

Resultados Preliminares da Caracterização Geomecânica das Formações Ferríferas Bandadas em seus Vários Níveis Intempéricos nas Minas da Vale, Borda Oeste do Quadrilátero Ferrífero/ MGBrasil

Costa, T. A. V.,
Vale S.A., Belo Horizonte, Brasil, teofilo.costa@vale.com

Marques, E. A. G.,
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, eagmarques1965@gmail.com

Dight, P.,
Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia, phil.dight@uwa.edu.au

Mercer, K.,
University of Western Australia, Perth, Australia, ken.mercer@uwa.edu.au

RESUMO: Esse trabalho apresenta os resultados preliminares dos ensaios geotécnicos e avaliação das características geológicas/ geotécnicas das Formações Ferríferas Bandadas (FFB) em diferentes graus de intemperismo e as implicações nas análises de estabilidade das minas de minério de ferro da Vale S.A. na borda oeste do Quadrilátero Ferrífero- MG. Para determinar o mecanismo de ruptura predominante nos taludes compostos por FFB (itabiritos e hematititos) faz-se necessário o entendimento tanto da mecânica de rochas quanto da mecânica de solos haja vista que a mesma litologia pode apresentar variados níveis de intemperismo que resultam em diferentes graus de compacidade da rocha. Análises preliminares em macro e micro escala mostraram uma íntima relação entre os níveis intempéricos com a densidade e a porosidade na determinação dos valores de resistência uniaxial (UCS). Adicionalmente, para a determinação dos mecanismos de ruptura são relevantes as características das descontinuidades e a trama mineralógica (anisotropia de direção). Esses parâmetros são de interesse tanto para a caracterização das FFB frescas a parcialmente alteradas, que possuem características de rocha, quanto para as completamente alteradas, que possuem características de solo. Os resultados dos ensaios de compressão uniaxial e medida das velocidades de propagação das ondas P e S nas rochas compactas (fresca) e os ensaios triaxiais (CID) e medida da poro pressão nos materiais friáveis (completamente a totalmente alterados) corroboram para essa relação. Por ultimo, a caracterização geológica e os testes industriais realizados na Vale foram correlacionados aos resultados dos ensaios geotécnicos e utilizados como guia na caracterização geotécnica dos vários litotipos. A utilização desses resultados mostrou-se mais eficaz na determinação do comportamento geomecânico dos maciços, melhorou a identificação do mecanismo de ruptura e promoveram avaliações de estabilidade dos taludes mais assertivas.

PALAVRAS-CHAVE: Formação Ferrífera Bandada, Intemperismo, Resistência, Mecanismo de Ruptura dos Itabiritos, Ensaio Geotécnico e Análise de Estabilidade.

1 INTRODUÇÃO

Esse artigo resume publicações de Costa et al (2015 e 2015a) que é parte integrante da tese de doutorado do primeiro autor em desenvolvimento no Australian Centre for Geomechanics (ACG) School of Civil, Environmental and Mining Engineering, da Western Australia University, Perth/Austrália. A tese tem como principal objetivo avaliar os efeitos do intemperismo nas principais características geomecânicas dos vários tipos de Formações Ferríferas Bandadas (FFB) de modo a determinar a influência dessa variação na resistência da rocha e nos mecanismos de ruptura envolvidos.

A caracterização geológica e geotécnica dos vários tipos de FFB e seus diferentes horizontes intempéricos, a determinação (em laboratório) dos parâmetros de resistência e deformação e a correlação entre essas informações obtidas nos ensaios industriais vão auxiliar na determinação dos mecanismos de ruptura, bem como na avaliação da estabilidade dos taludes e segurança operacional. Nesse contexto, o presente artigo pretende apresentar os primeiros resultados na caracterização e correlação geomecânica das várias FFB compactas e friáveis com os diferentes níveis intempéricos das minas de ferro da Vale na borda oeste do Quadrilátero Ferrífero MG (QF).

Nota-se que as várias litologias de FFB do QF possuem diferentes comportamentos geomecânicos principalmente quando considerado as suas variações litotípicas. A separação por tipos está vinculada principalmente aos diferentes níveis de alteração intempérica e resistência da rocha intacta que são definidos pelos níveis de compactidade e intemperismo descritos pelas tabelas da ISRM (1981) que foram adaptadas para as FFB encontradas nas minas da Vale.

