

# 16º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental

## ESTUDO DA CONECTIVIDADE HIDRÁULICA E ESTABILIDADE DE TALUDE DE MACIÇO DE ITABIRITO, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG

Jhansy Dinally Díaz Lesmez<sup>1</sup>; Maria Giovana Parizzi<sup>2</sup>

**Resumo** – Este trabalho objetivou caracterizar e classificar a qualidade geotécnica e hidráulica de um maciço de Itabirito localizado nas proximidades da Mina de Águas Claras, Nova Lima, MG. Os dados obtidos foram usados para recriar os condicionantes de um escorregamento ocorrido em 1992 em maciço de itabirito localizado na cava da mina de Águas Claras. Os resultados obtidos poderão contribuir para o entendimento das causas de deslizamentos de taludes de itabirito na região. Para tanto, foram analisadas características geológicas, geotécnicas e também realizado o estudo da conectividade hidráulica do maciço de Itabirito. Estas análises foram realizadas através dos programas *Wedge Failure Analysis* e *Planar failure Analysis*, programas da *Rocscience* e os sistemas de classificações RMR e Barton. Os estudos no talude permitiram observar que os principais mecanismos de ruptura foram planares e em cunha. As rupturas dependem da relação geométrica entre as descontinuidades dos maciços rochosos e a direção dos cortes dos taludes além de outros fatores de natureza antrópica, geomorfológica e climática. As rupturas planares são comuns tanto para o talude de estudo, quanto para o Talude da mina Águas Claras. A maior parte dos movimentos no talude analisado ocorre de maneira progressiva, dependendo das mudanças geométricas e dos estados de alteração do maciço ao longo do tempo. Os condicionantes geológicos influenciam no tipo de ruptura, enquanto as ações antrópicas, as características geomorfológicas e a ação da água interferem no grau de predisposição dos terrenos aos movimentos de massa.

**Abstract** – This work intends to characterize and classify the geotechnical and hydraulic quality of an Itabirite rock mass in a highway slope located in the Quadrilátero Ferrífero region, in Minas Gerais State. Slope's discontinuities were systematically analyzed in order to simulate the causes of the Águas Claras mine's landslide occurred in 1992. Also, trying to establish some constants for Itabirito slope's landslides and developing preventive methods in the region. Geological, geotechnical and mechanic slope's characteristics were evaluated. These analyses were carried out with *Wedge Failure Analysis* and *Planar failure Analysis* softwares, *Rocscience* Softwares and RMR and Barton's classification systems. Collected data from the slope show that exists two failure mechanisms types and they depend on the relationship between discontinuity orientations and the slope face orientation. Wedge and planar failures occur. The accident in Aguas Claras mine was caused by a planar failure. Most of the landslides that were observed in the analyzed slope occur in a progressive way, depending on the changes in the slope geometry and on the weathering conditions of rock masses along the time. The geological factors are responsible for the failure type, while human activities, geomorphologic factors and water action are responsible for the failure susceptibility degree of the rock mass.

**Palavras-Chave** – Instabilidade de talude; Itabirito; Conectividade Hidráulica

<sup>1</sup> Estudante de Geologia, Universidad Industrial de Santander, Colômbia, jhansydylez\_95@hotmail.com

<sup>2</sup> Geól., Dra, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geologia: Belo Horizonte, mgparizzi18@gmail.com

## 1. INTRODUÇÃO

Os Itabiritos são maciços rochosos pertencentes a formações ferríferas metamórficas, fortemente oxidadas apresentando descontinuamente corpos de minério de alto teor (>64% Fe), de morfologia mais ou menos lenticular e dimensões variáveis desde alguns decímetros até centenas de metros (Rosiére *et al*, 2000). Os maciços rochosos são compostos por um conjunto de blocos originados da rocha intacta, sendo limitados pelas suas descontinuidades. Seu comportamento mecânico e hidráulico é função das propriedades da rocha intacta, bem como das descontinuidades presentes, as quais são as que possuem maior influência neste comportamento. Geralmente os Itabiritos são resistentes a deslizamentos e também excelentes aquíferos dentro do território do QF. Entretanto, alguns deslizamentos de grande porte podem ocorrer, isso dependendo da direção e altura dos cortes realizados em estradas e minerações, como também do fluxo hidráulico que percola no interior das descontinuidades. Um dos maiores exemplos de escorregamentos de grande porte ocorridos em taludes de mineração de Itabiritos, foi a ruptura do Morro do Patrimônio, ocorrida em abril de 1992, situado na Mina de Águas Claras (MAC) (localizada aprox. a 1900 m da área de estudo), pertencente à época à Minerações Brasileiras Reunidas S/A (MBR), Município de Nova Lima (MG). Esse deslizamento, não acarretou perdas humanas. O acidente ocorreu por volta das seis horas, já no momento da troca de turno dos operários, havendo apenas três equipamentos trabalhando próximo do local. A massa de minério deslocada alcançou um volume de 500.000 m<sup>3</sup> dentro da cava da mina (Gobbi *et al*, 2015).

### 1.1. Objetivo

O presente trabalho tem a finalidade de caracterizar e classificar a qualidade geotécnica e hidráulica de um maciço de Itabirito em talude de corte similar ao talude da Mina de Águas Claras e possibilitar a simulação do deslizamento ocorrido neste local em 1992.

