

RUPTURA DO TALUDE SUDESTE DA MINA DE N4E – UM ESTUDO DE CASO, CARAJÁS, ESTADO DO PARÁ

GILVAN SÁ

*M.Sc. Geólogo VALE S/A, Belo Horizonte, MG, Brasil - gilvan.sa@vale.com
Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica stricto sensu (MPEG) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (CAPES), Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP;*

RODRIGO P. DE FIGUEIREDO

D.Sc. Engenheiro de Minas, Professor Associado, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil - rpfigueiredo@yahoo.com.br;

FÁBIO SOARES MAGALHÃES

D.Sc. Geólogo VOGBR Recursos Hídricos e Geotecnia Ltda, Belo Horizonte, MG, Brasil - fmagalhaes@vogbr.com.br;

RESUMO ABSTRACT

A mina de minério de ferro de N4E está situada no Complexo Minerador de Carajás, Estado do Pará, onde existe um histórico de grandes deformações fortemente condicionada pela zona de cisalhamento de contato no talude de lapa entre a formação ferrífera da Formação Carajás sobreposta às rochas metabásicas da Formação Parauapebas (Grupo Grão Pará). Os eventos de rupturas demonstraram um forte condicionamento geológico estrutural, nas rochas metabásicas do talude de lapa, caracterizando rupturas planares e plano-circulares demonstrando a necessidade de um melhor entendimento do arcabouço estrutural e dos condicionantes de rupturas. Neste sentido, procurou-se, através de mapeamentos litoestruturais e geomecânicos, de campanhas de ensaios de laboratório e retroanálises deste evento, aferir e recalibrar os parâmetros de resistência da hematita friável, da máfica decomposta e da zona de cisalhamento e entender o comportamento das rupturas. Após selecionar a ruptura do talude sudeste, foram realizadas retroanálises, ajustes e aferições dos parâmetros de resistência e métodos aplicados. Os critérios de resistência ao cisalhamento utilizado para as retroanálises foram: Critérios de Mohr-Coulomb e Critério de Barton & Bandis, os quais auxiliaram nos ajustes dos parâmetros a partir dos ensaios de laboratório, demonstrando boa aplicabilidade ao estudo de caso. Os métodos utilizados para o cálculo do fator de segurança foram: métodos Spencer e GLE/Morgenstern Price,

N4E iron mine is located in the Carajás Mining Complex in southeast Pará, has a history of large strain strongly related to the shear contact zone in the footwall slope between the Carajás Formation superimposed on metabasic rocks of Parauapebas Formation (Grão Pará Group). The failure events have demonstrated a strong structural geological conditioning in the metabasic rocks of footwall slope, which is generally classified as planar and circular plan failures showing that a better understanding is required about the structural framework and the potential failure mechanisms. In this way geomechanical and litho-structural mapping, laboratory tests and back analysis were carried out for validations and calibration of the strength parameters of hematite friable, mafic decomposed and shear zone, as well as to understand the behavior of failure mechanisms in that location. After selecting the southeastern slope failure this study carried out back analysis, adjustments and measurements of strength parameters and verification of the applied methods. The Mohr-Coulomb failure criterion and Barton & Bandis failure criterion were used in back analysis, where those criteria helped in the adjustment of the parameters obtained from laboratory tests, showing good applicability to the case study. The analysis methods used to calculate the safety factor were Spencer and GLE/Morgenstern Price, due to their greater accuracy. Previously back analyses were

aplicados em função de seu maior rigor. Anteriormente as análises não contemplavam esta informação e só eram realizadas pelo Método de Mohr-Coulomb. O resultado final apresentou parâmetros de resistência ajustados às condições da ruptura presente no contato do talude de lapa, além de confirmar a grande deformação do maciço sem sua ruptura plena em função das macrorrugosidades no contato de base, a qual corroborou diretamente para o modo e desenvolvimento desta ruptura, confirmada nas retroanálises realizadas, aferindo e recalibrando os parâmetros de resistência com maior precisão para utilizações futuras.

Palavras-chaves: Estabilidade de Taludes; Mina de N4E; Província Mineral de Carajás; Mineração

1 INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta estudos realizados no talude sudeste da mina de ferro N4E, Complexo Minerador de Carajás, Estado do Pará, onde ocorreram rupturas de grandes proporções. Segundo Sá (2010), popularmente conhecida como “região das trincas”, o talude sul-sudeste da mina de N4E é assim denominado pelo forte controle estrutural condicionado pela zona de cisalhamento do contato de lapa entre a Formação Ferrífera da Formação Carajás sobreposta às rochas metabásicas da Formação Parauapebas, ambas pertencentes ao Grupo Grão Pará.

Essas rupturas na realidade referem-se a reativações de um mesmo processo de instabilização e, em função dessas reincidências, realizaram-se estudos detalhados das características da superfície

only carried out with Mohr-Coulomb criteria and did not cover this information. The final result showed strength parameters adjusted to the failure conditions presents in the footwall contact, and confirm the large deformation without failure of the mass on the basis of macro-wrinkles at the contact (which helped directly the development of this form and confirmed by the back-analysis performed). This study also re-calibrates the existing resistance parameters with more accuracy for future use.

Key Words: Slope Stability; N4E Mine, Carajás Mineral Province; Mining

de ruptura por meio de mapeamentos, ensaios geotécnicos e retroanálises com a finalidade de se obter com maior confiabilidade seus parâmetros de resistência.

Essas instabilizações provocaram no maciço do talude sudeste grandes deformações, porém não se observou uma deflagração abrupta, mas sim abatimentos graduais de um trecho de até 155 m de altura e elevação do piso do banco da cota 460 de até três metros de altura (Sá 2010).

A mina de N4E é uma das maiores minas a céu aberto em rocha branda do Brasil com aproximadamente quatro quilômetros de comprimento, e uma das mais importantes do complexo minerador de Carajás (Figura 1). A região estudada possui atualmente um talude com altura global aproximadamente de 200 m.

