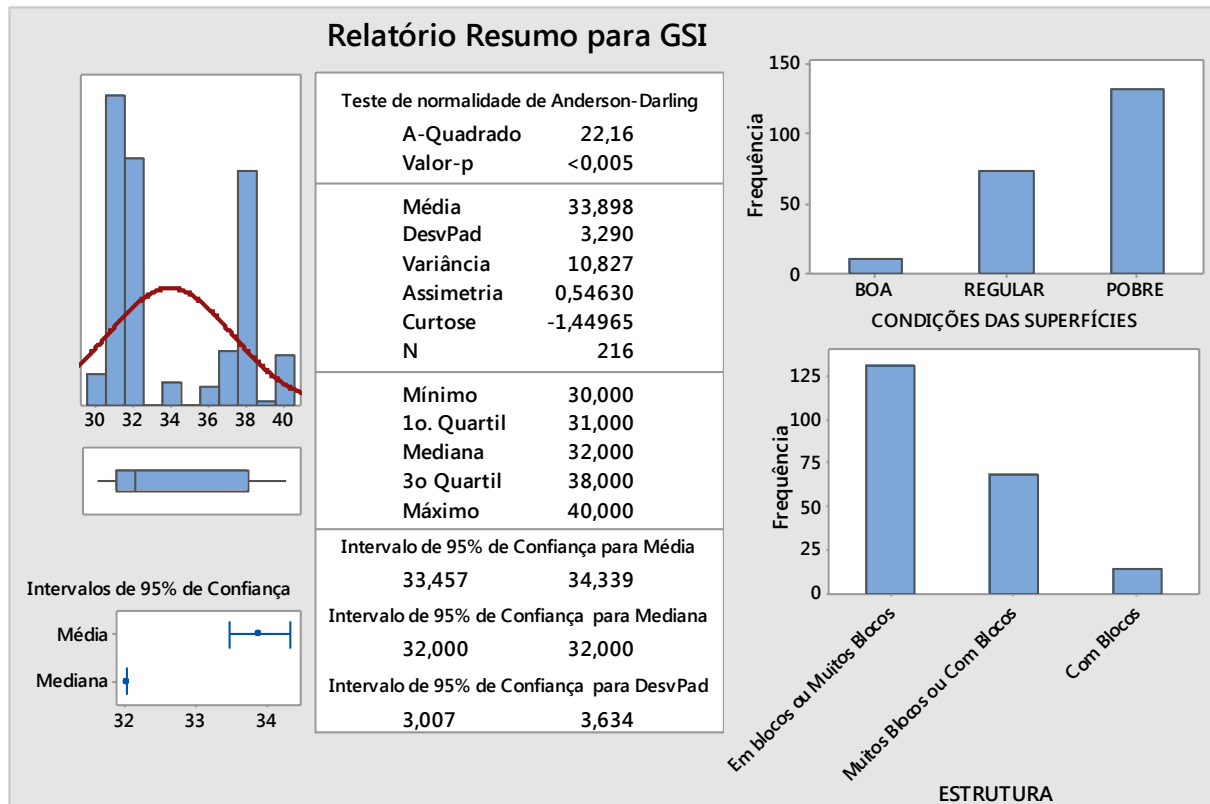


Gráfico 35 – Valores de GSI para os IFA e IFAR.

Ao utilizar a correlação de GSI, o método encontrou valores entre 30 e 40, tendo uma média de 34. Apesar dos quartis apresentarem valores entre 31 e 38, o histograma apresentado no Gráfico 28 mostrou frequência maiores para 31, 32 e 38, tendo, geralmente, GSI maior para os IFAR. Para as condições das superfícies são esperadas condições boa, regular e pobre (predominante). Além disso, foram previstas estruturas entre “em blocos”, “muitos blocos” e “com blocos”, apresentando maior frequência para as regiões entre “em blocos” e “muitos blocos”. De posse dos resultados, as regiões no gráfico de GSI puderam ser estimadas quantitativamente, como mostra o Gráfico 36 a seguir.

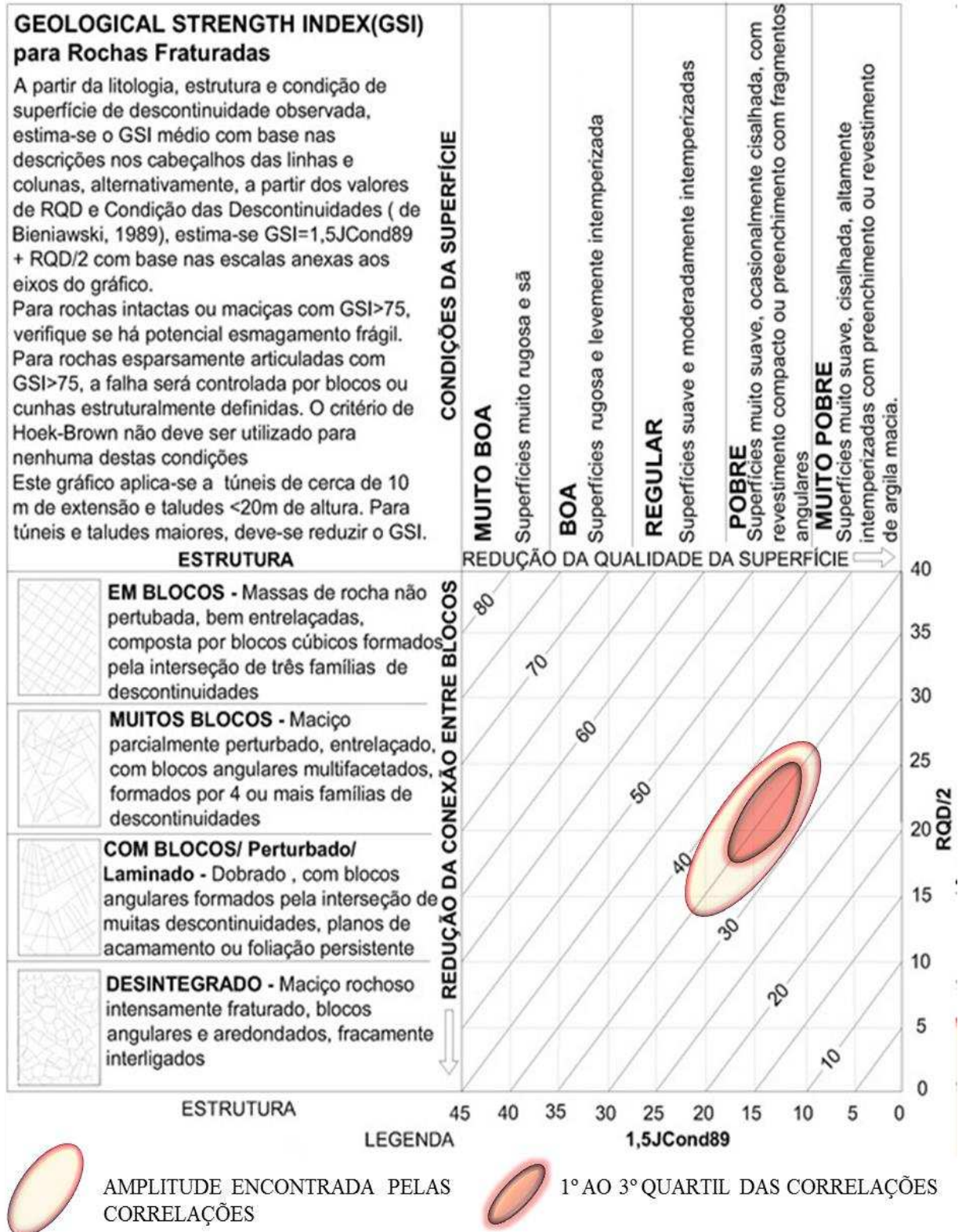


Gráfico 36 – Regiões esperadas no GSI para os IFA e IFAR.

Em geral, os IFAR estão mais próximos do terceiro quartil, por isso, é possível afirmar que os itabiritos friáveis argilosos se encontram, em sua grande maioria, entre 31 e 32 e, quando rico em ferros, apresentam GSI próximo de 38.

4.1.3.5 *Comparação entre os itabiritos presentes na mina do Tamanduá.*

As comparações entre os resultados encontrados para os itabiritos compactos, médios, silicosos e argilosos permitiram diferenciar os resultados das caracterizações e classificações de RMR e GSI.

Com relação às caracterizações, tanto os ICS como os IM apresentaram-se moderadamente alterados, diferentemente dos IFS, IFA e IFAR que apresentaram estar entre altamente alterados para os silicosos e completamente alterados para os argilosos.

Com relação ao grau de consistência, os ICS apresentavam-se média dura ou dura, os IM apresentavam-se relativamente médios, ou seja, média dura, média ou média macia, e os IF encontravam-se entre média macia, macia e extremamente macia. Os resultados mostram uma relação entre o grau de consistência e a forma que a Vale vem atribuindo à subdivisão entre as litologias.

Com relação ao grau de fraturamento apresentado, em geral, todos os itabiritos estavam entre muito fraturados e intensamente fraturados, tendo os de consistência argilosa sempre intensamente fraturados. Para o RQD, todos os maciços foram apresentados como muito pobres, tendo exceção os ICS que, apesar de apresentarem RQD muito pobre, também apresentaram RQD pobre.

Para as descontinuidades, quase todos apresentavam acamamentos e aberturas fechadas, com exceção dos IFA, que apresentaram aberturas pequenas. As rugosidades encontradas situavam-se entre rugosa, lisa e irregular e levemente rugosa, lisa e regular.

Quando considerado o primeiro e terceiro quartil das amostras na classificação GSI, os ICS apresentaram valores entre 43 e 48, os IM apresentaram valores entre 40 e 42, os IFS apresentaram valores entre 37 e 41 e os IFA apresentaram valores entre 31 e 38. Portanto, novamente é constatada uma classificação prévia ao nomear os maciços rochosos de acordo com a consistência das litologias, já que, à medida que os maciços vão se tornando friáveis, as resistências vão diminuindo. A Tabela 18 mostra os resultados encontrados de GSI para os itabiritos da mina do Tamanduá.

Tabela 18 – Comparação entre os itabiritos da Mina do Tamanduá

Itabiritos Compactos	Itabiritos Médios	Itabiritos Friáveis	Itabiritos Friáveis
-----------------------------	--------------------------	----------------------------	----------------------------

Silicosos		Silicosos		Silicosos		Argilosos	
GSI		GSI		GSI		GSI	
Média	1° ao 3° quartil	Média	1° ao 3° quartil	Média	1° ao 3° quartil	Média	1° ao 3° quartil
46,60	43 - 48	40,70	40 - 42	37,10	37 - 38	33,90	31 - 38
ESTRUTURA							
“Muitos Blocos” ou “Com Blocos”		“Muitos Blocos” ou “Com Blocos”		“Muitos Blocos” ou “Com Blocos”		“Em Blocos”, “Muitos Blocos” ou “Com Blocos”	
CONDIÇÕES DA SUPERFÍCIE							
Regular ou Pobre		Boa ou Regular		Regular		Regular ou Pobre	

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.1.4 Hematitas

As hematitas estão situadas na porção central da mina, dispostas paralelamente ao eixo do Sinforme Tamanduá (NW-SE). São encontradas nas formas compactas, médias e friáveis, tendo como contaminantes principais a sílica, a limonita, a goethita e o manganês.

4.1.4.1 Hematitas Compactas (HC)

As hematitas compactas (HC) são de pouca ocorrência na Mina do Tamanduá, tendo somente alguns corpos lenticulares de espessura métrica posicionados na porção central da mina, apresentando direção NW-SE. Em geral, são dobrados e muito fraturados, tendo plano do bandamento marcado pela intercalação de bandas cinza escuras e claras. A Figura 19 mostra um talude da Mina do Tamanduá composto de HC.



Figura 19 – Talude em Hematita Compacta (HC). (VALE, 2008)

Para as HC, foram analisados um total de 58 pontos coletados ao longo da Mina do Tamanduá. Os maciços se encontravam moderadamente alterados (3), com consistência média dura (4) ou dura (5) e quase sempre intensamente fraturados (5), apresentando um RQD entre muito pobre (1) ou pobre (2). Além disso, foram observadas estruturas de acamamento (2) e fratura (6), apresentando aberturas praticamente fechadas (1) e rugosidades (RU) rugosa, lisa e irregular (2) e levemente rugosa, lisa e regular (3).

Na classificação RMR_{89} , foram encontrados valores entre 42 e 63 pontos, tendo uma média de 53 pontos, sendo, por isso, encontradas classes II e III na classificação. Essas informações podem ser visualizadas no Gráfico 37 a seguir.

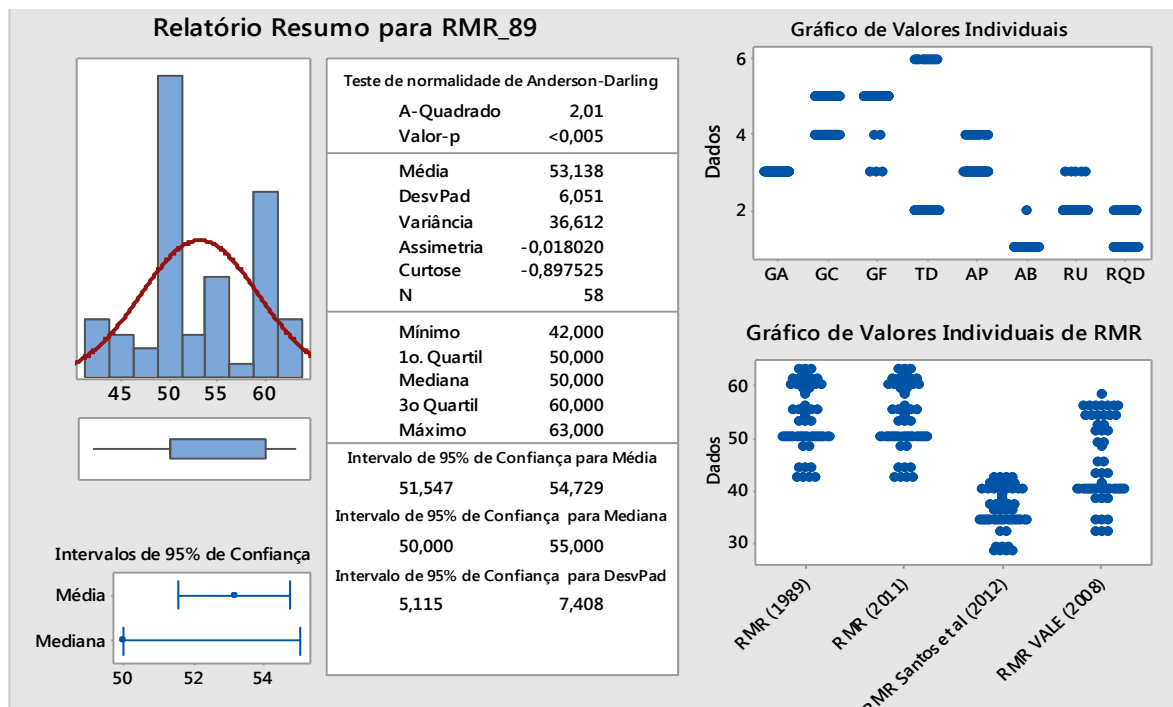


Gráfico 37 – Valores de RMR para as hematitas compactas

Ao analisar os resultados de RMR realizados segundo Santos *et al.* (2012), Bieniawski (2011) e Vale (2008) constatou-se novamente que, tanto Santos *et al.* (2012) como Vale (2008) esperam penalizações nos maciços rochosos constituídos de HC pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero. Enquanto a classificação original encontrou valores entre 42 e 63 e uma média de 53 pontos, a classificação ajustada por Santos *et al.* (2012) encontrou valores entre 28 e 42, com média de 36 pontos. Já as adaptações sugeridas por Vale (2008) encontraram valores intermediários entre a classificação RMR_{89} e os ajustes de Santos *et al.* (2012), tendo valores entre 32 e 58 e média de 45 pontos. Comparando os resultados encontrados entre Santos *et al.* (2012) e Vale (2008), verifica-se que Santos *et al.* (2012) foi mais conservador em seu

método, já que, sua penalização foi maior em 9 pontos quando comparado com Vale (2008), que já tinha penalizado a classificação original em 9 pontos também. Portanto, Santos *et al.* (2012) espera penalizações maiores que a classificação realizada pela Vale (2008). O histograma apresentado no Gráfico 38 a seguir mostra o resultado dos diferentes ajustes propostos para o RMR.

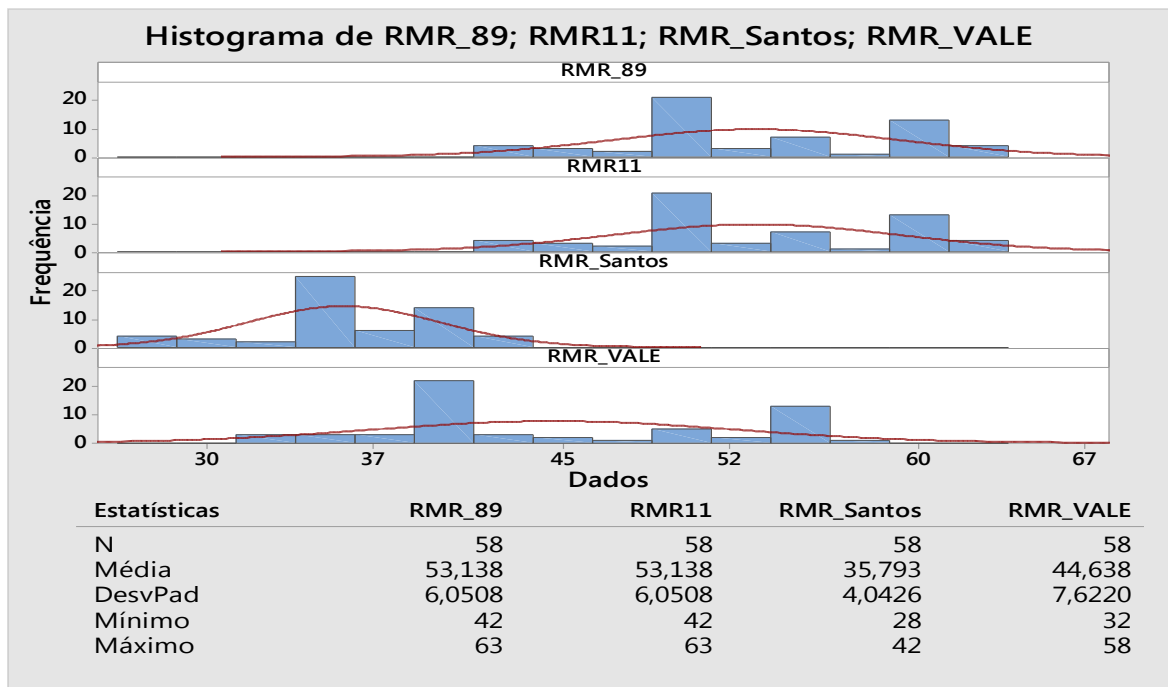


Gráfico 38 – Histograma para os diferentes ajustes de RMR para as HC

No Gráfico 39 é apresentando a frequência encontrada para cada classe de acordo com os ajustes adotados na classificação RMR.

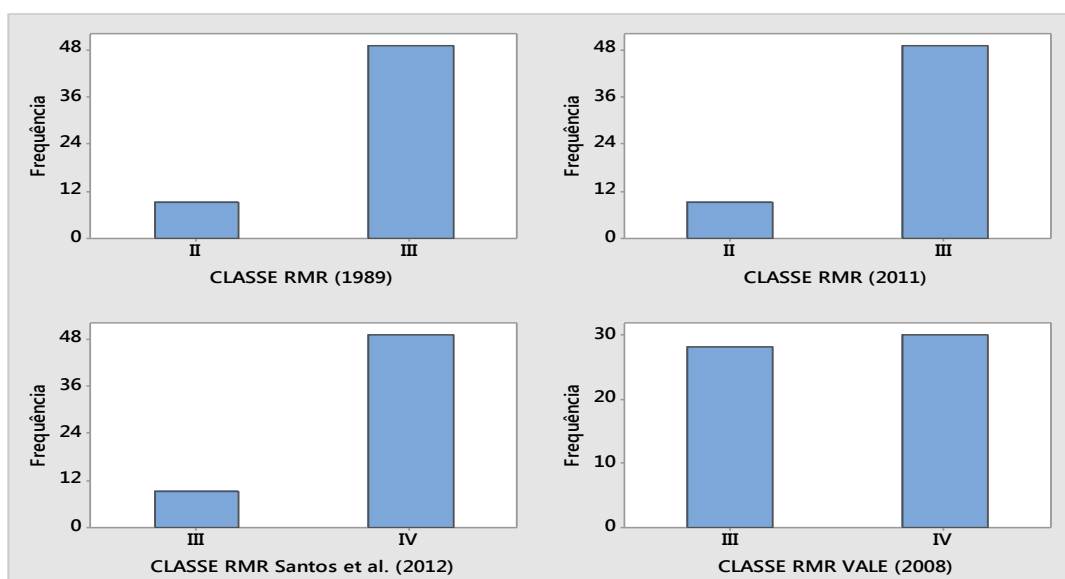


Gráfico 39 – Classes dos diferentes ajustes de RMR para as HC

No RMR_{89} , os pontos foram classificados como classe II e III, tendo uma representação maior para a classe III. Para os ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008), os maciços foram classificados como classe III e IV, tendo, para Santos *et al.* (2012) predominância maior a classe IV. Portanto, para as metodologias sugeridas por ambos os autores é de comum consenso que a classificação RMR vem atribuindo resultados não esperados para os maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero. Enquanto os fatores de correção de Santos *et al.* (2012) mostraram grandes penalizações na classificação, o ajuste realizado pela Vale (2008) encontrou um desvio padrão elevado. Por isso, recomenda-se realizar verificações entre os resultados encontrados pelos métodos em busca de verificar a veracidade dos resultados alcançados.

Para o GSI, a classificação encontrou valores entre 37 e 58, tendo uma média de 48 e uma mediana de 45. Considerando os valores entre o 1º e o 3º quartil do histograma, são encontrados intervalos entre 45 e 55. As condições de superfícies esperadas são desde muito boa até pobre, porém, a superfície com maior predominância é boa. Para as estruturas, foram encontradas todas as regiões, contudo, a grande maioria encontrou estruturas em “muitos blocos” ou “com blocos”. Os dados mencionados podem ser visualizados no Gráfico 40 a seguir.

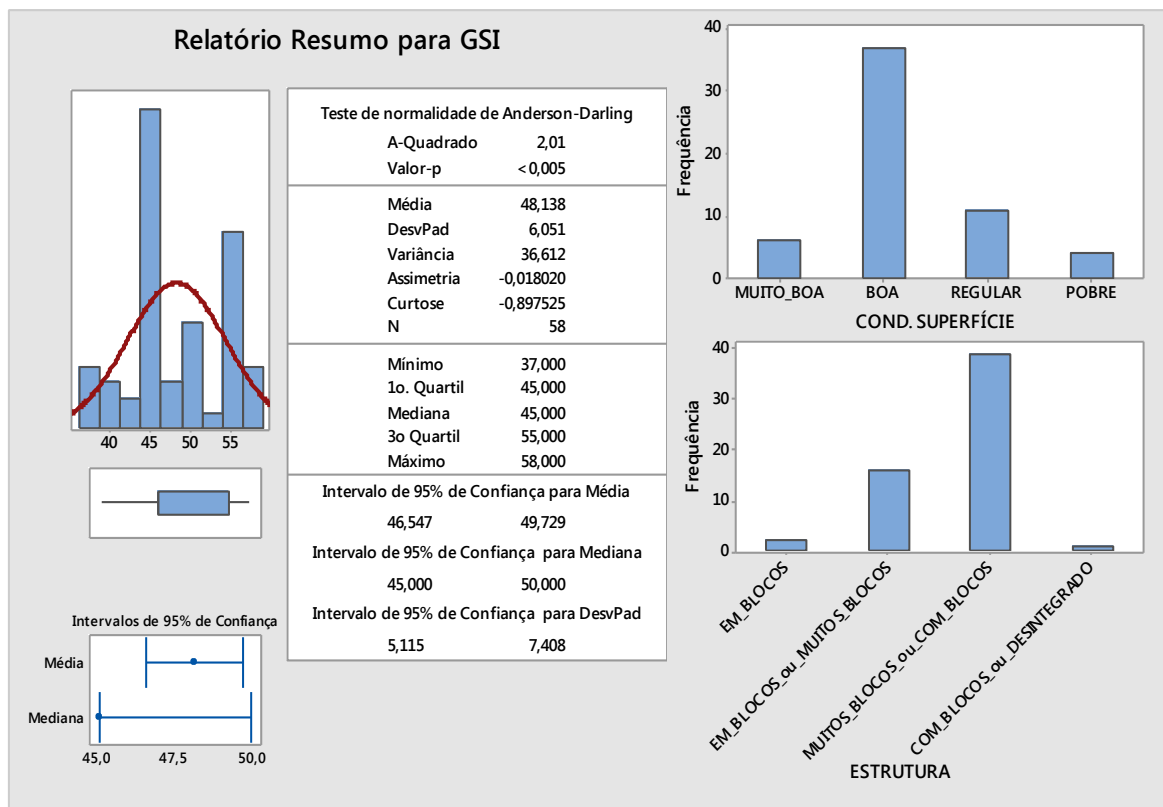


Gráfico 40 – Classes dos diferentes ajustes de RMR para as HC

As estimativas apresentadas no Gráfico 40 possibilitaram inserir no gráfico de Hoek *et al.*(2013) (Gráfico 41) os valores encontrados.

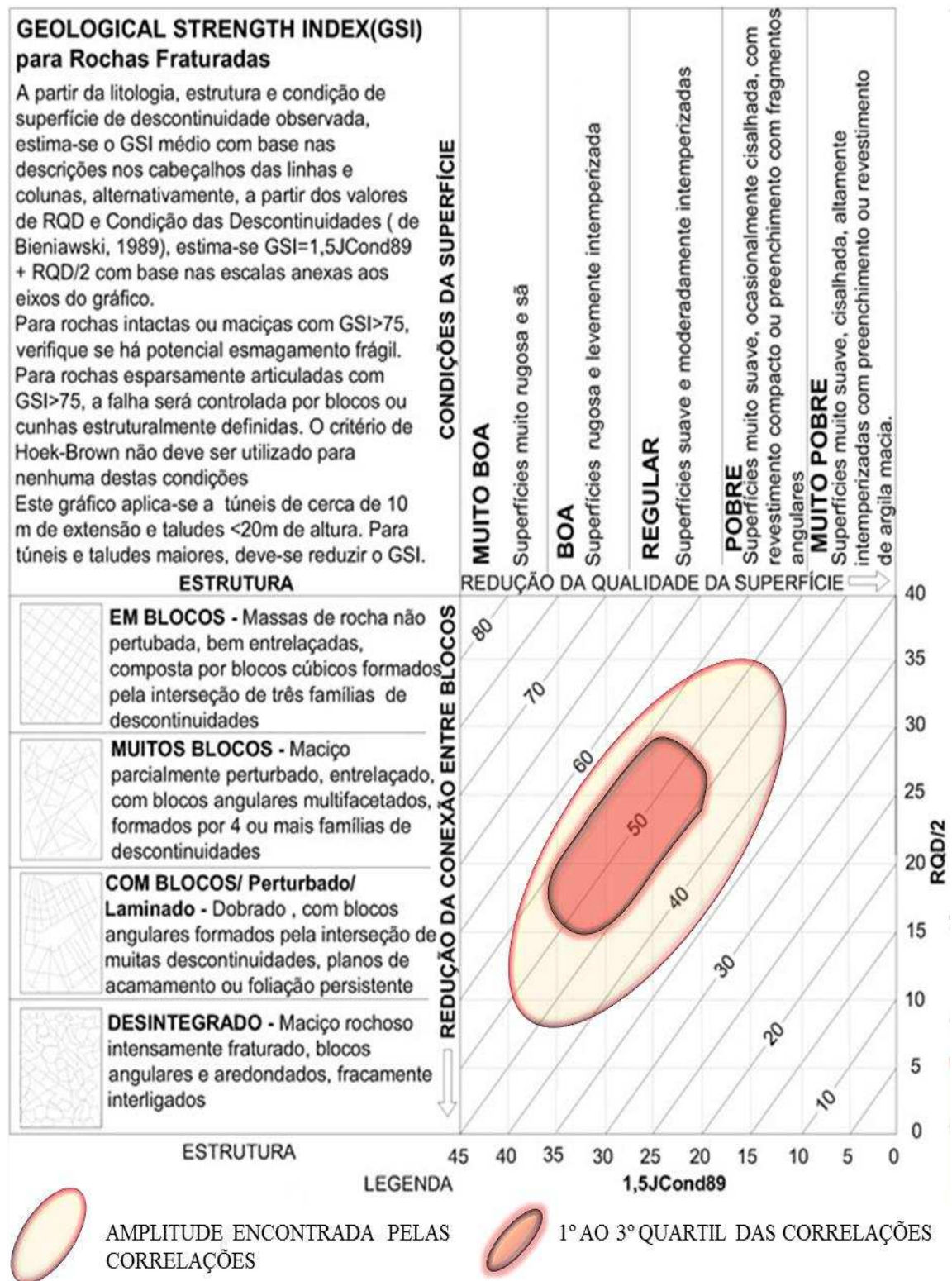


Gráfico 41 – Região esperada para o GSI nas hematitas compactas (HC) (Adaptado e traduzido de HOEK *et al.*,2013)

4.1.4.2 Hematitas Médias (HM)

As hematitas médias (HM) são encontradas principalmente na porção norte da mina do Tamanduá, associada a corpos menores de hematita friável e compacta. Apresentam-se, em geral, muito fraturadas, de espaçamento centimétricas a milimétricas, controladas pelas clivagens e o bandamento. A Figura 20 mostra uma hematita média, com foliação e clivagem, da mina do Tamanduá.



Figura 20 – Hematita média (HM) com foliação e clivagem (VALE, 2008)

Na caracterização, foram analisados 108 estações geológico-geotécnicas ao longo da mina do Tamanduá. Em geral, Os maciços se encontravam entre moderadamente alterados (3) e altamente alterados (4), com consistência média macia (2) ou média (3), sempre apresentando maciços intensamente fraturados (5) e RQD muito pobre (1).

Além disso, foram observadas xistosidades (5), apresentando aberturas praticamente fechadas (1) e rugosidades (RU) rugosa, lisa e irregular (2) e levemente rugosa, lisa e regular (3).

Na classificação RMR_{89} , foram encontrados valores entre 37 e 47, tendo média de 44 pontos. Essas informações podem ser visualizadas no Gráfico 42 a seguir.

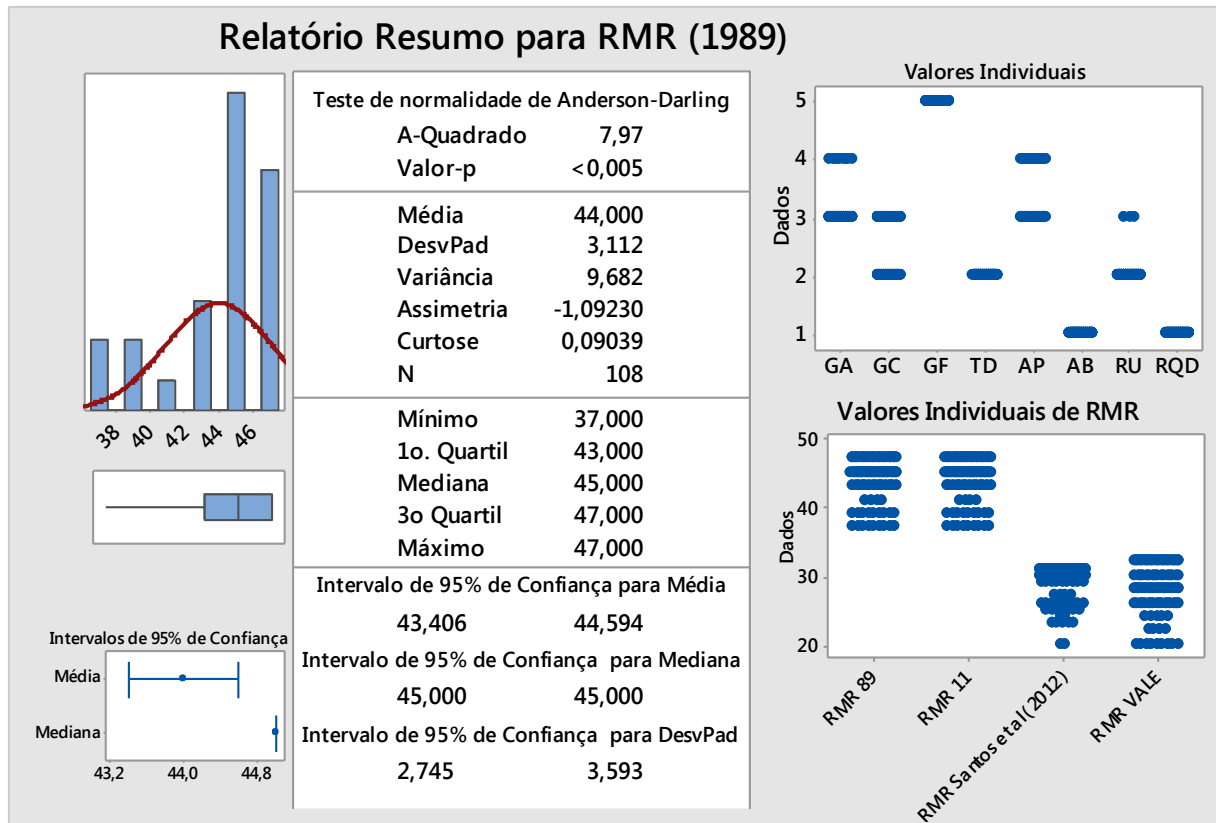


Gráfico 42 – Valores de RMR para as Hematitas Médias (HM)

Ao se analisar os resultados segundo Santos *et al.* (2012) e Vale (2008) constatou-se que, tanto a metodologia proposta por Santos *et al.* (2012) como pela Vale (2008) resultam em penalizações nos maciços rochosos constituídos de HM pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero. Enquanto a classificação original encontrou valores entre 37 e 47, tendo média de 44 pontos, a classificação ajustada por Santos *et al.* (2012) encontrou valores entre 20 e 31, com média de 29 pontos. Para as adaptações sugeridas pela Vale (2008) foram encontrados valores entre 20 e 32, tendo média de 28 pontos. A semelhança entre os resultados encontrados por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008) mostram as expectativas de encontrar, por diferentes autores e diferentes métodos, resultados mais realistas para os maciços rochosos pertencentes às regiões de clima tropical.

Além disso, vale ressaltar que, a aplicação dos ajustes nas HM penalizaram, em média, 15 pontos em relação à classificação original, a mesma atribuída para os IM. Com relação às considerações de Bieniawski (2011), os ajustes não foram considerados, já que os maciços não são considerados de baixa qualidade. A diferença entre os resultados de RMR podem ser visualizados no Gráfico 43 a seguir.

