

18º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental

APLICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DE DEERE E MILLER (1966) NA ANÁLISE DA DEFORMABILIDADE E RESISTÊNCIA DE ALGUMAS ROCHAS INTACTAS BRASILEIRAS POR MEIO DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

Mateus Zanini Broetto ¹; Rodrigo Peluci de Figueiredo ²; Nilo Rodrigues Junior ³; Fernando Maia Saliba ⁴; Camila Broetto Milli ⁵; Murilo da Silva Espíndola ⁶.

Resumo – A caracterização da deformabilidade e resistência de rochas intactas é fundamental para a compreensão do comportamento mecânico dos maciços rochosos em projetos de engenharia geotécnica, mineração e obras subterrâneas. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo caracterizar a deformabilidade e resistência de algumas rochas brasileiras por meio da classificação de Deere e Miller (1966). Foram estudadas ao todo 12 litotipos, compreendendo Granitos, Gnaisses, Basaltos, Xistos, Filitos, Quartzitos, Dolomitos e Formação Ferrífera Bandada (BIF). Como resultados, verificou-se que as rochas de estrutura maciça apresentaram valores de módulo relativo (MR) dentro da faixa esperada para rochas isotrópicas (300 a 500). No entanto, dentro dessa mesma faixa, foram identificados litotipos anisotrópicos com foliação sub-horizontal bem definida, e outros com estratificação/foliação pouco pronunciada, tendendo a uma estrutura maciça. Os planos de fraqueza representados por essas estruturas tiveram pouco impacto na resistência à compressão uniaxial (RCU) das amostras, quando comparados à redução significativa observada em litologias com foliação ou estratificação oblíqua a subvertical bem demarcadas. Para essa última condição, por conta da redução da Resistência à Compressão Uniaxial, foram observados MRs médios classificados como elevados (MR>500), típicos de rochas anisotrópicas. As rochas compostas por bandamentos oblíquos de espessuras variáveis, também apresentaram MRs médios superiores a 500, porém, não tão elevados quanto os das rochas foliadas.

Abstract – The understanding the deformability and strength of intact rocks is crucial for assessing the mechanical behavior of rock masses in geotechnical engineering, mining, and underground works. In this context, the present study aims to characterize the deformability and strength of selected Brazilian rocks using the Deere and Miller (1966) classification. A total of 12 lithotypes were analyzed, including Granites, Gneisses, Basalts, Schists, Phyllites, Quartzites, Dolomites, and Banded Iron Formation (BIF). The results showed that massive rocks exhibited relative modulus (MR) values within the expected range for isotropic rocks (300 to 500). However, within this same range, anisotropic lithotypes with well-defined sub-horizontal foliation, as well as others with weakly developed foliation/stratification tending toward a massive structure, were also identified. The weakness planes represented by these structures had little impact on the uniaxial compressive strength (UCS) of the samples, especially when compared to the significant strength reduction observed in lithologies with well-marked oblique to subvertical foliation or stratification. For the latter condition, due to the reduction in UCS, average MR values were classified as high (MR > 500), typical of anisotropic rocks. Rocks composed of oblique banding with variable thicknesses also presented average MR values above 500, although not as high as those observed in foliated rocks.

Palavras-Chave: Módulo Relativo; Módulo de Elasticidade; Resistência à Compressão Uniaxial; Foliação; Estratificação;

¹ Geól., MSc, Universidade Federal do Ouro Preto (UFOP) – Laboratórios Quaternion, (31) 9 9305-5369, mateuszanini7@gmail.com.

² Eng., Prof., Dr, Universidade Federal do Ouro Preto (UFOP), (31) 9 9711-2777, rpfigueiredo@ufop.edu.br.

³ Geól, Laboratórios Quaternion, (53) 9 9956-4259, nilorodriguesjunior@gmail.com

⁴ Eng, MSc, - Laboratórios Quaternion - Tec3 Geotecnia e Recursos Hídricos, (31) 9 8893-5653, fetsaliba@gmail.com

⁵ Geól., MSc, Universidade Federal do Ouro Preto (UFOP) – DF+ Geotecnia, (27) 9 9929-9273, camila.milli@aluno.ufop.edu.br.

⁶ Eng., Prof., Dr, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), (48) 9 9614-9445, murilo.espindola@ufsc.br.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização da deformabilidade e resistência de rochas intactas por meio de ensaios em laboratório é imprescindível para o entendimento do comportamento e desempenho dos maciços rochosos e de obras de engenharias desenvolvidas no seu entorno. Já é reconhecido que os parâmetros obtidos em laboratório frequentemente superestimam a resistência e deformabilidade do maciço devido à existência de descontinuidades. No entanto, esses parâmetros têm inúmeras aplicações, podendo ser utilizados como: (i) índices de correlação com outros parâmetros e observações de campo; (ii) parâmetros de deformabilidade e resistência corrigidos por uma pontuação atribuída à qualidade do maciço rochoso; (iii) parâmetros para a seleção de métodos de lavra e escavação de obras subterrâneas, entre outras aplicabilidades diversas.

