

ESTUDO DE ESTABILIDADE DE TALUDE A PARTIR DA IDENTIFICAÇÃO DE PLANO DE SLICKENSIDE PRINCIPAL (PSP) E ESTRUTURAS GEOLÓGICAS COMPLEXAS (EGC): ANÁLISES DE ESTABILIDADE COM USO DO SOFTWARE ROCPLANE PARA CONTENÇÃO DOS TALUDES DA CASA DE FORÇA DA BARRAGEM DE ATÁLHO, BREJO SANTO CE, BRASIL

STUDY OF STABILITY FROM THE IDENTIFICATION OF MAIN SLICKENSIDE PLANE (MSP) AND GEOLOGIC COMPLEX STRUCTURE (GCS): STABILITY ANALYSIS WITH ROCPLANE SOFTWARE FOR SLOPES PROTECTION OF THE POWER HOUSE IN ATALHO'S DAM, BREJO SANTO CE, BRAZIL

Mello, Kray, Geól. M. Sc, Roma-Estudos, Projetos e Supervisão Ltda (Consultor), Porto Alegre RS, Brasil, Kray@romaprojetos.com.br

RESUMO

O talude da Casa de Força da barragem de Atalho foi escavado em xistos com injeções graníticas, fraturado e dobrado, típico caso de estruturas geológicas complexas (EGC). A rocha que predomina no local é o xisto verde e o xisto cinza (grafita xisto), frequentemente fraturado por duas famílias de fratura F1 e F2 e uma falha de alívio. As fraturas e falha são preenchidas por material alterado e exercem grande influência na variação do ângulo de atrito interno do maciço juntamente com os planos de xistosidade. A falha ou descontinuidade presente também foi identificada como formadora de um típico Plano de *Slickenside* Principal (PSP) e mantém o controle dos blocos com roturas secundárias por cunha, quando comparados ao principal sistema de falhas que cortam o talude. Observou-se que a falha por cisalhamento poderia desencadear uma zona de instabilidade na forma de rotura planar após o enchimento do reservatório da barragem a jusante (Porcos). Entre os problemas associados a estas rochas estão ainda, os diferentes graus de alteração entre o xisto e o granito que provocam mudanças na coesão e ângulo de atrito do maciço rochoso em diferentes locais do talude. Esses sistemas metamórficos encaixam-se também na interpretação das estruturas geológicas complexas (EGC). Por fim, a sugestão de estabilização sob a ótica dos planos de *slickensides* que controlam a estabilidade do talude deve ser observada, visando melhorar as condições de estabilidade no talude gerado pela escavação do maciço rochoso na casa de força. Os estudos desenvolvidos estão fundamentados no mapeamento geoestrutural, classificação geomecânica, ensaios de laboratório e análise dos dados com utilização do software Rocplane da Rocscience. As medidas de contenção levaram em conta ainda os materiais e equipamentos disponíveis em obra, com execução de ancoragens associadas a um faceamento em tela metálica e concreto projetado.

ABSTRACT

The slopes of Atalho's Dam powerhouse was excavated in schist with granitic injections, fractured and folded, typical case of a complex geological structure (CGE). The predominant rock at the site is green schist and gray schist (graphite schist), often fractured by two fracture families F1 and F2 with a major fault. The fractures and fault are filled by weathering rocks with great influence on the variation in the behavior of de massif along with the planes of schistosity. The present fault was also identified as forming a typical Main Slickenside Plane (MSP) and maintains control of the blocks with secondary wedges breaks when compared to the main fault system that cuts the slope. It was also observed that shear failure is associated to a zone of instability. Problems associated with these rocks are also the different degrees of weathering between schists and granite that cause changes in the cohesion and angle of friction of the rock mass in different places of the slope. These metamorphic systems also fit into the interpretation of complex geological structures (CGE). Finally, the suggestion of stabilization of the slickenside planes that control the slope stability should be observed, to improve the stability conditions in the slope generated by the excavation of the rock mass in the powerhouse. The studies developed were based on geostructural mapping, geomechanical classification, laboratory tests and use of Rocscience's Rocplane Software. The support project also took into account the materials and equipment available on site, with the execution of rock bolting associated with a facing in metallic screen and shotcrete.

1 - INTRODUÇÃO

A Barragem de Atalho está localizada no riacho Jardim, principal afluente do riacho dos Porcos, distante cerca de 24 quilômetros da cidade de Brejo Santo, na região sul do Estado do Ceará. A barragem de Atalho foi concebida e construída pelo extinto Departamento Nacional de Saneamento (DNOS) a partir de 1984. Mais tarde, na fase de Estudos de Viabilidade, passou a fazer parte do Eixo Norte do Projeto de

2- TALUDE DA CASA DE FORÇA

O talude da Casa de Força foi escavado em xisto com injeções graníticas, fraturado e dobrado, típico caso de estruturas geológicas complexas (EGC), Mello et al. (2016) e Mello (2017), apresentando descontinuidades associadas ao cisalhamento regional, controlando parte do processo de instabilidade. A instabilidade deste maciço metamórfico punha em risco a futura obra civil da casa de força, projetada adjacente a esta escavação na saída do Túnel de adução, que captará as águas do reservatório de Atalho e alimentará o reservatório de Porcos. A rocha que predomina no local é o xisto de cor esverdeada e o xisto cinza (grafita xisto), frequentemente fraturado e com duas famílias de fratura a ele associado, F1 e F2 resultantes do processo geotectônico que gerou o cisalhamento regional refletido nessas rochas. Estas fraturas, juntamente com planos de falhas, controlam o ângulo de atrito interno do maciço juntamente, com planos de xistosidade, resultante de planos de micas e quartzo (textura lepidoblástica) com microdobras na rocha. Esta falha (também identificada como plano de PSP) mantém o controle dos blocos com roturas secundárias por cunha ou planares, quando comparados ao principal sistema de falha que corta o talude. A interpretação geoestrutural do processo de instabilidade do talude da casa de força leva à interpretação que este plano PSP poderá desencadear uma zona de instabilidade na forma de rotura planar após o enchimento do reservatório de Porcos ou após chuvas fortes, Figura 1.

