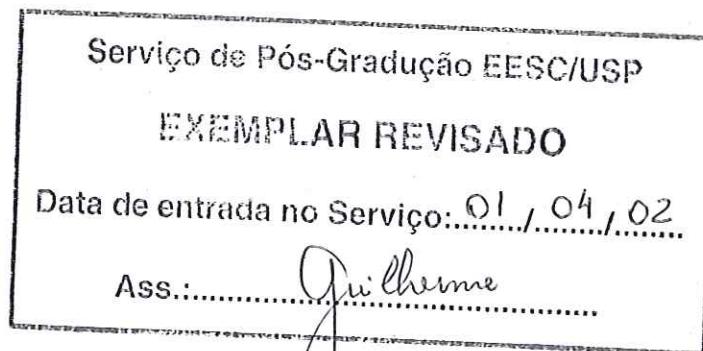


# ESTUDO DA DILATAÇÃO TÉRMICA DE ROCHAS USADAS EM REVESTIMENTO DE EDIFICAÇÕES



José Janio de Castro Lima

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geotecnia



31100036900

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassú



São Carlos

2002

Class. Tese - EESC  
Cult. L30397  
Tombo 10073/02

st 1237036

1237036

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC/USP

L732e

Lima, José Janio de Castro  
Estudo da dilatação térmica de rochas usadas em  
revestimento de edificações / José Janio de Castro  
Lima. -- São Carlos, 2002.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de  
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.

Área: Geotecnica.

Orientador: Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassú

1. Dilatação térmica. 2. Granito. 3. Gnaissse. 4.  
Rochas ornamentais. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Geólogo **JOSÉ JANIO DE CASTRO LIMA**

Dissertação defendida e julgada em 12-03-2002 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Tit. ANTENOR BRAGA PARAGUASSU (Orientador)  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Dr. ELY BORGES FRAZÃO  
(Instituto de Pesquisas Tecnológicas/IPT)

Prof. Dr. ANTONIO CARLOS ARTUR  
(UNESP/Campus de Rio Claro)

*[Signature]*  
**JOSÉ CARLOS A. CINTRA**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*[Signature]*  
Aprovador

*[Signature]*  
Aprovada

*[Signature]*  
Aprovada

*Dedico este modesto trabalho à minha mãe  
Maria Delfina de Lima, meus irmãos,  
sobrinhos, cunhados e cunhadas,  
e em especial ao meu pai  
Juraci de Castro Lima  
(“in memoriam”)*

*“...A culpa é da mentalidade criada sobre a  
região, porque que tanta gente teme?  
Norte não é com M, nossos índios  
não comem ninguém, agora  
é só hambúrguer, por que  
ninguém nos leva a  
sério? Só o nosso  
minério....”*  
*(Mosaico de Ravenna)*

## AGRADECIMENTOS

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida;

Ao Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassu pela amizade, orientação e dedicação;

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) pela liberação dos corpos-de-prova, em especial aos geólogos Maria Heloísa B. O. Frascá e Eduardo B. Quitete e ao técnico Fábio Queiroz;

Ao geólogo Dr. Ely Borges Frazão pela amizade, criação do tema de pesquisa e valiosas sugestões;

À Universidade Estadual Paulista (Unesp-Rio Claro), pela liberação do uso do dilatômetro e ao Prof. Dr. Antônio Carlos Arthur pelas discussões e sugestões;

A todos os professores e técnicos do Departamento de Geotecnia, em particular os Dr. Lázaro Valentim Zuquette, José Eduardo Rodrigues e Nelson Aoki pelas valiosas sugestões;

Aos mestrandos e doutorandos do Departamento de Geotecnia, em especial aos meus conterrâneos (geólogos Domingos Borges; Dirlene Gomes, Sara Rodrigues, Gilvana Marques e Sandra Silva);

Aos amigos Engº. Jesalay H. C. dos Reis; geólogos Maurico Giambastiani e Holden Amorim pelas discussões e ajuda durante o desenvolvimentos desse trabalho;

As amigas geólogas Silvana Brandão, Ezilma Dias e Engº Monique Salgado e Ihary Maia;

Ao geólogo Paulo Maurício S. Lopes pelo apoio e amizade;

A Engª de Minas Ana Valéria Rabelo Vieira, pela compreensão, dedicação, incentivo e amor.

A Deus....

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	i
<b>LISTA DE TABELAS</b>	v
<b>LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIAÇÕES</b>	vii
<b>RESUMO</b>	xi
<b><i>ABSTRACT</i></b>	xii
<b><i>Capítulo 1</i></b>	1
<b>INTRODUÇÃO</b>	1
<b><i>Capítulo 2</i></b>	4
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	4
<b>2.1 – Terminologia das Rochas Ornamentais e de Revestimento</b>	4
<b>2.2 – Aspectos Tecnológicos das Rochas Ornamentais e de Revestimento</b>	6
<b>2.2.1 - FUNÇÕES</b>	6
<b>2.2.2 - SOLICITAÇÕES</b>	7
<b>2.2.3 – CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA</b>	7
<b>2.3 – Parâmetros Térmicos de Minerais e Rochas</b>	10
<b>2.3.1 – CAPACIDADE TÉRMICA</b>	10
<b>2.3.2 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA</b>	12
<b>2.3.3 – DILATAÇÃO TÉRMICA</b>	17
<b>2.3.3.1 – Considerações Iniciais</b>	17
<b>2.3.3.2 – Dilatação Térmica dos Minerais e das Rochas</b>	18
<b>2.3.3.3 – Determinação da Dilatação Térmica</b>	25
<b>2.3.4 – VALORES DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS</b>	31
<b>2.4 – Assentamento das Rochas de Revestimento</b>	32
<b>2.4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b>	32
<b>2.4.2 – ANCORAGE METÁLICA</b>	33
<b>2.4.3 - ARGAMASSAS</b>	36
<b>2.4.4 – AS JUNTAS NOS REVESTIMENTOS</b>	38

<i>Capítulo 3</i>	41
MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 – Análise e Determinações Realizadas	43
3.1.1 – ANÁLISE PETROGRÁFICA	43
3.1.2 – ÍNDICES FÍSICOS	43
3.1.3 – COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR	44
3.1.4 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS	44
3.2 – Integração dos Resultados	45
3.2.1 – ROCHAS GRANÍTICAS	45
3.2.2 – ROCHAS GNÁISSICAS	46
3.3 – Equipamentos Usados na Determinação de $\beta$	46
3.3.1 – EQUIPAMENTO DO IPT	47
3.3.2 – EQUIPAMENTO DA Unesp	48
<i>Capítulo 4</i>	52
CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DAS ROCHAS ESTUDADAS	52
4.1 – Análise Petrográfica	52
4.2 – Índices Físicos	64
4.3 – Coeficiente de Dilatação Térmica Linear ( $\beta$ )	68
4.4 – Velocidade de Propagação de Ondas	73
<i>Capítulo 5</i>	78
ANÁLISE DOS RESULTADOS	78
5.1 – Análise dos Valores do Coeficiente de Dilatação	78
5.2 – Estudo de Probabilidade do Coeficiente de Dilatação	79
5.3 – Taxa de Aquecimento Usada na Determinação de $\beta$	80
5.4 – Análise dos Resultados das Rochas Graníticas	81
5.5 – Análise dos Resultados das Rochas Gnáissicas	87
5.6 – Sugestão de Fórmula Empírica para Determinação de $\beta$	89
5.7 – Previsão do Coeficiente de Dilatação Térmica Linear	91

<i>Capítulo 6</i>	95
CONCLUSÕES	95
6.1 - Geral	95
6.2 - Rochas Graníticas	96
6.3 - Rochas Gnáissicas	96
<i>Capítulo 7</i>	97
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
<i>Capítulo 8</i>	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