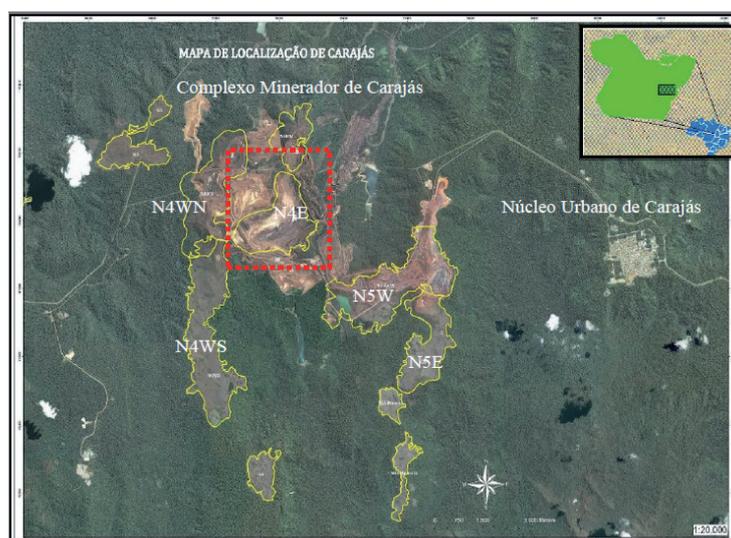


Figura 1 - Localização das minas de ferro do Complexo Minerador de Carajás.

2 CARACTERÍSTICAS LITOESTRUTURAIS DA MINA N4E

A mina N4E é composta por litotipos de idade arqueana, com idades entre 2,8 a 2,5 Ga, atribuídos ao Grupo Grão Pará, subdivididos nas Formações Parauapebas e Carajás (Tabela 1) e representados no mapa litoestrutural da Figura 2.

Tabela 1 – Coluna estratigráfica adaptada Macambira (1990, in Sá 2010).

EON	ERA	UNIDADE
FANEROZÓICO	CENOZÓICO	Coberturas Lateríticas
	PALEOZÓICO	Corpos Máficos Intrusivos
NEOPROTEROZÓICO		Granito Serra dos Carajás
		Gabro Santa Inês
		Fm. Igarapé Azul
		Fm. Igarapé Boa Sorte
	Gr. Grão Pará	Fm. Igarapé Cigarra
		Fm. Carajás
		Fm. Parauapebas
	Gr. Igarapé Pujuca	Fm. Gameleira
		Fm. Corpo 4
		Fm. Bueno
	Complexo Xingu	

A Formação Parauapebas é constituída por rochas metavulcânicas em diferentes estados de alterações (máfica sã - MS, semidecomposta - MS e decomposta - MD) e ocorrem como rochas encaixantes de capa e lapa ao minério de ferro, mostrando feições dúcteis e rúpteis, recobertas por uma cobertura laterítica.

A Formação Carajás é composta por diferentes tipos de minério de ferro tais como: Jaspilito (JP), Hematita macia ou friável (HM), Hematita dura (HD), minério de baixo teor (MBT), Canga de minério (CM), canga química (CQ), intrusões de soleiras e diques máficos.

As superfícies de cisalhamento são estruturas comuns na região da mina (Figura 3) e condicionam o contato de lapa entre a formação ferrífera e o maciço de rochas metabásicas onde são mais persistentes e paralelas ao bandamento.

O Sistema de Falhas Embaúbas, de direção geral E-W a NE-SW de caráter dúctil-rúptil a

rúptil, localizada na porção sul-sudeste da mina de N4E, está disposta concordantemente com o contato de lapa entre a formação ferrífera e o maciço metabásico (Figura 3) com alto grau de alteração variando entre 0,5 a 1,0 m. O qual ocorre discordantemente no contato de capa, onde ocorrem superfícies de cisalhamento subverticais e de caráter mais rúpteis.

Sá (2010) cita que essa zona de cisalhamento pode ter sido a responsável, por meio de movimentos transcorrentes destrais, pela grande inflexão observada no corpo de minério que se traduz no formato da cava em um grande “J” (Figura 2).

Essa estrutura é também importante do ponto de vista geotécnico, pois se constataram várias rupturas e reativações caracterizando o local de sua ocorrência como uma região de instabilidades conhecida informalmente na mina como “área das trincas”.