Uma série de classificações correlacionando a Resistência à Compressão Uniaxial (RCU) da rocha com o Módulo de Elasticidade (E) foram elaboradas nas últimas décadas, sendo a classificação por meio do Módulo Relativo (MR), proposta por Deere e Miller (1966), provavelmente a mais utilizada. O Módulo Relativo representa a razão entre o Módulo de Elasticidade e a Resistência à Compressão Uniaxial (E/RCU) obtida para um determinado litotipo. Além disso, os autores estabeleceram regiões típicas de valores encontrados para cada tipo de rocha em uma carta de $E \times RCU$. Deere e Miller (1966) também definiram três regiões delimitadas por linhas diagonais, representando um mesmo MR (isolinhas de MR). A região central seria representada por rochas com um módulo relativo intermediário (MR entre 200 e 500), as quais geralmente são maciças e isotrópicas tendo como exemplos os granitos, quartzitos, diabásios e calcários/dolomitos. Nas regiões superior (MR > 500) e inferior (MR < 200) à região intermediária, geralmente são encontradas rochas com uma certa anisotropia, comumente em forma de xistosidade, bandamento, foliação ou estratificação, tendo como principais exemplos os xistos, folhelhos e arenitos. Rochas com um plano de fraqueza sub-vertical tendem a apresentar módulos relativos altos (MR > 500), por terem resistência mais baixa devido à facilidade de ruptura pelos planos de fraqueza (mecanismo de fendilhamento axial), e ainda por exibirem módulos de elasticidade mais altos. Para o caso de rochas com o plano de fraqueza sub-horizontal, os valores de MR tendem a ser baixos (MR < 200) devido ao módulo de elasticidade ser menor, por conta do fechamento de espaços e microfissuras paralelas à anisotropia, e a resistência, por sua vez, tender a ser maior para planos de fraqueza mais horizontalizados.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo caracterizar a deformabilidade e resistência de algumas rochas brasileiras por meio da classificação de Deere e Miller (1966), a qual permitiu a avaliação comparativa do comportamento mecânico entre os diferentes tipos de rochas, com especial atenção às influências de heterogeneidades texturais/mineralógicas e planos de anisotropia. A análise considerou como essas características interferem na relação entre módulo de elasticidade e a resistência à compressão uniaxial, refletindo-se nos respectivos valores de módulo relativo (MR).

2. LOCALIZAÇÃO E CONTEXTO GEOLÓGICO DAS LITOLOGIAS ESTUDADAS

Foram analisadas 12 litotipos, de regiões e contextos geológicos variados conforme apresentado Tabela 1. Especialmente, as regiões são apresentadas na Figura 1. Para a Região 1 foram amostrados granitos pertencentes à Suíte Planalto com composição variando de monzo para sienogranítica. Macroscopicamente, apresentam textura fina a média, composta por proporções variáveis de hornblenda e biotita. Por vezes, apresentam foliação de biotita. A Região 2 é representada por amostras de xisto, dolomito e formação ferrífera que são pertencentes ao grupo Colomi. O xisto possui textura fina a média e estrutura fortemente orientada, devido aos minerais micáceos. Os dolomitos são estratificados e possuem textura fina a média. A formação ferrífera bandada (BIF) possui granulação predominantemente fina a média, com espessura de bandamentos variada. A Região 3 possui amostras de quartzito e de granito. O quartzito, pertencente ao grupo Natividade, possui textura fina a média, por vezes estratificada. O granito, por sua vez, pertence à Suíte Ipueiras, com textura granular média a grossa, por vezes, porfirítica. A Região 4 possui filitos da Formação Paracatu, sendo classificados em dois tipos, um *strictu sensu* e outro silicificado – associado com mineralização de ouro. A textura do filito, no geral, é foliada com granulação fina e, quando silicificado, apresenta textura com presença de quartzo e

carbonato. Na Região 5 foram amostrados granitos que pertencem à Suíte Itaporanga, com textura equigranular, fina a média, tendo a biotita como máfico principal. Essa região também é marcada por gnaisses, os quais pertencem ao complexo Presidente Juscelino, com diferentes estágios de migmatização, refletindo-se na granulação, que varia de média a grossa, equigranular e bandamento milimétrico a centimétrico. A Região 6 é caracterizada por amostras de mica -xistos da Formação Salinas – formação distal do Grupo Macaúbas. A Região 7 é contemplada neste trabalho com amostras de basaltos maciços da Formação Serra Geral, Bacia do Paraná.

Tabela - Contexto geológico das litologias ensaiadas

Região		Litologia simplificada	Contexto geológico	
1	Canaã dos Carajás - PA	Granito	Suíte Planalto	Supergrupo Planalto, Cratón Amazônico
2	Sento Sé - BA	Xisto	Formação Castela	Grupo Colomi, Supergrupo São Francisco, Craton São Francisco
		Dolomito	Formação Castela	
		Formação Ferrífera	Formação Serra da Capivara	
3	Monte do Carmo - TO	Quartzito	Grupo Natividade	Provincia Tocantins
		Granito	Suíte Ipueiras	
4	Paracatu, MG	Filito	Grupo Canastra - Formação Paracatu	
		Filito silicificado		
5	Serra Caiada/Lagoa dos velhos - RN	Granito	Suíte Itaporanga	Província Borborema
		Gnaisse	Complexo Presidente Juscelino	
6	Araçuaí - MG	Xisto	Formação Salinas	Orógeno Araçuaí
7	Monte Alegre dos Campos - RS	Basalto	Formação Serra Geral	Bacia do Paraná

