

## 6 Simulação Computacional

Neste capítulo é apresentada uma análise computacional, utilizando o programa comercial ABAQUS (ABAQUS, 2001) de um bloco de rocha sobre uma superfície inclinada sujeito à diferentes variações de temperatura ao longo do tempo. São descritas as propriedades empregadas, o modelo utilizado e os resultados obtidos.

### 6.1.

#### Análise de Bloco de Rocha Sujeito à Variações Térmicas

##### 6.1.1.

##### Descrição do Problema

Esta análise tem como por objetivo avaliar através do programa ABAQUS a variação do fator de intensidade de tensão  $K$  ao longo do tempo, de um bloco rochoso fraturado, exposto a diferentes variações de temperatura na sua superfície e na fresta, sobre um talude de  $60^\circ$  de inclinação, como é mostrado na figura 6.1

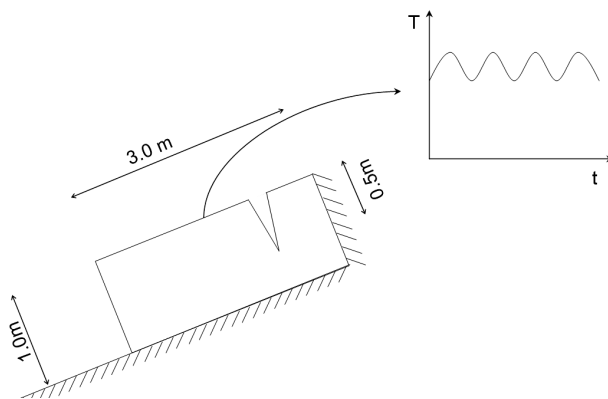


Figura 6.1 – Condições da simulação

Nesta análise foram aplicadas as seguintes condições de contorno de deslocamento, a face inferior do bloco tem restrição de deslocamento no eixo vertical e é livre no horizontal; na face da direita, a parte superior a partir do ponto médio o deslocamento é liberado nas duas direções, e a parte inferior tem restrição de deslocamento no sentido horizontal.

As condições de contorno de temperatura foram feitas através das variações de temperatura medidas na superfície e na fresta, as da superfície são utilizadas ao longo da face superior e no lado esquerdo do bloco, enquanto que as medidas na fresta são utilizadas a partir do ponto médio até a parte superior da face direita do bloco. A figura 6.2 apresenta a malha e as condições de contorno utilizadas.

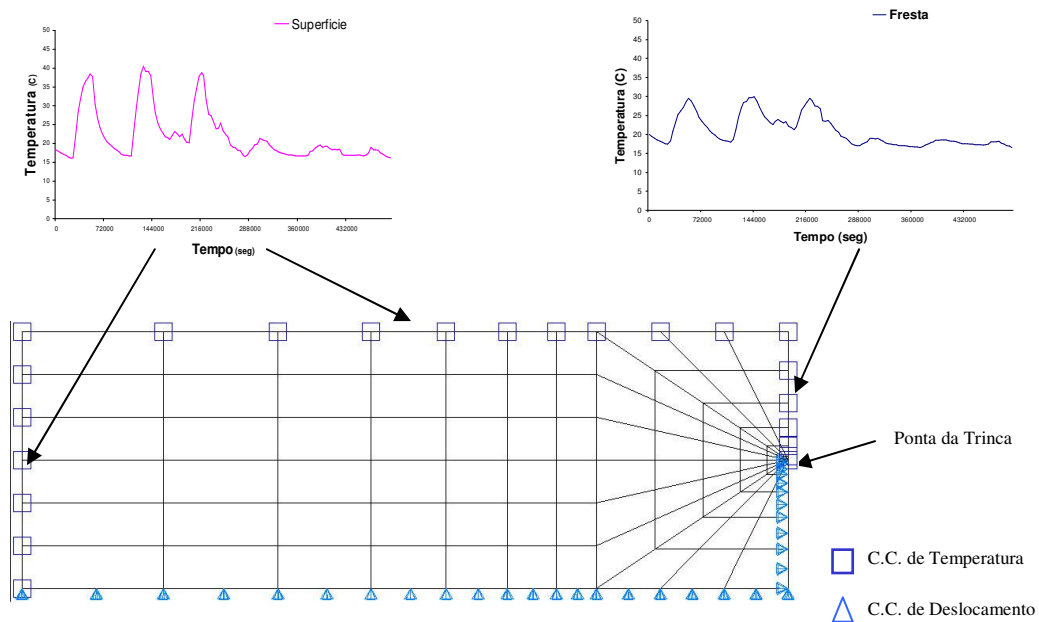


Figura 6.2 – Malha e Condições de Contorno utilizadas

### 6.1.2.

#### Propriedades Utilizadas e Validação

Os parâmetros da rocha utilizados na simulação foram obtidos da literatura e são apresentados a seguir:

- Módulo de Young: 40 GPa,
- Coeficiente de Poisson: 0,2,
- Condutividade térmica: 3 J/s m °C,
- Expansão Térmica:  $11,0 \times 10^{-6} \text{°C}^{-1}$ ,
- Calor específico:  $0,75 \times 10^{-3} \text{ MJ/ kg x °C}$ ,
- Densidade: 2,65 kg/dm<sup>3</sup>.

As variações de temperatura tanto da fresta como da superfície são dados fornecidos pelo sistema de aquisição, anteriormente explicado.

Para a validação dos parâmetros da rocha adotados, e do programa, foi simulado um bloco com dimensões similares ao do bloco aonde foram medidas pelos sensores térmicos as variações de temperatura. O bloco em questão tem dimensões aproximadas de 0,3m de comprimento e 0,2m de altura.

