

17º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental

ATUALIZAÇÃO DINÂMICA DE CURTO PRAZO EM MODELO GEOMECÂNICO 3D E IMPLICAÇÕES NA ESTABILIDADE DE TALUDES

Josiane Silva ¹; Felipe Vilela ²; Lucas Figueiredo ³; Leonardo Gomes ⁴; Manollo Barros ⁵

Resumo – A compartimentação geomecânica de uma cava a céu aberto é uma etapa importante no que se refere à definição dos possíveis mecanismos de ruptura. O conhecimento da variabilidade geotécnica existente em uma cava a céu aberto acarreta na previsibilidade, aumento de confiança e segurança nas análises de estabilidade de talude. Modelos Geomecânicos se tornam uma das principais ferramentas para o entendimento do comportamento litológico e estrutural de superfície e subsuperfície. O estudo em questão teve como objetivo avaliar a importância e o impacto nas análises de estabilidade, da atualização dinâmica de um modelo geomecânico tridimensional com dados de mapeamento de bancada.

Abstract – An open pit geomechanical compartmentalization is an important step to define possible rupture mechanisms. The knowledge of the geotechnical variability in an open pit mine results in predictability, higher reliability and safety in slope stability analyses. Geomechanical models become one of the main tools to understand the surface and subsurface lithological/structural behavior. The study in question aimed to evaluate the importance and impact of the dynamic updating of a three-dimensional geomechanical model on stability analyses.

Palavras-Chave – Modelo geomecânico; estabilidade de taludes; mapeamento de bancadas.

¹ Geól., M.Eng, Centro Universitário de Belo Horizonte: Belo Horizonte - MG, josianegeotec@gmail.com
EMPRESA: Anglo American, Conceição do Mato Dentro – MG, (31) 98481-1629, josiane.silva@angloamerican.com

² Geól., Universidade Federal do Espírito Santo: Alegre - ES, felipevilelago@gmail.com
EMPRESA: Anglo American, Belo Horizonte – MG, (31) 99871-0434, felipe.vilela@angloamerican.com.br

³ Eng. Geól., MSc Universidade Federal de Ouro Preto: Ouro Preto - MG, torrent.figueiredo@gmail.com
EMPRESA: Anglo American, Belo Horizonte – MG, (31) 98402-2195, lucas.t.figueiredo@angloamerican.com

⁴ Eng. Civil., MSc, Faculdade Kennedy: Belo Horizonte - MG, leonardo.leopoldo.gomes@gmail.com
EMPRESA: Anglo American, Conceição do Mato Dentro – MG, (31) 98419-1541, leonardo.gomes@angloamerican.com

⁵ Geól., MSc, Universidade do Estado do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro - RJ, manollosb@yahoo.com.br
EMPRESA: Anglo American, Conceição do Mato Dentro – MG, (31) 98314-5999, manollo.barros@angloamerican.com

2.2. Caracterização Local

A cava avaliada neste estudo, localizada na Serra do Sapo, possui trend NNW-SSE e, assim como observado em escala regional, verifica-se uma inversão estratigráfica em virtude da estruturação tectônica caracterizada por um sistema de falhas de empurrão de baixo a médio ângulo de direção N-S e vergência para W, definidas como zonas de cisalhamento dúcteis a dúcteis-rúpteis. As principais zonas de falha deram origem a alinhamento de nascentes, cavidades e o rebaixamento do topo rochoso em locais específicos da mina. Os principais litotipos que afloram na cava atual são itabiritos, quartzo xistos, quartzitos e xistos. Na Figura 2 é possível observar exemplos desses litotipos na cava e o aprofundamento rochoso observado.