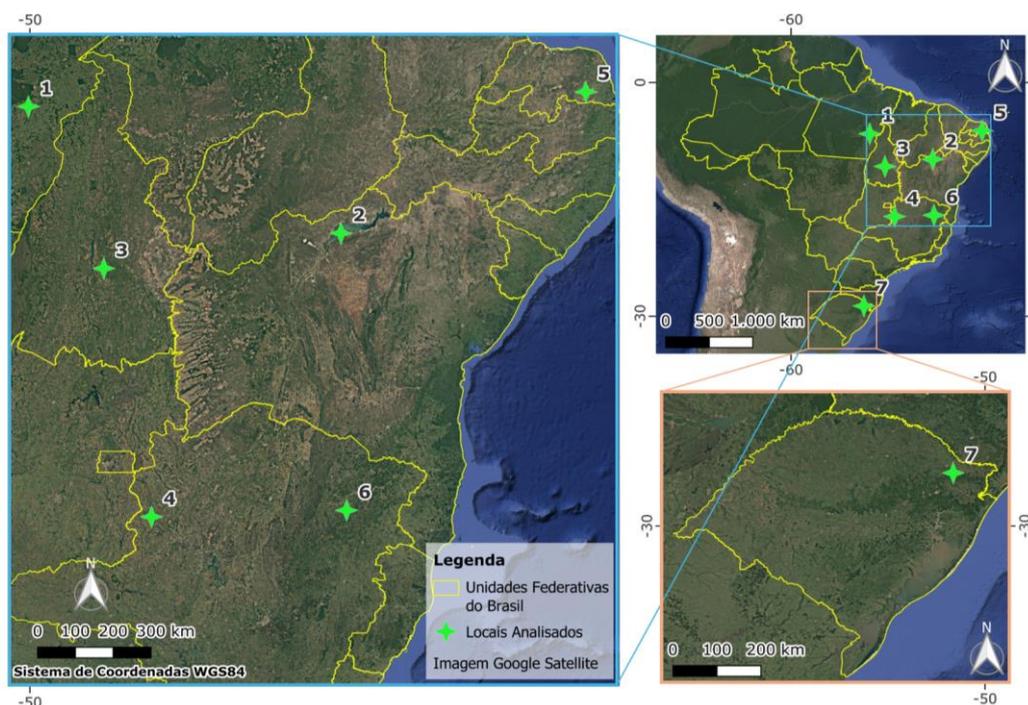


Figura 1 - Localização das litologias analisadas

3. MATERIAS E MÉTODOS

Para a obtenção das resistências à compressão uniaxial (RCU) e módulos elásticos (Young e Poisson) foram realizados 300 ensaios de compressão uniaxial distribuídos entre 12 litotipos distintos, compreendendo Granitos, Gnaisses, Basaltos, Xistos, Filitos, Quartzitos, Dolomitos e Formação Ferrífera Bandada (BIF). O processo de amostragem dos corpos de prova para execução de ensaios uniaxiais em laboratório se deu em testemunhos de sondagem de origem anônima, com diâmetros de 47,6 mm a 63,5 mm (HQ). De cada testemunho retirou-se um corpo de prova (CP) com suas extremidades (topo e base) regularizadas por um retifica montada em torno mecânico, respeitando-se dimensões/tolerâncias sugeridas pela ISRM (1979). Após a

retífica, os copos de prova ficaram com um diâmetro de 46 a 50 mm e uma relação H/D entre 2,1 e 2,5. Os CP's com diâmetros diferentes de 50mm, passaram por uma correção sugerida por Hoek e Brown (1980), para terem suas resistências à compressão uniaxial (RCU) equivalenciadas às de um CP com diâmetro padrão de 50 mm.

O equipamento utilizado para execução da campanha proposta possui uma capacidade para aplicar até 150 tf de carga axial. Tem um desenho compacto, não convencional (*Bishop type self supporting cells*), no qual a estrutura de reação consiste de vários tirantes de aço temperado acoplado o prato superior à base, onde fica abrigado o sistema hidráulico. A tensão axial é aplicada por meio de um atuador hidráulico servo-acionado que movimenta o CP contra a reação da estrutura, mediante controle por software específico, aplicando-se uma taxa de carregamento de 0,5 a 1 MPa/s (ISRM, 1979). As Figuras 2.a e 2.b ilustram o equipamento preparado para execução dos ensaios de compressão uniaxial. Vale notar, que na realização dos ensaios uniaxiais, o equipamento utiliza um cilindro de aço vazado em torno do CP que lhe confere uma grande rigidez no descarregamento, minimizando bastante, com isso, a possibilidade da ocorrência de rupturas "explosivas" e descontroladas. Isso permite manter a instrumentação ligada durante todo o ensaio, incluindo o momento da ruptura.

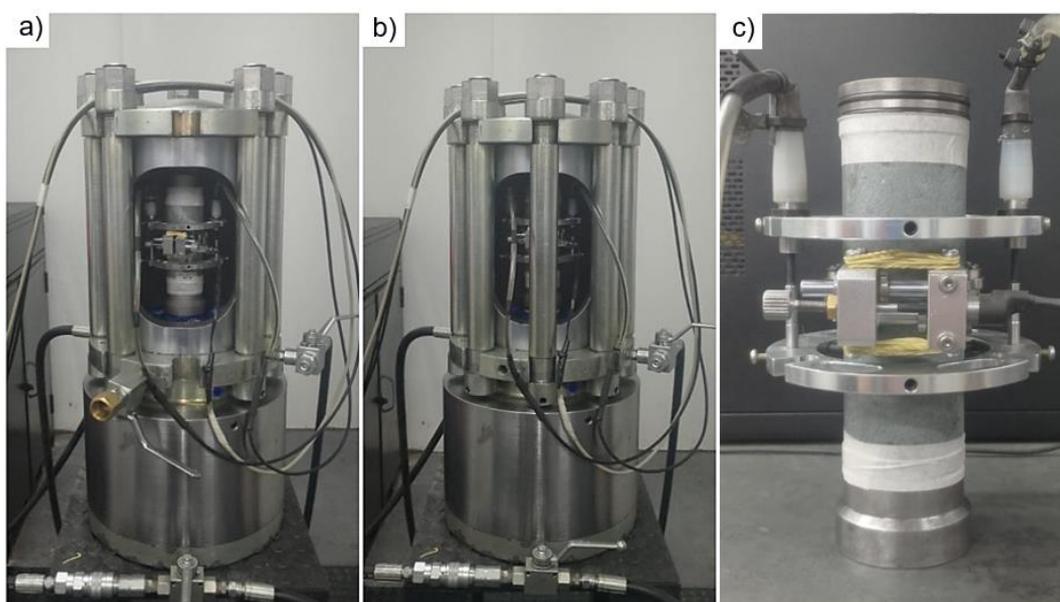


Figura 2 - a) e b) Prensa hidráulica configurada para execução dos ensaios de compressão; c) Instrumentação utilizada nos ensaios de compressão uniaxial.

