

Concepção do projeto de drenagem superficial da obra de recuperação do Talude da Cava / MAC

Anderson Fonini
FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, fonini@fgs.eng.br

Álisson Sachetti
FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, alisson@fgs.eng.br

Bruno Denardin
FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, bruno@fgs.eng.br

Felipe Gobbi
FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, felipe@fgs.eng.br

Gilvan Sá
Vale, Belo Horizonte, Brasil, gilvan.sa@vale.com.br

RESUMO: Em 1992 uma ruptura ocorreu na Mina de Águas Claras - MAC, na época explorada pela Mineração Brasileiras Reunidas (MBR). Mesmo após o evento a exploração do minério de ferro foi mantida até 2002. Como o local faz limite com Serra do Curral, patrimônio da cidade de Belo Horizonte, após o término das atividades, a atual proprietária da área, a Vale, deu início ao processo de descomissionamento. O primeiro passo foi analisar a ruptura de 1992, para a verificação da estabilidade global do talude remanescente. O estudo indicou que frente à estabilidade global o talude apresenta níveis de segurança adequados, contudo devido a materiais presentes no local e a grande área exposta pela ruptura, cerca de 100.000 m² processos erosivos começaram a afetar a superfície do talude. Esses processos ocorriam pela associação entre a baixa competência geotécnica dos materiais ocorrentes na face exposta e a falta de um sistema de drenagem, que coletasse e conduzisse o fluxo superficial adequadamente para fora da face. Sendo assim, foi elaborado um projeto para estabilizar as camadas superficiais (solo grampeado e faceamento em tela metálica de alta resistência) e um sistema de drenagem controlando o avanço dos processos erosivos. O sistema de drenagem previsto continha descidas d'água em degraus e coletores, dimensionados através do método Racional com base na curva IDF. A área total foi dividida em 3 fases: a primeira caracteriza-se por inclinações médias de 50° com predominância de material rochoso; a segunda tem 35° de declividade média, com material depositado (fino e blocos) e; a terceira por inclinações variáveis onde ainda há feições dos taludes antes da ruptura. O projeto de drenagem foi desenvolvido para ser executado na superfície do terreno, associada diretamente à dificuldade de escavação do terreno (material com foliação esconsa ao mergulho do talude), pela elevada erodibilidade do material e pela dificuldade de execução, visto que todos os trabalhos executados no talude foram desenvolvidos com técnicas de alpinismo. Os coletores foram dimensionados para que a sua velocidade estivesse entre 3m/s a 5m/s para evitar a sedimentação de partículas e para evitar a cavitação do concreto. Os degraus das descidas obedeceram às relações conhecidas entre largura e altura para que o escoamento ocorresse em degraus sucessivos, dissipando a energia do escoamento até o ponto de descarte, no lago existente no pé do talude.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema de Drenagem, Dissipação de Energia, Controle de Erosão, Mineração, Fechamento de Mina

1. INTRODUÇÃO

Nos anos 1970, na cidade de Belo Horizonte, foram iniciadas as operações de exploração de minério de ferro da Mina de Águas Claras (MAC). As atividades de extração mineral perduraram até meados dos anos 2000, dando início ao processo de fechamento da mina.

Em 1992 uma ruptura de grandes proporções foi deflagrada na do talude do Morro do Patrimônio, sendo as bermas de equilíbrio destruídas com a ruptura, gerando um talude único cerca de 300 metros de comprimento.

O Morro do Patrimônio faz parte da Serra do Curral, um patrimônio cultural da cidade de Belo Horizonte. Em virtude desta condição foi necessário prever um tratamento para o local, cujo objetivo era impedir o avanço de erosões e rupturas localizadas, e o eventual comprometimento da linha da Serra Geral.

Portanto, entre 2005~2008 foram elaborados estudos iniciais para propor uma solução de estabilização da face do Morro do Patrimônio. Nestes estudos iniciais foi verificado que na condição do talude à época, o problema de estabilidade era devido às rupturas superficiais e não a estabilidade global, sendo então proposto um sistema de faceamento para conter a camada superficial instável. Tal projeto previa o uso do sistema de telas metálicas e chumbadores e um sistema de drenagem.