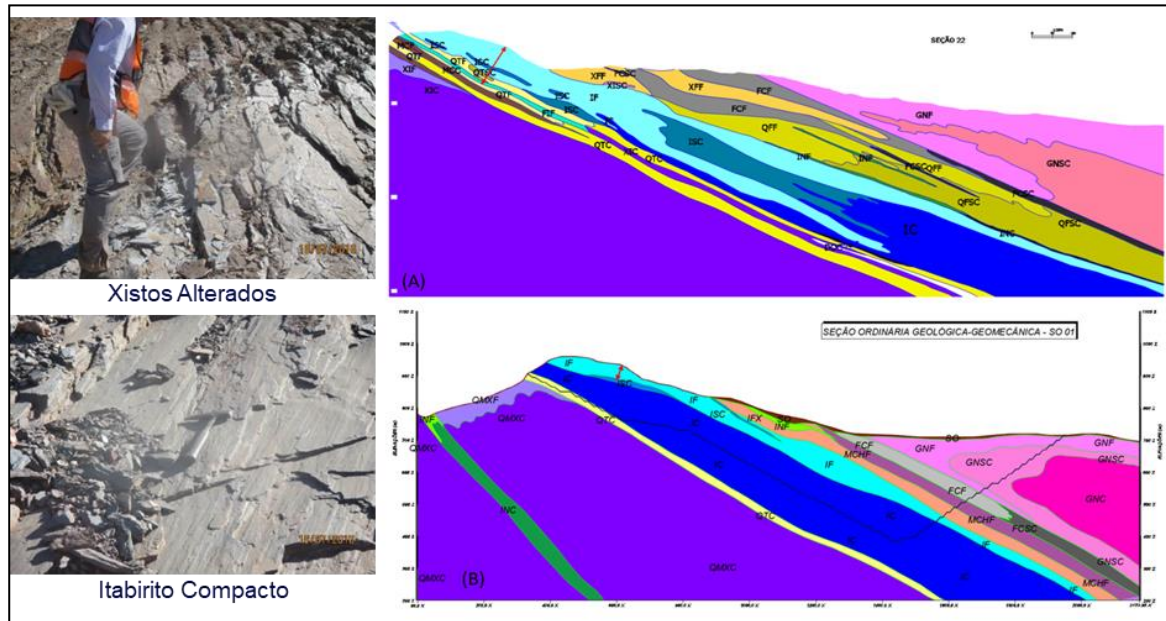


Figura 2. Litotipos aflorantes na cava e diferença brusca na profundidade do topo rochoso, indicada pela seta vermelha.

2.3. Caracterização Geomecânica

As unidades individualizadas no modelo geológico-geomecânico foram subdivididas a partir da subdivisão dos principais litotipos de acordo com o seu grau de resistência, em compactos, semi-compactos e friáveis. A Tabela 1 apresenta as principais características das unidades geomecânicas como resistência, grau de alteração e faturamento e classe de RMR.

Tabela 1. Caracterização das principais unidades geomecânicas.

Unidade Geomecânica	ID	R	W	GF	Classe RMR*
Itabirito Compacto	IC	R4/R5/R6	W1/W2	F1	I / II
Itabirito Semi Compacto	ISC	R2/R3	W2/W3/W4	F1 - F5	III / IV
Itabirito Friável	IF	R0/R1	W5/W6	-	V
Quartzito Compacto	QTC/QFC	R4/R5/R6	W1/W2	F1	I / II
Quartzito Semi Compacto	QTSC/QFSC	R2/R3	W2/W3/W4	F1 - F5	III / IV

Quartzito Friável	QTF/QFF	R0/R1	W5/W6	-	V
Xisto Compacto	XIC	R4/R5/R6	W1/W2	F1	I / II
Xisto Semi Compacto	XISC	R2/R3	W2/W3/W4	F1 - F5	III / IV
Xisto Friável	XIF	R0/R1	W5/W6	-	V
Filito Compacto	FIC/FCC	R4/R5	W1/W2	F1	I / II
Filito Semi Compacto	FISC/FCSC	R2/R3	W2/W3/W4	F1 - F5	III / IV
Filito Friável	FIF/FCF	R0/R1	W5/W6	-	V
Gnaiss Compacto	GNC	R4/R5	W1/W2	F1	I / II
Gnaiss Semi Compacto	GNSC	R2/R3	W2/W3/W4	F1 - F5	III / IV
Gnaiss Friável	GNF	R0/R1	W5/W6	-	V
Intrusiva Compacta	INC	R4/R5/R6	W1/W2	F1	I / II
Intrusiva Semi Compacto	INSC	R2/R3	W2/W3/W4	F1 - F5	III / IV

*Bieniawsky, 1989

2.4. Parametrização Geotécnica

Os critérios de resistência dos materiais foram divididos em grupos de acordo com as suas características geomecânicas. Para os litotipos friáveis, foi utilizado o critério de resistência de Mohr-Coulomb, levando em consideração dados de ensaios de laboratório e retroanálises. Para os parâmetros de resistência das unidades semi-compactas e compactas, optou-se pela envoltória não linear de ruptura de Hoek & Brown (2002) e adotou-se os parâmetros básicos: UCS, GSI, m_i e D . O critério de Barton e Bandis (1982) foi utilizado para anisotropias relacionadas à foliação, bandamento e contatos geológicos. As Tabelas 2 e 3 abaixo apresentam os parâmetros de resistência utilizados para as diferentes unidades nas análises de estabilidade.