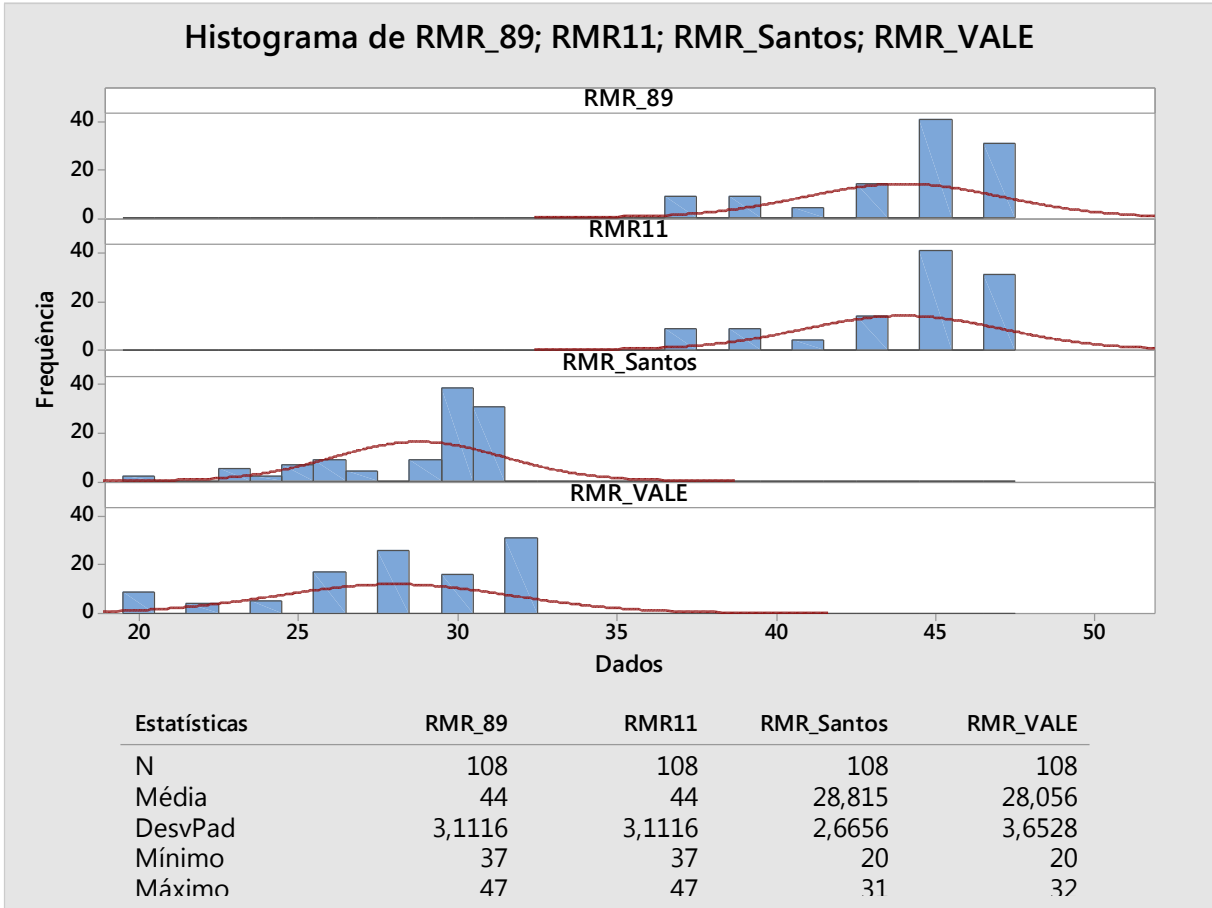


Gráfico 43 – Valores de RMR para os diferentes ajustes - Hematitas Médias (HM)

No Gráfico 44 é mostrada a frequência encontrada para cada classe de acordo com os ajustes adotados na classificação RMR.

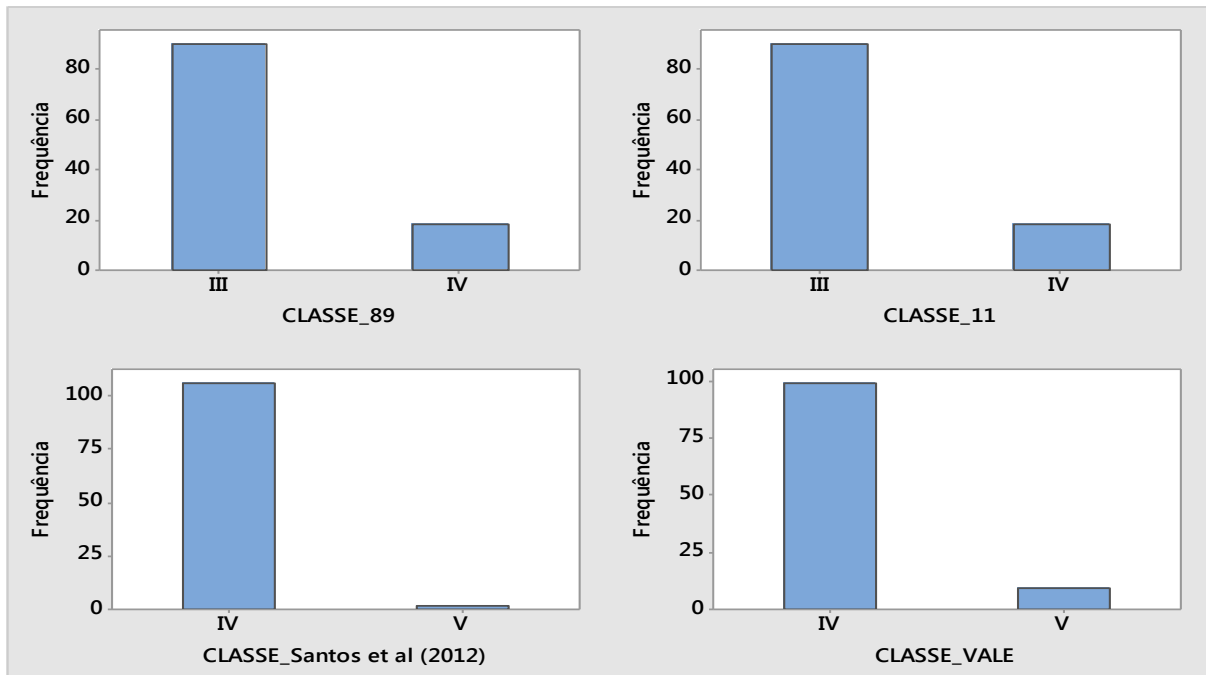


Gráfico 44 – Classes de RMR para os diferentes ajustes - Hematitas Médias (HM)

No RMR_{89} , os pontos foram classificados como classe III e IV, tendo uma representação maior para a classe III. Para os ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008), os maciços foram classificados como classe IV e V, tendo predominância a classe IV. Portanto, novamente são verificados que a classificação RMR vem atribuindo resultados não esperados para os maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero, sendo, por isso, necessária a atribuição de novos parâmetros na classificação.

Para o GSI, a classificação encontrou valores entre 32 e 42, tendo uma média de 39 e uma mediana de 40. Considerando os valores entre o 1º e o 3º quartil do histograma, são encontrados intervalos entre 38 e 42. Para as condições das superfícies são esperados superfícies desde boa até pobre, tendo predominância a superfície boa. Para as estruturas, foram encontradas as regiões “em bloco”, “muitos blocos” e “com bloco” (predominante). Os dados mencionados podem ser visualizados no Gráfico 45 abaixo.

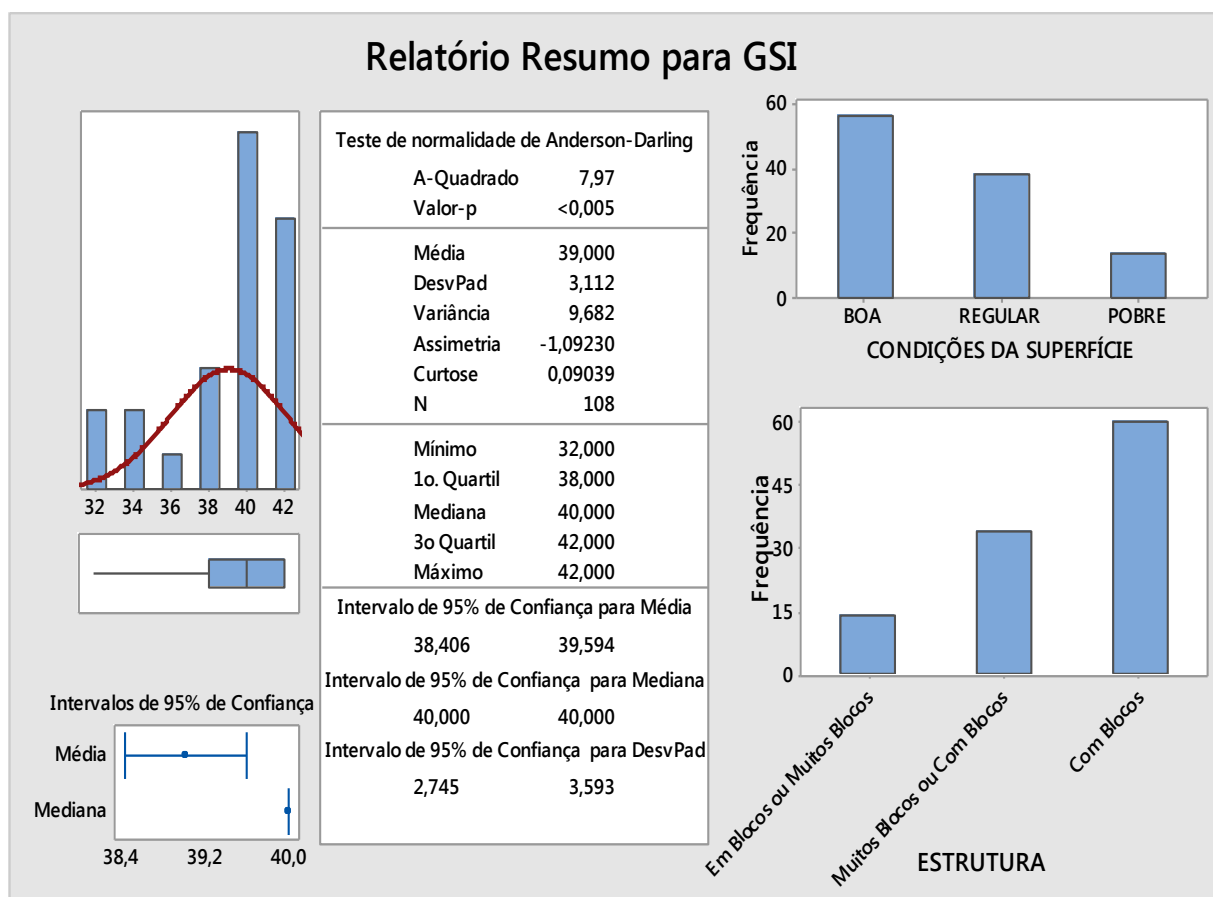


Gráfico 45 – Estimativa de GSI para os diferentes ajustes - Hematitas Médias (HM)

O Gráfico 46 ilustra as regiões esperadas de GSI para as hematitas médias do Quadrilátero Ferrífero.

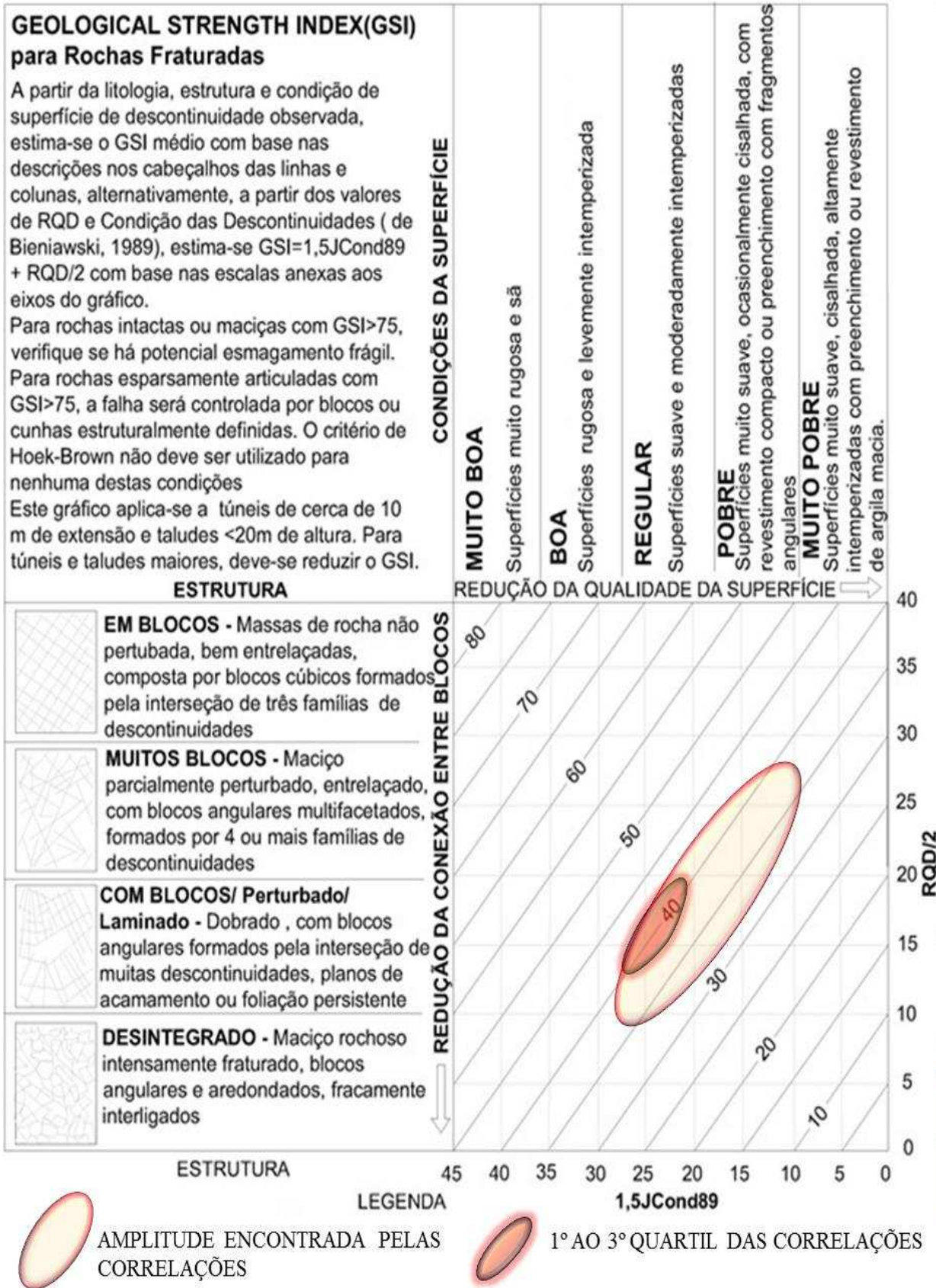


Gráfico 46 – Região prevista de GSI para as Hematita média (HM) da mina do Tamandú (Adaptado e traduzido de HOEK *et al.*,2013)

4.1.4.3 Hematitas Friáveis (HF)

As hematitas friáveis (HF) estão localizadas na porção central da mina, com direção NW-SE. Suas características mostram intercalações de bandas milimétricas cinza claras e escuras, friáveis a pulverulentas e, em geral, muito dobradas. A Figura 21 mostra um talude de hematita friável pertencente a Minas do Tamanduá.



Figura 21 - Hematita Friável – HF (VALE, 2008)

Em 125 estações geológico-geotécnicas de HF ao longo da mina do Tamanduá, foram observados maciços moderadamente alterados (3) e altamente alterados (4), com consistência entre média macia (2), macia (1) e extremamente macio (0), além de apresentarem intensamente fraturado (5) e RQD muito pobre (1). As xistosidades, de abertura praticamente fechada, apresentavam superfície rugosa, lisa e irregular (2).

Na classificação RMR_{89} , foram encontrados valores entre 36 e 45 pontos, tendo média e mediana de 42 e 44, respectivamente. O Gráfico 47 ilustra os resultados encontrados na caracterização e classificação das hematitas friáveis.

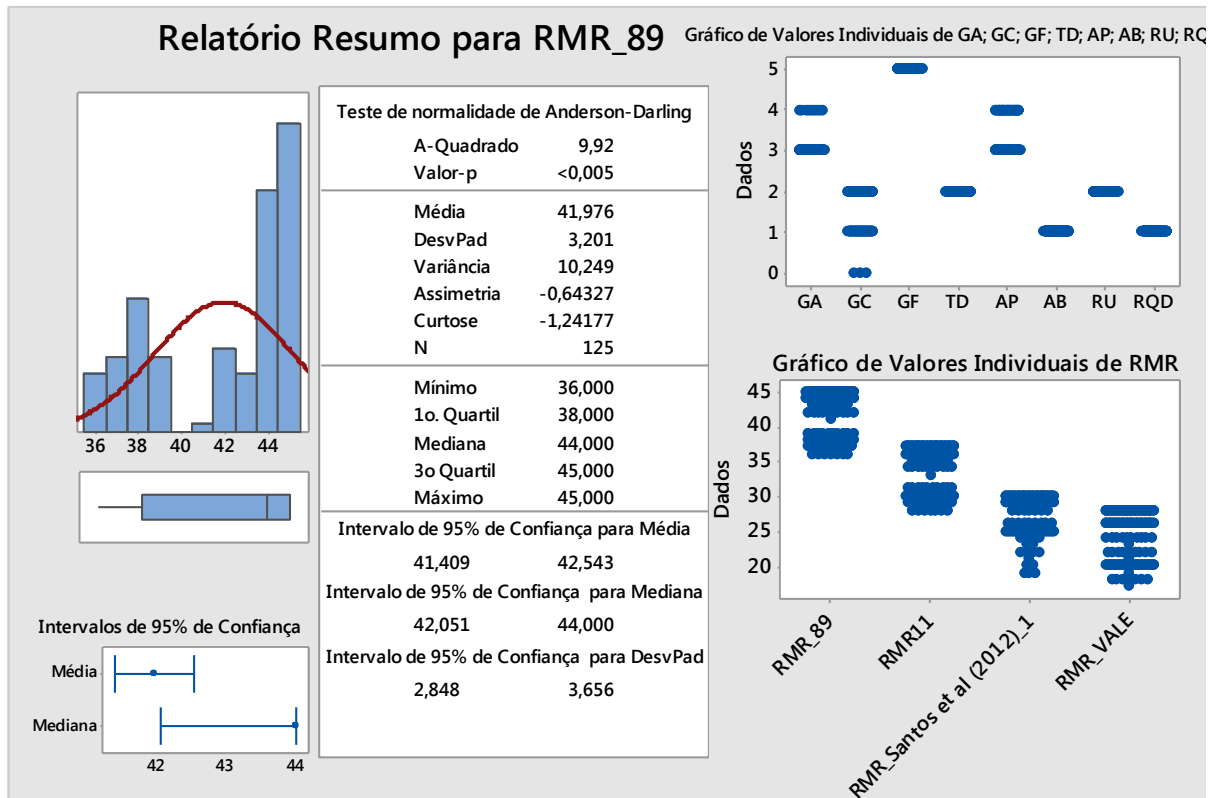


Gráfico 47 – Resumo da caracterização e classificação RMR - Hematitas Friáveis (HF)

Ao realizar os ajustes na classificação RMR, ficou constatado a diferença entre os resultados. No RMR_{89} , foram encontrados valores entre 36 e 45, tendo uma média de 42 pontos. Quando o RMR passa a ser calculado considerando os pesos como sendo médios (Bieniawski, 2011), a classificação sofre uma penalização de 8 pontos, encontrando valores entre 28 e 37 e média de 34 pontos.

Os resultados encontrados por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008) mostram a expectativa dos autores em encontrar valores de RMR menores para as regiões de clima tropical, mesmo quando aplicados os pesos de RMR como sendo médios. Mesmo com a explicação dada por Bieniawski (2011), Santos *et al.* (2012) resulta em resultados inferiores, encontrando valores entre 19 e 30 pontos e média de 27 pontos. Este resultado apresenta uma diferença de 15 pontos em relação à classificação original e 7 pontos quando comparado com às modificações feitas por Bieniawski (2011). Com relação aos valores encontrados por Vale (2008), a classificação ficou mais próxima dos números encontrados por Santos *et al.* (2012), divergindo, da média, em apenas 3 pontos. Como a metodologia da Vale (2008) resultou em valores entre 17 e 28 e média de 24 pontos, os ajustes penalizaram aproximadamente 22 pontos na classificação RMR_{89} e 10 pontos classificação RMR_{11} . No Gráfico 48 são apresentados os histogramas para as classes de acordo com os ajustes.

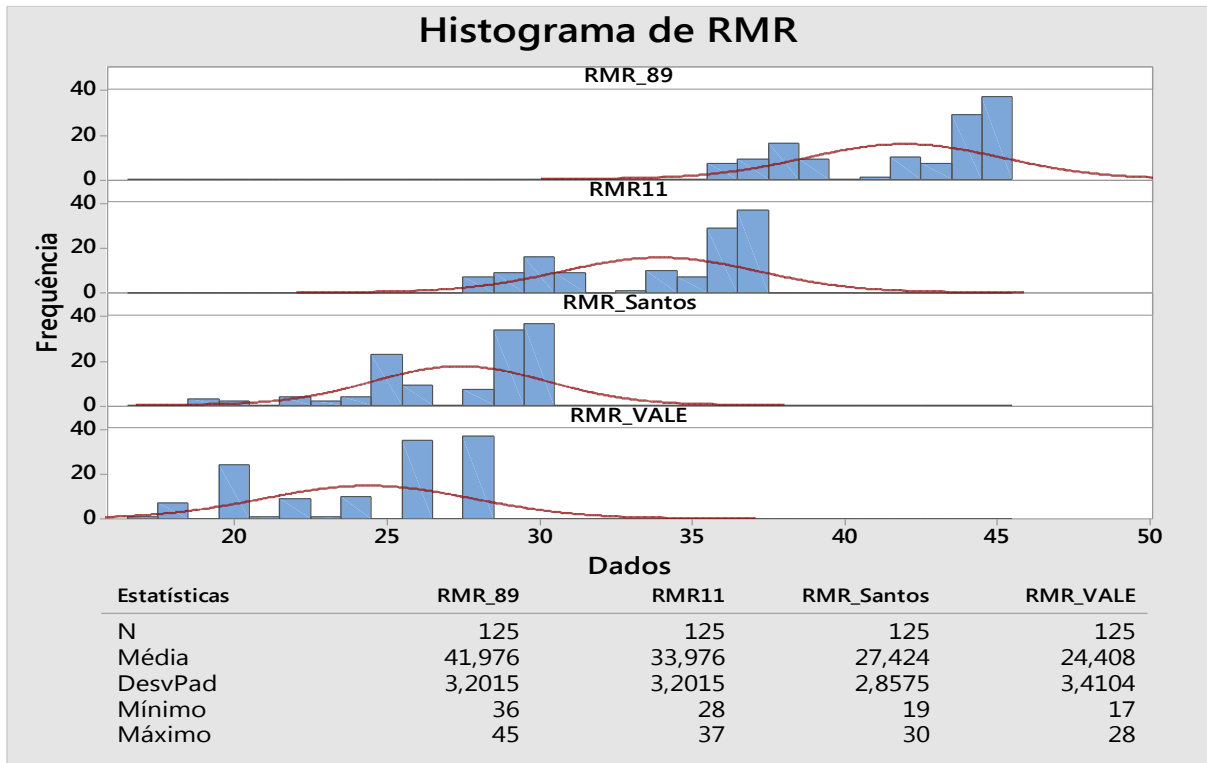


Gráfico 48 – Histograma dos ajustes na classificação RMR – Hematitas Friáveis (HF)

Com isso, no RMR_{89} , os pontos foram classificados como classe III e IV, tendo uma representação maior para a classe III. Se considerado os pesos como sendo médios, o RMR passa a classificar as HF como classe IV. Para os ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008), os maciços foram classificados como classe IV e V, tendo predominância a classe IV. O Gráfico 49 mostra as classes encontradas para os diferentes ajustes.

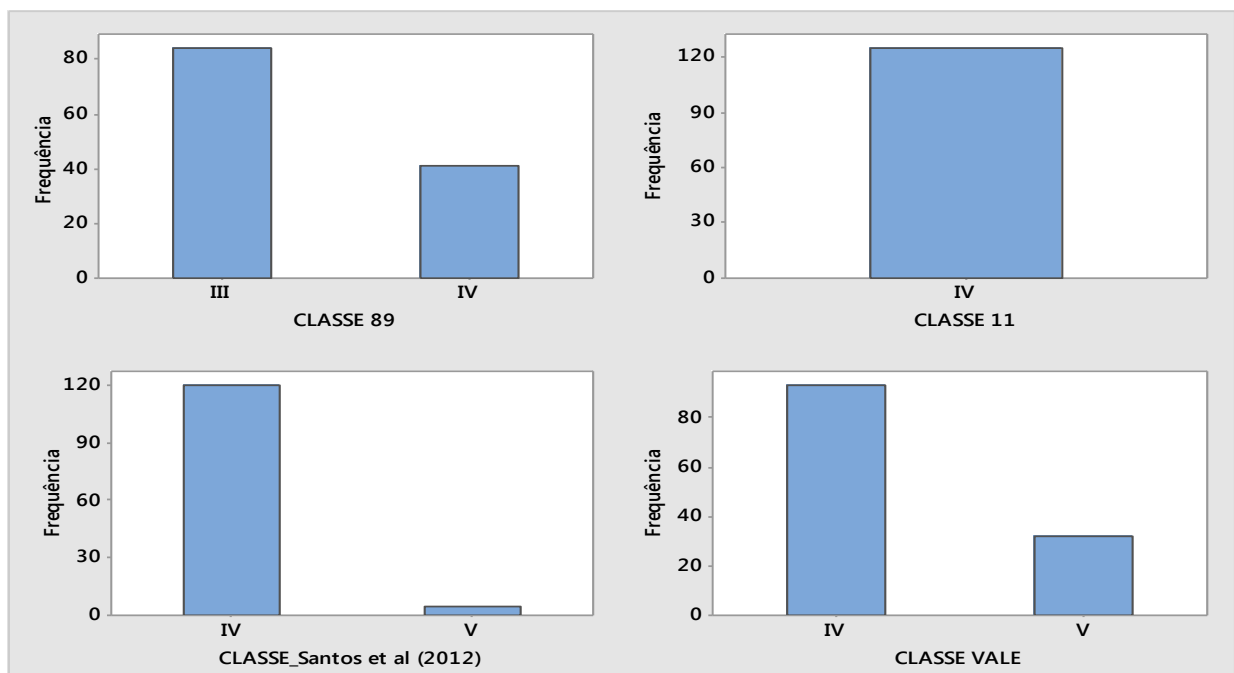


Gráfico 49 – Classes de RMR para os diferentes ajustes - Hematitas Médias (HF)

Para o GSI, a classificação resultou em valores entre 31 e 40, tendo uma média de 37 e uma mediana de 39. Considerando os valores entre o 1º e o 3º quartil do histograma, são encontrados intervalos entre 33 e 40. As condições das superfícies estavam entre boa (Predominante), regular e pobre. Além disso, os maciços podiam estar “em blocos”, com “muitos blocos” ou “com blocos”, sendo mais encontrados maciços “com blocos”. Os dados mencionados podem ser visualizados no Gráfico 50 a seguir.

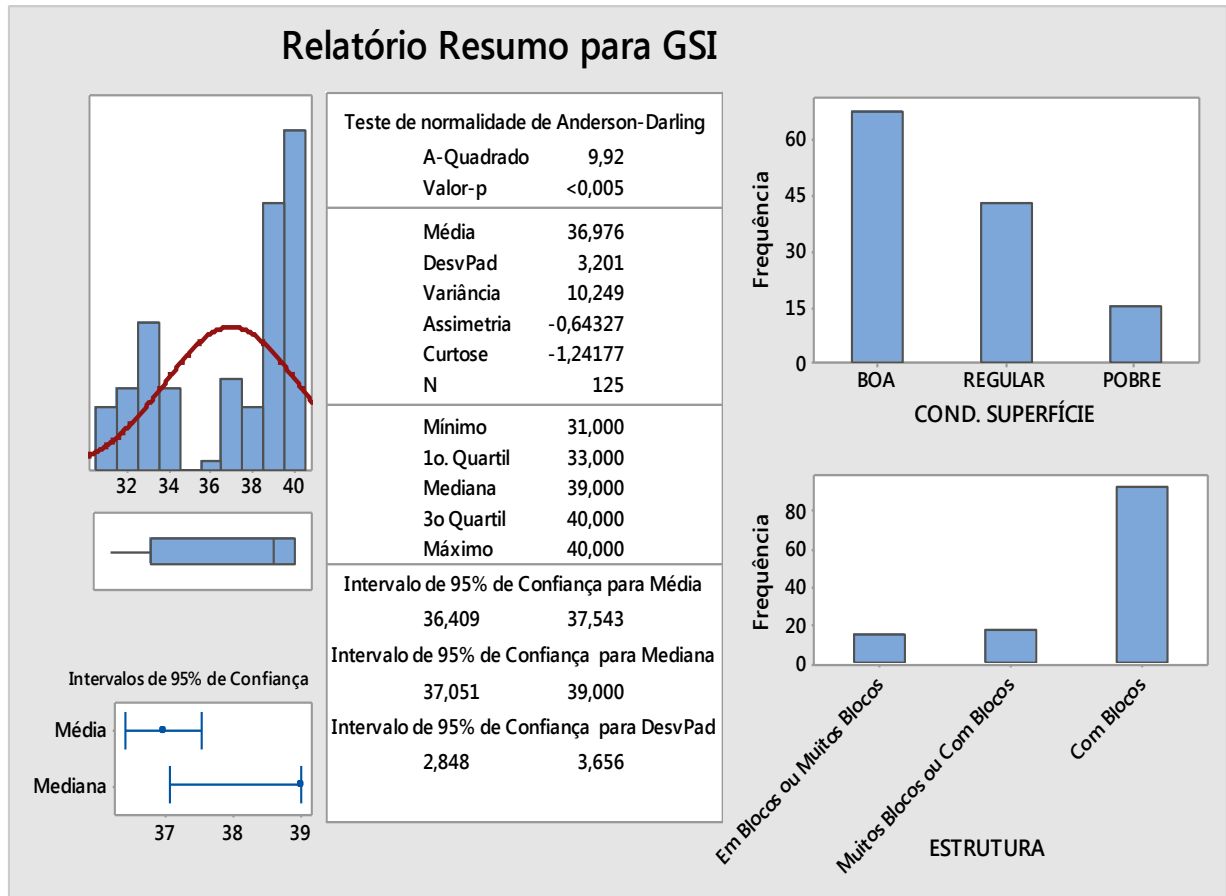


Gráfico 50 – Valores de GSI para as hematitas friáveis - HF.

O Gráfico 51 a seguir mostra as regiões encontradas para as hematitas friáveis no gráfico de Hoek *et al.* (2013). Considerando os resultados estatísticos, a região com maior probabilidade de encontrar hematitas friáveis no gráfico de Hoek *et al.* (2013), são as regiões entre 33 e 40 pontos, que estão situadas entre boa e regular, para as condições das superfícies; e “com blocos” para as estruturas.

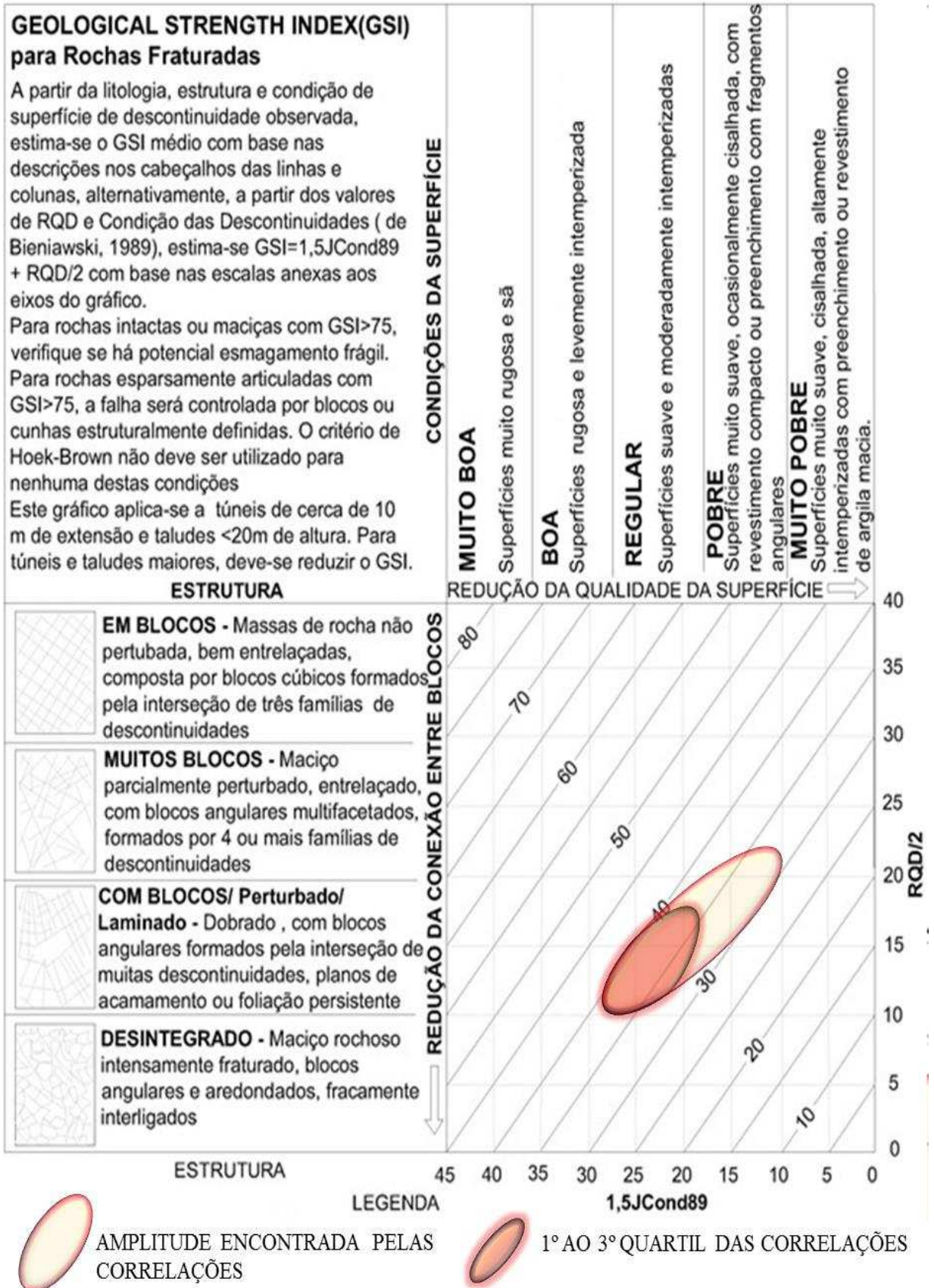


Gráfico 51 – Região prevista de GSI para as Hematitas friáveis (HF) da mina do Tamanduá. (Adaptado e traduzido de HOEK *et al.*,2013)

4.1.5 Básicas Intrusivas (BI)

As básicas intrusivas (BI) da mina do Tamanduá afloram na mina por meio de três corpos de rocha de espessura média de 60 metros, com direção NE-SW e caimento para SE, dispostos de forma discordante das formações ferríferas. Dois corpos afloram na porção centro-norte da mina e um na porção sul, de direção ENE-WSW. Quando alteradas apresentam coloração rosada ou amarela e, quando pouco alteradas são geralmente de coloração verde escura. Em geral, sofrem maiores alterações nas bordas, junto aos contatos com as encaixantes, formando núcleos rochosos pouco alterados ou sãos. Na Figura 22 ilustra-se as rochas Básicas Intrusivas (BI) pouco alteradas.



Figura 22– Talude composto de básicas intrusivas (VALE, 2008)

No levantamento dos maciços foram caracterizadas um total de 24 estações geológico-geotécnicas de BI ao longo da mina do Tamanduá. Em geral, os maciços se encontravam levemente alterados (3) ou moderadamente alterados (4), com consistência média (3) ou média dura (4). O Grau de faturamento estava entre moderadamente fraturado (3) e muito fraturado (4) e o RQD encontrado foi desde regular (3) até muito pobre (1). Com relação às discontinuidades, foram encontradas fraturas (6), abertura pequena (2) ou fechada (1) e superfície rugosa, lisa e irregular (2) ou levemente rugosa, lisa e regular (3).