## 2. MÉTODOS

Por questões de segurança, o talude da Mina de Águas Claras não está acessível ao público. Assim, para este estudo, foi escolhido um talude próximo ao da mina, chamado de talude Mangabeiras, contendo semelhantes características geológicas e morfológicas, o que permitiu posterior comparação dos resultados e simulação do escorregamento ocorrido no talude da Minas de Águas Claras em 1992. A descrição geral do maciço foi feita de acordo com o método da ISRM (1983). Foram analisadas a rocha intacta e as descontinuidades segundo a orientação, espaçamento, persistência, rugosidade, abertura, tipo de preenchimento, resistência das paredes, percolação e grau de alteração da rocha. Preferencialmente, as medidas foram tomadas no interior das cicatrizes de ruptura e escarpas de escorregamentos do talude. Esses locais nem sempre foram de fácil acesso ou estavam cobertos por depósitos superficiais que impediam a exposição do maciço rochoso e conseqüentemente das descontinuidades. A rugosidade foi determinada conforme a granulometria dos minerais, o tipo e grau de cimentação e a curvatura e aspereza das paredes das descontinuidades. A resistência a compressão pontual foi avaliada mediante ensaios com martelo de Schmidt e martelo de geólogo.

Para a classificação geotécnica do maciço foram adotados os sistemas RMR de Bieniawski (1989) e Q de Barton *et al.* (1974). Para ajuste dos valores de coesão e ângulo de atrito das descontinuidades encontrados foi usado o programa Roclab 1.0 da Rocscience.

A Análise Cinemática foi realizada para a avaliação das possíveis rupturas do maciço rochoso, condicionadas pelas descontinuidades existentes. Utilizou-se critérios de Projeção Estereográfica Horizontal, sendo possível efetuar uma correlação espacial entre as descontinuidades dos maciços e o topo e face dos taludes. O método está bem descrito no trabalho de Fiori & Carmignani (2001). O programa Dips.5 da Rocscience (2012) foi utilizado para a execução das projeções estereográficas. O diagrama de igual área ou rede de Schmidt-Lambert foi usado para o lançamento dos dados por planos e pólos. Para a obtenção do grau da conectividade das juntas do maciço rochoso utilizou-se o método de Zhang *et al.* (1992), descrito em Fiori e Carmignani, 2009. Os programas Wedge Failure, Plane failure (Kroeger, 1999) e, também, os programas Swedge e Rocplane (Rocscience, 2002) foram usados para o tratamento dos dados obtidos e cálculo dos Fatores de Segurança pelo método do Equilíbrio Limite (Hoek & Bray, 1981) para

cada ruptura prevista por meio da análise cinemática. Devido à alta conectividade hidráulica do maciço, em todas as análises foi considerado o grau de saturação 100%. Após a obtenção e interpretação dos dados geotécnicos concluiu-se à respeito dos condicionantes responsáveis pela ruptura de taludes de Itabirito localizados na encosta da Serra do Curral do Quadrilátero Ferrífero.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

#### 3.1. Localização

O talude analisado, que será chamado neste trabalho de Talude Mangabeiras, localiza-se no limite entre o município de Nova Lima e Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1), na porção sul da Serra do Curral. O talude tem uma extensão aproximada de 150 m e uma altura aprox. de 75 m. Suas coordenadas geográficas são: X: 0612753 e Y: 7791677. O talude da Mina de Águas Claras localiza-se a uma distância de 1900m em direção nordeste e apresenta as coordenadas X:0614597 e Y:7792948.

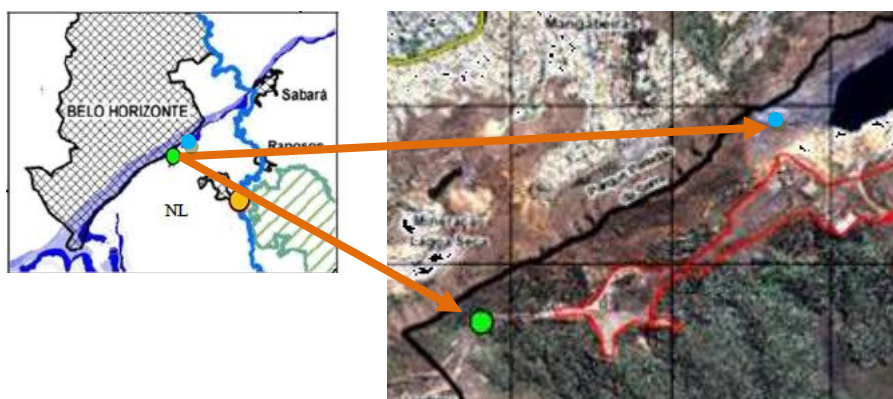


Figura 1. Localização e imagem do talude Mangabeiras (círculo verde) e do talude da Mina de Águas Claras (círculo azul)