Atualmente nas minas da Vale no QF estão expostas tanto rochas frescas a parcialmente alteradas (compactas a semicompactas) quanto rochas completamente alteradas (friáveis). Essa condição contrasta com o passado, em que predominavam exposições de rocha friável e as minas eram menos profundas. Por isso, foi necessária uma mudança do paradigma

estabelecido ao longo de décadas operando basicamente nesses materiais e profundidade. Os desafios atuais não se limitam somente à determinação dos parâmetros de resistência e mecanismos de ruptura associados às rochas friáveis e a baixos níveis de deformação, bem estabelecidos pela mecânica de solos, mas na determinação dos parâmetros de resistência, deformação e caracterização dos mecanismos de ruptura associados às rochas compactas (rocha intacta) e às descontinuidades do maciço rochoso que são descritos pela mecânica de rochas.

Existe ainda um desafio extra quando considerada a complexidade geológica das minas, que envolvem efeitos tectônicos e diferentes níveis de intemperismo que dificultam o entendimento da litoestratigrafia e o grau de compactidade dos litotipos

CONTEXTO GEOLOGICO E GEOTECNICO

1.1 Localização

As 12 minas estudadas encontram-se na borda oeste do QF e fazem parte da Diretoria de ferrosos sul da Vale S.A. (Vale/DIFL) que podem ser visualizadas na Figura 1.

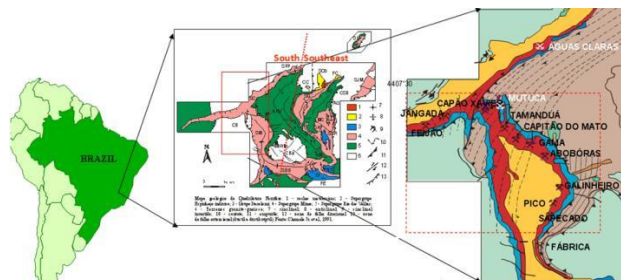


Figura 1. Mapa de localização das minas estudadas.

1.2 Geologia Regional

As minas de ferro estudadas são compostas por FFB metamórficas paleoproterozóicas da Formação Cauê, Grupo Itabira, Supergrupo Minas. Essas rochas são heterogêneas e anisotrópicas que apresentam bandamento milimétrico a centimétrico alternando bandas com minerais ferruginosos (hematita, magnetita) com bandas de minerais não ferruginosos (quartzo, dolomita e ou anfibólio), denominadas por Door (1969) como itabiritos.

Esse mesmo autor descreve quatro principais

litologias, sendo três com teores de ferro variando entre 30 a 62% (denominados baixo teor): Itabiritos quartzosos, dolomíticos e anfibolíticos. Por ultimo, denominada de minério de alto teor (acima de 62% de ferro) originalmente definida como hematita, foi redefinido por Rosiere et al (1996) como. Esse difere dos itabiritos por não apresentar o bandamento composicional típico sendo composto basicamente por minerais de ferro já descritos.

O bandamento composicional é a principal característica dos itabiritos, mas as deformações impostas pelos eventos tectono-metamórficos, bem como pelos processos intempéricos, provocaram mudanças mineralógicas e texturais nas litologias originais (proto-minério) que apresentam alta compacidade. Isso resulta em uma variedade litotípica que apresenta menor compacidade e uma maior variação mineralógica.

1.3 Formações Ferríferas Bandadas nas Minas da Vale/DIFL

Nesse artigo foram avaliados seis das dez tipologias (litotipos) presentes nas minas da Vale/DIFL que representam cerca de 70% das atuais exposições de FFB.

Os litotipos são agrupados utilizando ensaios que simulam os processos industriais de britagem e peneiramento, descrições geotécnicas dos testemunhos de sondagem e mapeamento superficial em três grupos, conforme se descreve a seguir.

O primeiro grupamento foi denominado de compacto ou de alta resistência (fresco) e é composto pelos proto-minérios itabiritos dolomíticos, quartzosos e anfibolítico que representam as porções mais profundas dos depósitos ou núcleos preservados da ação intempérica que serve como pontes rochosas dos maciços. Do mesmo modo os hematititos, que estão associados a feições estruturais e tectônicas, representam porções com altos valores de UCS, baixo índice de vazios e são classificados como maciços classe I a III (RMR, 1989) dependendo da influência das descontinuidades.

O segundo grupamento é denominado friável

ou de baixa resistência (completamente a totalmente alterado) e é composto por itabiritos quartzosos e goetíticos friáveis (não abordados nesse artigo) e hematitas friáveis e itabiritos argilosos que representam grande parte do minério de alto teor e podem ser encontrados desde a superfície até grandes profundidades. Apresentam alta porosidade, baixos valores de UCS e seus maciços variam da classe V a IV ou, na maioria das vezes, não podem ser caracterizados como material rochoso sendo classificado como solo saprolítico.

