



Leonardo Erik Chávez Bautista

**Influência das Tensões de Origem Térmica em Problemas
de Estabilidade de Blocos Rochosos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Jr.



Leonardo Erik Chávez Bautista

**Influência das Tensões de Origem Térmica em Problemas
de Estabilidade de Blocos Rochosos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr

Orientador e Presidente

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Rodrigo Peluci de Figueiredo

Universidade Federal de Ouro Preto UFOP

Prof. Cláudio Palmeiro do Amaral

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Emílio Velloso Barroso

Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de setembro de 2007.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Leonardo Erik Chávez Bautista

Graduou-se em Geologia de Engenharia em 2001 pela Universidad Nacional de San Agustín (UNSA-Peru). Ingressou em 2005 no curso de mestrado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, desenvolvendo dissertação de mestrado na linha de pesquisa de Mecânica das Rochas.

Ficha Catalográfica

Bautista, Leonardo Erik Chávez

Influência das tensões de origem térmica em problemas de estabilidade de blocos rochosos / Leonardo Erik Chávez Bautista ; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Jr. – 2007.

71 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Mecânica de rochas. 3. Propagação de fraturas. 4. Tensões térmicas. I. Vargas Junior, Eurípedes do Amaral. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

Aos meus pais, Ana María e Leonardo
pelo seu amor, confiança e apoio inesgotáveis.

Agradecimentos

Aos meus pais, e irmãos pelo apoio, carinho e compreensão ao longo dos meus estudos.

Ao professor Eurípedes Vargas, pela orientação recebida ao longo da realização deste trabalho.

Ao professor Luiz Gusmão, pelo apoio, ajuda e participação no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores Rodrigo Peluci e Cláudio Amaral pela ajuda e conselhos sempre oportunos.

A CAPES pelo apoio financeiro, sem o qual este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio pelos ensinamentos recebidos.

A todos meus amigos do mestrado, por terem sido parte importante nesta jornada, em especial ao Antônio, Fabio, Johan, Geraldo e Arthur por compartilhar bons momentos em casa; à Marianna pela ajuda para melhorar minha gramática; ao Wagner pela permanente cooperação. Ao João, Pedro, Marcelo e Priscila, pela ajuda e amizade ao longo destes anos de mestrado. À Marlene, Julio e Roberto amigos da sala de estudo; ao Hyllttonn, Maria Fernanda e Paola, importantes nas tardes de café. Ao Raffaello, Felipe e Carlos pela amizade espontânea.

Ao José Silvestre, pela ajuda na parte computacional deste trabalho.

À secretária de pós-graduação Ana Roxo e Rita de Cássia pela grande ajuda nestes anos de mestrado

Aos funcionários do laboratório de Geotecnia pela grande ajuda.

Ao professor Pablo Meza da Universidad Nacional de San Agustín (UNSA – Perú) pelos seus conselhos e amizade.

A todas as pessoas que contribuíram de maneira direta ou indireta para a realização deste trabalho.

Resumo

Chávez Bautista, Leonardo Erik. **Influência das Tensões de Origem Térmica em Problemas de Estabilidade de Blocos Rochosos**. Rio de Janeiro, 2007. xxxp. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No ano 1999 as quedas de blocos rochosos já representaram cerca de 8% dos diferentes tipos de escorregamentos registrados no Rio de Janeiro. A atividade antrópica gera um aumento das áreas de risco devido às construções próximas da base de escarpas rochosas e uma aceleração destes fenômenos. Desde 1993 o número de quedas de lascas e blocos rochosos a partir de faces de pedreiras desativadas tem aumentado.

As condições geológicas e estruturais da região favorecem este fenômeno ao discretizarem blocos nos taludes rochosos. Muitas destas quedas tem sido reportadas em condições climáticas particulares, em períodos relativamente secos correspondentes aos meses de junho, julho e agosto.

O presente trabalho discute que, dentro dos possíveis mecanismos para a ocorrência destes fenômenos, está a variação térmica diária, a qual pode criar tensões que favorecem a propagação de fraturas existentes dentro dos maciços rochosos.

Por tal motivo, simulou-se em laboratório as condições de um maciço rochoso fraturado e obtiveram-se dados das variações diárias de temperatura, mediante a disposição de blocos rochosos graníticos simulando a forma da fratura e com o auxílio de sensores térmicos em diferentes posições, como na superfície, no interior e na fresta. A partir disto elaborou-se um modelo de bloco com auxílio do software ABAQUS para se determinar a variação dos valores de concentração de tensões sob a influência térmica.