## LISTA DE FIGURAS

### *Capítulo 2*

<p>FIGURA 2.1 - Correlação entre a capacidade térmica e a densidade de minerais (RZHEVSKY &amp; NOVIK, 1971)</p> <p>FIGURA 2.2 - Variação da capacidade térmica das rochas com o aumento da temperatura. 1-basalto; 2-diabásio e 3-quartzito (RZHEVSKY &amp; NOVIK, 1971)</p> <p>FIGURA 2.3 - Curva mostrando a dependência da condutividade térmica das rochas com o tamanho dos grãos (RZHEVSKY &amp; NOVIK, 1971)</p> <p>FIGURA 2.4 - Curvas de comparação mostrando a relação entre condutividade térmica e porosidade. 1-fluxo de calor ao longo das fraturas; 2-poros esféricos isolados; 3-poros esféricos não isolados; 4-curva média dos tipos cúbicos; 5-para rochas bimodal; 6-o fluxo de calor atravessa perpendicular as fraturas (RZHEVSKY &amp; NOVIK, 1971)</p> <p>FIGURA 2.5 - Dependência da condutividade térmica das rochas com a temperatura. 1-dunito; 2-dolomito; 3-granito; 4-quartzo monzonito; 5-mármore; 6 sienito e 7-calcário (RZHEVSKY &amp; NOVIK, 1971)</p> <p>FIGURA 2.6 - Esquema de extração dos corpos-de-prova (PERES-RODRIGUES &amp; SOUZA, 1983)</p> <p>FIGURA 2.7 - Esquema de extração de corpos-de-prova (RIVAS <i>et al.</i>, 2000)</p> <p>FIGURA 2.8 - Dependência do coeficiente de dilatação térmica linear com a temperatura em quartzo-pórfiro (RZHEVSKY &amp; NOVIK, 1971)</p> <p>FIGURA 2.9 - Esquema simplificado dos aparelhos experimentais (RICHTER &amp; SIMMONS, 1974)</p> <p>FIGURA 2.10 - Dilatômetro de quartzo fundido, com transdutores do tipo <i>LVDT</i> (LO &amp; WAI, 1983)</p> <p>FIGURA 2.11 - Dilatação térmica do quartzo segundo KOZU &amp; TAKANE (1929) (<i>apud</i> RICHTER &amp; SIMMONS, 1974)</p> <p>FIGURA 2.12 - Comparação da dilatação térmica do quartzo fundido (PINCUS &amp; HOSKINS, 1985)</p>	<p style="text-align: right;">11</p> <p style="text-align: right;">12</p> <p style="text-align: right;">14</p> <p style="text-align: right;">14</p> <p style="text-align: right;">16</p> <p style="text-align: right;">20</p> <p style="text-align: right;">21</p> <p style="text-align: right;">24</p> <p style="text-align: right;">25</p> <p style="text-align: right;">26</p> <p style="text-align: right;">27</p> <p style="text-align: right;">28</p>
---	---

FIGURA 2.13 - Posicionamento dos extensômetros elétricos de fio: a) corpo-de-prova cilíndrico e b) corpo-de-prova prismático (EQUIPE DE FURNAS, 1997)	29
FIGURA 2.14 - Equipamentos: a) caixa térmica com os corpos-de-prova e b) corpos-de-prova com extensômetros colados no fundo da caixa (EQUIPE DE FURNAS, 1997)	30
FIGURA 2.15 - Modelos de extensômetros: a) modelo Kyowa e b) modelo Kratos (EQUIPE DE FURNAS, 1997)	30
FIGURA 2.16 - Processos de revestimento de uma edificação com placas de rocha (FRAZÃO & PARAGUASSU, 1998)	32
FIGURA 2.17 - Esquema de funcionamento dos dispositivos de fixação, retenção e sustentação de placas. 1-suporte; 2-placa de revestimento; 3-dispositivo metálico; 4-dispositivo metálico de retenção; 5-partes resistentes da placa; 6-sentido de inclinação da placa (FLAIN, 1995)	33
FIGURA 2.18 - Dispositivo de fixação metálica (FLAIN, 1995)	34
FIGURA 2.19 - Esquema de assentamento de placa usando dispositivo de fixação metálica (ROCHAS DE QUALIDADE, 2001)	34
FIGURA 2.20 - Método convencional usado no revestimento de paredes (FIORITO, 1994)	36
FIGURA 2.21 - Método convencional usado no revestimento de piso sobre laje (FIORITO, 1994)	37
FIGURA 2.22 - Folgas mínimas especificadas entre a placa e o componente de fixação (ABNT – NBR- 13708)	39

### *Capítulo 3*

FIGURA 3.1 - Esquema de extração dos corpos-de-prova do granito “Prata Interlagos”. 1 a 12 corpos-de-prova (comprimento de 90 mm e diâmetro de 27 mm), 20° a 70° ângulos entre os CP	42
FIGURA 3.2 - Esquema de extração dos corpos-de-prova do gnaisse “Cinza Corumbá”. 1 a 10 corpos-de-prova (comprimento de 90 mm e diâmetro de 27 mm), 45° ângulos entre os CP	42
FIGURA 3.3 - Esquema do dilatômetro do IPT	47

*Capítulo 4*

FIGURA 4.1 - Detalhe do granito “Prata Interlagos”, mostrando o aspecto maciço da rocha	53
FIGURA 4.2 - Distribuição da granulação dos granitos estudados	53
FIGURA 4.3 - Conteúdo de quartzo nos granitos estudados	54
FIGURA 4.4 - Detalhe do gnaisse “Cinza Corumbá”, mostrando a orientação da rocha	59
FIGURA 4.5 - Detalhe do gnaisse “Cinza Corumbá”, exibindo a orientação da rocha	59
FIGURA 4.6 - Conteúdo de quartzo nos gnaisses estudados	60
FIGURA 4.7 - Distribuição da granulação nos gnaisses estudados	60
FIGURA 4.8 - Distribuição dos valores de porosidade aparente dos granitos estudados	66
FIGURA 4.9 - Distribuição dos valores de porosidade aparente dos gnaisses estudados	68
FIGURA 4.10 - Distribuição de valores do coeficiente de dilatação térmica linear dos granitos estudados	71
FIGURA 4.11 - Distribuição de valores do coeficiente de dilatação térmica linear dos gnaisses estudados	73
FIGURA 4.12 - Distribuição dos valores da velocidade de propagação de ondas dos granitos estudados	75
FIGURA 4.13 - Distribuição dos valores da velocidade de propagação de ondas dos gnaisses estudados	77

*Capítulo 5*

FIGURA 5.1 - Distribuição dos 101 corpos-de-prova estudados e a curva de ajuste de Gauss	79
FIGURA 5.2 - Gráfico comparativo entre a velocidade de propagação determinada antes (em azul) e depois (em róseo) da determinação de $\beta$	81

FIGURA 5.3 -	Velocidade de propagação de ondas (VP) <i>versus</i> porosidade aparente ( $\eta$ ) para os granitos	81
FIGURA 5.4 -	$\beta$ <i>versus</i> $\eta$ para os granitos com granulação média e conteúdo em quartzo de 30%. r, coeficiente de correlação	84
FIGURA 5.5 -	$\beta$ <i>versus</i> $\eta$ para os granitos com granulação grossa e conteúdo em quartzo de 30%. r, coeficiente de correlação	84
FIGURA 5.6 -	$\beta$ <i>equivalente</i> <i>versus</i> percentual de quartzo para os granitos com granulação média e grossa	86
FIGURA 5.7 -	$\beta$ <i>equivalente</i> médio <i>versus</i> percentual de quartzo. r, coeficiente de correlação	87
FIGURA 5.8 -	Distribuição do erro da fórmula e a curva de ajuste de Gauss	87
FIGURA 5.9 -	Fluxograma da rotina usada no programa	90
FIGURA 5.10 -	Porosidade aparente <i>versus</i> VP para o gnaisse “Cinza Corumbá”. Com VP medido paralela (1, 2 e 3) e perpendicular (4, 5 e 6) à gnaissificação e em outras direções (7, 8, 9 e 10)	91
FIGURA 5.11 -	Porosidade aparente <i>versus</i> VP para os 31 CP de gnaisse analisado. Com VP medido paralela (em azul) e perpendicular (em róseo) à gnaissificação e em outras direções (em amarelo)	92