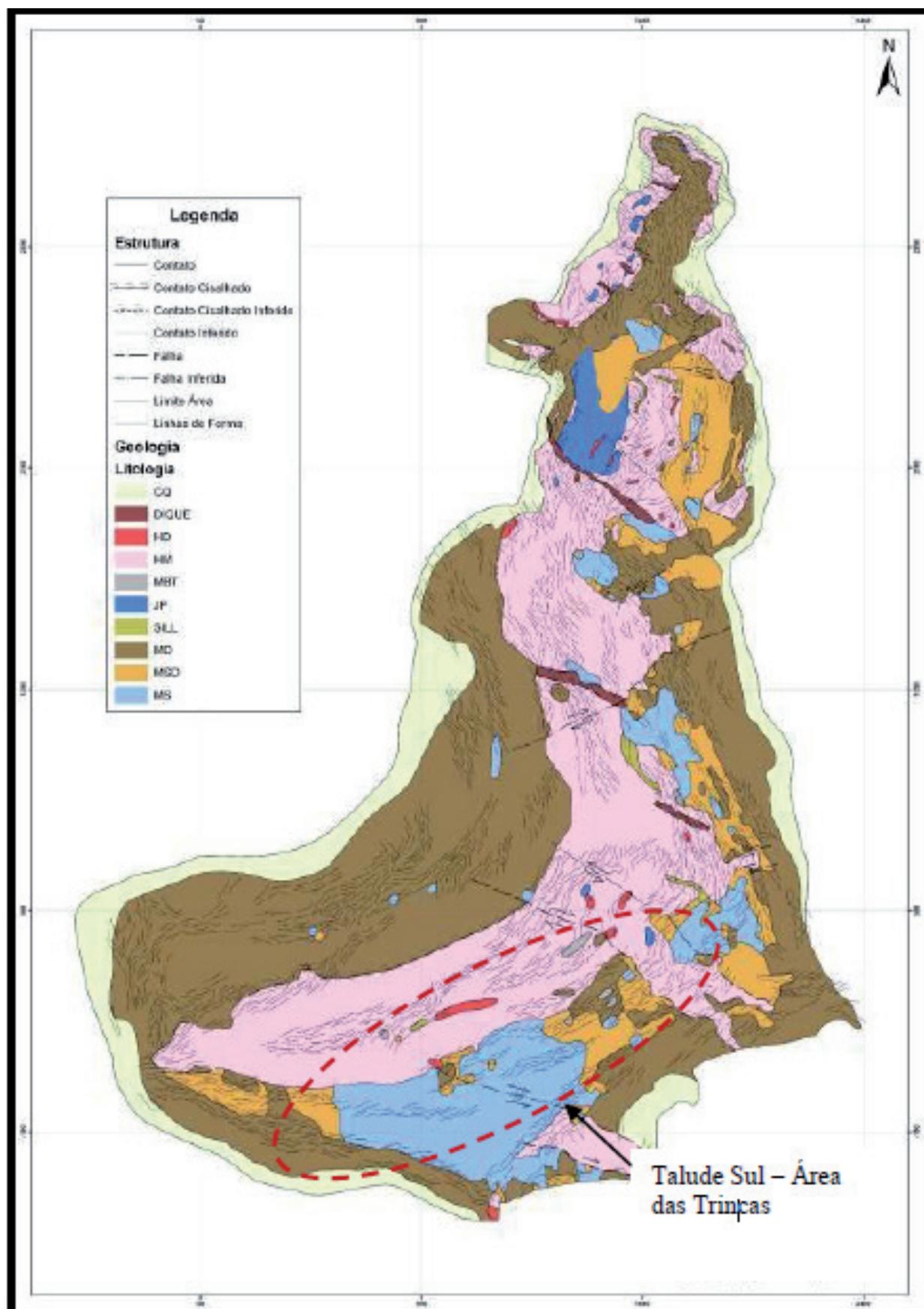


Figura 2 - Mapa litoestrutural da mina N4E (BVP, 2008 in Sá 2010). Siglas dos litotipos - CQ canga química, HD hematita dura, HM hematita macia, MBT minério de baixo teor, JP jaspilito, MD máfica decomposta, MSD máfica semidecomposta, MS máfica sã.

Esses cisalhamentos, localizados no contato de lapa, são representados em estereograma na Figura 4 com máximos de 164/45 (rumo de mergulho/mergulho) para o Flanco Sul.



Figura 3 – Zona de cisalhamento no contato de lapa, paralelo à foliação e com formas onduladas.

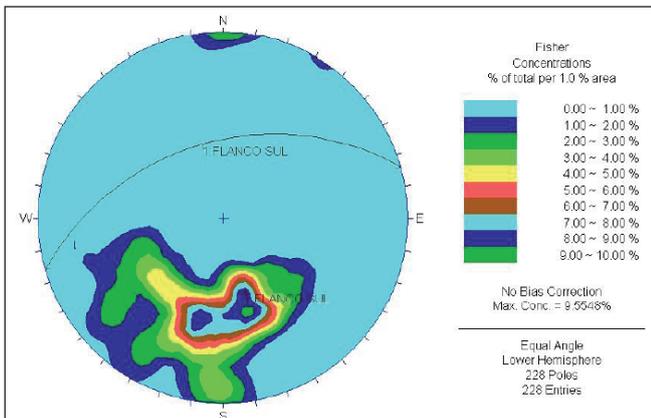


Figura 4 – Estereograma de polos dos planos do cisalhamento de lapa com máximo de 164/45 – Flanco Sul de N4E. (Software DIPS 5.0 Tutorials. www.rocsience.com.)

3 HISTÓRICO DOS EVENTOS

Para uma melhor compreensão das recorrências das instabilidades, os eventos ocorridos no talude sudeste são descritos em ordem cronológica, que se iniciaram em 2001 e finalizaram-se em 2007.

No início do ano de 2001, com o avanço da lavra, observou-se uma instabilidade envolvendo cinco bancadas de 15 m de altura atingindo altura total de 75m. Verificou-se que a ruptura se deu no minério pelo contato cisalhado de lapa com a rocha máfica decomposta, associada a uma surgência de água na cota 615. Após essa deformação,

verificou-se uma reativação na mesma área em 22 de maio de 2002 com o surgimento de trincas de alívio. Para a estabilização da área foram realizados retaludamentos.

Em 27 de junho de 2002 verificou-se uma deformação de grande porte nesse local, mobilizando o talude desde seu pé no banco 460 m até a crista no banco 615 m, caracterizando uma instabilização global com altura de 155 m. Essa deformação não se caracterizou como uma ruptura brusca e plena, mas observaram-se trincas e recalques da ordem de 2 a 3 m na crista do banco 615 m (Figura 5) e soerguimento de aproximadamente 3 m no pé do banco 460 m por uma extensão de aproximadamente 100 m (Figura 6).



Figura 5 – Surgimento de trincas no Talude Sudeste de N4E, banco 615 m.



Figura 6 – Soerguimento do banco 460.

Essas instabilidades foram condicionadas pelo contato de base entre o minério de ferro e a rocha máfica onde se instala uma zona de cisalhamento subparalela ao talude. A superfície desse contato encontrava-se bastante cisalhada, alterada

e com baixa resistência. Somada a isso, observou-se a condição de saturação do maciço, o que deve ter contribuído para a sua instabilização.

Em 18 de março de 2005 ocorreu nova reativação da ruptura com surgimento de novas trincas na face do talude e nos bancos superiores, soerguimento de aproximadamente 1,0 m do pé e deslocamento do piso em até 2,40 m. Essa instabilidade não ocorreu de forma abrupta, mas sim gradualmente. Na foto da Figura 7 é possível observar a área instável e o início do retaludamento. Trincas e recalques foram observados no banco superior, com abatimentos da ordem de 2,0 m no mesmo local (Figura 8).



Figura 7 - Vista geral do flanco sudeste da mina N4E.



Figura 8 - Vista da crista com surgimento de trincas e recalques.