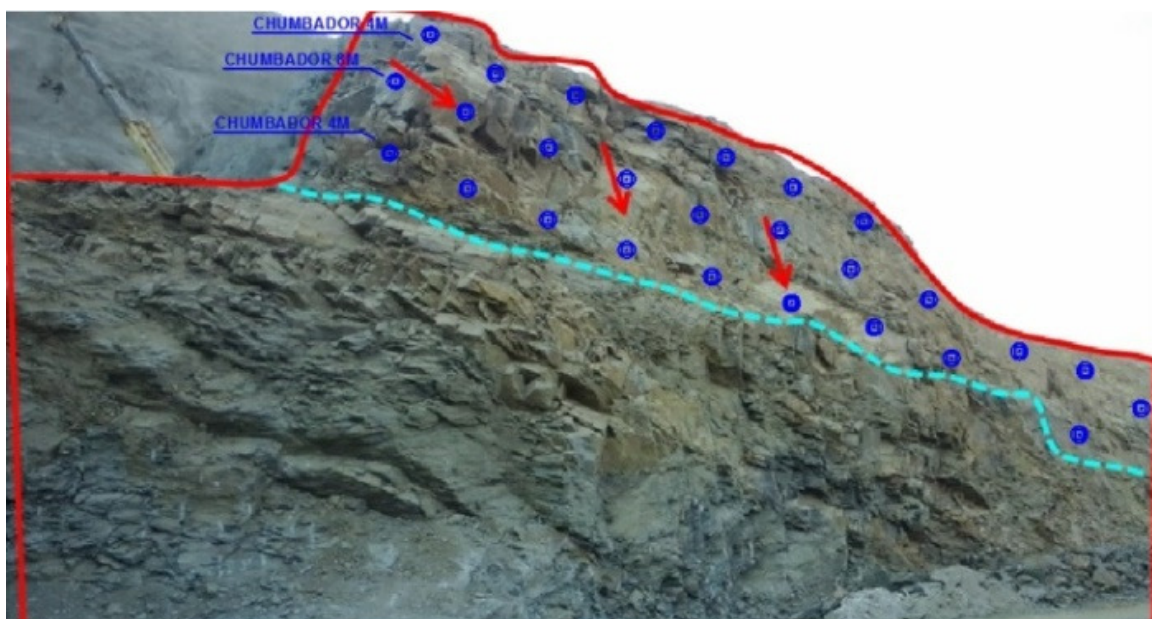


Figura 1 - Plano de Descontinuidade preponderante sobre o problema de instabilidade do Maciço Rochoso do Talude da Casa de Força (pontilhado ciano, plano PSP). Em azul escuro distribuição preliminar de três linhas de ancoragens

Este trabalho também alerta para um problema geotécnico e geomecânico pouco mencionado e explicado que são diferentes graus de alteração entre o xisto e o granito, responsáveis por mudanças na coesão e ângulo de atrito do maciço rochoso em diferentes locais do talude. Em uma análise geológico-geotécnica voltada a problemas de estabilidade, considera-se fundamental a identificação dessas variações, muitas vezes sutis e quase sempre presentes em sistemas metamórficos. Com base no conhecimento técnico adquirido em diversos estudos envolvendo classificações geomecânicas de diferentes taludes rochosos, salienta-se que estas zonas de alteração podem estar presentes também nas estruturas geológicas complexas (EGC). Os modelos de cálculos existentes ainda não contemplam estas variações, modelando apenas variáveis contínuas e estanques nas análises de estabilidade de taludes rochosos (planos retilíneos de instabilidade, coesão e ângulo de atrito interno de valores fixos). Variáveis que são identificadas apenas no mapeamento geológico por ocorrerem muitas vezes disseminadas ao longo do maciço rochoso acabam por não fazerem parte dos parâmetros envolvidos em grande parte dos estudos de estabilidade de maciços rochosos. Por fim, a sugestão de estabilização com os métodos propostos e recursos de programas computacionais no resultado final deste caso de estudo não diferiu, mas apresentou adequações ao projeto inicialmente proposto. Para facilitar ainda a execução do projeto proposto, foram considerados os materiais e equipamentos disponíveis em obra, com execução de ancoragens associadas a um faceamento em tela metálica e concreto projetado, resultando em proposta de economia à obra.

3 - ESTUDO DE ESTABILIDADE PELO MÉTODO DETERMINÍSTICO (FS) COM USO DO SOFTWARE ROCPLANE 2.0 (ROCSIENCE)

Os estudos para determinação dos fatores de segurança (FS) dos taludes rochosos adjacentes ao futuro prédio da Casa de Força da Barragem de Atalho, foram desenvolvidos em porções dos taludes com maior precisão possível, nos quais foram executados levantamentos topográficos para o correto dimensionamento das alturas e comprimentos dos taludes e posição exata do Plano de Descontinuidade, identificado no mapeamento geológico estrutural por uma visível descontinuidade na rocha e interpretado como plano PSP. O mapeamento apresenta ainda as classificações geomecânicas de detalhe pelos critérios do *RMR* e do *SMR*, incluindo parâmetros considerados relevantes da classificação de Barton (*Q Index*), Palmstrom (*RMI*) e Hoek (*GSI*).

A classificação geomecânica foi executada pelo método da *scanline* associada ao mapeamento geoestrutural, e tem-se mostrado muito eficiente na avaliação do comportamento de risco de taludes rochosos e elaboração de modelos criativos para estabilização a partir de cálculos matemáticos simples.

Nestes foram utilizados o tamanho do bloco, densidade da rocha, inclinação do talude e do plano de falha. Os parâmetros das classificações geomecânicas, de geologia de engenharia e geotecnia, são fundamentais para soluções de engenharia onde consideramos a aplicação de ancoragens que são amplamente aplicada para situações onde precisam-se estabilizar conjuntos de blocos largamente conectados que apresentam certo risco de queda e risco a estruturas civis como é o caso do talude da Casa de Força de Atalho.

Como medida de estabilização por ancoragens foram considerados o tipo de aço e seu respectivo f_{ck} (onde está incluído seu diâmetro), profundidade de ancoragem, bolbo de ancoragem e respectiva carga de trabalho.

Com a ampla utilização de softwares de modelamentos numéricos, cada vez mais se verifica a incorporação destes estudos em projetos de contenção de encostas e taludes escavados em rocha, não sendo normalizados ainda no Brasil, mas que apontam uma forte tendência futura de necessidade de sua aplicação como forma documental de apresentação e constatação de problemas geotécnicos em escavações em rocha.