A instrumentação dos ensaios de compressão uniaxial (para determinação do Módulo de Elasticidade e do Coeficiente de Poisson) consiste em 2 LVDT's axiais e um circunferencial, montados no corpo de prova conforme exemplificado na Figura 2.c. Os LVDT's utilizados têm uma resolução máxima 0,0001 mm, equivalente a $1,0 \times 10^{-6}$ strains. Com base nas leituras dos LVDT's foram determinados os parâmetros elásticos, Módulo de Young (E) o Coeficiente de Poisson (ν), pela tangente às curvas tensão x deformação, no ponto equivalente a 50% da tensão de ruptura (método 1, ISRM 1979). Mais especificamente para os xistos e filitos, por apresentarem trechos elásticos muito reduzidos, utilizaram-se trechos lineares das referidas curvas, entre 15% a 50% da tensão de ruptura, no cálculo de tais parâmetros (método 2, ISRM 1979). Para a determinação dos valores de MR e das regiões típicas para cada litotipo na carta de Deere e Miller (1966), utilizou-se o mesmo critério estabelecido pelos autores, o qual considera uma região na carta representando aproximadamente 75% dos corpos de prova, que fica centrada nos valores médios obtidos para RCU e E.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a caracterização da deformabilidade e resistência dos 12 litotipos estudados, foram realizados 300 ensaios de compressão uniaxial. Na Tabela 1, é apresentado um resumo dos

resultados obtidos para cada litotipo, contendo o número de ensaios e os respectivos valores de resistência à compressão uniaxial (RCU), módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν) e módulo relativo (MR), podendo ser confrontados com resultados obtidos pela literatura (Tabela 2). Para os xistos e filitos, os resultados foram ainda subdivididos de acordo com a inclinação da foliação (α°), sendo categorizadas como: sub-vertical ($60^\circ \leq \alpha^\circ \leq 90^\circ$), oblíqua ($30^\circ \leq \alpha^\circ \leq 60^\circ$) e sub-horizontal ($0^\circ \leq \alpha^\circ \leq 30^\circ$). As regiões de valores encontrados de E e RCU para cada litotipo na carta de Deere e Miller (1966) encontram-se nas Figuras 3, 4 e 5.

Tabela 1 - Valores de RCU e de módulos elásticos encontrados para cada litotipo

Litologia	Nº CP's	RCS (MPa)					E (GPa)					MR (E/RCS)*			ν
		Méd	Min	Máx	D. P	C.V (%)	Méd	Min	Máx	D. P	C.V (%)	Méd	Min	Máx	
Granito Itaporanga (It)	10	244,3	210,4	259,4	14,9	6,1%	65,0	62,5	67,9	2,1	3,2%	261	244	282	0,16
Granito Planalto (PI)	17	270,7	170,8	323,0	45,0	16,6%	65,0	48,0	71,0	5,6	8,6%	241	202	312	0,28
Granito Ipueiras (Ip)	22	116,7	59,9	188,4	35,3	30,3%	68,2	50,7	83,8	8,7	12,7%	591	389	903	0,13
Basalto Serra Geral (SG)	17	174,9	93,0	262,4	49,1	28,1%	73,6	38,3	107,1	18,1	24,6%	395	262	565	-
Gnaisse P. Jucelino (PJ)	50	124,9	70,5	200,1	33,0	26,5%	61,6	31,3	90,5	10,3	16,7%	521	306	908	0,15
Xisto Salinas (Sa) - F.Sub-horizontal	19	61,7	20,2	115,3	26,5	43,0%	28,5	14,2	49,0	10,3	36,1%	456	326	578	0,16
Xisto Salinas (Sa) - F.Sub-vertical	21	41,0	13,6	75,6	15,1	36,8%	26,9	6,4	69,5	13,2	49,2%	702	315	1048	0,15
Xisto Colomi (Co) - F. Oblíqua	15	42,1	11,8	73,9	20,3	48,1%	22,7	4,9	38,8	9,2	40,8%	547	296	912	0,16
Quartzito Natividade (Na)	10	145,8	17,9	231,1	64,9	44,5%	61,3	14,2	83,9	21,3	34,8%	425	311	637	0,16
Dolomito Castela (Ca)	14	109,6	47,5	152,3	30,8	28,1%	87,5	48,8	126,5	21,1	24,2%	780	522	1035	0,16
Formação Ferrífera S. da Capivara (SCa)	15	147,7	51,6	229,9	47,8	32,4%	98,4	62,9	121,1	15,3	15,6%	618	472	807	0,15
Filitos Paracatu (oblíqua)	30	26,2	3,7	48,0	9,1	34,7%	27,8	10,0	47,6	9,5	34,1%	1134	589	1821	0,12
Filitos Paracatu (sub-horizontal)	30	149,7	45,1	287,2	59,1	39,5%	52,1	12,5	72,9	14,2	27,2%	412	184	627	0,19
F. Paracatu silicificado (sub-horizontal)	30	201,3	92,1	297,6	55,6	27,6%	57,2	43,9	75,7	6,9	12,1%	270	198	475	0,28

C.V: Coeficiente de variação; D.P: Desvio Padrão; *Valores de MR considerados para região compreendendo 75% dos pontos.

Tabela 2 - Valores de resistência à compressão uniaxial (RCU), módulo relativo (MR) e módulo elásticos obtidos da literatura para alguns litotipos (Read e Stacey, 2009; Hoek e Diederichs, 2006).

Rocha	RCU (MPa)	E (Gpa)	MR	ν
Andesito	120-320	30-40	300 - 500	0,20-0,30
Arenito	35-215	10-60	200 - 350	0,10-0,45
Basalto	145-355	35-100	250 - 450	0,20-0,35
Calcário	50-245	30-65	400 - 1000	0,25-0,35
Diabásio	240-485	70-100	300 - 350	0,25-0,30
Diorito	180-245	25-105	300 - 350	0,25-0,35
Dolomito	85-90	44-51	350 - 500	0,10-0,35
Filito	-	-	300 - 800	-
Folhelho	35-170	5-65	150 - 250	0,20-0,30
Gnaisse	160-200	40-60	300 - 750	0,20-0,30
Granito	140-230	30-75	300 - 550	0,10-0,25
Granodiorito	100-200	30-70	400 - 450	0,15-0,30
Mármore	60-155	30-65	700 - 1000	0,25-0,40
Quartzito	200-460	75-90	300 - 450	0,10-0,15
Siltito	35-250	25-70	350 - 400	0,20-0,25
Xisto	-	-	250 - 1100	-