#### 3.2. Caracterização Geológica

Geologicamente a área de estudo faz parte do Quadrilátero Ferrífero QF um dos pólos de mineração mais importantes do Brasil, composto por quatro grandes unidades: o embasamento granito-gnáissico de idade arqueana; sequências metavulcano-sedimentares do Supergrupo Rio das Velhas (SGRV), também arqueano; sequências meta-sedimentares paleoproterozóicas do Supergrupo Minas (SGM) e meta-sedimentos do Grupo Itacolomi. As unidades acima citadas são cortadas por diques básicos, veios pegmatíticos e veios de quartzo, estes últimos abundantes em todas as sequências litológicas. A área de estudo localiza-se na borda sul da Serra do Curral. A estrutura da Serra do Curral é o maior exemplo do acervo de estruturas vergentes para NNW. Ao longo de praticamente toda sua extensão, as unidades do SGM estão invertidas com mergulho das camadas predominantemente para SE. Medina (2005) definiu estruturalmente a Serra como um “hogback” extenso, constituindo o resto de uma dobra sinclinal invertida das rochas do SGM sobre as rochas graníticas da região de Belo Horizonte (Depressão Periférica de Belo Horizonte). O Supergrupo Minas é composto da base para o topo por quatro Grupos: Caraça Itabira, Piracicaba e Sabará. Ocorre em discordância sobre o Supergrupo Rio das Velhas e complexos granito-gnáissicos (Dorr, 1969). Foi depositado em ambiente plataformar de margem passiva (Alkmin e Marshak, 1998) e suas rochas são correlacionadas à Sequência Transversal, na África do Sul, sugerindo que teriam sido depositadas na mesma bacia (Renger *et al*, 1994). O Grupo Itabira sobreposto ao Grupo Caraça e em contato transicional representa o maior período de sedimentação química plataformar da bacia e contém a sequência mais espessa de formações ferríferas bandadas com corpos de minério de alto teor economicamente exploráveis. É constituído por itabiritos, dolomitos e, subordinadamente, metapelitos. Processos de metamorfismo e deformação modificaram diversas características primárias dos sedimentos originais e deram a esse conjunto de rochas um aspecto único quando comparados com outras regiões ferríferas (Rosiere *et al*, 2000).

Está subdividido da base para o topo em Formação Cauê e Formação Gandarela. A primeira é a basal e é composta predominantemente por itabiritos (Bandeira, 2015). Segundo Dorr (1969) o



termo itabirito refere-se, a uma formação ferrífera óxido laminada e metamórfica na qual as bandas de chert ou jaspe originais estão recristalizadas como quartzo granular e o ferro está presente como hematita, magnetita ou martita. As bandas de quartzo contêm quantidades variáveis, porém menores, de óxido de ferro, acontecendo da mesma forma para as bandas de óxido de ferro e seu conteúdo de quartzo. A formação Cauê tem espessura da ordem de 250 a 300 m. Está caracterizada pelos seus grandes depósitos de minério de ferro compostos principalmente por itabiritos que apresentam padrões de assinaturas de elementos terras mais características de águas oceânicas com mais de 100 metros de profundidade. Constitui a crista e o terço superior da escarpa da Serra do Curral. A litologia característica é o itabirito silicoso, uma formação ferrífera, constituída de quartzo finamente granular e hematita, localmente rica em magnetita. Sua estrutura marcante é fina, com alternância de leitos de hematita e de quartzo, que lhe confere um aspecto listrado em branco e preto (ou marrom escuro). Intercalam-se no itabirito típico, camadas e lentes de diferentes espessuras de itabirito dolomítico, filito hematítico e filito dolomítico.

### 3.3. Caracterização Geotécnica

#### 3.3.1. Descrição do maciço rochoso

O local do talude situa-se dentro de uma zona de controle estrutural bastante forte altamente influenciado pela Serra do Curral, sendo esta uma megaestrutura de direção NE/SW, com extensão aproximada de 100 km que geralmente delimita os contatos entre as unidades geológicas da área. O talude apresenta direção e mergulho geral de 125/70. A Foliação principal, família F1, apresenta orientação 155/58 ou 170/50 devido à presença de um dobramento suave e aberto com eixo 260/40. Três famílias de fraturas sub-verticais e inclinadas, persistentes e com espaçamento médio de 19,6 cm, foram identificadas (Tabela 1). Essas famílias são responsáveis pela delimitação dos blocos que se rompem do itabirito. A (Figura 2) ilustra duas faces rochosas contendo um conjunto de descontinuidades de três famílias, sendo a foliação paralela ao plano da face do talude. O maciço, de forma geral, apresenta resistência a compressão baixa, altamente alterada. Prontamente amolgada com o dedo polegar, e penetrada com baixo esforço. Também corresponde ao grau de alteração W4, rocha muito alterada, ou seja, a alteração é visível em todo o maciço rochoso e a rocha é parcialmente friável (Figura 3). Quanto a coerência, pode ser atribuído o fator C4, que corresponde a Rocha incoerente, ou seja, quebra com a pressão dos dedos, desagregando-se. Pode ser cortada com lâmina de aço.

Tabela 1. Caracterização das descontinuidades e orientação dos taludes Mangabeiras e Mina Aguas Claras