Na elaboração de soluções com vistas às características geoestruturais e geomecânicas do maciço, alguns parâmetros de cálculo, muitas vezes parecem não ficar claros na apresentação do reconhecimento do problema apesar de fazerem parte do modelamento computacional dos estudos determinísticos como geometria, resistência e força. Desta forma, são apresentados abaixo a descrição dos elementos utilizados nos cálculos:

3.1 - Geometria

- altura do talude até a superfície que conduz a rotura (plano de falha, ou fraturamento);
- ângulo de inclinação do talude com o plano horizontal;
- ângulo do plano de falha com o plano vertical;
- presença de fraturas de tração no topo do talude que apresenta instabilidade e o ângulo das fraturas de tração com o plano horizontal;
- ângulo da face superior com a horizontal - *upper face*;

3.2 - Resistência ao cisalhamento ao longo do plano de falha

No caso da resistência ao cisalhamento (τ_f) optou-se pelo critério mais conservador para a situação estudada o de Mohr Coulomb

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad [1]$$

Onde:

- c a coesão e ϕ o ângulo de atrito interno;

3.3 - Forças

Entre as forças atuantes na instabilidade do maciço rochoso encontra-se a pressão de água nas fraturas da rocha. A avaliação dos Fatores de Segurança se deu em diferentes porções do talude definidas em estacas e seções (com diferentes geometrias), contendo levantamentos acima e abaixo do plano de descontinuidade que conduz a rotura. A presença ou não de água nas fraturas da rocha e plano de falha,

diferentes inclinações para fraturas de tração e variação dos ângulos de mergulho dos planos de falha foram considerados. Os valores de coesão inferidos para os planos de falha de 20kPa em condições secas é o que mantém estável o bloco com um fator de segurança considerado aceitável (FS maior ou igual a 1,5, por ser amplamente usado em geologia de engenharia). Observa-se o decréscimo imediato com a introdução da variável pressão de água nas fraturas, o que praticamente anula o fator de segurança do talude rochoso acima do plano de falha.

3.4 - Parâmetros de cálculo utilizados para o fator de segurança (FS)

Com base em diversas análises de cisalhamento em diferentes tipos de xistos presentes na literatura e por ser a rocha dominante no talude estudado, o ângulo de atrito básico das discontinuidades do maciço foi estimado como sendo a média de valores obtidos por Silva et al. (2014), ou seja, igual a 26,8°. O mapeamento geoestrutural aponta a existência de duas famílias principais de fraturas F1 e F2, responsáveis pela potencial ocorrência de deslizamento e rotura planar, deslizamento e rotura em cunha e tombamento.

O mapeamento geológico estrutural foi executado com bússola Brunton e retroanálises foram efetuadas através de um método analítico com o programa computacional *RocPlane 2*. Observa-se que para a obtenção de fator de segurança próximo do equilíbrio limite, FS 1,08, as coesões estimadas aleatoriamente com uso do modelamento foram de 20 kPa, com base na experiência de campo dos autores, por não ter sido possível a amostragem para ensaio durante a obra.

As ancoragens foram dimensionadas de acordo com o critério de rotura de Tresca, conquanto não seja empregado com frequência, mostra-se pragmático e racional, já que permite a consideração de um estado complexo de tensões, isto é, uma abordagem mais realista, conforme Conte et al. (2016). As ancoragens possuem diâmetro de 25 mm e f_{yk} de 50 kN/cm², com espaçamento horizontal e vertical de 1,50 m. Observa-se também que a rotura mais crítica é a que ocorre no topo da crista até a base da falha ou discontinuidade e definida como do tipo planar, porquanto a estabilidade do talude é fortemente influenciada pelo surgimento de pressões hidrostáticas em trincas de tração posicionadas no topo do talude com inclinação média de 77°, as quais estão associadas a famílias de fratura F2, conforme se verifica na Figura 2.

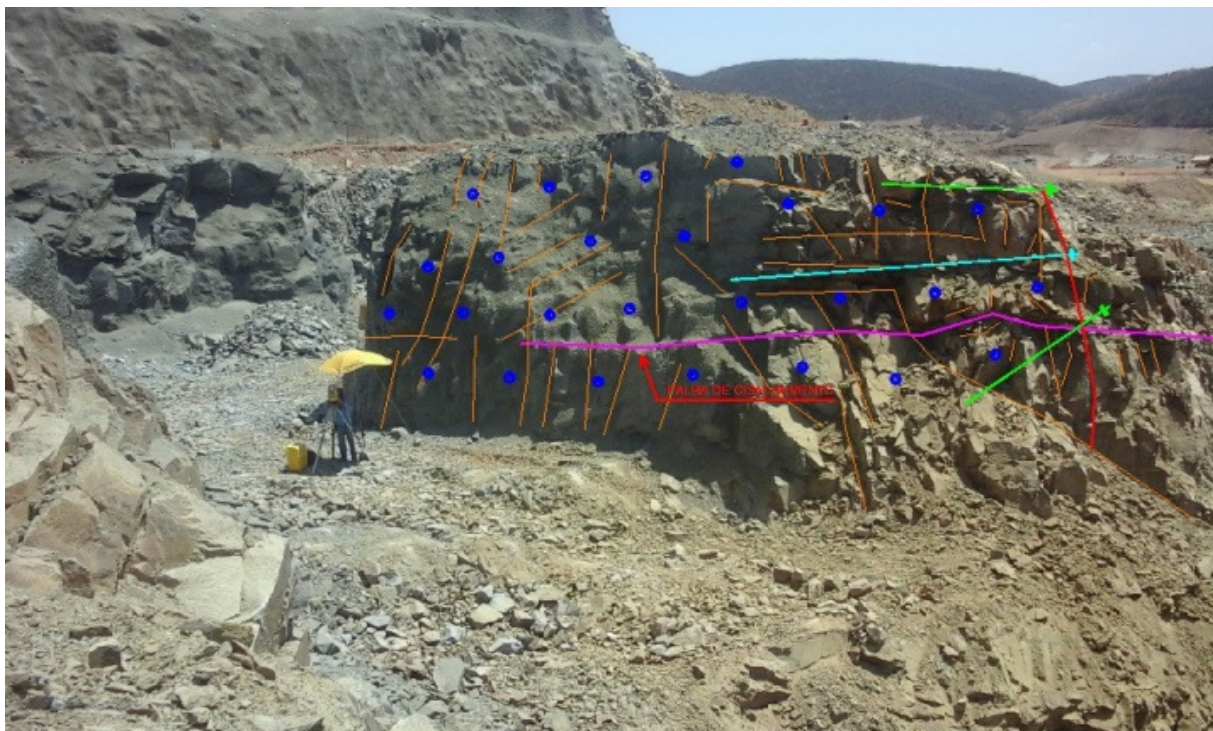


Figura 2 - Talude Lateral aos condutos das válvulas dispersoras. Plano de Falha responsável pela instabilidade do Maciço Rochoso do Talude da Casa de Força e no local (pontilhado magenta). Em azul escuro distribuição das ancoragens. Verde e magenta também são ancoragens, em marrom famílias F1 e F2 (coincidentes com as trincas de tração). Fonte: Roma Projetos & Magna Engenharia (2016)

4 - GEOMECÂNICA DO TALUDE DA CASA DE FORÇA DE ATALHO PARA FINS DE ESTABILIDADE

As detonações para o corte do talude e para a entrada dos condutos das válvulas dispersoras causaram

bastante abalo no maciço remanescente, gerando muitos blocos soltos que após o desmonte a fogo foram removidos por bate choco, Figura 3. A Figura 4 mostra uma das seções esquemática de estudo geológico e de engenharia de rochas para o estudo de estabilidade e projeto de tratamento do talude.