Como foi visto além das temperaturas na superfície e na fresta também foram obtidas temperaturas do interior do bloco. Então esta temperatura medida foi comparada com a temperatura calculada no interior do bloco modelado.

Foram feitas duas comparações, cada uma delas com variações térmicas num tempo aproximado de 6 dias.

A primeira apresenta uma transição de variações altas de temperatura num período aproximado de três dias, a variações baixas num período de tempo similar, como se pode ver na figura 6.3.

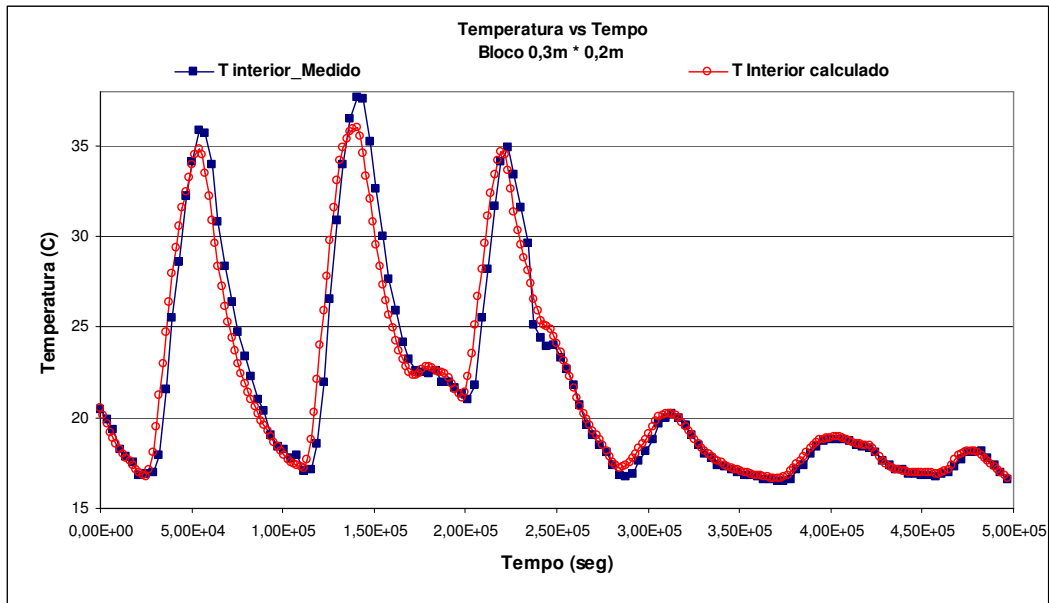


Figura 6.3 – Comparação das variações térmicas medidas e calculadas ao longo de um tempo aproximado de 6 dias

Na figura 6.4, é apresentado o mesmo tipo de comparação, mas com uma transição de baixas a altas variações térmicas, num tempo total de 6 dias aproximadamente.

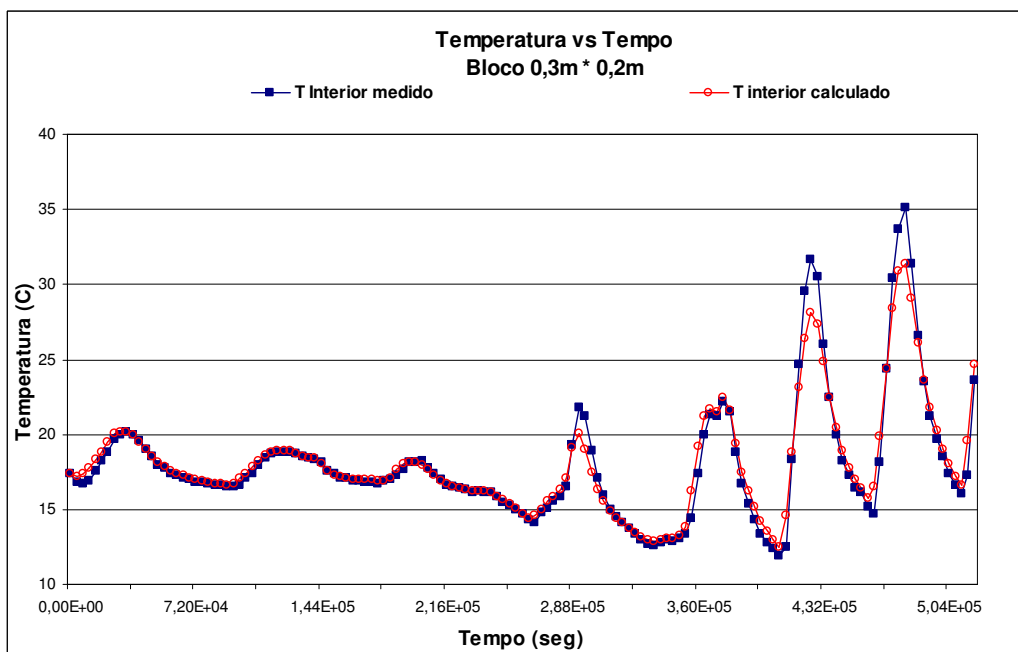


Figura 6.4 – Comparação das variações térmicas medidas e calculadas ao longo de um tempo aproximado de 6 dias

O comportamento das variações medidas e calculadas evidencia grande similaridade, o qual dá respaldo ao comportamento térmico modelado para blocos de diferentes dimensões e para as propriedades utilizadas na modelagem.

