MODELAÇÃO GEOMECÂNICA E PROPOSTAS DE ESTABILIZAÇÃO DA ENCOSTA DO MORRO DO CURRAL – OURO PRETO / BRASIL

Geomechanical model and stabilization solutions for the Morro do Curral rock mass in Ouro Preto / Brazil

Gilberto Fernandes*
Frederico Garcia Sobreira**
Romero César Gomes***

RESUMO - O presente trabalho teve como objetivo principal a determinação dos parâmetros geomecânicos de um maciço rochoso para viabilizar o projeto conceitual e as respectivas soluções técnicas de estabilização da chamada encosta do Morro do Curral, feição situada adjacente ao Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto, na área urbana da cidade de Ouro Preto / Brasil. Neste sentido, foram realizados levantamentos de campo para caracterização geológico-geotécnica do maciço e uma série de ensaios geotécnicos de laboratório sobre os materiais presentes. Estes estudos compreenderam ensaios de caracterização e de resistência das rochas, destacando-se os ensaios puntiforme e de cisalhamento direto. O conhecimento das características intrínsecas do maciço rochoso, aliadas aos resultados dos ensaios de laboratório, permitiram a aplicação das classificações para a formulação do modelo geomecânico do maciço. Com base em correlações envolvendo estes índices geomecânicos, foram estabelecidos os parâmetros de resistência e de deformabilidade do maciço rochoso, que nortearam os procedimentos para a análise da estabilidade da encosta e os princípios gerais do projeto global de sua estabilização.

SYNOPSIS - The aim of this work was to determine geomechanical parameters for a slope stability project on the Morro do Curral rock mass. The slope is located next to Ouro Preto Convention Center in the urban area of Ouro Preto, Brazil. Local surveys and geotechnical laboratory tests were developed to obtain geological–geotechnical characterization of the area, comprising point load and direct shear tests. The understanding of the intrinsic characteristics of the rock mass associated with laboratory tests enabled the geomechanical classification, but also brought up many interesting co-relations in terms of the strenght and deformability parameters. Finally, stability analyses were processed and global stabilization mechanisms were proposed based on the geomechanical model obtained for the slope.

1 – INTRODUÇÃO

A cidade de Ouro Preto, situada no estado de Minas Gerais, constitui um dos principais conjuntos arquitetônicos e artísticos do Brasil e é distinguida pela UNESCO com o título de cidade patrimônio cultural da humanidade. Este sítio histórico é continuamente ameaçado por uma série de condicionantes topográficas, geológicas, geotécnicas e hidrológicas amplamente desfavoráveis, somadas a fatores resultantes de uma ocupação crescente e

* MSc., Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, gilberto@em.ufop.br

** Professor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, sobreira@degeo.ufop.br

*** Professor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, romero@em.ufop.br

inadequada do meio físico local (Carvalho, 1982; Sobreira, 1990; Bonuccelli, 1999; Gomes, 2002).

Atualmente, a cidade carece do uso do conhecimento integrado das propriedades e das características dos seus terrenos de forma a se desenvolver harmonicamente, viabilizando um crescimento ordenado em um espaço físico geotecnicamente inadequado. Estes riscos estão associados à susceptibilidade natural das encostas a movimentos de massa, aos efeitos de uma ação antrópica descontrolada e outros fatores tais como baixo poder aquisitivo da população das áreas periféricas e ausência de boas técnicas de construção civil.

As transformações sofridas pela cidade, em face da dinâmica do seu processo de ocupação crescente, interferiram de maneira acelerada e intensa na estabilidade das encostas. Particularmente na área estudada, estes efeitos são patentes ao se analisar a evolução local pelo conjunto de fotos aéreas ao longo de várias décadas, atestando a degradação imposta pela ocupação desordenada.

O presente trabalho investiga os condicionantes gerais da encosta do Morro do Curral, abordando a sua ocupação, a geologia local, sua caracterização geológico-geotécnica, a classificação geomecânica do maciço, a identificação dos mecanismos potenciais de ruptura e dos processos dos movimentos gravitacionais de massa. Adicionalmente, procurou-se obter os parâmetros de projeto de engenharia e estabelecer um modelo geológico-geotécnico para a encosta estudada, de forma a se obter soluções e projetos consistentes com os mecanismos de instabilização detectados.

No entanto, tão importante quanto a solução dos problemas existentes, é a adoção de medidas preventivas, capazes de evitar a repetição de acidentes geotécnicos de gravidade, que têm-se repetido sistematicamente nos últimos anos. Ouro Preto possui várias outras encostas em condições similares de risco geotécnico e, neste sentido, a ausência de ações efetivas e preventivas dos órgãos municipais, estaduais e federais em termos do planejamento e da ocupação territorial, conjugados em um plano diretor integrado, compromete drasticamente quaisquer políticas de expansão da cidade, no âmbito do seu espaço urbano atual.

2 – ENCOSTA DO MORRO DO CURRAL

A encosta estudada localiza-se no eixo histórico da cidade de Ouro Preto (parte central da Figura 1), sendo limitada a leste (pé da encosta) pelos córregos Caquende e Água Limpa/dos Contos, e a oeste pela vertente natural (crista da encosta). As litologias da encosta do Morro do Curral são rochas do Grupo Sabará, de geologia complexa pela variação do grau de metamorfismo, mas que podem ser genericamente designadas como xistos. A estrutura geológica xistosa, a fraturação descontínua e as declividades acentuadas implicam variações de comportamento, que induzem feições distintas em termos da estabilidade do maciço.

A encosta do Morro do Curral registra sinais de movimentos de massa e cicatrizes de instabilidades ocorridas em períodos chuvosos mais intensos e prolongados, como os de 1979 e 1989 (Sobreira et al., 1990). Os problemas são de natureza específica, como a instabilidade manifestada a meia encosta através de superfícies de foliação. Outro mecanismo grave decorre do escoamento das águas superficiais pela face dos taludes, que carreiam grande quantidade de material fino para o córrego Caquende, na base da encosta, provocando o estrangulamento do seu curso natural.