Figura 3 - Blocos soltos removidos após a detonação para a abertura da entrada dos condutos para as válvulas dispensoras. Lateral a Casa de Força

SEÇÃO COM TRATAMENTO DO TALUDE DA CASA DE FORÇA - ESTACA 10+0.00

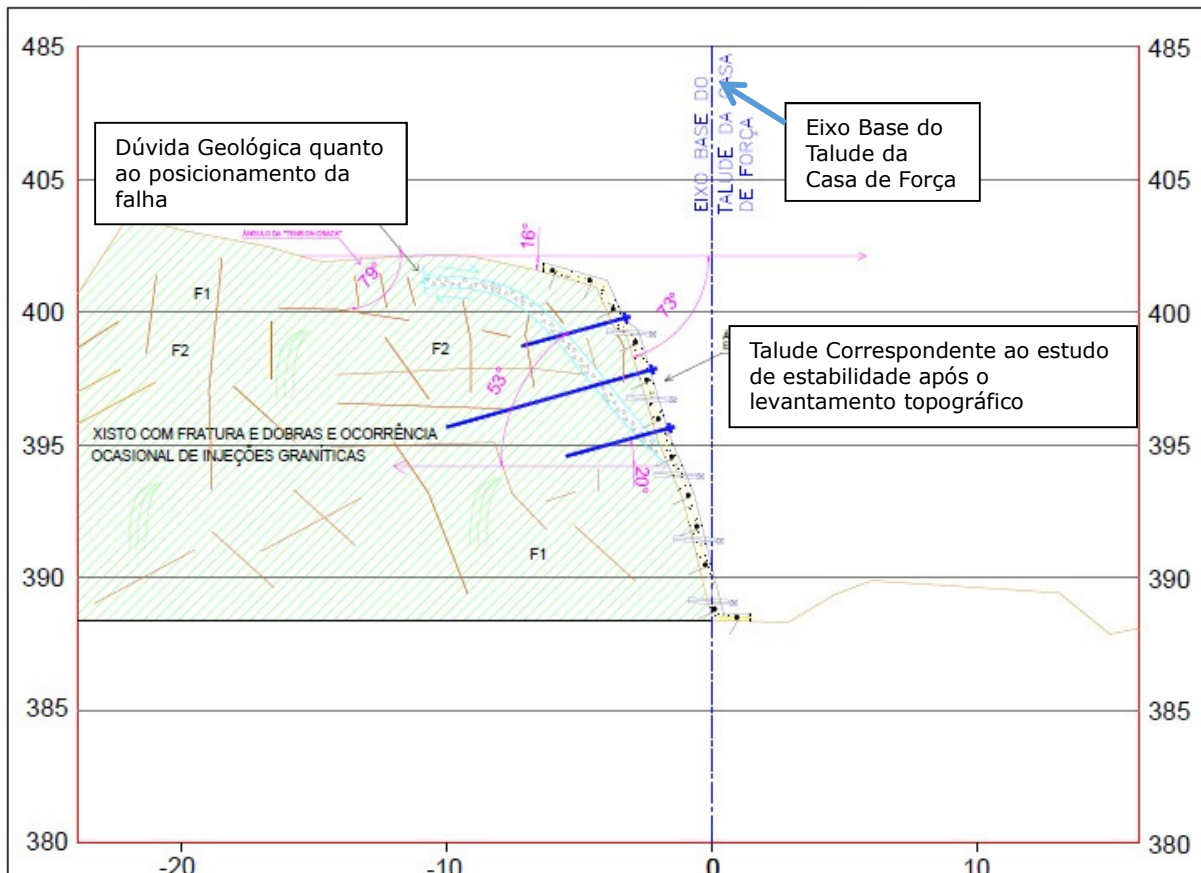


Figura 4 - Seção Tipo de Tratamento de Talude correspondente à estaca 10+00, com verificação dos elementos geométricos em conjunto com equipe topográfica, incluindo parâmetros geológicos, estruturais e geomecânicos para o estudo de estabilidade. Fonte: Roma Projetos & Magna Engenharia Ltda (2016)

Na avaliação do talude da Casa de Força são considerados os métodos de verificação de Conte et al. (2016), por considerá-los completos. As análises dos tipos de rotura possíveis para o talude seguem os

critérios de Wyllie e Mah (2004) e Goodman (1989) onde um escorregamento planar ocorre somente quando o mergulho da descontinuidade é aflorante na face do talude e superior ao ângulo de atrito do plano de movimento. A formação de uma cunha, por sua vez, só é possível quando, na projeção estereográfica, o polo da linha formada pela interseção de dois planos possuir um mergulho menor que o da face do talude e maior que o ângulo de atrito da descontinuidade. Finalmente, o mecanismo de tombamento pode ser verificado através da seguinte equação:

$$(90^\circ - \beta) + \phi < \alpha$$

Onde β é o ângulo de inclinação do talude;

ϕ o ângulo de atrito do plano de falha; e

α a inclinação do plano de falha.

Critério a partir do qual identifica-se também em menor proporção a presença de pequenos blocos isolados formando rotura por *toppling* no maciço, como pode ser observado na Figura 5A. Este tipo de mecanismo não apresenta elevado risco como o caso de uma rotura planar definida claramente pela descontinuidade geológica observada acompanhando a seta vermelha mais fina. A figura 5B mostra o talude após a execução do projeto de tratamento.