De modo geral, apenas o Granito (PI) apresentou uma RCU média superior a 250 MPa (R6), com um valor aproximado de 270 MPa. Dentro da faixa de resistência média R5 (100 a 250 MPa)

foram identificados nove litotipos, destacando-se o Granito (It) e o Filito Silicificado (foliação sub-horizontal), com os maiores valores médios de resistência (244 e 201 MPa), e o Quartzito (Na) e o Dolomito (Ca), com os menores (117 e 110 MPa). Os Xistos (Sa) e (Co), juntamente com o Filito (foliação oblíqua), apresentaram os menores valores médios de resistência (26 a 62 MPa), devido à forte influência da inclinação dos planos de foliação, encaixando-se na faixa de resistência R3-R4 (25 a 100 MPa). Esses litotipos também apresentaram os menores valores de módulo de elasticidade (E), na faixa de 23 a 28 GPa, enquanto para os filitos com foliação sub-horizontal foram encontrados E médios na faixa de 52 a 57 GPa. Por outro lado, os maiores E médios, entre 98 e 87 GPa, foram encontrados na Formação Ferrífera Bandada (Sca) e no Dolomito (Ca), respectivamente. Os demais litotipos, compreendendo as rochas ígneas, gnaisses e quartzitos apresentaram um E médio de 61 a 76 GPa.

Ao se analisar especificamente os resultados das rochas ígneas, conforme apresentado na Figura 3, observou-se que o Basalto Serra Geral (SG) apresentou um MR médio de 395, estando dentro da faixa esperada para Basaltos (250 a 450). A maior parte da faixa de MR obtida para os Basalto SG (262 a 565) situa-se dentro da faixa esperada para rochas homogêneas (200 a 500), provavelmente em virtude de sua estrutura maciça

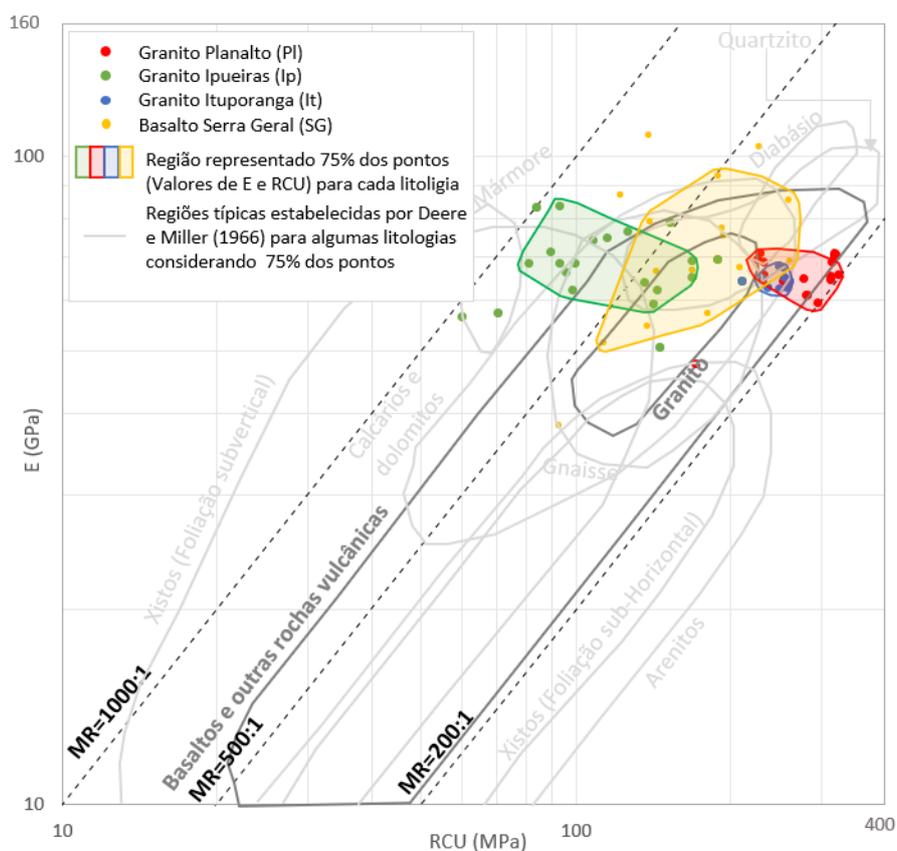


Figura 3 – Carta de Deere e Miller contendo os valores de RCU, E e MR para as rochas ígneas.

Para os granitos, foi verificado que os três tipos avaliados apresentaram valores de MR médios, não condizentes com a faixa esperada para granitos (300 a 550), a qual foi estipulada, essencialmente, para granitos homogêneos, conforme observado na literatura (Tabela 2). A disparidade de valores de MR pode ser explicada, em grande parte, pela presença de heterogeneidades, defeitos e planos de anisotropia presentes nas amostras, que afetaram principalmente a sua resistência. Isto é observado principalmente para os Granitos Planalto e Ipueiras, os quais apresentam regiões na carta de Deere e Miller (Figura 3) mais alongadas e paralelizadas ao eixo de RCU, sendo reflexo de uma maior variabilidade encontrada para tais valores.