A validação apresentada nos parágrafos anteriores foi realizada partindo-se dos valores de literatura, destes valores, apenas o de condutividade térmica foi alterado de modo a obter melhor aproximação com os dados medidos.

Foram feitas três simulações com relação ao tamanho de bloco, um bloco pequeno, de 0.30m de comprimento e 0.20 m de altura; um bloco mediano de 3m de comprimento e 1m de altura; e um grande de 30m de comprimento e 10m de altura. Para todos eles é considerado o mesmo tipo de malha mostrada anteriormente.

### **6.1.3.**

#### **Resultados**

Na figura 6.5 é apresentado o resultado da variação do fator de intensidade de tensão,  $K$  em função das variações térmicas, para um bloco pequeno com transição térmica de altas à baixas variações.

As temperaturas que atingem valores maiores correspondem às medidas na superfície do bloco e que servem de condicionante na modelagem, sendo que as mais baixas são as temperaturas registradas na fresta, as do interior do bloco são temperaturas calculadas.

Observa-se que os valores de  $K$  diminuem quando a temperatura superficial (TS), é maior que a temperatura no interior do bloco e o efeito contrário é produzido quando TS é menor que a temperatura interna do bloco. Mas as variações dos valores de  $K$  são obviamente correspondentes aos valores térmicos, isto é, que enquanto as variações sejam altas haverá grande variação nos valores de  $K$ , já quando as variações térmicas sejam baixas o valor de  $K$  variará pouco. O máximo valor de  $K$  é  $0,35 \text{ MPa.m}^{1/2}$ .

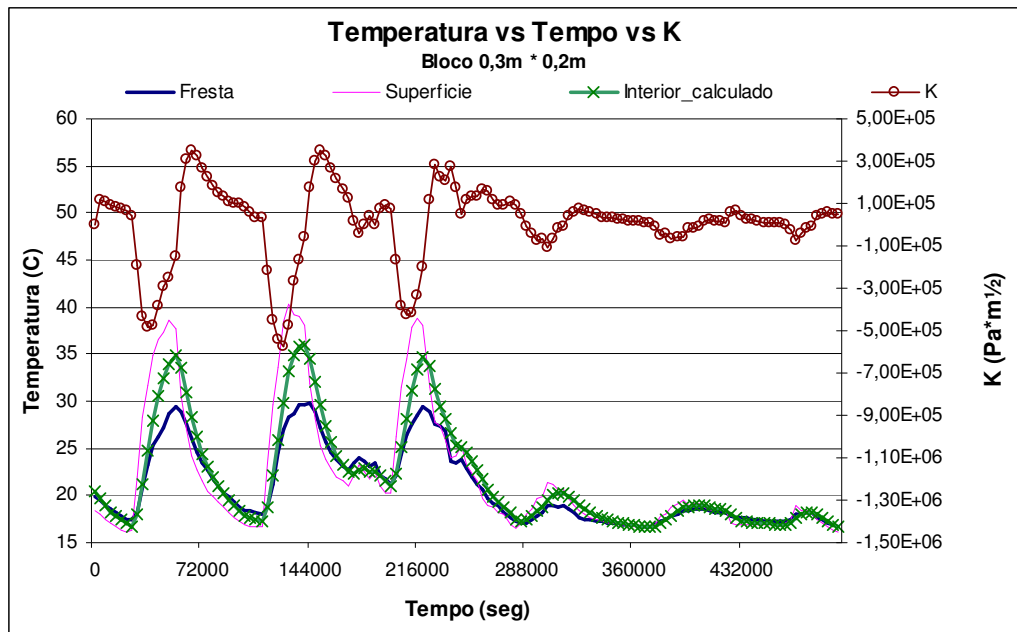


Figura 6.5 – Variação dos valores de K em função da variação térmica para um bloco pequeno

Na figura 6.6 são apresentados os valores de K para um bloco mediano, neste caso são introduzidas três diferentes temperaturas iniciais do interior do bloco, e seus correspondentes valores de K.

Sendo que  $T_i=20,5$  corresponde às temperaturas do interior do bloco calculadas a partir de uma temperatura inicial de  $20,5$  °C, e seus correspondentes valores de  $K_a$ . Para os valores de  $K_b$  a temperatura inicial é  $25$  °C, e para  $K_c$ ,  $T_i = 30$  °C.

Observa-se que inicialmente as diferentes temperaturas internas introduzidas geram diferentes valores de K, tendo valores altos de K para um maior valor da temperatura interna do bloco, mas ao longo do tempo ambos valores terminam se equalizando. O que evidencia que num tempo a temperatura interna na qual se encontra o bloco pode determinar valores razoáveis de K.

Para uma  $T_i= 20,5$  °C ,o maior valor de K é  $1,06 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , para  $T_i = 25$ °C, K é  $1,31 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , finalmente para  $T_i = 30$ °C, K é  $2,1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