Em outubro de 2007 ocorreu nova instabilização no flanco sul/sudeste da mina N4E, entre os bancos 460 na base e 530 no topo com uma extensão lateral de aproximadamente 150 m. Também

nesse caso não se verificou uma ruptura plena com deslocamento abrupto de massa, mas apenas abatimentos métricos de topo e soerguimento da berma de pé (Figura 9).

Observou-se na porção superior da instabilidade, no banco 530, que a ruptura novamente foi condicionada pelo plano de cisalhamento do contato de lapa entre a formação ferrífera e a rocha máfica sã/decomposta, que se estende por todo o talude que compõe o flanco sul da mina N4E (Figura 10).



Figura 9 - Vista frontal da área de instabilidade de outubro de 2007, talude sul/sudeste da mina N4E.



Figura 10 - Vista do flanco sul/sudeste de N4E. Contato cisalhado de lapa entre a formação ferrífera e a rocha metabásica.

Nas fotos das Figuras 11 e 12 verifica-se o abatimento ocorrido no plano de falha em rocha máfica da ordem de três metros. No local, a espessura da zona de cisalhamento varia entre 1 e 2 m. Nas porções laterais da instabilidade em hematita também se verificaram trincas com abatimentos da mesma ordem.

Novamente verificaram-se soerguimentos na berma do banco 460 com dimensões que evoluíram de forma lenta de 0,4 a 2,5 m, como mostram as das fotos Figuras 13 e 16.



Figura 11 – Ruptura através do plano de contato de lapa (máfica decomposta x hematita) mostrando recalque de 3 m na crista da ruptura.



Figura 12 – Detalhe da superfície de ruptura na máfica decomposta (contato de lapa).



Figura 13 – Início do soerguimento lento e progressivo na ordem de 0,5m no pé da ruptura - banco 460 (outubro de 2007).



Figura 14 – Avanço gradual do soerguimento no pé do banco (Outubro/2007).



Figura 15 – Prosseguimento do soerguimento - deformação lenta na berma 460 (Outubro/2007).



Figura 16 – Fase final do soerguimento no pé da ruptura da ordem de 2,5 m

4 AVALIAÇÃO DO MECANISMO DE RUPTURA

O contato de lapa no local da ruptura apresenta uma inflexão próxima ao pé do talude na bancada 460 m (horizontalização). A existência dessa inflexão deve ter proporcionado um movimento ascendente da parte inferior da massa instável, que explica seu soerguimento através de superfícies de cavalgamento, como representado na Figura 17. A ação de um empuxo passivo, atuante sempre que ocorrem tais movimentos ascendentes e as características mais dúcteis do contato cisalhado explicam a natureza lenta e não brusca da deformação notada nessa ruptura. Nota-se na Figura 17 o detalhe das “superfícies de cavalgamento” na berma 460, onde ocorre a inflexão da máfica do contato de lapa funcionando como uma macrorrugosidade do contato.

Deste modo, a interpretação para as instabilidades é a de que elas tenham sido deflagradas pela remoção de minério do banco 460 que servia de arrimo e condicionada pelo plano de cisalhamento de baixa resistência que ocorre no contato da rocha máfica com o minério, somada a presença de água. Acredita-se que os soerguimentos tenham ocorrido devido à inflexão desse contato que se horizontalizou, aproximando-se do pé do talude e se estendendo abaixo do banco 460, como mostra a Figura 17.

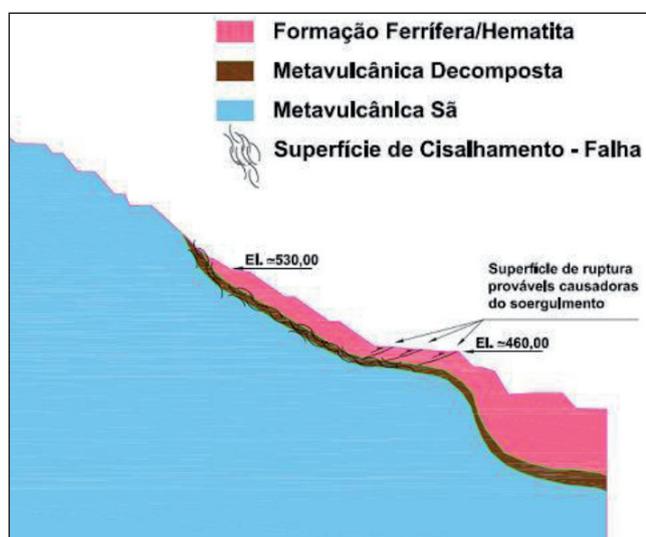


Figura 17 – Seção típica mostrando o contato de lapa em máfica decomposta, cisalhada, definindo a superfície de ruptura. Notar a influência da inflexão da zona de cisalhamento na base da superfície de ruptura (VALE 2007, in Sá 2010).

O soerguimento da berma 460 foi lento e progressivo como mostrado pelas fotos das Figuras 13 a 16, diferentemente do que ocorreu em outras rupturas, cujas superfícies apresentavam-se retilíneas. Apesar de não ter sido realizada uma instrumentação por meio de levantamento topográfico para acompanhamento dessa deformação, observou-se um soerguimento de aproximadamente 3 m. Esse soerguimento foi calculado pela diferença topográfica entre as cotas da praça deformada e não-deformada. Além disso, houve uma coincidência com os recalques de 3 m na crista do banco 530 (VALE 2007, in Sá 2010).

5 PARAMETROS DE RESISTÊNCIA

Os parâmetros de resistência utilizados para as retroanálises foram estimados a partir de resultados de ensaios de duas campanhas realizadas entre os anos de 2003 e 2009 (Sá 2010). O programa consistiu na realização de ensaios de caracterização completa e compactação no proctor normal, cisalhamento direto, triaxiais (CUnat, CUsat, CDSat) e *Ring Shear*.

Os litotipos ensaiados foram a máfica decomposta (MD) e a hematita friável (HF). Como a ruptura se deu no contato entre o pacote de hematita friável (HF) e a máfica decomposta (MD) de lapa caracterizada por uma superfície cisalhada e de difícil acesso para amostrá-la, os parâmetros de resistência foram obtidos a partir de resultados dos ensaios de cisalhamento *Ring Shear* em amostras de máfica decomposta (MD) com as mesmas e/ou características de alteração e cisalhamento muito próximas à da zona de cisalhamento que define a superfície de ruptura.