## LISTA DE TABELAS

### *Capítulo 2*

TABELA 2.1 -	Normas técnicas para caracterização de rochas ornamentais e de revestimento	8
TABELA 2.2 -	Ensaios, análises e determinações recomendados para mármores e granitos, conforme o emprego	9
TABELA 2.3 -	Valores limites para algumas propriedades tecnológicas fixadas pela ASTM e sugeridos por FRAZÃO & FARJALLAT (1995a e 1996)	9
TABELA 2.4 -	Valores de algumas características tecnológicas de rochas ornamentais brasileiras	10
TABELA 2.5 -	Comparação da condutividade térmica entre minerais e rochas	13
TABELA 2.6 -	Comparação das condutividades térmicas de rochas cristalinas e vítreas	13
TABELA 2.7 -	Anisotropia na condutividade térmica	15
TABELA 2.8 -	Condutividade térmica de alguns “granitos” brasileiros	16
TABELA 2.9 -	Energias de ligação para os quatro mecanismos de ligação	17
TABELA 2.10 -	Dilatação térmica de rochas e seus conteúdos relativos de SiO <sub>2</sub>	19
TABELA 2.11 -	Valores experimentais dos coeficientes de dilatação térmica	20
TABELA 2.12 -	Resultado da dilatação térmica de 4 amostras de granito	21
TABELA 2.13 -	Valores do coeficiente de dilatação térmica volumétrico para as rochas lunares	22
TABELA 2.14 -	Valores médios de $\beta$ determinados para diferentes temperaturas	24
TABELA 2.15 -	Propriedades térmicas de alguns minerais e rochas	31
TABELA 2.16 -	O número de ancoragens em função do tamanho da placa	35

#### *Capítulo 4*

TABELA 4.1 -	Síntese dos aspectos petrográficos dos granitos estudados	55
TABELA 4.2 -	Síntese dos aspectos petrográficos dos gnaisses estudados	61
TABELA 4.3 -	Valores de massa específica aparente ( $\rho$ ), porosidade aparente ( $\eta$ ) e absorção d'água aparente ( $\alpha$ ) dos granitos estudados	64
TABELA 4.4 -	Valores de massa específica aparente ( $\rho$ ), porosidade aparente ( $\eta$ ) e absorção d'água aparente ( $\alpha$ ) dos gnaisses estudados	67
TABELA 4.5 -	Valores de $\beta$ determinados na Unesp e no IPT	68
TABELA 4.6 -	Valores do coeficiente de dilatação térmica linear ( $\beta$ ) dos granitos estudados	69
TABELA 4.7 -	Valores do coeficiente de dilatação térmica linear ( $\beta$ ) dos gnaisses estudados	71
TABELA 4.8 -	Valores de velocidade de propagação de ondas (VP) dos granitos estudados	73
TABELA 4.9 -	Valores de velocidade de propagação de ondas (VP) dos gnaisses estudados	76

#### *Capítulo 5*

TABELA 5.1 -	A média e o desvio-padrão dos valores de $\beta$ determinados na Unesp e no IPT	78
TABELA 5.2 -	Valores de probabilidade para as rochas estudadas	79
TABELA 5.3 -	Valores de velocidade de propagação de ondas determinados antes e depois de $\beta$	80
TABELA 5.4 -	Anisotropia de $\beta$ nas rochas graníticas	83
TABELA 5.5 -	Valores médios de $\beta$ <i>equivalente</i> , para granitos com granulação média e conteúdo em quartzo de 25, 30 e 35%	85
TABELA 5.6 -	Valores médios de $\beta$ <i>equivalente</i> , para granitos com granulação grossa e conteúdo em quartzo de 25 e 30%	85
TABELA 5.7 -	Influência do tamanho dos grãos minerais no $\beta$	86
TABELA 5.8 -	Copilação dos valores de $\beta$ determinados paralelo (//) e perpendicular (⊥) à estrutura dos gnaisses	88

## LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIAÇÕES

$\beta$	Coeficiente de dilatação térmica linear
$\beta$ <i>equivalente</i>	Coeficiente de dilatação térmica linear com porosidade aparente igual a zero
$\beta_M$	Coeficiente de dilatação medido
$\beta_q$	Coeficiente de dilatação do tubo de quartzo
$\beta_{q20}$	Coeficiente de dilatação do tubo de quartzo na referida temperatura
$\gamma$	Coeficiente de dilatação térmica volumétrico
$C$	Capacidade térmica
$K$	Módulo volumétrico ( <i>Bulk modulus</i> )
$V$	Fração volumétrica do mineral
$k$	Condutividade térmica
$k_{cr}$	Condutividade térmica cristalino
$k_{am}$	Condutividade térmica amorfo
$k_0$	Condutividade térmica inicial
$k_{ar}$	Condutividade térmica do ar
$\rho$	Massa específica aparente seca
$\alpha$	Absorção d'água aparente
$\eta$	Porosidade aparente
$\bar{x}$	Média
$s$	Desvio-padrão
$\delta$	Coeficiente de variação
$v$	Grau de liberdade
$t$	Distribuição de <i>Student</i>
$n$	Número de dados
$\Delta$	Intervalo de confiança
$\Sigma$	Somatório
$P$	Grau de confiança
$\sqrt{\phantom{x}}$	Raiz quadrada

%	Percentagem
$\perp$	Perpendicular
//	Paralelo
<	Menor
$\geq$	Maior e igual
T	Temperatura
E	Módulo de elasticidade
°C	Grau centígrado
nd	Não disponível
n.e.	Não especificado
p.ex.	Por exemplo
min.	Minuto
CP	Corpo-de-prova
VP	Velocidade de propagação de ondas
VPA	Velocidade de propagação de ondas antes
VPD	Velocidade de propagação de ondas depois
CA	Coeficiente de anisotropia
N	Número de amostra
d	Diâmetro médio
r	Coeficiente de correlação
AP	Análise petrográfica
RDA	Resistência ao desgaste abrasivo
RCU	Resistência à compressão uniaxial
RICD	Resistência ao impacto de corpo duro
RF	Resistência à flexão
Q	Quartzo
Pl	Plagioclásio
F	Feldspato
B	Biotita
M	Muscovita
A	Anfíbólio
Ep	Epídoto

SM	San Martín
RS	Rodamine sã
BS	Baleante sã
BW	Baleante alterado
CM	Cinza Mauá
PI	Prata Interlagos
DP	Dorê Paulista
DC	Dourado Caju
MC	Marrom Caju
MSP	Marrom São Paulo
AS	Amêndoas Sorocaba
RB	Rosa Biritiba
RI	Rosa Itupeva
RMB	Rosa Monte Belo
VB	Vermelho Bragança
VCB	Vermelho Capão Bonito
VPL	Vinho Paulista
QM	Quatro Marcos
MP	Marrom Pantanal
VMT	Vermelho Mato Grosso
VPN	Vermelho Pantanal
VU	Vermelho Urutau
CF	Cinza Francês
J	Jauru
AF	Azul Fantástico
RC	Rosa Cedro
RS	Rosa Salmão
SC	Salmão Cardeal
VCO	Vermelho Coral
VF	Vermelho Fartura
SMT	Salmão Mato-Grossense
VC	Vila Cardoso

