

Estudo Técnico de Estabilidade e Otimização de Taludes da Cava Lagoa Seca

Complexo Mineroquimico de Catalão-GO

Adriano de Albuquerque Souza Sendra¹; Silvio Luiz de Oliveira²; Marcio Roberto Pereira³

Resumo

Os estudos visavam definir os ângulos de corte para a frente de lavra da cava da Lagoa Seca. Estes estudos foram iniciados com um mapeamento geológico-geotécnico detalhado das escavações já realizadas. Estes estudos foram iniciados com um mapeamento geológico-geotécnico detalhado das escavações. O mapeamento inicial foi realizado pela BVP, no final de 2013. Em 2015 foi realizada uma inspeção com a equipe de geotecnia e da Geoconsultoria dos taludes da cava. Considerando o mapeamento geológico da BVP, foi elaborado um programa de coleta de amostras deformadas e indeformadas, para a realização de ensaios. Em 2016 o mapeamento geológico-geotécnico foi atualizado pela equipe de Geotecnia. E foram coletadas amostras na cava nas diferentes unidades geológico-geotécnicas. Ao todo foram escavados 12 poços, nos taludes e bermas das frentes de lavra da Cava. As análises iniciais foram realizadas para os taludes dos bancos individuais, para as diversas litologias presentes nos taludes da cava, para as condições seca e saturada, a depender da condição presente ou futura do material nos taludes. Por fim, foram realizadas as análises para os taludes globais da cava final. As análises de estabilidade foram realizadas pelo método de Bishop Simplificado e Spencer, utilizando o software SLIDE da Rocscience. Com isso, foram propostos os ângulos de corte para os materiais presentes na cava da Lagoa Seca. As amostras coletadas foram enviadas para a execução de ensaios em laboratório. Nas 12 amostras coletadas foram realizados ensaios de caracterização, que compreenderam: granulometria completa, massa específica dos grãos, e limites de Atterberg.

PALAVRAS-CHAVE: Mecânica dos Solos, Análise de Estabilidade, Otimização de Taludes.

¹ Geól., Empresa, Mosaic Fertilizantes; Tapira-MG; (34) 3669-5008; adriano.sendra@mosaicco.com.br

² Geól., Empresa, Geoconsultoria: São Paulo - SP, (11) 3872-5898; geo@geoconsultoria.com.br

³ Técn., Empresa: Mosaic Fertilizantes; Catalão – GO, (64) 3411-8817; márcio.roberto@mosaicco.com.br

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho de pesquisa teve como objetivo principal realizar uma análise completa da condição de estabilidade de taludes da Cava Lagoa Seca da mina de Catalão, de propriedade da Mosaic Fertilizantes LTDA.

Com o intuito de verificar se as inclinações dos ângulos de face dos taludes usados pela operação de mina atendem ao fator de segurança mínimo aceitável.

Com as análises de estabilidade realizadas pretende-se, também, a otimização da cava, para aumento da inclinação dos ângulos de face dos taludes, acarretando a máxima disponibilidade de minério para a operação da mina. Isto possibilitaria um ajuste na geometria de escavação, de forma a otimizar seus ângulos e maximizar a sua vida útil, sem prejudicar os parâmetros de segurança previstos no projeto.

2. LOCALIZAÇÃO

A cava da Lagoa Seca está inserida no Complexo Minerquímico de Catalão, pertencente à Mosaic Fertilizantes e localiza-se próximo à divisa dos estados de Minas Gerais e Goiás, no município de Ouidor-GO, a cerca de 260 km de Goiânia e 640 km de Belo Horizonte-MG.

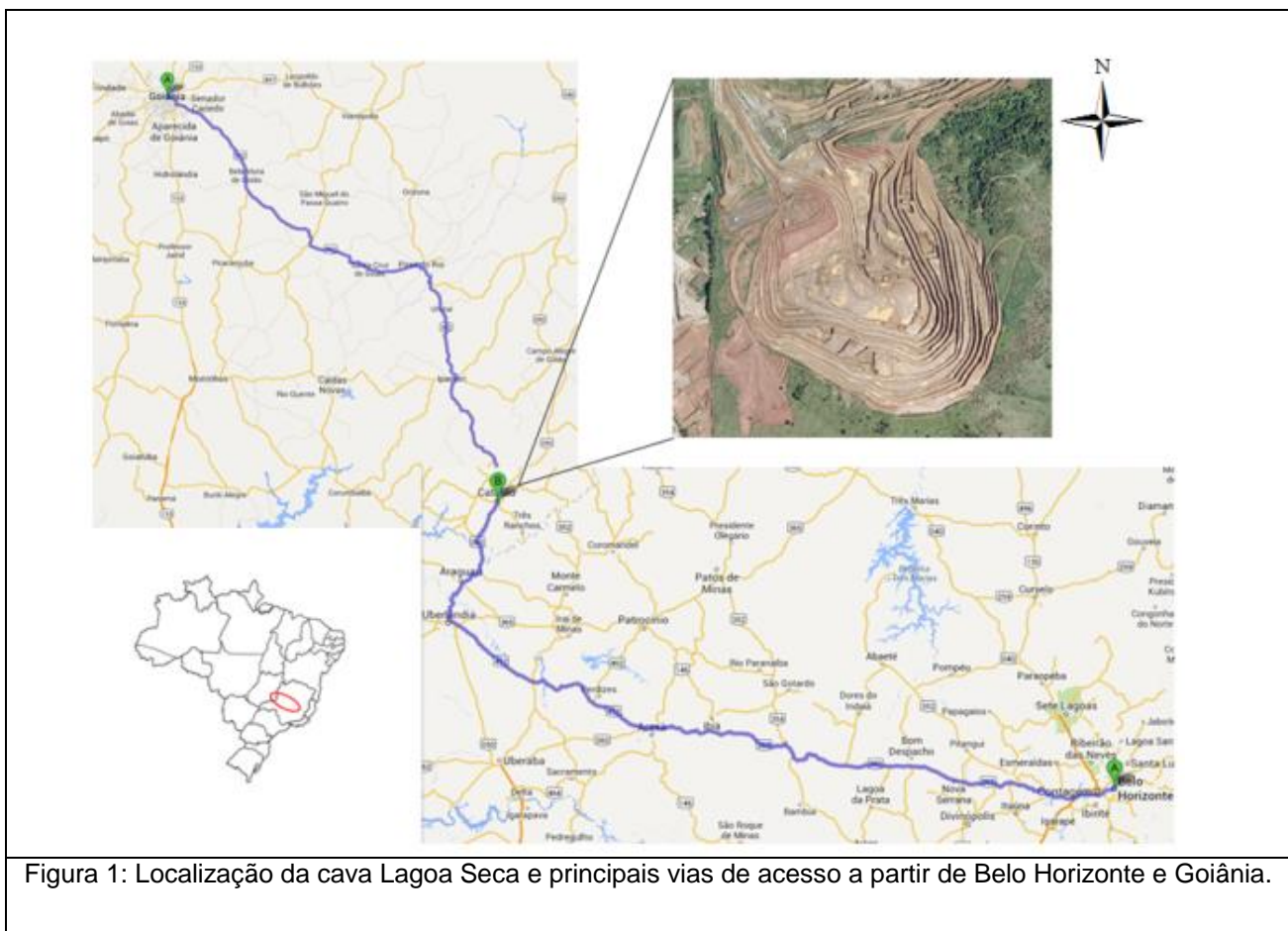


Figura 1: Localização da cava Lagoa Seca e principais vias de acesso a partir de Belo Horizonte e Goiânia.

3. GEOLOGICA DA ÁREA ESTUDADA

A Lagoa Seca apresenta nos taludes superiores um solo coluvionar superficial, argiloso, normalmente com pequena espessura, não ultrapassando um banco, por isso de pequena representatividade geotécnica. Sotoposto ao solo superficial coluvionar ocorre uma espessa camada