Através dos resultados dos ensaios realizados no Laboratório de Engenharia Civil da CESP foi possível definir envoltórias médias para cada litotipo e valores de resistência (c e ϕ) a serem utilizados nas análises de estabilidade, utilizando-se o *Software. ROCKDATA 3.0 Tutorials (RocScience)* homologado na VALE S.A. A Tabela 2 apresenta o quantitativo de ensaios realizados nas campanhas entre 2003 e 2009 (Sá 2010).

Tabela 2 – Quantitativos totais dos ensaios realizados em ambas as campanhas (Sá 2010).

Tipo de ensaio	Máfica decomposta (MD)	Hematita (HM)
Cu (sat)	12	7
CD (sat)	4	4
Cis. Dir. inund.	2	6
<i>Ring Shear</i>	2	n/e(*)

(*) não ensaiado.

A Tabela 3 apresenta de forma resumida os valores de resistência médios para os litotipos ensaiados e utilizadas nas análises e retroanálises de estabilidade.

Tabela 3 – Parâmetros de resistência obtidos por ensaios.

Tipologias Avaliadas		Peso Especifico Seco γ (kN/m ³)	Peso Especifico Saturado γ (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito ϕ (°)
Máfica Descomposta (parâmetros médios)	MD	18,5	20	94	26
Hematita Friável (parâmetros médios)	HM	37	38	123	38
Zona de Cisalhamento	ZC	19	20	9 (*)	18 (*)

(*) Resistência a grandes deformações do ensaio do *Ring Shear*

6 PARAMETRIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA

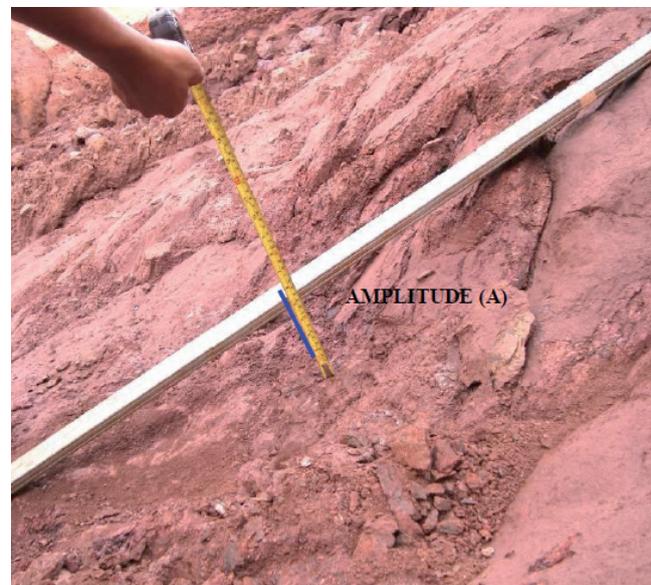
Para a parametrização da superfície de ruptura se fez necessária a determinação das amplitudes das ondulações e dos ângulos de rugosidade médio, visando calcular o JRC (Coeficiente de Rugosidade das Juntas) das superfícies de escorregamento, verificados preferencialmente no contato de lapa entre o minério e a máfica. Para esta parametrização utilizou-se o método de Barton (1982, in Sá, 2010). O intuito foi fornecer subsídios para as retroanálises apresentadas no item 7.

Para o cálculo do JRC (Coeficiente de Rugosidade das Juntas) da superfície de ruptura utilizou-se os dados obtidos através do mapeamento litoestrutural da mina N4E (Sá 2010).

6.1 Caracterização das amplitudes das ondulações

Foram levantados 26 pontos representativos do contato de lapa num total de 90 medidas de

amplitude das rugosidades/ondulações. A foto da Figura 18 indica a forma de obtenção desse parâmetro com a utilização de uma régua metálica de 1 m de comprimento e bússola de geólogo.

**Figura 18** – Determinação das amplitudes (A).

Realizou-se um tratamento estatístico desses dados com a utilização de planilha *Excel*, chegando-se ao valor médio de 15 cm, conforme gráfico apresentado na Figura 19.

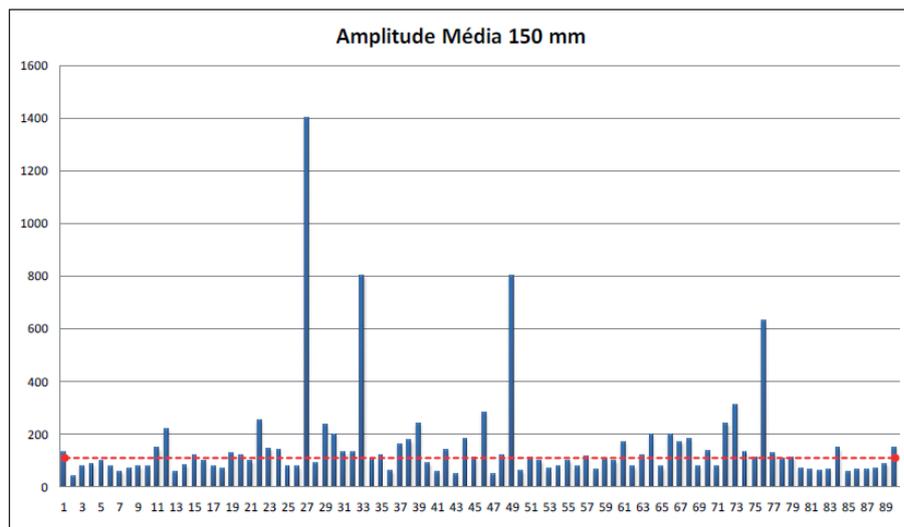


Figura 19 – Média para a amplitude (A) = 15 cm (Sá 2010).

6.2 Estimativa do JRC

Para o cálculo dos parâmetros de resistência das superfícies cisalhadas de contato utilizou-se o modelo de Barton (1982) definido pela equação 1.