ATITUDE TALUDES			ABERTURA	PREENCHIMENTO	RUGOSIDADE	ESPAÇAMENTO (cm)	PERSISTÊNCIA (m)	RESISTENCIA			
<b>TALUDE MINA AGUAS CLARAS</b>	<b>65/70</b>	<b>155/70</b>		Talude que sofreu escorregamento na Mina de Aguas Claras							
<b>TALUDE MANGABEIRAS</b>	<b>30/70</b>	<b>125/70</b>		Talude do estudo.							
FAMÍLIAS			ATITUDE FLIAS.								
<b>F1</b> (Acamamento principal)	Cuadrantes	Aniutnal	0.5 -5 cm	Tabela 6	Tabela 7	PLANO/RUGOSA	Dados: 13, 7, 8, 32, 6, E5 Próxima (6 a 20cm) E. médio: S1= 0.13m	<b>GRANDE</b> De 10 a 20m	Rocha extremadamente fraca		
	N65E/70SE	65/70		5	6						
	N68E/75SE N88E/57SE	68/75 90/57									
<b>A F1</b> apresenta dobramento.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Direção 260/40</li> <li>▪ Plano flanco E 160/54</li> <li>▪ Plano flanco W 170/50</li> </ul>										
	Cuadrantes	Aniutnal	1-5 cm	5	5	ONDULADA/ ESTRIADA/RUGOSA	Dados: 20, 12, 15, 23, 13 30, 45, 22, 30 E5 próxima (6 a 20cm) E. médio: S2=0.23 m	<b>MUITO GRANDE</b> <20m	Rocha extremadamente fraca		
N11E/48SE N10E/45SE	11/48 10/45										
<b>F3</b>	Cuadrantes	Aniutnal	1-3 cm	5	6	RUGOSA	Dados: 40, 10, 36, 25, 15 0.2, 0.5, 0.6, 0.8 Medianamente afastada E4 (20 a 60cm) E. médio: S3=0.25 m	<b>MUITO PEQUENA</b> < 1m	Rocha extremadamente fraca		
	N58E/88NW N10E/85NW N22E/74NW	58/88 10/85 22/74									
<b>F4</b>	Cuadrantes	Aniutnal	0.5-1 cm	5	6	PLANO/RUGOSA	Dados: 20, 23, 17 E5 Próxima (6 a 20cm) E. médio: S4= 0.2 m	<b>GRANDE</b> De 10 a 20m	Rocha extremadamente fraca		
	N40W/86SW N10W/84SW N35W/78SW	320/86 350/84 325/78									

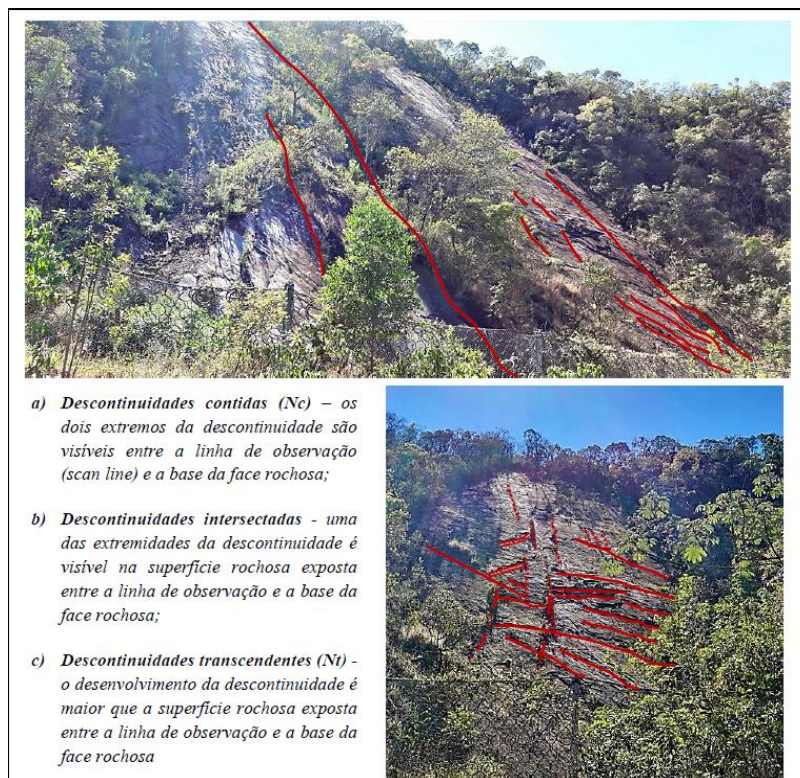


Figura 2. Vista geral do Talude de Itabirito e das principais famílias de descontinuidades e as representações dos tipos de descontinuidades segundo sua persistência (a – contidas; b – intersectadas; c – transcendentais).

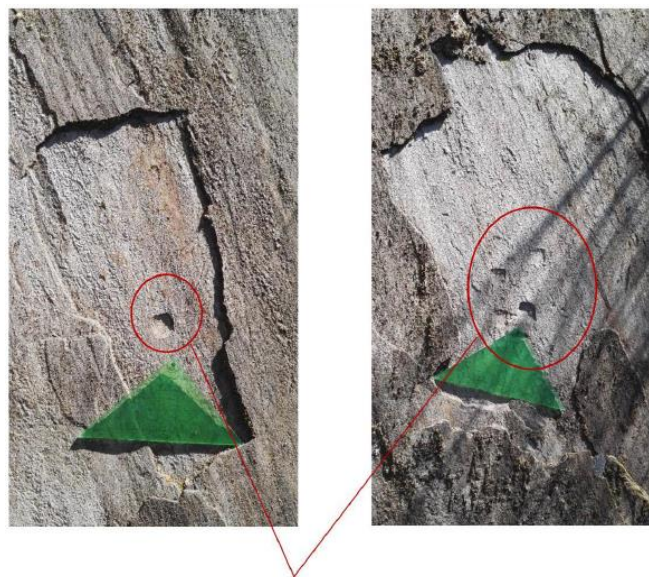


Figura 3. Marcas causadas pelo impacto do martelo de Schmidt na parede das descontinuidades, mostrando o baixo grau de resistência.