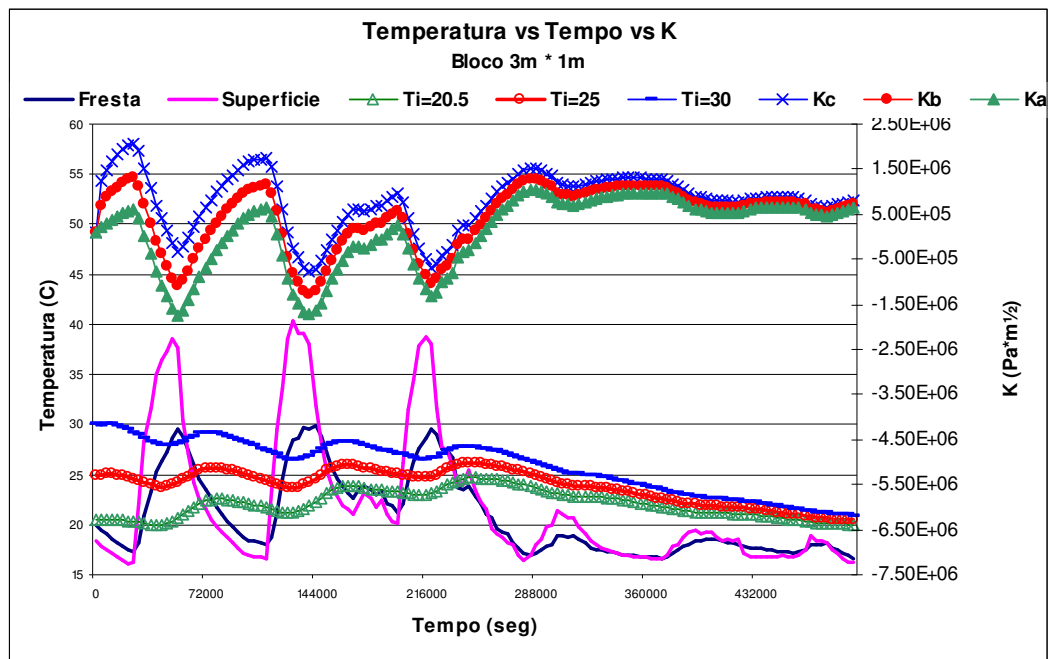


Figura 6.6 – Variação dos valores de K em função da variação térmica para um bloco mediano

As variações dos valores do fator de concentração de tensões K para um bloco grande são apresentadas na figura 6.7.

Como foi feito anteriormente, também foram introduzidos valores distintos de temperatura interna inicial do bloco, mas neste caso pelas dimensões, estas temperaturas permanecem praticamente constantes ao longo do tempo sem serem afetadas pelas variações térmicas externas. Pelo que pode se observar, enquanto a temperatura interna do bloco seja menor que a temperatura superficial os valores de K serão menores. E o valor de K aumenta quando as temperaturas superficiais são menores que a temperatura interna do bloco. Os maiores valores de K vão de 4 a 7 MPa.m<sup>1/2</sup>, tendo-se em consideração que este é um caso extremo.

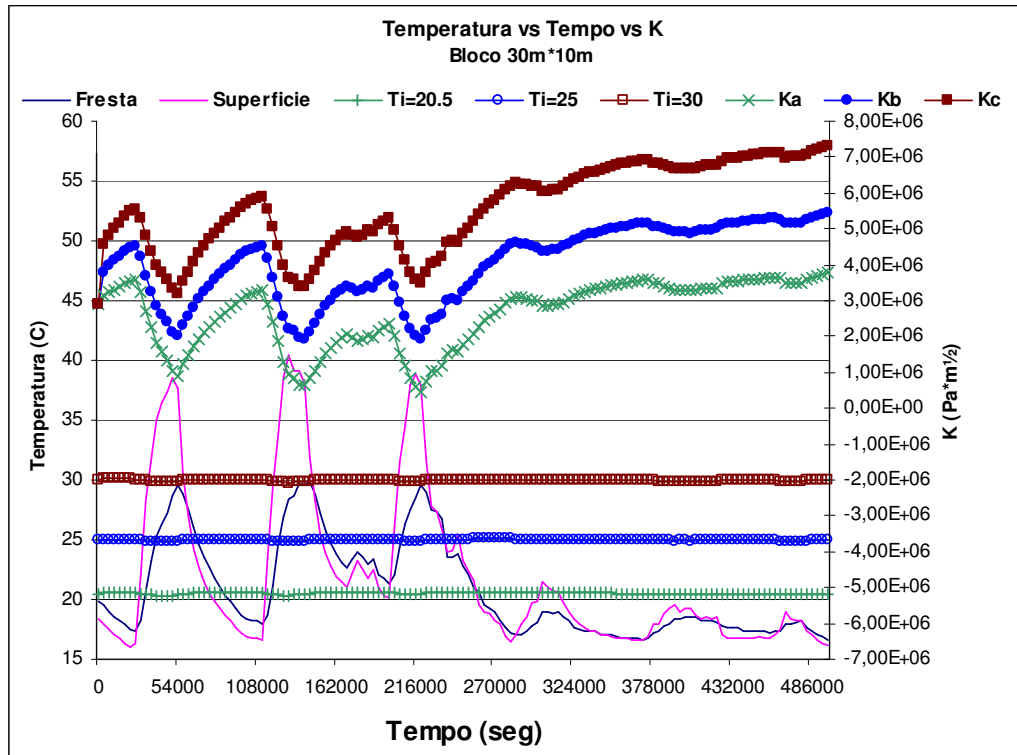


Figura 6.7 – Variação dos valores de K em função da variação térmica para um bloco grande

Os resultados da variação do fator de intensidade de tensão, K em função das variações térmicas, para um bloco pequeno com transição térmica de baixas a altas variações, são apresentados na figura 6.8, e na figura 6.9 e 6.10 são apresentados estes resultados para um bloco mediano e grande respectivamente. Apresentando características similares como as descritas nos casos anteriores.