Ainda existe um terceiro grupo (também não avaliado nesse artigo) corresponde a litotipos de transição denominados médios ou semicompactos (parcialmente alterado) e são composto por itabiritos quartzosos, goetíticos e hematitas semi-compactas.

O aspecto visual, em escala de mão, de cada um desses tipos pode ser vistos na Figura 2 e suas principais características geotécnicas podem ser observadas na Tabela 1.

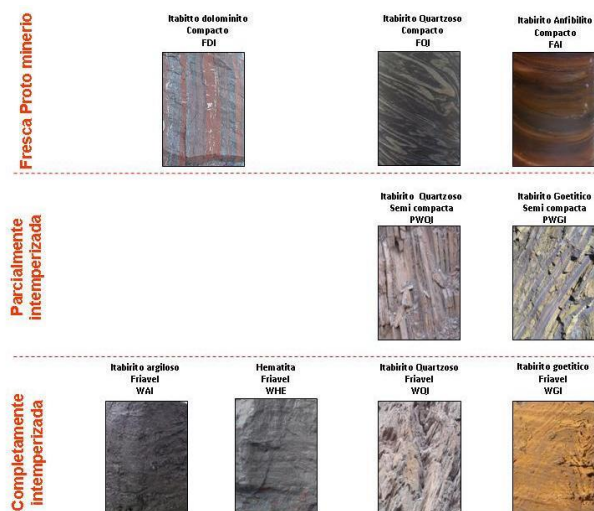


Figura 2. Aspecto visual dos litotipos avaliados e terminologias utilizadas.

Tabela 1. Características geotécnicas dos litotipos avaliados.

Litologia	Tipologia	Grau de intemperismo (*)	Teste de britagem (% > 3.35 mm)	Grau de resistência (*)	Índice de vazios (e)	Densidade (D) (T/m³)	UCS (MPa)
Hematita	Compacta	W1-W2	≥50	R5-R6	e≤7%	5,0	UCS>400
	Friável	W5-W6	<25	R0-R2	15%<e≤35%	3,2	UCS<5
Itabirito Quartzoso	Compacta	W1-W2	≥50	R5-R6	e≤7%	3,4	150<UCS<450
	Semi Compacta	W3-W4	25%<e≤50	R3-R4	7%<e≤15%	2,7<D≤3,4	5<UCS<150
	Friável	W5-W6	<25	R0-R2	15%<e≤35%	2,7	UCS<5
Itabirito Anfibolítico	Compacta	W1-W2	≥50	R5-R6	e≤7%	3,0	150<UCS<450
	Semi Compacta	W3-W4	25%<e≤50	R3-R4	7%<e≤15%	3,0<D≤2,6	5<UCS<150
Itabirito Dolomítico	Compacto	W1	≥50	R5-R6	e≤7%	3,1	150<UCS<450
Itabirito Goetítico	Friável	W5-W6	<25	R0-R2	15%<e≤35%	2,6	UCS<5
Itabirito Argiloso	Friável	W6	<25	R0-R1	15%<e≤35%	2,6	UCS<1

1.4 Processos Intempéricos nas Formações Ferríferas Bandadas

Considerou-se que os processos intempéricos de oxidação, dissolução e lixiviação/ remoção física por meio aquosos são os principais agentes responsáveis pela redução da resistência das FFB originalmente compactas. Esses tipos neoformados apresentam principalmente um aumento da porosidade primária e secundária e redução da resistência dos minerais constituintes por oxi-hidratação e diminuição da área de contato intergranular, proporcionando uma redução na resistência da matriz rochosa.

A perda de compacidade é dada principalmente pela oxidação dos minerais ferruginosos, alteração dos anfibólios e COBRAMSEG 2016 dissolução e lixiviação principalmente da dolomita, mas também em menor intensidade do quartzo. A efetividade desses processos é condicionada pelas: condições climáticas, estruturação geológica, porosidade original e trama mineralógica que definem a anisotropia de direção característica das FFB.

Trabalhos de Morris (2002) e Taylor et al (2001) sugerem que esse acréscimo de porosidade pode alcançar valores de 40% em rochas com porosidades iniciais em torno de 5%.

Algumas dessas interações foram descritas por Ribeiro e Carvalho (2002) e Ribeiro (2003) e podem ser associadas aos processos de enriquecimento supergênico de ferro como já apresentados por Door et al (1969 e 1973), Spier et al (2005), Ramanaidou et al (2009) e Ramanaidou e Moris (2010). Esses últimos

sugerem a diferenciação dos processos de enriquecimento supergênico associados à formação de mantos profundos de intemperismo em diferentes fases. Mas a influência dos processos tectono metamórficos não pode ser desconsiderada, como colocados por Pires (1979 e 1995).