Dentre as atividades previstas para a estabilização da face rompida e manutenção do formato da Serra do Curral está o projeto de drenagem da área. Na concepção inicial, no projeto de drenagem foram concebidos canais principais locados dentro das ravinas que conduziram as águas até o lago existente no pé do talude. Estes canais seriam alimentados por canais secundários, que por sua vez iriam coletar diretamente as águas pluviais.

No ano de 2013, com a contratação da obra, uma revisão no projeto original foi desenvolvida pela FGS Geotecnia/ Geobrug e Geotest. Durante este processo foram realizadas inúmeras visitas à área do talude, levantando as condições de campo e ajustando o projeto, de modo a obter a configuração ajustada às condições de campo.

Deste modo, a ideia de canais de drenagem principais foi mantida, estes compostos por

descidas de água em degraus, também locadas ao longo do eixo das ravinas. Estas estruturas teriam por função absorver o fluxo de água, fornecido por uma série de muretas concreto distribuídas em locais específicos do talude, e dissipar a energia das águas, descarregando a vazão coletada de maneira segura em canais enrocados. Estes por sua vez conduziriam a as águas para o lago.

O sistema de drenagem concebido teve por objetivo absorver o fluxo superficial, conduzindo o volume até o lago, de modo que ao longo deste trajeto a energia fosse dissipada sem causar danos à face do talude e aos dispositivos.

Também foram levados em conta no projeto do sistema drenagem pontos referentes à durabilidade e eficiência dos dispositivos, visto que a seu correto funcionamento é de suma importância para a estabilidade superficial do talude, atuando em conjunto com o sistema de faceamento para o controle dos já instaurados processos erosivos.

1.1 Apresentação da área

O talude do Morro do Patrimônio está localizado nos arredores da cidade de Belo Horizonte, na área hoje pertencente a Vale, denominada como Mina de Águas Claras. Na Figura 1 é possível visualizar a localização da área em questão.



Figura 1: Localização da área de interesse (google earth)

A formação de serras onde fica localizada a área da MAC corresponde a Serra do Curral, um patrimônio histórico dos mineiros. Os morros da Serra do Curral tem um importante papel histórico na formação de Minas Gerais, e é o lar de inúmeras espécies animais e vegetais.

Por estas razões a manutenção do formato original e da recuperação dos taludes oriundos das atividades mineradoras no local é de suma

importância, justificando todo o investimento realizado no local.

2. DIMENSIONAMENTO

2.1 Metodologia

O dimensionamento do projeto de drenagem da Cava foi realizado em diversas etapas, sendo possível destacar a determinação das vazões, locação dos elementos, dimensionamento hidráulico e estrutural, culminando na verificação em campo da solução e eventuais ajustes. É possível ilustrar esse procedimento utilizando um fluxograma, apresentado na Figura 2.

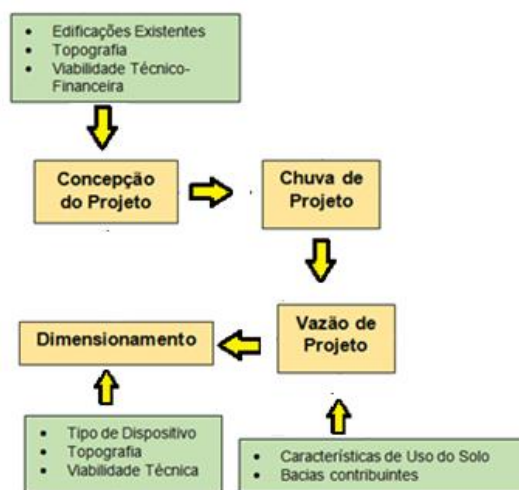


Figura 2: Fluxograma de dimensionamento

Cada uma das etapas do processo de dimensionamento pode ser descrita da seguinte maneira.

2.2 Concepção de projeto

A concepção inicial do projeto consiste no levantamento de campo das informações necessárias, como por exemplo caminho do escoamento natural, tipos de materiais geotécnicos presentes, possíveis interferências, áreas de contribuição e condições topográficas.