Na base desta encosta, na área da confluência dos córregos da Água Limpa/dos Contos e do Caquende, está sendo construída uma grande estrutura de eventos – o chamado Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto, destinado a ser local de congressos, convenções, núcleo de artes e criação, seminários, reuniões, conferências e eventos similares. O projeto está orçado em torno de 1,8 milhões de euros e possui uma infra-estrutura de atendimento para até

600 pessoas. A área ocupada é de cerca de 10900 m^2 e constitui uma das poucas áreas planas disponíveis na zona central do núcleo urbano da cidade de Ouro Preto.

Fig.1 - Localização da Encosta do Morro do Curral na área urbana da cidade de Ouro Preto.

A ocupação atual da área na base da encosta do Morro do Curral por uma estrutura de tal porte não satisfaz os critérios de segurança e economia exigidos, tornando-se imperativa, portanto, a necessidade de estudos específicos para um efetivo trabalho de estabilização global de todo o maciço e para a viabilização do empreendimento (Fernandes, 2000).

3 – CONDICIONANTES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS LOCAIS

Num contexto morfológico, a encosta tem inclinação média de 45°, amplitude da ordem de 50 m e extensão de 151 m, no domínio de influência direta na infra-estrutura do Centro de Convenções de Ouro Preto. A encosta apresenta perfil irregular, com escarpas sub-verticais e aproximadamente paralelas e vertentes irregulares, com declives variáveis. As escarpas são condicionadas por fraturas plano-axiais das dobras, representando a transição flanco-charneira, e pelas vertentes, que correspondem aos trechos menos íngremes (flancos da dobra).

Nas vertentes ocorrem depósitos de tálus sem cobertura vegetal, que se localizam a jusante das linhas de drenagem dos talvegues principais. Estes depósitos são compostos por blocos e lascas rochosas de tamanhos variáveis (dimensões métricas a decimétricas), apresentando claros sinais de movimentos recentes. As declividades observadas mostram patamares médios de 45°, valores estes muito próximos ao mergulho da foliação.

A drenagem é representada por dois talvegues principais (linhas de drenagem), um na região central e outro situado na zona norte da encosta. Eles captam e direcionam a maior parte das águas superficiais. Na zona inferior da encosta não há linhas de drenagem bem definidas,

sendo o escoamento superficial irregular, com fluxos de água por toda a superfície da vertente, com sulcos erosivos generalizados neste trecho. No sopé da encosta os córregos Caquende e Água Limpa/dos Contos formam a calha natural das águas de escoamento superficial.

O tipo litológico encontrado no local de estudo é constituído por um xisto cinza, intercalado por veios de quartzo de espessura variada, concordantes ou não com a xistosidade. O xisto encontra-se, em muitos pontos, mais alterado, com coloração marrom a avermelhado. Apresenta-se também muito frágil, quebradiço e bastante fraturado, localmente oxidado. A textura é de rocha com granulometria média a grossa (diâmetro dos grãos minerais compreendido entre 1 e 5 mm), caracterizada pela orientação mais ou menos paralela dos componentes minerais, principalmente lamelares (mica, clorita) e prismáticos (anfibólios). Outros componentes minerais (quartzo, feldspato, etc.) também tendem a orientar-se e tal disposição orientada determina a foliação da matriz rochosa, segundo planos paralelos ou sub-paralelos.

A encosta situa-se no flanco leste de uma dobra aberta, com eixo na direção aproximadamente N/S, mergulhando 20° a 30° para Sul, com flanco bem inclinado mergulhando para E (30° a 45°). A zona de charneira no segmento sul da encosta está localizada no terço inferior da encosta e no segmento norte no terço superior. A foliação é aproximadamente horizontal na zona de charneira e mergulha de 20° a 50° para E no flanco. Apesar de ser possível a caracterização de atitudes gerais, geralmente a foliação está ondulada. Estas ondulações condicionam localmente a inclinação das vertentes (Figura 2).

Fig. 2 – Ondulações típicas da foliação dos xistos da Encosta do Morro do Curral.

No segmento mais ao norte, a encosta está bem mais perturbada por se tratar de zona de falhamento regional, de direção E-W, que corta o Morro do Curral e se estende até o Morro da Forca adjacente, que constitui a outra vertente do Vale do Caquende. A foliação é variável e apresenta dobras em ziguezague ("kink bands"), com eixo EW e flancos N e S.

Embora a foliação seja proeminente, detecta-se também a presença de duas famílias de descontinuidades (superfícies de fratura), persistentes e sub-verticais, com rumo de mergulho respectivamente 50° e 130°, abertas em alguns pontos e, em outros, preenchidas por material argilo-siltoso de cor marrom e (ou) amarelado. Este sistema de descontinuidades condiciona profundamente as superfícies de ruptura, provocando os movimentos da massa rochosa. Estas famílias de fraturas sub-verticais são responsáveis predominantemente pela infiltração de água no maciço. Em quase todas as escarpas constatam-se surgências de água no período chuvoso.

Ocorrem ainda depósitos de cobertura representados por solos, depósitos de vertentes (tálus) e depósitos aluviais. Os solos são pouco espessos e predominam no topo da encosta e nas zonas mais estáveis, estando geralmente recobertos por vegetação rasteira, tendo pouca importância no comportamento geral da encosta. Os depósitos de tálus são formados predominantemente por blocos e lascas do xisto, envolvidos por matriz fina e fragmentos menores da rocha. Este material, com a incorporação de inúmeros blocos e lascas rochosas, condiciona os processos de movimentos de massa ao longo da encosta devido à sua situação de instabilidade.

Após caracterizadas as descontinuidades e o material rochoso em campo, procedeu-se ao levantamento geotécnico de toda a área. Este levantamento possibilitou a definição dos processos de movimentos de massa sistematizados no Quadro 1, com a caracterização geral de três unidades geotécnicas distintas.