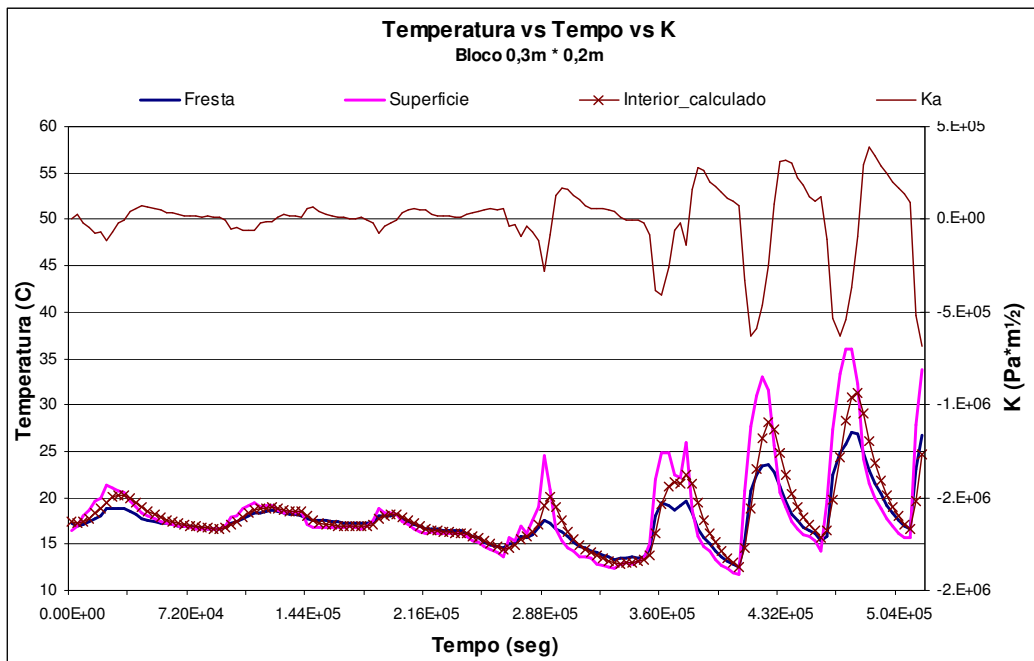


Figura 6.8 – Variação dos valores de K em função da variação térmica para um bloco pequeno

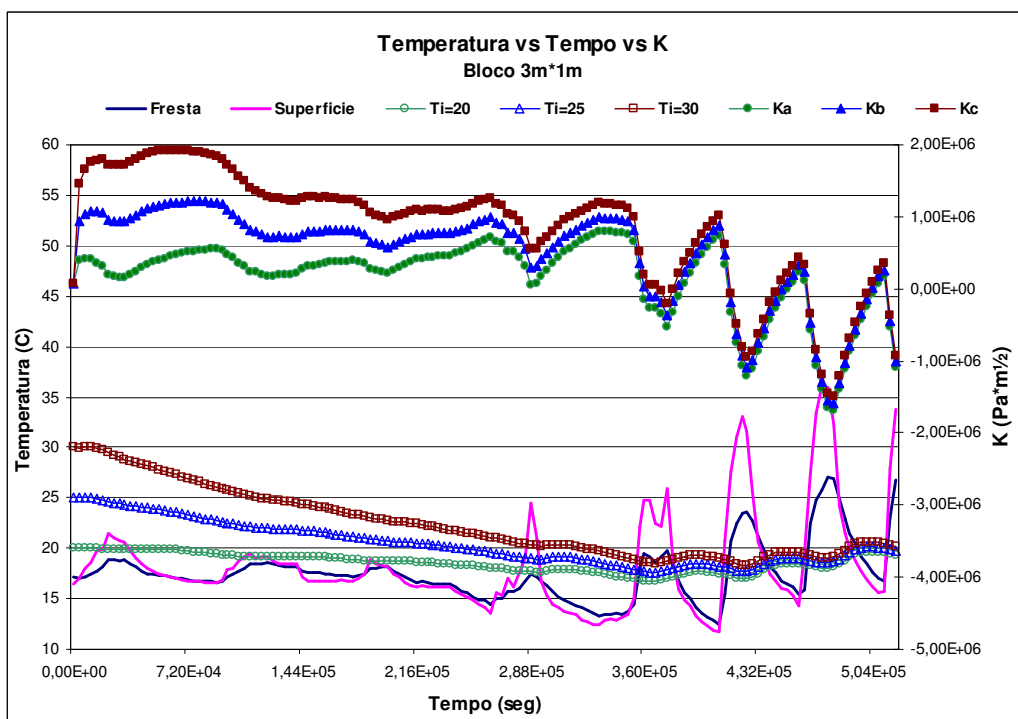


Figura 6.9 – Variação dos valores de K em função da variação térmica para um bloco mediano