I	Ipiranga
CC	Cinza Corumbá
a, b e c	Termos da equação
$X, Y e Z$	Direções de extração dos corpos-de-prova
$\Delta L$	Incremento de comprimento
$\Delta L_M$	Incremento de comprimento medido
$\Delta L_q$	Incremento de comprimento do tubo de quartzo
$\Delta T$	Variação de temperatura
$L_0$	Comprimento inicial
<i>LVDT</i>	Linear Variable Differential Transducer
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
USP	Universidade de São Paulo
Unesp	Universidade Estadual Paulista
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
NUTEC	Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial
NBR	Norma brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Material
DIN	Deustches Institut fur Norming
AFNOR	Association Français du Normalisation
UNI	Ente Nazionali in unification e Normazione di Itália
AENOR	Associacion Española de Normalización y Certificación

## RESUMO

LIMA, J. J. C. (2002). *Estudo da dilatação térmica de rochas usadas em revestimento de edificações*. São Carlos, 2002. 103p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Existe atualmente uma tendência de se utilizar em revestimento das fachadas de grandes edificações placas cada vez maiores, separadas por juntas de dilatação com dimensões menores possíveis, a fim de proporcionar efeitos arquitetônicos agradáveis e ao mesmo tempo dificultar a infiltração de agentes deterioradores na estrutura das edificações. Desta forma, há a necessidade de se dimensionar precisamente essas juntas, cuja função é de absorver as variações de comprimento das placas produzidas pela dilatação térmica. Esta pesquisa apresenta valores dos coeficientes de dilatação térmica linear ( $\beta$ ) de rochas graníticas e gnáissicas extraídas nos Estados de São Paulo, Mato Grosso e Espírito Santo, usadas comercialmente na forma de placas para revestimento de edificações. Os coeficientes de dilatação térmica linear ( $\beta$ ) foram determinados em dilatômetro de quartzo fundido e correlacionados com o conteúdo em quartzo, granulação, porosidade aparente e estrutura das rochas estudadas. Concluiu-se que, nas rochas gnáissicas, os valores de  $\beta$  são muito maiores quando determinados paralelo à gnaissificação. Nas graníticas, o  $\beta$  aumenta com o conteúdo em quartzo e diminui com os aumentos da porosidade aparente e do tamanho dos grãos minerais.

**Palavras-chave:** Dilatação Térmica, Granito, Gnaisse e Rochas Ornamentais.

## ABSTRACT

LIMA, J. J. C. (2002). *Study of the thermal expansion of rocks used for covering of buildings*. São Carlos, 2002. 103p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

There is a great tendency of using larger plaques of rocks on the covering of the faces of buildings, separated by expansion joints of very small dimensions as possible, in order to provide agreeable architectural effects and at the same time to make difficult the infiltration in the building structure of deterioration agents. Therefore, there is a great need of dimensioning precisely these joints whose function is to absorb the plates length variation produced by thermal expansion. This research presents values of plates length variation produced by thermal expansion. This research presents values of thermal linear expansion coefficient ( $\beta$ ) of granite and gneiss rocks extracted from São Paulo, Mato Grosso and Espírito Santo states, used commercially in plate shapes for covering of buildings. The thermal linear expansion coefficients ( $\beta$ ) were determined by cast quartz dilatometer and correlated with the quartz content, granulation, apparent porosity, and the studied rock structures. It can be concluded that, in gneiss rocks, the  $\beta$  values are much bigger when determined in parallel with the structure. On the granite rocks, the  $\beta$  value increases with the quartz content and it decreases with the increases of apparent porosity and the size of mineral grains.

**Keywords:** Thermal expansion; Granite; Gneiss and Dimension Stones.

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

---

A pedra foi, certamente, um dos primeiros materiais a ser aproveitado pelo Homem, mesmo antes deste atingir o estado de ser pensante. Atingindo esse estado e durante milênios, ela foi o material mais nobre que o Homem soube se servir. Utilizou-se primeiro na forma natural como cascalhos soltos, depois descobriu-se a maneira de trata-la toscamente e aos poucos foi sendo aperfeiçoados os processos de efetuar esse trabalho.

Para muitos autores, *a idade da pedra* foi o marco inicial das atividades do homem e, desde então, a pedra tem sido a colaboradora inestimável da História, documentando, através dos tempos, povos e costumes.

Segundo PETRUCCI (1975), com o aparecimento da construção metálica no século XIX e o desenvolvimento do concreto armado no século XX, a pedra, como material estrutural, sofreu forte impacto, passando a ter seu campo de aplicação bem definido e limitado: muros de arrimo, fundações pouco profundas, blocos para pavimentação, lastro de ferrovias e principalmente como material agregado, componente do concreto de cimento *portland* de uso estrutural ou da mistura betuminosa usada em pavimentação.

Nos dias atuais, a pedra vem sendo utilizada como revestimento de paredes e pisos, funcionando como elemento de acabamento e proteção, em função de sua alta qualidade e durabilidade. Somado aos efeitos arquitetônicos exibidos pela variedade e riqueza de seu colorido, pela perfeição de seu aparelhamento e belíssimo aspecto.

O Brasil possui, atualmente, mais de 500 tipos de rochas ornamentais , das mais variadas cores e texturas, comercializadas com mais de 1.200 nomes diferentes. Eles variam de acordo com a região, ou até mesmo com a decisão de uma empresa em adotar um nome que seja considerado mais atrativo para vendagem do produto (GALAN, 2001).

Segundo dados do *Departamento Nacional de Produção Mineral* (DNPM, 2000), a produção mundial de rochas ornamentais e de revestimento, no ano de 1999, teve um incremento de 3,7% em relação ao período anterior. No Brasil, a produção estimada de blocos de “granitos” e “mármore” em 1999 cresceu, em peso, 12,7% em relação à 1998. Isto resultou do aumento do consumo interno e das exportações de rochas processadas que cresceram 19,7% e 36,8%, respectivamente.

O Brasil situa-se entre os cinco principais produtores mundiais dessas rochas, sendo que os principais Estados produtores são: Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia, São Paulo, Ceará, Rio Grande do Sul e Rio de Janeiro. O Estado de São Paulo destaca-se ainda como o maior pólo consumidor e é detentor das principais técnicas de caracterização e de assentamentos de placas.

A técnica de assentamento recomenda que sejam previstas juntas entre as placas, para a dilatação das rochas que constituem o revestimento, no sentido de evitar rupturas, principalmente, nas fachadas ou em pisos externos que estão expostos a constantes variação de temperatura.

Por essa razão foi desenvolvida a presente pesquisa que trata da dilatação térmica linear ( $\beta$ ) de granitos e gnaisses dos Estados de São Paulo, Mato Grosso e Espírito Santo, que são comercializados como rochas ornamentais e de revestimento.

Em função do grande número de dados de dilatação térmica disponível na literatura brasileira (IPT, 1990, 1993, 1994, 2000 e DNPM, 1998) desenvolveu-se esse trabalho que tem como objetivo, principal, identificar e quantificar, quando possível, os fatores que influenciam o  $\beta$  das rochas estudadas.

Inicialmente é apresentada uma revisão bibliográfica abordando os vários aspectos das rochas ornamentais e de revestimento, os parâmetros térmicos, os fatores que influenciam na dilatação térmica e ainda as técnicas de assentamento de placas.

No capítulo 3 são descritos os materiais, assim como a apresentação dos dois equipamentos utilizados na determinação do coeficiente de dilatação das rochas estudadas e a forma de integração dos dados.

O capítulo 4 trata das características tecnológicas dos granitos e gnaisses estudados, envolvendo a análise petrográfica, os índices físicos, a dilatação térmica linear e a velocidade de propagação de ondas.

As análises desses resultados e suas correlações com as propriedades das rochas encontram-se no capítulo 5.