Com estas informações é possível definir micro bacias de drenagem e conceber, de maneira conceitual, onde serão locados os dispositivos de drenagem, qual o tipo de estrutura será utilizada e para onde o fluxo será direcionado e escoado de maneira segura.

Ainda com os dados topográficos e nas microbacias definidas, foram traçados os eixos

as descidas de água em degraus e as muretas que iriam alimentar as estruturas principais. Tais estruturas foram locadas visando a maximização das áreas de contribuição, ou seja, a redução no número de estruturas, o que implica em redução de custos.

Na Figura 3 está apresentado o traçado final do sistema de drenagem para o Morro do Patrimônio.



Figura 3: Croqui da solução preliminar (FGS, 2015)

2.3 Determinação das chuvas e da vazão de projeto.

A vazão a ser absorvida pelos dispositivos de drenagem é obtida diretamente a partir da chuva de projeto, que por sua vez é função das características do microclima de uma dada região.

Todas estas variáveis de projeto podem ser facilmente definidas utilizando o método racional, que é detalhadamente apresentado em TUCCI, PORTO e BARROS (1995). Esta metodologia pode ser aplicada a bacias de drenagem de pequeno porte, de até 200 ha, situação na qual a área da MAC se enquadra.

De acordo com o método a chuva de projeto pode ser definida com base em uma curva IDF, (intensidade duração e frequência) específica para o local, neste caso Belo Horizonte. Estas curvas são construídas com base em dados históricos de chuvas do local. Estas curvas podem ser expressas matematicamente pela equação 01.

$$i = \frac{k \cdot T^m}{(t + b)^n} \quad (1)$$

Onde i é a intensidade da chuva (mm/h), T tempo de retorno (anos) t tempo de

concentração (min) e k, m, n são coeficientes para Belo Horizonte (682,7; 0,169; 0,671 respectivamente).

Para o tempo de retorno foi adotado um período de 50 anos, considerando um tempo de concentração de 5 minutos. Sendo assim a chuva de projeto foi de 303 mm/h.

Sendo assim, com o tempo de retorno definindo as vazões foram recalculadas para a nova situação. O cálculo das vazões é obtido com a equação 2, também apresentada no método racional e expressa abaixo:

$$Q = \frac{C.I.A}{3,6} \quad (2)$$

Onde Q é a vazão calculada (m³/s) C um coeficiente adimensional, I a intensidade da chuva (mm/h) e A a área de contribuição (km²). O coeficiente C expressa a relação entre o volume escoado e o volume precipitado em função das características do terreno, tendo sido adotado um C= 0,90, o que corresponde a terrenos de baixa permeabilidade e com elevadas declividades.

Sendo assim, para cada uma das microbacias definidas e dos dispositivos de drenagem previstos na Figura 3 foi calculada a vazão de drenagem dos dispositivos.

As vazões a serem absorvidas pelas descidas de água em degraus foram calculadas pela contribuição das muretas ao longo do trajeto das mesmas, ou seja, as descidas não captariam diretamente o fluxo apenas o conduziriam.

2.4 Dimensionamento dos dispositivos de drenagem

No desenvolvimento do projeto os dispositivos de drenagem foram dimensionados em duas etapas, sendo a primeira o dimensionamento hidráulico e a segunda o dimensionamento estrutural. Este artigo irá ater-se somente ao dimensionamento hidráulico dos dispositivos.

2.4.1 Dimensionamento das muretas

Cada mureta foi dimensionada para absover o fluxo de acordo com a área de influência previamente determinada. Foi considerado que as muretas ao serem instaladas na face do talude

funcionariam como uma sarjeta triangular, de altura igual a altura definida para a parede. A inclinação transversal da face foi atribuída como a declividade média do talude na região onde seria instalada a mureta. Deste modo foi possível estimar as vazões com a equação de Manning que relaciona variáveis hidráulicas conhecidas a priori (n, Q e S) e variáveis da geometria do conduto (A e Rh), sendo função da profundidade normal.

$$Q = \frac{A_m.R_h^{2/3}S^{1/2}}{n} \quad (3)$$

Onde Am é a área molhada (m²), Rh o raio hidráulico (m) S a declividade (m/m) e n o coeficiente de Manning.