### 3.3.2. Classificação do maciço

Os sistemas de classificação de maciços adotados foram o Sistema RMR de Bieniawski (1989) e o Sistema Q de Barton *et al.* (1974). A classificação do maciço, conforme o critério RMR, foi a classe V (nota = -21), ou seja, maciço muito ruim, com valores prováveis de ângulo de atrito menores a  $15^\circ$  e coesão menor que 100 kPa. Como o Sistema RMR fornece faixas de valores de coesão e atrito aos maciços rochosos, foi necessário ajustar os valores obtidos para um único valor. Pelo sistema Q, o ângulo de atrito encontrado foi de  $11^\circ$ , valor semelhante ao encontrado pela classificação RMR ( $<15^\circ$ ). O Sistema Q não oferece valores de coesão. O valor de coesão,

menor que 100 kPa, encontrado pela classificação RMR, pode ser muito variável. Assim, utilizou-se o programa Roclab 1.0 da Rocscience para o ajuste desses valores. Os resultados obtidos foram: 30 t/m<sup>2</sup> para a coesão e 11° para o atrito. É válido ressaltar que foi utilizado o valor de 3,42 t/cm<sup>3</sup> como o peso específico do Itabirito e 1000 kg/m<sup>3</sup> da água.

### 3.3.3. Análise Cinemática

Os diagramas apresentados durante este estudo representam as atitudes médias das famílias das discontinuidades. Ainda que a análise feita com base nesses estereogramas seja de caráter semiquantitativa, é bastante útil na definição de áreas críticas que requerem uma análise mais rigorosa (Parizzi, 2004). Através da análise cinemática do Talude Mangabeiras (Figura 4) foi possível reconhecer a possibilidade de ruptura em cunha, pela intersecção das famílias de discontinuidades F1 e F2 e também entre F4 e F2, e de rupturas planares ao longo do plano das famílias F1 e F2. A análise cinemática considerando a orientação do talude da Minas Aguas Claras já evidencia forte possibilidade de ruptura planar ao longo de F1 e ruptura em cunha pela intersecção entre F4 e F2.