O Granito Ipueiras (Ip) apresentou MRs de 389 a 903, devido à grande variabilidade textural e mineralógica, bem como, por conta de feições, como veios e regiões hidrotermalizadas / oxidadas,

que afetaram principalmente a resistência das amostras, levando a uma maior dispersão nos valores de MR. Os Maiores valores de MR, para o Granito Ipueiras, foram obtidos para situações em que as amostras sofreram uma redução de resistência por conta de defeitos, principalmente em forma de fissuras. Embora os granitos Planalto (PI) e Ituporanga (It) apresentem valores médios de MR abaixo da faixa típica para granitos (300 a 550), por conta de suas RCU elevadas, esses valores ainda se enquadram dentro da faixa geral esperada para rochas homogêneas e isotrópicas (200 a 500). Dentre todos os litotipos, o Granito Ituporanga (It) (MRs de 244 a 282) visualmente apresentou a maior homogeneidade textural e mineralógica, o que reflete os menores valores de coeficiente de variação encontrados para esse litotipo, tanto para RCU (6,1%), quanto para E (3,2%), resultando em uma grande concentração de pontos circundados por uma pequena região na carta de Deere e Miller (Figura 3). Já o Granito Planalto (PI) (MRs de 202 a 312) apresentou uma certa heterogeneidade textural e mineralógica, porém, não tão grande quanto a presente no granito Ipueiras. Identificou-se ainda, no Granito (PI), planos de anisotropia representados por uma foliação mineral oblíqua composta por micas. Observou-se que a foliação, por ser pouco pronunciada, não condicionou significativamente os modos de ruptura, os quais ocorrem predominantemente por fendilhamento e duplo cone. Ademais, não foi possível identificar uma relação clara entre a variação mineralógica (especialmente quanto ao teor de micas) ou a orientação da foliação e a variação dos valores de RCU e E. No entanto, quando comparado aos outros granitos de textura predominante média, o Granito (PI) apresentou uma textura menor (fina), que pode ter contribuído para valores de RCU maiores.

Para o caso das rochas metamórficas foliadas, xistos e filitos, consideradas como transversalmente isotrópicas, observou-se uma forte influência dos planos de foliação, sobretudo nos valores de resistência. Para o Xisto Salinas (Sa) e Filito Paracatu (Pa) (não silicificado), observaram-se os maiores valores de RCU e E para a foliação sub-horizontal, com MRs médios, para essa condição, de 578 e 627, respectivamente. Por outro lado, ao considerar a foliação oblíqua, para o caso do Filito (Pa), obteve-se uma RCU média e um E médio, 5,7 vezes e 1,9 vezes menores do que os valores médios obtidos para foliação sub-horizontal. Esse comportamento é atribuído ao fato de que, para foliação oblíqua, praticamente todas as rupturas ocorreram por cisalhamento ao longo do seu plano. Consequentemente, o MR médio obtido (1134) para essa condição foi mais alto do que o observado para foliação sub-horizontal (412), em virtude da diminuição de RCU ser mais significativa do que a redução de E. O efeito da orientação da foliação torna-se mais evidente na Figura 4, onde estão destacadas duas regiões na carta de Deere e Miller (1966), representando os Filitos (Pa) com foliação oblíqua e sub-horizontal.

Devido à indisponibilidade de amostras, não foi possível realizar ensaios em Filitos (Pa) com foliação subvertical, no entanto, acredita-se que esses apresentariam valores intermediários de RCU. Quando comparado o Filito (Pa) silicificado com o não silicificado, observou-se, para a mesma orientação da foliação (sub-horizontal), um aumento de 35 % da RCU em relação aos filitos não silicificados, passando de 149 para 201 MPa. No entanto, foi verificado que a silicificação praticamente não interferiu nos módulos de elasticidade obtidos para as amostras com foliação perpendicular. Devido ao ganho de resistência proporcionado pela silicificação, o filito silicificado apresentou um MR médio de 270, próximo ao limite inferior de 300 esperado para filitos em geral (Tabela 2).

O Xisto Salinas (Sa), analogamente ao Filito Paracatu, também apresentou uma redução dos valores médios de RCU e E para a foliação com inclinações maiores, porém, não tão significativa quanto a observada nos Filitos (Pa) com foliação oblíqua. Para os xistos (Sa) com foliação subvertical, observou-se que a resistência à compressão uniaxial (RCU) média foi aproximadamente 1,5 vezes inferior à registrada para amostras com foliação sub-horizontal. Por outro lado, o módulo de elasticidade médio apresentou pouca sensibilidade à variação da orientação da foliação, sendo obtidos valores praticamente equivalentes tanto para foliação subvertical quanto para sub-horizontal. Na Figura 4, encontram-se demarcadas na carta de Deere e Miller (1966) as duas regiões que representam os Xistos (Sa), de acordo com a orientação da sua foliação. Os valores médios de MR obtidos para o Xisto (Sa) foram de 456, para foliação subvertical, e de 712, para foliação sub-horizontal. Esses valores se encontram dentro da faixa registrada para alguns tipos de xisto, que varia de 250 a 1100 (Tabela 2). Em razão da

indisponibilidade de amostras, não foi possível realizar ensaios nos xistos (Sa) com foliação oblíqua. Entretanto, pode-se presumir que amostras com foliação oblíqua apresentariam valores de RCU inferiores aos obtidos nas demais orientações, o que implicaria, conseqüentemente, em valores de MR superiores à média de 712, observada para a foliação subvertical. Os corpos de prova do Xisto Colomi (Co), por sua vez, foram ensaiados apenas com foliação oblíqua, e apresentaram uma faixa de valores de RCU e E semelhantes à faixa obtida para o Xisto Salinas (Sa). Para esse litotipo, foi encontrado um MR médio de 547.