Os mesmos processos intempéricos e de enriquecimento que diminuem a resistência da rocha intacta original podem provocar um aumento da densidade, pela concentração de ferro. Portanto, há de se avaliar qual o efeito e correlação do aumento da porosidade e a variação da densidade, como os parâmetros mais importantes para a determinação da resistência da rocha intemperizada. A correlação da densidade com o teor de ferro vem sendo estudada nas minas da Vale por Santos et al (2005) e Santos (2007), enquanto que a relação desses parâmetros com a resistência à compressão uniaxial foi abordada por Costa et al (2015).

Do mesmo modo, a oxidação dos íons de ferro provoca um aumento na porosidade matricial que diminui a resistência. Por outro lado, esse mesmo processo pode induzir a reprecipitação em forma de cimento goetítico que, localmente, pode aumentar a resistência da rocha. As cangas lateríticas são um exemplo desse efeito.

Nas minas avaliadas o manto de intemperismo pode alcançar facilmente 400 metros de profundidade e mostram-se diferenciados e zonados segundo o tipo de FFB e condicionantes estruturais entre outros.

As minas que possuem como principal protólito o itabirito dolomítico apresentam mantos intempéricos mais homogêneos, que não apresentam transições ou horizontes intermediários como pode ser visto na Figura 3 (B). São basicamente constituídos por rocha fresca a levemente alterada em profundidade, com contato brusco (centímetro a poucos metros) com rochas completamente ou totalmente alteradas com morfologia de contato que segue preferencialmente condicionantes estruturais. Para esses perfis os tipos semicompactos são ausentes e as minas de Águas Claras, Mutuca e Capão Xavier são os exemplos típicos.

Nas minas em que os protólitos são preferencialmente itabiritos quartzosos ou anfibolíticos o perfil intemperico apresenta vários horizontes, com tipologias variando em resistência e teor de ferro desde a rocha fresca até completamente alteradas, como podem ser visto na Figura 3 (A). Nesses perfis os tipos semi-compactos ganham importância geotécnica e mesmo econômica sendo hora considerada minérios, hora estéril. As minas do Tamanduá, Capitão do Mato e Pico, são típicas para o protólito quartzoso, enquanto as Minas de Jangada e Córrego do Feijão apresentam um predomínio de protólito anfibolítico.

Pouco pode-se afirmar sobre a relação da profundidade dos perfis de intemperismo e o tipo de FFB, porém os protólitos dolomíticos parecem apresentar perfis mais profundos, possivelmente devido à maior solubilidade das bandas ricas em dolomita.

O entendimento desses processos e a identificação desses perfis e seus diversos horizontes são importantes para a caracterização geotécnica das várias tipologias de FFB encontradas nas minas. Além disso, a morfologia definida pelo manto de intemperismo e pelos contatos geológicos condicionam as características geomecânicas dos taludes, mecanismos de ruptura e, em última instância, o tipo de abordagem a ser utilizada na avaliação de estabilidade dos taludes quer seja utilizando mecânica de rochas ou de solo.

A Figura 3 apresenta o perfil geológico típico das minas e os perfis de intemperismo esquemático desses tipos.

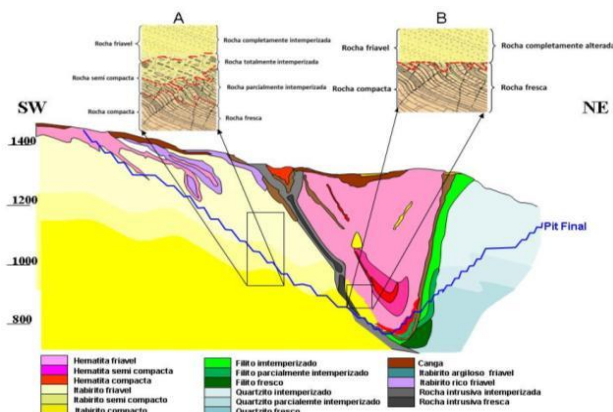


Figura 3. Seção geológica típica e perfis de intemperismo esquemático

2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada foi baseada na avaliação do banco de dados de ensaios geotécnicos, na descrição de furos de sondagem, mapeamento geológico e geotécnico e na campanha de ensaios geotécnicos de laboratório realizados especificamente para esse estudo. As amostras foram coletadas em furo de sondagem nas várias minas.

Os resultados obtidos devem ser considerados preliminares, pois ainda não abrangem todas as direções de anisotropia e litotipos ou possuem número suficiente para resultados conclusivos, porém, em termos de variabilidade das FFB expostas nas minas representam cerca de 70% dos litotipos a serem pesquisados.