Como as declividades longitudinais no terreno era muito elevadas, foi projetado junto das muretas um revestimento em concreto da face do talude, com o objetivo de controlar os processos erosivos que poderiam se manifestar devido ao fluxo. Além de conformar a estrutura ao terreno, a forte declividade tem uma função de auto limpeza, ou seja, a velocidade do fluxo é elevada, o que evita o acúmulo de sedimentos ao longo do canal. Mesmo assim, a altura das muretas implementadas foi superior a altura mínima prevendo algum acúmulo de materiais decorrente de um evento não mapeado.

2.4.2 Dimensionamento das descidas de água

O dimensionamento hidráulico destas estruturas foi mais complexo, sendo este realizado em duas etapas. A primeira consistiu em determinar a geometria mínima para absorver as vazões projetadas. Foi utilizada uma equação empírica, baseada nas equações de Manning.

$$Q = 2,07.R_h^{0,90}Rh^{1,60} \quad (3)$$

Com esta equação e com a vazão que cada mureta descarregaria na escada foram determinadas as dimensões. Cabe apontar que ao longo de seu traçado as descidas sofreram incrementos nas dimensões, a medida em que a vazão absorvida era maior, ou seja, as dimensões foram otimizadas em todo o projeto.

Com a geometria definida em função da

vazão, foi necessário dimensionar as escadas para dissipar a energia do escoamento superficial. Dado o grande comprimento destas estruturas (>100 metros), optou-se pela dissipação através do escoamento *nappe* (sucessivos degraus). Mesmo que dispositivos projetados para este regime de escoamento sejam mais onerosos, quando comparado ao regime *skimming* são mais eficientes na dissipação de energia.

Deste modo é esperado que a durabilidade dos dispositivos também seja maior, em virtude da amenização dos impactos do fluxo. Essa escolha foi realizada com base nas informações obtidas na literatura que fazem menção a maior dissipação de energia com este tipo de escoamento e também por as DADs serem muito longas (ELLIS, 1989; PEYRAS et al.; 1991; CHAMANI e RAJARATNAM, 1994; apud ARANTES, 2007).

O escoamento *nappe* tem como principais características: a dissipação de energia por meio de impacto do jato no degrau, incorporação de ar e formação do ressalto hidráulico. A completa formação do ressalto hidráulico proporciona uma a dissipação total da energia do fluxo, entretanto exige um degrau com base de grandes dimensões. Dadas as características geométricas da encosta, a utilização do ressalto completo iria exigir uma DAD que não poderiam ser instaladas devido a declividade do terreno. Portanto foi adotado um ressalto parcial, em um sub-regime NA2. No gráfico apresentado Figura 4 esta ilustrado este tipo de regime.

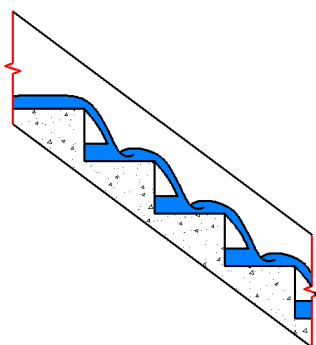


Figura 4: Nappe Flow / sub-regime NA2.

Para que o escoamento se caracterize como *nappe* é necessário verificar a altura crítica (dc), altura (h) e o comprimento do degrau (l). Chanson (1994 e 2001), Ohtsu e Yasuda (2001), Arantes (2007) e Chinnarasri e Wongwises

(2004) apud Simões 2008, realizaram simulações numéricas e estudos laboratoriais e chegaram a conclusões muito semelhantes em relação a divisão do tipo de escoamento. Na Figura 5 estão apresentados os resultados obtidos pelos pesquisadores, os quais separam os regimes de escoamento entre escoamento *skimming* ou *nappe* e também o valor máximo que foi fixado para a realização do dimensionamento das DADs neste projeto.