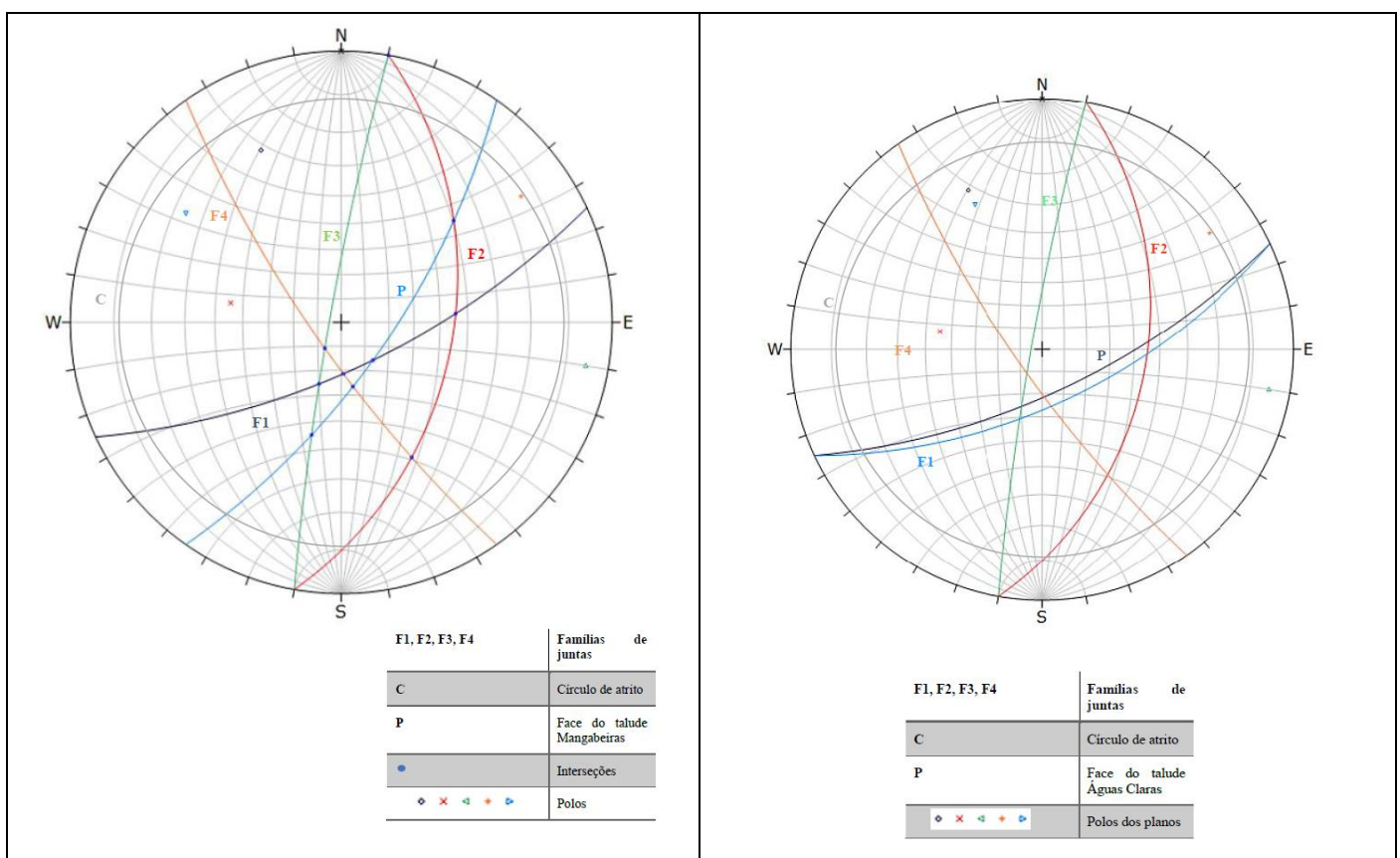


Figura 4. Diagrama estereográfico exibindo a análise cinemática das discontinuidades descritas considerando a orientação do Talude Mangabeiras (diagrama da esquerda) e a orientação do Talude Minas Aguas Claras (diagrama da direita)

### 3.3.4. Conectividade Hidráulica

As discontinuidades têm um significativo efeito nas propriedades geotécnicas dos maciços rochosos. Nesse sentido, é importante diferenciar as discontinuidades individuais daquelas componentes de um Sistema, principalmente para o estudo da estabilidade e permeabilidade de maciços rochosos, pois são afetadas, não somente pelas características das discontinuidades individuais, mas, principalmente, pelas características do sistema de discontinuidades como um todo. Particularmente, o grau de conectividade hidráulico de um sistema de juntas desempenha um papel importante na permeabilidade das rochas. Dentre os possíveis parâmetros geométricos das discontinuidades como direção, inclinação, etc., parece que a conectividade ou grau de interação das discontinuidades é um dos mais importantes e talvez, dos mais difíceis de ser avaliado (Fiori e Carmignani, 2009). O método de Zhang et al. (1992), descrito em Fiori e

Carmignani, 2009, propõe uma metodologia mais completa para a descrição da conectividade das juntas em um maciço rochoso, eles caracterizam qualquer conjunto de juntas como sendo constituído por nós e ramos. Um nó é representado por um ponto de interseção entre duas ou mais descontinuidades, enquanto os ramos podem ser classificados em dois tipos diferentes: conectados e não-conectados. Uma junta individual, dentro de um conjunto, é chamada de ramo não-conectado, enquanto uma junta conectada a um nó ou situada entre dois nós é denominada de ramo conectado. A Figura 5 mostra um sistema de juntas com 63 nós, 6 redes de juntas conectadas e 8 ramos não conectados. A razão de conectividade  $C_k$  de um conjunto de juntas é definido como:

$$C_k = \frac{\sum B_k}{B_c + B_0} \quad \text{equação 1}$$

$B_k$  representa a soma dos ramos conectados de todas as redes de  $k$ -ésima ordem, e  $B_0$  o número total de ramos não conectados e  $B_c$  é o número de ramos conectados. Fica evidente da relação acima que quando  $C_k$  é igual a zero, a razão de conectividade será zero, indicando um caso extremo de um conjunto de juntas sem nenhum intercruzamento, estando todas separadas umas das outras. Por outro lado, o extremo oposto é dado quando  $C_k$  é igual à unidade e, nesse caso, todas as juntas estão interconectadas. O valor de  $C_k$  deverá, portanto, variar entre 0 e 1. O grau de conectividade para o maciço de Itabirito do talude Mangabeiras foi  $C = 0,94$ , ou seja o maciço apresenta boa conectividade e, portanto, a água desempenha papel fundamental como condicionante das rupturas.

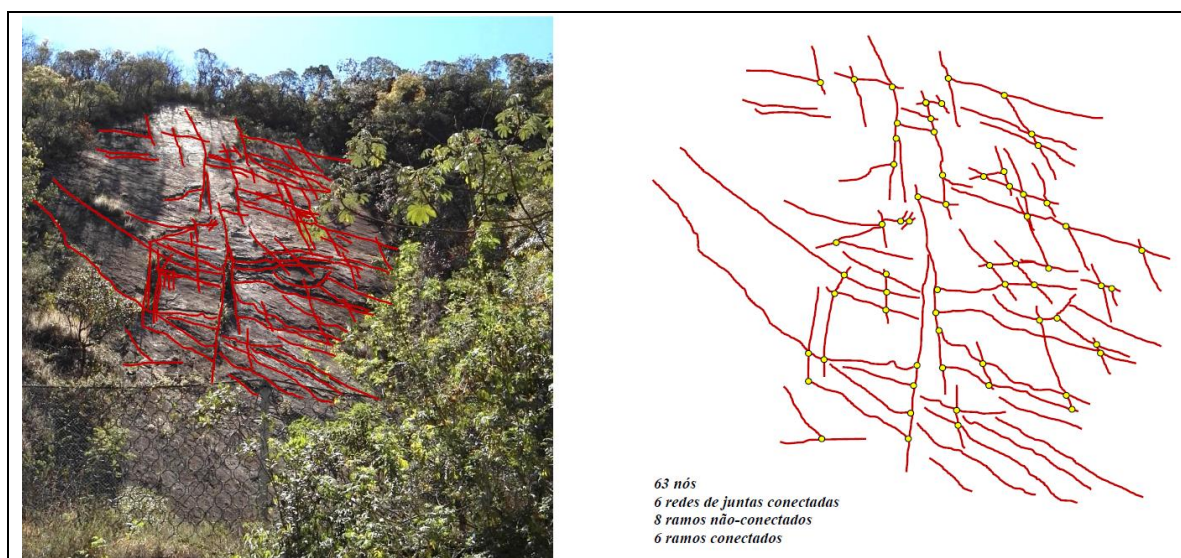


Figura 5. Análise da conectividade das descontinuidades presentes no maciço de Itabirito do talude Mangabeiras.