Numa análise preliminar, o uso e a ocupação do espaço no pé da encosta com o descalçamento acentuado dos taludes e a remoção completa da cobertura vegetal ao longo de suas vertentes favoreceram a movimentação de blocos rochosos isolados e delimitados pelas descontinuidades sub-verticais, associando movimentos translacionais envolvendo diferentes materiais a quedas e rolamento de blocos e movimentos rápidos de depósitos de tálus, com aceleração destes processos pela infiltração crescente das águas de chuva.

Quadro 1 - Caracterização das unidades geotécnicas da encosta do Morro do Curral

Agrupamentos	Processos de Movimento	Estado de atividade	Materiais envolvidos
I	Escorregamentos planares e em cunha, com queda e rolamento de blocos e corridas de tálus	Ativo	Rocha branda, blocos rochosos, lascas rochosas, detritos e solo de cobertura
II	Escorregamentos planares e em cunha, com queda e rolamento de blocos e corridas de tálus	Inativo/latente	Rocha branda, blocos rochosos, lascas rochosas e detritos
III	Escorregamentos planares e em cunha, com queda e rolamento de blocos	Ativo/estabilizado	Manto vegetal, solo de cobertura, rocha branda, blocos rochosos e sedimentos fluviais

4 – METODOLOGIA DOS TRABALHOS

A metodologia do trabalho comportou quatro fases distintas de estudo: inventário e pesquisa de dados técnicos previamente disponíveis, investigação de campo, ensaios de laboratório e análises de estabilidade / soluções de estabilização para a encosta.

Na primeira etapa do trabalho foram realizados os estudos de pesquisa bibliográfica, as análises das bases cartográficas e os trabalhos de fotointerpretação. Os trabalhos de campo (segunda etapa) envolveram amostragem de solos e rochas e a execução de ensaios de laboratório, compreendendo a caracterização física dos solos e rochas, análises petrográficas, ensaios de cisalhamento direto e de carga puntiforme.

Na fase subseqüente foram realizados levantamentos topográficos e geológico-geotécnicos e a modelação geomecânica do maciço rochoso. Na quarta etapa, após as correlações dos resultados obtidos, foram processadas as análises cinemáticas de estabilidade dos taludes e a elaboração dos projetos para a estabilização da encosta.

Os trabalhos preliminares consistiram em um levantamento topográfico de detalhe da encosta na escala 1:750, gerado pela utilização do programa Autocad-R14. Neste levantamento, tomou-se atenção especial para a geometria específica dos taludes e escarpas existentes, conferindo um alto grau de detalhamento ao mapa produzido. Este mapa serviu de base para a caracterização das principais feições e estruturas geológicas presentes, definidoras do arcabouço estrutural do maciço.

Os estudos geológico-geotécnicos foram executados a partir da tomada de dados de campo de toda a encosta e igualmente plotados na base topográfica. Foram identificados todos os tipos de materiais presentes (afloramentos rochosos, depósitos superficiais, solos de cobertura, blocos rochosos e depósitos de aluvião), as estruturas geológicas relevantes, particularmente foliação e superfícies de fraturamento (Figura 3), os pontos de amostragem de solos e rochas e as principais feições morfológicas.

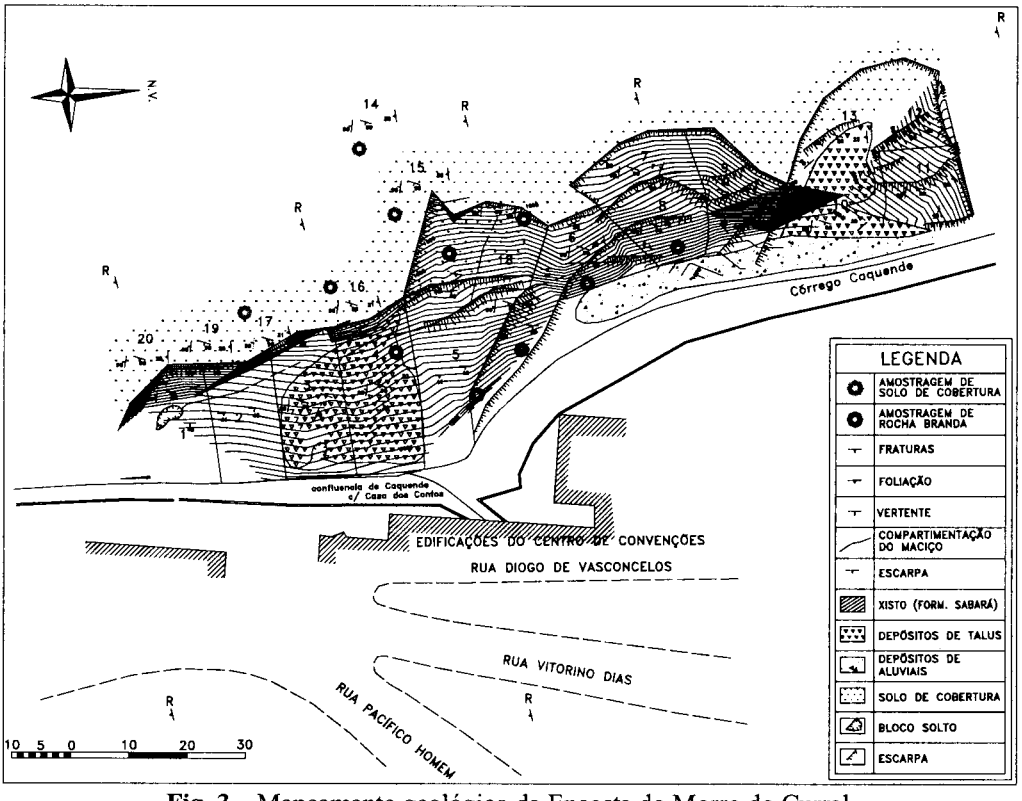

Fig. 3 – Mapeamento geológico da Encosta do Morro do Curral.