Palavras-chave

Mecânica de Rochas, Propagação de Fraturas, Tensões Térmicas.

Abstract

Chávez Bautista, Leonardo Erik. **Influence of the Stresses of Thermal Origin in Problems of Rock Blocks Stability**. Rio de Janeiro, 2007. xxxp. MSc. Dissertation - Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In 1999, the falls of rock blocks had represented about 8% of the different types of slides registered in Rio de Janeiro. The anthropic activity generates an increase of the risk areas due the building of vulnerable houses near to foot rock scarps, and an acceleration of these phenomena. Since 1993 the number of falls of rock blocks from slopes of disactivated quarries has increased.

The geologic and structural conditions of the region favor this phenomenon forming blocks in rock slopes. Many of these falls have been reported in particular climatic conditions, in relatively dry periods correspondents to the months of June, July and August.

This work argues that, the daily thermal variation could be one of the possible mechanisms for the occurrence of these phenomena, which can create stresses to propagate cracks already existing on the rock mass.

For such reason, conditions of a broken rock mass was simulated in laboratory to obtain daily temperature variations, it was made by the disposal of granitics rock blocks simulating a fracture form, where was placed thermal sensors.

From this, a model of rock block in the ABAQUS software was elaborated to determine the variation of stress concentration factor values under the thermal influence

Keywords

Rock Mechanics, Fracture Propagation, Thermal Stresses

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Objetivos e Organização da Dissertação	16
2	Tipos de Escorregamentos em Maciços Rochosos	18
2.1	Ruptura Planar	18
2.2	Ruptura em Cunha	19
2.3	Ruptura por Tombamento	20
2.4	Ruptura Circular	20
2.5	Movimento de Blocos Rochosos	21
2.5.1	Queda de Blocos	21
2.5.2	Rolamento de blocos	21
2.5.3	Deslocamento	22
2.6	Taludes Rochosos No Estado De Rio De Janeiro	22
2.6.1	Casos de queda de Rocha	24
3	Propriedades e Tensões Térmicas	28
3.1	Propriedades Térmicas	28
3.1.1	Calor Específico	28
3.1.2	Condutividade Térmica	29
3.1.3	Expansão Térmica	31
3.2	Tensões Térmicas	33
4	Mecanismos de Fratura	35
4.1	Critério de Energia	35
4.2	Fator de Intensidade de Tensão	36
5	Aquisição De Dados	40
5.1	Equipamento e Material	40
5.1.1	Sensor LM35	40

5.1.2	Equipamento de Aquisição de Dados	42
5.1.3	Sistema de Aquecimento	44
5.1.4	Bloco Rochoso	45
5.2	Desenvolvimento do Equipamento de Aquisição De Dados	45
5.2.1	Etapas e Procedimento	46
5.2.2	Instalação De Sensores De Temperatura	50
6	Simulação Computacional	53
6.1	Análise de Bloco de Rocha Sujeito à Variações Térmicas	53
6.1.1	Descrição do Problema	53
6.1.2	Propriedades Utilizadas e Validação	55
6.1.3	Resultados	57
6.1.4	Discussão	65
7	Conclusões e Sugestões	68
7.1	Conclusões	68
7.2	Sugestões	69
8	Referências Bibliográficas	70

Lista de figuras

Figura 2.1 – Ruptura Planar	19
Figura 2.2 – Ruptura em Cunha	19
Figura 2.3 – Ruptura por Tombamento	20
Figura 2.4 Ruptura Circular	21
Figura 2.5 Queda de Blocos	21
Figura 2.6 Rolamento de Blocos	21
Figura 2.7 Desplacamento	22
Figura 2.8 Tipologia dos escorregamentos significativos no Estado de Rio de Janeiro (Silva et al., 2000).	23
Figura 2.9 Vista Frontal da escarpa rochosa no local Village das Pedras.	25
Figura 2.10 Pé do talude depois da remoção de casas no Rego Barros	25
Figura 2.11 Acidente de queda de rocha em 1996 no local de Contorno.	26
Figura 2.12 Vista frontal do talude rochoso no Mal. Rondon	26
Figura 2.13 Vista Frontal da escarpa rochosa no Visconde de Sabóia.	27
Figura 3.1 Fluxo térmico numa placa	30
Figura 3.2 Placa retangular	34
Figura 4.1 Trinca de comprimento $2a$ numa placa infinita	36
Figura 4.2 Modos de carregamento básico que pode ser aplicado numa trinca	36
Figura 4.3 Coordenadas polares e tensões ao redor da ponta de uma trinca	37
Figura 5.1 – Escala do sensor LM 35	41
Figura 5.2 – Dimensões do sensor LM 35	41
Figura 5.3 – Equipamento da serie DI-710	43
Figura 5.4 – Registro Autônomo de Dados	43
Figura 5.5 – Módulo de Aquecimento	44
Figura 5.6 – Condições de leitura da temperatura	47
Figura 5.7 – Sistema de aquecimento e leitura	47
Figura 5.8 – Face inferior, aquecimento (18 W)	48
Figura 5.9 – Face inferior, desaquecimento. (18W)	48
Figura 5.10 – Distribuição de blocos e sensores térmicos	50