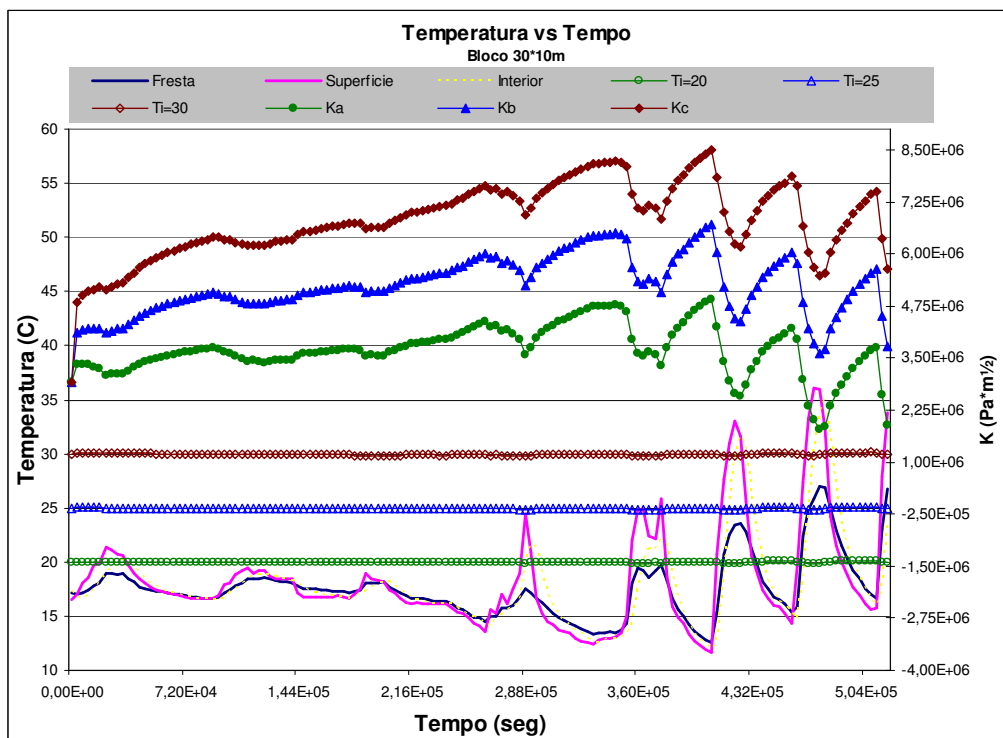


Figura 6.10 – Variação dos valores de K em função da variação térmica para um bloco grande

Na figura 6.11 se apresenta, a variação térmica correspondente a 12 dias aproximadamente, e tem uma transição de temperaturas altas a baixas e vice-versa; e os valores de K calculados. Nesta simulação foi utilizado o bloco mediano por considerá-lo mais representativo, e a temperatura inicial do interior do bloco foi a correspondente medida pelo sistema de aquisição de dados.

O maior valor de K é  $1,05 \text{ MPa.m}^{1/2}$ , o qual é gerado na transição de temperaturas altas a baixas.

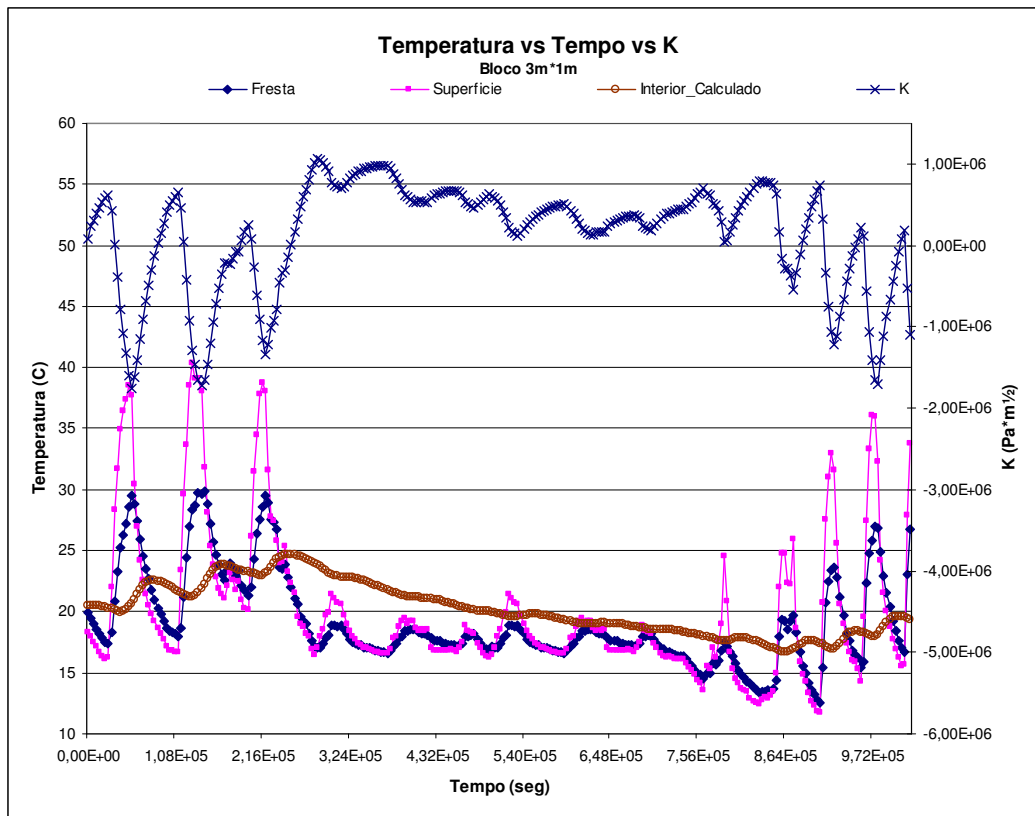


Figura 6.11 – Variação dos valores de K em função da variação térmica para um bloco mediano num tempo de 12 dias.

Como é observado na figura 7.11, a temperatura interna do bloco parece determinante para os valores de K, desta forma procurou-se um comportamento contínuo da temperatura interna do bloco que variasse numa pequena faixa de valores, como é mostrado na figura 6.12. Para isto foram calculados os valores de concentração de tensões para três diferentes valores de temperatura interna inicial, que ao longo de aproximadamente um tempo de 5 dias as variações térmicas internas se equalizam, mostrando um mesmo comportamento. O mesmo comportamento acontece para os valores de K, considerando que  $K_a$  representa os valores calculados para uma temperatura interna inicial de 20 °C, para  $K_b$  e  $K_c$ , 25°C e 30°C respectivamente.