Finalizando são apresentados as conclusões de ordem geral, que é um apanhado sobre os ensaios de dilatação e de ordem específica, que mostra, em termos numéricos, os fatores que influenciam no  $\beta$  dos granitos e gnaisses.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

---

Serão apresentados e descritos os seguintes assuntos referentes às rochas ornamentais e de revestimento: *Terminologia, Aspectos Tecnológicos, Parâmetros Térmicos e Técnicas de Assentamento de Placas.*

#### **2.1 - Terminologia das Rochas Ornamentais e de Revestimento**

A busca por um termo capaz de englobar o conjunto de rochas utilizadas como rochas ornamentais e de revestimento (mármore, granitos, travertinos e outros), não é fácil. Haja visto, que em cada localidade, região ou país utiliza-se pelo menos uma expressão diferente.

Segundo VIDAL *et al.* (2001), as rochas ornamentais e de revestimento, também designadas pedras naturais, rochas lapídeas, rochas dimensionadas e materiais de cantaria, são os tipos litológicos que abrangem os materiais que podem ser extraídos em blocos ou placas.

Para ALENCAR (1996), o termo *pedras naturais* é o mais adequado para ser adotado por se tratar do correspondente às designações usadas na Alemanha (*Naturstein*); França (*Pierre Naturelle*); Inglaterra (*Natural Stone*) e outros países da Europa.

No Brasil, geralmente, utiliza-se o termo *rochas ornamentais*, assim como, nos Estados Unidos (*Dimension Stone*); na Espanha (*Rocas Ornamentales*) e Portugal (*Rochas Ornamentais*).

As *rochas ornamentais* são aquelas passíveis de polimento como os granitos, gnaisses, migmatitos, sienitos, gabros, etc. todas designadas comercialmente de granitos. Os mármore, genericamente especificando todas as rochas carbonáticas, metamórficas ou não (IPT, 1990 e 1993).

Para o *Departamento Nacional de Produção Mineral* (DNPM, 1998), o termo *rochas ornamentais* é próprio para designar aquelas rochas que depois de submetidas aos processos de acabamento, estão prontas para serem utilizadas como materiais nobres de construção, elementos de ornamentação, artes funerárias, esculturas, objetos de arte e outros, conservando integralmente sua composição, textura e características físico-químicas.

Do ponto de vista comercial, as rochas ornamentais e de revestimento são subdivididas em “mármore” e “granitos”, para simplificar a linguagem, em função da grande variedade de rochas que se encontram no mercado.

Os “mármore” abrange todas as rochas carbonáticas, como travertinos, calcários, calcitas, dolomitas, brechas calcárias, metamórficas ou não e outras de composição química semelhante (IPT, 1990, 1993 e DNPM, 1998).

O termo “granitos” é comercialmente empregado para englobar uma variedade de rochas ígneas e metamórficas, como granitos, gnaisses, migmatitos, gabros, granodioritos, monzonitos, charnoquitos, dioritos, sienitos e outras rochas que aceitam polimento, lustro e que servem como material para polimento (IPT, 1990, 1993 e DNPM, 1998).

Outras rochas que merecem destaque, são as ardósias e os quartzitos.

As ardósias e os quartzitos são rochas metamórficas, que ocorrem em várias tonalidades, nas ardósias predomina as cores escuras e nos quartzitos o branco. A característica marcante destas rochas é a facilidade com que se partem segundo o plano de foliação, permitindo manualmente a obtenção de placas de espessura milimétricas.

FRAZÃO & PARAGUASSU (1998), utilizando o termo *pedras de revestimento*, as definem como sendo os componentes de construção, com forma e

geometrias, em geral, regulares, que se destinam ao embelezamento das edificações, além de lhes proporcionar funcionalidade. As quais recebem as seguintes denominações:

**Chapa:** material rochoso de formato laminado com espessura menor que 4 cm, de contorno não necessariamente regular, obtido diretamente da pedreira ou pelo desdobramento de blocos (por serragem);

**Placa:** componente com geometria e dimensões padronizadas obtidas de uma chapa;

**Laje:** corpo rochoso planar que não passou por processo de afeiçoamento mecanizado;

**Ladrilho:** componente com geometria e dimensões padronizadas obtidas de uma chapa, normalmente, com tamanho equidimensional.

## 2.2-Aspectos Tecnológicos das Rochas Ornamentais e de Revestimento

### 2.2.1 – FUNÇÕES

Para FLAIN (1995), a proteção que os revestimentos exercem está associado a durabilidade da rocha e do componente de fixação, evitando a ação de agentes agressivos que atuam na superfície das edificações. Dentre esses agentes, merecem destaque a umidade, o fogo, poeira, microorganismos, ar e gases poluentes, vibrações, cargas de impactos e forças exteriores.

De acordo com FRAZÃO & PARAGUASSU (1998), as rochas de revestimento servem de elemento durável e decorativo em revestimentos verticais de exteriores e interiores e de piso de edificações. Neste uso, as rochas exercem as seguintes funções:

- a) Manter os aspectos estéticos ao longo do tempo;
- b) Promover isolamento (ou conforto) térmico na edificação;
- c) Proteger as estruturas do intemperismo;
- d) Facilitar a limpeza e manter a higidez no ambiente.

Dentro desse contexto, essas rochas devem atender aos seguintes requisitos de qualidade para que possam apresentar bom desempenho:

- a) alta resistência ao intemperismo e aos agentes químicos agressivos, quando usados em revestimentos de exteriores;

- b) baixa capacidade de absorção de líquidos, visando evitar manchamentos e, também, impedir a sua deterioração;
- c) baixa dilatação térmica, para garantir estabilidade do revestimento;
- d) alta resistência ao desgaste, para serem usadas em pisos;
- e) alta resistência à flexão, quando o revestimento é fixado por ancoragem metálica;
- f) aspecto estético agradável.

### 2.2.2 - SOLICITAÇÕES

Em termos gerais, pode-se dizer que as solicitações sofridas pelas rochas ornamentais quando usadas como revestimento são as seguintes: atrito ou desgaste, impacto, ação das intempéries, ataque por produtos de limpeza, ação de líquidos agressivos em geral, variação de temperatura, etc.

De acordo com FLAIN (1997), as solicitações a que as placas de rochas, assim como seus componentes de fixação, estarão sujeitos durante a obra e a vida útil do revestimento são as seguintes:

- a) cargas paralelas ao plano das placas: peso próprio das placas e peso próprio de eventual camada de isolamento térmico;
- b) cargas perpendiculares ao plano da placa: ação do vento e impactos acidentais;
- c) solicitações devidas ao movimento relativo do suporte e do revestimento: deformações devidas a variações higrotérmicas e deformações permanentes devidas à retração e à deformação lenta do concreto;
- d) agressividade do meio ambiente: ações químicas, físicas e biológicas.

### 2.2.3 - CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

Como vimos, anteriormente, as rochas ornamentais e de revestimento, quando em uso, têm algumas funções e são submetidas às mais variadas solicitações. Desta forma, a caracterização tecnológica precisa (mineralógica, química e físico-mecânica) desses materiais torna-se de fundamental importância para a sua utilização de forma correta, segura e econômica (IPT, 1993).

São recomendados, geralmente, os seguintes ensaios, análises e determinações para a caracterização de rochas ornamentais: análise petrográfica, índices físicos, coeficiente de dilatação térmica linear, resistência ao desgaste

*Amsler*, resistência ao impacto de corpo duro, resistência à compressão uniaxial, resistência à flexão, módulo de deformabilidade estática, micro dureza *Knoop* e alterabilidade.

A caracterização é, normalmente, feita através de determinações, análises e ensaios executados, segundo procedimentos rigorosos, estabelecidos e normalizados por entidades nacionais e/ou estrangeiras (Tabela 2.1).

TABELA 2.1 - Normas técnicas para caracterização de rochas ornamentais e de revestimento.