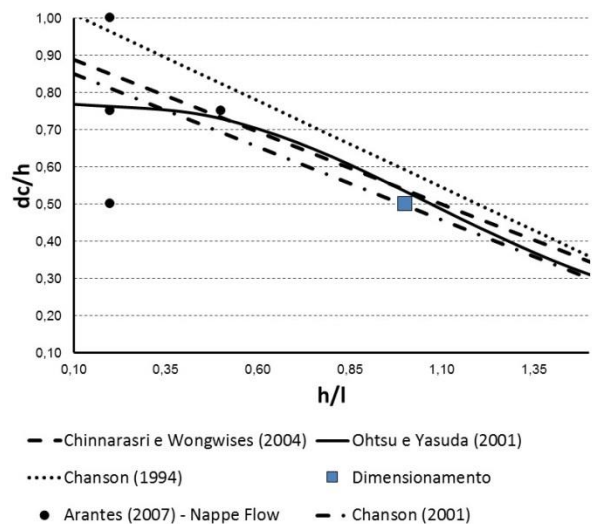


Figura 5: Regimes de escoamento (Adaptado de Simões 2008).

A máxima relação dc/h e h/l consideradas para o dimensionamento do projeto foram 0,50 e 1,00 respectivamente. Porém é importante apontar que essa razão entre a altura do degrau e a largura é esperada em apenas alguns locais, devido a geometria do talude. De maneira geral, a relação entre h/l tende a se afastar da linha limite entre os regimes *skimming* e *nappe*, no sentido do regime *nappe*.

Para garantir que o regime das DADs seriam do tipo *nappe*, foi realizada uma verificação, utilizando a equação publicada por Chanson (2010). De acordo com esta, é necessário que a seguinte relação seja atendida:

$$dc < 0,89 \cdot 0,4 \frac{h}{l} \quad (4)$$

Após o dimensionamento foi verificada a parcela de energia potencial gravitacional dissipada ao longo de cada escada. De acordo com Peyras et al. (1991) apud Arantes (2007), no escoamento *nappe*, a taxa de dissipação de

energia no sub-regime com formação parcial do ressalto (NA2) é 10% inferior se comparada ao sub-regime com a formação completa (NA1).

Portanto, como simplificação, foi realizada estimativa de dissipação para o sub-regime (NA1), reduzindo a dissipação encontrada em 10% para adequar a situação esparada para as escada. Com base nesta premissa, a foi adaptada equação proposta por Simões (2008), a fim de adequá-la a situação de projeto para a obtenção da energia dissipada em relação a altura total da escada.

$$\frac{\Delta H}{H_{\text{escada} + \text{lamina}}} = 0,9 - \left[\frac{0,54 \left(\frac{dc}{h} \right)^{0,275} + 1,714 \left(\frac{dc}{h} \right)^{-0,55}}{\frac{H_{\text{escada}}}{dc} + 1,5} \right] \quad (5)$$

3. EXECUÇÃO DO PROJETO E OPERAÇÃO DOS DISPOSITIVOS

Dadas às características geomorfológicas do talude, todo o processo executivo foi acompanhado pela projetist em campo, verificando durante o processo executivo as particularidades do terreno não contempladas no projeto, e adaptando a solução de drenagem e do faceamento com a evolução da obra.

Foram necessárias alterações na locação das estruturas e bem como nas dimensões dos desgraus, além de ajustes pontuais na própria concepção da solução (junção das DADs).

3.1 Resultados

Até a presente data, uma grande parte dos sistemas de drenagem já foram executadas, tendo sido finalizada os trechos do sistema de drenagem da Fase 01, terço superior do talude, Figura 6.



Figura 6: Condição atual do sistema de drenagem

3.2 Muretas de concreto

O principal ajuste necessário para as muretas foi em relação ao posicionamento das mesmas. Na fase de projeto as muretas foram locadas com base nos dados topográficos e na geometria necessária para a estrutura drenar a vazão prevista.

Em campo, com as alterações realizadas na geometria do talude, em função da remoção de blocos e escavações, as muretas sofreram uma alteração na locação.

Foi definida uma faixa de declividades, atribuindo um valor mínimo para garantir a vazão e o efeito autolimpante, e um valor máximo para garantir a durabilidade da estrutura. Uma fotografia de um trecho finalizado das muretas está apresentada na Figura 7.