Figura 5A – Esporádicas roturas por *toppling* (seta vermelha grossa) acima da descontinuidade principal - Talude da Casa de Força



Figura 5B – Talude da Casa de Força após o tratamento com ancoragens e concreto projetado

4.1 - Retroanálises

Para a simulação de uma rotura planar com a movimentação de um bloco rochoso, empregou-se o software *RocPlane* (versão 2), tendo em vista que a metodologia de cálculo deste programa é bastante similar ao método analítico, descrito em detalhes por Norrish e Wyllie (1996). A determinação do fator de segurança do talude foi realizada através da seguinte equação:

$$FS = \frac{cA + (W(\cos \alpha - sc \times \sin \alpha) - U - V \sin \alpha + T \cos \Theta) \tan \phi}{W \sin \alpha}$$

[2]

$$W(\sin \alpha - sc \times \sin \alpha) + V \sin \alpha - T \sin \emptyset$$

Onde c corresponde à coesão no plano da fratura (kPa), A é a área do plano de deslizamento (m^2), W o peso do bloco (kN/m), α o ângulo de mergulho da fratura ($^\circ$), U o empuxo hidrostático na base do bloco (kN/m), V o empuxo hidrostático na trinca de tração (kN/m) e \emptyset o ângulo de atrito no plano de falha. Adotou-se como peso específico para o xisto 27 kN/m^3 . Os empuxos hidrostáticos foram supostos com distribuição triangular de tensões e a posição horizontal crítica da trinca de tração foi estabelecida a partir da média da posição das trincas atrás da crista do talude conforme a Figura 4. Este valor também pode ser calculado pela equação proposta por Hoek e Bray (1981).

As Figuras 6, 7 e 8 representam o talude seco, com 100% de saturação de água e com uso de ancoragens com carga de trabalho de 100kN e espaçamento de 1,0 m. O FS obtido para estas situações são 1,08 para talude seco e 0,66 com 100% de saturação nas trincas de tensão e coesão de 20 kPa. Esta coesão é muito baixa e estimada, podendo ser maior, todavia acredita-se dada as características geológicas, geotécnicas e geomecânicas que a estabilidade do maciço no período do estudo era parcial e por estarem as rochas e as fraturas secas. Observa-se também que o FS aumenta proporcionalmente com a coesão do maciço. Na Figura 8 é apresentado o modelamento das ancoragens com 100 kN, suficiente para obter um fator de segurança satisfatório.

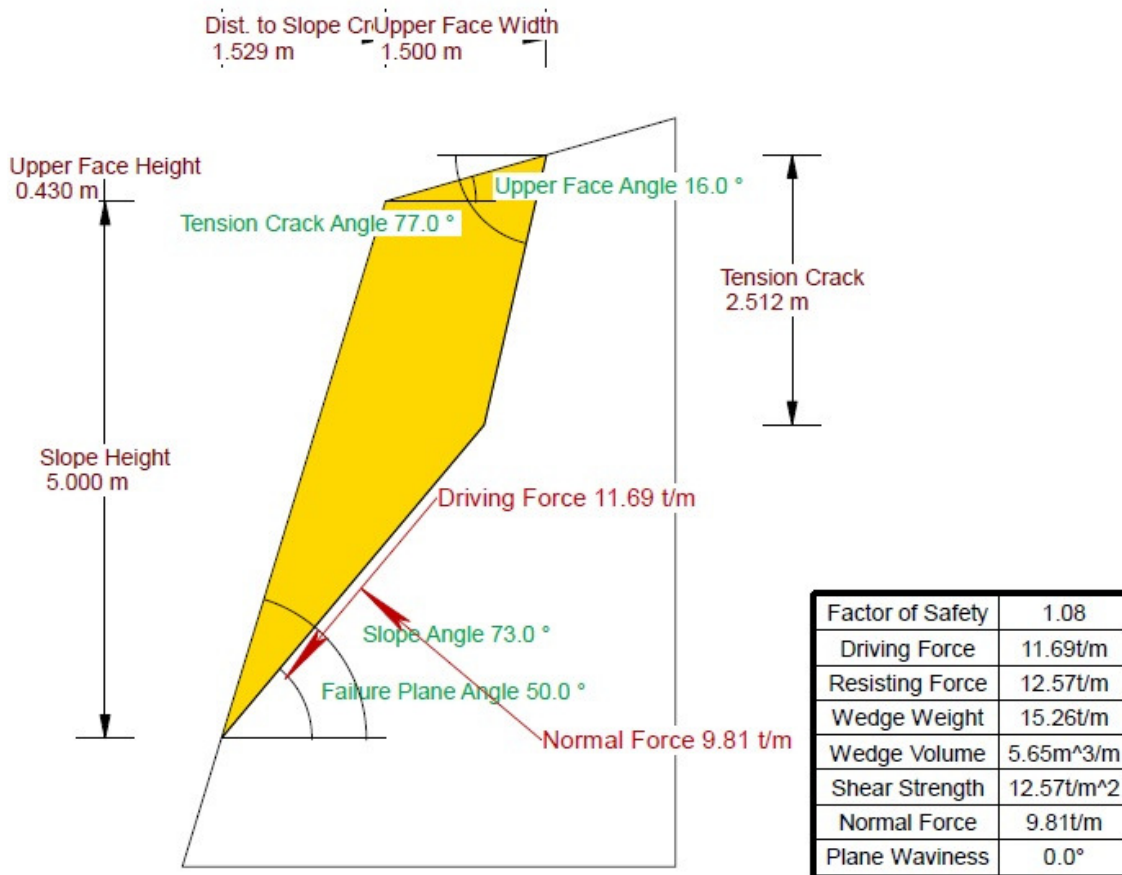


Figura 6 - Esquema geométrico com forças atuantes em um bloco rochoso seco na estaca 10 considerando da crista do talude até a base da descontinuidade, coesão no plano de falha atribuída de 20 kPa