### 3.3.5. Análise do Equilíbrio Limite

O fator de segurança (FS) para a ruptura em cunha formada entre as interseções das descontinuidades F2 e F1 foi próximo de 2, o que significa estabilidade ou pouca possibilidade de ruptura. Já o FS para a cunha formada entre F2 e F4 foi ligeiramente maior do que 1, ou seja 1,02. Isso demonstra maior possibilidade de ruptura em cunha, principalmente no talude da mina Aguas Claras devido à orientação do corte ser geometricamente mais favorável. Devido à alta conectividade hidráulica do maciço, em todas as análises foi considerado o grau de saturação 100%. A Figura 6 exhibe a forma das possíveis rupturas em cunha, sendo em “a” a cunha formada entre F2 e F1 e em “b” a cunha formada entre F2 e F4.

Com relação às rupturas planares, os fatores de segurança para as rupturas ao longo de F1 e ao longo de F2 foram, respectivamente, 0,0 e 0,98. Isso significa que os taludes já apresentam rupturas planares segundo F1 e estão no limite para rupturas ao longo de F2. As rupturas ao longo de F1 são caracterizadas por blocos estreitos e amplos, como se fossem placas finas delimitadas pela foliação (Figura 6, letra c). A ruptura planar ao longo de F2 já envolve blocos

mais espessos como mostra a Figura 6, letra d. A Figura 7 exibe cicatriz de rupturas planares ao longo de F1 no Talude Mangabeiras.

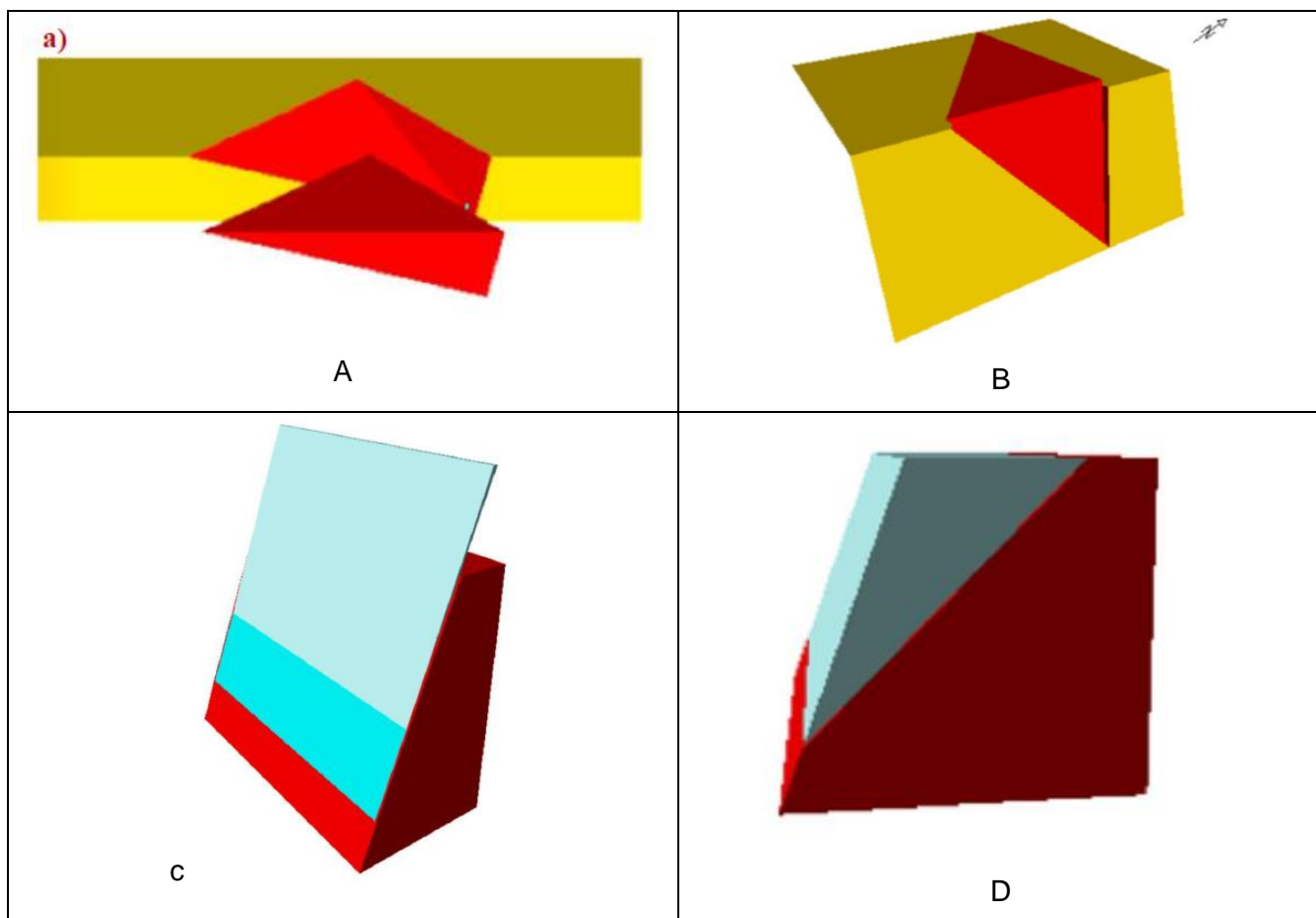


Figura 7 – À direita tem-se a visão geral do talude Mangabeiras exibindo cicatriz de ruptura planar segundo F1. À esquerda exibe-se detalhes da ruptura ao longo de F1.