Tabela 2. Parâmetros de Resistência para os litotipos friáveis.

Litotipo	ID	Parâmetros					
		Caracterização		Resistência Ortogonal		Resistência Paralela	
		γ_{seco} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	c' (KPa)	Φ' (°)	c' (KPa)	Φ' (°)
Itabirito Friável	IF	22	24	50	36	25	29
Filito Friável	FIF	19	21	25	28	24	23

Tabela 3. Parâmetros Geotécnicos para os litotipos compactos e semi-compactos.

PARÂMETROS – RESISTÊNCIA PARALELA						
Materiais		Peso Específico (KN/m ³)	JCS _(50 mm) (MPa)	JCS _(1m) (MPa)	JRC _(1m)	ϕ (°)
Descrição	Cód.					
Itabirito Compacto	IC	32	113	94	2	28
Xisto Compacto	XIC	27	57	50	1.5	27
Itabirito Semi Compacto	ISC	32	-	12	2	28
Quartzito Semi Compacto	QTSC	27	-	10	2	27
Xisto Semi Compacto	XISC	27	-	10	1.5	27

3. MODELO GEOMECÂNICO 3D

3.1. Desenvolvimento do Modelo Geomecânico 3D

Para o desenvolvimento do Modelo Geomecânico foi aplicada a arquitetura construtiva implícita por meio do *software* Leapfrog Geo, com a configuração de um Modelo Litoestrutural inicial que serviu como base para o refinamento dos grandes domínios geológicos (*Refined Model*).

O Modelo Litoestrutural é composto por nove volumes: Cobertura Superficial, Intrusivas, Gnaiss, Metaconglomerado, Capa, Quartzitos Internos, Itabiritos, Lapa e Xisto de Base. Os volumes Capa, Lapa e Quartzitos Internos utilizaram da abordagem de partição do banco de dados, por meio da seleção de intervalos, para o mapeamento das ocorrências de estéril na base e no topo do minério. A definição da ordem cronológica aplicada às superfícies de contato litológico segue a ordem estratigráfica regional e a saída de volumes desse modelo serviu como os limites para o refinamento dos domínios geomecânicos, e assim foram geradas as superfícies de contato: Compacto, Semi-Compacto e Friável.

Os *trends* estruturais aplicados à busca por continuidade dos corpos modelados seguem a definição de anisotropias, e tem o intuito de adequar a situações especiais de domínio e sua distribuição no depósito. Além disso, foi determinado para todos os corpos uma SMU (Small Modelling/Selective Unit) de 3 metros.

Com a ideia da operacionalização do Modelo, através de atualização Semi-Dinâmica e Cortes de Curto Prazo, optou-se por criar tanto a Superfície de Cobertura, quanto os corpos intrusivos em um modelo distinto, chamado Modelo Intrusivas.

3.2. Incorporação do Mapeamento de Bancadas

Os dados utilizados no processo de atualização dinâmica se dão a partir do mapeamento geomecânico de superfície. Essas informações são coletadas, respeitando um limite de um ponto mapeado a cada 30 m, ou em mudanças litológicas/geomecânicas. Os dados coletados em campo são tratados e transformados em uma nuvem de pontos categorizada que é incorporada

ao modelo, conforme a Figura 3 abaixo. Após a incorporação desses novos dados no modelo, a superfície é remodelada, transformando a nuvem de pontos categorizada em pontos numéricos para sequente introdução ao interpolador de interesse. Desta forma os contatos tendem a ter um comportamento mais realista com relação à geometria, uma vez que passam a utilizar além dos dados de sondagem, os novos dados de mapeamento de superfície. É importante ressaltar que as sondagens são reavaliadas caso exista divergência com as informações coletadas no mapeamento.