De forma a facilitar a caracterização do maciço, efectuou-se a sua subdivisão em setores, procedimento convencional neste tipo de análise. A encosta foi dividida em um total de vinte setores, definidos com base nos seguintes critérios: a) condições de acesso; b) dimensões (extensão horizontal, variando entre 5 e 15 m); c) padrão de comportamento (domínios de representatividade).

A caracterização do maciço rochoso da encosta do Morro do Curral foi processada através do estudo das descontinuidades, de acordo a sistemática proposta pela ISRM (1983) para a descrição quantitativa das descontinuidades. Para tal, utilizou-se fichas de campo, onde foram sistematizadas todas as informações coletadas.

Na análise das descontinuidades, o método adotado para a coleta dos dados consistiu em identificar as características principais de cada família de descontinuidades (orientação, espaçamento, persistência, rugosidade das paredes, abertura, preenchimento, resistência das paredes, fluxo de água, número de famílias e tamanho de blocos). Foram descritas e quantificadas as feições das descontinuidades de interesse para a caracterização e classificação do maciço rochoso.

As amostras para ensaios de rocha (caracterização física, cisalhamento direto e compressão puntiforme) foram coletadas em nove pontos mais representativos das feições do afloramento rochoso, com forma aproximadamente prismático-retangular e faces irregulares. Os procedimentos adotados na amostragem foram baseados nas normas brasileiras NBR 6490/85 e 6502/80 da ABNT. Os ensaios foram executados no Laboratório de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, de acordo com normas e especificações da ABNT e ASTM.

Nos ensaios de cisalhamento direto, foram realizados duas séries de ensaios, nas direções paralela e perpendicular à foliação. Devido a impossibilidade de moldagem dos corpos de prova nas dimensões recomendadas, em face da fragilidade do xisto local, a preparação das amostras e os procedimentos do ensaio foram adaptados às prescrições da norma americana 3080/90, para ensaios de cisalhamento direto em amostras indeformadas de solo. O ensaio foi realizado em uma prensa convencional de cisalhamento a deformação constante. Nos ensaios de compressão puntiforme, adotou-se a sistemática recomendada pela norma D 5731/95 da ASTM, tendo sido realizados 46 ensaios no total.

Com base nos dados de campo e laboratório, procedeu-se à classificação geomecânica do maciço segundo os sistemas de Bieniawski (1989), Romana (1990, 1996) e Barton et al. (1974), com as prescrições recentes (Gomes, 1991). Fez-se o enquadramento das classes em termos de comportamentos geomecânicos similares, condições gerais do maciço, tipos de rupturas, condições de estabilidade, necessidade de tratamento e correlações com parâmetros de resistência. A comparação dos resultados possibilitou o zoneamento do maciço segundo o comportamento geomecânico potencial, possibilitando a análise de comportamento geológico–geotécnico por setores individualizados.

Utilizando os conceitos de susceptibilidade e de risco geológico, foram identificados os mecanismos de instabilização e as medidas de correção para cada setor. A situação de risco atual identifica um risco instalado (ou efetivo) em áreas já ocupadas, enquanto o risco potencial expressa, na verdade, a susceptibilidade à ocorrência de processos geológicos em áreas ainda não ocupadas.

Numa abordagem clássica, podem ser adotados diferentes processos de estabilização de taludes e encostas e, com base nestas diretrizes, um dado projeto busca compatibilizar diversas soluções no sentido de garantir à estrutura os princípios de viabilidade técnica e econômica adequados. No caso desta encosta em particular, aspectos inerentes ao sítio histórico e ao conjunto arquitetônico local implicam a implementação de metodologias que, além do atendimento às premissas de economia e segurança, assegurem ao projeto uma inserção natural ao meio físico e adequados conceitos estéticos e paisagísticos.

5 - ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os ensaios preliminares em laboratório visaram a determinação dos índices físicos e a caracterização geral do material rochoso. A partir de amostras indeformadas dos xistos cinza e marrom a avermelhado, foram determinados a densidade dos grãos G_s, o peso específico do solo γ e o teor de humidade w do solo e calculados a porosidade e o grau de saturação (Quadro 2). Os dados estão de acordo com as faixas típicas de variação destes parâmetros geotécnicos para os xistos regionais do Grupo Sabará.

Quadro 2 - Parâmetros geotécnicos das litologias típicas da Encosta do Morro do Curral

Litologia	γ (kN/m^3)	γ_d (kN/m^3)	w (%)	S (%)	e	G_s
Xisto Cinza	23,0	20,8	10,3	81,2	0,37	2,91
Xisto marrom a avermelhado	23,2	21,3	8,8	71,0	0,37	2,98

O ensaio de índice puntiforme constitui um parâmetro convencionalmente adotado para a determinação da resistência à compressão de rochas. O Quadro 3 apresenta os valores médios dos 46 ensaios de índice puntiforme executados em amostras dos xistos locais, identificados pela litologia e pela orientação relativa (paralela ou perpendicular) à foliação. Foram executados 24 ensaios nos xistos cinza, sendo 13 ensaios na orientação paralela à foliação e 11 ensaios na orientação perpendicular à foliação; nos xistos marrom a avermelhados foram efetuados 22 ensaios, sendo 11 ensaios na orientação perpendicular à foliação e 11 ensaios na orientação paralela à foliação.

Quadro 3 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão puntiforme executados nos xistos da encosta do Morro do Curral

Litologia	$I_{S(50,p)}$ (MPa)	σ (p)* (MPa)	$I_{S(50,pp)}$ (MPa)	σ (pp)* (MPa)	I_a $I_{S(50,p)} / I_{S(50,pp)}$
Xisto Cinza	0,15	3,45	0,041	0,94	3,66
Xisto Marrom ou amarelado	0,45	10,35	0,114	2,62	3,95

* valores obtidos por correlação a partir dos índices I_S (K =23); $I_{S(50,p)}$: índice puntiforme na direção perpendicular à foliação; $I_{S(50,pp)}$: índice puntiforme na direção paralela à foliação.