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_r + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (1)$$

Onde:

- JRC = coeficiente de rugosidade das juntas;
- JCS = resistência à compressão das paredes da junta;
- ϕ_r = ângulo de atrito residual.

O valor de JRC foi estimado em função dos valores de amplitude (A) das ondulações das superfícies cisalhadas do contato de lapa expostas na mina N4E. Com a utilização do ábaco proposto por Barton (1982) para estimativa do valor de JRC, foi estimado um $JRC_0 = 20$ (valor referente à escala das medidas realizadas - 1 m), conforme indicado na Figura 20 pela seta azul.

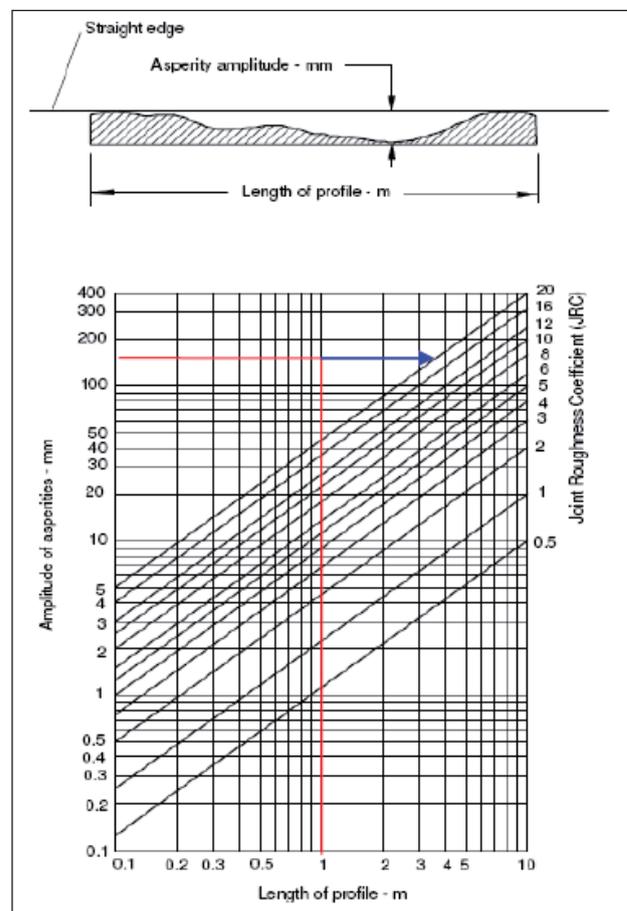


Figura 20 – Estimativa do valor de JRC_0 por meio do valor médio da amplitude para a escala de 1 m (Barton 1982, in Sá 2010).

Em campo estimou-se em 10 m o comprimento de onda das ondulações das superfícies cisalhadas na escala das bancadas. Para o cálculo do JRC para esse comprimento utilizou-se a equação proposta por Barton & Bandis (1982), que fornece a seguinte correção de escala:

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,02.JRC_0} \quad (2)$$

Onde o JRC_0 e L_0 estão referidos à escala das leituras e JRC_n e L_n , a escala cujos valores se quer estimar (dimensões *in situ*).

Logo, se os valores de:

$$JRC_0 = 20,$$

$$L_0 = 1 \text{ m}$$

$$\text{e } L_n = 10 \text{ m,}$$

utilizando a equação 2 tem-se um valor corrigido de JRC_n igual a 8.

6.3 Estimativa do JCS

Segundo Barton & Choubey (1977), o valor do JCS pode ser determinado pelo martelo de Schmidt, utilizando-se uma relação proposta por Deere & Miller (1966) para se estimar a resistência à compressão uniaxial. Porém, no presente estudo adotou-se o valor da resistência à compressão uniaxial do maciço (BVP 2009, *in* Sá 2010), cuja expressão, conforme o critério de Mohr-Coulomb, é:

$$JCS = \sigma_{cm} = \frac{2c \text{Cos } \phi}{1 - \text{Sen } \phi} \quad (3)$$

Foram admitidos os valores médios dos parâmetros de resistência para a máfica decomposta, quais sejam: $c = 94 \text{ kPa}$ e $\phi = 26^\circ$. Aplicando-se, pois, a equação 3, obtém-se o valor de JCS para a máfica decomposta:

$$JCS = 300 \text{ kPa}$$

Os parâmetros de resistência encontrados para a zona de cisalhamento pelo modelo de Barton & Bandis (1982) estão resumidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de resistência calculados pelo Modelo de Barton & Bandis e adotados nas análises de estabilidade (Sá 2010).

Tipologia de Contato		Peso Específico Seco γ (kN/m ³)	Peso Específico Saturado γ (kN/m ³)	JRC	JCS (kPa)	Ângulo de Atrito ϕ_r (°)
Zona de Cisalhamento Decomposta	ZC-MD	19	20	8	300	18

7 RETROANÁLISES PARA AJUSTES DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DA SUPERFÍCIE DA RUPTURA

Como visto, esse evento envolveu uma deformação lenta através do contato cisalhado de lapa. Essa superfície apresenta-se com uma espessura em torno de 2 m, muito alterada e com baixa resistência, configurando uma ruptura plano-circular.