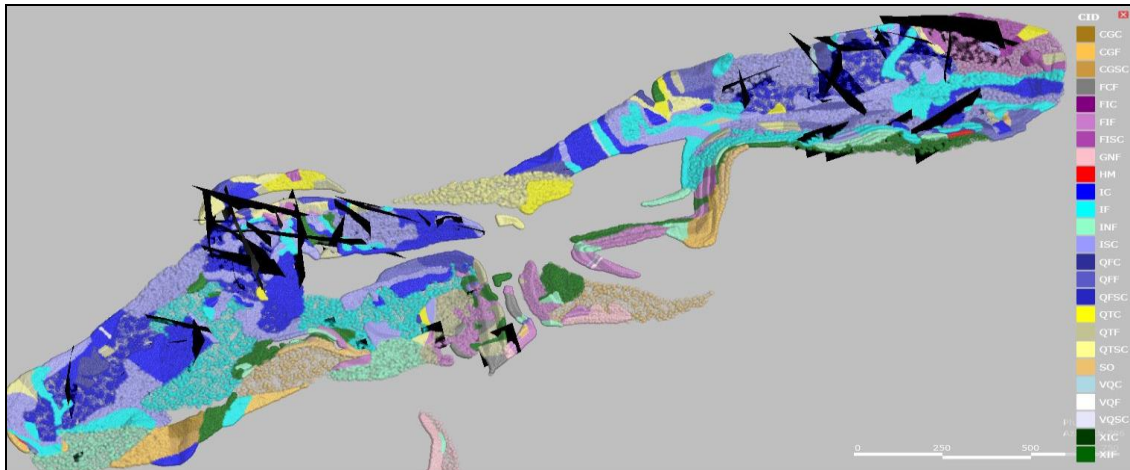


Figura 3. Dados de mapeamento de bancadas, incluindo pontos lito-geomecânicos categorizados e planos de descontinuidades interpolados.

O mapeamento de bancada agrega confiabilidade ao modelo, e gera uma malha de informação mais robusta. A atualização das informações possibilita novas interpretações que podem ser correlacionadas diretamente aos dados de subsuperfície, fazendo com que o modelo se aproxime mais da realidade.

4. IMPLICAÇÕES DA ATUALIZAÇÃO DINÂMICA E A ESTABILIDADE DE TALUDES

Através da atualização dinâmica do modelo geomecânico, com a inserção da nuvem de pontos categorizada, é possível refinar os contatos litológicos. Os dados adensam as informações, quando comparado à utilização somente das investigações geotécnicas de subsuperfície e, além disso, com o mapeamento é possível adquirir características que não são possíveis de serem coletadas somente com descrição de testemunhos (ex.: persistência de descontinuidades e litotipos de baixa coesão não recuperados). A Figura 5 abaixo ilustra o refinamento e aderência dos sólidos modelados com a integração do mapeamento aos dados de sondagem.

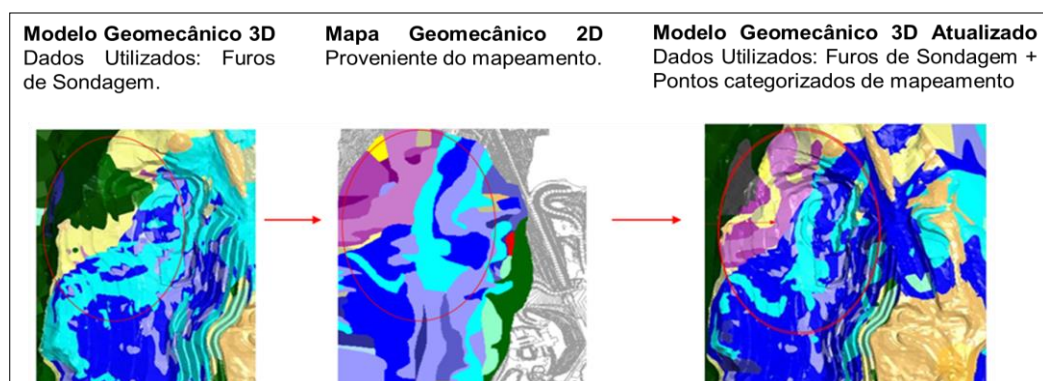


Figura 5. Área da cava refinada com os dados de mapeamento.

A Figura 6 abaixo evidencia uma seção crítica para a Cava da Serra do Sapo, sendo possível observar que a litologia anteriormente classificada como QTSC (Quartzito Semi-compacto), foi reavaliada e modificada para FIF (Filito Friável) com o adensamento das informações.