<i>Ensaios, Análises e Determinações</i>	<i>ASTM</i>	<i>DIN</i>	<i>AFNOR</i>	<i>UNI</i>	<i>ABNT</i>	<i>AENOR</i>
Análise Petrográfica	C-295	nd	B-0301	9724/1	12768	nd
Índices Físicos	C-97	52102 52103	B-10503 B-10504	9724/2	12766	22.182
Resistência à Flexão	C-99 C-880	52112	B-10510	9724/5	12763	22.186
Resistência ao Impacto de Corpo Duro	C-170	nd	nd	nd	12764	22.189
Resistência à Compressão	D-2938 C-170	52105	B-10509	9724/4	12767	22.185
Coeficiente de Dilatação Térmica Linear	E-228	nd	nd	nd	12765	nd
Congelamento e Degelo Conjugado à Compressão	nd	52104	B-10513	nd	12769	nd
Desgaste <i>Amsler</i>	C-241	52108	B-10518	2232	6481	23.183
Módulo de Deformabilidade Estática	D-3148	nd	nd	2234	nd	nd
Micro Dureza <i>Knoop</i>	nd	nd	nd	9724/6	nd	22.188

ASTM, American society for Testing and Material (americana); DIN, Deustches Institut fur Norming (alemã); AFNOR, Association Français du Normalisation (francesa); UNI, Ente Nazionali in unificazion e Normazione di Itália (italiana); ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (brasileira); AENOR, Asociacion Española de Normalización y Certificación (espanhola); nd, não disponível.

Fonte: Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial – NUTEC (*apud* VIDAL, 1999), modificada.

Com isso, são recomendados alguns ensaios, análises e determinações para caracterização de mármores e granitos usados como rochas ornamentais e de revestimento em função do uso (Tabela 2.2).

TABELA 2.2 – Ensaios, análises e determinações recomendados para mármores e granitos, conforme o emprego.

<i>Tipos de Revestimentos e Usos</i>	<i>Ensaios, Análises e Determinações Recomendados</i>						
	AP	$\alpha$	RDA	RF	RCU	$\beta$	RICD
Horizontais de exteriores	N	N	R	R	R	N	N
Horizontais de interiores (baixo tráfego)	N	N	R	R	R	R	N
Horizontais de interiores (alto tráfego)	N	N	N	R	R	R	N
Verticais de exteriores (fixados com argamassa ou por ancoragens metálicas)	N	N	I	N	N	N	I
Verticais de interiores	N	N	I	R	R	R	I
Pias e tampos de cozinha/lavatórios	N	N	I	I	I	R	R

AP, análise petrográfica;  $\alpha$ , absorção d'água aparente; RDA, resistência ao desgaste abrasivo; RF, resistência à flexão; RCU, resistência à compressão uniaxial;  $\beta$ , coeficiente de dilatação térmica linear; RICD, resistência ao impacto de corpo duro.

N = necessário; R = recomendado; I = de interesse.

Fonte: IPT (2000), modificada.

Ao final da caracterização tecnológica das rochas, os valores encontrados são comparados com limites estabelecidos pela ASTM ou ainda com valores sugeridos por alguns autores, como FRAZÃO & FARJALLAT (1995a e 1996) (Tabela 2.3).

TABELA 2.3 - Valores limites para algumas propriedades tecnológica fixadas pela ASTM e sugeridos por FRAZÃO & FARJALLAT (1995a e 1996).

<i>Propriedades</i>	<i>Valores fixados pela ASTM</i>	<i>Valores Sugeridos Por Frazão &amp; Farjallat</i>
Massa específica aparente (Kg/cm <sup>3</sup> )	$\geq 2.560$	$\geq 2.550$
Porosidade aparente (%)	n.e.	$\leq 1,0$
Absorção d'água (%)	$\leq 0,4$	$\leq 0,4$
Velocidade de propagação de ondas (m/s)	n.e.	$\geq 4.000$
Dilatação térmica linear $10^{-3} \times [\text{mm}/(\text{m.}^{\circ}\text{C})]$	n.e.	$\leq 12,0$
Desgaste Amsler (mm)	n.e.	$\leq 1,0$
Compressão uniaxial (MPa)	$\geq 131$	$\geq 100,0$
Flexão (módulo de ruptura) (MPa)	$\geq 10,34$	$\geq 10,0$
Módulo de deformabilidade estático (GPa)	n.e.	$\geq 30,0$
Impacto de corpo duro (m)	n.e.	$\geq 0,4$

n.e. não especificado.

Fonte: FRAZÃO & FARJALLAT (1996), modificada.

A Tabela 2.4 apresenta alguns valores das principais características tecnológicas de rochas usadas como ornamentais e de revestimento.

TABELA 2.4 – Valores de algumas características tecnológicas de rochas ornamentais brasileiras.

Rochas	Valores	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\eta$ (%)	$\alpha$ (%)	Desgaste Amsler (mm/1.000 m)	Compressão Uniaxial (MPa)	Impacto (m)	Flexão (MPa)
Granitos Lato Sensu (N=158)	mínimo	2.545	0,07	0,02	0,34	52	0,22	7,4
	máximo	3.504	2,92	1,14	2,02	323	0,98	48,1
	médio	2.680	0,58	0,21	0,69	158	0,48	18,5
Mármore Lato Sensu (N=19)	mínimo	2.606	0,02	0,01	1,19	37	0,22	6,0
	máximo	3.035	2,62	1,01	8,08	214	0,88	28,5
	médio	2.792	0,51	1,88	3,59	110	0,44	14,6

$\rho$ , massa específica aparente seca;  $\eta$ , porosidade aparente;  $\alpha$ , absorção d'água aparente; N, número de amostras.

Fonte: FRAZÃO & FARJALLAT (1995b), modificada.

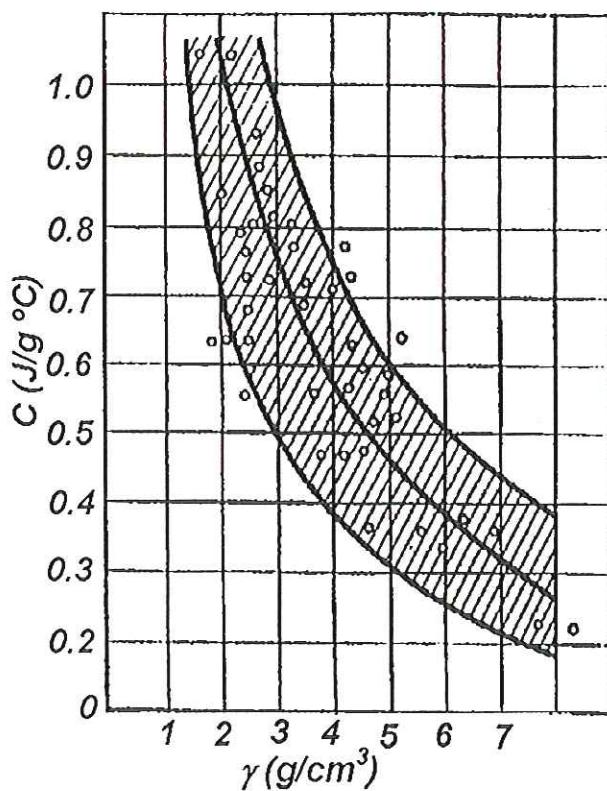
### 2.3 - Parâmetros Térmicos de Minerais e Rochas

Neste capítulo serão discutidos os parâmetros térmicos dos minerais e das rochas, a fim de entender a resposta ou reação desses materiais à aplicação de calor. As propriedades térmicas desses materiais, incluem a *capacidade térmica*, a *condutividade térmica* e a *dilatação térmica*.

#### 2.3.1 – CAPACIDADE TÉRMICA ( $C$ )

A capacidade térmica ( $C$ ) é a propriedade que indica a aptidão do material em absorver calor do meio externo, ou seja, ela representa a quantidade de energia necessária para aumentar a temperatura de uma unidade. Freqüentemente, utiliza-se o termo *calor específico* para representar a capacidade térmica por unidade de massa.