Os resultados evidenciam valores de resistência a compressão característicos de rocha branda, classificada como rocha muito fraca ou extremamente fraca (Hoek & Bray, 1981). Os valores das resistências à compressão, tanto normal como paralelamente à xistosidade, apresentam-se muito próximos, estando um pouco acima dos valores apresentados por Rocha (1981). Os índices de anisotropia (Ia) obtidos são bastante elevados, mas dentro do padrão apresentado na literatura técnica para rochas xistosas.

Nos ensaios de cisalhamento direto, foram realizadas duas campanhas de ensaios, nas direções paralela e perpendicular ao plano da foliação. Foram realizados ensaios para os estágios de tensão normal de 20 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa e 400 kPa, simulando em laboratório as condições gerais da encosta. O Quadro 4 sistematiza os resultados dos ensaios realizados em termos dos parâmetros de resistência das litologias típicas da encosta.

Quadro 4 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto executados em amostras das litologias típicas da Encosta do Morro do Curral

Litologia / direção do cisalhamento em relação à foliação	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Xisto cinza / direção paralela à foliação	47	30
Xisto cinza / direção perpendicular à foliação	75	69
Xisto marrom / direção paralela à foliação	50	55
Xisto marrom / direção perpendicular à foliação	200	78

Os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento apresentados no Quadro 4 estão de acordo com dados da literatura técnica. Entretanto, na grande maioria dos ensaios, não ficou caracterizada a delineação de uma superfície de ruptura contínua, única e conclusiva no corpo de prova, com nítida separação das bandas do xisto e sem interferências das crenulações. Em geral, o plano de ruptura foi descontínuo, sem uma definição clara da superfície de ruptura devido às fragmentações da amostra, pelo que os valores obtidos podem representar essencialmente fatores intrínsecos e localizados do maciço, sendo questionáveis, portanto, para a adoção em análises de estabilidade para áreas ou zonas mais abrangentes do maciço. Em face destas restrições, procedeu-se a um amplo programa de investigação de campo, em termos da modelação mecânica do maciço rochoso, de modo a se obter, ainda que através de correlações, parâmetros de resistência mais representativos dos materiais presentes.

6 - CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DO MACIÇO

Com a finalidade de se obter os índices característicos de qualidade do maciço, associados ao modelo geomecânico proposto para o projeto de engenharia de contenção da encosta, foram utilizados os sistemas de classificação baseados na quantificação de parâmetros que caracterizam os materiais rochosos e as suas descontinuidades.

Nesta caracterização geomecânica do maciço rochoso, foram identificados e individualizados 20 setores, num modelo de compartimentação definido pelas descontinuidades pré-existentes que interceptam o maciço e o domínio das feições, nos vários taludes ao longo da encosta, levando-se ainda em consideração critérios de acesso, extensão e representatividade da área em estudo.

A caracterização do maciço rochoso foi processada de acordo com os parâmetros indicados pela ISRM (1981) para a descrição quantitativa das descontinuidades, em termos de atitude, persistência, espaçamento, abertura, preenchimento, percolação e rugosidade. Dentro das campanhas de inspeção de campo, procedeu-se à abertura de 8 trincheiras ao longo da encosta, para verificação das descontinuidades e acompanhamento da foliação. Em alguns setores com morfologia mais irregular, foram delimitadas escarpas (degraus sub-verticais) e vertentes (relevos mais suaves).

O Quadro 5 apresenta a ponderação destes parâmetros para a estimativa do índice global RMR da classificação geomecânica de Bieniawski (1989).

Quadro 5 - Ponderação dos parâmetros do sistema RMR de Bieniawski (1989) para a encosta do Morro do Curral

Setor	σ (valores estimados)		RQD		Espaçamentos		Padrão Descont/.	Ação da água	Orientação Descont/.
	Valor (MPa)	Peso	Valor	Peso	Valor (m)	Peso			
1	5,0-25	2	94,78	20	3,05	20	0	15	-25
2	5,0-25	2	36,55	8	1,68	15	0	15	-50
3	5,0-25	2	38,27	8	1,81	15	0	15	-50
4	25-50	4	86,39	17	1,625	15	10	15	-25
5	5,0-25	2	49,81	8	3,39	20	0	15	-60
6	1,0-5,0	1	56,14	13	1,19	15	20	7	-5
7	1,0-5,0	1	56,15	13	1,19	15	20	7	-25
8	5,0-25	2	56,16	13	2,02	20	0	7	-25
9	5,0-25	2	50,65	13	1,41	15	0	15	-25
10	0,25-1,0	0	43,49	8	0,286	10	20	4	-25
11	5,0-25	2	36,89	8	0,565	10	0	15	-25
12	55,0-25	2	46,80	8	0,353	10	20	15	-25
13	5,0-25	2	51,75	13	1,02	115	0	15	-25
14	0,25-1,0	0	26,99	8	0,153	8	20	15	-25
15	0,25-1,0	0	38,00	8	0,220	10	20	15	-25
16	0,25-1,0	0	15,09	5	0,120	8	20	15	-25
17	0,25-1,0	0	27,00	8	0,153	8	20	15	-25
18	1,0-5,0	1	53,40	13	0,686	15	0	15	-5
19	5,0-25	2	57,75	13	1,686	15	25	15	-25
20	5,0-25	2	57,75	13	1,686	15	25	15	-25

Os resultados obtidos pela classificação de Bieniawski permitiram correlações para estimativa dos parâmetros de resistência e a respectiva classificação do padrão geomecânico das diferentes zonas do maciço rochoso da encosta.

Análises similares foram implementadas para a ponderação dos parâmetros característicos das classificações geomecânicas de Barton et al. (1974) e Romana (1990, 1996). Os padrões de compartimentação geomecânica do maciço rochoso da encosta do Morro do Curral estabelecidos a partir destas metodologias de classificação foram essencialmente análogos, sendo os índices globais destas análises correlacionados no Quadro 7.