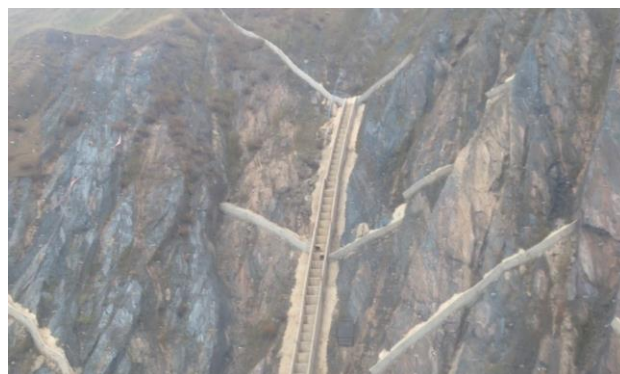


Figura 7: Muretas do sistema de drenagem

Após um período de alguns dias com precipitação moderada verificou-se que as muretas já executadas tiveram um ótimo

desempenho frente ao fluxo que deveriam interceptar e frente ao acúmulo de sedimentos. Elas foram capazes de absorver e transportar toda a vazão coleta, conforme o projetado, sem que quaisquer problemas fossem observados.

Após este período, o sistema já executado foi inspecionado, buscando avaliar o acúmulo de sedimentos carregados pelo fluxo superficial. Foi verificado que o efeito autolimpante destes sistemas, gerado pela velocidade de escoamento (declividade) foi obtido, restando apenas em alguns pontos uma pequena quantidade de material depositado.

3.3 Descidas de água em degraus

Foram previstas 6 DADs, das quais 5 já apresentam trechos executados, Figura 8. Em relação a posição inicial prevista foram necessários alterações de traçado em função da presença de blocos de rocha, fortes declividades entre outras interferências. Estas alterações eram previstas no projeto, dadas às dimensões da obra.



Figura 8: Trecho executado das DAD's

Além da alteração na locação, durante a execução das mesmas foi realizada a análise da dissipação de energia. Este procedimento foi adotado pelo fato de que prever com precisão as dimensões dos degraus baseado somente na topografia é uma tarefa de extrema dificuldade. Portanto, ao longo do processo executivo as dimensões executadas de todos os degraus foram registradas, e em escritório alimentaram a análise, objetivando verificar se condições de dissipação idealizadas foram atingidas.

A análise foi realizada antes do período de precipitação comentado anteriormente, portanto foram utilizados os dados hidrológicos do projeto. Já para as relações dimensionais entre h/l foram utilizados os dados reais

coletados em campo para as DADs já executadas. Os resultados foram plotado no mesmo gráfico apresentado na Figura 9, a fim de avaliar se a condição de regime *nappe* definida estava atendida.

Como é possível observar, os dispositivos executados em campo até a presente data atendem a premissa básica de projeto, operando sob regime de escoamento *nappe*, inclusive distantes do seu limite com o regime *skimming*.

Em função da forte declividade de trechos do talude ao longo do traçado adaptado das DADs 01 e 06 é possível antecipar que pequenos trechos isolados destes dois dispositivos irão operar sob o regime transitório ou *skimming*. São previstos trechos com 10 degraus nestes locais, onde a parcela de energia dissipada será menor, o que irá conferir uma velocidade maior ao fluxo.

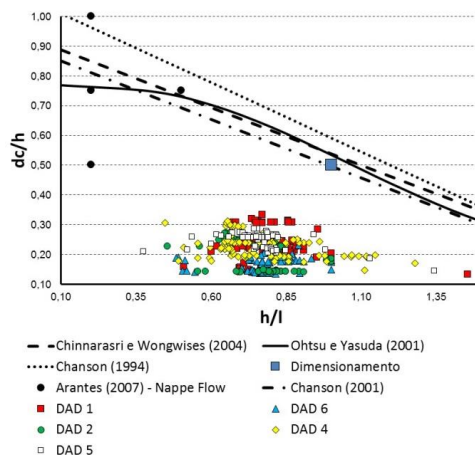


Figura 9: Relação entre h/l das DADs executadas.