#### 4. CONCLUSÕES

A análise do talude Mangabeiras e a correlação dos dados obtidos com o Talude Águas Claras permitiu a realização a comparação entre os mecanismos de ruptura atuantes em ambos os taludes. Embora o talude da Mina Aguas Claras tenha orientação do corte ligeiramente diferente do corte do talude Mangabeiras, ambos são voltados para SE e localizam-se na encosta sul da Serra do Curral. As características geológicas e estruturais podem ser consideradas bem semelhantes.

Em cada um dos mecanismos de ruptura encontrados, a associação dos condicionantes geológicos, geomorfológicos naturais e físicos, incluindo a ação interna da água nos maciços rochosos e de solo e os processos intempéricos, funcionam como agentes predisponentes e preparatórios às movimentações, causando a redução da resistência mecânica do material. No caso da Mina de Aguas Claras a maior altura (>200m) da cava da mineração, foi agravante para a instabilidade.

As características gerais dos Itabiritos revelam que o maciço encontra-se em estágio avançado de alteração física. Os processos intempéricos são constantes, como alívio de tensão e empastilhamento. Segundo os estudos realizados, foi evidente que a presença de mais de uma família de descontinuidades é fator fundamental para a intensificação das rupturas e aumento da variedade dos tipos de mecanismos de ruptura que podem ocorrer. O pequeno espaçamento e a grande persistência das descontinuidades mais comuns aumentam a fragmentação do maciço, que é acompanhada por um aumento significativo das superfícies expostas a ação da água. É comum a presença de depressões côncavas que funcionam como áreas concentradoras das águas pluviais e pontos de maior infiltração. A ruptura planar ao longo de F1, família paralela à foliação, é a ruptura mais provável e justifica o escorregamento do talude da mina Aguas Claras. Outras rupturas em cunha e planares também podem ocorrer de forma secundária em ambos os taludes. Embora o Itabirito com hematita compacta seja uma rocha sã com elevado grau de resistência, principalmente com relação ao ângulo de atrito e da coesão, quando apresenta-se alterado, com Hematita laminada ou especular, silicosa ou Hematita Filito, como ocorre na área estudada, a rocha torna-se bastante friável, com baixa coerência e os maciços são, geralmente, de classe V, ou seja, muito ruins do ponto de vista geotécnico. A elevada inclinação da foliação, presença de cortes íngremes na borda sul da Serra do curral e as características das orientações das descontinuidades favoráveis à instabilidade são condicionantes fortes para o desencadeamento de escorregamentos como o ocorrido em 1992 na Mina de Aguas Claras.

#### AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem

a PRPq-UFMG pela oportunidade da pesquisa de iniciação científica voluntária;

ao convênio de intercâmbios estudantis entre as universidade Industrial de Santander, Colômbia e a universidade Federal de Minas Gerais;

a FAPEMIG pela oportunidade de aquisição de equipamentos e programas computacionais (processo APQ-00269-11) usados no desenvolvimento desta pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

ALKMIM, F. F. & MARSHAK, S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29 – 58.

DORR, J. V. N. 2nd. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *U. S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 641-A: 110p.

FIORI, A., P., CARMIGNANI, L. *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas, aplicações na estabilidade de taludes*. Ed. UFPR. 2001. 548p.

GOBBI, F; TOBLER, D. ; FONINI, A.; Sá, G.; SOARES, M.T, 2015. Recuperação do talude da cava -mina de Águas Claras. Anais do 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, ABGE, Outubro de 2015. 11 p.

HOEK, E.; BRAY, J. 1981. Rock Slope Engineering (third edition, 1981). Institution of Mining and Metallurgy, London (1981). 358 p.

INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS (ISRM). 1981. Rock characterization testing and monitoring. ISRM Suggested methods. Brown E.T. (ed.). Pergamon Press, Oxford. 53-70p.

MEDINA,A.I.M.; DANTAS, M.E; SAADI,A.Estudo do Meio Físico. Belo Horizonte. Projeto Apa sul RMBH, v. 06, p.29-40, 2005.

PARIZZI, M.G, 2004. Condicionantes e mecanismos de ruptura em taludes da região metropolitana de Belo Horizonte, MG. Contribuições às Ciências da Terra – Série D, v.10, 2004. 211p. Tese (Doutorado em Geociências, concentração em Geodinâmica Ambiental e Conservação de Recursos Naturais) – Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

RENGER, F. E., Noce, C. M., Romano, A. W. & Machado, N. 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500Ma. de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Geonomos, 2 (1): 1-11

ROSIÉRE, C.A., CHEMALE Jr., F. & GUIMARÃES, M.L.V. 2000. Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte I - estruturas e recristalização. - Revista Geonomos, 1(1): 65-84, UFMG, Belo Horizonte, MG.