Os resultados caracterizam o maciço rochoso como sendo medianamente homogêneo, de constituição xistosa e com intenso processo de alteração superficial. O maciço apresenta-se com um comportamento geomecânico normal, passando localmente a ruim e muito ruim, em áreas que exigem tratamento com relação à estabilidade. Adicionalmente, o maciço apresenta um elevado grau de anisotropia, quantificado pelo índice I_a .

Na sistemática da compartimentação geomecânica do maciço rochoso da encosta, o conjunto de 20 setores previamente definidos foram reagrupados em três conjuntos principais, designados como agrupamentos I, II e III (Fernandes, 2000), conforme descrição a seguir.

Quadro 6 - Classificação geomecânica do maciço pelo sistema RMR

Setor	RMR	Classe*	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)
1	32	IV	180-200	15-25
2	-10	V	<100	<15
3	-10	V	<100	<15
4	36	IV	100-200	15-25
5	-15	V	<100	<15
6	51	III	200-300	25-35
7	31	IV	100-200	15-25
8	17	V	<100	<15
9	20	V	<100	<15
10	17	V	<100	<15
11	10	V	<100	<15
12	30	IV	100-200	15-25
13	20	V	<100	<15
14	26	IV	100-200	15-25
15	28	IV	100-200	15-25
16	23	IV	100-200	15-25
17	26	IV	100-200	15-25
18	31	IV	100-200	15-25
19	45	III	200-300	25-35
20	45	III	200-300	25-35

* Classe III: Regular; Classe IV: Ruim; Classe V: Muito ruim.

Quadro 7 - Comparação entre os resultados obtidos pelos sistemas de classificação geomecânica utilizados nas análises.

Setor	RMR	SMR	Q	Setor	RMR	SMR	Q
1	32	9	1,263	**11**	10	20	0,615
2	-10	-29	0,387	**12**	30	29	2,08
3	-10	-42	0,102	**13**	20	19	0,518
4	36	22	1,079	**14**	26	27	0,675
5	-15	-2	0,491	**15**	28	18	1,266
6	51	49	1,235	**16**	23	14	1,066
7	31	38	0,370	**17**	26	24	1,800
8	17	28	0,371	**18**	31	38	1,180
9	20	29	0,084	**19**	45	46	2,543
10	17	15	0,362	**20**	45	46	3,816

Agrupamento I - Setores 1 a 6

É representado pela zona de dobramento (charneira e flanco E) e caracterizado por escarpas sub-verticais (zonas de charneira) e vertentes (flancos). Ocorrem blocos rochosos semi-engastados no maciço ao longo de toda esta área da encosta, depósitos de tálus e blocos soltos de tamanho métricos a centimétricos nos trechos menos inclinados e deposição de sedimentos na base da encosta. Os mecanismos de instabilização observados são desplacamentos, tombamentos de blocos e erosões. Durante o período chuvoso, ocorrem inúmeras surgências de água nas fraturas.

Agrupamento II - Setores 14 a 20

É representado pelos setores situados no topo da encosta e, estruturalmente, corresponde à zona de charneira da dobra. Apresenta foliação mergulhando 20-30° para sul, sem ou com poucos afloramentos, devido à cobertura de solo silto-argiloso ou areno-siltoso e revestimento vegetal. Não há sinais claros de instabilizações. Estes setores representam uma zona de recarga, área da encosta onde ocorre a alimentação superficial de águas por infiltração. Estas águas são concentradas ao longo das fraturas e tem como caminho preferencial a foliação.

Agrupamento III - Setores 7 a 13

Este agrupamento corresponde à zona perturbada pelo falhamento regional de direção E-W. Apresenta foliação variando fortemente e dobramentos do tipo "kink bands". As escarpas são altas (em torno de 15 m). Ocorre um depósito de tálus em trecho menos íngreme e sedimentos fluviais na base da encosta, no leito do córrego Caquende. São nítidos os processos erosivos e de instabilização de caráter progressivo, observando-se ainda a presença de muitos blocos soltos na vertente e desplacamento de lascas rochosas do maciço. No setor 10, especificamente, constata-se uma surgência de água em fratura com caráter perene.

7 – PROPOSTAS DE ESTABILIZAÇÃO

As soluções mais indicadas são as que consideram a melhor relação custo/benefício, o que significa priorizar a utilização de parte dos recursos (mão de obra, materiais e equipamentos) da própria região, adotar metodologias executivas mais simples e utilizar equipamentos disponíveis no local da implantação da obra.

Em função do modelo estrutural da encosta e dos parâmetros geomecânicos obtidos, são explicitados, nos itens subseqüentes, as diferentes propostas de tratamento e de minimização dos problemas geotécnicos detectados nos diferentes setores do maciço rochoso da encosta do Morro do Curral. Ratifica-se, mais uma vez, que as soluções incorporaram fortemente as premissas de cunho estético e paisagístico para a área, condicionadas pelas exigências específicas do conjunto arquitetônico e das normas de proteção ambiental do núcleo histórico da cidade de Ouro Preto, patrimônio mundial da humanidade. As soluções propostas estão representadas na Figura 4.

7.1 Agrupamento I

Como a encosta apresenta muitos blocos e lascas rochosas instáveis, as soluções convencionais poderiam optar por processos como revestimentos de concreto armado, concreto projetado ou produtos betuminosos, com eventuais ancoragens nos locais onde ocorrem blocos

ou lascas de maiores dimensões descolados do maciço. Tais soluções, além de onerosas, seriam francamente agressivas ao equilíbrio da paisagem local.