Na classificação RMR_{89} , foram encontrados valores entre 51 e 66, tendo média de 57 pontos. O Gráfico 52 ilustra os resultados encontrados na caracterização e classificação das BI.

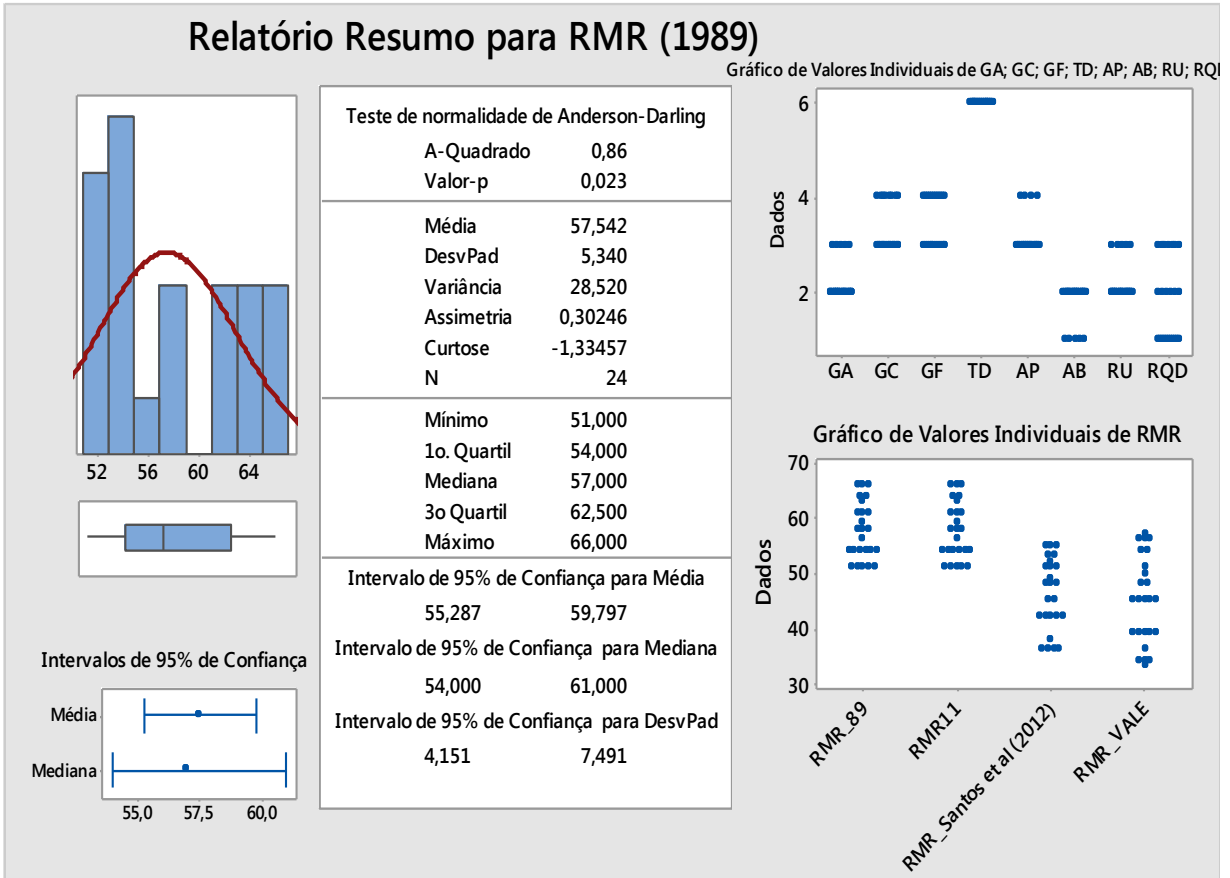


Gráfico 52 – Valores de RMR para as básicas intrusivas.

No Gráfico 53 são apresentados os histogramas para as classes de acordo com os ajustes.

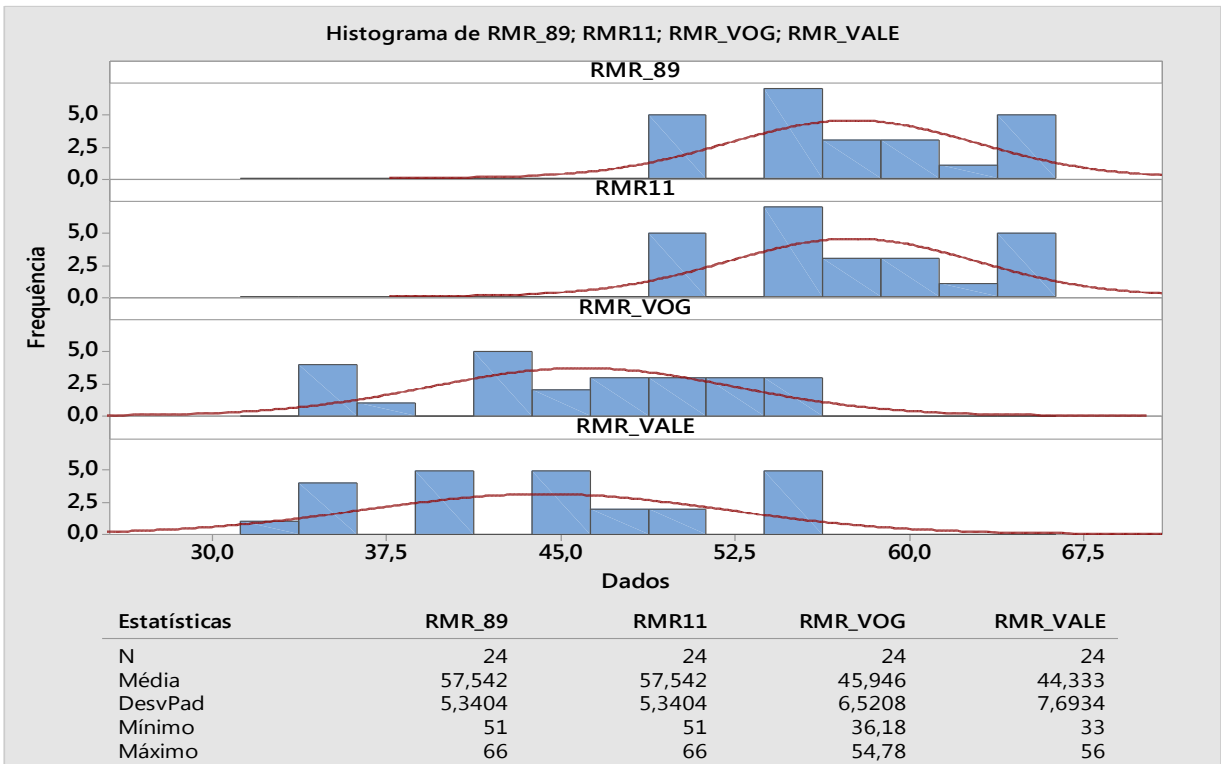


Gráfico 53 – Histograma dos ajustes na classificação RMR – BI

Os histogramas apresentados no Gráfico 53 mostram que, tanto para a proposta de Santos *et al.* (2012) como para a da Vale (2008) esperam-se penalizações na classificação RMR para os maciços rochosos constituídos de básicas intrusivas e localizados no Quadrilátero Ferrífero. Enquanto o RMR_{89} encontrou valores entre 51 e 66, com média de 42 pontos, a classificação ajustada por Santos *et al.* (2012) resulta em valores entre 36 e 55. Já os ajustes da Vale (2008) levaram a encontrar valores entre 33 e 56 pontos, ou seja, valores próximos aos esperados por Santos *et al.* (2012).

Com relação à frequência encontrada para cada classe, no RMR_{89} , os maciços foram classificados como classe II e III, tendo uma representação maior para a classe III. Quando realizado os ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008), os maciços encontraram classes III e IV, tendo predominância a classe III. Estes resultados podem ser visualizados no Gráfico 54 a seguir.

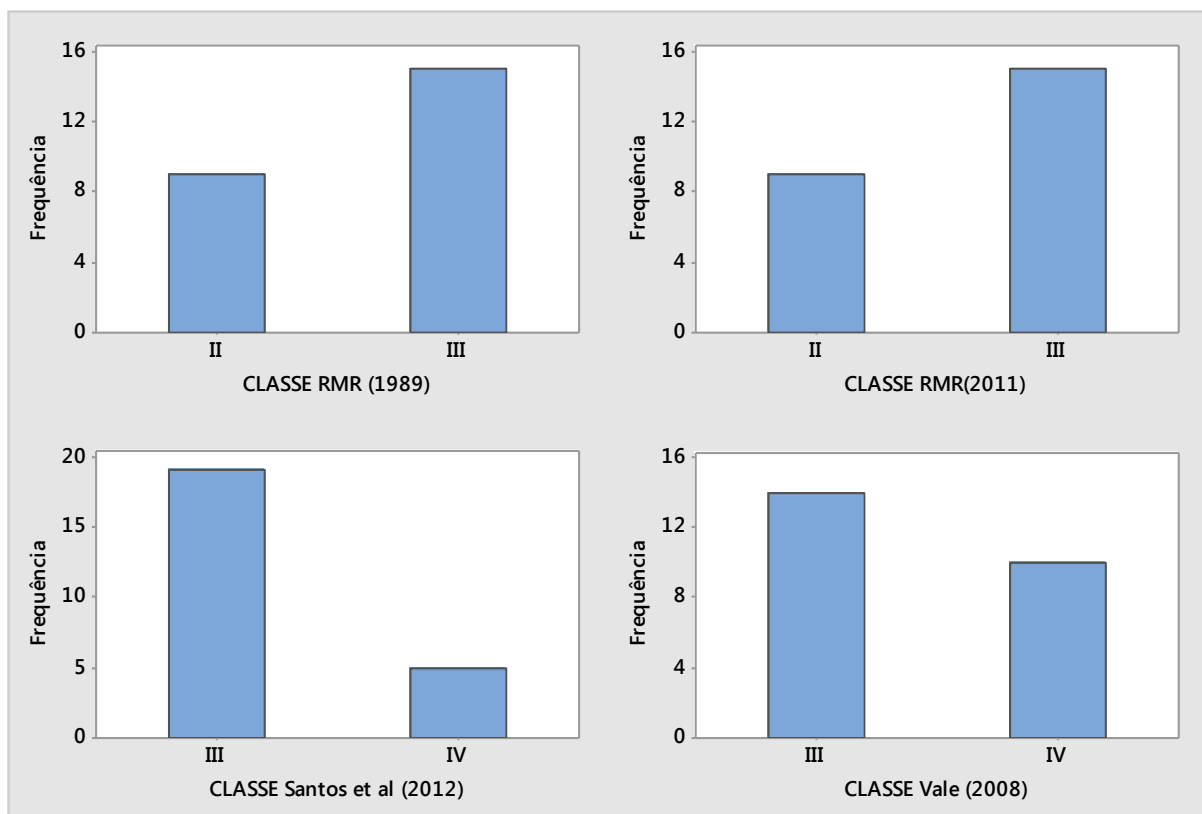


Gráfico 54 – Classes de RMR para os diferentes ajustes – Básicas Intrusivas (BI)

Para o GSI, foram encontrados valores entre 46 e 61, tendo uma média e mediana de 52. Considerando os valores entre o 1º e o 3º quartil do histograma, são encontrados intervalos entre 49 e 57. As condições da superfície estavam entre boa, regular (predominante) e pobre. Com relação às estruturas, os maciços apresentavam-se bastantes heterogêneos, sendo mais

encontrados maciços com “muitos blocos” e “com blocos”. Os dados mencionados podem ser visualizados no Gráfico 55.

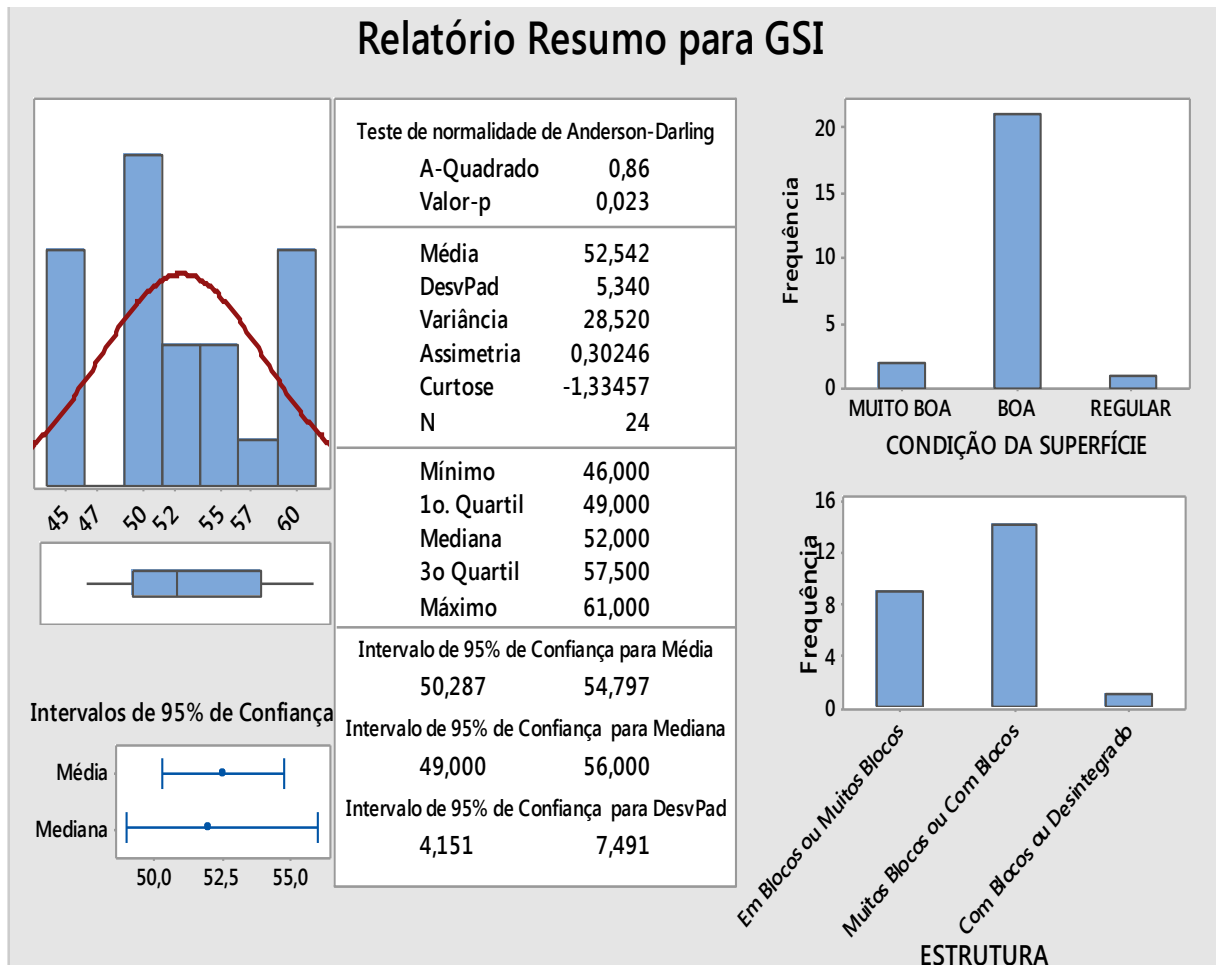


Gráfico 55 – Classificação GSI das básicas intrusivas

Ao determinar a condição da superfície, a estrutura e o valor de GSI das básicas intrusivas, as regiões no gráfico de GSI foram introduzidas conforme o Gráfico 56.

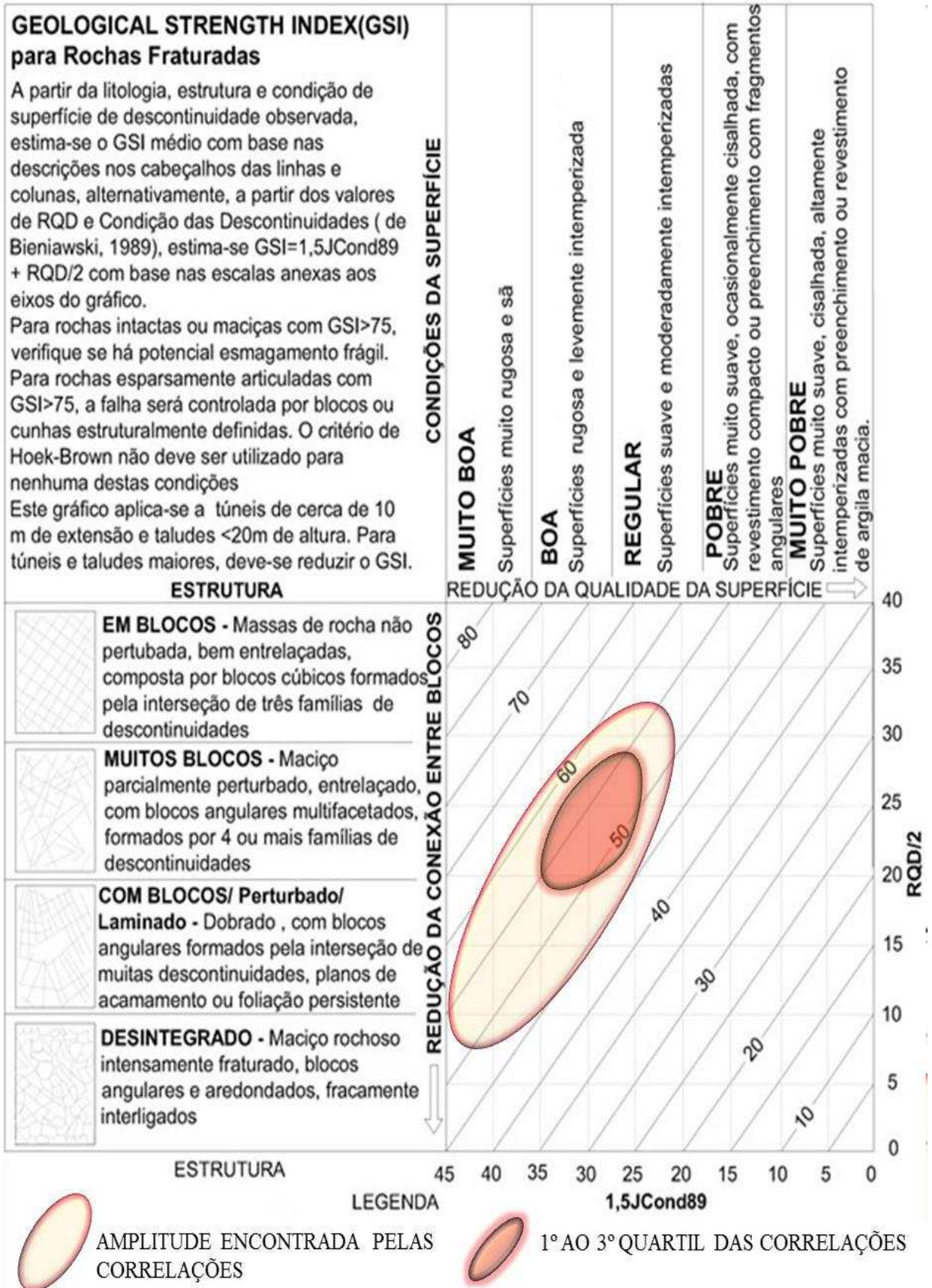


Gráfico 56 – Região prevista de GSI para as básicas intrusivas (BI) da mina do Tamanduá. (Adaptado e traduzido de HOEK *et al.*,2013)

Os resultados encontrados pelo GSI mostram que as BI da mina do Tamanduá apresentam, na maioria das vezes, superfícies levemente rugosa e levemente intemperizada, ou seja, uma condição boa. As estruturas dos maciços apresentam-se parcialmente perturbadas, entrelaçadas, com blocos angulares multifacetados e formadas por quatro ou mais famílias de descontinuidades.

4.1.6 Básicas Intrusivas Saproilitizadas (BIS)

Quando as básicas intrusivas apresentam-se saproilitizadas, a classificação RMR_{89} resultou em valores entre 40 e 64 pontos, tendo uma média de 47 e uma mediana de 45 pontos. Os maciços geralmente estavam moderadamente (3) ou altamente alterados (4) com consistência macia (1), média macia (2) ou média (3). Para o grau de fraturamento foram encontrados diversas particularidades, encontrando maciços desde pouco fraturados (2) até intensamente fraturados (5). Além disso, eram visíveis fraturas e foliações que apresentavam aberturas fechadas (1) ou pequenas (2) e rugosidade rugosa, lisa e irregular (2) ou levemente rugosa, lisa e regular (3). O gráfico 57 mostra um resumo dos resultados encontrados para as características dos maciços e para os resultados de RMR_{89} .

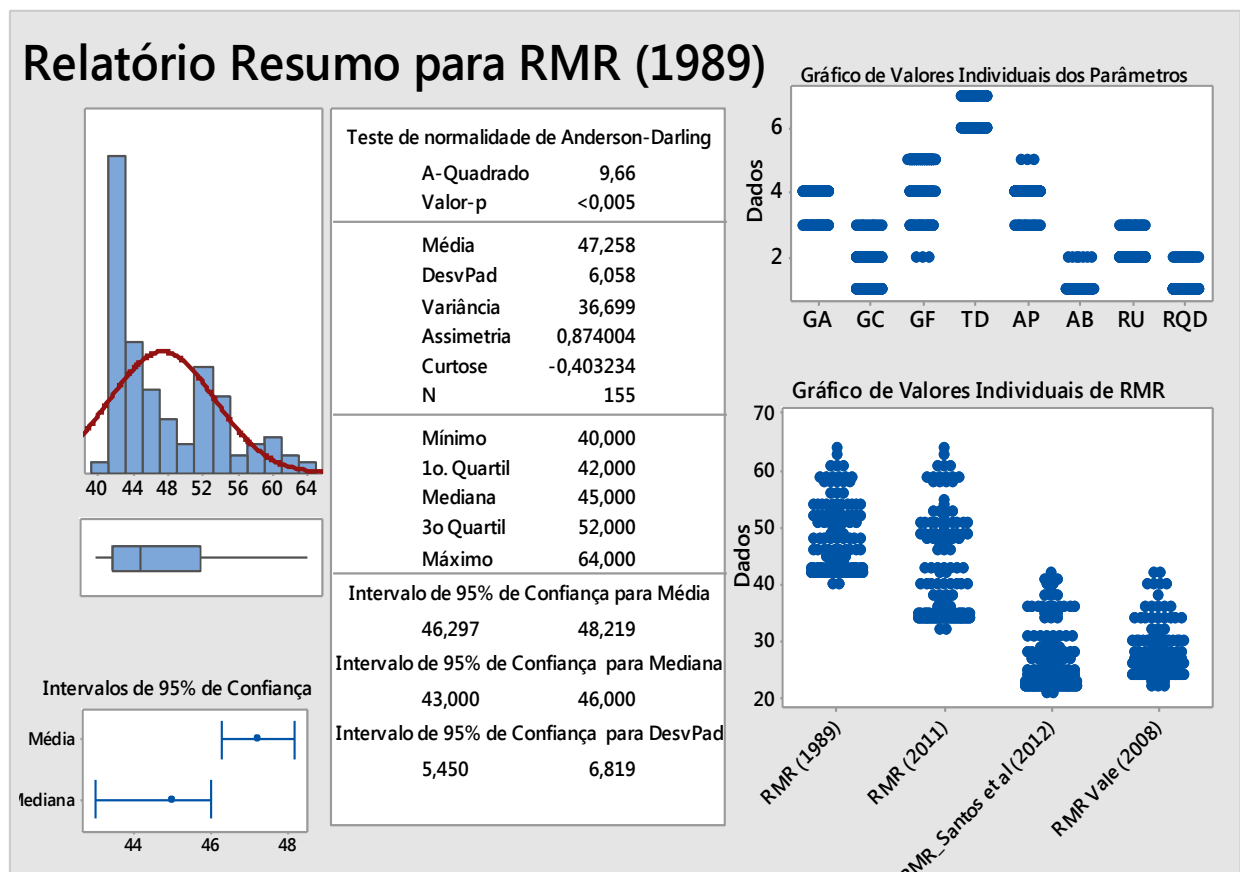


Gráfico 57 – Caracterização e classificação RMR das básicas intrusivas saproilitizadas

Ao realizar os ajustes na classificação RMR, tanto pela metodologia de Santos *et al.* (2012) quanto pela da Vale (2008) encontraram-se valores entre 21 e 42 pontos. Enquanto a Vale (2008) resultou numa média de 27 pontos, Santos *et al.* (2012) resultou em uma média de 26 pontos. Para o RMR (2011) foi encontrado uma média de 41 pontos. Comparando-se as médias previstas pelos ajustes de Santos *et al.* (2012) e Vale (2008) com a classificação original constata-se uma diferença de aproximadamente 20 pontos em relação às médias encontradas. Para a classificação RMR (2011), que considera os pesos como médios, foi encontrado uma diferença de aproximadamente 6 pontos a menos que a classificação original. Nos histogramas apresentados no Gráfico 58 fica perceptível a diferença esperada pelos autores quando comparado com os resultados da classificação original.

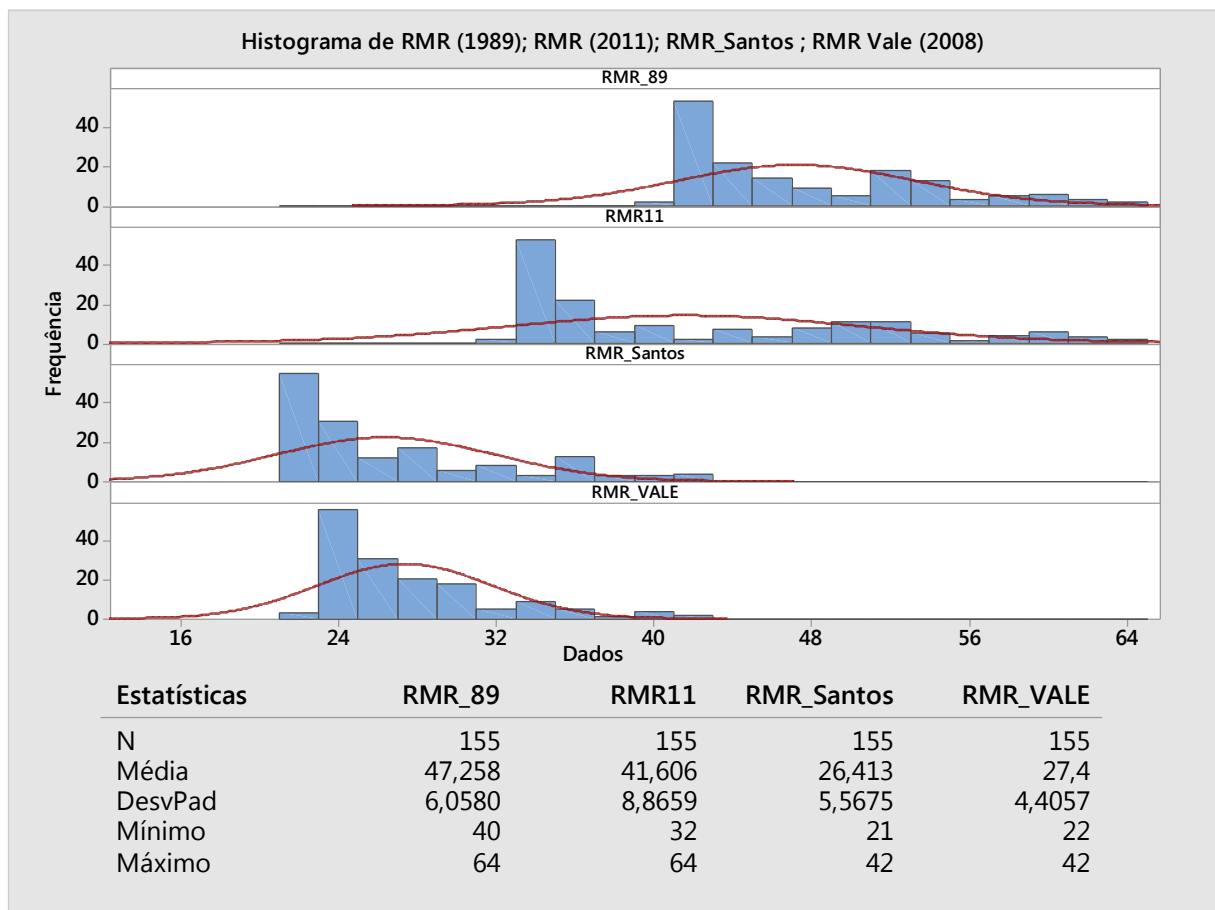


Gráfico 58 – Histograma dos ajustes na classificação RMR – BIS.

Nota-se que o RMR_{89} vem atribuindo também pontuações elevadas para as básicas intrusivas saprolitizadas pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero. Enquanto o RMR_{89} resulta em maciços classificados como classe III e, classe III e IV se considerado os pesos como sendo médios (RMR 2011), Santos *et al.* (2012) e Vale (2008), resultam em maciços classificados como classe IV. Portanto, em regiões de clima tropicais e subtropicais, a classificação RMR

também mostra a necessidade da utilização de ajustes para encontrar resultados mais fidedignos nas classificações das básicas intrusivas saprolitizadas, mesmo quando considerado os pesos como sendo médios. O Gráfico 59 ilustra a frequência de classe encontrada para cada classificação

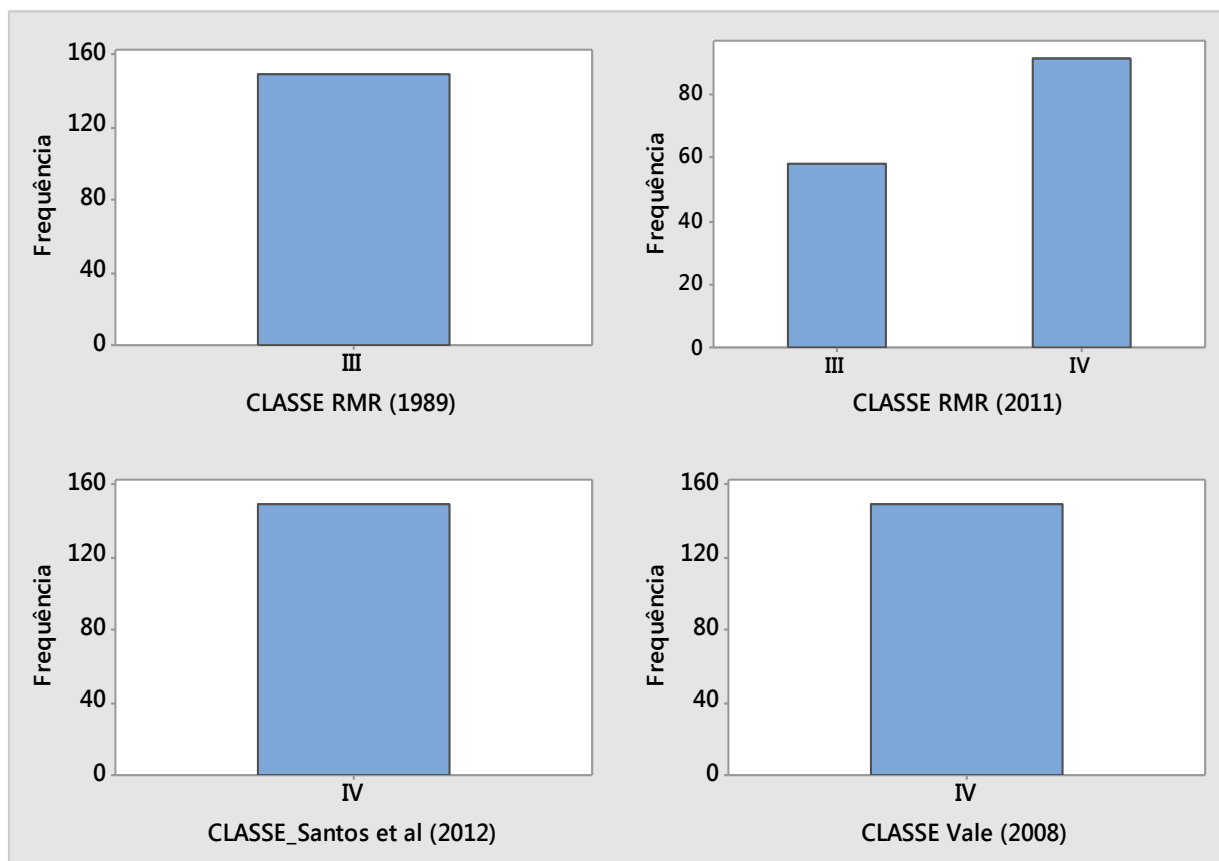


Gráfico 59 – Classes de RMR para os diferentes ajustes – Básicas Intrusivas Saprolitizadas

Para a classificação GSI, as correlações mostraram valores entre 35 e 49, tendo uma média de 42. Considerando os valores entre o 1º e o 3º quartil do histograma, são encontrados intervalos entre 37 e 47. Com relação às superfícies dos maciços, as correlações de Hoek *et al.* (2013) encontraram condições de superfície entre muito boa, boa e regular, tendo maiores frequências para a condição regular e boa, respectivamente. Para as estruturas, as regiões mais encontradas foram “muitos blocos” e “com blocos”. Apesar dos valores encontrados de GSI apresentarem média de 42 pontos, o histograma apresentado no Gráfico 60 a seguir, mostra que a maioria dos pontos coletados encontraram GSI de 38.

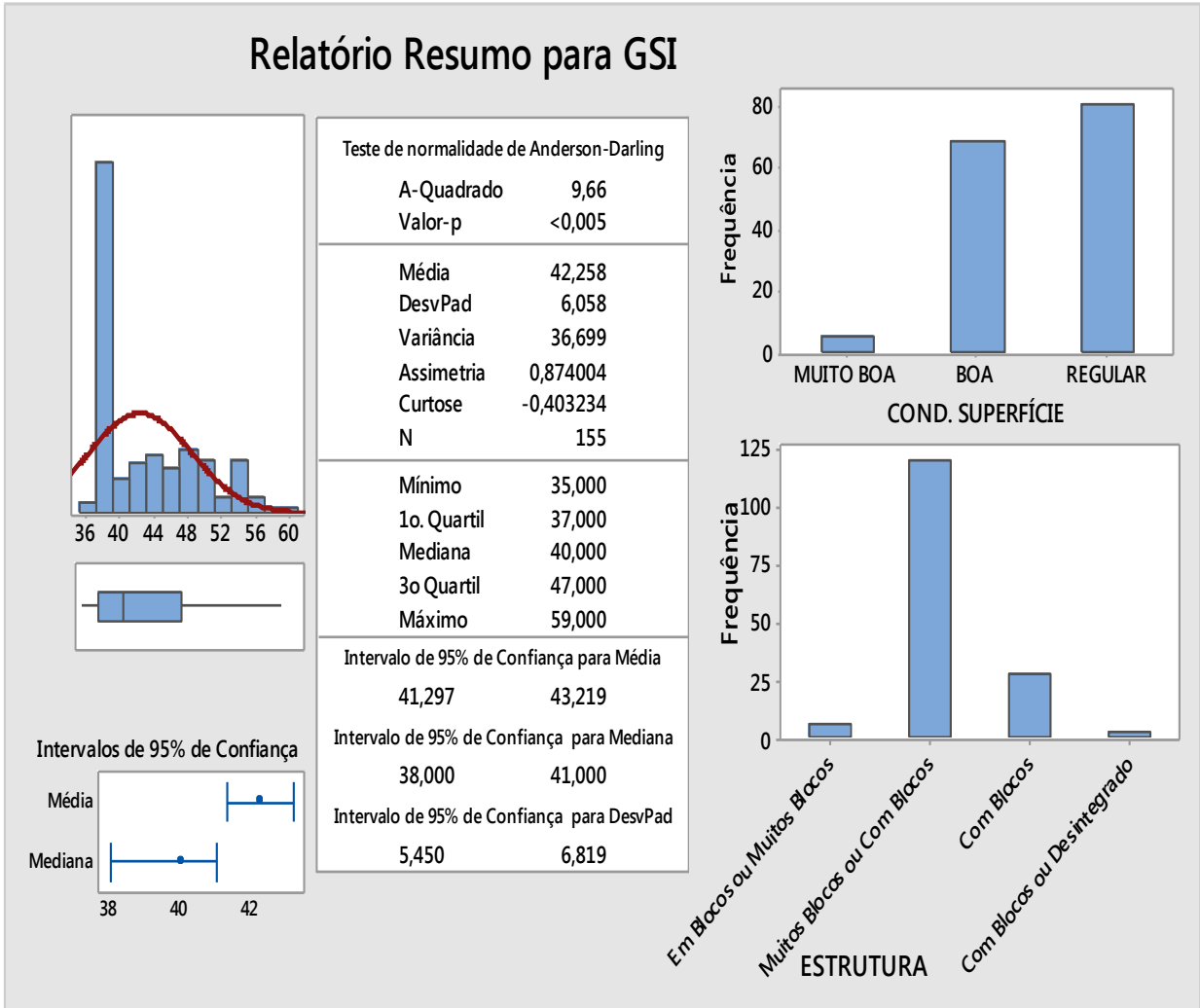


Gráfico 60 – Classificação GSI das básicas intrusivas saprolitizadas

No Gráfico 61 mostra-se as regiões esperadas para as básicas intrusivas saprolitizadas, da mina do Tamanduá, no gráfico de GSI de Hoek *et al.* (2013). Também são definidas as regiões de maior ocorrência (região mais escura) de básicas intrusivas saprolitizadas no GSI.