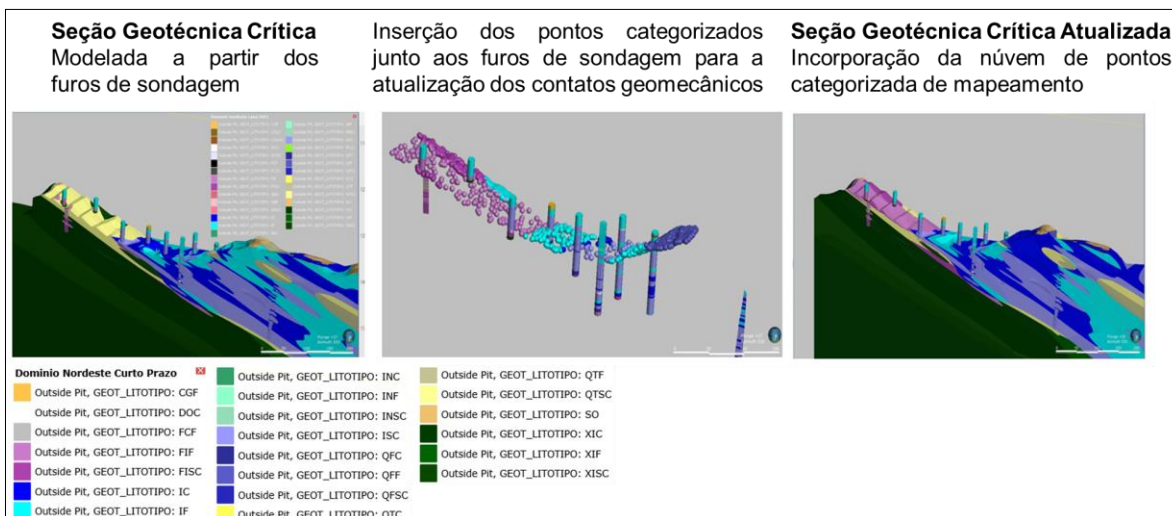


Figura 6. Sessão geotécnica crítica reavaliada com informações de mapeamento de superfície e sondagem.

A atualização do modelo impacta diretamente no fator de segurança das seções críticas, uma vez que os estudos de estabilidade estão relacionados aos dados geomecânicos. Tais informações são importantes para a caracterização do maciço rochoso e verificação das estruturas geológicas nele presentes, bem como a compreensão da influência dessas características na estabilidade dos taludes. Esses dados são fundamentais para a avaliação cinemática que precede as análises de estabilidade.

5. ANÁLISES DE ESTABILIDADE

As análises de estabilidade tiveram o objetivo de comparar a influência dos novos dados de mapeamento em uma das seções críticas da cava. Para isso, foram realizadas com o auxílio do *software* Slide 2 (Rocscience ®), análises de estabilidade por equilíbrio limite pelos métodos GLE/Morgenstern-Price e Bishop, validando os dois cenários litológicos modelados, antes e após a retroalimentação do modelo geomecânico. A Figura 7 evidencia as diferenças encontradas nas análises realizadas.