Entetanto, ao ultrapassar estas regiões o escoamento irá retornar para a condição de *nappe flow*, ou seja, esta condição não afetará a premissa de projeto, sendo então considerada aceitável.

Através de um sistema de câmeras de monitoramento foi possível verificar o funcionamento dos dispositivos para uma chuva de 20 mm ocorrida em 5min. As imagens na sequencia apresentam as imagens das DADs em funcionamento.

Por fim, a última etapa da retroanálise foi estimar a parcela de energia dissipada ao longo das DADs executadas. Esta verificação foi realizada utilizando a equação (5), apresentada acima. Para as cinco descidas, que estão parcialmente executadas os resultados foram

plotados, e estão apresentados na Figura 11



Figura 10: DAD's em funcionamento

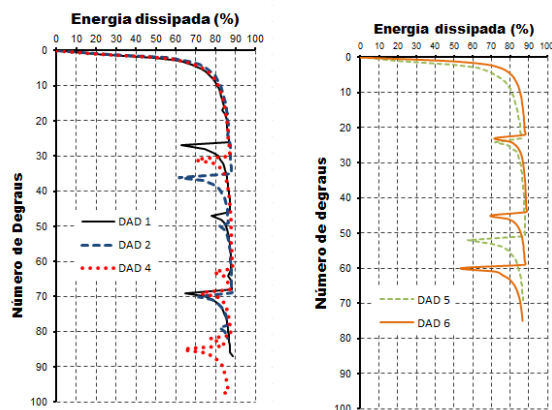


Figura 11: Dissipação de energia estimada para as DADs

Com base nos resultados de todas as DADs, quanto maior o número de degraus maior a parcela de energia dissipada do fluxo, e a consideração de que ao final da DAD, baseada no comprimento das mesmas, a energia restante seria de aproximadamente 10% da energia total pode ser observada.

Cabe apontar que nas curvas de energia apresentadas na Figura 11 existem pontos com ganho de energia, que correspondem aos pontos de alimentação, onde as muretas encontram as DAD's. Nestes pontos, foi considerado um novo fluxo, explicando o ganho de energia nestes locais.

4. CONCLUSÕES

A concepção inicial de uma solução de drenagem para um talude exige que sejam conhecidas características básicas do local,

dados hidrológicos e topográficos.

Entretanto, o projeto executivo final em situação complexa, exige que um trabalho de campo detalhado seja realizado, levantando as particularidades do local e ajustando o projeto com o avanço das obras.

As estruturas projetadas e executadas foram capazes de desempenhar a função para as quais foram dimensionadas, atendendo todas as premissas idealizadas na fase de projeto. O regime de escoamento *nappe*, definido como modelo de escoamento para o fluxo é capaz de dissipar grande parte da energia do fluxo, garantindo a durabilidade dos sistemas, e impedindo que processos danosos ao concreto ocorressem.

Por fim, o acompanhamento em tempo real da obra e da execução das soluções foi fundamental para o sucesso, pois a partir dos constantes levantamentos de campo o projeto pode ser ajustado e corrigido quando necessário. Tendo em vista as dimensões do talude a grande importância da obra, por se tratar de um patrimônio tombado, o acompanhamento da obra em tempo real foi fundamental para o sucesso da manutenção do Serra do Curral.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos em especial à Vale pela autorização para a publicação do artigo e à equipe da FGS pela disponibilização dos dados utilizados.

REFERÊNCIAS

- Arantes, E.J. (2007). *Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via CFD*. USP. São Carlos. 2007. P. 204.
- GEOBRUGG (2008) Project Águas Claras, Final Executive Design V3.0.
- MBR (1990) Mapa geológico da Mina de Águas Claras.
- TERZAGHI, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. John Wiley e Sons Inc., New York. 510p.
- Tucci, E. M. C.; Porto, R. L.; Barros, T. M. (1995). *Drenagem urbana*. Porto Alegre: ABRH. UFRGS. 1995. 428p.
- Simões, A. L. A.; *Considerações sobre a hidráulica de vertedouros em degraus. Metodologia adimensionais para pré-dimensionamento*. USP. São Carlos. 2008. P. 286.