Para os diferentes agrupamentos foram realizados diferentes ensaios: para as rochas compactas foram realizados ensaios de resistência à compressão uniaxial – UCS (ASTM 2002), Densidade (ASTM, 2002) e medida de velocidade da propagação das ondas P e determinação empírica das ondas S. Para os materiais friáveis foram realizados ensaios de Limites de Atterberg (ASTM, 2002); medidas de poro pressão e determinação da curva característica com a umidade (SWCC).

Foi realizado um total de 18 ensaios UCS com CP's de 20mm de diâmetro por 50 mm de comprimento considerando a direção de anisotropia () de 0° e 90°. Nesses foram medidos as deformações axiais e laterais por pares de strain gauges (entre 2 a 6 pares). Enquanto que o número de ensaios realizados na obtenção da curva de caracterização da poro pressão e umidade foram totalizaram 7 (sete) Cp's com 61.8 mm de diâmetro por 20mm de espessura.

3. APRESENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Devido à diferença da natureza das amostras e ensaios realizados optou-se por apresentá-las separadamente.

3.1 FFB Compacta

Foram avaliadas amostras de hematitos compactos, itabiritos compactos quartzosos (ICQ), dolomíticos (ICD) e anfibolíticos (ICA) das minas das Águas Claras (MAC), Abóbora (ABO), Segredo (SEG) e Capitão do Mato (CMT).

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de UCS, velocidade das ondas P e S e os valores dos módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson estático à partir dos ensaios de UCS e módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson dinâmicos à partir da medida da velocidade de propagação da onda P e cálculo da onda S.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de laboratório para as FFB compactas.

ID	Mina	Litologia	UCS (MPa)	Velocidade ondas P (m/s)	Velocidade ondas S (m/s)	E din (GPa)	ν din	E stat (GPa)	ν stat	Densidade (T/m^3)
1	CMT	ICA (0°)	351	6024	3133	83.5	0.27	108.1	0.126	3.24
2	CMT	ICA (0°)	145	6253	3352	103.4	0.27	50.3	0.346	3.68
3	CMT	ICA (0°)	341	6329	3391	107.4	0.27	126.8	0.192	3.77
4	CMT	ICA (0°)	313	6487	3363	113.3	0.27	120	0.144	3.81
5	CMT	ICA (90°)	173	5682	2855	69.0	0.27	117.9	0.109	3.04
6	CMT	ICA (90°)	256	5882	3059	84.1	0.27	85.2	0.145	3.42
7	CMT	ICA (90°)	369	5618	2921	67.4	0.27	115.6	0.103	3.00
8	MAC	ICD (0°)	68	6494	3377	92.3	0.27	97.3	0.234	3.08
9	MAC	ICD (0°)	85	6757	3514	99.1	0.27	82	0.238	3.05
10	MAC	ICD (0°)	83	5747	2989	72	0.27	73	0.062*	3.06
11	ABO	ICQ (0°)	166	6526	3394	106	0.27	55.2	0.292	3.30
12	ABO	ICQ (0°)	202	6660	3463	118.3	0.27	98.9	0.232	3.76
13	ABO	ICQ (90°)	379	5971	3105	96	0.27	99	0.200	3.79
14	ABO	ICQ (90°)	288	6011	3126	94.7	0.27	107.8	0.224	3.69
15	ABO	ICQ (90°)	253	6005	3122	96.3	0.27	102.8	0.218	3.76
16	SEG	HC	538	7000	3640	181	0.27	223	0.320	5.2
17	SEG	HC	521	7646	3976	215	0.27	213	0.330	5.2
18	SEG	HC	225	7889	4102	230	0.27	223	0.310	5.2

A Figura 4 apresenta o gráfico que correlaciona os resultados UCS com a densidade.

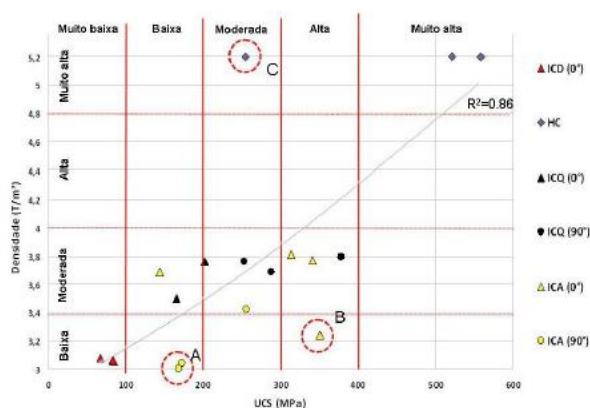


Figura 4. Gráfico mostrando a correlação entre os resultados de UCS que leva em consideração da

Mesmo com um pequeno número de amostras ensaiadas é possível notar que existe uma correlação direta entre a densidade e os valores de UCS, dado pela curva exponencial apresentada na Figura 4, porém, apresenta baixo valor de correlação quando considerado o universo dos materiais ensaiados. Quando os ensaios considerados atípicos são extraídos do conjunto (A, B e C apresentadas nas Figuras 4 e 5) o valor da curva de correlação apresenta resultados com melhor correlação entre as variáveis de $R^2=0.86$, como observado na Figura 4.