Segundo RZHEVSKY & NOVIK (1971), tem-se achado que a capacidade térmica dos minerais aumenta quando a densidade diminui (Figura 2.1). Por outro lado, a capacidade térmica das rochas não depende se esse (mineral) é cristalino ou não, p. ex., a capacidade térmica do quartzo cristalino e fundido é o mesmo. Além disso, a capacidade térmica não depende de outros parâmetros estruturais das rochas como granulometria, estratificação e etc.



**FIGURA 2.1** – Correlação entre a capacidade térmica e a densidade dos minerais (RZHEVSKY & NOVIK, 1971).

Para PADILHA (1997), a capacidade térmica depende muito pouco da estrutura e da microestrutura do material. Por outro lado, a porosidade tem grande influência prática na  $C$ , ou seja, material poroso exige uma quantidade menor de calor para atingir uma determinada temperatura, que outro isento de poros.

A dependência da capacidade térmica com a porosidade é governada pelos valores de  $C$  do ar e dos minerais. Sabe-se, ainda, que capacidade térmica da água (4,18 J/g. °C) excede, consideravelmente, a capacidade térmica de qualquer mineral. Desta forma, rochas porosas e completamente saturadas têm uma capacidade térmica mais alta que outras rochas similares secas (RZHEVSKY & NOVIK, 1971).

Segundo esse autor, com a elevação da temperatura a capacidade térmica de rochas densas e minerais, normalmente, aumentam (Figura. 2.2). Essa dependência da capacidade térmica com a temperatura é também characteristicamente anômala em argilas e outras rochas que podem ser substancialmente alterada pela ação do calor.

Além disso, a capacidade térmica em rochas e minerais mudam agudamente perto dos pontos de transição de fase.

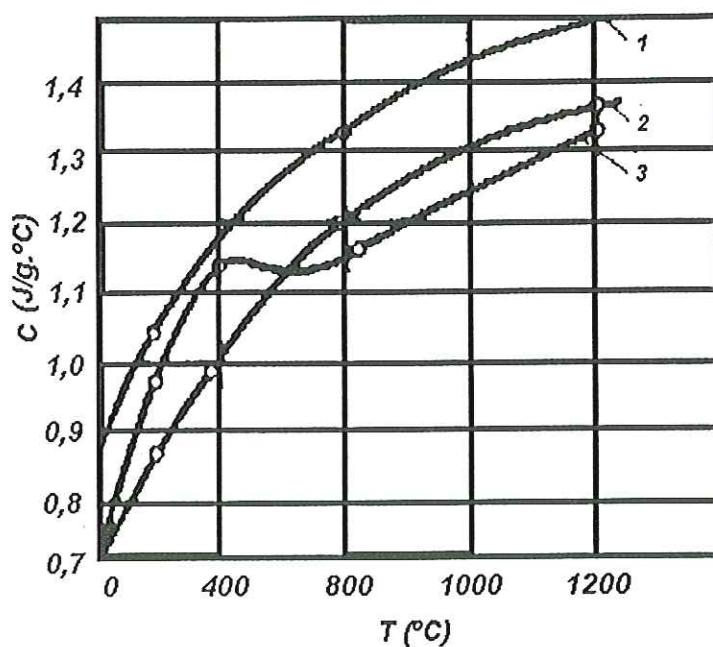


FIGURA 2.2 – Variação da capacidade térmica das rochas com o aumento da temperatura. 1-basalto; 2-diabásio e 3-quartzito (RZHEVSKY & NOVIK, 1971).

### 2.3.2 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k)

Segundo CAVALCANTI (1951), a condutividade térmica das rochas é relativamente pequena, variando entre largos limites, conforme a natureza de seus constituintes e de sua textura. As rochas porosas são, em geral, mais isolantes do que as compactas. Como o ar conduz mal o calor, o poder isolante dos materiais decorre, principalmente, da morfologia e quantidade de poros que apresentam.

Para CLAUSER & HUENGES (1995), os aspectos que influenciam na condutividade térmica (k) das rochas, são: os petrológicos ou influências petrofísicas, como a porosidade, a fase mineral dominante e a anisotropia, além dos efeitos da temperatura, pressão e saturação. A condutividade térmica dos minerais é muito mais fácil de ser entendida do que a das rochas, haja visto que cada mineral tem sua estrutura e fórmula química bem definida. Porém, existem duas dificuldades principais associadas com a medida da condutividade térmica nas amostras de mineral, que são: a pureza e o tamanho da amostra.

De acordo com RZHEVSKY & NOVIK (1971), as rochas são pobres condutores de calor quando comparadas com os metais, pois os metais têm condutividade de elétron enquanto nas rochas o principal é o tipo fônon. Apesar do fato que a condutividade térmica do diamante é do tipo fônon, ele tem um valor de k extraordinário (até 200 W/m. °C), o qual é atribuído as poucas imperfeições presentes na estrutura.

Seguindo esses autores, quando a estrutura cristalina regular está distorcida a condução da energia fica difícil. Monocristais quando puros têm a condutividade térmica alta, quando a estrutura torna-se policristalina a condutividade cai (Tabela 2.5).

TABELA 2.5 – Comparação da condutividade térmica entre minerais e rochas.

<i>Monocristais</i>	<i>k (W/m. °C)</i>	<i>Policristais</i>	<i>k (W/m. °C)</i>
Quartzo	11,7 – 7	Quartzito	3,6
Calcita	3,7	Mármore	2
Halita	26,7	Rocha salina	7,2
Silvita	21,7	Silvita (rocha)	9,8

Fonte: RZHEVSKY & NOVIK (1971).

Para RZHEVSKY & NOVIK (1971), a condutividade térmica das rochas depende da habilidade dos seus constituintes minerais para conduzir o calor. Existe uma grande diferença entre a condutividade térmica entre substâncias cristalinas,  $k_{cr}$ , e amorfas (vítreas),  $k_{am}$ . Isto pode ser constatado na Tabela 2.6. De forma geral,  $k_{cr}$  é maior que  $k_{am}$ . Portanto a presença de uma fase vítreia reduz a condutividade das rochas. Os valores da condutividade térmica de minerais amorfos não excedem 1,5 W/m °C.

TABELA 2.6 – Comparação das condutividades térmicas de rochas cristalinas e vítreas.

<i>Rocha cristalina ou mineral</i>	<i><math>k_{cr}</math> (W/m. °C)</i>	<i>Rocha vítreia ou mineral</i>	<i><math>k_{am}</math> (W/m. °C)</i>
Quartzo	11,7 – 7	Quartzo fundido	1,39
Diabásio	2,25	Diabásio vítreo	1,15

Fonte: RZHEVSKY & NOVIK (1971).

A condutividade térmica em rochas depende do tamanho dos seus grãos constituintes. Em rochas (p. ex. mármores) a queda da condutividade térmica com a diminuição do tamanho de grãos está relacionada como o aumento do número de contatos no caminho do fluxo de calor, pois os contatos têm maior resistência ao calor que os cristais. Está claro que o efeito de tamanho do grão é muito significante para valores de diâmetro médio  $d$  (Figura 2.3), como foi confirmado através de experiências em materiais policristalinos (p. ex. cerâmica). A condutividade térmica depende não só da porosidade, mas também com a forma dos poros (Figura 2.4) (RZHEVSKY & NOVIK, 1971).