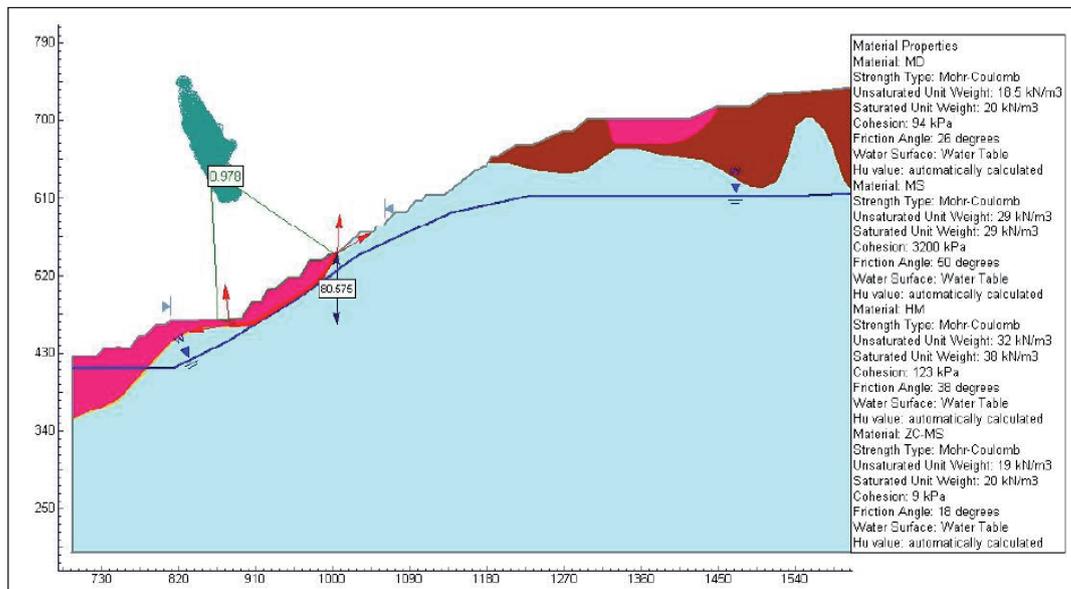


Figura 22 – Retroanálise da Seção da Ruptura Talude Sudeste – Critério de Mohr-Coulomb (Sá 2010).

Na Figura 23 é apresentado o fator de segurança obtido considerando-se os parâmetros de melhor ajuste para a hematita friável (HM). É possível observar um FS de 1,051 pelo Método de Spencer e de 0,956 pelo Método GLE/Morgenstern-Price com os parâmetros $c = 125$ kPa e $\phi = 42^\circ$ para a hematita friável. Essa retroanálise foi

realizada variando-se os valores de c e ϕ da hematita friável (HM) e fixando-se os demais parâmetros. Na Tabela 5 estão apresentados os resultados em termos de Fatores de Segurança. Os valores que forneceram os Fatores de Seguranças mais próximos da unidade foram: $c = 125$ kPa e $\phi = 42^\circ$. (Sá 2010).

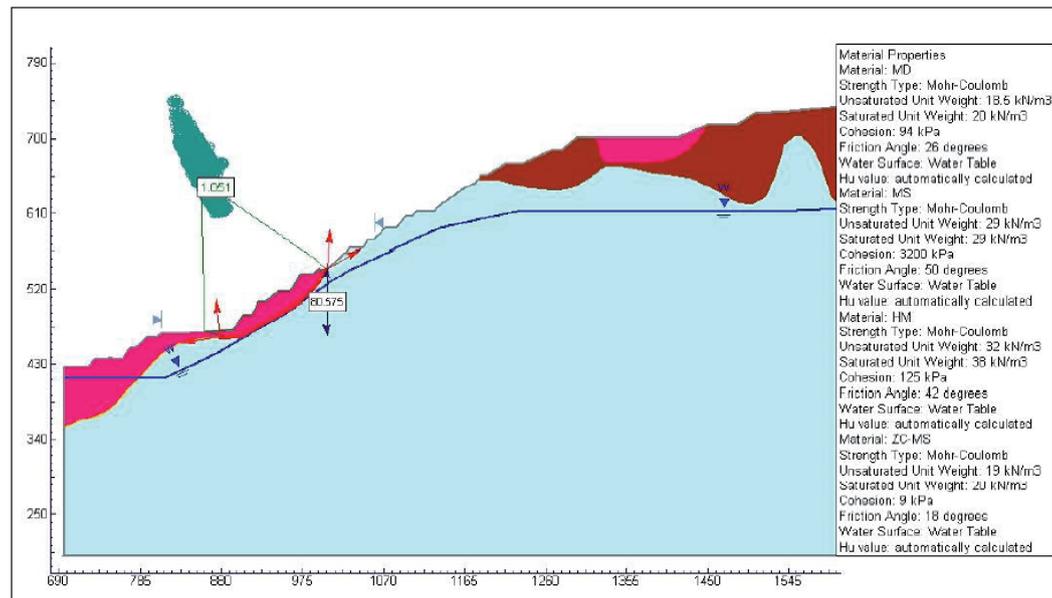


Figura 23 - Retroanálise do talude sudeste: resultado para os parâmetros de melhor ajuste da HM - critério de Modelo Mohr-Coulomb (Sá 2010).

Tabela 5 - Resultados (FSs) para a retroanálise com critério de Mohr-Coulomb para os parâmetros da HM (Sá 2010).

Parâmetros Geomecânicos		Fator de Segurança (FS)	
Coesão (c) kPa	Ângulo de atrito (f)	Método Spencer	Método GLE
100	38	0,959	0,875
100	39	0,965	0,890
100	40	0,989	0,899
100	41	0,990	0,916
100	42	1,026	0,924
110	42	1,016	0,935
115	42	1,040	0,941
120	42	1,045	0,951
125(*)	42(*)	1,051(*)	0,956(*)

(*) Parâmetros que forneceram o melhor ajuste (FS ≈ 1)

Posteriormente ao ajuste dos parâmetros para a hematita friável, fixaram-se os mesmos ($c = 125$ kPa e $\phi = 42^\circ$) e foram retroanalísados os parâmetros de Barton & Bandis da zona de cisalhamento

(ZC-MD). Os resultados estão apresentados na Tabela 6, onde é possível verificar que o melhor valor de parâmetros para um FS próximo da unidade foi: JCS = 1,000 kPa (Sá, 2010).

8 CONCLUSÕES

Este item apresenta os resultados obtidos e considerações acerca do modo de ruptura e parametrização da superfície de ruptura e litotipos associados.

Segundo Sá (2010), trata-se de uma superfície de ruptura do tipo plano-circular, iniciando planar no topo e à medida que tangencia a inflexão da máfica de lapa passa a ter um comportamento circular.

Para estudo e retroanálise desta ruptura, foi empregado o critério de resistência de Mohr-Coulomb, para os ajustes dos parâmetros de resistência da hematita friável (HF) e máfica decomposta (MD), e de Barton & Bandis para os ajustes dos parâmetros de resistência da superfície de contato definida pela zona de cisalhamento (ZC-MD) localizada entre o pacote de hematita friável e a rocha metabásica (máfica decomposta - MD) encaixante dos taludes de lapa.