Figura 5.11 – Encapsulamento dos Sensores	51
Figura 5.12 – Disposição dos blocos e detalhe dos sensores de superfície e ambiente	51
Figura 5.13 – Resultado das medidas realizadas durante três dias.aproximadamente	52
Figura 5.14 – Gráfico comparativo das variações térmicas obtidas.	52
Figura 6.1 – Condições da simulação	53
Figura 6.2 – Malha e Condições de Contorno utilizadas	54
Figura 6.3 – Comparação das variações térmicas medidas e calculadas ao longo de um tempo aproximado de 6 dias	56
Figura 6.4 – Comparação das variações térmicas medidas e calculadas ao longo de um tempo aproximado de 6 dias	56
Figura 6.5 – Variação dos valores de K em função da variação térmica para um bloco pequeno	58
Figura 6.6 – Variação dos valores de K em função da variação térmica para um bloco mediano	59
Figura 6.7 – Variação dos valores de K em função da variação térmica para um bloco grande	60
Figura 6.8 – Variação dos valores de K em função da variação térmica para um bloco pequeno	61
Figura 6.9 – Variação dos valores de K em função da variação térmica para um bloco mediano	61
Figura 6.10 – Variação dos valores de K em função da variação térmica para um bloco grande	62
Figura 6.11 – Variação dos valores de K em função da variação térmica para um bloco mediano num tempo de 12 dias.	63
Figura 6.12 – Variação dos valores de K em função da variação térmica para um bloco mediano num tempo de 12 dias, para diferentes temperaturas iniciais internas.	64
Figure 6.13– Granitos Utinga e Favela.	65
Figure 6.14– Resultados dos valores de KIc para Granito Favela sob modo I de carregamento	65
Figure 6.15– Resultados dos valores de KIc para Granito Utinga sob modo I de	

carregamento.

66

Figure 6.16– Resultados de ensaios de tenacidade mostrando o angulo entre o corte e a foliação e os níveis de alteração.

66

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Casos de quedas de rocha (Vargas et al, 2004)	24
Tabela 3.1 – Valores de calor específico para algumas substâncias.	29
Tabela 3.2 – Valores de condutividade de alguns materiais	31
Tabela 3.3 – Valores de coeficiente de dilatação linear	33
Tabela 3.4 – Valores de coeficiente de dilatação volumétrica	33
Tabela 5.1 – Quadro comparativo dos tempos T1 e T2	49
Tabela 6.1 – Resumo de valores máximos de K para diferentes condições.	67

Lista de Símbolos

Romanos

a	Metade do comprimento da fratura
A_i	Área inicial do corpo
c	Calor específico
C	Capacidade térmica
$\frac{dT}{dy}$	Gradiente térmico
E	Módulo de elasticidade
G	Taxa de alívio de energia potencial
G_c	Taxa de variação crítica
G'	Módulo de cisalhamento
k	Conductividade térmica
K	Fator de intensidade de tensão
K_I	Fator de intensidade de tensão no modo I
K_{II}	Fator de intensidade de tensão no modo II
K_{III}	Fator de intensidade de tensão no modo III
K_{IC}	Fator de intensidade de tensão crítica
L_i	Comprimento inicial do corpo
l	Espessura de uma placa
m	Massa
q	Fluxo de calor
r	Coordenada polar
T	Variação da temperatura num ponto
V_i	Volume inicial do corpo

Gregos

α	Coeficiente de expansão térmica
α_l	Coeficiente de dilatação térmica linear
β	Coeficiente de dilatação térmica superficial
ΔT	Variação da temperatura
φ	Ângulo de atrito interno
θ	Coordenada polar
γ	Coeficiente de dilatação térmica volumétrica
σ	Tensão de tração
σ_x	Tensão térmica na direção x
σ_z	Tensão térmica na direção z
ν	Coeficiente de Poisson
ω	Ângulo de mergulho da descontinuidade
Ψ	Angulo de mergulho do talude