A Figura 5 apresenta fotografias dos corpos de prova antes e após os ensaios.

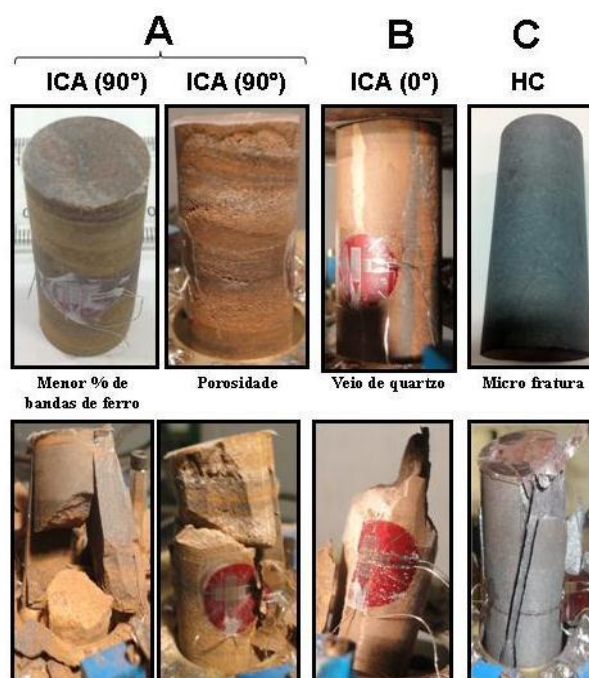


Figura 5. Fotografias das amostras testadas e seus efeitos geológicos diferenciados dos tipos típicos.

Os resultados mostram que o ICD apresenta resistência uniaxial e baixa densidade. Esses resultados podem estar associados à presença de minerais planares nos planos de bandamento (especularita e talco) enquanto que os baixos valores de densidade estão associados à menor densidade dos minerais de ganga desse tipo (ferro dolomita e siderita).

O ICQ apresenta moderada densidade e valores de UCS variando de baixa a alta para. Como esperado, pois para não interfere no resultado dos testes.

O ICA mostra-se disperso em relação à

densidade, variando de baixa a moderada, e valores de resistência, variando de baixa a alta. Essa dispersão foi associada à presença níveis com maior porosidade e ou diferença do tamanho (%) de bandas de minerais ferruginosos em relação à banda de minerais não ferruginosos que podem fazer variar tanto a resistência quanto à densidade, como pode ser visto na Figura 5(A). Isso não é notado no ICQ que se apresenta mais homogêneo, sem alteração intempérica visível.

A HC apresentou densidade muito alta e valores de UCS que variaram de moderado a muito alto. A dispersão da resistência se deu devido à presença de micro fraturas como podem ser observadas na Figura 5(C).

A baixa correlação dos dados de resistência e densidade observados pode ter ocorrido devido ao pequeno número de amostras e presença de feições geológicas que podem alterar os resultados tanto da densidade quanto da resistência. São exemplos dessas feições: vênulas de quartzo, níveis mais porosos e ou alterados e micro fraturas como podem ser observados na Figura 5(B e A).

3.2 FFB Friáveis

Foram avaliadas amostras de itabiritos friáveis argilosos (IFA) e hematita friável (HF) da mina do Tamanduá (TAM).

A Tabela 3 mostra os resultados dos ensaios físicos e a Figura 5 mostra esses resultados na tabela de plasticidade.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de laboratório das amostras friáveis.

ID	Amostra	Lítipo	Atterberg							PSD					Classificação		Índice fixos
			LL	PL	PI	SL	LS	A	escudo (%)	areia (%)	silt (%)	argila (%)	Co	Cu	USCS	Densidade (g/cm³)	
1	IFA	37	21	17	-	-	2	20	0	17	70	13	2	7	CL	1.95	
2	IFA/HF	35	21	14	17	7	2	20	52	26	2	1	34	SC		2.84	
3	IFA	24	17	8	15	5	2	3	62	34	2	2	16	SC		3.09	
4	IFA/HF	28	24	4	22	3	1	13	63	22	2	17	68	SM		2.38	
5	IFA/HF	25	19	6	17	2	1	4	55	38	2	1	18	SC-SM		2.60	
6	IFA	34	26	8	23	5	2	1	47	49	2	1	7	ML		2.71	
7	HF	11	8	3	-	-	2	5	55	38	2	1	12	SM		2.96	

Os dois tipos apresentam características físicas e resistência de solo distintas, sendo o IFA siltoso com baixa a moderada porcentagem de argila e baixa plasticidade e o HF arenoso

fino a siltoso.