Para o material que compõe a zona de cisalhamento (ZC-MD) foi adotado o ângulo de atrito básico obtido através de resultado do ensaio de *Ring Shear* (ângulo de atrito residual), uma vez que não foi possível amostrar a máfica decomposta da zona de cisalhamento (ZC-MD). Este parâmetro residual, obtido através do ensaio de cisalhamento *Ring Shear*, foi comparado a valores de coesão e ângulo de atrito anteriormente praticados por empresas de consultorias de forma empírica ou sob influência de sua expertise e até de campanhas de ensaios preliminares. Como estes resultados foram muito próximos, pode-se assim validá-los, demonstrando que este ensaio apresentou um resultado confiável para a coesão e ângulo de atrito residual utilizados para a zona de cisalhamento - ZC-MD (Sá 2010).

Através dos valores obtidos pelos ensaios de laboratório, do mapeamento das rugosidades / ondulações da superfície de ruptura (superfície de cisalhamento da encaixante no contato de lapa), dos cálculos do JRC e JCS através do Modelo de Barton (1982) e de suas aferições pelas retroanálises realizadas nesta ruptura, pode-se recalibrar os parâmetros de resistência anteriormente utilizados por unidade litológica, através da aplicação do *Software Slide 5.0*. Com isto foi possível trabalhar com valores dos parâmetros de resistência,

com maior confiabilidade e representatividade, assim como entender melhor o comportamento desta ruptura.

Como relação à superfície de cisalhamento, anteriormente em retroanálises não se utilizava o critério de Barton & Bandis. As análises de estabilidade eram realizadas somente com o critério de Mohr-Coulomb. Os parâmetros de resistência para os litotipos estudados, máfica decomposta (MD), hematita friável (HF) e máfica decomposta da zona de cisalhamento (ZC-MD), foram ajustados tanto pelo critério de Mohr-Coulomb quanto pelo critério de Barton & Bandis. A utilização do critério de Barton & Bandis para ajuste dos parâmetros de resistência da zona de cisalhamento foi possível devido ao minucioso mapeamento das amplitudes das rugosidades em campo, por meio de metodologia adequada. Esse nível de detalhamento ainda não havia sido empregado na mina N4E e, conseqüentemente, não se levava em consideração tal aspecto nas análises de estabilidade e retroanálises anteriores (Sá 2010).

Através deste estudo de caso foi possível observar que a ruptura não foi brusca em função do JCS = 1.000 kPa e da inflexão no pé do talude, no nível 460, causando grandes deformações em escalas métricas com estufamento do piso do banco 460 em até 3m. Segundo Sá, 2010, outras rupturas que ocorrem na mesma mina, porém em setores diferentes, se deram de forma planar e bruscas. A inflexão da rocha metabásica no contato de lapa corroborou diretamente para o modo e desenvolvimento desta ruptura. Sendo assim, através das retroanálises realizadas, foi possível aferir os parâmetros de resistência e recalibrá-los com maior precisão para utilizações futuras.

REFERÊNCIAS

- Barton, N. R. & Choubey, V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, **10**(1-2):1-54.
- Barton, N. 1982. Shear strength investigations for surface mining. In: C.O. Brawner (ed.), *Stability in surface mining*, Proceedings of 3rd International Conference, Vancouver, British Columbia, p. 171-196. Society of Mining Engineers. AIME, New York.

- Barton, N. & Bandis, S. 1982. Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock. In: R.E. Goodman & F.E. Heuze (eds), *Issues in Rock Mechanics*. In Proceedings of 23rd US Symposium of Rock Mechanics, Berkeley, California, p. 739-760. AIME, New York.
- BVP Engenharia Ltda. 2008. Mapeamento litoestrutural e geomecânico da Mina de N4E, Serra dos Carajás – PA. Relatório Interno, Carajás – PA, 84 pp.
- BVP Engenharia Ltda. 2009. Consolidação e análise dos resultados dos ensaios geotécnicos de laboratório realizados nas Minas de N4E, N5E e N4WN - VL 707.01-09-E-CA-RT-19-002. 51 pp.
- BVP Engenharia Ltda. 2009. Detalhamento geotécnico das rochas máficas decompostas e hematitas moles da Mina N4E e correlação com ensaios laboratoriais - VL 707-01-09-E-CA-RT-11-003-00. 23 pp.
- CESP. 2006. Relatório LEC-037/06. Mina de Ferro Carajás (CVRD) – Ensaio geotécnicos para definição de parâmetros de estabilidade das pilhas de estéreis e taludes de mina (Parte 1). Ilha Solteira – SP. 60 pp.
- CESP. 2006. Relatório LEC-038/06. Mina de Ferro Carajás (CVRD) – Ensaio geotécnicos para definição de parâmetros de estabilidade das pilhas de estéreis e taludes de mina (Parte 2). Ilha Solteira – SP. 121 pp.
- CESP. 2009. Relatório LEC-006/09 – Mina de Ferro Carajás (CVRD) – Ensaio geotécnicos em amostras indeformadas de solo e de rocha extraídas das cavas N4E, N4W e N5E. Ilha Solteira – SP. 114 pp.
- Macambira, M.J.B.; Ramos, J.F.F.; Assis, J.F.P.; Figueiras, A.J.M. 1990. Projeto Serra Norte e Projeto Pojuca. Convênio SEPLAN/DOCEGEO/UFPA/DNPM. Relatório final. 150 pp.
- RocScience. SLIDE 5.0 Tutorials. www.rocscience.com.
- RocScience. DIPS 5.0 Tutorials. www.rocscience.com.
- RocScience. ROCKDATA 3.0 Tutorials. www.rocscience.com.
- Sá, G. 2010. Caracterização litoestrutural e parametrização geomecânica das superfícies de ruptura em taludes da Mina de N4E – Carajás/PA. Dissertação de Mestrado. UFOP, Ouro Preto – MG, 172 pp.