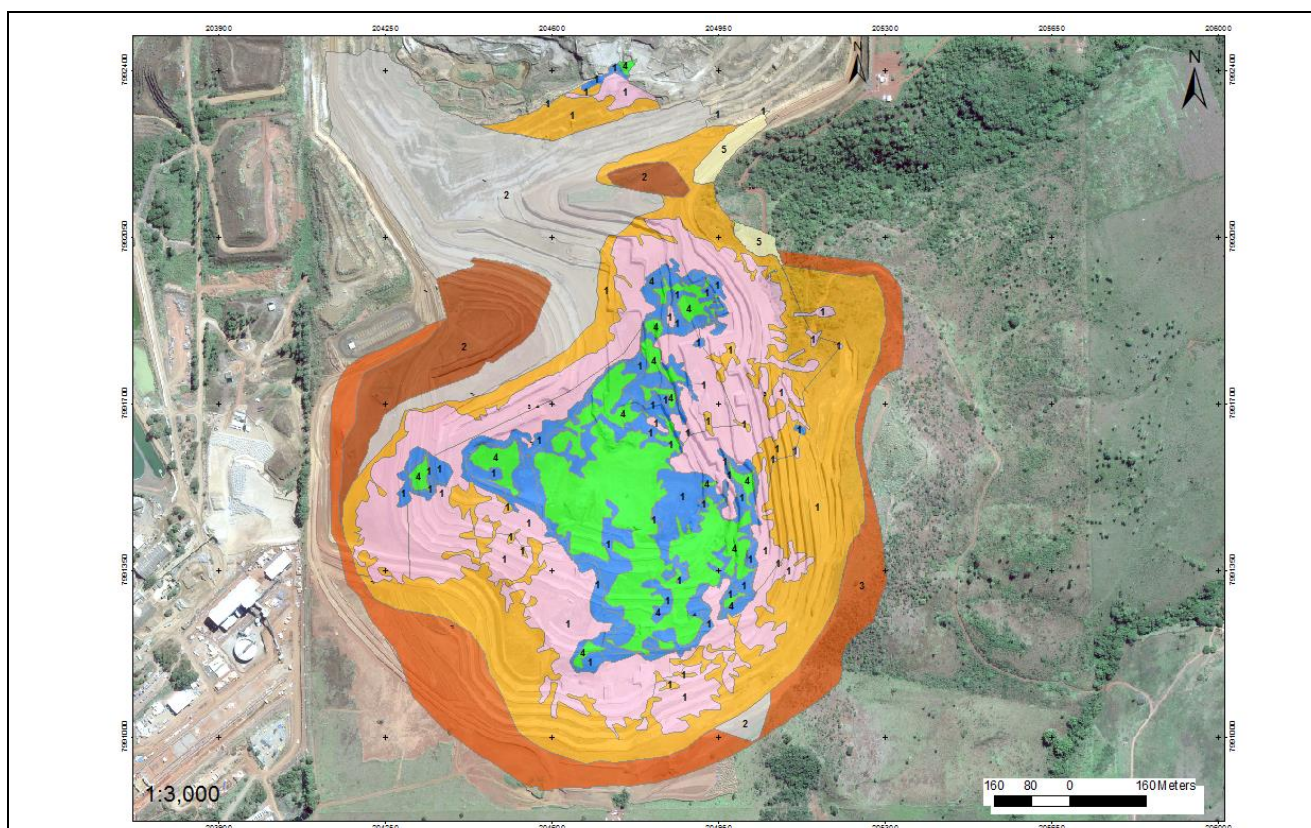
de solo amarelado, areno-siltoso, com pedregulhos, classificado como aloterito. Esta unidade aflora em diversos bancos, revelando grande espessura, e condições geotécnicas bastante semelhantes, nos bancos superiores e inferiores. Sotoposto ao aloterito ocorre solo amarelo escuro a amarronzado, rico em veios e diques, também areno-siltoso, mas com mais pedregulhos, classificado como isalterito.

Na base ocorre quase sempre como manchas isoladas, material esverdeado, arenoso, preservando a estrutura da rocha, classificado como sílico carbonatado (SIC). Em pontos isolados, no fundo da cava, ocorre material mais duro, já classificado como rocha.

4. INCLINAÇÃO DOS TALUDES POR SETORES GEOTÉCNICOS DA CAVA

Atualmente a mina é conformada em bancos, com cerca de 10 m de altura nos diversos materiais, variando a inclinação do talude do banco individual em função do tipo de material. De um modo geral são projetados taludes com 55 e 63°.

Para o planejamento de lavra são considerados 4 setores geotécnicos, conforme Figura 2 e parâmetros a seguir. As larguras das bermas são relativamente uniformes, de 15,0 m para a cava operacional, e de 10,0 m para a cava final.



Setor Geotécnico	Tipologias	Ângulo individual do Talude	Berma(m)*	Altura de Banco(m)
1	Aloterita e Isalterito (topo e Base)	63	15	10
2	Sedimento e colúvio argiloso	55	15	10
3	Colúvio cascalhoso	45	15	10
4	SIC	45	15	10

* Para berma em operação, no caso de cava final, 10 metros

Figura 2 - Setores geotécnicos considerados na cava da Lagoa Seca

5. INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

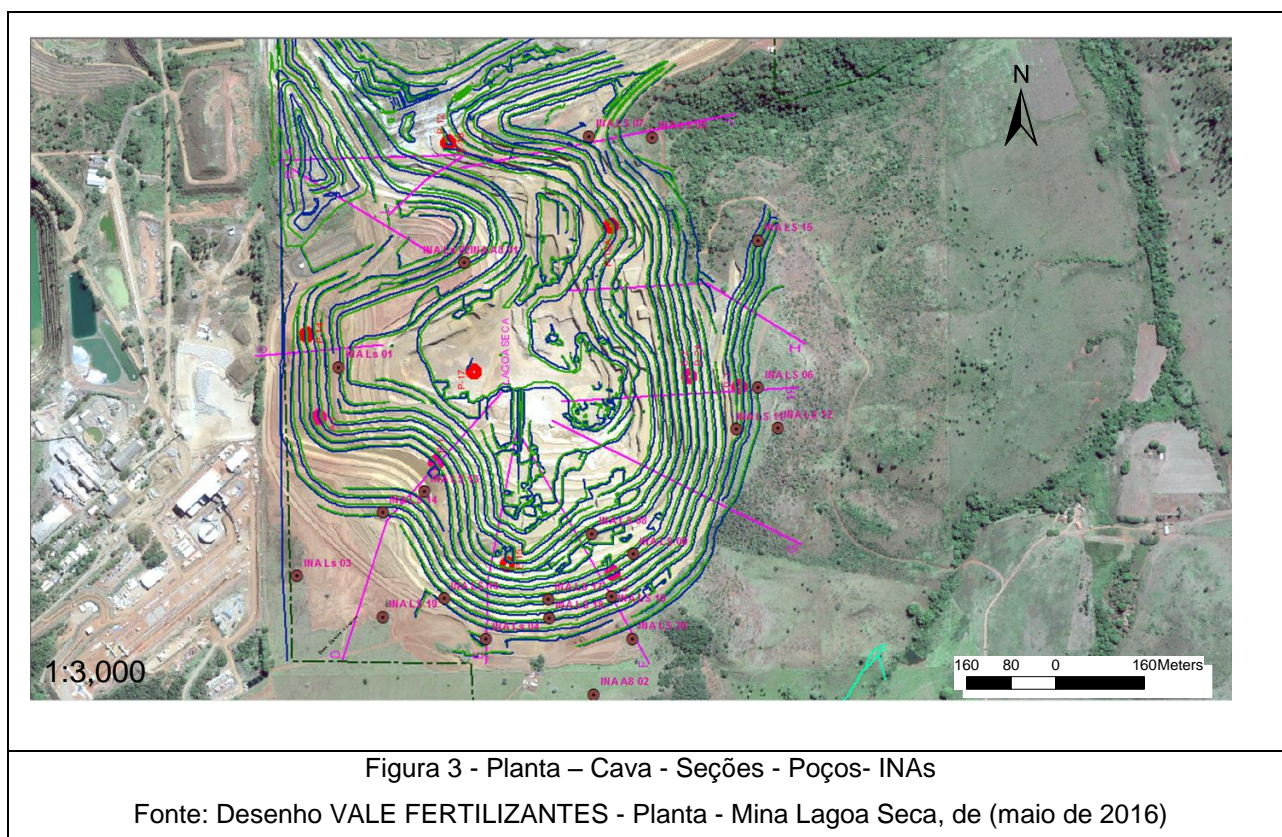
Com o mapa geológico-geotécnico consolidado e definição dos locais das seções, foram locados os poços nas diversas unidades geotécnicas, visando a coleta de amostras deformadas e indeformadas.

Foi executada a locação de 12 poços escavados nos taludes e bermas da Lagoa Seca. Todas as amostras coletadas foram enviadas para a execução de ensaios em laboratório, na TECNOGEO, em São Paulo.

Em todas as 12 amostras coletadas foram realizados os ensaios de caracterização, que compreenderam: granulometria completa, massa específica dos grãos, e limites de Atterberg.

A partir dos resultados dos ensaios de caracterização, foram selecionadas as amostras para a execução dos ensaios de resistência. Foram executados ensaios de compressão triaxial, adensado rápido, na umidade natural e com corpos de prova saturados, em função das condições de cada material nos taludes.

A Figura 3 apresenta a locação das seções, poços e INA's, cujos dados foram utilizados no traçado das seções geológico-geotécnicas para as análises de estabilidade.



6. ANÁLISES DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Os resultados dos parâmetros de resistência utilizados para as análises de estabilidade dos taludes foram agrupados por materiais, separados quando necessário, mesmo sendo o mesmo material, mas que mostrava comportamento distinto, resultando nos parâmetros efetivos de resistência apresentados na tabela 1, e utilizados nas análises de estabilidade.

Tabela 1 - Parâmetros de resistência dos diversos materiais, na condição natural e saturada

Amostras	Unidades	Natural			Saturado		
		γ (KN/m ³)	c' (Kpa)	ϕ' (°)	γ (KN/m ³)	c' (Kpa)	ϕ' (°)
P14	Cobertura vermelha	18.2	55	31			
P12/P16	Sedimentos Paleo Lago	-	-	-	21.1	50	25
B1/C1	Aloterito Amarelo	18.5	40	35	19.5	48	33
A1/D1/D2	Aloterito Amarelo	18	17	31	19	18	33
P15	Isalterito Topo	17.6	40	29	18	41	31
P17	Isalterito Base	18.6	31	35	19	44	37
P13A	Silico-Carbonatado-SIC	20.7	31	29	21	14	27

Para a rocha sã foi adotado um parâmetro elevado em relação aos materiais existentes na cava da lagoa seca (de 20 kN/m³ para a massa específica, 200 kPa para a coesão, e 36° para o ângulo de atrito) se comparado a outras rochas este parâmetro e até baixo, é o mesmo utilizado nas análises das cavas da Frentes 1 e Frente 4. Não foram realizados ensaios na rocha sã e no mapeamento geotécnico, pois a mesma na aflora na cava, encontrando-se em profundidades inferiores.