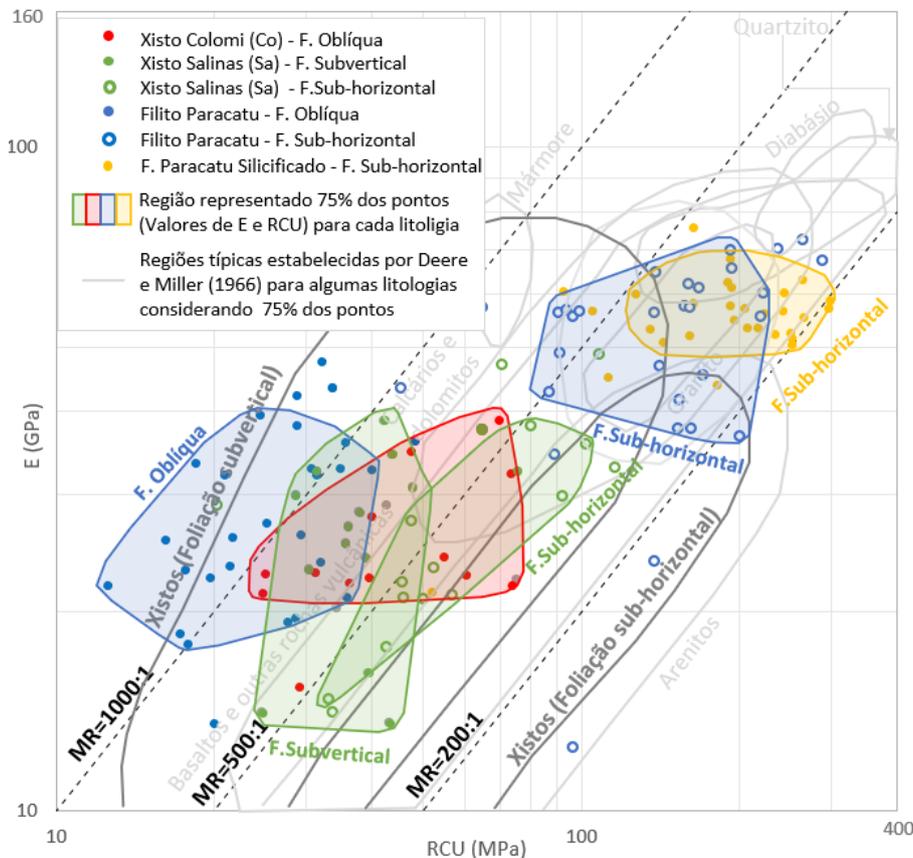


Figura 4 – Carta de Deere e Miller contendo os valores de RCU, E e MR para as rochas metamórficas foliadas.

A análise do comportamento mecânico de rochas metamórficas bandadas revelou que o Gnaiss Presidente Juscelino (PJ) e a Formação Ferrífera Serra da Capivara (SCa) apresentaram módulos relativos (MR) superiores aos valores comumente observados em rochas homogêneas, com médias de 521 e 618, respectivamente. Na Figura 5, são delimitadas as duas regiões encontradas, para os Gnaiss PJ e a Formação Ferrífera (SCa). Nas Formações Ferríferas (SCa), foram identificados bandamentos predominantemente oblíquos ($30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$), com espessuras variáveis. Ressalta-se, contudo, que tais estruturas não atuaram como superfícies preferenciais de ruptura, já que ocorreram rupturas predominantemente em forma de fendilhamento axial. Mesmo apresentando faixas de módulo relativo (MR) semelhantes às do Gnaiss (PJ), a Formação Ferrífera (SCa) apresentou valores superiores de RCU e E, possivelmente em função da maior concentração de minerais como hematita, magnetita e quartzo, os quais conferem maior rigidez e resistência à rocha. Por outro lado, o Gnaiss (PJ) apresentou E médio significativamente menor, por ser formado de minerais não tão rígidos quanto os minerais ferrosos, como feldspatos e biotita. Os CPs de Gnaiss (PJ) apresentaram grande variação composicional e bandamentos com espessuras variadas e orientações que vão desde sub-horizontais até oblíquas. Apesar da grande quantidade CPs ensaiados, não foi possível identificar uma correlação consistente entre a variação mineralógica, ou a orientação do bandamento, com a variação dos valores de RCU e E. No entanto, o Gnaiss (PJ) apresentou uma faixa de MRs (306 a 908) condizente com a registrada pela literatura (Tabela 3).

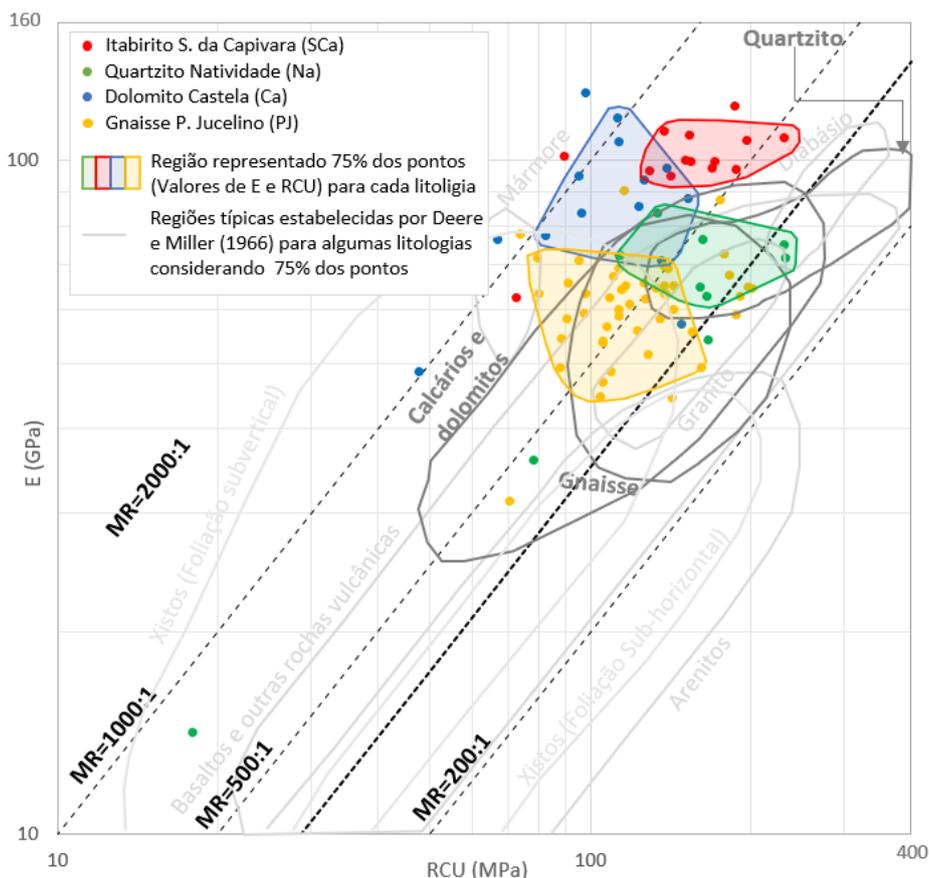


Figura 4 – Carta de Deere e Miller contendo os valores de RCU, E e MR para as rochas bandadas e estratificadas.