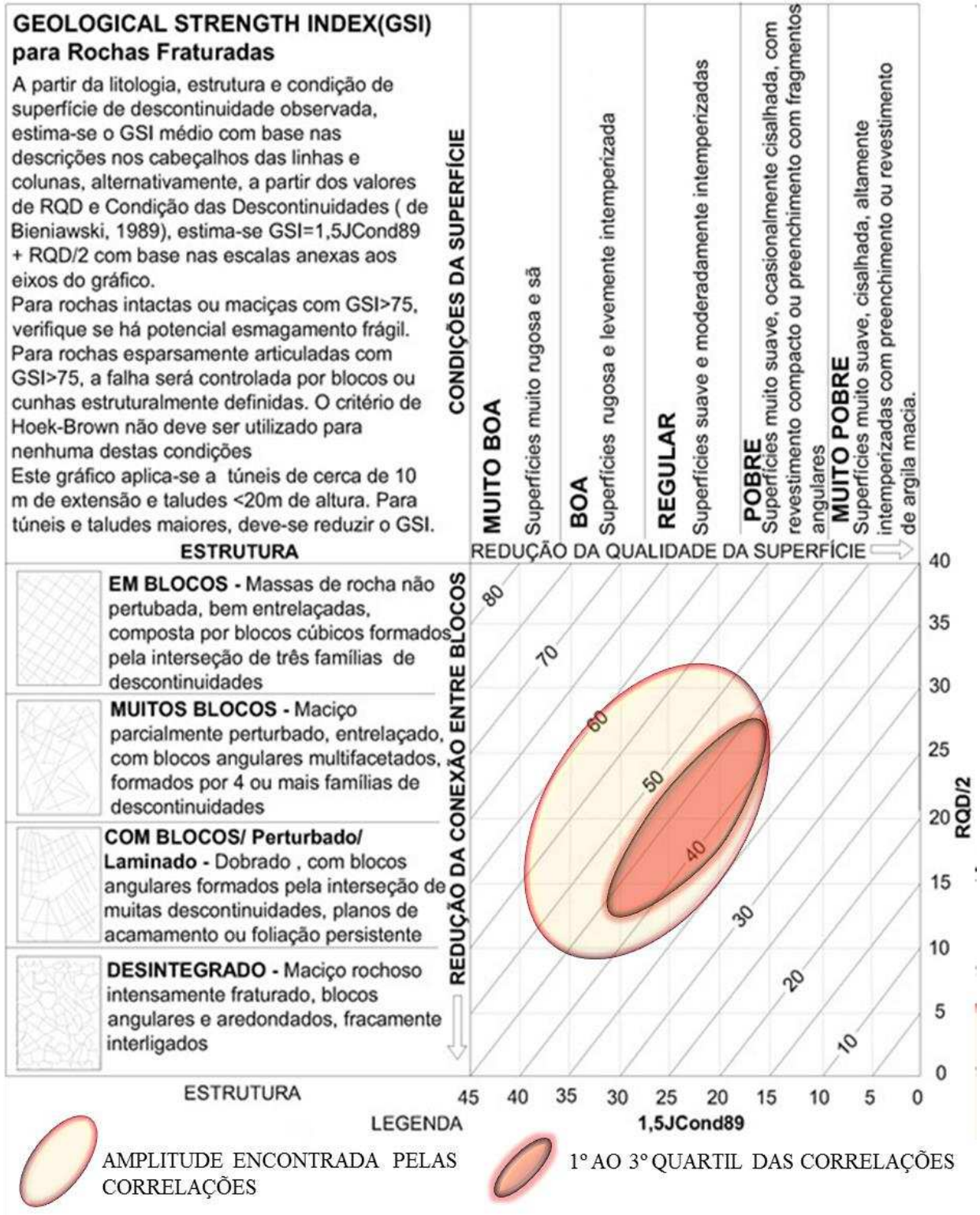


Gráfico 61 – Região prevista de GSI para as básicas intrusivas saponitizadas (BIS).

Enquanto as básicas intrusivas encontraram estimativas entre 49 e 57 com condições de superfície “boa” e estrutura com “muitos blocos”, as básicas intrusivas saponitizadas encontraram estimativa entre 37 e 47, com condições de superfície voltada para “regular”.

4.1.7 *Metavulcânicas (VU)*

As rochas metavulcânicas afloram no lado oeste da mina, sob a forma de corpos lenticulares de direção NWN. São rochas alteradas, de coloração rósea ou amarela, que mostram estruturas deformacionais marcantes como dobras, foliação e fraturas. Além disso, apresentam espessura bastante variável, desde alguns centímetros (lentes) até cerca de 35 metros. A Figura 23 mostra um talude de rochas metavulcânicas alteradas.



Figura 23 – Talude composto de rochas metavulcânicas alteradas (VALE, 2008)

Na caracterização das 60 estações geológico-geotécnicas (pontos) ao longo da mina do Tamanduá, foram mapeados maciços moderadamente alterados (3) e altamente alterados (4), com consistência média macia (2) ou macia (1) e grau de faturamento moderadamente (3), muito (4) ou intensamente fraturados (5). Além disso, nos maciços existem a presença de xistosidades (5) e fraturas (6), com aberturas fechadas (1) e superfície rugosa, lisa e irregular (2) ou levemente rugosa, lisa e regular (3).

Na classificação RMR_{89} , foram encontrados valores entre 42 e 56 pontos, tendo média e mediana de, 44 e 42, respectivamente. O Gráfico 62 ilustra os resultados encontrados na caracterização e classificação das hematitas friáveis.

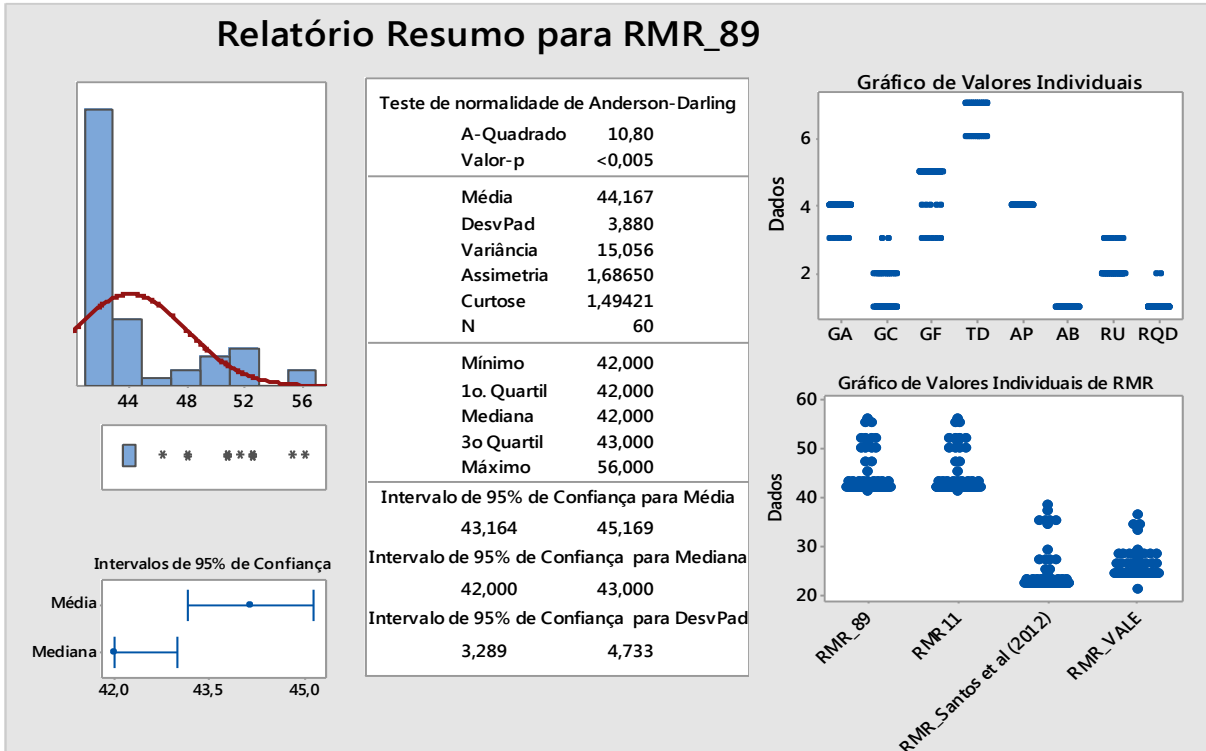


Gráfico 62 – Caracterização e classificação RMR das metavulcânicas.

Com relação aos valores encontrados pelas classificações, tanto de Santos *et al.* (2012) como da Vale (2008), foram obtidos valores inferiores aos encontrados pela classificação de Bieniawski (1989). No Gráfico 63 são apresentados os histogramas para as classes de acordo com os ajustes.

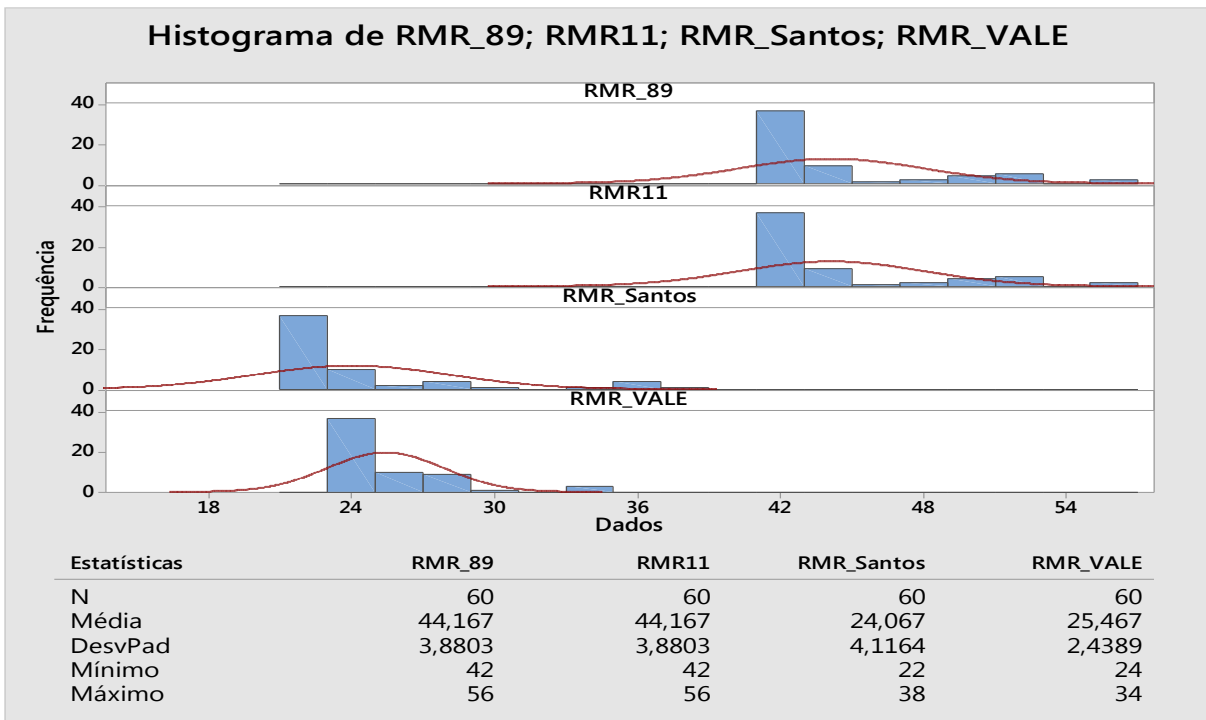


Gráfico 63 – Histograma dos ajustes na classificação RMR – Metavulcânicas (VU).

Ao adotar os ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012), a classificação RMR passou a encontrar valores entre 22 e 38, com média de 24 pontos. Se considerado a média encontrada, os ajustes propostos por Santos *et al.* (2012) penalizaram os maciços em aproximadamente 20 pontos. Para as adaptações realizadas pela Vale (2008), a classificação encontrou valores entre 24 e 34, tendo média de 25 pontos. Portanto, novamente os ajustes propostos por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008) esperam, praticamente, os mesmos resultados de RMR, confirmando assim, a necessidade de adaptações na classificação RMR_{89} para serem utilizadas nos maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero.

Na classificação RMR_{89} os maciços foram classificados como classe III. Ao atribuir os ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008), os maciços passaram a ser classificados como classe IV. Isso anda ocorrendo na maioria dos casos, uma vez que o RMR_{89} vem classificando os maciços do Quadrilátero Ferrífero como sendo uma classe acima da esperada. O Gráfico 64 a seguir mostra a frequência encontrada para cada classe.

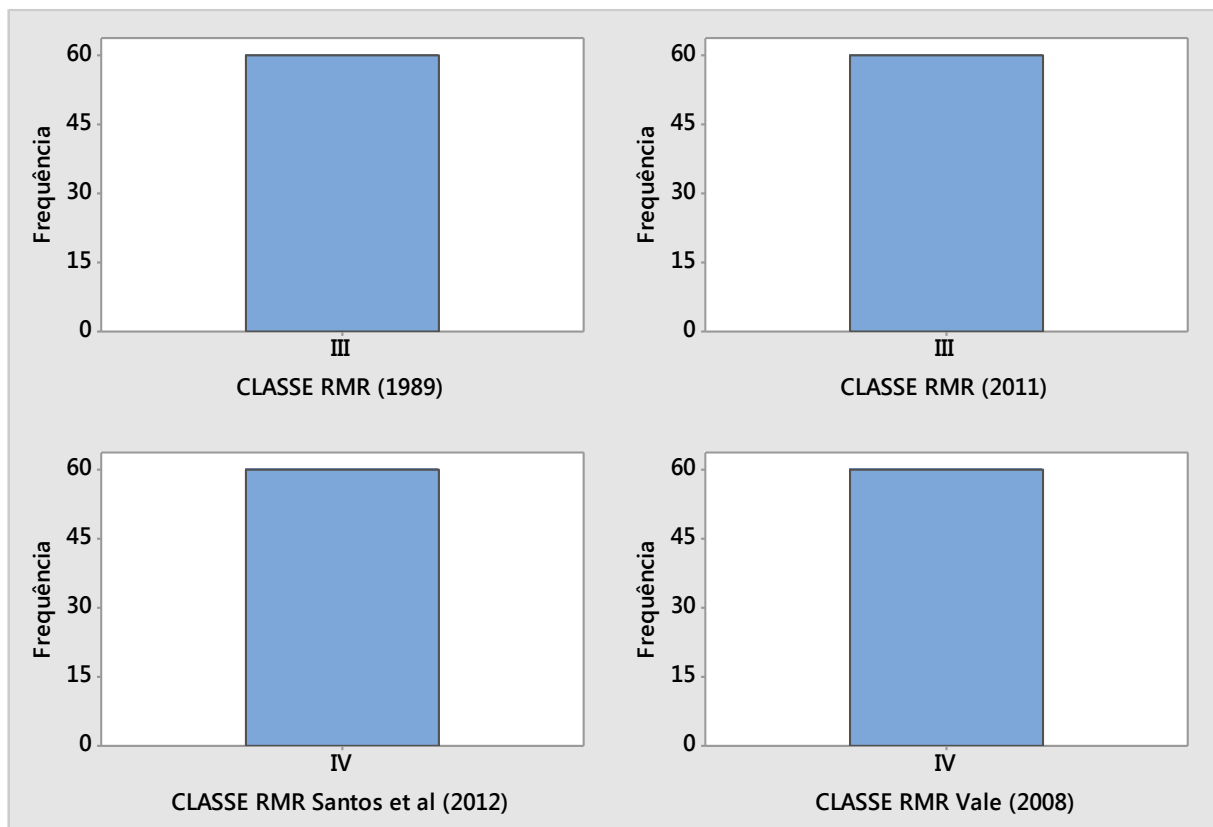


Gráfico 64 – Classe de RMR para diferentes ajustes - Metavulcânicas (VU).

Com relação ao GSI, foram encontrados valores entre 37 e 51, tendo uma média de 39 e uma mediana de 37. Apesar da faixa de valor encontrada, a maior parte dos maciços foi pontuada com GSI de 37. As estruturas dos maciços se apresentavam com “Muitos Blocos” e as

condições das superfícies estavam entre boa e regular, tendo maiores frequências para superfícies regulares. Os dados mencionados podem ser visualizados no Gráfico 65 abaixo.

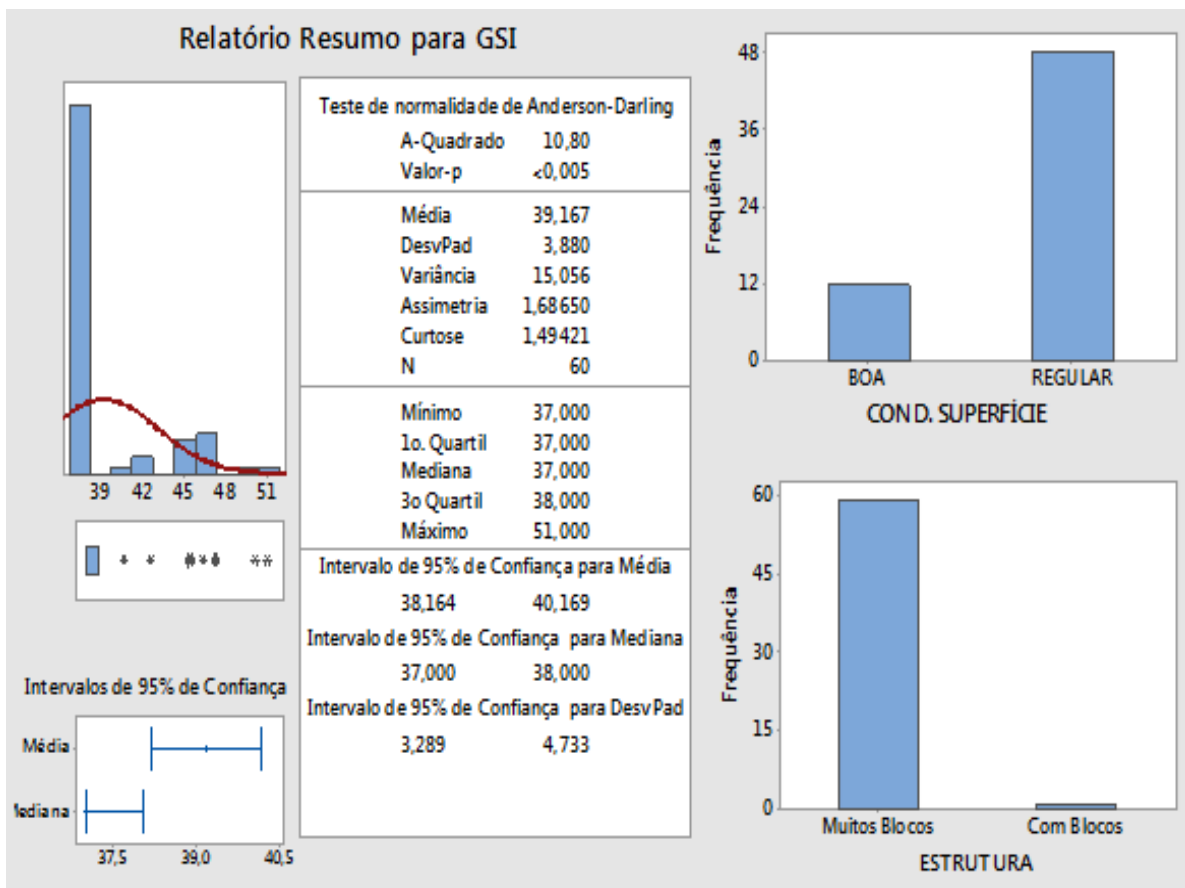


Gráfico 65 – Classificação GSI das metavulcânicas.

O Gráfico 66 ilustra as regiões encontradas de GSI para as metavulcânicas do Quadrilátero Ferrífero. A região clara representa o GSI de todos os pontos coletados e, a região mais escura, representa a região com maior probabilidade de GSI para as metavulcânicas.

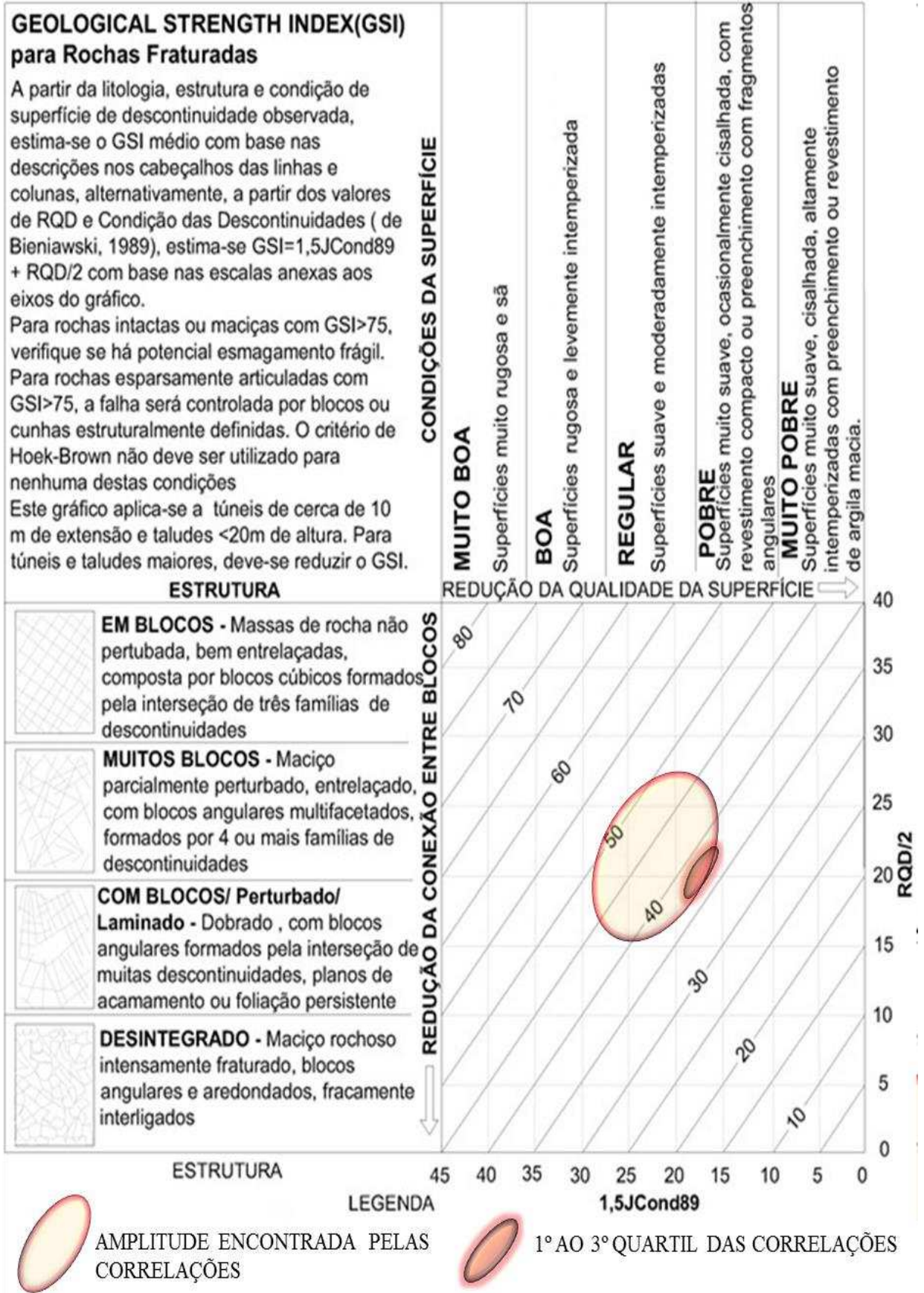


Gráfico 66 – Região prevista de GSI para as metavulcânicas – VU (Adaptado e traduzido de HOEK *et al.*,2013)

4.2 Comparativo entre o Grau de Alteração (GA) e o Grau de Consistência (GC)

Os resultados apresentados nesta seção mostram as frequências encontradas para as caracterizações e classificações dos maciços rochosos da mina do Tamanduá.

O Gráfico 67 mostra a frequência encontrada para o grau de alteração de acordo com cada litologia.

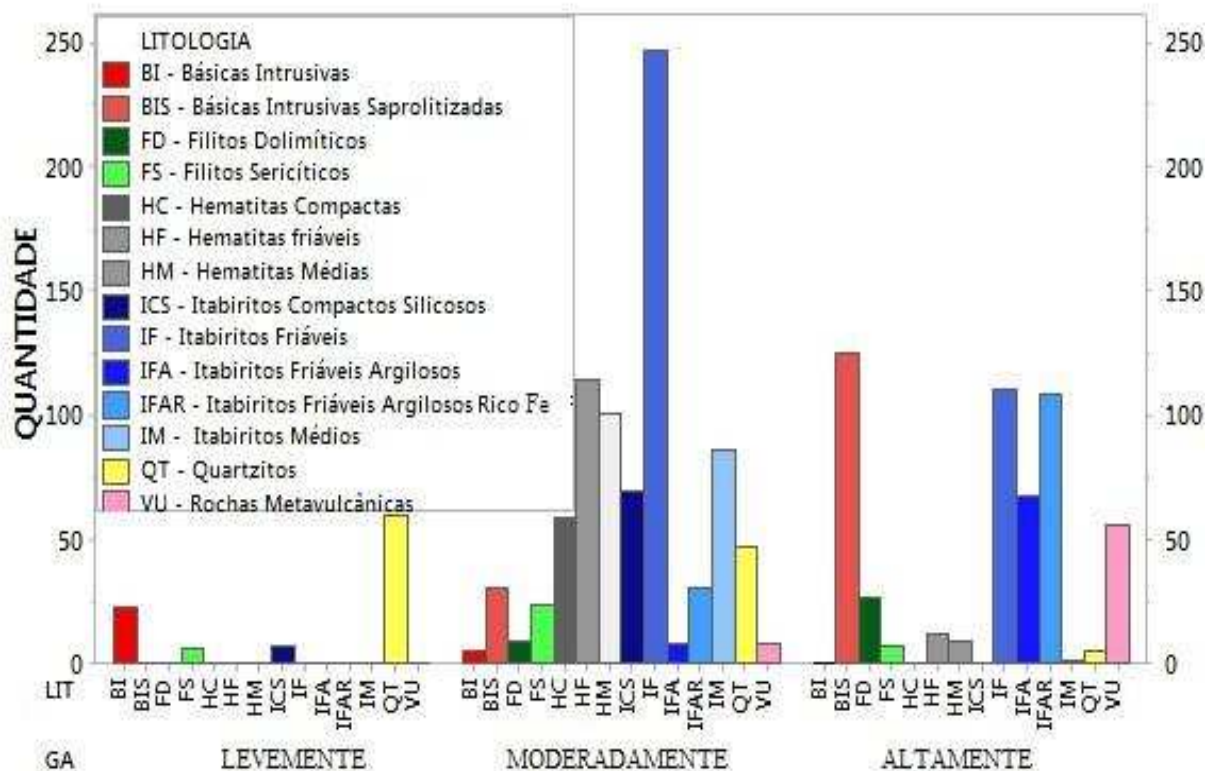


Gráfico 67- Relação entre o Grau de Alteração (GA) e a Litologia

De acordo com o Gráfico 67, as BI foram caracterizadas como levemente (predominante) e moderadamente alteradas. BIS, FD, IFA, IFAR e VU são geralmente moderadamente a altamente alteradas (predominantes). Os ICS, HF, HM e IF compreendem principalmente maciços rochosos moderadamente (predominantes) para altamente alteradas. FS e QT variam de levemente a altamente alteradas. A classificação apresentada no Gráfico 63 mostra uma prévia classificação de intemperismo por Vale (2008), uma vez que os tipos de rocha são separados em tipos friáveis, médios e compactos. Em geral, os tipos de rochas friáveis são caracterizados como altamente alteradas e as compactas são principalmente moderadamente e ligeiramente alteradas. Como a classificação de maciços rochosos não depende apenas da influência do intemperismo, mas também da resistência da rocha intacta, o grau de

consistência (GC) foi avaliado para todos os materiais, sendo os resultados apresentados no Gráfico 68.

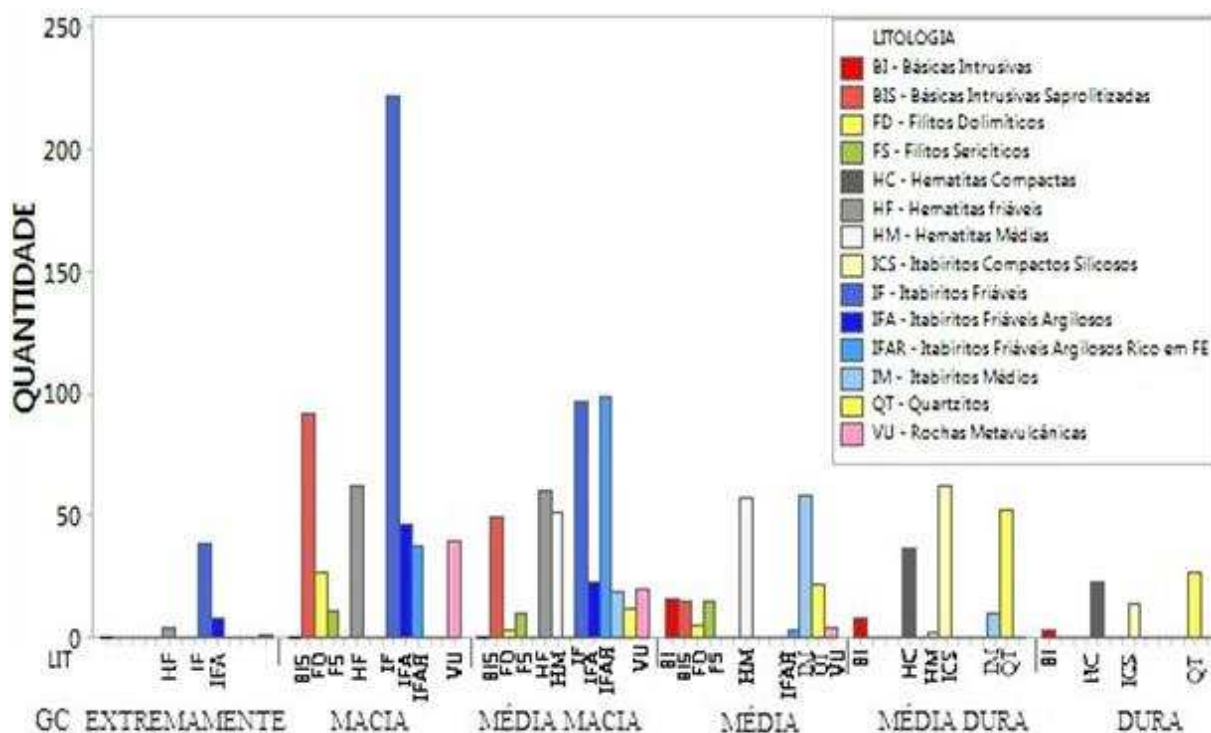


Gráfico 68 - Relação entre o Grau de Consistência (GC) e as Litologias

O Gráfico 68 mostra que alguns tipos de rochas alteradas podem apresentar uma maior consistência, mesmo quando resistentes como, por exemplo, os ICS. Assim, em geral, os tipos de rochas consideradas friáveis foram caracterizadas como extremamente macias a média macia. Os tipos de rochas médias variam de média macia e média dura, e os tipos de rochas compactas variam de média dura a dura. Portanto, a seleção prévia de Vale (2008) baseia-se não apenas em grau de alteração, mas também em grau de consistência. Na Tabela 19 mostra-se a relação entre o grau de consistência e o grau de alteração encontrado pela caracterização. Resultado semelhantes foram obtidos por Cruz (2017).

Tabela 19 – Relação entre o Grau de Alteração (GA) e o Grau de Consistência (GC)

LITOLOGIA	GRAU DE CONSISTÊNCIA	GRAU DE ALTERAÇÃO
Friáveis	Extremamente Macia a Média Macia	Altamente alterada
Médias	Média Macia e Média Dura	Moderadamente alteradas
Compactas	Média Dura e Dura	Levemente a Moderadamente alteradas

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3 Comparativo entre os resultados de RMR

Os resultados da aplicação dos diferentes ajustes em RMR serão apresentados posteriormente. No Gráfico 69 são apresentados os resultados da classificação RMR para todas as litologias da mina Tamanduá, de acordo com Bieniawski (1989).