De maneira geral, a diferenciação litológica/tipológica e geomecânica das unidades existentes na cava Lagoa Seca segue um padrão horizontalizado, no qual nota-se um gradativo aumento de resistência em profundidade, normalmente atrelado à diminuição no grau de alteração das rochas.



Figura 4 - Localização da cava Frente 1; Frente 4 e Lagoa Seca

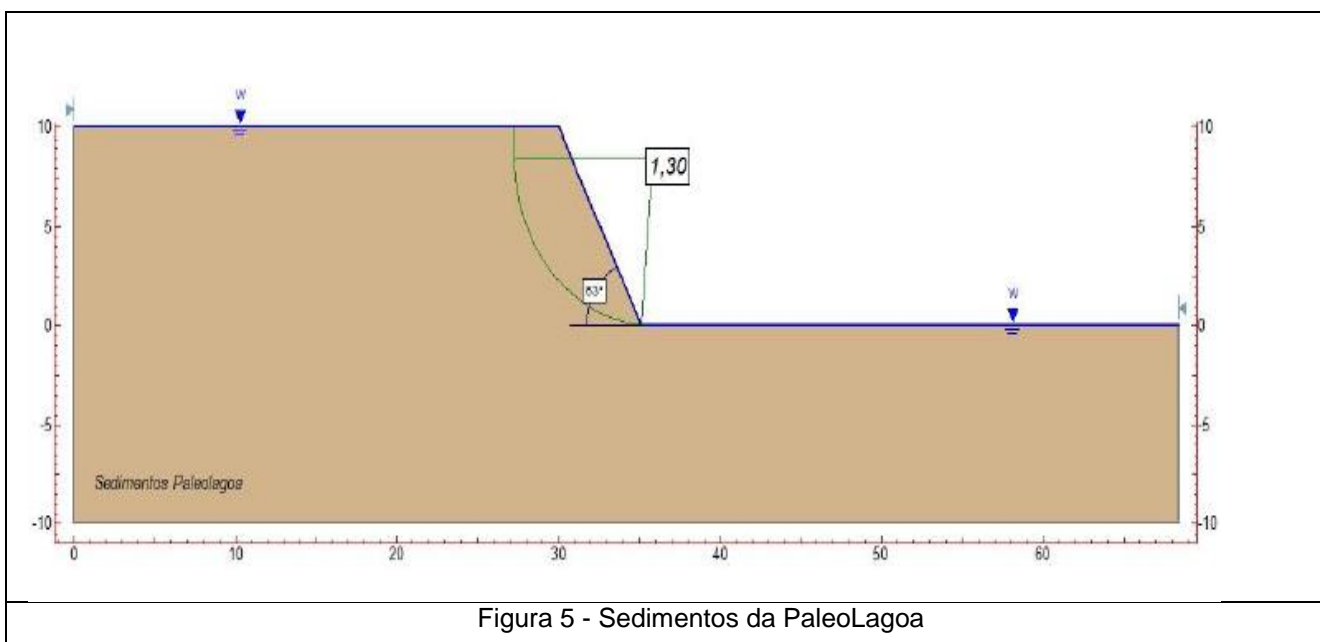
6.1 ANÁLISE DE ESTABILIDADE BANCO INDIVIDUAIS

Foram realizadas análises para os bancos individuais, com 10 m de altura, e inclinações variadas, conforme se observa na tabela 2. Os parâmetros são aqueles do tratamento global dos resultados, e resumidos e apresentados na tabela 1.

Tabela 2 - Análises de estabilidade para os taludes dos bancos individuais

Unidade	Amostras	Fator de Segurança									
		Natural					Saturado				
		45°	50°	55°	60°	65°	45°	50°	55°	60°	65°
Cobertura vermelha	P14		2,79	2,61	2,44	-	-	-	-	-	-
Sedimentos Paleo Lago	P12/P16	-	-	-	-	-	1,77	1,65	1,52	-	-
Aloterito Amarelo	B1/C1		2,41	2,24	2,08	1,92		1,74	1,59	1,43	1,27
Aloterito Amarelo	A1/D1/D2	-	-	1,46	1,34	1,23	1,14	-	0,80	-	-
Isalterito Topo	P15	-	-	2,11	1,97	1,82	-	-	1,41	1,26	1,12
Isalterito Base	P17	-	-	1,93	1,79	1,66	-	-	1,52	1,35	1,19
Silico-Carbonatado-SIC	P13A	1,91	1,77	1,52	-	-	0,72	-	-	-	-

Em função destes resultados foram realizadas algumas análises adicionais. Há registro de trincamento nos sedimentos da paleolagoa em 2016, com banco com cerca de 10 m de altura, e inclinação do talude do banco com 63°. Para esta situação de fator de segurança próximo de 1, conforme apresentado na figura 15, os parâmetros do material teriam que ser de 37 kPa para a coesão, e 25° para o ângulo de atrito, ou seja, menores que aqueles observados nos ensaios de laboratório. Com os resultados dos ensaios de laboratório não haveria este trincamento, pois o fator de segurança resultou em 1,30 (figura 05).

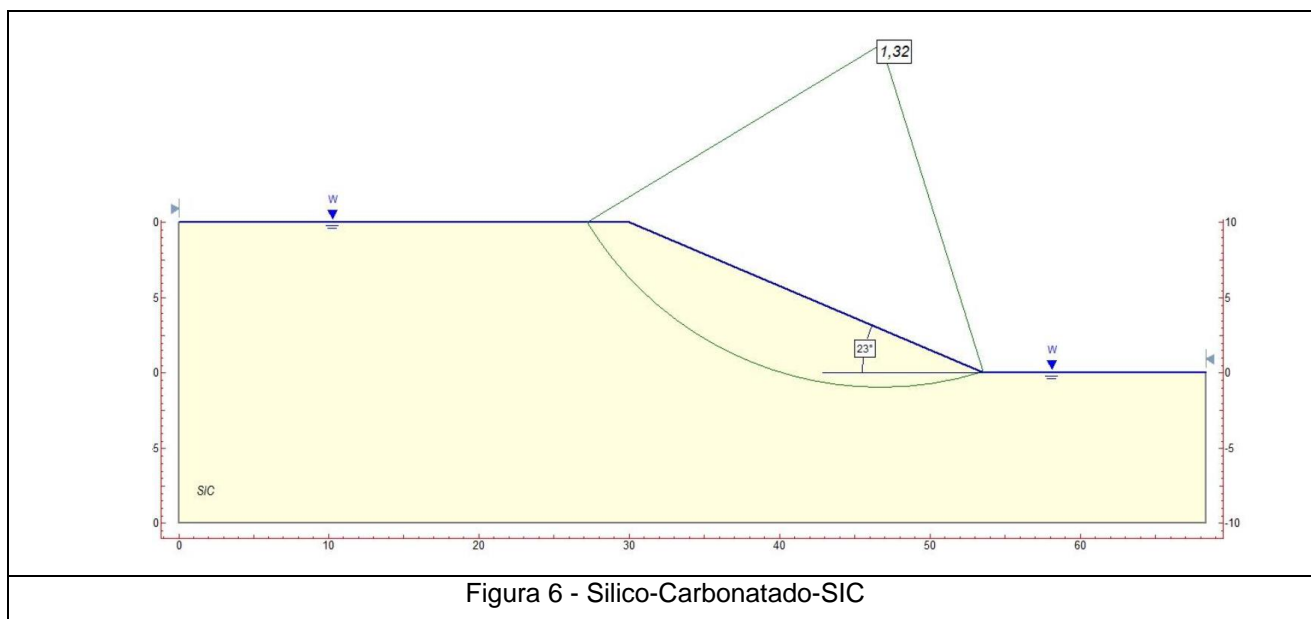


Assim, há divergências entre o observado no campo, e com o resultado da análise com os ensaios de laboratório (apenas 2 resultados, mas consistentes). Contudo, os resultados mostram grande sensibilidade nas análises, e se a inclinação do talude fosse pouca coisa maior, o fator de

segurança com os resultados dos ensaios de laboratório poderiam mostrar também valor próximo da unidade.

Para o aloterito amarelo saturado (A1/D1/D2), cujo fator de segurança para 50° é de 0,80, para ter se ter este fator aumentado para 1,35 deverá ser escavado com 30° (figura 17). No campo possivelmente a situação deste aloterito saturado nas faces dos taludes não se realize.

Para o SIC foi realizada uma análise, para a condição saturada, que deve ocorrer no campo, buscando-se uma inclinação do talude do banco individual para um fator de segurança próximo a 1,3. A figura 18 mostra esta análise, que resulta em um talude com 23° de inclinação.