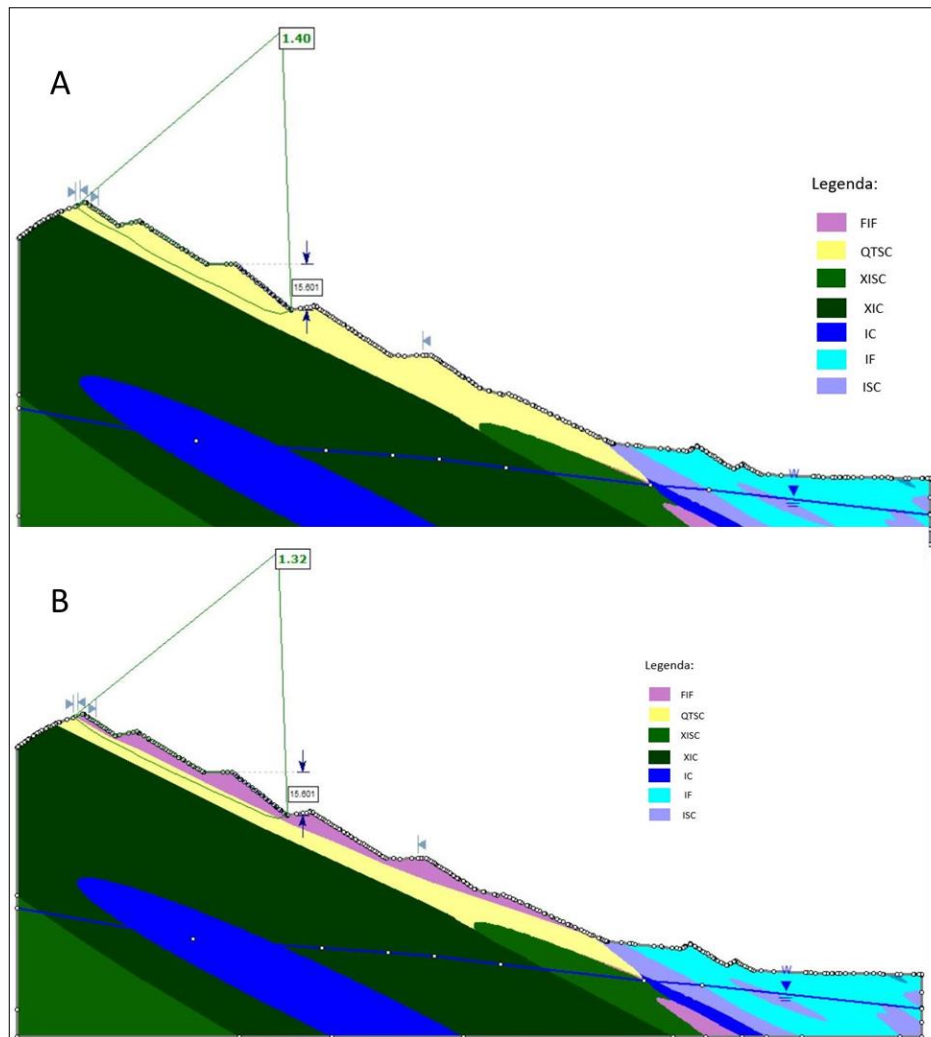


Figura 7. Seção crítica anterior a retroalimentação do modelo geomecânico em A e após a incorporação dos dados de mapeamento de bancadas e B.

Os resultados das análises de estabilidade, tendo como foco principal rupturas em escala de múltiplos bancos (3 ou mais bancos), mostraram que, a litologia é uma das principais condicionantes na estabilidade dos taludes rochosos, tendo grande influência no resultado do fator de segurança. Essa afirmativa é comprovada com os diferentes resultados para as seções A e B. Embora o resultado tenha ficado dentro dos limites aceitáveis para a premissa de projeto da Cava Serra do Sapo (FS mínimo $\geq 1,3$), resultados como esse mostram o alto ganho de confiabilidade e a eficácia do incremento de informações providas do mapeamento de bancada para reavaliações das superfícies aflorantes.

6. CONCLUSÕES

A geração de um modelo geomecânico incorporando informações de mapeamento de superfície e a reavaliação da descrição de sondagem (em caso de incompatibilidade) trouxe ganho de previsibilidade, aumento de confiança e segurança para as análises de estabilidade de taludes. A importância do enriquecimento dos dados para as análises fica evidente, quando comparadas as seções com e sem informação de mapeamento, que trazem maior detalhe e aderência ao talude escavado. Tais resultados foram importantes para a compreensão da influência dessas características na dinâmica da cava, visto que, a configuração litológica é a principal condicionante na estabilidade dos taludes rochosos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Anglo American pelo suporte oferecido.

REFERÊNCIAS

BIENIAWSKI, Z. T., 1989. Engineering rock mass classification. New York: John Wiley. 248p, 1989.

HOEK, E., BRAY, J. W. (1977). Rock Slope Engineering. The Institution of Mining and Metallurgy, London.

KNAUER, L. G.; GROSSI-SAD, J. H. 1996. Geologia da Folha Serro (SE-23-Z-B-IV). In: GROSSI SAD, J. H.; LOBATO, L. M.; PEDROSA-SOARES, A. C. et al. (Eds.) Projeto Espinhaço. Belo Horizonte: COMIG, 1997.

MARSHAK S., ALKMIM F.F., WHITTINGTON A., PEDROSA-SOARES A.C. 2006. Extensional collapse in the Neoproterozoic Araçuaí orogen, eastern Brazil: A setting for reactivation of asymmetric crenulation cleavage. J. Structural Geol., 28: 129-147.