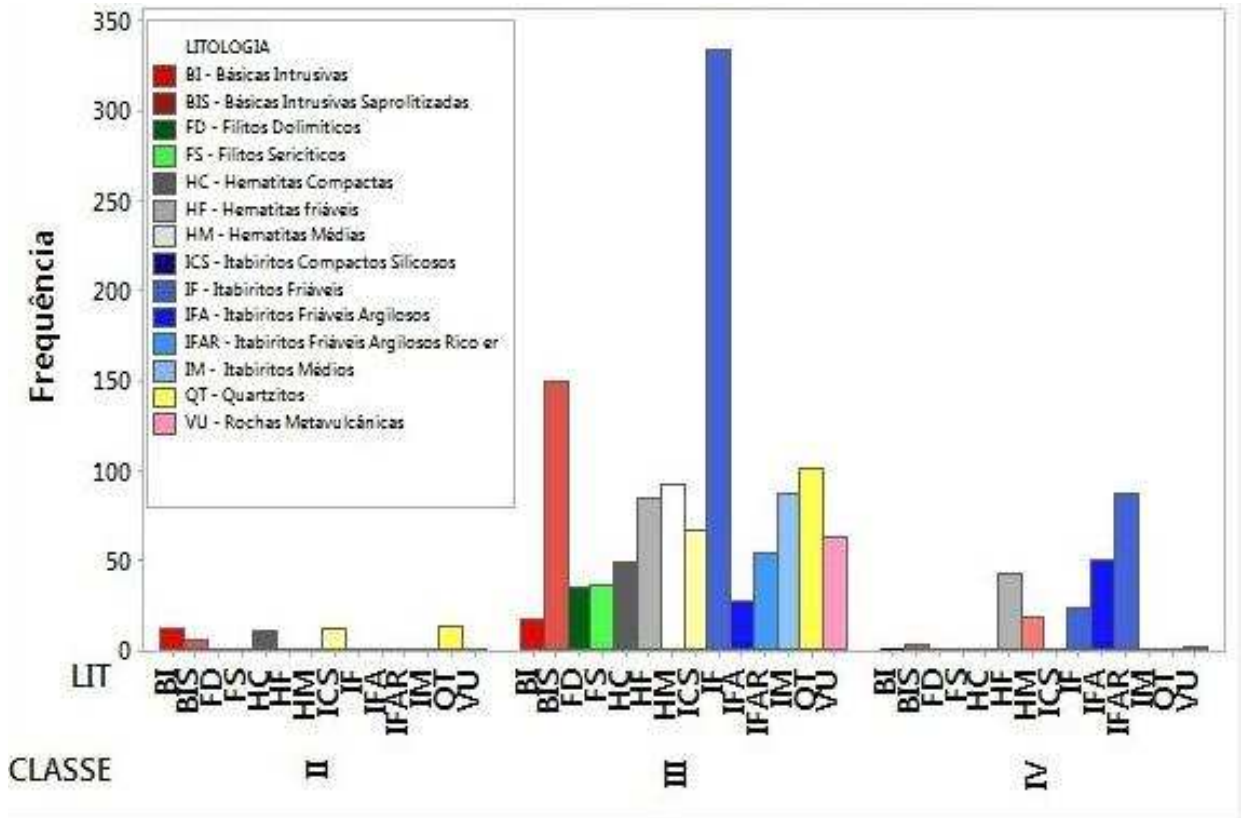


Gráfico 69 – Classificação RMR segundo Bieniawski (1989)

Na classificação RMR original HC, QT, ICS, BI e as BIS foram classificados como classes II ou III. HF, HM e IF foram classificados como classe III e IV, mais frequentemente como Classe III. Os itabiritos ricos em argila, com maior ou menor teor de ferro (IFA e IFAR) também foram classificados como classe III e IV, mas mais frequentemente como Classe IV. Finalmente, os FS, FD, IM e VU foram classificados como classe III.

Ao considerar a explicação dada por Bieniawski (2011), a classificação de maciços rochosos RMR mudou de acordo com a sugestão de 1989, como observado no Gráfico 70.

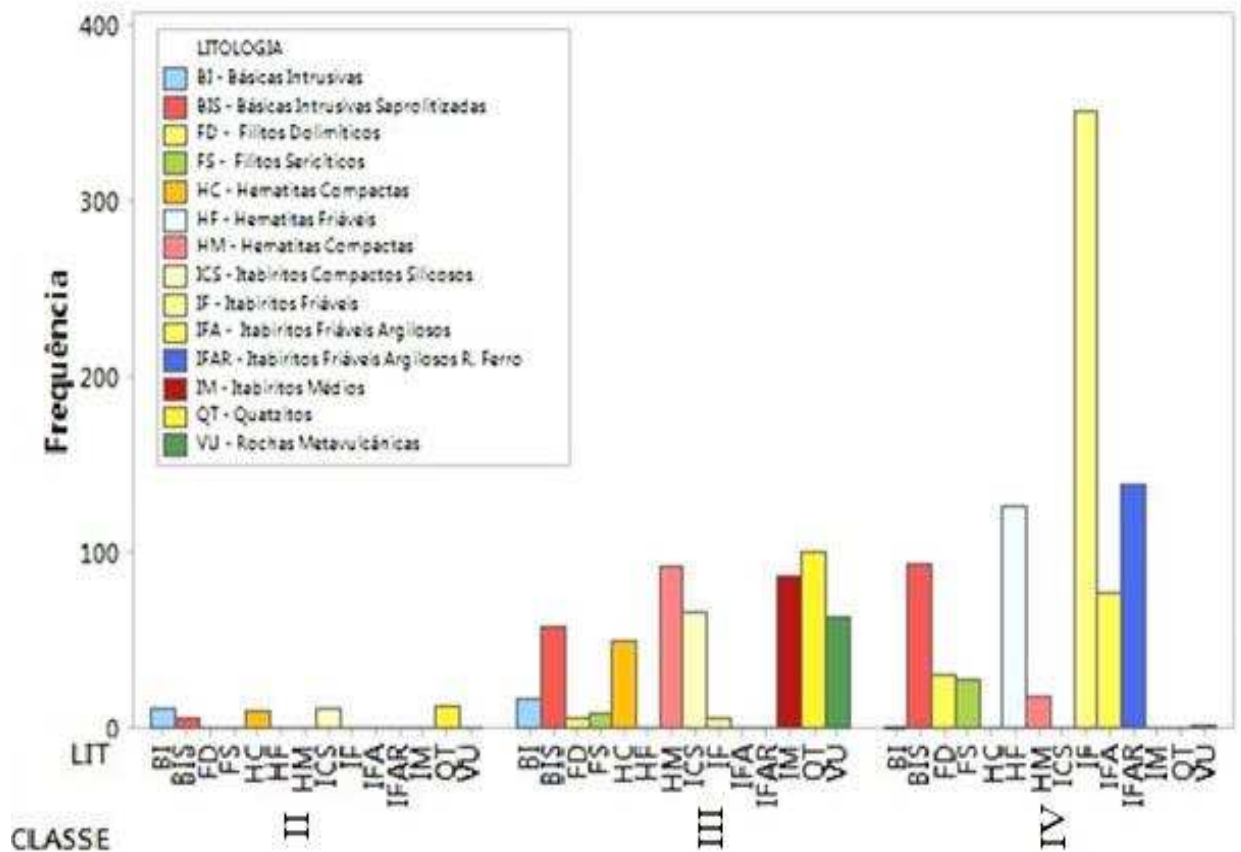


Gráfico 70 – Classificação RMR *apud* Bieniawski (2011)

Os resultados apresentados no Gráfico 70 mostram que todas as litologias friáveis foram classificadas como Classe V, enquanto que os outros tipos de maciços rochosos permanecem na mesma classificação apresentada no Gráfico 69 (com base em RMR, 1989). Isso mostrou que a consideração de 8 (oito) pontos relacionados ao RQD e espaçamento das discontinuidades estavam majorando a classificação das massas rochosas com base na proposição original de Bieniawski (1989).

O Gráfico 71 apresenta os resultados dos maciços rochosos de Tamanduá com base nas sugestões de Santos *et al.* (2012)

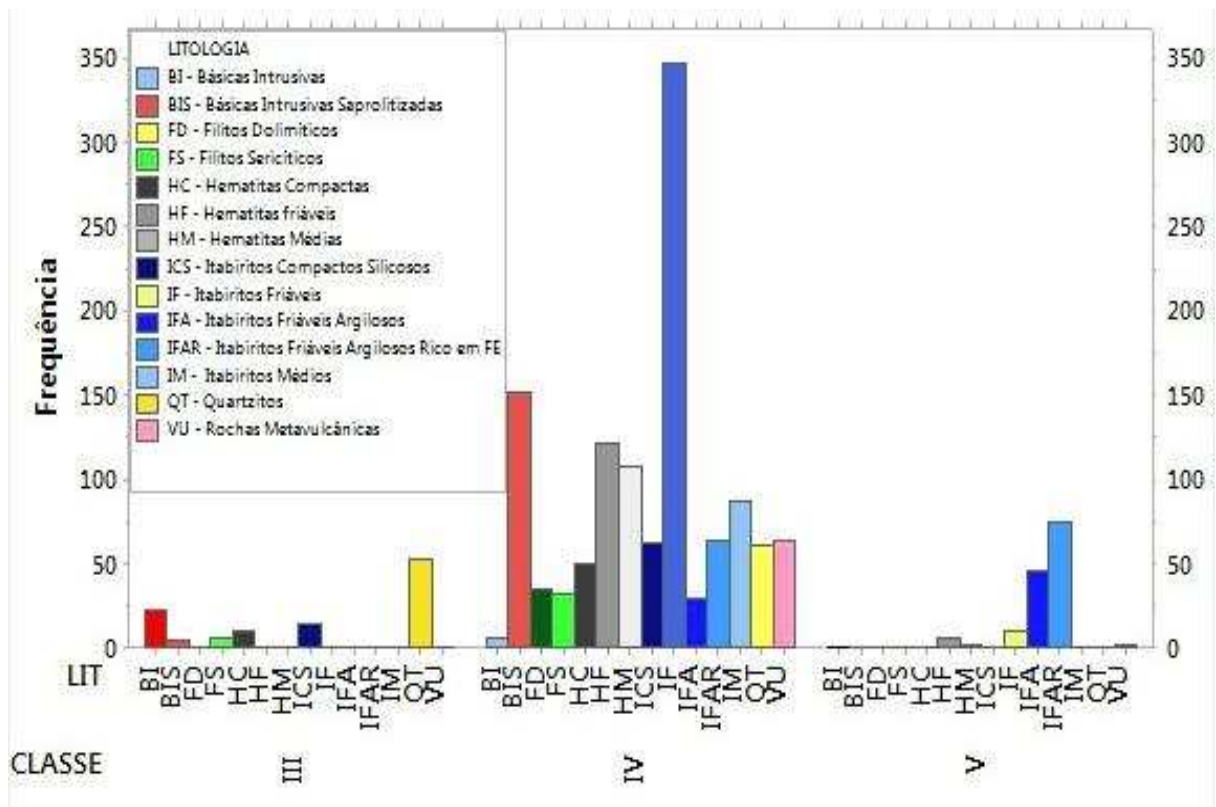


Gráfico 71 – Classificação RMR segundo Santos *et al.* (2012)

Para ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012), os resultados mostram que BI e QT foram classificados como classe III e IV. BIS, FS, HC e ICS também foram classificados como classe III e IV, mas com maior frequência na classe IV. HF, IF, HM, IM, FD e VU foram classificados como Classe IV. Finalmente, IFA e IFAR foram classificados como classe IV e V.

Ao comparar o Gráfico 69 e o Gráfico 71, verifica-se que a proposta de Santos *et al.* (2012) tende a diminuir, a classificação RMR original, em uma classe, ou seja, os materiais considerados como classe II na classificação original mudaram para materiais classe III na proposta de Santos *et al.* (2012). Ao comparar os resultados do Gráfico 70 (RMR corrigido pela sugestão de Bieniaswki de 2011) com o Gráfico 71, resultados semelhantes foram encontrados. Somente para os tipos de rochas ricas em argila, uma diferença pode ser observada no RMR 2011, já que esses tipos de rocha foram classificados como Classe IV, e com base em Santos *et al.* (2012), esses maciços rochosos foram classificadas como Classe IV - Classe V. A sugestão de Santos *et al.* (2012) considera que todos os maciços rochosos serão afetados pelo intemperismo e não apenas os maciços rochosos friáveis.

O ajuste da Vale (2008), demonstrado no Gráfico 72 a seguir, apresentou resultados semelhantes aos de Santos *et al.* (2012).

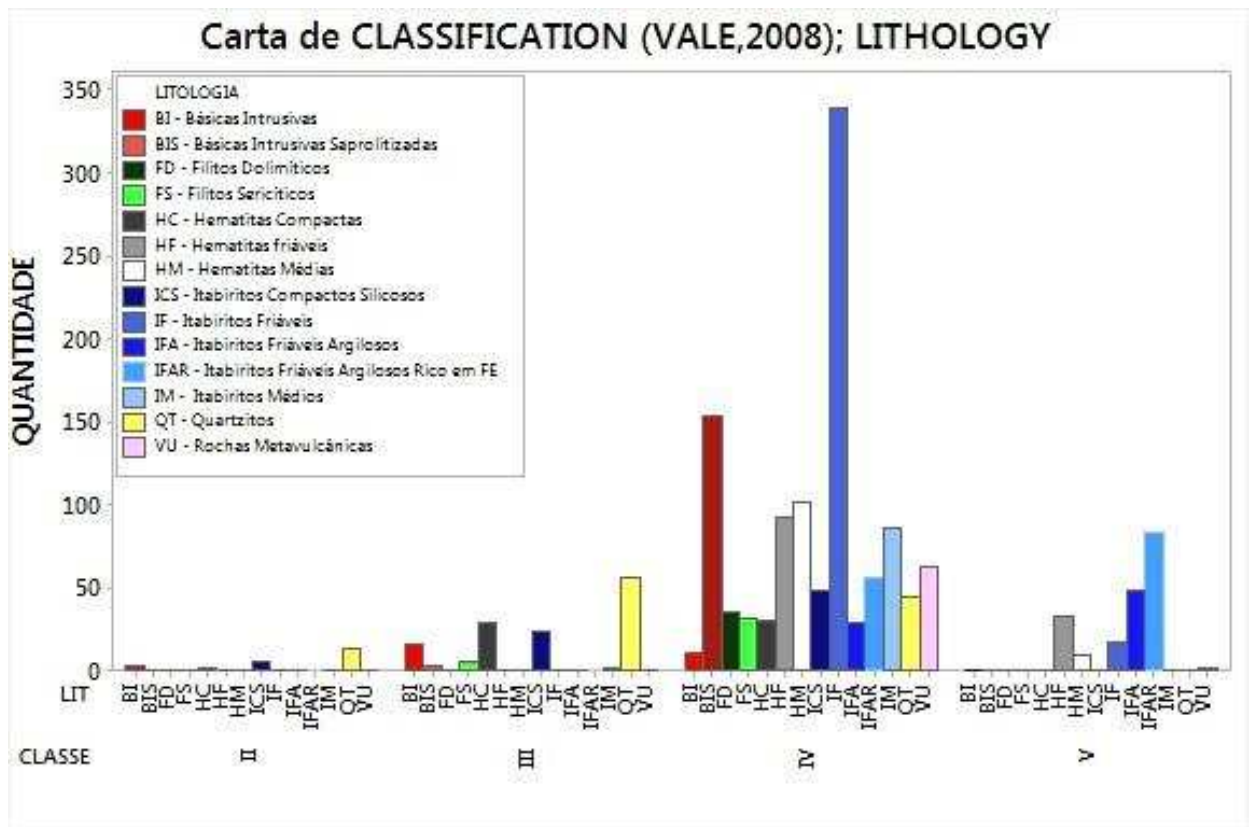


Gráfico 72 – Classificação RMR para a mina do Tamanduá segundo Vale (2008)

Na classificação proposta por Vale (2008) BI, HC, ICS foram classificados como classe III e IV. QT, IM e VU variam de Classe II a Classe IV. FD, FS, IM e VU foram classificados como Classe IV. Finalmente, HF, HM, IF, IFA e IFAR foram classificados como Classe IV e Classe V, os três primeiros predominantemente na Classe IV e IFA e IFAR mais frequentemente na Classe V.

De forma semelhante à observada para Santos *et al.* (2008), a classificação Vale (2008) resultou, em geral, de uma redução de uma classe quando comparada à proposta original RMR (1989). Ao comparar Vale (2008) com o RMR de Bieniawski (2011), pode notar-se que, apesar dos resultados para maciços rochosos friáveis estejam próximos, os ajustes propostos pela Vale (2008) também impuseram penalidades a maciços rochosos mais competentes. Os resultados mais semelhantes foram obtidos em comparação com dados de Vale (2008) com Santos *et al.* (2012). As referências encontradas nessas diferentes propostas mostram que diferentes métodos de RMR encontraram resultados semelhantes para uma região do Quadrilátero Ferrífero, demonstrando assim uma necessidade de adaptações na metodologia original, a fim de fornecer resultados mais confiáveis. A Tabela 20 mostra os resultados encontrados para cada ajuste.

Tabela 20 - Resultados encontrados entre os diferentes ajustes de RMR

LITO	CLASSE (1989)	CLASSE (2011)	CLASSE Santos	CLASSE Vale(2008)	GRAU DE ALTERAÇÃO (GA)	GRAU DE CONSISTÊNCIA (GC)
QT	II e III	II e III	III e IV	II, III e IV	Levemente/ Moderadamente/ Altamente	Média macia/ Média/ Média dura/ Dura
ICS	II e III	II e III	III e IV	II, III e IV	Levemente/ Moderadamente	Média dura/Dura
HC	II e III	II e III	III e IV	II, III e IV	Moderadamente	Média dura /Dura
BI	II e III	II e III	III e IV	II, III e IV	Levemente/ Moderadamente	Média/ Média dura/ Dura
FS	III	III e IV	III e IV	III e IV	Levemente/ Moderadamente/ Altamente	Macia/Média macia/ Média
BIS	II, III e IV	II, III e IV	III e IV	III e IV	Moderadamente/ Altamente	Macia/ Média macia/ Média
IM	III	III	IV	IV	Moderadamente	Média macia/ Média/ Média dura
FD	III	III e IV	IV	IV	Moderadamente/ Altamente	Macia/ Média macia/ Média
VU	III	III	IV	IV e V	Moderadamente/ Altamente	Macia/ Média macia/ Média
HM	III e IV	III e IV	IV e V	IV e V	Moderadamente/ Altamente	Média macia/ Média/ Média dura
HF	III e IV	IV	IV e V	IV e V	Moderadamente/ Altamente	Extremamente macia/ Macia/ Média macia
IF	III e IV	III e IV	IV e V	IV e V	Moderadamente/ Altamente	Extremamente macia/ Macia/ Média macia
IFA	III e IV	IV	IV e V	IV e V	Moderadamente/ Altamente	Extremamente macia/ Macia/ Média macia
IFAR	III e IV	IV	IV e V	IV e V	Moderadamente/ Altamente	Macia/ Média macia/ Média

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os resultados marcados em negrito na Tabela 20 mostram os resultados que têm maior probabilidade para cada caso. Pode-se verificar que, após a explicação de Bieniawski em 2011, o RMR encontrou, para as litologias friáveis, resultados mais próximos aos encontrados por Santos *et al.* (2012) e os resultados de Vale (2008), que são mais representativos em relação ao comportamento dos maciços observados no campo. Um ponto que deve ser destacado é que os ajustes propostos por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008) também impõem penalizações em maciços rochosos mais competentes.

Os resultados da aplicação dos diferentes ajustes em RMR são apresentados posteriormente. Na Figura 24, é apresentado um mapa com todos os tipos de rocha que ocorrem na mina Tamanduá, bem como as classificações dos maciços rochosos segundo o RMR_{1989} .

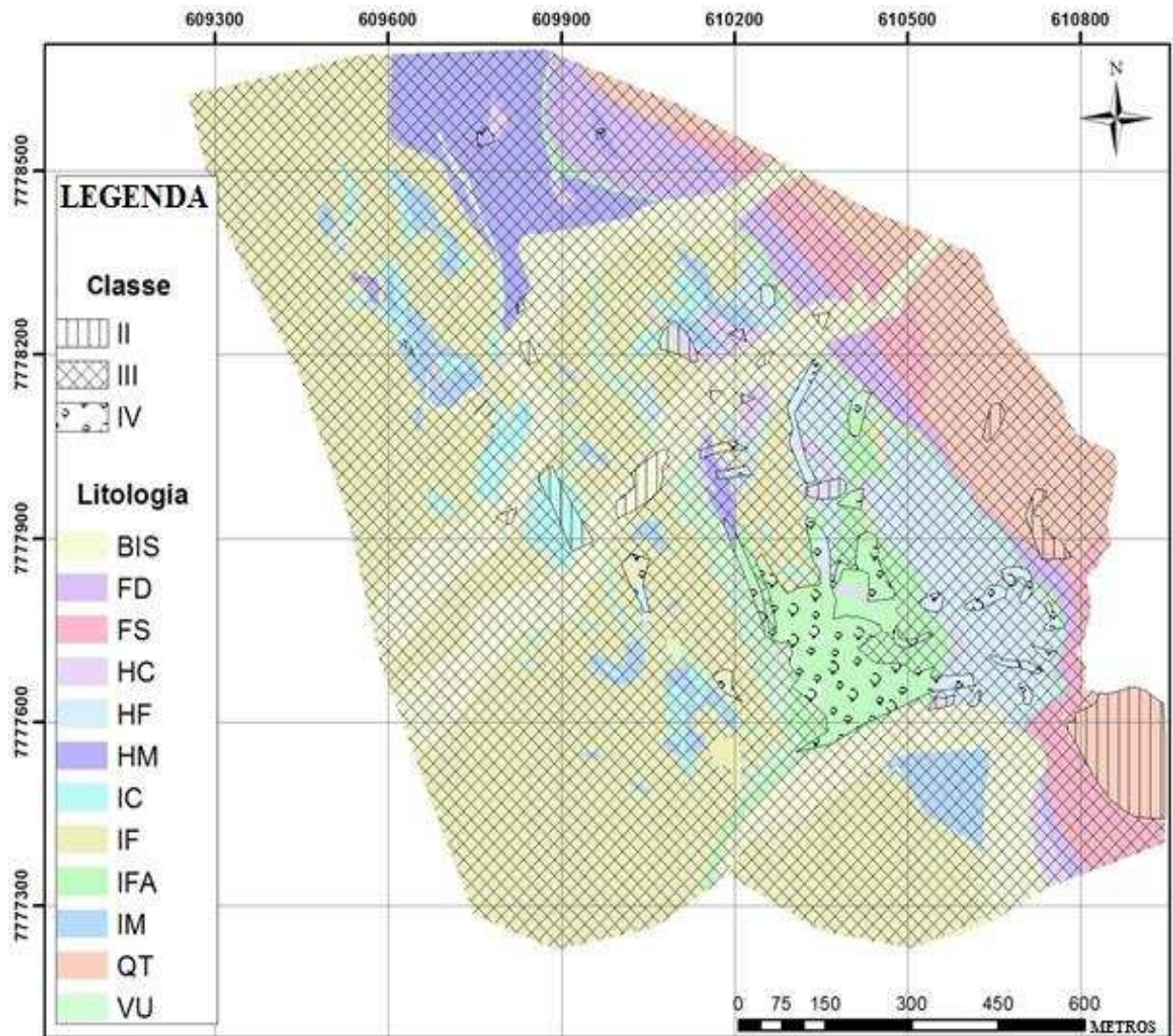


Figura 24 – Classificação RMR_{1989} para a mina do Tamanduá

Ao analisar os resultados da classificação RMR_{1989} apresentadas na Figura 24, é possível notar que a maioria dos tipos de rocha que ocorrem na mina de Tamanduá foram classificados, de acordo com RMR_{89} , como materiais de Classe III. Os materiais de Classe IV são praticamente restritos à ocorrência de itabiritos friáveis ricos em argila e à maioria das hematitas friáveis.

Com o ajuste proposto por Bieniawski (2011), como mostrado na Figura 25 a seguir, pode aparecer uma predominância de materiais Classe IV. Com a explicação dada por Bieniawski (2011), praticamente todos os litotipos friáveis mudaram da classe III para a classe IV.

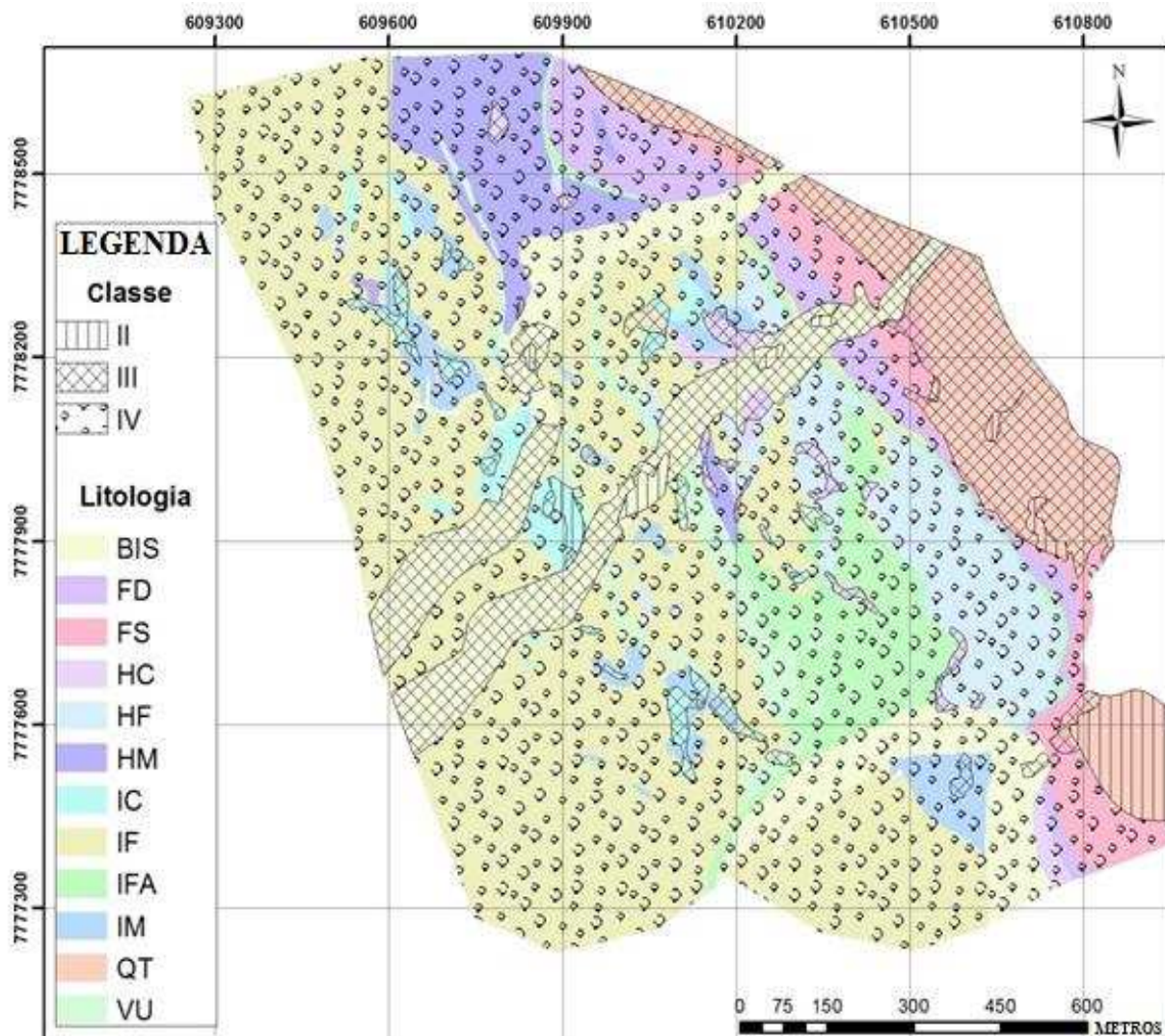


Figura 25 – Classificação RMR_{2011} para a mina do Tamanduá

Com base nesse resultado, se o ajuste de Bieniawski (2011) não for realizado para a mina do Tamanduá, a classificação resultará em classes não condizentes com as características observadas “*in situ*”.

Nas Figuras 26 e 27, classificações de RMR usando as sugestões propostas por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008) são apresentadas.

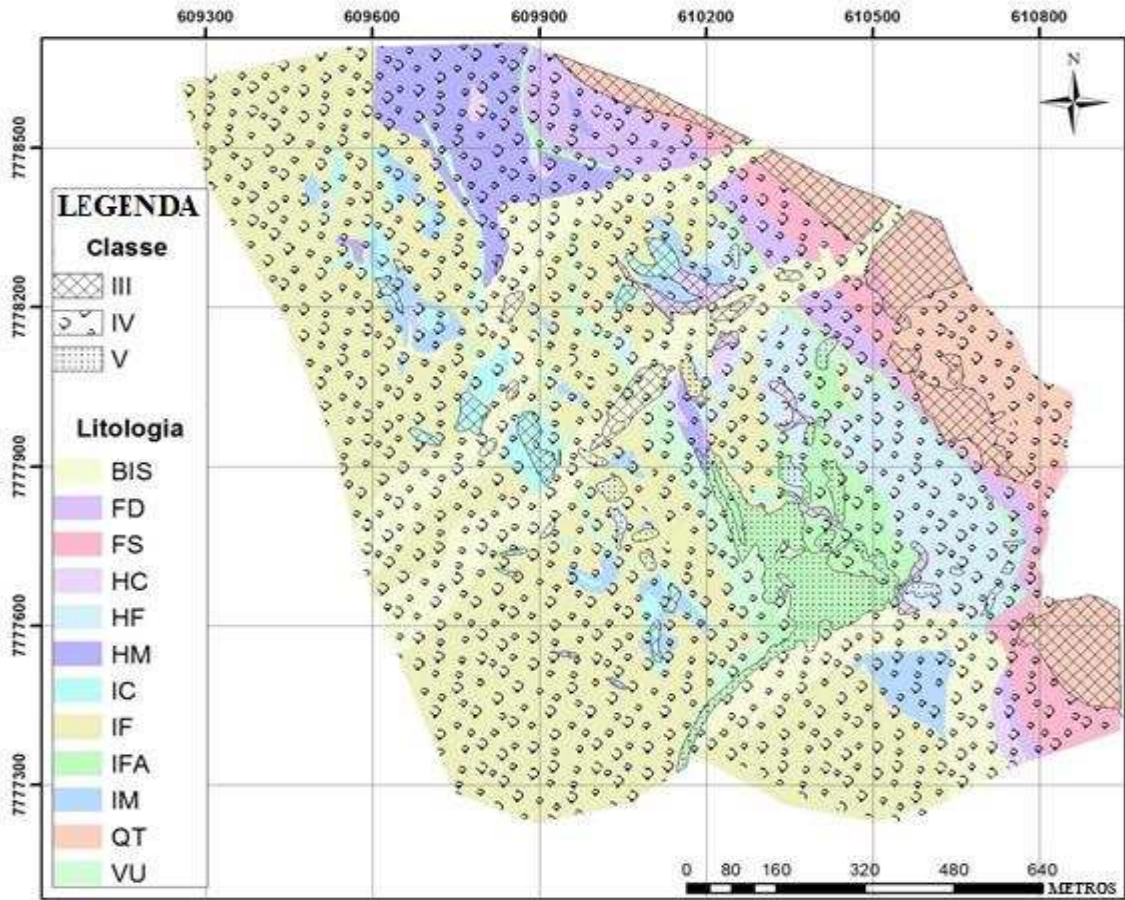


Figura 26– Classificação $RMR_{Santos et al. (2012)}$ para a mina do Tamandua

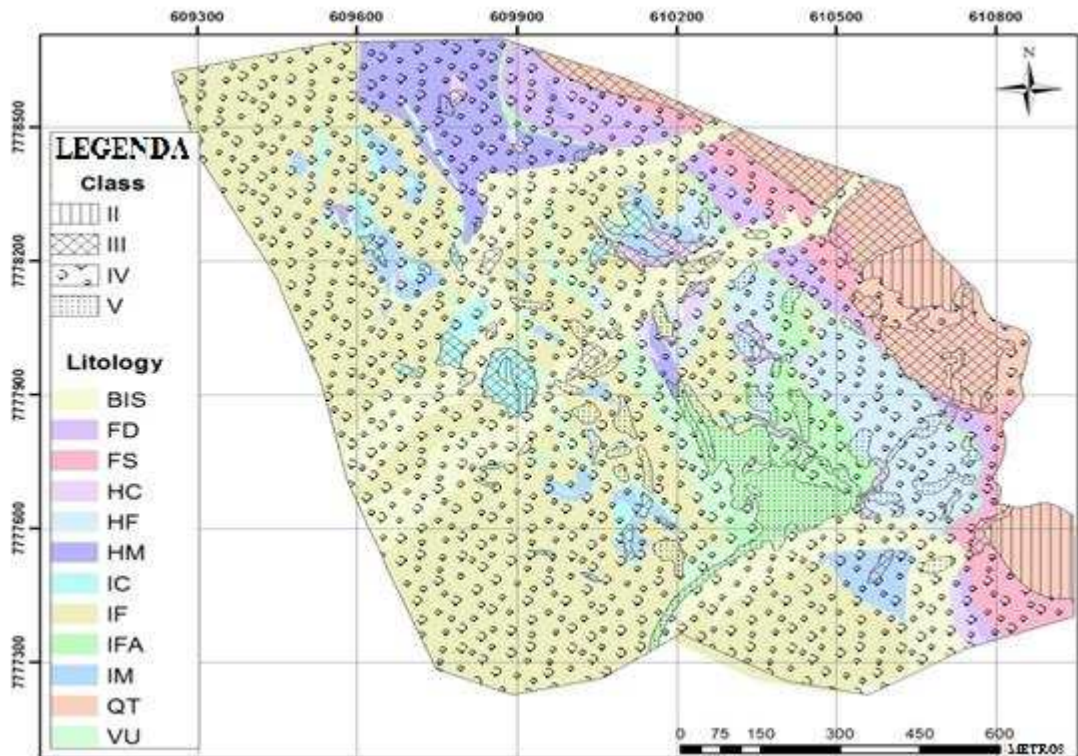


Figura 27 – Classificação $RMR_{Vale (2008)}$ para a mina do Tamandua

O ajuste proposto por Santos *et al.* (2012) no RMR_{89} resultou em uma classificação mais conservadora. No entanto, é perceptível uma similaridade com os resultados quando utilizadas as explicações de Bieniawski (2011) apresentadas na Figura 25, uma vez que a maioria das litologias foi classificada como classe IV, tendo como exceção os itabiritos friáveis ricos em argila, que foram classificados como Classe V, e uma porção de quartzito, que foi classificado como Classe III.

Para o mapa da Figura 27, o ajuste proposto pela Vale (2008) resultou em uma similaridade com os resultados obtidos pela proposta de Santos *et al.* (2012). Pode-se observar uma predominância de materiais de Classe IV, com algumas regiões de Classe III em quartzitos e itabiritos compactos.

4.4 Comparativo entre os métodos quantitativos e qualitativos de GSI

A seguir são mostrados os resultados encontrados de GSI para os itabiritos compactos silicosos (ICS), itabiritos médios (IM) e itabiritos friáveis (IF). Os resultados foram obtidos pelo método tradicional, qualitativamente, e pelo método quantitativo, por meio das correlações propostas por Hoek (1994) e Hoek *et al.* (2013). Os pontos coletados são da mina Sapecado.

4.4.1 *Itabiritos Compactos Silicosos (ICS) – Mina Sapecado*

Para a realização da correlação, foram realizadas um total de 60 investigações de campo em busca de determinar o RMR, para em seguida realizar as correlações sugeridas por Hoek *et al.* (2013). O Gráfico 73 ilustra os resultados encontrados de forma quantitativa, ou seja, através das correlações.