Com base nos resultados destas análises observa-se que:

- a cobertura vermelha argilosa, sempre na condição de umidade natural, pode ser escavada com taludes íngremes, até superiores a 65°, mas como é estéril, e o ângulo global do talude deve ser respeitado, o aumento na inclinação do banco corresponde a aumento na largura da berma para a manutenção do ângulo médio, aumentando a remoção de estéril. Assim deve ser realizada esta avaliação, mas, a princípio, a escavação pode ser realizada com 60°;

- o aloterito amarelo (fundo da cava – B1/C1), isalterito de topo e de base, todos na condição natural, podem ser escavados com até 65°; mas é recomendado que seja respeitada a situação de 63°, que é praticada atualmente;

- o aloterito amarelo lateral, leste e oeste (A1/D1/D2) e o SIC, todos na condição natural, devem ser escavados com 55°, mas é recomendável escavar este último com 50°, devido às estruturas preservadas;

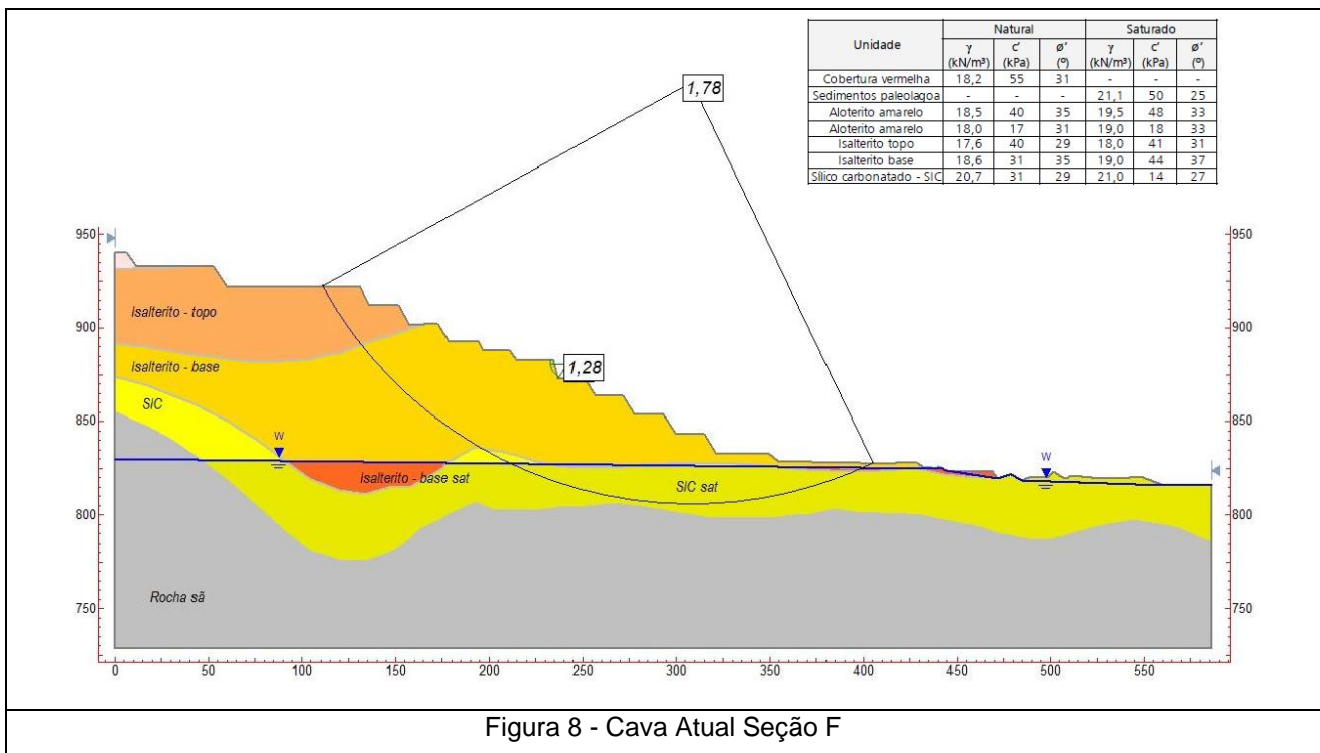
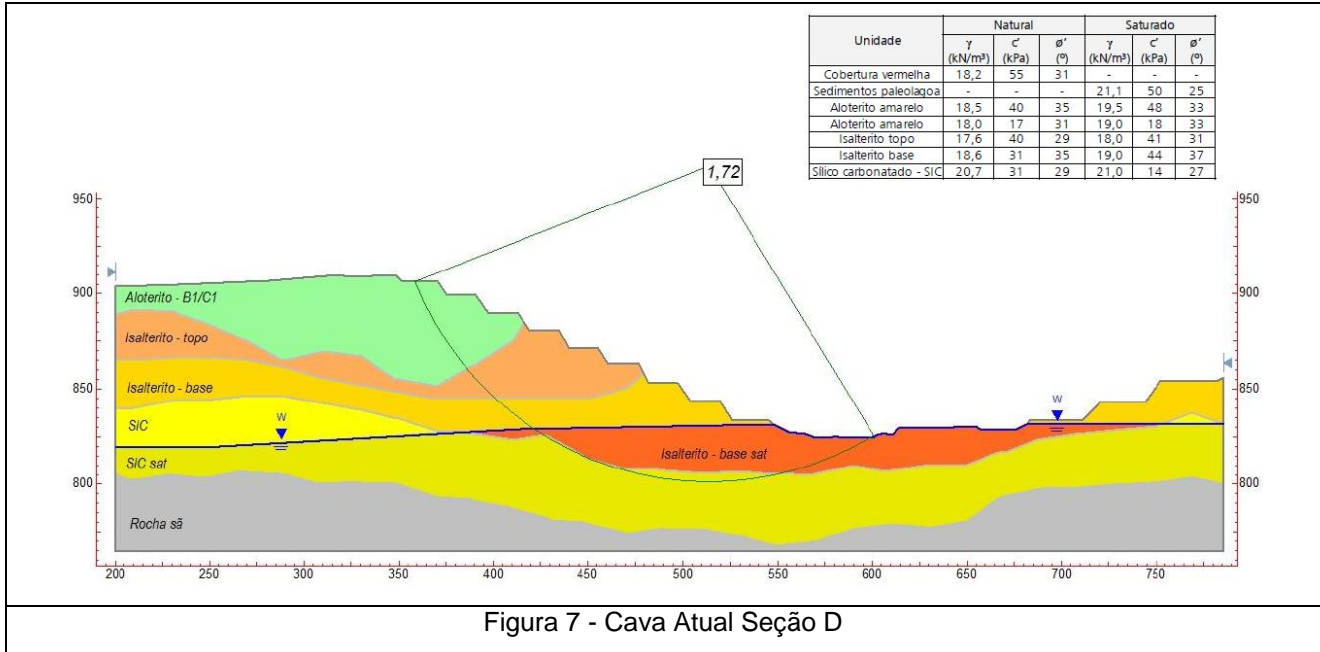
- para a condição saturada o aloterito amarelo do fundo (B1/C1) e os isalteritos devem ser escavados com até 60° de inclinação do talude do banco individual; os sedimentos da paleolagoa devem ser escavados com até 50°;