O comportamento que se apresenta mais uniforme, com menor variação de faixas em relação as variações térmicas interna é o correspondente a temperatura inicial de 25 °C, e para o qual o valor maior de K é  $1,3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

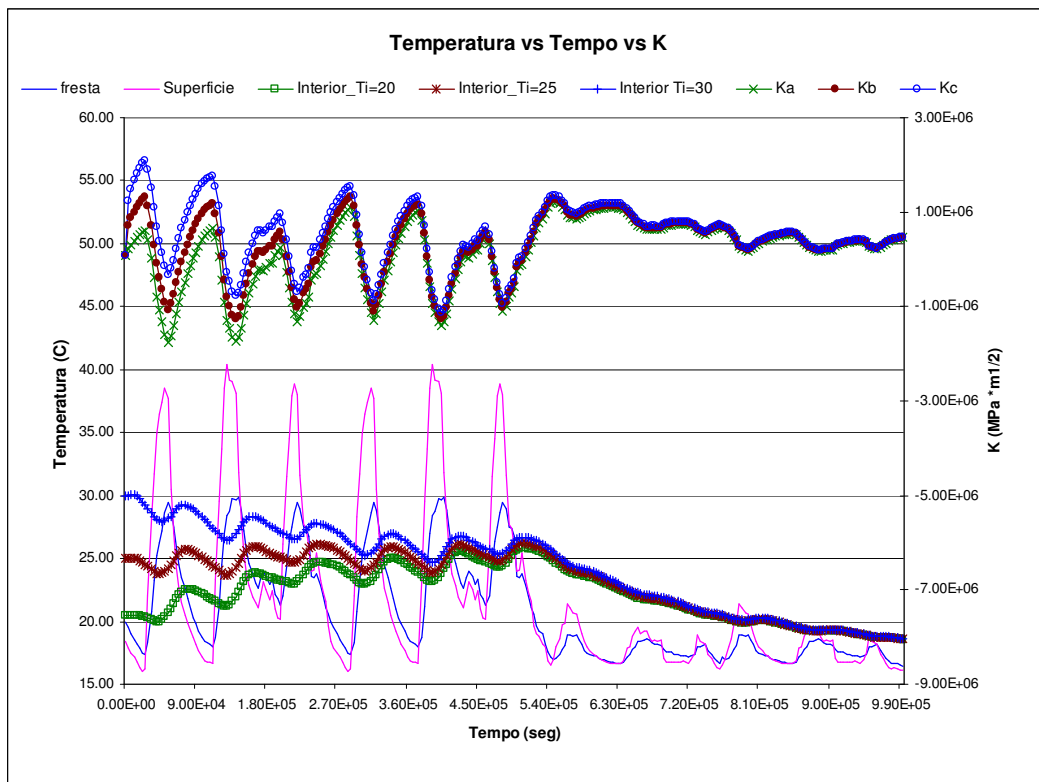


Figura 6.12 – Variação dos valores de K em função da variação térmica para um bloco mediano num tempo de 12 dias, para diferentes temperaturas iniciais internas.

#### 6.1.4.

#### Discussão

Almeida (2006), apresentou resultados de valores de  $K_{Ic}$ , para dois tipos de rochas graníticas encontradas no Rio de Janeiro chamadas de granito Utinga e Favela, que são definidas como intrusões graníticas em gneiss do proterozoico. São granitoides hornblenda-biotita, de grão fino a medio, equigranular a porfiritico, localmente apresentam foliação. Na figura 6.13 são mostrados estes granitos

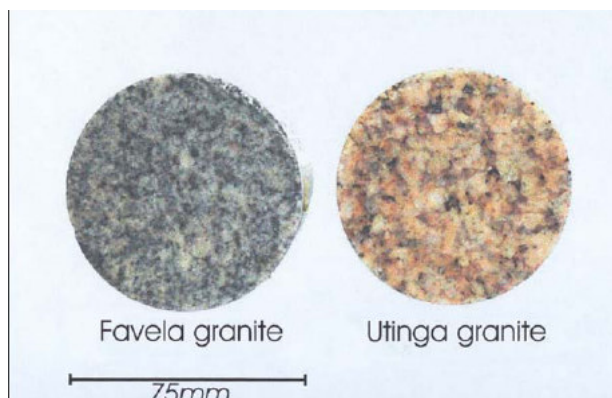


Figure 6.13– Granitos Utinga e Favela.

Estas rochas foram testadas sob o modo I de carregamento, e os resultados são apresentados nas figuras 6.14 e 6.15

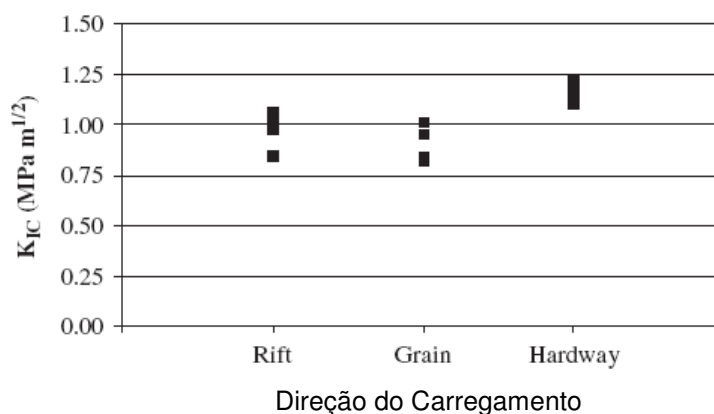


Figure 6.14– Resultados dos valores de  $K_{Ic}$  para Granito Favela sob modo I de carregamento