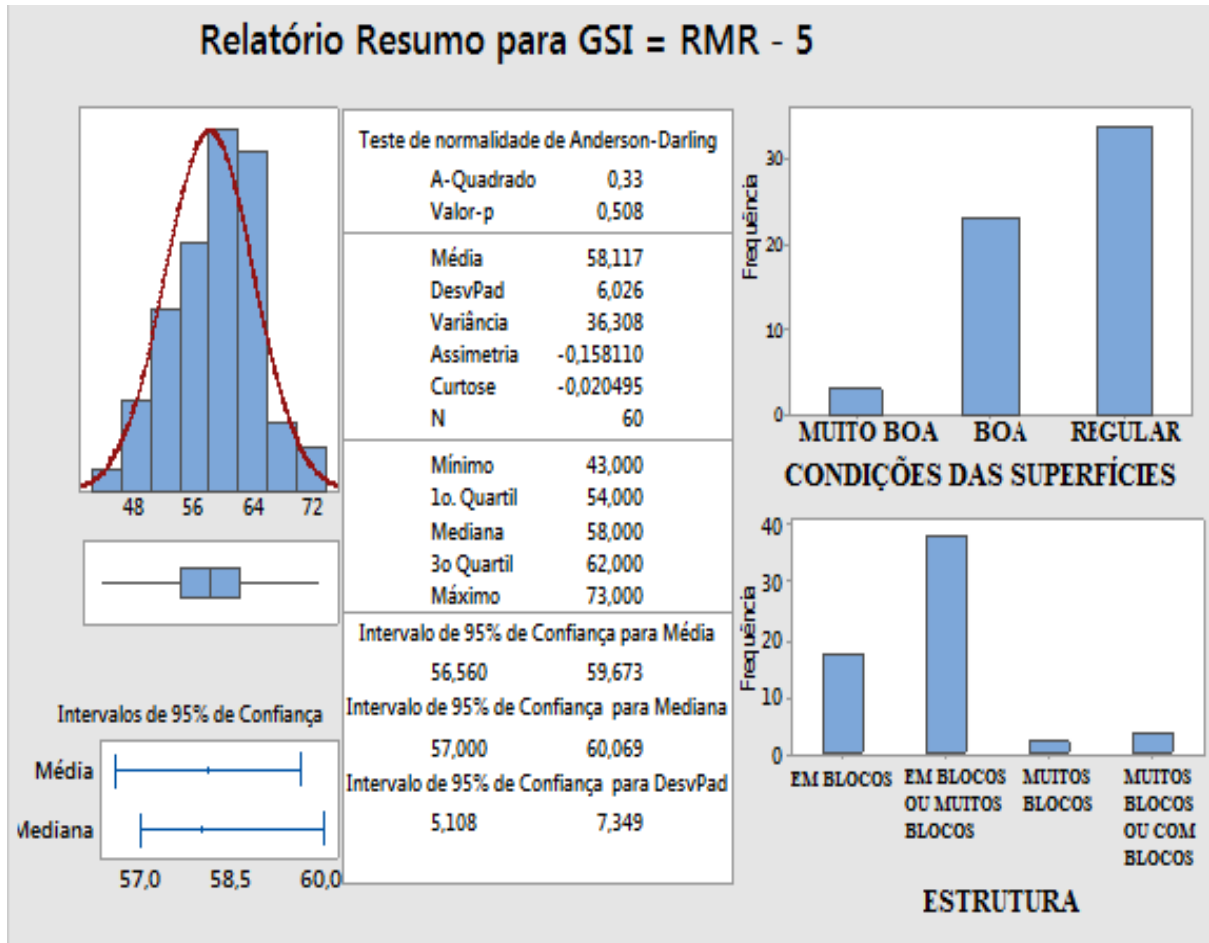


Gráfico 73 – GSI quantitativo de itabiritos compactos silicosos da mina Sapecado.

Ao verificar os resultados, constatou-se que, o valor médio encontrado de GSI para os itabiritos compactos silicosos foi de 58 pontos, se considerado um intervalo de confiança de 95%, é esperado valores entre 56 e 59 pontos. Contudo, como no GSI a melhor opção é considerar uma faixa maior de valores, optou-se por considerar os valores encontrados para o primeiro e o terceiro quartil da amostra, sendo por isso, esperados valores entre 54 e 62.

Ao analisar a frequência encontrada para as condições das superfícies e para as estruturas verificaram-se que, foram encontrados maiores frequências para as superfícies boa e regular. Para as estruturas, as correlações encontraram resultados com maior frequência para “em blocos” e “muitos blocos”.

Para o GSI encontrado de forma qualitativa, o levantamento de campo consistiu em analisar 49 pontos de itabiritos compactos silicosos. De forma geral, foi encontrada uma média de GSI de 60, tendo valores mínimos e máximos entre 49 e 73. Se considerado valores entre o primeiro e o terceiro quartil, os valores ficam entre 56 e 63. Os resultados encontrados podem ser visualizados no Gráfico 74.

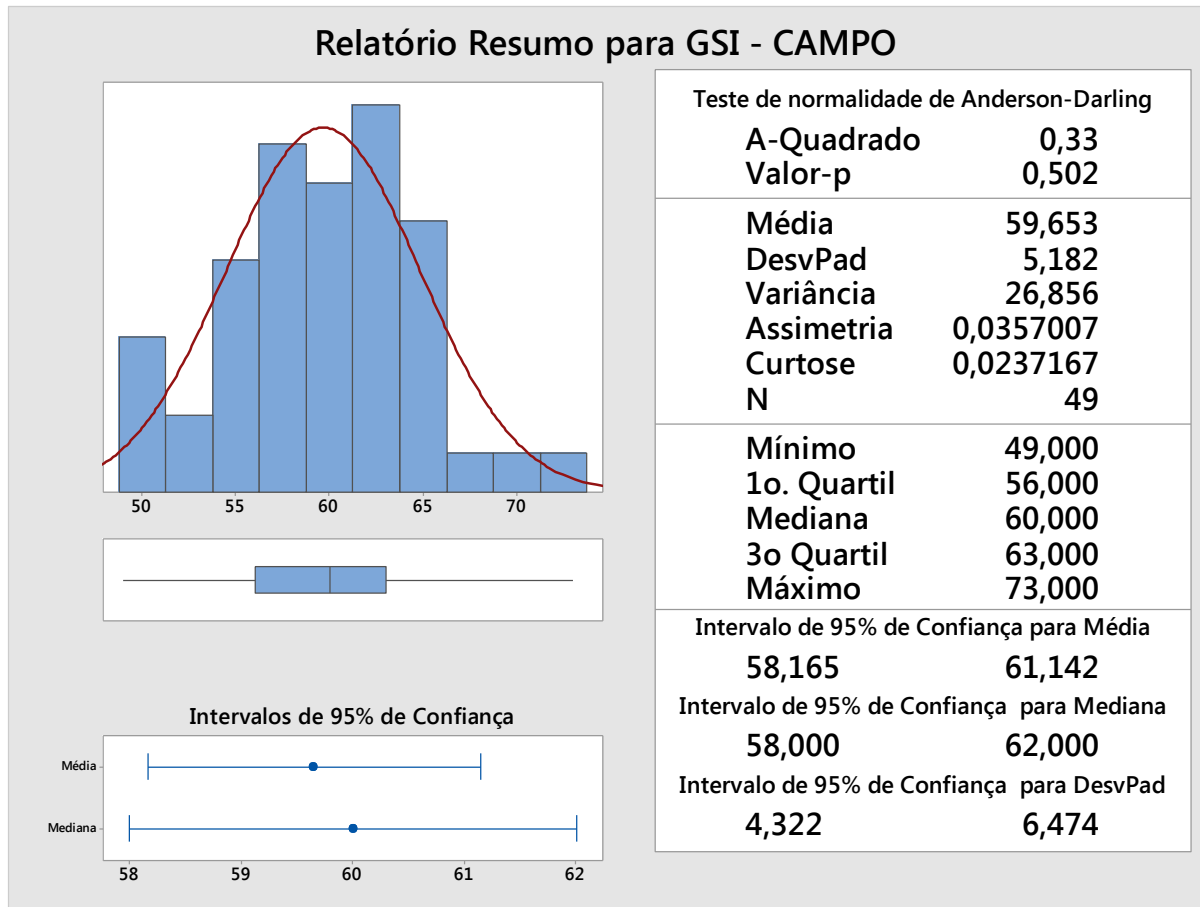


Gráfico 74 – GSI qualitativo para itabiritos compactos silicosos da mina Sapecado.

Comparando os resultados encontrados entre a forma quantitativa e qualitativa foi constatado que os dois métodos encontraram resultados próximos, tendo uma diferença percentual de 2,6% em relação às médias encontradas, insignificante para um método empírico. Considerando os intervalos entre o primeiro e o terceiro quartil de cada método foi verificado que, para a forma quantitativa, valores de GSI entre 54 e 62 são esperados. Para o levantamento qualitativo de GSI, são esperados valores entre 56 e 63. Portanto, ambos os métodos podem ser empregados para encontrar regiões de GSI no gráfico de Hoek *et al.* (2013), para os itabiritos compactos silicosos. O Gráfico 75 mostra as regiões encontradas pelos métodos quantitativos, à esquerda, e pelos métodos qualitativos, à direita.

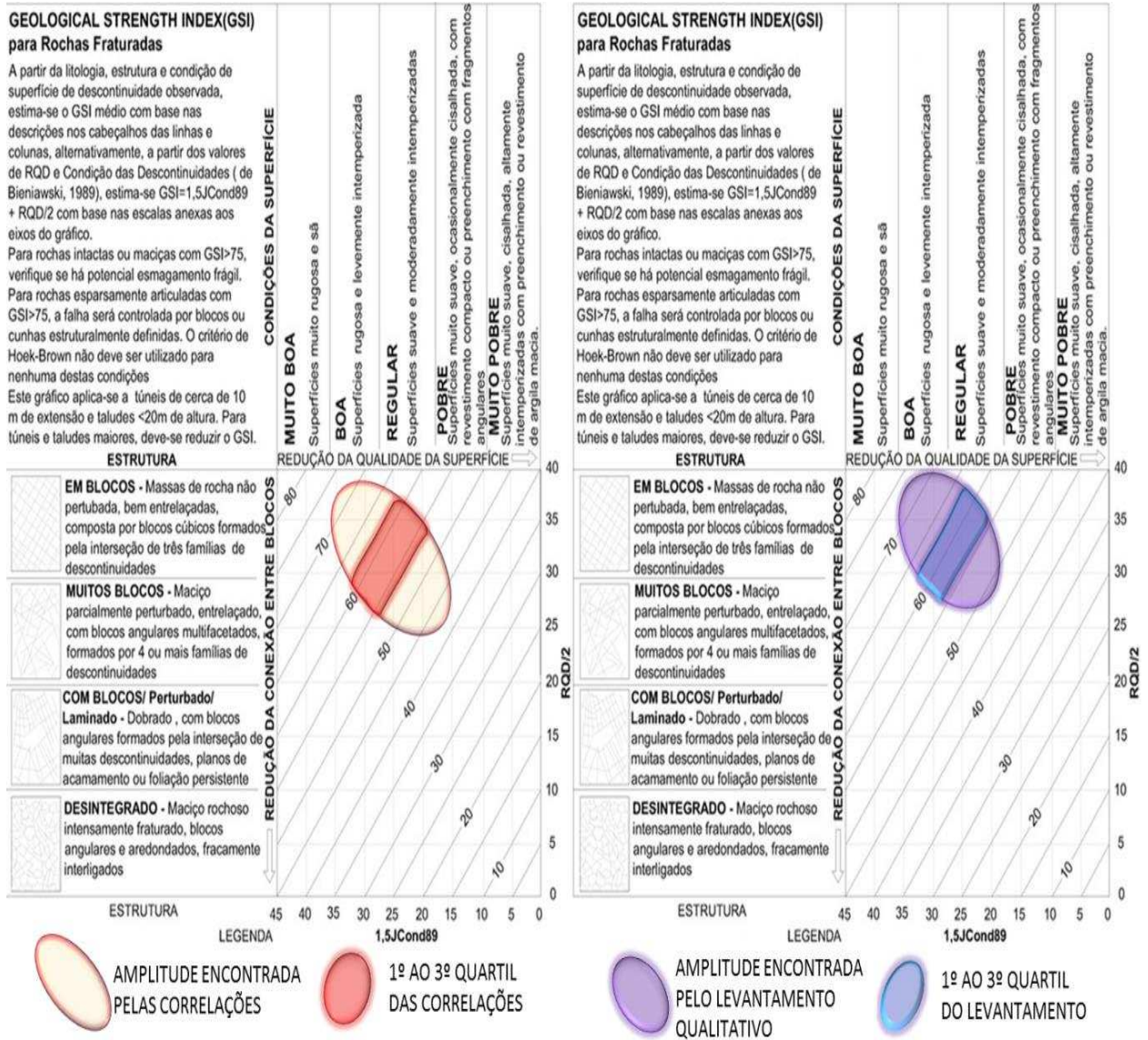


Gráfico 75 – Estimativa de GSI para os ICS, à esquerda pelo método quantitativo e, à direita pelo método qualitativo.

4.4.2 Itabiritos Médios (IM) – Mina Sapecado

Com relação aos itabiritos médios, o levantamento de campo consistiu em analisar 50 superfícies. Após a realização da classificação RMR dos itabiritos médios, as correlações de Hoek *et al.* (2013) foram empregadas. O Gráfico 76 mostra os resultados de GSI encontrados de forma quantitativa para os itabiritos médios.

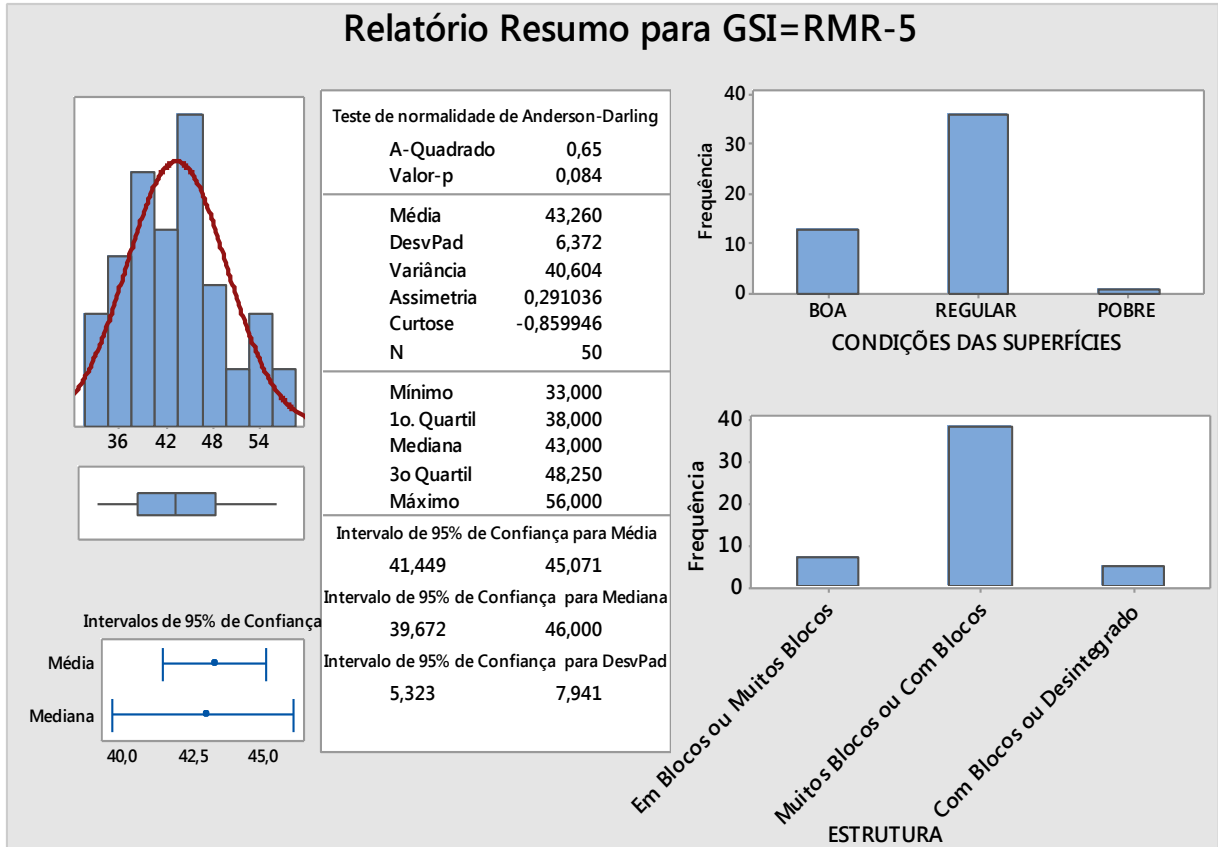


Gráfico 76 - GSI quantitativo de itabiritos médios da mina Sapicado.

Com o emprego das correlações, o valor médio esperado para os itabiritos médios ficou em torno de 43, apresentando valores entre 33 e 56. Para um intervalo de confiança de 95%, foram encontrados valores de GSI entre 41 e 45. Considerando o primeiro e o terceiro quartil do histograma, são esperados para os IM, valores de GSI entre 38 e 48.

Para as condições de superfície, foram encontrados resultados entre boa, regular e pobre, sendo mais esperadas superfícies regulares. Em se tratando das estruturas, são esperadas estruturas com muitos blocos ou com blocos perturbados.

Ao realizar o levantamento das condições das superfícies e estruturas de forma qualitativa em 50 pontos, verificaram-se que, de maneira geral, foi encontrada uma média de 43 pontos, tendo valores mínimos e máximos entre 33 e 46 pontos. Considerando os valores entre o primeiro e o terceiro quartil, os valores ficaram entre 38 e 49. Os resultados encontrados podem ser visualizados no Gráfico 77.

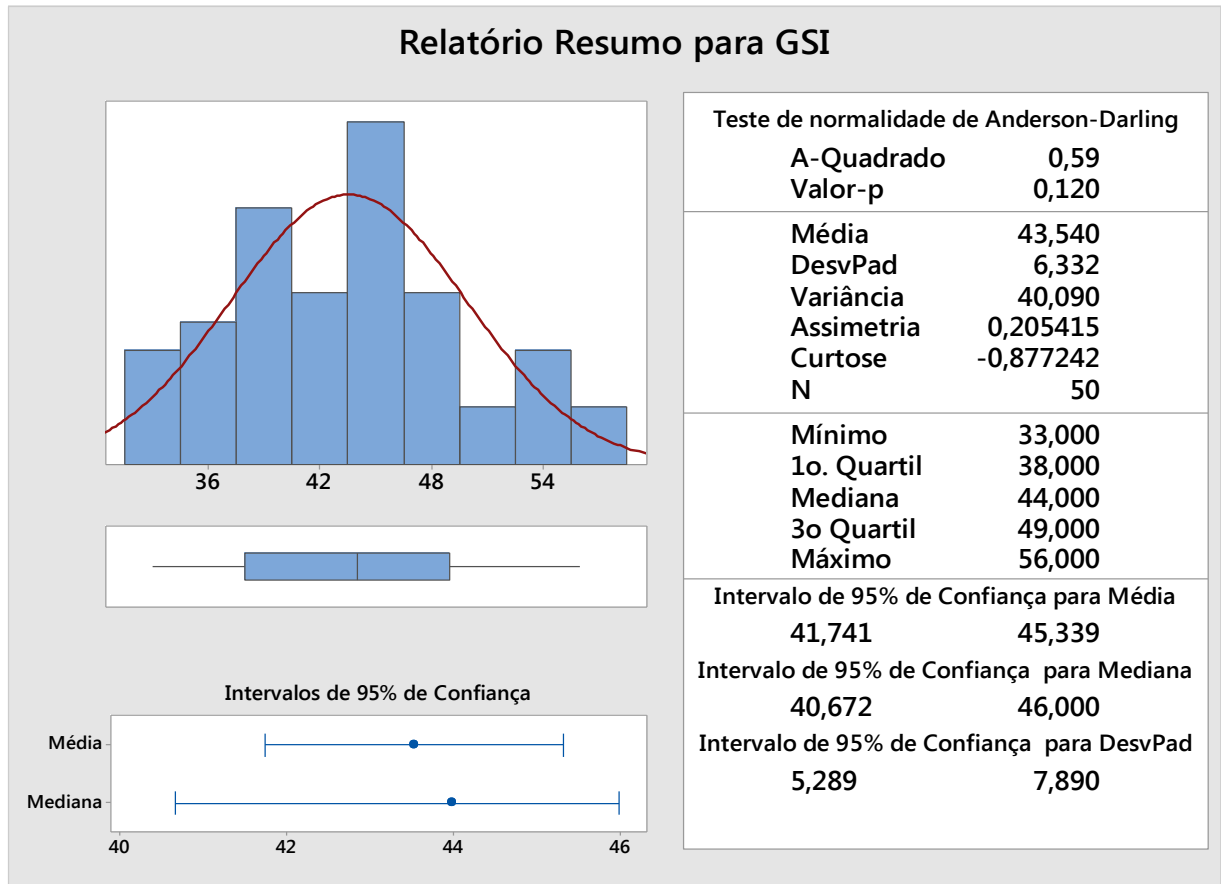


Gráfico 77 - GSI qualitativo para itabiritos médios da mina Sapecado.

Considerando o primeiro e o terceiro quartil da amostra, são esperados para ambos os métodos, valores entre 38 e 49. Portanto, a determinação dos valores de GSI em itabiritos médios do Quadrilátero Ferrífero mostraram resultados satisfatórios quando correlacionados ou quando realizados de forma visual. Como os dois métodos atendem os maciços estudados, cabe ao usuário decidir qual método utilizar. O Gráfico 78 mostra as regiões encontradas pelas duas formas de se alcançar os valores de GSI.

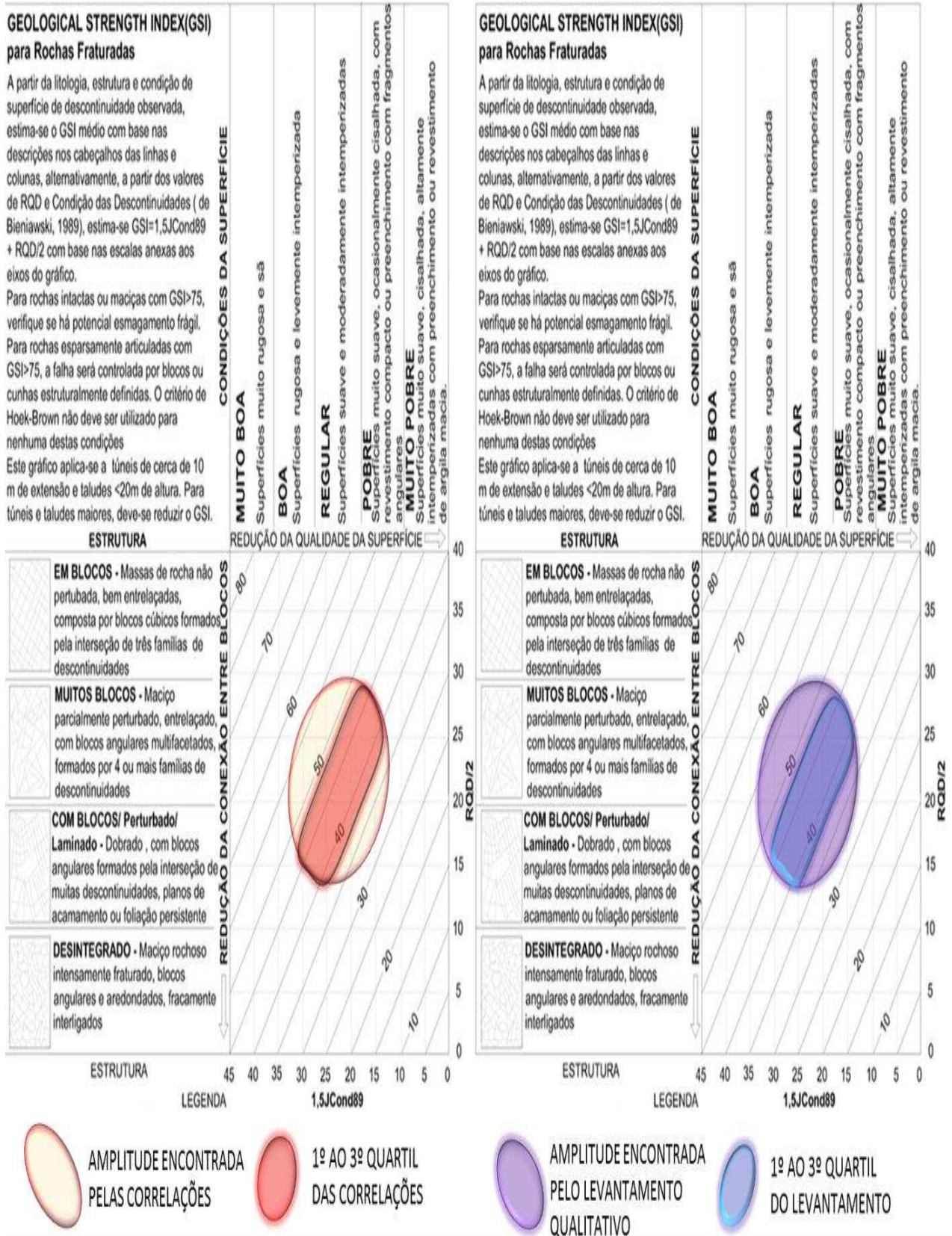


Gráfico 78 – Estimativa de GSI para os IM, à esquerda, pelo método quantitativo e, à direita, pelo método qualitativo.

4.4.3 Itabirito Friáveis (IF) – Mina Sapecado

Para os itabiritos friáveis (IF), o levantamento consistiu num total de 132 estações geomecânicas. O Gráfico 79 mostra os resultados de GSI encontrados de forma quantitativa para os itabiritos friáveis.

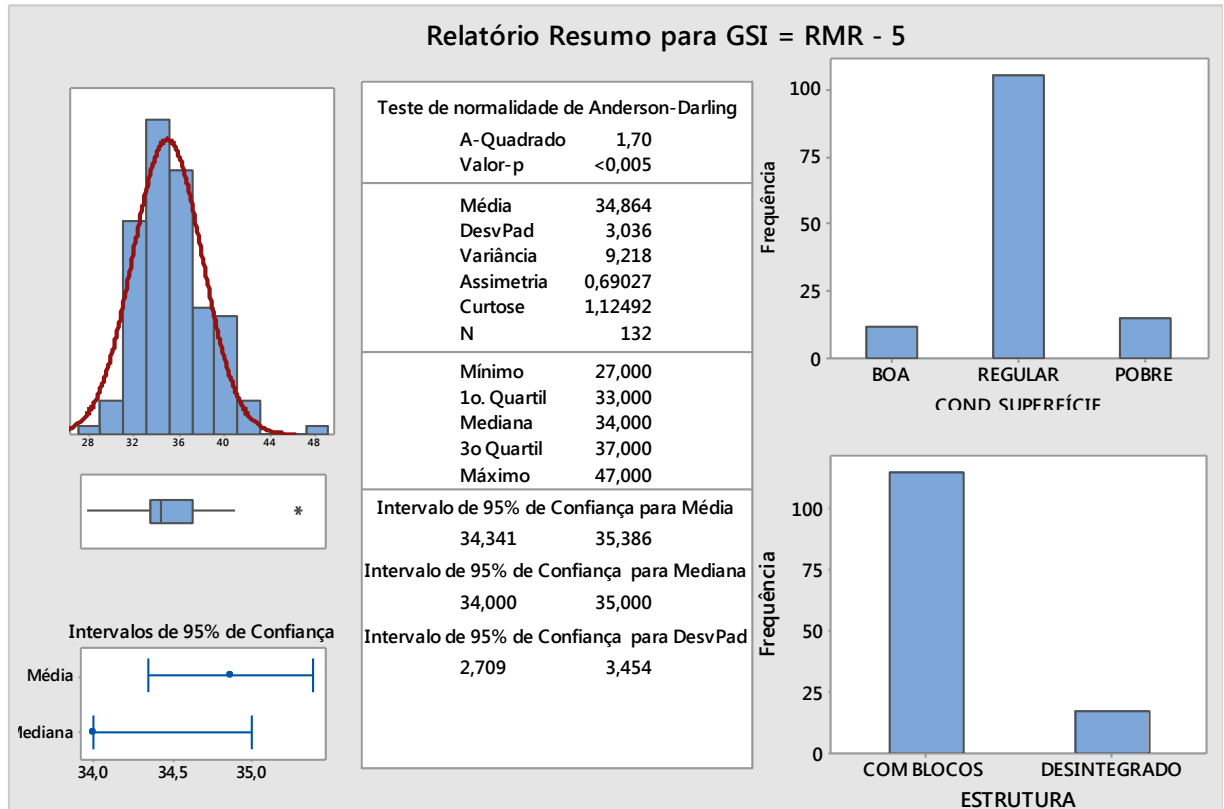


Gráfico 79 - GSI quantitativo para itabiritos friáveis da mina Sapécado.

No levantamento realizado, foi encontrada uma média de GSI de 35, tendo, para um intervalo de confiança de 95%, valores entre 34 e 35. Considerando do primeiro ao terceiro quartil é esperado valores entre 33 e 37.

Com relação às condições das superfícies, são esperadas superfícies entre boa, regular e pobre, tendo frequências maiores para as superfícies regulares. Já para as estruturas das paredes foram encontrados estruturas “com blocos” e desintegrado”. Com isso, esperam-se regiões no gráfico de GSI localizadas mais ao centro.

Ao realizar o levantamento das condições das superfícies e estruturas de forma qualitativa de 131 estações geológicas, foi encontrada uma média de 33 pontos, tendo valores mínimos e máximos entre 20 e 45 pontos. Considerando os valores entre o primeiro e o terceiro quartil, os valores ficaram entre 31 e 36. Os resultados encontrados podem ser visualizados no Gráfico 80.

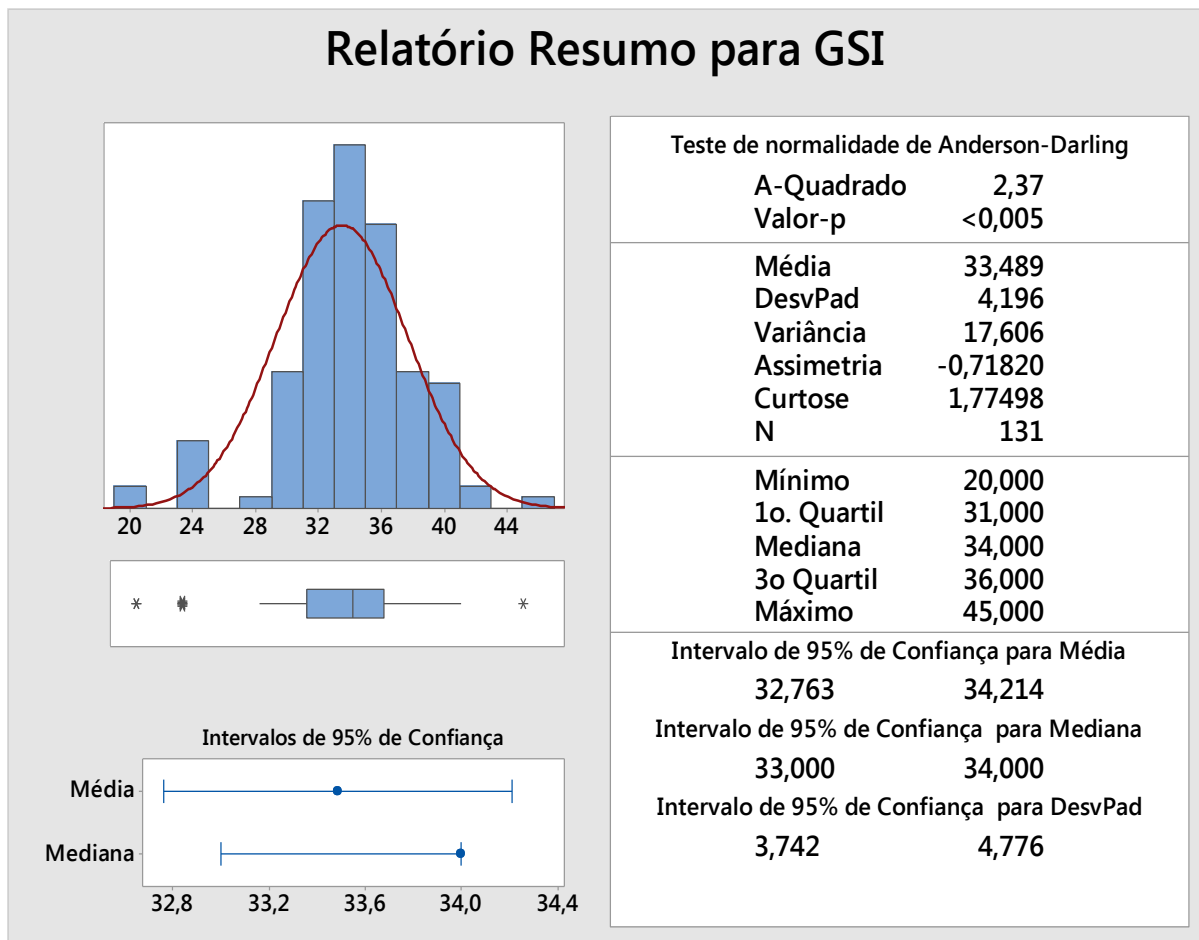


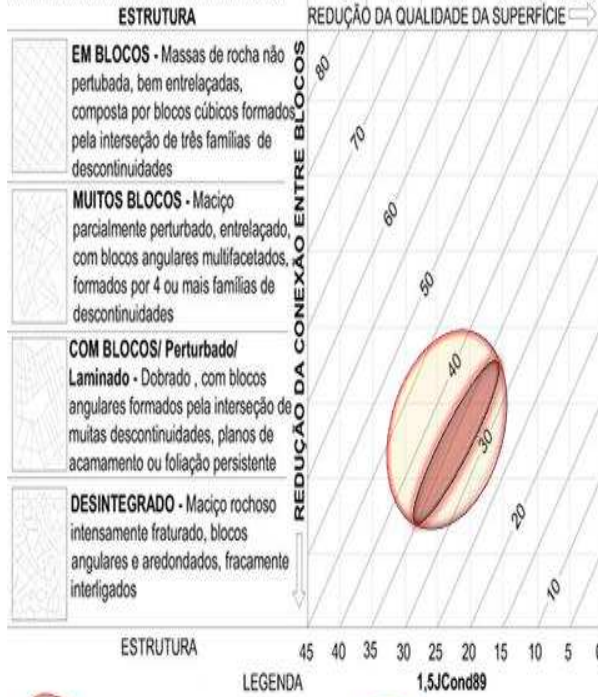
Gráfico 80 - GSI qualitativo para itabiritos friáveis.

Mesmo tendo os valores mínimos pela forma qualitativa divergindo dos valores encontrados pela forma quantitativa, foram encontrados valores próximos para o primeiro e terceiro quartil.

As regiões encontradas no Gráfico 81 a seguir mostram que, mesmo sendo encontradas regiões inferiores ao método quantitativo, os resultados em geral, foram satisfatórios, uma vez que as regiões de maior incidência encontrada para ambos os casos foram semelhantes.

**GEOLOGICAL STRENGTH INDEX(GSI)
para Rochas Fraturadas**

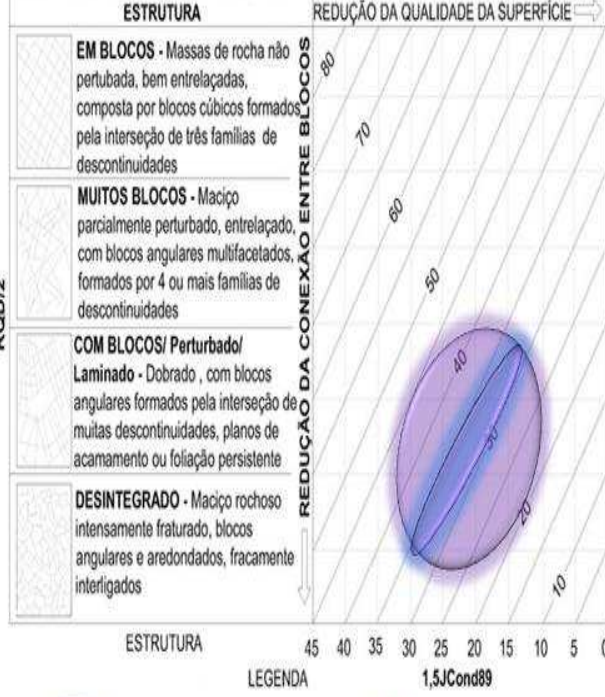
A partir da litologia, estrutura e condição de superfície de descontinuidade observada, estima-se o GSI médio com base nas descrições nos cabeçalhos das linhas e colunas, alternativamente, a partir dos valores de RQD e Condição das Descontinuidades (de Bieniawski, 1989), estima-se $GSI = 1,5JCond89 + RQD/2$ com base nas escalas anexas aos eixos do gráfico.
Para rochas intactas ou maciças com $GSI > 75$, verifique se há potencial esmagamento frágil. Para rochas esparsamente articuladas com $GSI > 75$, a falha será controlada por blocos ou cunhas estruturalmente definidas. O critério de Hoek-Brown não deve ser utilizado para nenhuma destas condições
Este gráfico aplica-se a túneis de cerca de 10 m de extensão e taludes <20m de altura. Para túneis e taludes maiores, deve-se reduzir o GSI.