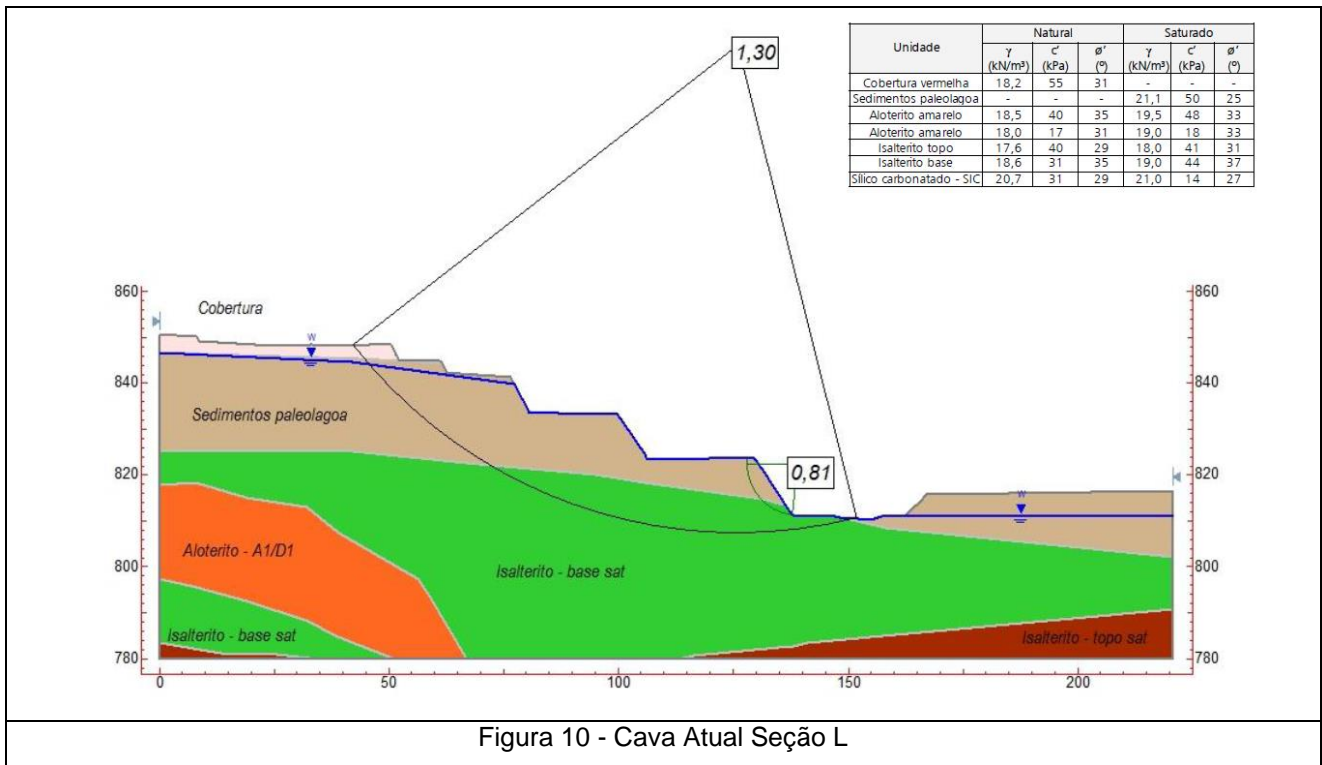
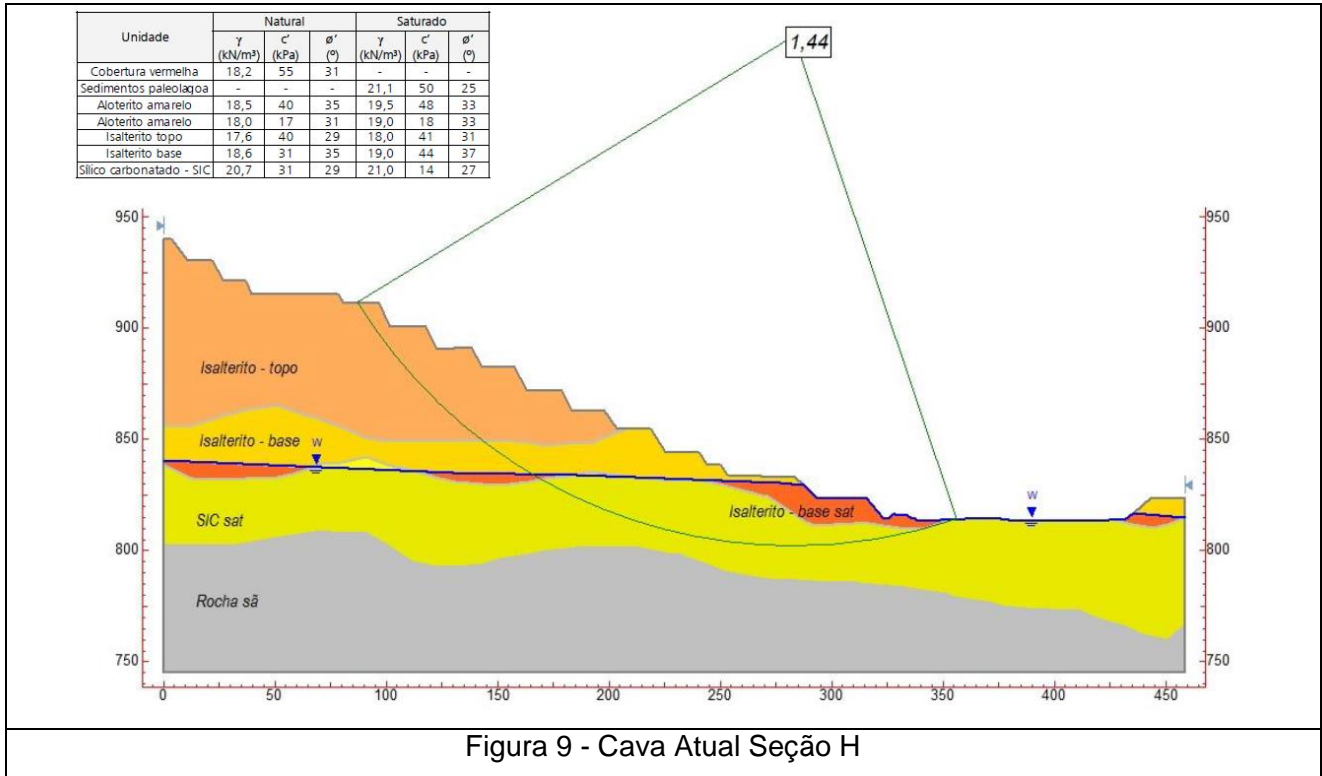
- o aloterito amarelo das laterais (A1/D1/D2) e SIC, quando saturados, devem ser escavados com taludes suaves: o primeiro com 30° (possivelmente esta situação não ocorra no campo), e o segundo com 23°.

6.2. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DOS TALUDES GLOBAIS DA CAVA ATUAL

Foram selecionadas algumas seções da cava atual para a realização de análises de estabilidade, apenas para verificação dos parâmetros que estão sendo empregados, e se não há alguma inconsistência com a situação de campo, de taludes estáveis, e de análises de estabilidade, com fatores de segurança abaixo de 1.

Foram seleccionadas as seções D e F, da porção sul da cava, por apresentarem as maiores alturas, e variação de espessura dos materiais presentes nos taludes. Foi seleccionada também a seção H, na lateral leste, também de elevada altura, e que apresenta N.A. um pouco mais elevado, e a seção L, por estar nos sedimentos da paleolagoa.





Os resultados destas análises mostram fatores de segurança condizentes com as condições de estabilidade dos taludes observadas no campo, pois é raro ocorrer algum problema de instabilidade nos taludes da Lagoa Seca, exceto de forma localizada, condicionada por estruturas, ou nos sedimentos da paleolagoa, quando são escavados com taludes mais íngremes. Por isso, os parâmetros definidos para os diversos materiais (tabela 2) serão utilizados nas análises de estabilidade dos taludes da cava final.

6.3. ANÁLISE DOS TALUDES GLOBAIS DA CAVA FINAL

Para a cava final foram selecionadas algumas seções que representam a região sul da cava, que mostra nível de água mais próximo do pé da escavação, conforme informações dos INA's monitorados. Assim, foram selecionadas as seções E e H, que representam as demais seções desta região (D / E / F / G / I).