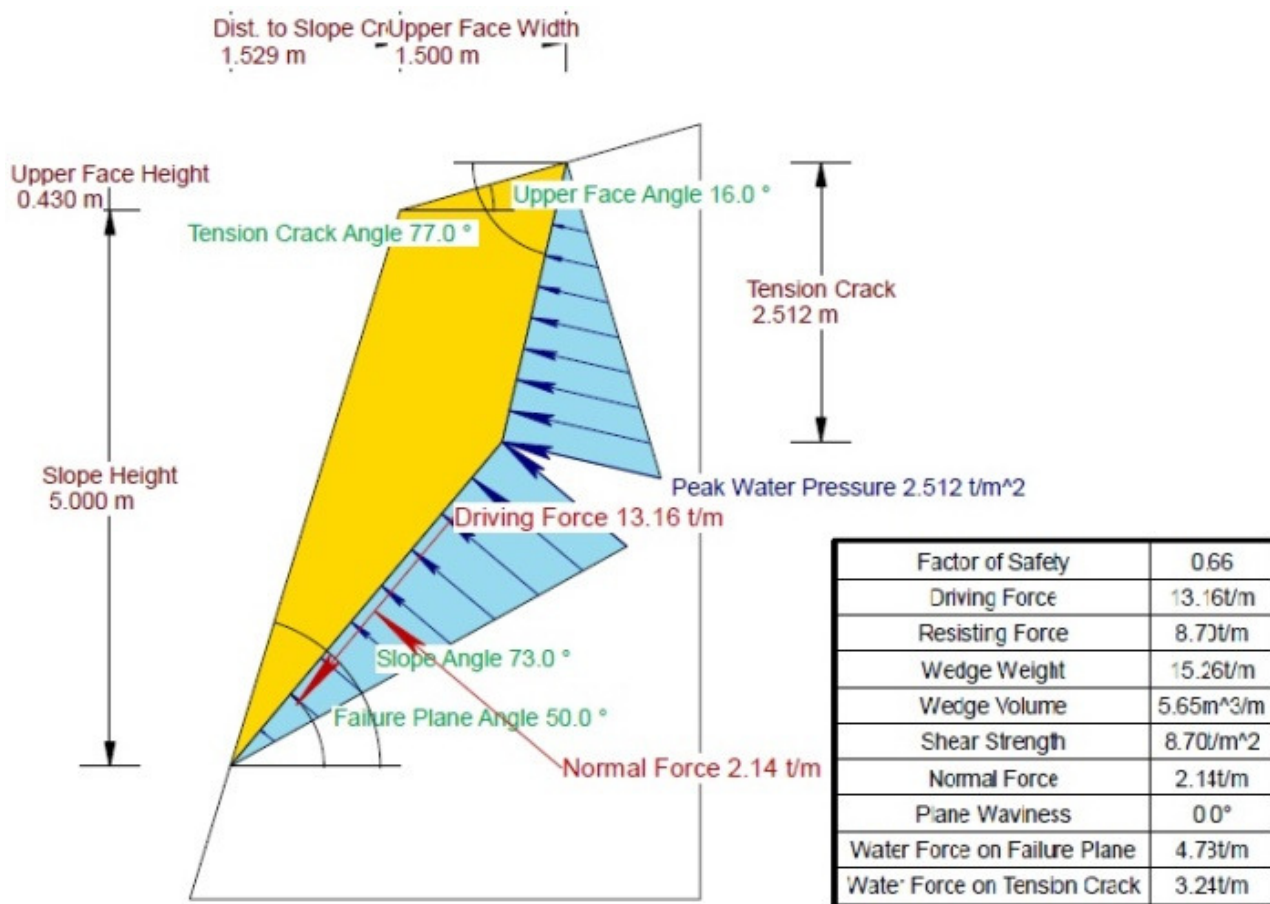


Figura 7 - Esquema geométrico com forças atuantes e saturação das trincas de tração de 100% na estaca 10. Análise considerando da crista do talude até a base da descontinuidade, coesão no plano de falha Igual a 20 kPa

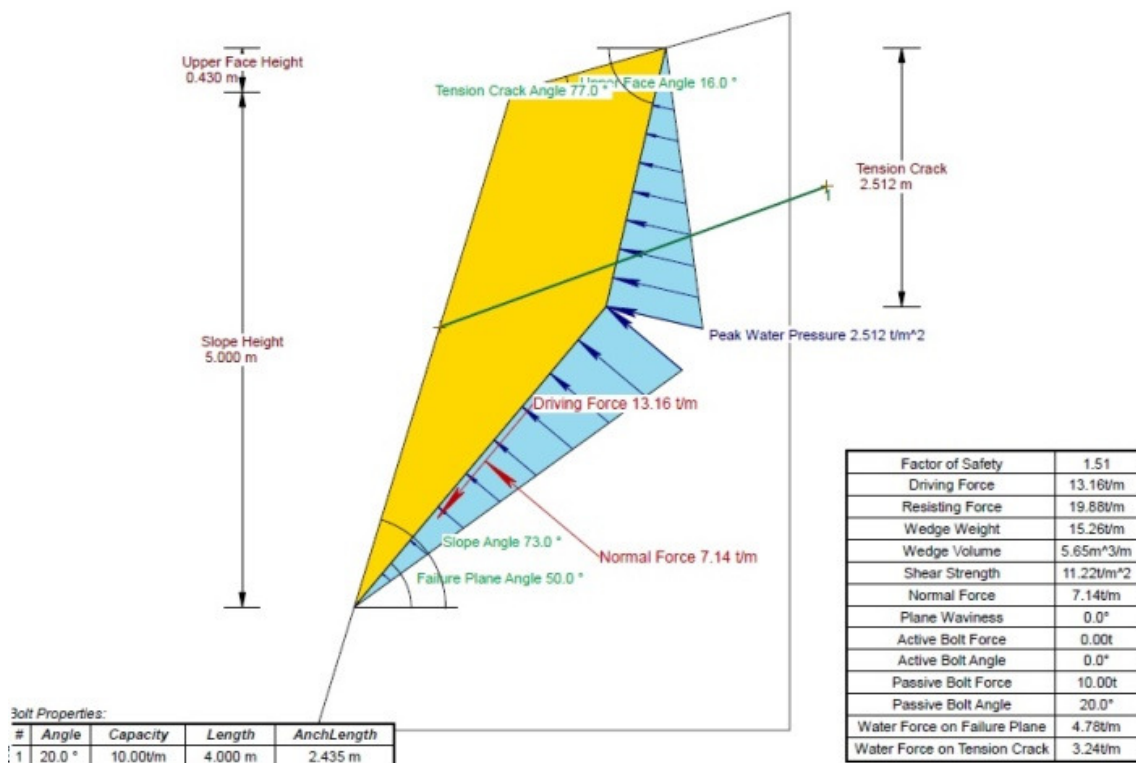


Figura 8 - Esquema geométrico com aplicação de ancoragens com carga de trabalho de 10 ton/m e inclinação de 20° elevando o fator de segurança do talude para 1,51

4.2 - Análise de sensibilidade

Análises de sensibilidade foram executadas no modo *sensibility analysis* do software *RocPlane* para verificação da coesão mínima do maciço no momento da rotura (FS=1) para a saturação máxima das trincas de 100%, que será a situação similar a qual o talude será submetido no momento do enchimento do reservatório de Porcos, a coesão máxima no plano de falha será de 32 kPa.