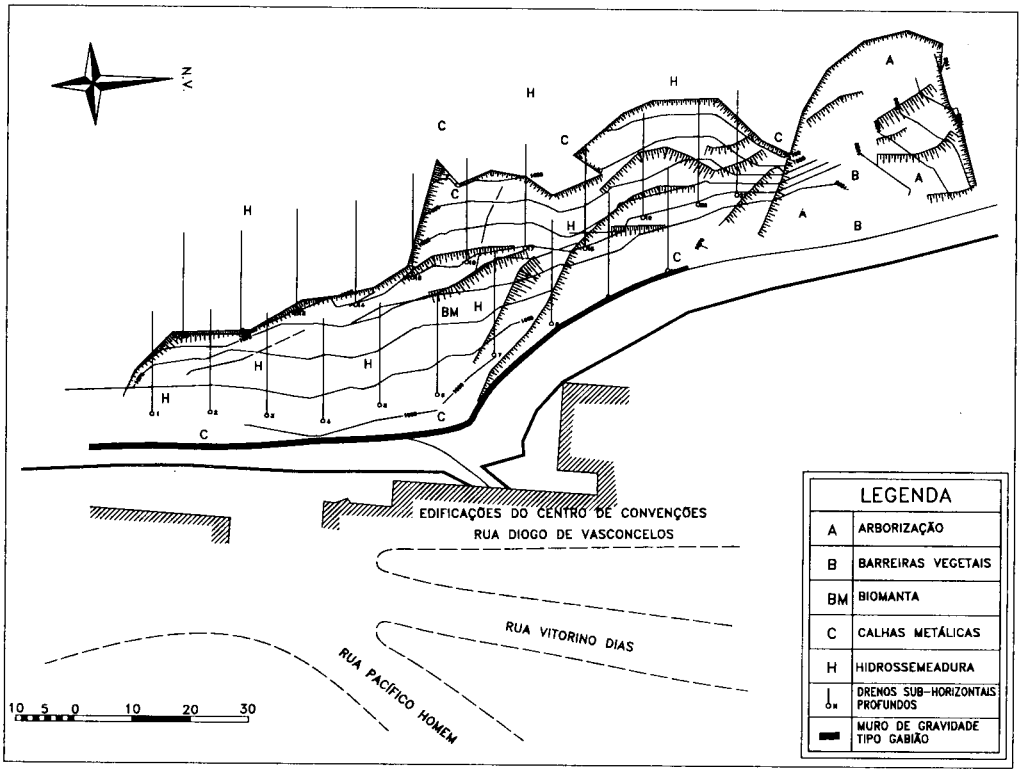

Fig. 4 – Projeto integrado de estabilização da encosta do Morro do Curral

O projeto buscou abranger estes diferentes aspectos do problema, fundamentando-se em uma solução integrada e harmônica ao ambiente da encosta. Na base da encosta, a contenção é constituída por um muro de gabiões, com transição em geotêxtil, projetado para apresentar uma elevada flexibilidade e construído com pedras de quartzito da Formação Moeda da estratigrafia regional, utilizadas genericamente como pedras ornamentais na região de Ouro Preto. Assim, a concepção considera a hipótese de deslocamentos diferenciais do conjunto, caracterizando uma interface ondulada do sistema de contenção, geometricamente enquadrada nas nuances geomorfológicas das vertentes da encosta.

Esta estrutura tem por objetivo básico servir de fronteira para contenção e acumulação das lascas e blocos de rocha deslocados da encosta, impedindo o estrangulamento e o assoreamento do leito do córrego do Caquende. Adicionalmente, pode ser utilizada como parede de uma eventual canalização do córrego, bastante poluído no local do empreendimento.

Nas escarpas e vertentes, após a remoção dos detritos soltos e entulhos, propôs-se a utilização de uma biomanta para desenvolvimento de vegetação e plantio de espécies nativas, atuando ainda como estrutura de confinamento dos materiais soltos e proporcionando proteção superficial contra fluxos das águas pluviais.

Na face da encosta, o projeto estabeleceu a execução de uma malha de drenos sub-horizontais profundos, para redução das poropressões do maciço, estabelecendo zonas preferenciais de fluxo. A drenagem superficial será adicionalmente controlada com a inclusão

de linhas em calhas de ferro fundido (a estrutura do Centro de Convenções corresponde à adaptação de uma antiga usina metalúrgica), eliminando-se a possibilidade de carreamento de finos e proporcionando-se o completo controle e direcionamento do fluxo de água superficial.

7.2 Agrupamento II

A solução racional para esta área é a realização de obras de proteção (barreiras vegetais) e obras de drenagem superficial. Nas obras de proteção, optou-se pela hidrossemeadura convencional para recomposição ambiental, formando uma defesa viva na cobertura de solo, essencial para manutenção do equilíbrio natural. Outras linhas de drenagem em calhas de ferro fundido foram projetadas para conduzir e disciplinar o fluxo das águas na encosta. As calhas deverão ter diâmetro de 0,40 m, espessuras da chapa de 1,5 mm e comprimentos de 150 m.

7.3 Agrupamento III

A solução viabilizada para esta área consiste de obras de proteção superficial (barreiras vegetais) e dispositivos de drenagem superficial, antecipadas por serviços de remoção de blocos deslocados e de lascas soltas das vertentes e escarpas. No sopé da encosta e margem do córrego Caquende, recomenda-se adotar a bacia de sedimentos como área de escape.

Nas obras de proteção superficial as barreiras vegetais serão intensificadas. Foram previstas barreiras vegetais para retenção e acumulação dos detritos segundo duas linhas de contenção. As estruturas, em número variável, deverão ser constituídas por paus roliços com diâmetro de 0,12 m e comprimentos inferiores a 3 m. As áreas do depósito de sedimentos (área de escape) deverão ser arborizadas, criando-se um bosque artificial que será uma defesa viva e eficiente. Nestes locais, propôs-se ainda a execução de uma camada vegetal, com aplicação de hidrossemeadura convencional, para recomposição de toda a área e a implantação de linhas de drenagem superficial na forma de calhas de ferro fundido, a exemplo das áreas adjacentes da encosta.