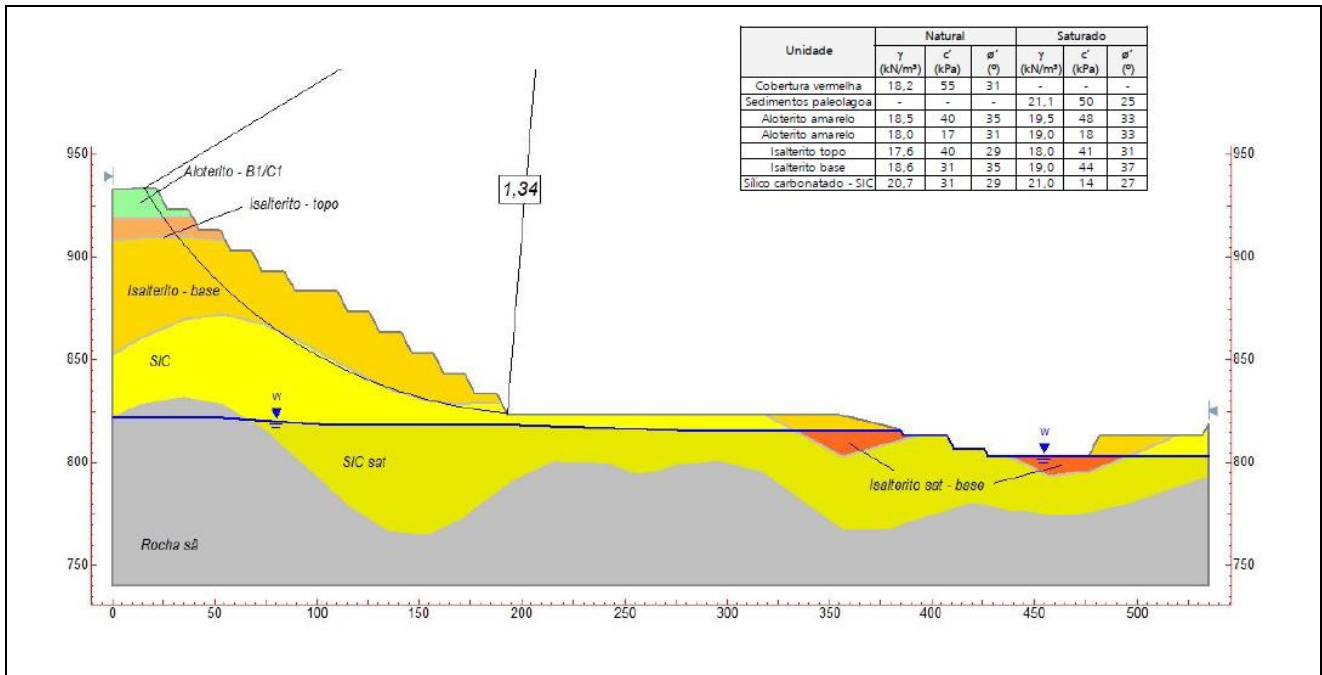


Figura 11 - Cava Final Seção E

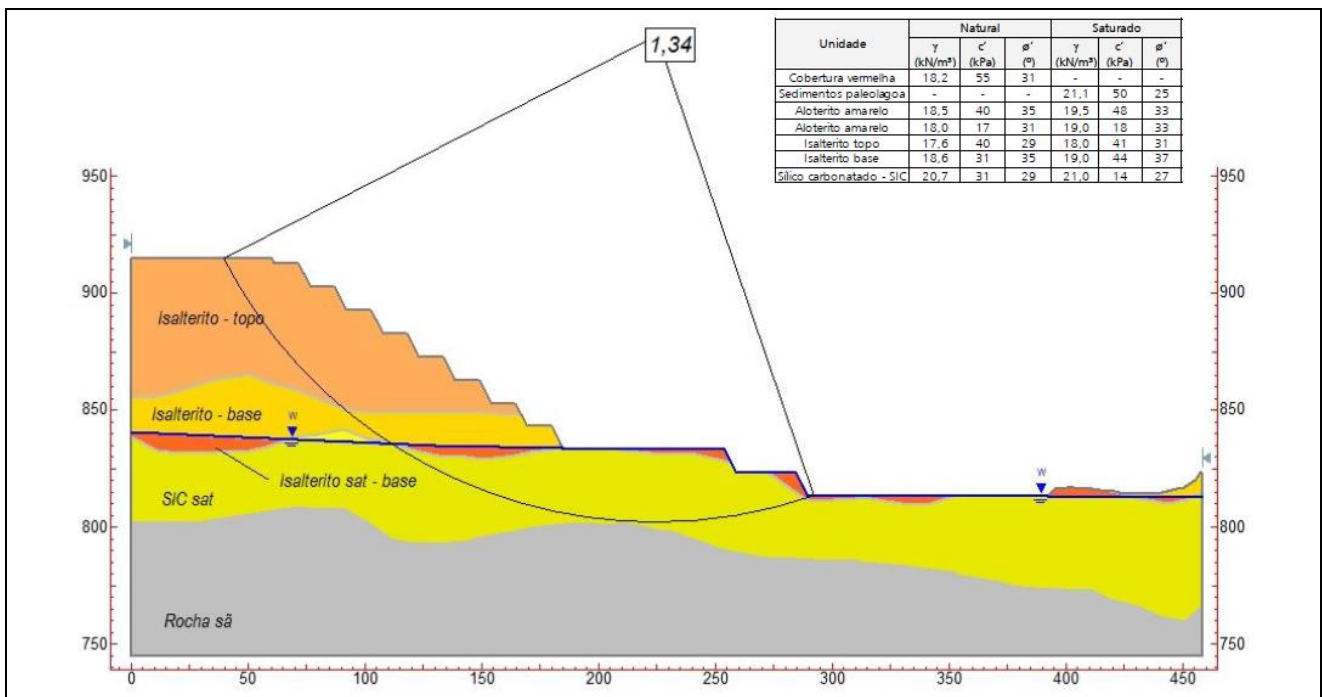


Figura 12 - Cava Final Seção H

Estas duas análises mostram situações muito semelhantes, com fundo de cava pouco acima da cota 800 m. e N.A. baixo. Esta situação, que deve ocorrer na porção sul da cava final, desde pouco a sul da seção C, passando pela D, E, F, G, H, e I, os fatores de segurança mostram-se pouco acima de 1,3, permitindo implantar as seções planejadas, representadas no mapa de seções figura 11.

As análises de estabilidade para a porção norte da cava final são distintas, pois esta região tem características específicas:

- cava planejada, com fundo na cota 673 m;
- comportamento do N.A. (rebaixamento) com este aprofundamento da escavação;
- N.A. nos sedimentos da paleolagoa, se suspenso ou não.

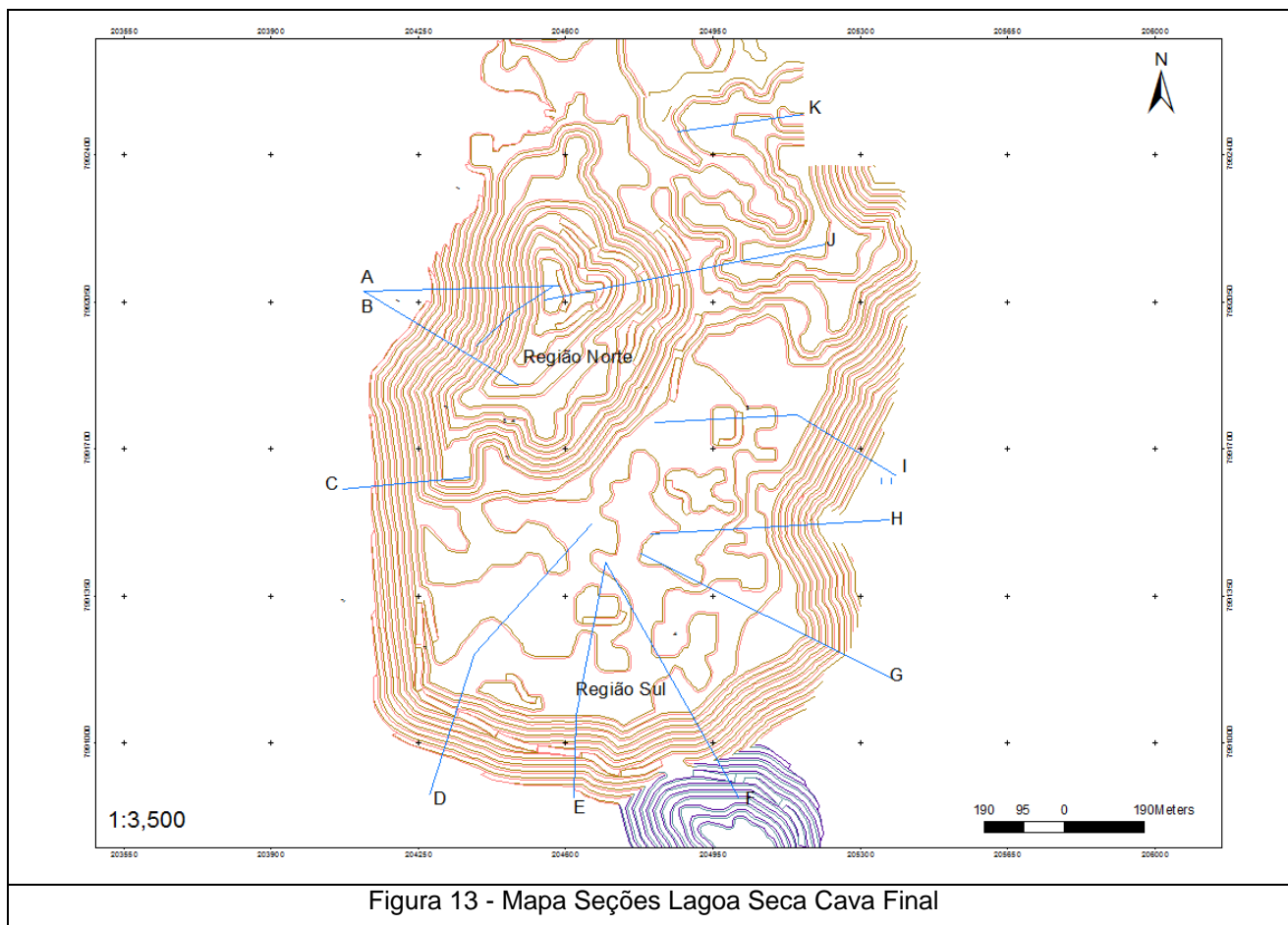
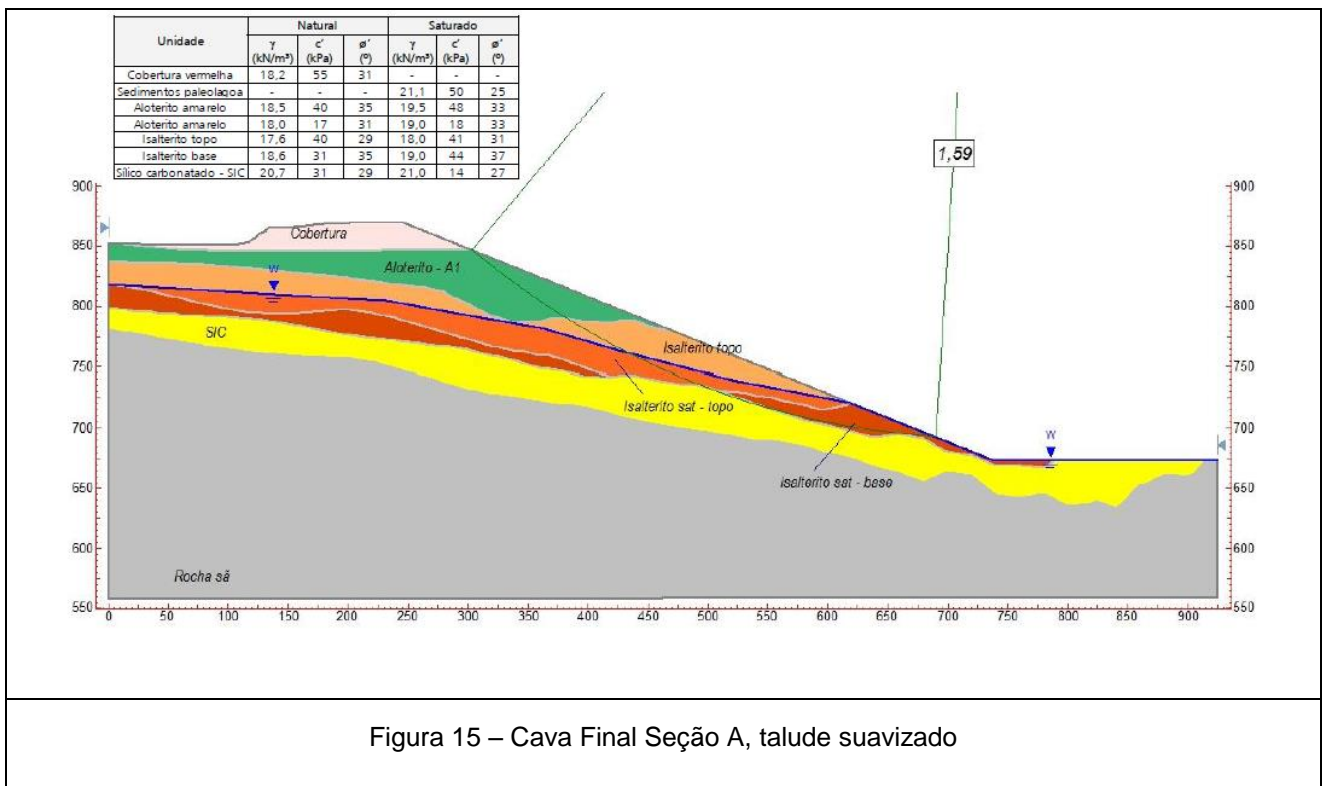
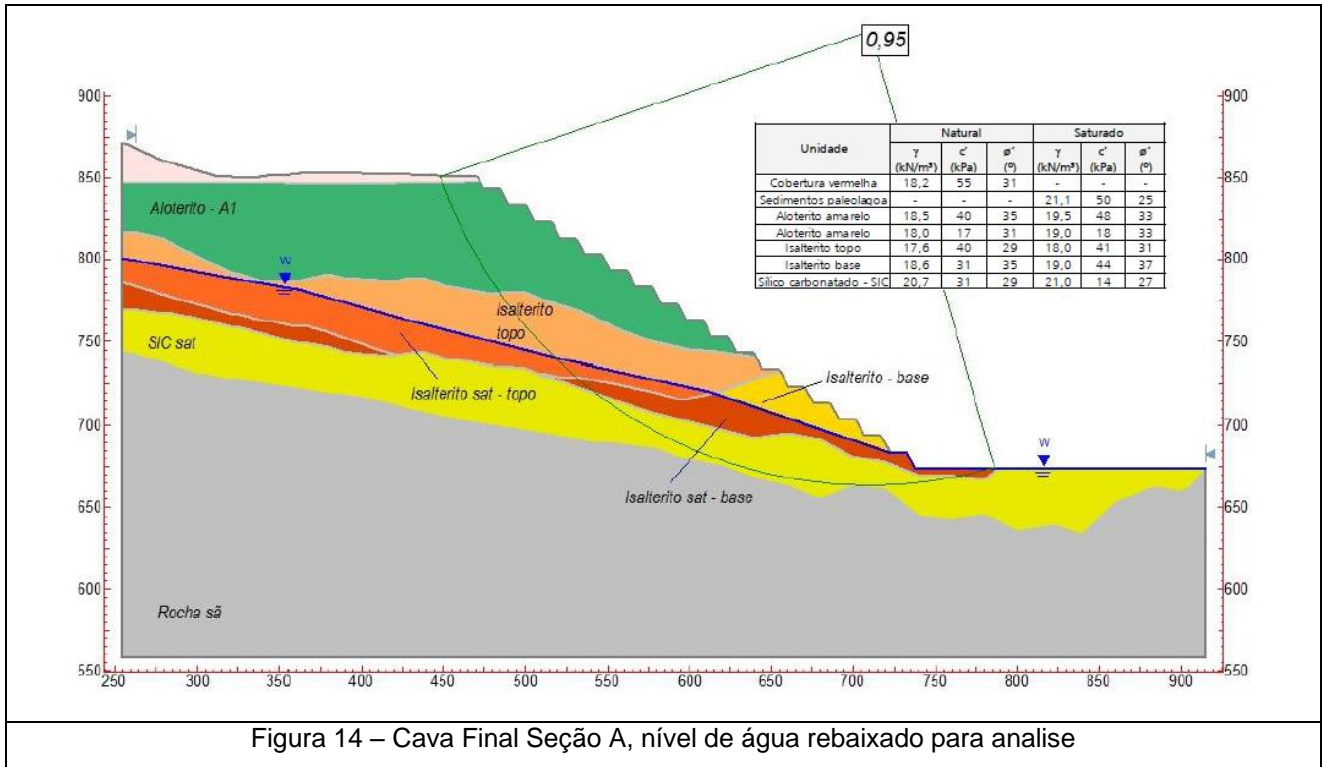