O Dolomito Castela (Ca) e o Quartzito Natividade (Na) apresentaram comportamento governado pela estratificação presente nas amostras, mesmo que não tenham sido identificadas grandes variações em sua orientação, que é predominantemente oblíqua para ambas as litologias. Para os corpos de prova com estratificação mais destacadas/proeminentes, identificaram-se RCUs menores, devido às rupturas condicionadas pela estratificação, em forma de cisalhamento e *step path*. Em contrapartida, para amostras com estratificação menos pronunciada, tendendo a uma estrutura maciça, observaram-se RCUs maiores, com rupturas por fendilhamento axial e duplo cone. Dessa forma, tanto o Dolomito (Ca) quanto o Quartzito (Na) apresentaram MRs maiores para CPs com a estratificação mais demarcada e MRs menores para amostras pouco estratificadas a maciças. Ao compará-los com os valores de MR obtidos na literatura para esses dois litotipos, predominantemente maciços (300 a 500), o Dolomito (Ca) e o Quartzito (Na) demonstraram uma faixa de valores de MR consideravelmente superior, com valores de 522 a 1035 e de 311 a 637, respectivamente. No entanto, para caso específico do Quartzito (Na), foi verificado uma concentração maior de CPs com estrutura maciça, o que levou a uma faixa de MR mais baixa.

5. CONCLUSÕES

Com base na análise dos comportamentos mecânicos dos diferentes litotipos, pode-se concluir que as rochas maciças, com certa homogeneidade e isotropia, como o Basalto Serra Geral e o Granito Itaporanga, apresentaram valores de MR dentro da faixa esperada para rochas isotrópicas (300 a 500). No entanto, dentro dessa mesma faixa, foram identificados litotipos com certa anisotropia, como o Filito Paracatu e o Xisto Salinas, com foliação sub-horizontal bem definida, e aqueles com estratificação/foliação pouco pronunciada, como o Granito Planalto e o Quartzito Natividade, com uma estrutura tendendo a maciça. Os planos de fraqueza representados por essas estruturas tiveram pouco impacto na resistência à compressão uniaxial (RCU) das amostras, quando comparados à redução significativa observada em litologias com foliação ou estratificação oblíqua a subvertical bem demarcadas, como o Dolomito Castela, o Filito Paracatu, o Xisto Salinas e o Xisto Colomi. Para essa última condição, por conta da redução de RCU, foram

observados MRs médios classificados como elevados ($MR > 500$), típicos de rochas anisotrópicas. O Gnaiss Presidente Juscelino e a Formação Ferrífera Serra da Capivara, formados por bandamentos oblíquos de espessuras variáveis, também apresentaram MRs médios superiores a 500, porém, não tão elevados quanto as rochas foliadas, as quais tendem a apresentar uma menor coesão entre os planos de foliação do que a existente entre os planos de bandamento. O Granito Ipueiras, embora não apresente uma anisotropia evidente, também exibiu MRs elevados, atribuídos à presença de heterogeneidades mais acentuadas como veios, zonas hidrotermalizadas e variações texturais e mineralógicas ao longo das amostras.

De um modo geral, observou-se que, para todas as litologias, o módulo de elasticidade (E) apresentou uma sensibilidade menor a variações texturais e estruturais em comparação a resistência a compressão uniaxial (RCU), fazendo com que os valores de MR sejam fortemente influenciados pela RCU das amostras. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que o módulo de elasticidade é determinado a partir de um trecho linear da curva tensão-deformação, onde a rocha ainda se encontra em regime elástico e seu comportamento é predominantemente controlado pela matriz intacta do material. Nessa fase, a influência de defeitos locais, microfraturas e planos de anisotropia é limitada, pois tais descontinuidades ainda não foram mobilizadas de forma significativa. Por outro lado, a resistência à compressão está diretamente relacionada à propagação de fraturas e à ativação de descontinuidades estruturais, sendo, portanto, altamente sensível à presença de defeitos e à orientação dos planos de fraqueza.

Os parâmetros obtidos neste estudo representam, em sua maioria, rochas sãs ou com baixo grau de alteração. No entanto, com base na literatura e na experiência dos autores, pode-se assumir, na ausência de ensaios, valores de módulo relativo (MR) semelhantes aos das rochas sãs, para amostras alteradas, desde que apresentem comportamento predominantemente isotrópico. Salienta-se que o módulo relativo (MR) pode ser utilizado como alternativa para estimativas de E e/ou RCU quando está disponível apenas um desses parâmetro, até mais do que propriamente para classificar/discriminar as rochas, já que litotipos com comportamentos totalmente diferentes podem apresentar MRs semelhantes, como foi o caso do Xisto Salinas e do Basalto Serra Geral.

Com base em tudo que foi discutido, e na sua utilidade para representar os dados de litotipos de diversos comportamentos mecânicos, os autores esperam que este trabalho possa servir de incentivo a outros assemelhados, nos quais cartas de Deere e Miller sejam elaboradas para diferentes contextos geológicos, mais específicos e de grande importância econômica, como, por exemplo, o Quadrilátero Ferrífero e a Província de Carajás.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores reconhecem e agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), que, por meio da concessão de bolsa de estudos, contribuiu significativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DEERE, D.U., MILLER, R.P. (1966) Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock, Air Force Weapons Laboratory, Report AFWL-TR-65-16, Kirtland Air Force Base, NM.

ISRM (1979) Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts. Vol. 16, No. 2, p. 135 – 140.

HOEK, E. & E. T. BROWN (1980). Underground Excavations in Rock. London: IMM (The Institution of Mining and Metallurgy), 527 p.;

HOEK, E.; DIEDERICHS (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences, v. 43, n. 2, p. 203-215.

READ, J., e STACEY, P (2009). Guidelines for open pit slope design. CSIRO Publishing - CRC press, Collingwood.