4.3 - Análise das ancoragens e da estabilidade do maciço

As ancoragens foram dimensionadas seguindo a metodologia de Conte et al. (2016) para um estado complexo de tensões, prevendo a ocorrência de solicitações de flexo-tração e cisalhamento quando houver deslocamento de um bloco rochoso semelhante àquele das retroanálises. Esta metodologia segue o critério de rotura de Tresca, apresentado na equação 3:

$$\frac{(T_a)^2}{(T_{a \text{ máx}})^2} + \frac{(T_c)^2}{(T_{c \text{ máx}})^2} \leq 1 \quad [3]$$

Onde a T_a é a resultante das tensões normais à seção transversal da barra de aço (kN), T_c a resultante das tensões tangenciais à seção transversal da barra (kN) e $T_{a \text{ máx}}$, e $T_{c \text{ máx}}$, as resistências da seção de aço da ancoragem à tração simples e ao cisalhamento simples (kN).

$$T_{a \text{ máx}} = \frac{f_{yk} \cdot A_s}{1,10} \quad [4]$$

$$T_{c \text{ máx}} = \frac{0,58 \cdot f_{yk} \cdot A_s}{1,10} \quad [5]$$

Onde f_{yk} é a tensão característica de escoamento do aço (kN/cm²) e A_s a área da seção transversal da barra de aço (cm²). A força resultante T (kN) equivale graficamente a uma elipse, e pode ser expressa pela equação 6 com suas componentes reescritas em função do seu ângulo com o eixo do chumbador, ω (°), através das equações 7 e 8. Equações 6, 7 e 8

$$T = \sqrt{(T_a)^2 + (T_c)^2} \quad [6]$$

$$T_a = T_{a \text{ máx}} \cos \left[\alpha \tan \frac{(T_{a \text{ máx}})}{(T_{c \text{ máx}})} \tan \omega \right] \quad [7]$$

$$T_c = T_{c \text{ máx}} \sin \left[\alpha \tan \frac{(T_{a \text{ máx}})}{(T_{c \text{ máx}})} \tan \omega \right] \quad [8]$$

Considerando que a condição crítica das ancoragens se dá quando a sua força resistente T for mobilizada paralelamente ao plano de escorregamento, é válida a equação 9:

$$\omega_{\text{crit}} = 90^\circ - \delta_n \quad [9]$$

Onde ω_{crit} corresponde ao ângulo crítico da força resistente T em relação ao eixo da ancoragem (°), e δ_n ao ângulo de inclinação da ancoragem com relação à normal ao plano de deslizamento (°). Após a introdução das ancoragens o fator de segurança do maciço deve ser maior ou igual a 1,5, porém observa-se que o FS atingido é superior a NBR 5629/2016. É conveniente, então, calcular a carga requerida (T_{req} , kN/m) para estes elementos de modo a satisfazer essa condição, através da equação 10:

$$T_{\text{req}} = W \cdot \sin \alpha + V \cdot \cos \alpha - \frac{cA + [W(\cos \alpha) - U - V \sin \alpha]}{FS} \tan \varnothing \quad [10]$$

Definindo-se o número de chumbadores (n_v) e o seu espaçamento em uma linha vertical S_v (m), o espaçamento horizontal S_h (m), e estabelecendo-se o fator de segurança desejado, é possível calcular a carga requerida para cada ancoragem isoladamente, T_i (kN), através da equação 11:

$$T_i = \frac{T_{\text{req}} \cdot S_h \cdot FS}{n_v} \quad [11]$$

Em seguida deve ser feita a comparação dos valores fornecidos pelas equações (11) e (6), sendo que esta última deve ser calculada com os seus parâmetros na condição crítica (ω_{crit}), quando então a carga resultante passa a ser definida como T_{crit} . Caso a carga crítica da ancoragem adotada seja menor que a requerida individualmente, deve ser selecionada outra mais robusta.

4.4 - Comprimento da ancoragem

Existem diversas abordagens para o cálculo do comprimento de ancoragem, optando-se pela forma de Conte et al. (2016) que consta com uma larga experiência na geologia de engenharia e engenharia de minas. Neste trabalho optou-se pelo procedimento de cálculo baseado na resistência ao arrancamento das ancoragens, que pode ser expresso através da equação de Bustamante et Doix (1985), onde:

$$L_a = \frac{T_{a \text{ crit}} \cdot FS}{q_s \cdot \pi \cdot D_f} \quad [11]$$

Sendo L_a o comprimento de ancoragem (m), D_f o diâmetro de perfuração (m), q_s o atrito unitário no contato bulbo-maciço (kPa), $T_{a \text{ crit}}$ a componente axial crítica da ancoragem (kN), de acordo com a equação 8, e FS o coeficiente de segurança desejado. O fator q_s foi definido com base no trabalho de Bustamante et Doix (1985), que apresentam uma série de resultados para rochas alteradas e fragmentadas. O patamar inferior de q_s obtido pelos autores é da ordem de 200 e 220 kPa. Em seguida, este valor deve ser comparado com a resistência à compressão característica da calda de cimento (f_{ck}) minorada 30 vezes. O menor dos dois valores é então utilizado na equação acima.

4.5 - Dimensionamento das ancoragens

Tendo em vista que o talude apresenta fator de segurança adequado quanto à rotura em cunha, e que o mecanismo de tombamento possui atuação restrita a blocos de pequenas dimensões e apenas localizado em pontos esporádicos do topo do talude, o dimensionamento das ancoragens foi efetuado prevendo a ocorrência de rotura planar. As análises foram conduzidas considerando a situação mais desfavorável para a estabilidade do maciço, isto é, formação de um bloco cuja trinca de tração estivesse completamente preenchida por água e posicionada no local mapeado *in loco*. Foram selecionadas ancoragens com diâmetro 25 mm e f_{yk} igual a 500 MPa (conforme NBR 7480), resultando, a partir das equações 7 e 8, cargas máximas de resistência à tração e ao cisalhamento iguais a 223,12 kN e 129,44 kN, respectivamente. A partir das equações 6, 7 e 8 foram calculadas as forças atuantes na ancoragem de acordo com o ângulo ω . O ângulo de instalação das ancoragens em relação à horizontal foi definido, conforme modelamento computacional, como sendo 20° para obtenção do maior FS. O seu ângulo em relação à normal ao plano de deslizamento (δ_n) igual a 20°. Da equação 9, ω_{crit} é igual a 70°. Na sequência, foi calculada a carga requerida para estabilização do bloco, resultando em um valor igual a 80,36 kN/m. Adotando três ancoragens em uma linha vertical de 5 m (altura do talude) com espaçamento igual a 1,5 m, espaçamento horizontal igual a 1,5 m e um fator de segurança igual a 1,51 (para distribuição espacial das ancoragens). A equação 12 indica que a carga requerida para cada ancoragem (T_i) deve ser maior ou igual a 60 kN. A carga crítica total do chumbador pode ser determinada através das equações 6, 7 e 8, resultando em 222,54 kN, valor maior que 3 vezes o requerido.