Figura 13 - Mapa Seções Lagoa Seca Cava Final

As seções mostram a cava final, com os materiais, mas o N.A. está na condição atual. Deveria ser realizada apenas algumas simulações de comportamento do N.A., a ser confirmado posteriormente, pois as informações disponibilizadas não permitiram um estudo conclusivo.

A seção A foi traçada exatamente no talude oeste da cava profunda, e é a que apresenta a maior altura, pelo fundo na cota 673 m. O N.A. fornecido na seção está posicionado na cota aproximada 815 m, como pode ser observado na Seção A. Para esta seção foram realizadas algumas simulações, conforme se observa nas figuras 14 a 17.



A análise com o N.A. rebaixado, mantendo o talude quase todo seco, conforme se observa na figura 15, apresenta fator de segurança de 0,95, ou seja, na condição de ruptura. O círculo crítico procura o SIC (rocha sílico carbonatado) saturado na base, de parâmetros mais baixos.

Foi realizada uma nova simulação, com talude ainda mais suave, para uma inclinação média de 1V:2,5H (21,8°), com SIC ainda na umidade natural, e N.A. um pouco mais elevado. O fator de segurança mostra 1,59 (figura 15). A figura 16 apresenta a mesma seção anterior, mas apenas com o SIC na umidade natural (foram alterados apenas os parâmetros deste material), e o fator de segurança se elevou para 1,15. O círculo crítico ficou mais raso, saindo no pé do talude.

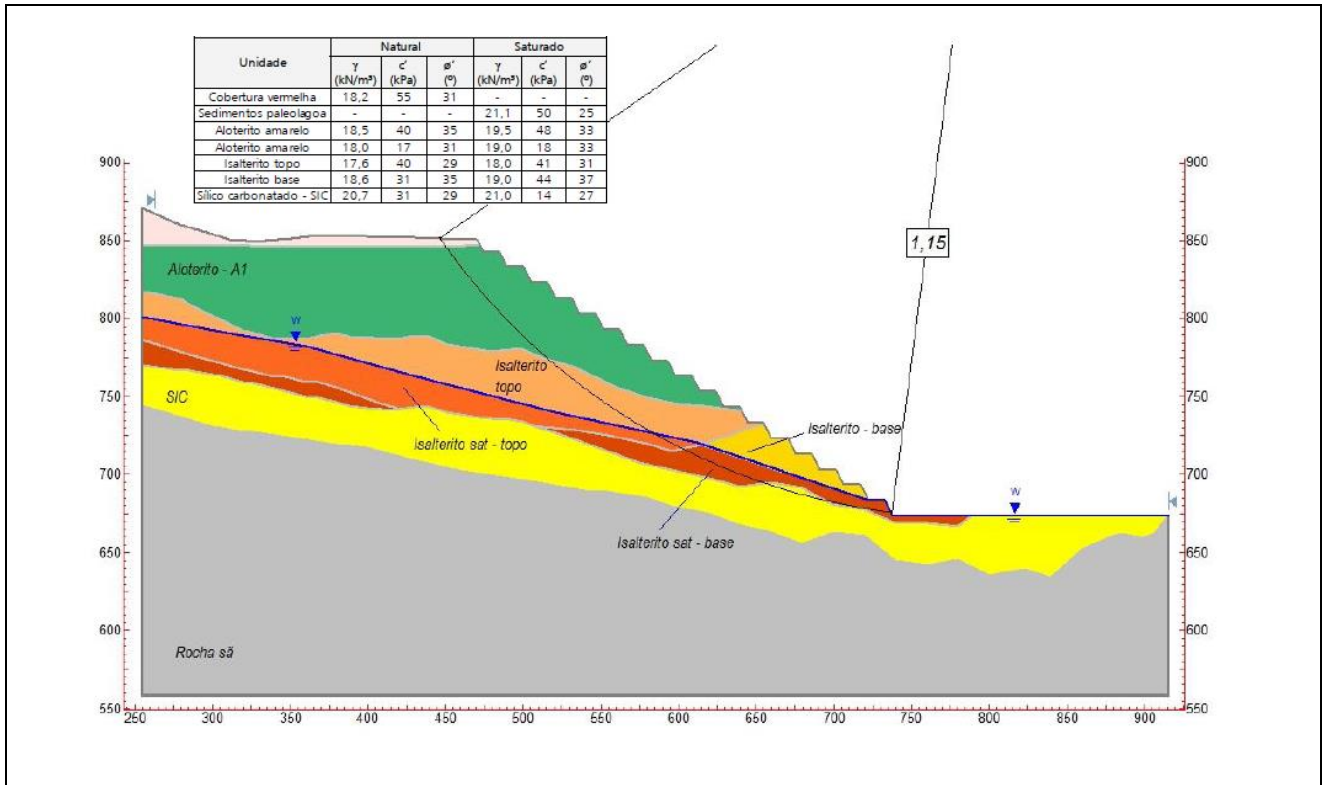


Figura 16 – Cava Final Seção A, Sic na umidade natural

Uma terceira simulação para esta seção foi realizada com a suavização do talude para uma inclinação média de 1V:2H (26,5°), ainda com o SIC na umidade natural. O fator de segurança obtido foi de 1,38, já mais aceitável (figura 17).