A plasticidade varia progressivamente dos itabiritos argilosos friáveis com CL para CLML até as hematitas friáveis ML. Para a densidade é de esperar tipos mais densos para a HF e menos densos para os IFA associando o aumento da densidade com o teor de ferro, como estudado por Santos et al (2007), porém, a variação da porosidade e a percentagem de bandas mais argilas do IFA com bandas mais siltosas de HF podem fazer variar os resultados da densidade como podem ser visto na Tabela 3.

A Figura 5 apresenta as curvas de ajuste de sucção matricial (SWCC) com os parâmetros de poro pressão também ajustados para as litologias avaliadas segundo Fredlund e Xing (1994). Nota-se uma semelhança na forma da curva e os parâmetros resultantes mostram baixos valores de sucção sendo o IFA mais susceptível a esse efeito, com valores que chegam à ordem de 324 KPa enquanto que a HF possuem ordem de 237 KPa. A natureza mais argilosa do IFA pode ser notada pelos valores de entrada que representam o dobra do obtido para os materiais menos argilosos.

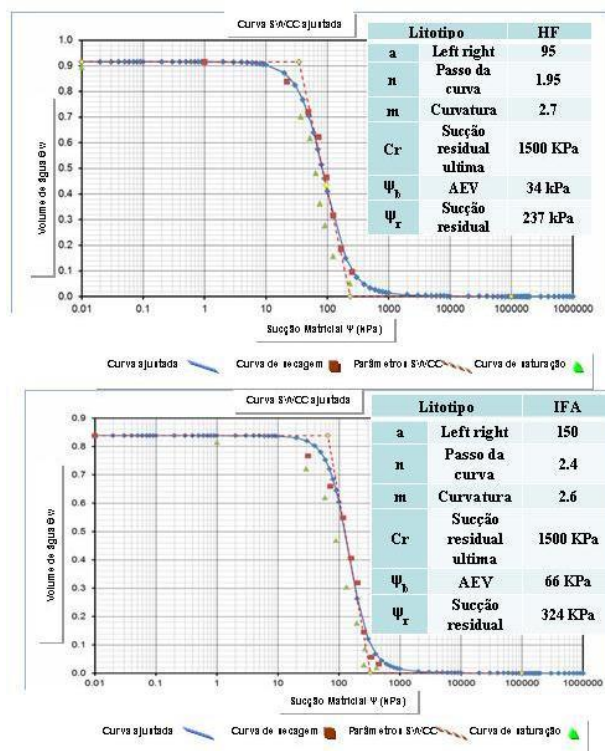


Figura 5. Curvas de ajuste e tabela de resultados dos ensaios de SWCC para as amostras ensaiadas.

4. IMPLICAÇÕES DOS RESULTADOS

Historicamente as avaliações de estabilidade realizadas nas minas da Vale, vêm utilizando critérios de ruptura de Mohr Coulomb, muitas vezes até mesmo para as rochas compactas, considerando, portanto a resistência da rocha intacta. A difusão de ensaios de compressão uniaxial e a adoção de critérios de ruptura de maciço rochoso apoiados nesses ensaios têm trazido novas perspectivas às análises de estabilidade de taludes, incluindo efeitos de anisotropia e feições geológicas a esses parâmetros, bem como os valores de resistência atribuídos às descontinuidades.

Do mesmo modo, a inclusão do efeito sucção em taludes temporários nos quais as condições drenadas podem ser consideradas credita maior resistência aos taludes.

Em ambos os casos os resultados das análises, tanto de equilíbrio limite quanto de tensão-deformação tem-se mostrado mais assertivas.

5. CONCLUSÕES E PRÓXIMOS PASSOS

Mesmo que preliminarmente pode-se afirmar que os tipos compactos avaliados possuem altos valores de resistência e atuam nas minas como pontes rochosas. A resistência das FFB fresca é influenciada pela anisotropia de direção que será determinante para os mecanismos de ruptura, principalmente em condições onde o plano de anisotropia se encontre com alteração COBRAMSEG 2016 inferior à da matriz, representando ponto de fraqueza do maciço rochoso.