8 - CONCLUSÕES

O trabalho buscou definir, de forma integrada e abrangente, os condicionantes geológico-geotécnicos da encosta do Morro do Curral, visando estabelecer as bases para o modelo conceitual das análises de estabilidade e das propostas de estabilização da encosta, em face de que eventuais movimentos de massa e (ou) processos de erosão e assoreamento de curso d'água local poderiam vir a comprometer a infra-estrutura ou as condições operacionais do Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto, empreendimento de grande porte implantado junto à encosta.

As características das famílias de descontinuidades, de modo geral, são essencialmente similares em todos os setores. Detectou-se o predomínio de duas famílias de fraturas em toda a área da encosta, com direções N50E e E130S, apresentando mergulhos elevados para NW e SW. A xistosidade constitui a família de descontinuidades mais persistente. Em relação à modelação geomecânica do maciço, os parâmetros obtidos, guardadas as diferenças conceituais entre os diferentes métodos, forneceram resultados bastante compatíveis e consistentes com as condições de campo.

Os ensaios puntiformes realizados foram muito importantes para a determinação dos parâmetros de resistência e para a caracterização da anisotropia dos xistos locais. Estes

resultados, associados aos ensaios de laboratório, evidenciaram o comportamento de rochas brandas para os xistos da encosta. Os ensaios de cisalhamento direto permitiram quantificar os parâmetros de resistência destas rochas, ratificando os efeitos significativos da alteração e da anisotropia sobre o comportamento geotécnico destas litologias.

Na zona correspondente ao Agrupamento I da encosta, constituída pela charneira e pelos flancos da zona de dobramento, foram detectados predominantemente mecanismos de ruptura planar nas vertentes ao longo das famílias de foliação e rupturas por cunha nos planos de interseção das famílias de fraturas. Na região da encosta designada por Agrupamento II não se evidenciam sinais de instabilizações potenciais. O agrupamento III, correspondente à zona perturbada pelo falhamento regional, é condicionado por mecanismos de erosão concentrada e deslocamentos súbitos de blocos soltos pelas vertentes. Identificou-se, ainda, processos de desplacamento de lascas rochosas e blocos deslocados do maciço nas escarpas mais altas e íngremes, mas a situação global é de estabilidade, com baixa susceptibilidade a rupturas localizadas.

O padrão geomecânico determinado para o maciço rochoso é o de uma rocha branda, com baixa rigidez e elevada deformabilidade, com modelo estrutural de uma dobra aberta, de eixo na direção aproximadamente N/S e flanco bem inclinado.

A análise global dos resultados e a inserção da encosta em um contexto de sítio histórico de uma cidade considerada patrimônio mundial da humanidade condicionaram as soluções tecnicamente disponíveis àquelas adequadamente inseridas à natureza, ao histórico e às realidades específicas do empreendimento. Neste sentido, o conjunto de soluções propostas visou a obtenção de um projeto integrado e naturalmente vinculado às condicionantes fisiográficas locais, comportando estrutura de contenção em gabião, mediante a utilização de pedras ornamentais da região, conjugado com obras de proteção, feitas de barreiras vegetais com paus roliços formando uma cortina vazada, biomantas e hidrossemeadura, além de dispositivos de drenagem subterrânea (drenos sub-horizontais profundos) e de drenagem superficial (revestimentos em calhas de ferro fundido).

Como proposição complementar, propôs-se um sistema simplificado de controle e monitoramento da encosta, avaliando-se a eficácia das soluções implementadas, ao longo do tempo e particularmente nas estações chuvosas. Os resultados poderiam ser extrapolados ao domínio geral da encosta do Morro do Curral e demais encostas adjacentes, no sentido de se avançar no estudo de mecanismos potenciais de instabilização destas encostas.

Estes estudos têm sido bastante intensificados recentemente através de programa de pesquisa específico, direcionado a encostas similares e a outras feições constituídas por diferentes unidades lito-estratigráficas do espaço urbano da cidade de Ouro Preto (Gomes, 2002).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barton, N.; Lien, R. & Lunde, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, Vol.6, n°4, pp.189-236, 1974.

Bieniawski, Z. T. Engineering Rock Mass Classification. New York, John Wiley, 215p, 1989.

Bonuccelli, T.J. Estudo dos Movimentos Gravitacionais de Massa e Processos Erosivos com Aplicação na Área Urbana de Ouro Preto/MG – escala 1:10000. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, USP, 3v., 191p, 1999.

Carvalho, E. T. Carta geotécnica de Ouro Preto. Dissertação de mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 1982.

Fernandes, G. Caracterização Geológico-geotécnica e Propostas de Estabilização da Encosta do Morro do Curral - Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 160p, 2000.

Gomes, R. C. Classificações Geomecânicas de Maciços Rochosos. Publicação Interna, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 37p, 1991.

Gomes, R.C. Projeto Imagem: Identificação, Mapeamento Geotécnico e Monitoramento de Encostas da Área Urbana da Cidade de Ouro Preto/MG. Universidade Federal de Ouro Preto, 2002 (a publicar).

Hoek, E. & Bray, J. W. Rock Slope Engineering, IMM. 358p., 1981.

ISRM. Suggested Methods – Rock Characterization Testing & Monitoring. International Society for Rock Mechanics. E.T. Brown (ed.), Pergamon Press, 1981.

Rocha, M. Mecânica das Rochas. Lisboa, LNEC. 445p, 1981.

Romana, M. SMR classification. 7th International Congress of Rock Mechanics, Vol.2, pp.955-960, 1990.

Romana, M. The SMR geomechanical classification for slopes: a critical ten-years review. Landslides, Balkema (ed), pp.255-267, 1996.

Sobreira, F. G. Levantamento de áreas de risco geológico no espaço urbano de Ouro Preto. Ouro Preto: Convênio UFOP-Ministério da Cultura/SPHAN, 85p, 1990.

Sobreira, F. G.; Araújo, L. G. & Bonuccelli, T. J. Levantamento de soluções estruturais para a contenção de encostas em Ouro Preto. Ouro Preto: Convênio UFOP - Ministério da Cultura/SPHAN, 91p, 1990.