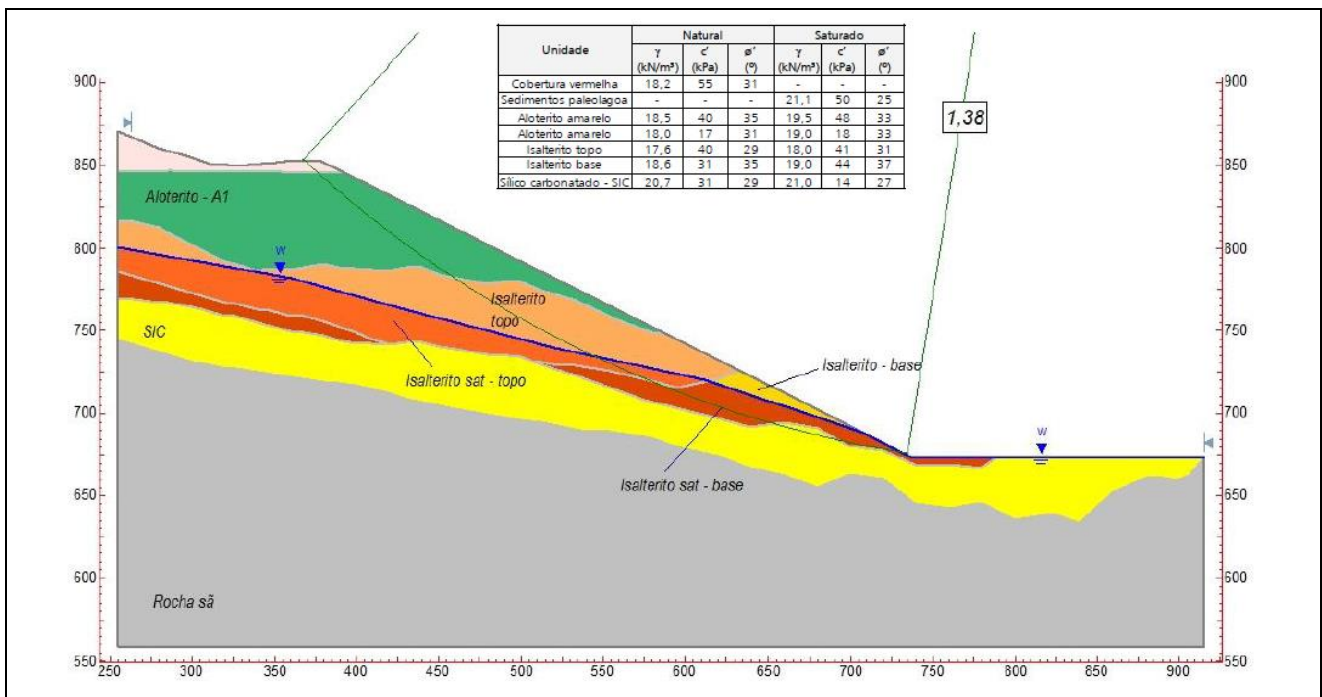


Figura 17 – Cava Final Seção A, Sic na umidade natural, talude suavizado

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De um modo geral os taludes mostram bom aspecto, com condições satisfatórias de estabilidade. Não é frequente a ocorrência de instabilidade na mina, e quase sempre restrita a banco individual.

As análises de estabilidade para os bancos individuais mostram que muitos materiais podem ser escavados com 63/65° de inclinação na condição de umidade natural, como o aloterito amarelo no fundo da cava (B1/C1), e o isalterito de topo e o de base.

A cobertura vermelha deve ser escavada com 60°, e o aloterito amarelo lateral (A1/D1/D2) e o SIC com 55°. Caso este tenha condicionantes estruturais, e por ser estéril, a inclinação do SIC deve ser reduzida para 50°.

Para a condição de saturação as inclinações devem ser reduzidas para 60° para o aloterito amarelo no fundo da cava (B1/C1), e para os isalterito. Os sedimentos da paleolagoa devem ser escavados com 50° (poderá até ser mais suave para remover menos estéril, pois exigirão bermas mais largas para o talude médio), e o aloterito amarelo lateral (A1/D1/D2 - talvez não tenha esta situação no campo) com 30°, e o SIC saturado com 23°.

Para a cava final as análises das seções E e H mostram fatores de segurança satisfatórios, próximos de 1,3, mas não elevados, para a cava planejada na porção sul da mina, onde o fundo da mesma ficará pouco acima da cota 800m, e o nível de água permanecerá profundo, na base da escavação.

Para a região norte as análises foram mais simulações, em função dos dados fornecidos, de N.A. elevado, e escavação profunda. Mesmo considerando taludes secos, é muito provável que a seção de escavação tenha que ser suavizada, no mínimo para uma inclinação média de 1V:2H – talude médio próximo a 26,5°. Com a presença de água é possível que a suavização tenha que ser até maior.

Para os sedimentos da paleolagoa as análises mostram bermas mais largas que as praticadas, entre 25 e 27 m, mesmo para alturas próximas a 50 m.

Ressalta-se que nem sempre a escavação com taludes mais íngremes no estéril é interessante para a lavra. As larguras de bermas são resultantes da inclinação do talude do banco individual, respeitando um talude médio. Se este talude médio for relativamente suave, as bermas devem ser alargadas. Neste caso, reduzir a inclinação do banco individual reduz a remoção de estéril. Caso típico na Lagoa Seca é a situação dos sedimentos da paleolagoa, que exigem taludes médios baixos, ou seja, bermas largas.

8. Referências Bibliográficas para Elaboração do Estudo

- 1 - Desenho BVP - Mapa geológico-geotécnico - Mina Lagoa Seca, de 2013;
- 2 - Desenho BVP - Mapa de lito-resistência - Mina Lagoa Seca, de 2013;
- 3 - Desenho VALE FERTILIZANTES - Mapa geotécnico - Mina Lagoa Seca, de maio de 2016;
- 4 - Desenho VALE FERTILIZANTES - Mapa compacidade - Mina Lagoa Seca, fornecido em novembro de 2016;
- 5 - Desenho VALE FERTILIZANTES – Base topográfica de novembro de 2016 - Mina Lagoa Seca, fornecido em dezembro de 2016;
- 6 - Desenhos VALE FERTILIZANTES - Cavas do Planejamento da Lagoa Seca para 2016 / 2017 / 2018 / 2019 / 2020 / Final, fornecidas em maio de 2016;
- 7- Imagem de Satélite com a locação dos INA´s na região da Lagoa Seca, incluindo planilha de monitoramento, fornecido em novembro de 2016;
- 8 - Seções **A a K** - Mina Lagoa Seca - Seções elaboradas pela VALE FERTILIZANTES, fornecidas em outubro de 2016;
- 9 - Seção **L** - Mina Lagoa Seca - Seção elaborada pela VALE FERTILIZANTES, fornecida em dezembro de 2016;
- 10 - Locação dos poços - Tabela com a locação dos poços escavados nos taludes da Mina Lagoa Seca, fornecida pela VALE FERTILIZANTES, em maio de 2016;
- 11- ABGE, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. **Geologia de engenharia**. São Paulo: Editores Antônio Manoel dos Santos Oliveira, Sérgio Nertan Alves Brito, 1998.
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: Estabilidade de taludes. Comitê Brasileiro de Construção Civil. Origem: Projeto 02:04.07-001/90. Rio de Janeiro, 1991
- 12- **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Fundamentos. 6º edição, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. Volume 2, 1988b. CARDOSO, Dr Francisco Ferreira. **Sistemas de Contenção**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- 13-FARIAS, PhD Márcio Muniz de Farias; ASSIS, PhD André. **Uma Comparação entre métodos probabilísticos aplicados à estabilidade de taludes**. In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 1998, volume I. 1998.
- 14- GUIDICIN I, Guido, NIEBLE, Carlos Manuel. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Editora Edgar Blücher, 1983.
- 15-MACHADO, Sandro Lemos, MACHADO, Miriam de Fátima. **Mecânica dos solos II: conceitos introdutórios**. Salvador, 1997
- 16-PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 2a ed. São Paulo. Oficina de Textos, 2002.