LEGENDA
 AMPLITUDE ENCONTRADA PELAS CORRELAÇÕES
 1º AO 3º QUARTIL DAS CORRELAÇÕES

**GEOLOGICAL STRENGTH INDEX(GSI)
para Rochas Fraturadas**

A partir da litologia, estrutura e condição de superfície de descontinuidade observada, estima-se o GSI médio com base nas descrições nos cabeçalhos das linhas e colunas, alternativamente, a partir dos valores de RQD e Condição das Descontinuidades (de Bieniawski, 1989), estima-se $GSI = 1,5JCond89 + RQD/2$ com base nas escalas anexas aos eixos do gráfico.
Para rochas intactas ou maciças com $GSI > 75$, verifique se há potencial esmagamento frágil. Para rochas esparsamente articuladas com $GSI > 75$, a falha será controlada por blocos ou cunhas estruturalmente definidas. O critério de Hoek-Brown não deve ser utilizado para nenhuma destas condições
Este gráfico aplica-se a túneis de cerca de 10 m de extensão e taludes <20m de altura. Para túneis e taludes maiores, deve-se reduzir o GSI.



LEGENDA
 AMPLITUDE ENCONTRADA PELO LEVANTAMENTO QUALITATIVO
 1º AO 3º QUARTIL DO LEVANTAMENTO QUALITATIVO

Gráfico 81– Estimativa de GSI para os IF, à esquerda, pelo método quantitativo e, à direita, pelo método qualitativo.

Diante do resultado, fica evidente que os métodos propostos encontraram resultados semelhantes para as regiões no gráfico. Por isso, as correlações podem ser utilizadas para estimar regiões no gráfico de GSI em itabiritos friáveis do Quadrilátero Ferrífero. A tabela 21 resume os resultados encontrados para os diferentes itabiritos.

Tabela 21 - Valores de GSI para os Itabiritos da mina do Sapecado.

Itabiritos Compactos Silicosos	Itabiritos Médios	Itabiritos Friáveis
--------------------------------	-------------------	---------------------

GSI Quantitativo		GSI (Qualitativo)		GSI Quantitativo		GSI (Qualitativo)		GSI Quantitativo		GSI (Qualitativo)	
Média	1° ao 3 Quartil	Média	1° ao 3 Quartil	Média	1° ao 3 Quartil	Média	1° ao 3 Quartil	Média	1° ao 3 Quartil	Média	1° ao 3 Quartil
58,1	54 - 62	59,6	56 - 63	43,2	38 - 48	43,5	38 - 49	34,8	33 - 37	33,5	31 - 36
Estrutura											
Em blocos ou Muitos Blocos				Muitos Blocos ou Com Blocos				Entre Muitos Blocos a Desintegrado			
Condições da superfície											
Boa a Regular				Boa a Regular				Regular			

Fonte: Elaborado pelo Autor

Em geral, itabiritos com GSI acima de 51 foram considerados compactos, entre 38 e 51, estão os médios e abaixo de 38 estão os friáveis. Com relação à estrutura, itabiritos compactos foram classificados entre em blocos e muitos blocos, itabiritos médios entre muitos blocos e com blocos e itabiritos friáveis entre muitos blocos e desintegrados, tendo maior frequência para blocos perturbados ou desintegrados. Com relação às condições das superfícies, itabiritos compactos e médios estavam com superfícies entre boa e regular e, itabiritos friáveis estavam em sua grande maioria com superfícies regulares.

Apesar dos métodos quantitativos e qualitativos de GSI terem encontrado regiões semelhantes no gráfico de GSI, não necessariamente o modelo quantitativo pode estar entregando resultados satisfatórios quando comparado ao modelo qualitativo, já que existe a possibilidade de um método ter encontrado 30 pontos enquanto o outro tenha encontrado 45. Por isso, no Gráfico 82 foi verificada a relação alcançada entre os dois métodos propostos.

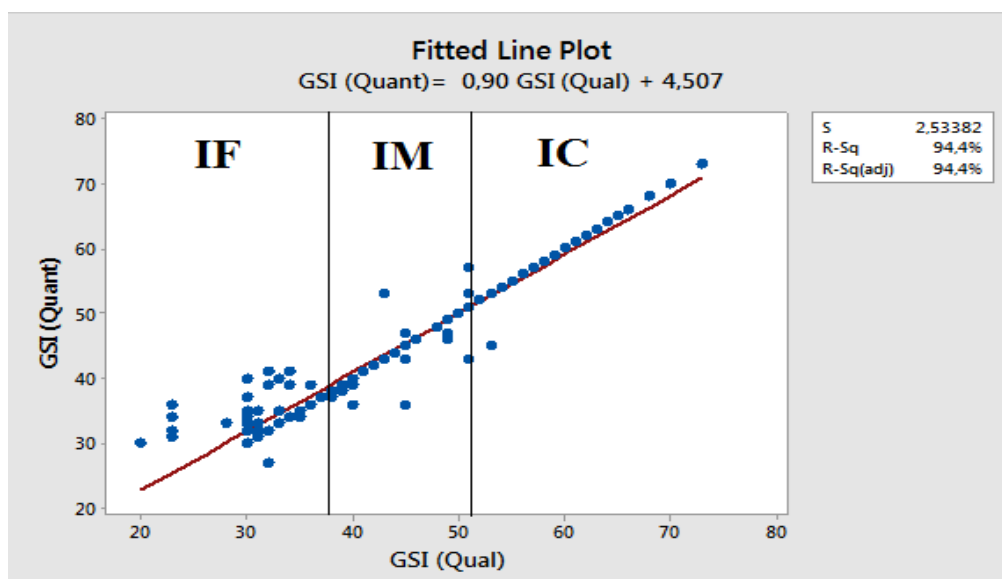


Gráfico 82 – Correlação entre os métodos quantitativos e qualitativos de GSI em itabiritos.

A regressão linear apresentou um ajustamento ao modelo estatístico (R^2) de 94,4%. No gráfico, a nuvem de pontos tem ótima relação com valores encontrados para os itabiritos compactos silicosos. Para os itabiritos médios, apesar de alguns pontos distanciarem da reta, os resultados foram satisfatórios. Em contrapartida, a nuvem de pontos apresentou grandes variações para os itabiritos friáveis, não apresentando resultados satisfatórios. Apesar de o método quantitativo apresentar regiões semelhantes no gráfico de GSI, a nuvem de pontos apresentada no Gráfico 82, mostrou grandes distorções em relação aos itabiritos friáveis, sendo por isso, não recomendadas na utilização dessas litologias. Apesar do Gráfico 82 limitar as litologias friáveis a 38 pontos, existe uma transição entre as litologias friáveis e médias, por isso, no Gráfico 83, optou-se por considerar todas as pontuações consideradas como friáveis. O Gráfico 83 mostra a distorção apresentada pelos métodos nos resultados encontrados para os itabiritos friáveis.

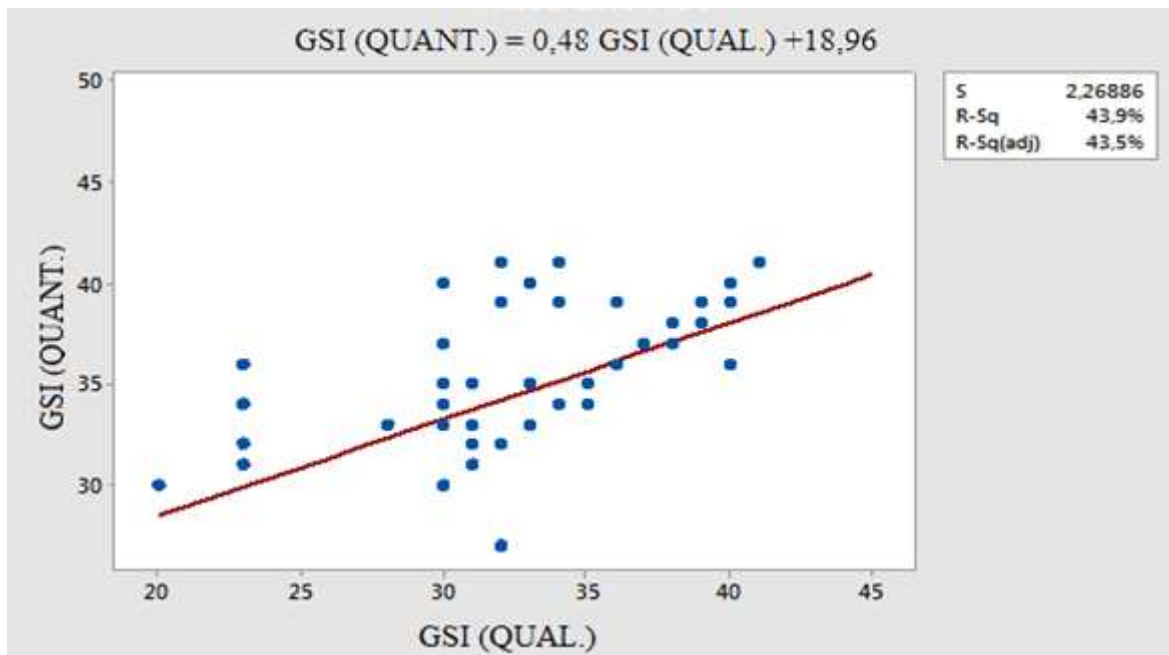


Gráfico 83 – Correlação entre os métodos quantitativos e qualitativos de GSI em IF

Além disso, foram constatadas certas dificuldades entre o método quantitativo e qualitativo para os maciços friáveis com valores de GSI inferiores a 33. Portanto, da mesma forma que o RMR_{1989} vem apresentando dificuldades em encontrar soluções para a classificação dos maciços rochosos de baixa qualidade, a quantificação do GSI não funcionou perfeitamente para a determinação dos parâmetros nos maciços rochosos de itabiritos friáveis. A dificuldade em encontrar resultados satisfatórios para as rochas fracas pelas classificações atuais pode ser devido às características de solo e resistência de rocha apresentadas pelos maciços friáveis encontrados em regiões de clima tropical.

4.5 Correlações de GSI para diferentes ajustes de RMR

A seguir são apresentadas possíveis correlações de GSI para os diferentes ajustes de RMR propostos por Celada *et al.* (2014), Santos *et al.* (2012), Bieniawski (2011) e Vale (2008) para as litologias presentes no Quadrilátero Ferrífero.

Para os maciços rochosos de consistência friável, a classificação RMR_{2011} foi realizada considerando os pesos em relação ao RQD e ao espaçamento da descontinuidade como sendo zero. Para as litologias de melhor competência, não são esperadas modificações, sendo por isso, ainda recomendada a fórmula $GSI = RMR - 5$ para essas litologias. O Gráfico 84 mostra a correlação encontrada para os litotipos de consistência friável.

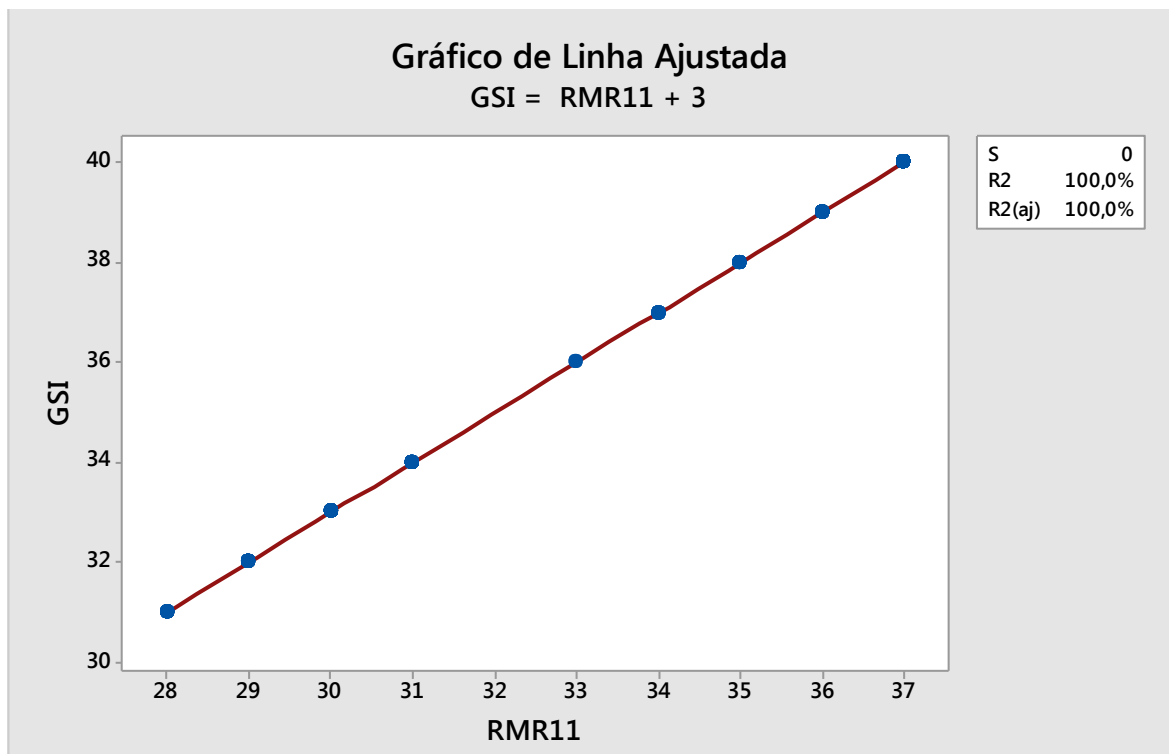


Gráfico 84 – Correlação GSI para as litologias de consistência friável da Mina do Tamanduá.

O resultado encontrado para as litologias de consistência friável existentes na Mina do Tamanduá é dado pela equação 27.

$$GSI = RMR_{2011} + 3 \quad (\text{eq.27})$$

Esse resultado já era esperado, já que, para todas litologias friáveis, foram descontados oito pontos referentes ao RQD e à condição das descontinuidades. Como a correlação de GSI para

o RMR é GSI menos cinco pontos, com o desconto de oito pontos na classificação RMR, foi necessário acrescentar três pontos para chegar ao mesmo valor de GSI de Hoek.

Vale ressaltar que, mesmo considerando as recomendações de Bieniawski (2011), o RMR não encontrou, para os maciços rochosos friáveis do Quadrilátero Ferrífero, resultados condizentes com o observado em campo. Sendo, portanto, ainda, devem ser aplicados ajustes em como o proposto por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008).

No Gráfico 85 é mostrada a correlação com GSI encontrada para os ajustes sugeridos pela Vale para a mina do Tamanduá.

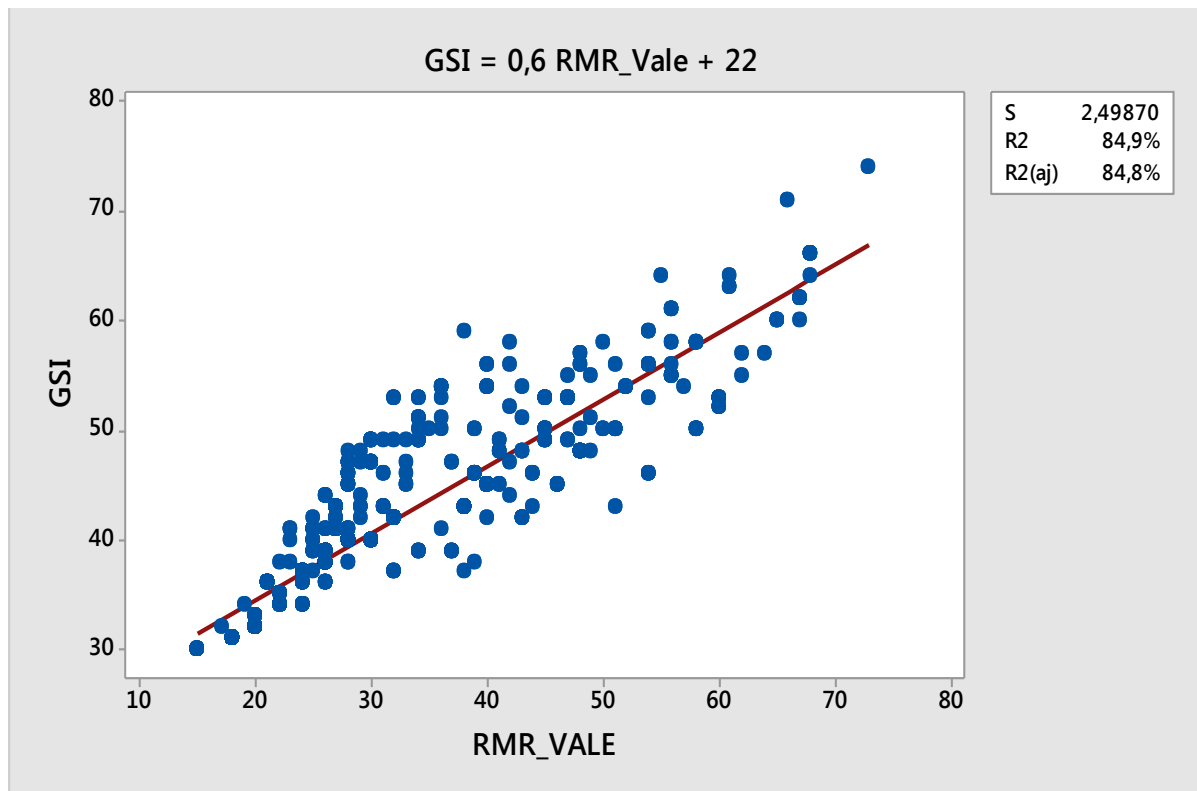


Gráfico 85– Correlação GSI para o RMR adaptado pela Vale para a Mina do Tamanduá.

A fórmula de GSI encontrada para o RMR adaptado pela Vale é dada pela equação 28.

$$GSI = 0,6 RMR_{Vale} + 22 \quad (\text{eq.28})$$

A correlação realizada entre o GSI e o RMR adaptado pela Vale apresentou bons resultados, já que a regressão linear do modelo apresentou uma boa distância padrão dos dados até a linha de regressão (S) e um ajustamento ao modelo estatístico (R²) de aproximadamente 85 %.

Para os ajustes propostos por Santos *et al.*(2012), o GSI estimado pode ser observado no Gráfico 86.

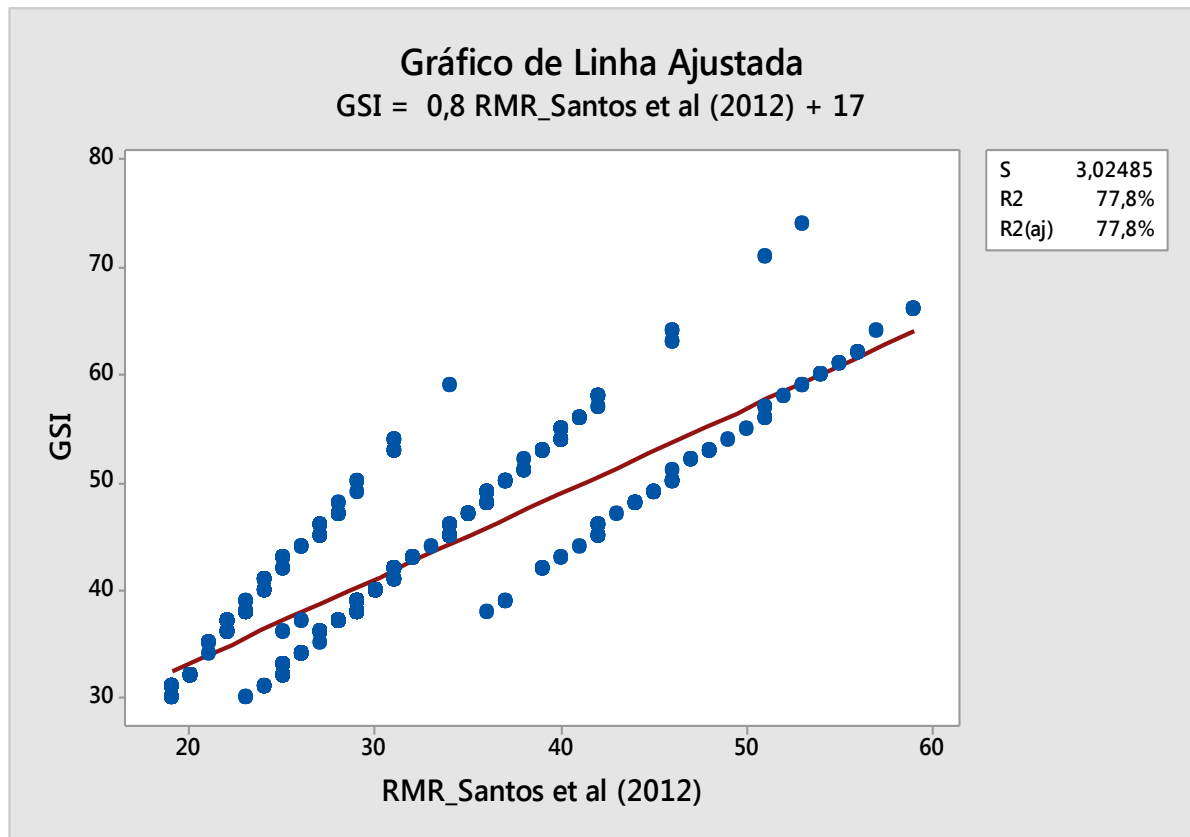


Gráfico 86– Correlação GSI para o RMR ajustado pelos fatores de Santos *et al.* (2012) para a Mina do Tamanduá.

Para os ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012) verificou-se uma separação dos pontos em 3 linhas, isso pode ter ocorrido devido ao fato do método multiplicar os valores originais de RMR por fatores relacionados com o grau de intemperismo, de forma constante. A diferença entre esses fatores pode ter influenciado a tendência dos pontos e, conseqüentemente, a inclinação das retas. Por isso, os resultados da correlação para o RMR ajustado pelos fatores de Santos *et al.* (2012) para a Mina do Tamanduá, apresentaram um menor ajustamento ao modelo estatístico, tendo um coeficiente de determinação (R^2) de aproximadamente 78 %. Apesar disso, foram realizadas validações de campo para as litologias encontradas na mina e os resultados foram satisfatórios. Portanto, a equação 29 pode ser utilizada para os maciços pertencentes à Mina do Tamanduá.

$$GSI = 0,8 RMR_{Santos\ (2012)} + 17 \quad (\text{eq.29})$$

Na tentativa de obter melhores correlações para os ajustes propostos por Santos *et al.* (2012), a classificação foi separada em relação ao Grau de Intemperismo (W). Portanto no Gráfico 87 a seguir, apresentam-se os resultados para os maciços rochosos considerados levemente alterados e classificados, segundo a ISRM (2007), como W2.

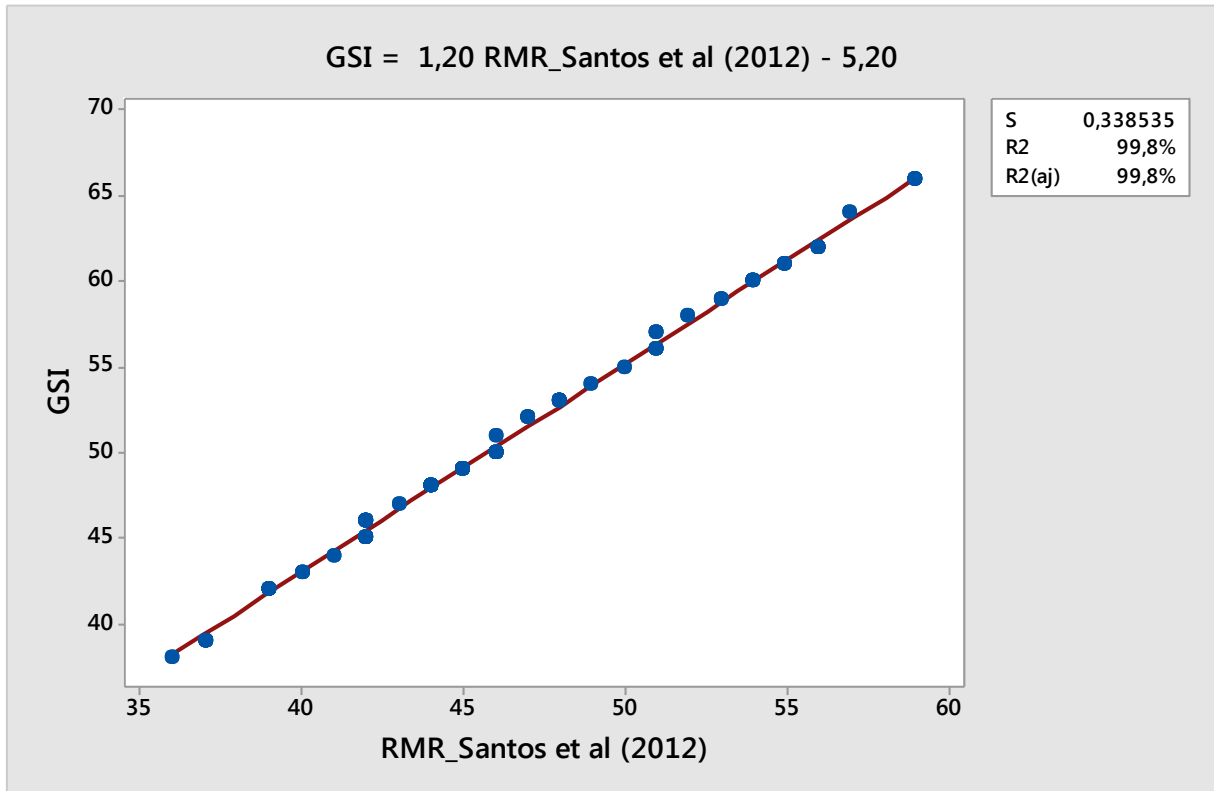


Gráfico 87 – Correlação GSI para o RMR ajustado por Santos *et al.* (2012) para maciços W2 da Mina do Tamanduá.

A separação da classificação em relação ao grau de intemperismo mostrou-se extremamente eficaz, uma vez que o coeficiente de determinação encontrado foi de 99,8% e o ajustamento da linha de regressão em relação aos pontos estavam próximos de 0, sendo portanto, uma correlação estatisticamente significativa. Por conta disso, para os maciços rochosos da Mina do Tamanduá caracterizados, segundo o grau de alteração, como W2, sugere-se para o RMR adaptador por Santos *et al.* (2012) a correlação mostrada na equação 30.

$$GSI = 1,2 RMR_{Santos(W2)} - 5,20 \quad (\text{eq.30})$$

Para os maciços rochosos caracterizados, em relação ao grau de intemperismo, como W3, a correlação para o RMR adaptado por Santos *et al.* (2012) pode ser visto no Gráfico 88.

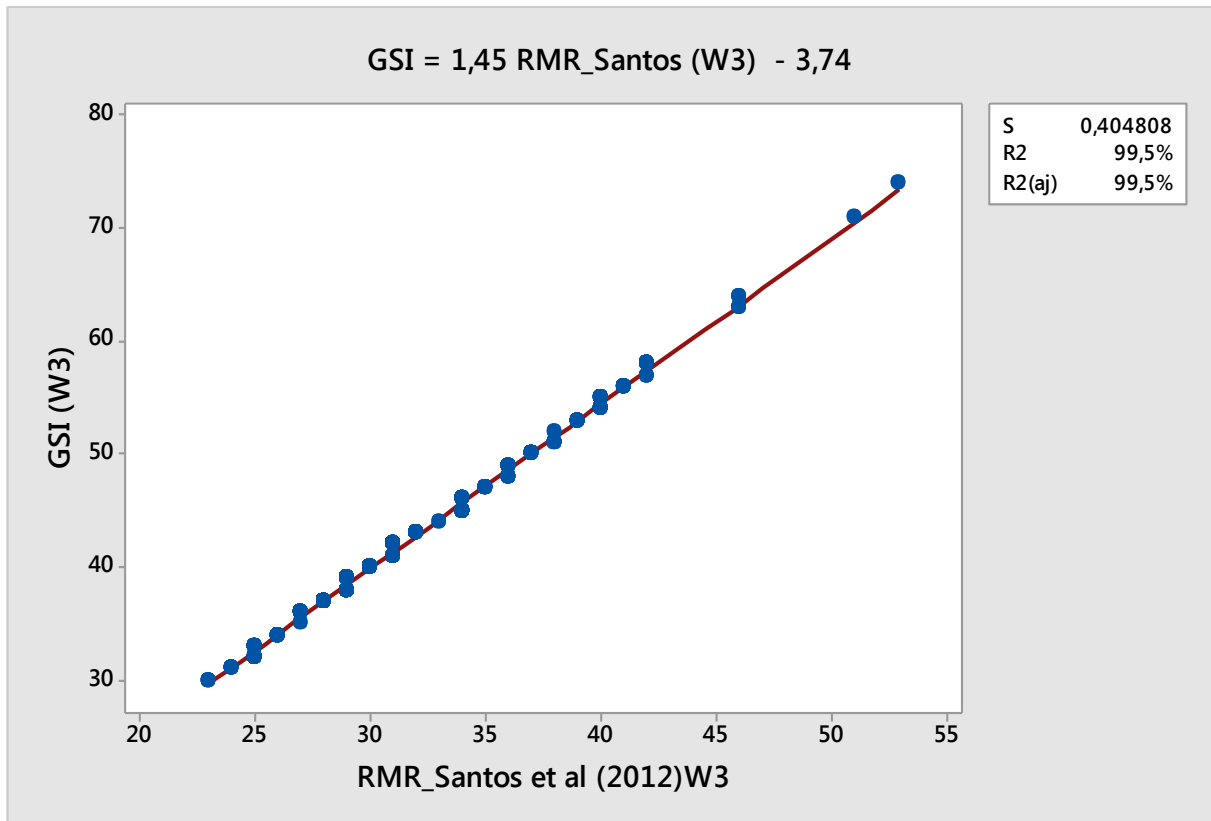


Gráfico 88 – Correlação GSI para o RMR ajustado por Santos *et al.* (2012) para maciços W3 da Mina

A correlação para os maciços rochosos da Mina do Tamanduá caracterizados como moderadamente alterados (W3), mostrou uma correlação também estatisticamente significativa. Por isso a equação 31 pode ser utilizada para encontrar os valores de GSI.

$$GSI = 1,45 RMR_{Santos (W3)} - 3,74 \quad (\text{eq.31})$$

Por fim, no Gráfico 89 é mostrado as correlações em relação aos maciços rochosos caracterizados como altamente intemperizados (W4) para o RMR adaptado por Santos *et al.* (2012).

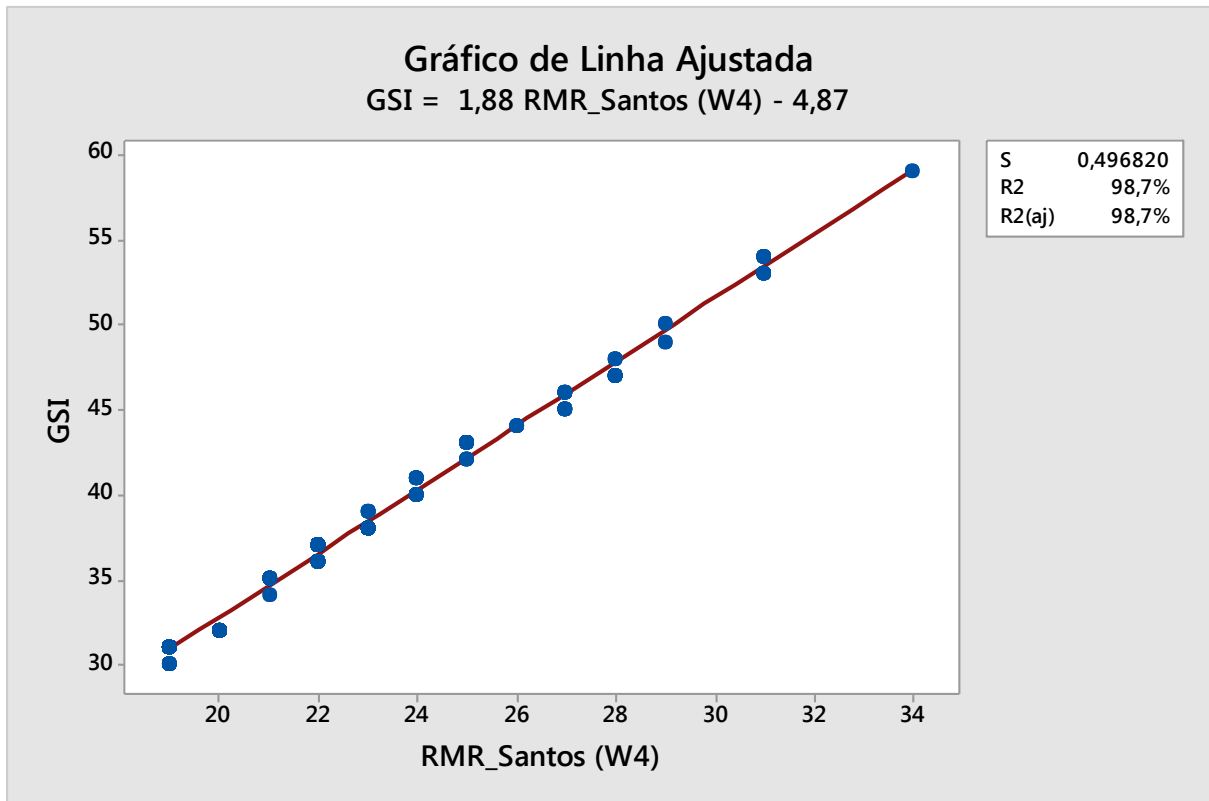


Gráfico 89 – Correlação GSI para o RMR ajustado por Santos *et al.* (2012) para maciços W4 da Mina do Tamanduá.

A correlação para os maciços rochosos altamente intemperizados também mostrou resultados excelentes, o que era de se esperar, uma vez que, o ajuste proposto por Santos *et al.* (2012) atribui fatores em relação ao grau de intemperismo. Portanto, para maciços rochosos caracterizados como W4, a fórmula da equação 32, pode ser usada para encontrar valores de GSI por meio dos resultados de RMR ajustado por Santos *et al.*(2012).

$$GSI = 1,88 RMR_{Santos (W4)} - 4,87 \quad (\text{eq.32})$$

Da mesma forma que Celada *et al.* (2014) determinou a correlação entre o RMR89 e o RMR14, neste trabalho foi realizado a correlação entre o RMR14 e o GSI, como demonstrado no Gráfico 90 a seguir.