Os vários litotipos de FFB apresentam diferentes resistências da rocha intacta (matriz) definidas principalmente pelos ensaios UCS e, de maneira geral, as rochas mais densas apresentam maior valor de resistência à compressão uniaxial sendo crescente à partir dos itabiritos dolomíticos, anfíbolíticos, quartzosos e máximos para os hematítitos.

A anisotropia de direção dada pelo bandamento nos itabiritos quartzosos e hematítitos mostrou menor importância.

Os agrupamento friável apresentam em

laboratório um aumento da poro pressão negativa quanto maior o teor de argilo minerais. Esses valores, mesmo que baixos, podem ser significativos na coesão aparente desses tipos em condições de taludes não saturados e devem ser levados em consideração nas análises de estabilidade.

Os próximos passos referentes à pesquisa vão se concentrar nos tipos ainda não avaliados dos grupos semi- compactos e friáveis para determinação dos parâmetros de resistência e deformação, na determinação da poro pressão in situ dos tipos friáveis bem como incrementar os ensaios de laboratório e incluir ensaios de determinação da porosidade dos vários tipos estudados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Vale S.A. por suportar a pesquisa, aos colegas de empresa e academia pelas discussões e incentivo.

REFERÊNCIAS

- A. S. T. M., 2002. D2938-95. Brazilian Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens. In
- Costa, T.A.V.; Dight, M.P.; Mercer, K. and Marques, ore mines on the western side of the Iron Quadrangle, Brazil: A geological and geotechnical overview from fresh to completely weathered itabirites. In Proceedings Iron Ore Conference 2015, Perth, Australia, (1).
- Costa, T.A.V.; Mercer, K; Dight, M.P. and Marques, E.A.G, 2015(A). Weathered banded iron formations in Vale iron ore mines on the western side of the Iron Quadrangle, Brazil: weak hematite and weathered argillaceous itabirite geotechnical characteristics and implications of matrix suction effects on slope stability in Proceedings International Symposium on Slope Stability 2015, Cape Town, South Africa, (1)
- Dorr, J, V N, II, 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, U. S. Geological Survey Professional Paper, 641 A: 110.
- Fredlund, D G., & Xing, A, 1994. Equations for the soilwater characteristic curve. Canadian geotechnical journal, 31(4), 521-532. ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974- 2006. International Society for Rock Mechanics, Commission on Testing Methods, Australia.

- Morris, R C, 2002. Iron Genesis and post ore Metasomatic at Mount Tom Price, in Proceedings Iron Ore Conference 9, Perth, Western Australia, pp 3-12.
- Pires, F R M, 1995. Textural and mineralogical variations during metamorphism of the Proterozoic Itabira Iron Formation in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil, *Annals of Sciences Brazilian Academy* 67:77-105.
- Ramanaidou, E R, 2009. Genesis of lateritic iron ore from banded iron-formation in the Capanema mine (Minas Gerais, Brazil), *Australian Journal of Earth Sciences*, 56(4):605-620.
- Ribeiro, D T and Carvalho, R M, 2002. Simulation of Weathered Iron Ore Facies: Integrating Leaching Concepts and Geostatistical Models, in Proceedings Geostatistics Rio 2000, pp 101-115 (Springer Netherlands).
- Ribeiro, D T, 2003. Banded iron formations: Supergene Enrichment: Disorder and collapse structures, PhD thesis, Geoscience institute Federal university of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Rosière, C A, Chemale, F, Jr and Quade, H, 1993. Iron Quadrangle iron ore microstructural analysis: developed texture for an orgies model, in Proceedings Workshop Geological iron ore structures, Belo Horizonte, pp 362-366 (Brazilian geological Society, Nucleus Minas Gerais).
- Rosière, C A, Quade, H, Siemes, H, Chemale, F, Jr and Resende de Souza, E M, 1996. A microstructural evolutionary model for Iron Quadrangle iron ore. Part II Texture and magnetic, *Geonomos* 4:61-75.
- Santos, P A, Kaneko, K M, Santos and G J L, 2005. Rock density test for CVRD South division, in Proceedings VI Brazilian Iron Ore Symposium, Florianópolis, 2 :855-864 (Brazilian Mining, Materials and metallurgical association).
- Santos, P A, 2007. Variations rock density at Quadrilatero Ferrifero region. XXXVII Raw material and iron ore reduction seminar, in Proceedings VIII Brazilian iron ore symposium, Salvador BA, v1, pp 200-211 (Metallurgical, materials and mining Brazilian association).
- Spier, C A, 2005. Geology and geochemistry of the Águas Claras and Pico Iron Mines, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, PhD Thesis, São Paulo University, São Paulo.