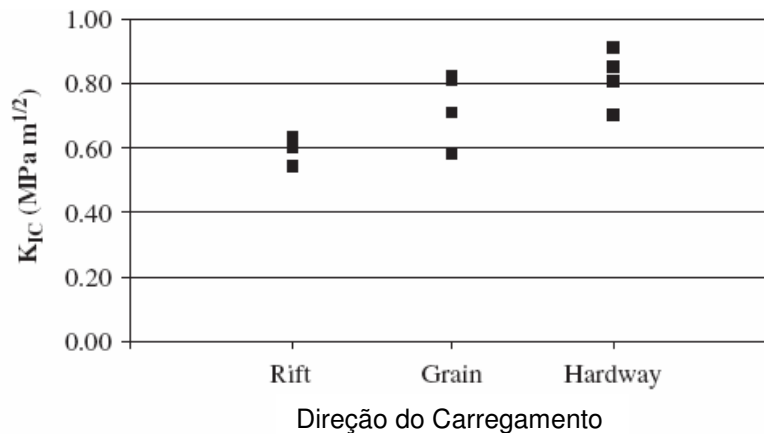


Figure 6.15– Resultados dos valores de  $K_{Ic}$  para Granito Utinga sob modo I de carregamento.

Considerando que para um bloco mediano como foi modelado, os valores máximos de  $K$  estão em torno de  $1,3 \text{ MPa.m}^{1/2}$  (com temperatura inicial interna de  $25^\circ\text{C}$ ). Este valor supera os valores de  $K_{Ic}$  do granito Utinga e Favela.

Santos (2006) apresenta valores de  $K_{Ic}$  para rochas de diferentes níveis de alteração, nível I = rocha sã, nível II = rocha levemente alterada e nível III para rochas moderadamente alteradas. Os resultados são apresentados na figura 6.16.

A rocha analisada foi um gneiss porfiroblástico, composto por quartzo feldespato e mica.

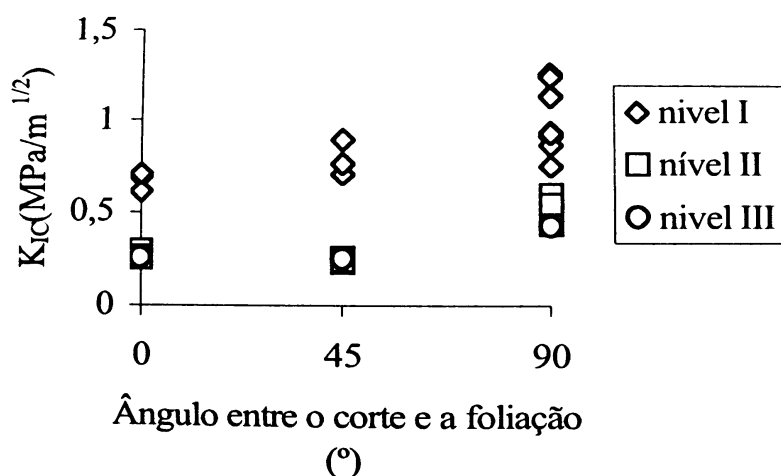


Figure 6.16– Resultados de ensaios de tenacidade mostrando o ângulo entre o corte e a foliação e os níveis de alteração.

O valor de K calculado a partir do modelo de um bloco mediano supera na maioria dos casos os valores de  $K_{Ic}$  apresentados na figura 6.16.

Para fins de comparação são mostrados na tabela 6.1 os valores de intensidade de carga de tensão só pela ação do peso do bloco num talude inclinado de 60°.

Tabela 6.1 – Resumo de valores máximos de K para diferentes condições.

Tamanho do Bloco	Valores de K para $T_i = 0$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )
Pequeno	0,003570
Mediano	0,080785
Grande	2,919350

Como foi visto anteriormente existe uma grande probabilidade de fraturas se propagarem nas condições modeladas para um bloco mediano.

Segundo Miranda (2003), fadiga é um tipo de falha mecânica caracterizada pela geração e/ou propagação paulatina de uma trinca, causada pelas repetições dos carregamentos aplicados, podendo ainda em muitos casos causar a fratura do meio. Diversos parâmetros afetam a resistência do meio à fadiga, sendo esses relativos às solicitações, geometria, propriedades dos materiais e ambiente externo. Os parâmetros de solicitação incluem estados de tensões, razão entre os fatores de intensidade de tensões máximo e mínimo, carregamentos constantes ou variáveis, frequências ou tensões máximas. A geometria da estrutura influencia principalmente o gradiente das tensões e os fatores de intensidade de tensões. É como parte importante desses parâmetros, claramente estão as propriedades mecânicas e térmicas que caracterizam o comportamento do material. Os parâmetros do ambiente externo incluem temperaturas e agressividade do ambiente.

As variações do valor de K dependem das temperaturas e como estas são cíclicas é de se esperar que K tenha um comportamento parecido, o que é observado nos gráficos anteriores. Na são em todos os casos mostrados que se atingem valores que superem os de valores  $K_{Ic}$  referenciados no presente trabalho, mas é possível que condições se repitam para quando estes valores sejam iguais ou maiores, e que tenham comportamento cíclicos ao longo de períodos maiores de tempo dos apresentados. Pelo qual pode também se relacionar que as possíveis variações cíclicas sazonais levem, em longos períodos de tempo a rupturas por fadiga.