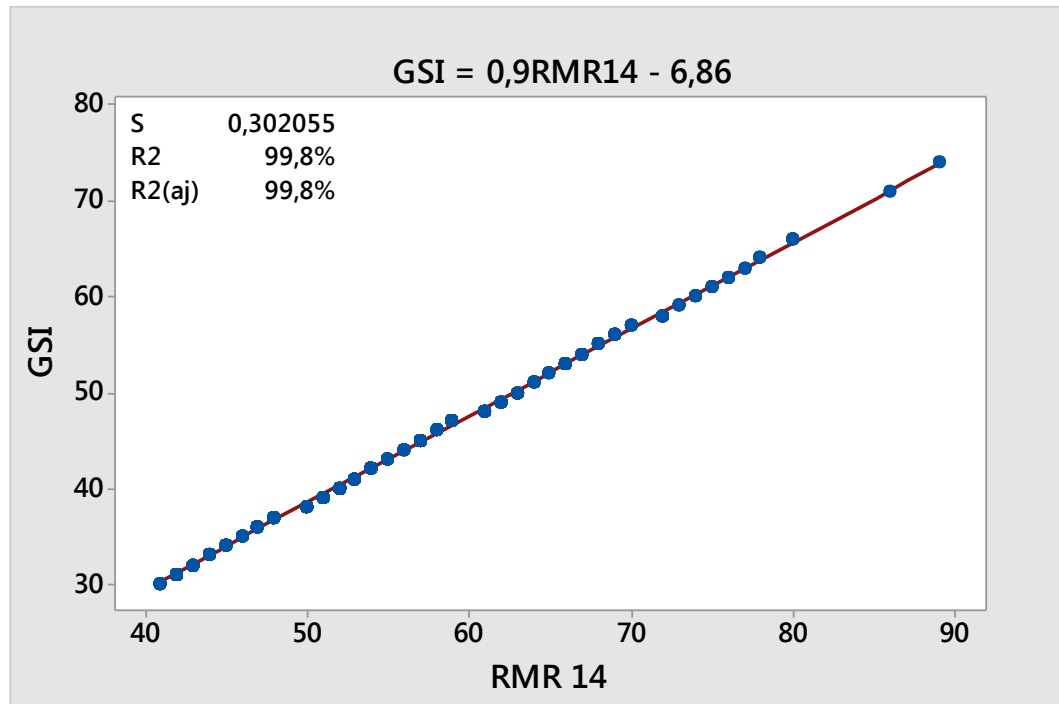


Gráfico 90 – Correlação entre GSI e RMR14

Ao correlacionar os resultados de RMR14 com os resultados de GSI verifica-se que, a equação apresentada no Gráfico 86 encontrou um R^2 de praticamente 100%. Como já era de se esperar, o RMR14 foi a classificação que apresentou maior penalização em relação ao GSI. Isso ocorreu devido ao fato do RMR14 aumentar a pontuação apresentada pelo RMR89, em vez de atribuir penalizações. Com isso, nota-se que mesmo com as modificações e atualizações recentemente empregadas na classificação RMR, o sistema ainda apresenta dificuldades em encontrar resultados mais fidedignos para os maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero, sendo, por isso, ainda recomendado o emprego de ajustes na classificação.

5. CONCLUSÕES

Alguns ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012), Bieniawski (2011) e Vale (2008) foram testados e aplicados a um caso real em minas do Quadrilátero ferrífero (Tamanduá e Sapecado), apresentando resultados mais fidedignos com a realidade observada no campo. Isso é importante porque o uso indistinto de RMR_{89} pode levar a classificações geomecânicas errôneas, uma vez que a mesma vem apresentando dificuldades em encontrar resultados satisfatórios para os maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero, principalmente para as litologias de consistência friável.

Tanto Santos *et al.* (2012) como Vale (2008) esperam ajustes não somente em maciços rochosos de baixa qualidade, mas também em maciços de melhor competência. Por isso, mesmo considerando-se as explicações dadas por Bieniawski (2011) e do RMR_{14} apresentado por Celada *et al.* (2014), o RMR ainda precisa de adaptações para os maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero.

O método sugerido por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008) apresentaram penalizações maiores do que as esperadas para os maciços rochosos de melhor competência, sendo, por isso, recomendado realizar verificações entre os resultados encontrados quando utilizado os ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008) em maciços rochosos resistentes.

Para as litologias de consistência média, tanto Santos *et al.* (2012) como Vale (2008), esperam penalizações na ordem de 15 pontos, ou seja, aproximadamente 35% em relação ao RMR_{89} . Porém, como cada classe RMR tem um intervalo de 20 pontos, a diferença entre os ajustes propostos nem sempre podem ser previstas pela classificação.

Com isso, parece que os ajustes atribuídos por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008) estão apresentando resultados mais adequados para as rochas brandas, enquanto que o RMR_{89} está caracterizando adequadamente as rochas de melhor competência. Nota-se que, Santos *et al.* (2012) e Vale (2008) reduzem, equivocadamente, os valores de RMR para os maciços compactos. Porém, se ajustam melhor aos maciços friáveis.

A quantificação de GSI, proposta por Hoek *et al.* (2013), agrupa-se em regiões semelhantes no gráfico de GSI quando comparado com a forma qualitativa, ao se realizar a verificação da relação entre os pontos mapeados pelas duas maneiras para os litotipos estudados. Apesar disso, constatou-se certa dificuldade em encontrar bons resultados em maciços de

consistências friáveis. Essa dificuldade das classificações geomecânicas em encontrar resultados satisfatórios para os maciços rochosos intemperizados das regiões de clima tropical pode ser devido às características de solo e resistência de rocha apresentadas por esses maciços friáveis, que, muitas vezes, apresentam comportamentos geomecânicos com maior variabilidade devido ao intenso processo de intemperismo sofrido. Por isso, em maciços do Quadrilátero Ferrífero, a quantificação do GSI somente é recomendada para os maciços de melhor competência, uma vez que os mesmos encontraram resultados satisfatórios tanto na determinação das regiões no gráfico de GSI, quanto nas correlações. Para os maciços friáveis, a quantificação pode servir para estimar valores prévios, sendo, por isso, recomendada a verificação em campo dos resultados encontrados. A fórmula de GSI apresentada por Hoek (1994) funciona para a classificação RMR quando considerados os valores como sendo mínimos, e não médios. Portanto, para qualquer alteração realizada no método, a correlação sugerida pelo autor não deve ser utilizada.

Foram apresentadas novas correlações de GSI, para diferentes ajustes de RMR, que podem ser utilizadas na Mina do Tamanduá. Quando o RMR for realizado considerando valores médios, uma nova correlação de GSI poderá ser utilizada para os maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero. A correlação de GSI encontrada para o RMR adaptado pela Vale (2008) encontrou resultados muito bons para os maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero. Já as correlações encontradas para o RMR ajustado por Santos *et al.* (2012) mostraram-se mais estatisticamente significativas quando analisadas considerando-se o grau de intemperismo do maciço. Como o método proposto por Santos *et al.* (2012) necessita da caracterização do grau de intemperismo, é recomendado a utilização da correlação considerando-se esse parâmetro.

Além disso, como as correlações apresentaram resultados satisfatórios, as fórmulas obtidas poderão auxiliar em tomadas de decisão em trabalhos que envolvam classificações geomecânicas nas minas do Tamanduá e Sapecado, pertencentes ao quadrilátero ferrífero, e em outras que apresentem as mesmas litologias e os mesmos tipos e graus de intemperismo.

O trabalho mostra a importância do conhecimento de cada método de classificação, uma vez que a origem e as limitações impostas pelo método nem sempre condizem com as condições dos maciços rochosos analisados. Quando isso ocorre, é recomendada a utilização de ajustes nessas classificações, principalmente quando forem utilizadas para maciços de consistência friável.

Por isso, neste trabalho, os ajustes sugeridos por Santos *et al.* (2012) e Vale (2008) para o

Quadrilátero Ferrífero mostraram melhores resultados em maciços rochosos friáveis, quando comparado com a classificação RMR original. A semelhança encontrada entre os resultados apresentadas pelos ajustes, mostraram que diferentes métodos esperam penalizações semelhantes para os maciços friáveis presentes na área de estudo. Já o o RMR_{89} apresenta melhores resultados para as rochas de melhor competência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, p.30, 1998.

ÁVILA, C. R. **Determinação das propriedades mecânicas de maciços rochosos e/ou descontinuidades utilizando classificações geomecânicas: uma comparação entre os diversos métodos de classificação.** Dissertação de Mestrado. Nugeo, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2012.

AZEVEDO, I.C.D.; MARQUES, E.A.G. Introdução à Mecânica das Rochas. **Caderno Didático**. Ed. UFV, Viçosa, MG, 2006. 361p.

BARTON, N; LIEN, R; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnels support: **Rock Mechanics**. 6 ed, 183-236 p.1974.

BIENIAWSKI, Z.T. **Geomechanics Classification of Rock Masses and its Applications in Tunneling**. In: 3RD INTERNATIONAL CONGRESS OF ROCK MECHANICS. Denver: ISRM, 1974. 27-32 p.

BIENIAWSKI, Z.T. **Rock Mechanic Design in Mining & Tunnelling, Rotterdam, 1984.** 272 p.

BIENIAWSKI, Z.T. **Engineering Rock Mass Classification: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering, USA, 1989.** 251p.

BRADY, B.H.G.; BROWN, E.T. **Rock Mechanics for Underground Mining**. 2ed. London: Chapman & Hall,1994. 571 p.

BRAGA, J.; COLOMBO, P.; CATARINO, M. **Estimativa de recursos de minério de ferro das mina de Galinheiro e Sapecado com a incorporação dos novos dados de sondagem.** Belo Horizonte : Relatório Interno Vale, 2010. p.9-11.

BROWN, E. T. **Strength of models of rock with intermittent joints.** Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, v. 96, n. SM6, 1970. p. 18–22.

CELADA, B.; TARDÁGUILA, I.; RODRÍGUEZ, A.; VARONA, P.; BIENIAWSKI, Z.T. **Actualización y mejora del RMR.** INGEPRES, 2014.

CHAVES, S. S.; SANTOS, Y.L.; PAREDES, J.P.; ZENÓBIO, A. A. **Avaliação de Aderência do Índice de Ajuste (Aw) Utilizando o Grau de Intemperismo no Sistema RMR Comparando com as Alterações de Bieniawski (2011).** SBMR, 2014.

COSTA, T. A. **Caracterização geológica-geotécnica e modos de ruptura do minério hematítico friável nas Minas da Vale, Borda Oeste do Quadrilátero Ferrífero - MG.** Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brazil, 2009.

CRUZ, F. A. R. **Espacialização de parâmetro de rocha intacta em modelos de blocos utilizando krigagem da indicatriz.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2017

DEERE, D. U.; MILLER, R. . **Engineering classification and index properties for intact rock**. Technical Report, Air Force Weapons Laboratory, v. 1, , p. 65–116, 1966.

FERREIRA FILHO, F.A.F.; DIAS, E.C. **Geologia estrutural da mina do Tamanduá - MBR: Borda oeste do Quadrilátero Ferrífero - MG**. Nova Lima, MG, 2004.

GIANI, G. P. **Rock-Slope-Stability-Analysis**. Rotterdam: A.A.Balkema, 1992.

HOEK, E. Brittle Fracture of Rock. In: K.G. STAGG AND O.C ZIENKIEWICZ (Ed.). **Rock Mechanics in Engineering Practice**. I ed. London: John Wiley & Sons Ltd, 1968. p. 99–124.

HOEK E. Strength of rock and rock masses. **ISRM News Journal**, 1994. 4-16 p.

HOEK, E. Practical rock engineering, p. 313, 2007. 313 p.

HOEK, E.; BROWN, E. T. Empirical strength criterion for rock masses. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 18, n. 2, p. 23, 1980.

HOEK, E.; CARRANZA, C.; CORKUM, B. **Hoek-brown failure criterion** – 2002 edition. Narms-Tac, p. 267–273, 2002.

HOEK, E.; CARTER, T.G., DIEDERICHS, M.S. **Quantification of the Geological Strength Index Chart**. Proc. 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium held in San Francisco. CA, USA. 2013. p. 23-26.

HOEK, E; BROWN, E. T. **Strength of rock and rock masses**. In: Underground Excavations in Rock. Inst. Min. Metall. London, UK. 527 p.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. **The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring**. In: Ulusay, R. & Hudson, J.A. 1974-2006.

_____. **Rock Characterization Testing and Monitoring**. E.T.Brown, 1981. 211 p.

_____. **Suggested Method for Point Load Strength**. Int. J. Rock Mechanics Min, 2007. 53-59p.

JAEGER, J. C.; COOK, N. W. **Fundamentals of Rock Mechanics**. 3^a Ed. London, 1979. 593p.

JAQUES, S.D. **Caracterização e classificação de maciços rochosos da mina de Volta Grande, Nazareno, Minas Gerais**. 2014. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2014. 202 p

LOWSON, A. R.; BIENIAWSKI, Z. T. **Critical Assessment of RMR based Tunnel Design Practices: a Practical Engineer's Approach**. Rapid Excavation & Tunneling Conference, p.16, 2013.

MARINOS, P.; HOEK, E. **Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch**. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v. 60, n. 2, p. 85–92, 2000.

MARINOS, V.; MARINOS, P.; HOEK, E. (2005). “**The geological Strength index: applications and limitations**”. Bull. Eng. Geol. Environ, 2005. 55-65 p

NONATO, C.A. **Contribuição à Caracterização Geológica-Geomecânica no Quadrilátero Ferrífero**. 2002. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, MG. 2002. 186 p.

OURO PRETO GEOLOGIA E PESQUISA MINERAL LTDA. **Estudo geológico-geotécnico da mina do tamanduá**. Nova Lima, MG. Relatório Interno, 2004.

PALMSTROM, A. **The volumetric joint count-a useful and simple mensure of the degree of jointing**. In: *Proceedings of the Fourth International Congress IAEG*, New Delhi, vol. V, p. 221-229, 1982.

PALMSTROM, A. **Meaurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD)**. *Tunnels and Underground Space Technology*, 2005. 326-377.

SANTOS, T.B. **Aplicabilidade das classificações geomecânicas e retroanálises para estimação de propriedades dos maciços**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto- Escola de Minas, Ouro Preto, MG, 2015. 147p.

SANTOS, Y.L. *et al.* **Proposta de índice de ajuste (aw) utilizando o grau de intemperismo no sistema RMR (rock mass rating) de classificação do maciço rochoso**. *CBMINA*, 2012

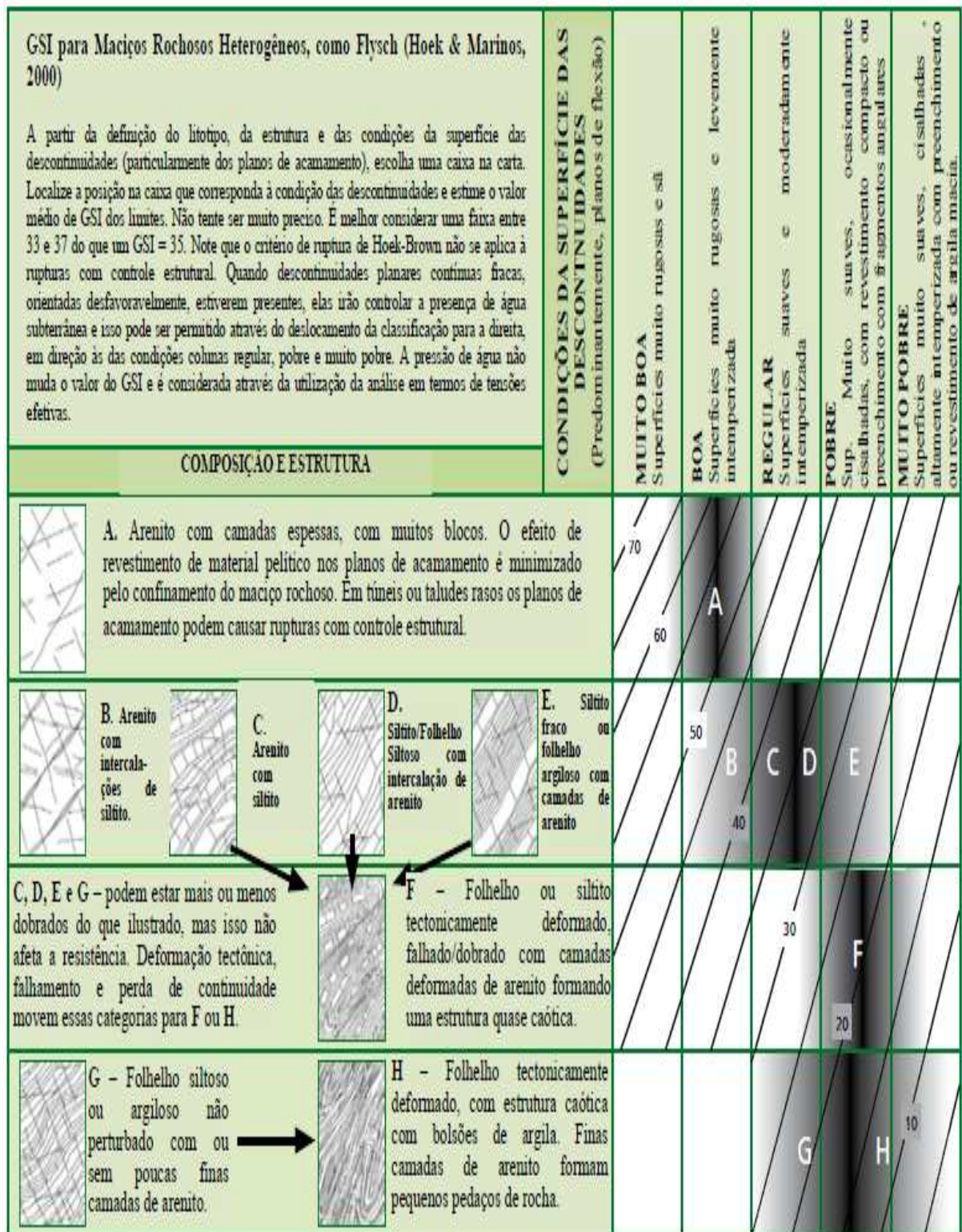
SERRA JUNIOR, E.; OJIMA, L. M. **Caracterização e classificação de maciços rochosos**. In: OLIVEIRA, A. M. do S.; BRITO, S. N. A. de. *Geologia de Engenharia*, 2011. 211-226 p

VALE. **Mapeamento Litoestrutural e Geomecânico da Mina do Tamanduá: Relatório Técnico nº “VL 707.07-09-E-CA-RT-03-034-01”**. Nova Lima, MG. Relatório Interno Vale, p.123, 2008.

ZACARIAS, C. M. **Classificação De Maciços Rochosos Da Mina Do Córrego Do Meio Aplicada Às Operações De Perfuração**. UFMG, 2003.

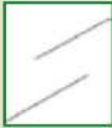



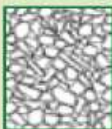

WYLLIE, D. C.; MAH, C. W. **Rock Slope Engineering, Civil and Mining**, 4th Edition. London and New York: Spon Press and Taylor & Francis Group, 2004. 431p.

ANEXO A – GRÁFICO PARA ESTIMATIVA DE GSI (Maciços heterogêneos)



Estimativa do GSI para maciços rochosos heterogêneos. (traduzido de MARINOS *et al.*, 2005)

ANEXO A – GRÁFICO PARA ESTIMATIVA DE GSI (Maciços fraturados)

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX para Rochas Fraturadas (Hoek & Marinos, 2000) A partir da definição do litotipo, da estrutura e das condições da superfície das descontinuidades é possível fornecer estimativas precisas. É melhor considerar uma faixa entre 33 a 37, por exemplo, do que definir um GSI = 35. Note que a estrutura da tabela não se aplica a rupturas sem controle estrutural. Nos locais em que planos estruturais fracos estão presentes em uma orientação desfavorável em relação à face do talude, este irá dominar o comportamento do maciço rochoso. A resistência ao cisalhamento de superfícies em rocha sujeitas à deterioração como resultado de mudanças no conteúdo de umidade será reduzida se houver presença de água. Quando trabalhando com rochas muito à direita do diagrama é possível considerar-se condições úmidas. A pressão de água é considerada nas análises em termos de pressões efetivas.		CONDIÇÕES DA SUPERFÍCIE								
		MUITO BOA Superfície muito rugosa e sã	MUITO BOA Superfície muito rugosa e sã	REGULAR Superfície suave e moderadamente intemperizada	POBRE Sup. cislhada, altamente intemperizada com revestimento compacto ou preenchimento ou fragmentos angulares	MUITO POBRE Superfície cislhada (slickenside), altamente intemperizada com preenchimento ou revestimento de argila macia.				
ESTRUTURA		REDUÇÃO DA QUALIDADE DA SUPERFÍCIE →								
Diminuição da Conexão entre Porções de Rocha ↓		90	80	70	60	50	40	30	20	10
 INTACTA OU MACIÇA – Rocha intacta ou maciça in situ com poucas descontinuidades muito espaçadas								N/A	N/A	
 EM BLOCOS – Massas de rocha não perturbada, bem entrelaçada, composta por blocos cúbicos formados pela interseção de três famílias de descontinuidades										
 MUITOS BLOCOS – Maciço parcialmente perturbado, entrelaçado, com blocos angulares multifacetados, formados por 4 ou mais famílias de descontinuidades										
 COM BLOCOS / Perturbado / Laminado – Dobrado, com blocos angulares formados pela interseção de muitas descontinuidades. Planos de acamamento ou foliação persistentes										
 DESINTEGRADO – Maciço rochoso intensamente fraturado, blocos angulosos e arredondados, fracamente interligados										
 LAMINADO/CISLHADO – Não há blocos, em função ao reduzido espaçamento de planos de foliação ou cislhamento.		N/A	N/A							

Estimativa do GSI para maciços rochosos fraturados (traduzido de MARINOS *et al.*, 2005)

ANEXO B – CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA

		Grau de Alteração	
		(Particularidade do material rochoso)	
CODIGO	GRAU	DESCRIÇÃO	01 (continua)
		Nenhum sinal visível de material rochoso alterado.	
		Rocha sã, alteração mineralógica nula a incipiente.	
01	FRESCA	Minerais preservam as características originais de brilho, cor e clivagem. (W1)	
		Descoloração sutil das principais descontinuidades.	
		Nas FFB tanto as bandas silicosas quanto as ferruginosas estão coesas e sem presença de alteração.	
		Descoloração leve indicando alteração da rocha e das descontinuidades.	
		Todo material pode estar descolorido.	
		Alteração mineralógica perceptível.	
02	LEVEMENTE ALTERADA	Menos de 5% do maciço rochoso está alterado.	
		Cores esmaecidas. Perda do brilho dos minerais. (W2)	
		Nas FFB tanto as bandas silicosas quanto as ferruginosas estão coesas, presença de oxidação nas bandas ferruginosas e nas descontinuidades.	
		Menos da metade do material rochoso está decomposto, a rocha fresca ou descolorida está presente como uma estrutura descontínua ou em pedaços.	
		Toda a matriz apresenta-se com evidências de oxidação, caulinitização.	
03	MODERADA- MENTE ALTERADA	Pode ocorrer material mais alterado e ou solo ao longo das descontinuidades. (W3)	
		Nas FFB tanto as bandas silicosas quanto as ferruginosas apresentam-se menos coesas (principalmente as bandas silicosas), presença acentuada de oxidação nas bandas ferruginosas, nas descontinuidades e filmes de hidróxidos de ferro nas bandas silicosas.	
		Mais da metade do material rochoso está decomposto e ou desagregado a rocha fresca ou descolorida está presente como uma estrutura descontínua ou em pedaços.	
		Alteração mineralógica muito acentuada.	
04	ALTAMENTE ALTERADA	Cores bastante modificadas.	
		Possível presença de núcleos rochosos menos alterados. (W4)	
		Nas FFB as bandas silicosas apresentam-se com baixa coesão e as bandas ferruginosas apresentam-se menos coesas com presença acentuada de oxidação, nas bandas silicosas aparecem filmes de hidróxidos de ferro.	
		Todo material está decomposto, porém com a estrutura original preservada.	
05	COMPLETA- MENTE ALTERADA	Saprolito. (W5)	
		Nas FFB tanto as bandas silicosas quanto as ferruginosas apresentam-se com baixa coesão (sílica liberada) e as bandas ferruginosas apresentam-se alto índice de oxidação (limonitizados).	
		Todo material rochoso foi decomposto e a estrutura original esta destruída.	
06	SOLO RESIDUAL	Solo formado por alteração “in situ”. (W6)	
		Nas FFB as bandas de sílica então liberadas com filmes de hidróxido de ferro, as bandas ferruginosas estão completamente hidratadas.	

Fonte: ISRM, 2007, adaptado de Vale, 2008

ANEXO B – CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA

Grau de Consistência			02
CODIGO	GRAU	(Particularidade do material rochoso) DESCRIÇÃO	
00	EXTREMAM. MACIA	Penetrável pelo polegar. Marcado com a unha. Esfarela facilmente sob pressão dos dedos e dissolve completamente quando agitado em água. R_0 (T_c 0,25 a 1 Mpa)	
01	MACIA	Penetrável por lâmina provoca sulcos profundos, desagregáveis manualmente. Esfarela ao golpe do martelo. R_1 (T_c 1 a 5 Mpa)	
02	MEDIA MACIA	Facilmente penetrável por lâmina; quebra-se facilmente a um golpe do martelo. Somente as bordas do fragmento podem ser quebradas pela pressão dos dedos. R_2 (T_c 5 a 25 Mpa)	
03	MEDIA	Quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo, as bordas do fragmento não podem ser quebradas pela pressão dos dedos. A lâmina de aço provoca sulcos rasos na superfície. R_3 (T_c 25 a 50 Mpa)	
04	MEDIA DURA	A lâmina de aço dificilmente provoca sulcos na superfície. Quebra-se a um golpe de martelo. R_4 (T_c 50 a 100 Mpa)	
05	DURA	Quebra-se com vários golpes de martelo. Não risca pela lamina de aço. R_5 (T_c 100 a 250 Mpa)	
06	EXTREMAM. DURA	São impenetráveis por lâminas de aço. Os fragmentos possuem bordas ásperas e cortantes. Quebra-se com dificuldade a vários golpes do martelo. R_6 ($T_c >250$ Mpa)	

Fonte: ISRM, 1978, adaptado de Vale, 2008

ANEXO B – CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA

		Grau de Fraturamento	
		(Particularidade do Material Rochoso)	03
CODIGO	GRAU	DESCRIÇÃO	
01	MACIÇO	Espaçamento das descontinuidades > 2 m 1 descontinuidades a cada 3 metros (F1)	
02	POUCO FRATURADO	Espaçamento das descontinuidades entre 60 cm e 2 m 2 a 3 descontinuidades a cada 3 metros 0 a 1 descontinuidades por metro (F2)	
03	MODERADAMENTE FRATURADO	Espaçamento das descontinuidades entre 20 e 60 cm 4 a 10 descontinuidades a cada 3 metros 2 a 5 descontinuidades por metro (F3)	
04	MUITO FRATURADO	Espaçamento das descontinuidades entre 6 e 20 cm 11 a 30 descontinuidades a cada 3 metros 6 a 10 descontinuidades por metro (F4)	
05	INTENSAMENTE FRATURADO	Espaçamento das descontinuidades entre 2 e 6 cm 30 a 60 descontinuidades a cada 3 metros 11 a 20 descontinuidades por metro (F5)	
06	FRAGMENTADO	Espaçamento das descontinuidades entre < 2 cm 60 descontinuidades a cada 3 metros >20 descontinuidades por metro (F6)	
-	DESAGREGADO	Sem possibilidade de se determinar às descontinuidades. Material destruído pela sondagem	

Fonte: ISRM, 1978, adaptado de Vale, 2008

Tipo de Descontinuidade (adaptado de Vale, 2008)

CÓDIGO	TIPO DE DESCONTINUIDADE	CÓDIGO	TIPO DE DESCONTINUIDADE
01	Junta	06	Fratura
02	Acamamento	07	Foliação
03	Lamina	08	Veio
04	Lente	09	Falha
05	Xistosidade	10	Zona de Cisalhamento

Fonte: Adaptado de Vale, 2008

Tabela 19 – Alteração das Paredes da Descontinuidade

CODIGO	GRAU	DESCRIÇÃO
01	SEM ALTERAÇÃO	Nenhum sinal visível de material rochoso alterado;
		Alteração mineralógica nula a incipiente;
		Minerais preservam as características originais de brilho, cor e clivagem;
		Possível descoloração sutil das paredes;
		Bandas coesas.
02	POUCO ALTERADA	Descoloração leve indicando alteração da rocha e das descontinuidades;
		Alteração mineralógica perceptível;
		Cores esmaecidas. Perda do brilho dos minerais;
		Presença de oxidação nas descontinuidades;
		Bandas coesas.
03	MODERADAMENTE ALTERADA	Evidências de oxidação, caulinitização;
		Pode ocorrer material mais alterado e/ou solo ao longo das descontinuidades;
		Bandas menos coesas.
		Alteração mineralógica muito acentuada;
		Cores bastante modificadas;
04	MUITO ALTERADA	Presença acentuada de oxidação nas bandas ferruginosas, nas descontinuidades e filmes de hidróxido de ferro nas bandas silicosas;
		Bandas silicosas com baixa coesão, bandas ferruginosas menos coesas.
		Todo material está decomposto, porém com a estrutura original preservada;
		Saprolito;
		Sílica liberada e alto índice de oxidação.

Fonte: Adaptado de Vale, 2008.

ANEXO B – CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA

Tabela 20 – Abertura da Descontinuidade

CODIGO	GRAU	DESCRIÇÃO
01	FECHADA	--
02	PEQUENA	Abertura < 0,3 cm
03	MODERADA	Abertura entre 0,3 cm e 2 cm
04	LARGA	Abertura entre 2 cm e 10 cm
05	CAVERNOSA	Abertura >10 cm

Fonte: Adaptado de Vale, 2008

Tabela 21 – Rugosidade

CODIGO	DESCRIÇÃO
1	Superfície lisa com estrias; Aspecto plano e regular; S1.
2	Superfície lisa; Aspecto ondulado e regular, S2.
3	Superfície levemente rugosa; Aspecto ondulado e irregular; S3.
4	Superfície rugosa; Aspecto regular, mas escalonada, S4.
5	Superfície extremamente rugosa; Aspecto Irregular e escalonado; S5.

Fonte: Adaptado de Vale, 2008

Tabela 22 – Tipo de Preenchimento

TIPO DE MATERIAL DO PREENCHIMENTO	ABREVIATURA	TIPO DE MATERIAL DO PREENCHIMENTO	ABREVIATURA
ARGILA	AG	ÓXIDOS	OX
MICA	MI	CANGA	CG
TALCO	TC	QUARTZO	QT
CARBONATO	CB	OUTROS	Consultar tabela log
HIDRÓXIDOS	HI		

Fonte: Adaptado de Vale, 2008

Tabela 23 – RQD

RQD – Rock Quality Designation		09
CODIGO	%	DESCRIÇÃO
01	0-25	Muito Pobre (Q1)
02	25-50	Pobre (Q2)
03	50-75	Regular (Q3)
04	75-90	Bom (Q4)
05	90-100	Excelente (Q5)

Fonte: Deere; Miller, 1996, *apud* Vale, 2008**ANEXO C – PESOS ADOTADOS PARA O RMR ADAPTADO PELA Vale**

Pesos adotados para GC e GA no RMR adaptado pela Vale

GRAU DE CONSISTÊNCIA (GC)	GRAU DE ALTERAÇÃO (GA)	Peso
EXTREMAMENTE	FRESCA	3
EXTREMAMENTE	LEVEMENTE	3
EXTREMAMENTE	MODERADAMENTE	0
EXTREMAMENTE	ALTAMENTE	0
EXTREMAMENTE	COMPLETAMENTE	0
EXTREMAMENTE	SOLO RESIDUAL	0
MACIA	FRESCA	5
MACIA	LEVEMENTE	5
MACIA	MODERADAMENTE	3
MACIA	ALTAMENTE	3
MACIA	COMPLETAMENTE	3
MACIA	SOLO RESIDUAL	3
MEDIA MACIA	FRESCA	7
MEDIA MACIA	LEVEMENTE	7
MEDIA MACIA	MODERADAMENTE	5
MEDIA MACIA	ALTAMENTE	5
MEDIA MACIA	COMPLETAMENTE	3
MEDIA MACIA	SOLO RESIDUAL	3
MÉDIA	FRESCA	17
MÉDIA	LEVEMENTE	17
MÉDIA	MODERADAMENTE	9
MÉDIA	ALTAMENTE	9
MÉDIA	COMPLETAMENTE	7
MÉDIA	SOLO RESIDUAL	7
MEDIA DURA	FRESCA	23
MEDIA DURA	LEVEMENTE	23
MEDIA DURA	MODERADAMENTE	17
MEDIA DURA	ALTAMENTE	17
MEDIA DURA	COMPLETAMENTE	14
MEDIA DURA	SOLO RESIDUAL	14
DURA	FRESCA	35
DURA	LEVEMENTE	35
DURA	MODERADAMENTE	28
DURA	ALTAMENTE	28
DURA	COMPLETAMENTE	21
DURA	SOLO RESIDUAL	21
EXTREMAMENTE	FRESCA	35
EXTREMAMENTE	LEVEMENTE	35
DURA	ALTERADA	
EXTREMAMENTE	MODERADAMENTE	35
EXTREMAMENTE	ALTAMENTE	35
EXTREMAMENTE	COMPLETAMENTE	33
EXTREMAMENTE	SOLO RESIDUAL	33

Fonte: Adaptado de Vale, 2008

ANEXO C – PESOS ADOTADOS PARA O RMR ADAPTADO PELA Vale

Pesos adotados para GF e TD no RMR adaptado pela Vale

RQD	GRAU DE FRATURAMENTO (GF)	Peso	TIPO DE DESCONTINUIDADE (TD)	Peso
Muito Pobre	DESAGREGADO (0)	3	Junta	3
Muito Pobre	MACIÇO (1)	5	Acamamento	0
Muito Pobre	POUCO FRATURADO (2)	5	Lamina	3
Muito Pobre	MODERADAMENTE (3)	4	Lente	3
Muito Pobre	MUITO FRATURADO (4)	4	Xistosidade	0
Muito Pobre	INTENSAMENTE (5)	3	Fratura	3
Muito Pobre	FRAGMENTADO (6)	3	Foliação	0
Pobre (Q2)	DESAGREGADO (0)	7	Veio	6
Pobre (Q2)	MACIÇO (1)	12	Falha	0
Pobre (Q2)	POUCO FRATURADO (2)	12	Zona de Cisalhamento	0
Pobre (Q2)	MODERADAMENTE (3)	10		
Pobre (Q2)	MUITO FRATURADO (4)	10	ALTERAÇÃO DAS	Peso
Pobre (Q2)	INTENSAMENTE (5)	8	FRESCA	6
Pobre (Q2)	FRAGMENTADO (6)	8	LEVEMENTE ALTERADA	5
Regular (Q3)	DESAGREGADO (0)	11	MODERADAMENTE	3
Regular (Q3)	MACIÇO (1)	16	ALTAMENTE ALTERADA	1
Regular (Q3)	POUCO FRATURADO (2)	16	COMPLETAMENTE	1
Regular (Q3)	MODERADAMENTE (3)	15		
Regular (Q3)	MUITO FRATURADO (4)	15	ABERTURA	Peso
Regular (Q3)	INTENSAMENTE (5)	12	FECHADA	6
Regular (Q3)	FRAGMENTADO (6)	12	PEQUENA	1
Bom (Q4)	DESAGREGADO (0)	16	MODERADA	0
Bom (Q4)	MACIÇO (1)	19	LARGA	0
Bom (Q4)	POUCO FRATURADO (2)	19	CAVERNOSA	0
Bom (Q4)	MODERADAMENTE (3)	18		
Bom (Q4)	MUITO FRATURADO (4)	18	TIPO DE PREENCHIMENTO	Peso
Bom (Q4)	INTENSAMENTE (5)	17	ARGILA (Ag)	0
Bom (Q4)	FRAGMENTADO (6)	17	MICA (Mi)	0
Excelente	DESAGREGADO (0)	18	TALCO (Tc)	0
Excelente	MACIÇO (1)	20	CARBONATO (Cb)	2
Excelente	POUCO FRATURADO (2)	20	HIDROXIDOS (Hi)	2
Excelente	MODERADAMENTE (3)	20	OXIDOS (Ox)	4
Excelente	MUITO FRATURADO (4)	20	CANGA (Cg)	4
Excelente	INTENSAMENTE (5)	19	QUARTZO (Qt)	6
Excelente	FRAGMENTADO (6)	19	-	6

Fonte: Adaptado de Vale, 2008.

Pesos adotados para Rugosidade (RU) no RMR adaptado pela Vale

RUGOSIDADE (RU)	PESO
EXTREMAMENTE RUGOSA; ÁSPERA E IRREGULAR; S1.	6
RUGOSA; LISA E IRREGULAR; S2.	5
LEVEMENTE RUGOSA; LISA E REGULAR; S3.	3
SUPERFÍCIE LISA; S4.	1
SUPERFÍCIE COM <i>SLICKENSIDE</i> ; LISA ESTRIADA; S5.	0

Fonte: Adaptado de Vale, 2008.