Finalmente para o cálculo do comprimento da ancoragem foi adotado fator de segurança igual a 1,87 para o mecanismo de arrancamento, pouco acima da norma NBR 5629/2016. Quanto ao diâmetro de perfuração estimou-se um valor de 75 mm. Se for adotado um f_{ck} de 25 MPa para calda de cimento, seu q_s vale cerca de 833 kPa; o valor a ser utilizado, portanto, é aquele extraído de Bustamante et Doix (1985), que seria o fator condicionante do arrancamento. A componente axial crítica, por sua vez, vale 223,12 kN. Assim, o comprimento da ancoragem resulta em 8,00 m. Considerando que este valor deve ser tomado a partir do plano de fratura do bloco rochoso.

5- CONCLUSÕES

Os procedimentos desse trabalho são consoantes aos de Conti et al. (2016), e de modo geral, trazem métodos consagrados à luz da Mecânica de Rochas. Ainda que simples, são fundamentais para uma compreensão ampla do comportamento do talude e para a adoção de uma medida adequada de proteção e estabilização. O critério de rotura de Tresca, em que pese, não seja empregado com frequência no dimensionamento das ancoragens, permite a consideração de um estado complexo de tensões, isto é, uma abordagem realista. Diversamente, outros métodos mais simplórios consideram apenas a atuação de forças de tração, de modo que a estrutura acaba sendo superdimensionada para contornar este problema. Neste trabalho ainda foi possível identificar dois aspectos muito importante, a definição de uma descontinuidade principal e a existência de estruturas geológicas complexas (EGC), que demonstraram serem menos problemáticas sob o ponto de vista da instabilidade do que o bloco apoiado sobre a descontinuidade, um clássico plano de *slickenside* principal (PSP). Outrossim, conclui-se que a rotura do tipo planar é a que apresenta maior criticidade, sendo a estabilidade do talude fortemente influenciada pelo nível de saturação das trincas de tração.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Ministério da Integração Nacional da República Federativa do Brasil pelo suporte oferecido, à Supervisora Magna Engenharia Ltda e à Consultora Roma - Estudos, Projetos e Supervisão Ltda pela mútua cooperação e apoio com o fornecimento das informações necessárias à execução deste artigo.

REFERÊNCIAS

- Barton et al (1974) in Hoek E. (2000) - *Rock Engineering*. Free on-line book available at the Hoek's Corner.
- Bieniawski, Z.T (1989) - *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley, p.251.
- Bustamante, M. e Doix, B. (1985) - *Une Méthode pour le Calcul des Tirants et des Micropieux Injectés*. Section des Fondations, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris. p. 75-92
- Consórcio Hydroconsult - MWH Brasil (2012) - Relatório 1220-REL-1101-20-04-001. Revisão 11. *Relatório Final do Projeto Executivo das Barragens*, vol. 1, Setembro/2012. Ministério da Integração Nacional.
- Conte, M.A.G., Dias. R.A., Zingano A.C. e Carvalho F.H (2016) - *Avaliação da Estabilidade e Dimensionamento de Chumbadores em um Talude Rochoso da Cidade do Rio de Janeiro*. Congresso Brasileiro de Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG 2016) e Simpósio Brasileiro de Mecânica de Rochas e Engenharia Geotécnica (SBMR 2016), Mecânica das Rochas e Engenharia de Rochas para Inovação e Desenvolvimento. Conferência Especializada ISRM. Belo Horizonte, Minas Gerais, outubro 2016.
- Goodman, R.E. (1989) - *Introduction to Rock Mechanics*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 566 p.
- Hoek, E. e Bray, J. (1981) - *Rock Slope Engineering*, 3rd ed., Inst. Mining and Metallurgy, London.
- Hudson, J.A. e Harrison, J.P. (2000) - *Engineering Rock Mechanics: an Introduction to the Principles*, 1st ed., Pergamon, London, 458 p.
- Mello. K. S., Fontenelle. A. S. Brum F.S., Moura Filho, O. e Larivoir, C. N. (2016) - *Escavações do Canal de Restituição e Túnel Adutor da Barragem de Jati no Estado do Ceará: Introdução do Critério de Estruturas Geológicas Complexas à Classificação Geomecânica*. Congresso Brasileiro de Mecânica de Rochas e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG 2016) e Simpósio Brasileiro de Mecânica de Rochas e Engenharia Geotécnica (SBMR 2016), Mecânica das Rochas e Engenharia de Rochas para Inovação e Desenvolvimento. Conferência Especializada ISRM. Belo Horizonte, Minas Gerais, outubro 2016.
- Mello. K. S. (2017) - *Estudo de Estabilidade de Talude com Classificação Geomecânica e Análises de Estabilidade com uso do Software RocPlane para Contenção de Blocos Rochosos: Taludes da Casa de Força da Barragem de Atalho, Brejo Santo CE - XII Conferencia Brasileira sobre Estabilidade de Encostas - COBRAE 2017*. Florianópolis, Santa Catarina, ABMS, Brasil.
- Norrish, N.I. e Wyllie, D.C. (1996) - *Rock Slope Stability Analysis*. In: Turner, A. K.; Schuster, R. L. (Ed.)
- Roma Projetos Ltda & Magna Engenharia Ltda: Plantas de Projeto: GEO-TRA-ATA-01-REV01; GEO-TRA-ATA-02-REV01 e GEO-SEC-ATA-03-REV01. Relatório RCA-C_Fechamento Visita Técnica Setembro e Outubro_2016 - Sugestões de Tratamento e Estudos de Estabilidade Taludes Casa de Força de Atalho e Lote VI.
- Romana M., Serón J.B. e Montalar E (2003) - *SMR Geomechanics classification: Application, experience and validation ISRM -Technology roadmap for rock mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy.
- Silva H.R.S., Costa R.F., Oliveira M.M. e Henriques A.B (2014) - *Análise Comparativa entre Cisalhamento Direto e Tilt Teste para Obtenção do Ângulo De Atrito Interno Básico em Estudo de Caso do Xisto*. Revista Pensar Engenharia, v.2, n. 2, Jul.
- Wyllie, D.C. e Mah, C.W. (2004) - *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*, 4th ed., Spon Press, New York, NY, USA, 432 p.