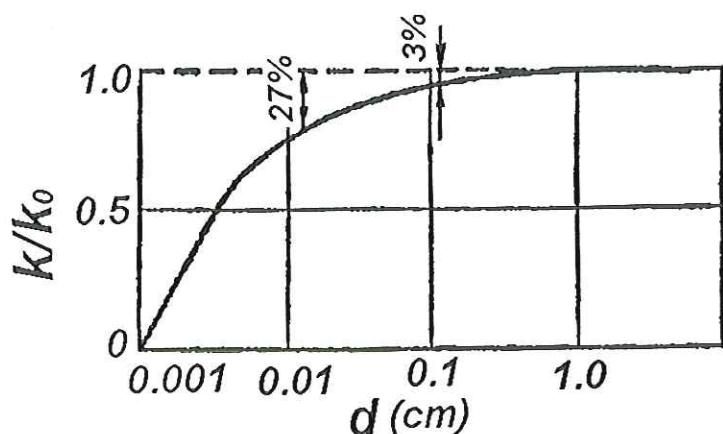


FIGURA 2.3 – Curva mostrando a dependência da condutividade térmica das rochas com o tamanho dos grãos (RZHEVSKY & NOVIK, 1971).

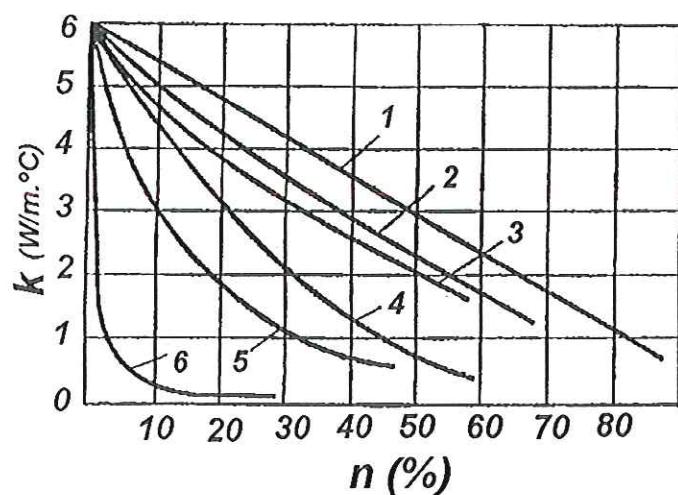


FIGURA 2.4 – Curvas de comparação mostrando a relação entre condutividade térmica e porosidade. 1-fluxo de calor ao longo das fraturas; 2-poros esféricos isolados; 3-poros cúbicos isolados; 4-curva média dos tipos cúbicos; 5-para rochas bimínimas; 6-o fluxo de calor atravessa perpendicular as fraturas (RZHEVSKY & NOVIK, 1971).

Esses autores, acreditam que a condutividade térmica em rochas bandeadas depende da direção do fluxo. Cálculos teóricos e dados experimentais indicam que a condutividade térmica medida paralela ( $k//$ ) ao bandeamento é sempre maior que a perpendicular ( $k\perp$ ). A razão entre a condutividade térmica medida paralela ou perpendicular ao bandeamento das rochas variam entre 1,1 e 1,5 (Tabela 2.7).

TABELA 2.7 – Anisotropia na condutividade térmica.

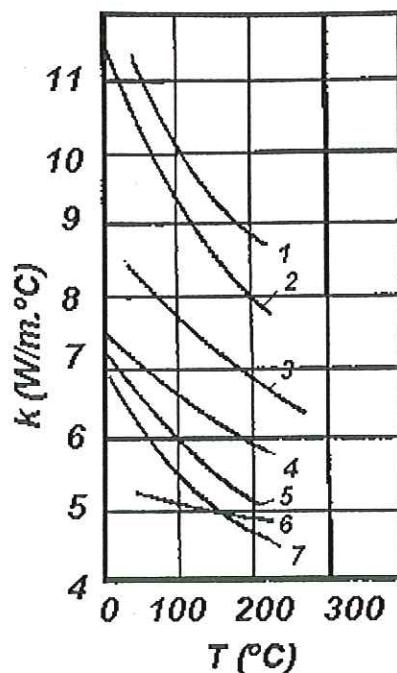
<i>Rocha</i>	<i><math>k//</math> ao bandeamento (W/m °C)</i>	<i><math>k\perp</math> ao bandeamento (W/m °C)</i>	<i>Coeficiente de anisotropia (<math>k// / k\perp</math>)</i>
Quartzito	5,7	5,49	1,06
Gnaisse	3,11	2,16	1,44
Mármore	3,08	3,01	1,02
Calcário	3,44	2,55	1,35

Fonte: RZHEVSKY & NOVIK (1971).

A anisotropia da condutividade térmica não é só inerente as rochas constituídas de diferentes camadas, mas também em rochas xistosas e em minerais com boa clivagem. Nas micas, p. ex., a condutividade térmica ao longo da clivagem é seis vezes maior que no sentido transversal.

Para RZHEVSKY & NOVIK (1971), em rochas porosas a energia térmica pode ser transferida por condução e por convecção no espaço poroso; mas se os poros forem pequenos comparando com o volume de rocha estudado, a convecção pode ser ignorada. A transferência de calor por radiação pode também ser negligenciada quando a temperatura de aquecimento não exceder 1000°C. A condutividade térmica do ar  $k_{ar}$ , como é conhecida, é muito baixa, de forma que  $k$  é sempre menor em rochas porosas secas do que nas não porosas. A forma dos poros também é significante. Quando são alongados (como em fraturas), a condutividade é muito reduzida se eles se posicionam em ângulos retos ao sentido do fluxo de calor. Essas características da condutividade térmica explica o efeito no fraturamento, planos de descontinuidade, e alteração nas propriedades térmicas das rochas; todos eles reduzem a condutividade de calor quando as rochas estiverem secas.

O aumento de temperatura reduz a condutividade térmica de quase todos os minerais e rochas cristalinas ou não (Figura 2.5).



**FIGURA 2.5** – Dependência da condutividade térmica das rochas com a temperatura. 1-dunito; 2-dolomito; 3-granito; 4-quartzo monzonito; 5-mármore; 6-sienito; 7-calcário (RZHEVSKY & NOVIK, 1971).

A Tabela 2.8 apresenta valores de condutividade térmica, determinada por CARUSO & TAIOLI (1982), em algumas rochas brasileiras.

**TABELA 2.8** – Condutividade térmica de alguns “granitos” brasileiros.

Grupo	Nome Comercial	Condutividade Térmica (W/m °C)	
		Variação	Valor Médio
1	Negro Tijuca	1,64-1,88	1,76
	Verde Ubatuba	1,74-2,60	1,84
2	Roxo Gaúcho	1,92-2,52	2,11
	Preto São Gabriel	1,92-2,98	2,32
	Cinza Mauá	2,34-2,40	2,36
	Champagne	2,28-2,86	2,50
3	Vermelho Imperial	2,34-2,70	2,53
	Cinza Continental	2,12-2,96	2,58
	Juparana	2,64-3,08	2,81
	Dourado Carioca	2,38-3,26	2,82
	Rosa Biritiba	2,16-3,56	2,89
4	Capão Bonito	2,5-6,2	3,4
	Vermelho Bragança	2,7-5,4	3,4

Fonte: CARUSO & TAIOLI (1982).

### 2.3.3 - DILATAÇÃO TÉRMICA

#### 2.3.3.1 – Considerações Iniciais

A dilatação térmica pode ser definida como o aumento das dimensões de qualquer corpo com aumento da temperatura. Este fenômeno ocorre com quase todos os corpos, no estado sólido, líquido e gasoso. Os corpos sólidos cristalinos mantêm forma geométrica praticamente invariável mesmo quando com mudança de temperatura. Com isso, pode-se dizer que a dilatação térmica depende do sistema cristalino e das ligações entre os átomos (GASPAR, 2000).

A dilatação térmica depende da natureza das ligações entre os átomos, ou seja, quanto mais forte for a ligação menor será a dilatação térmica, ou vice-versa (ASKELAND, 1993; PADILHA, 1997 e MARINO & BOSCHI, 1998). Dentre as ligações químicas, pode-se destacar as *ligações iônicas, covalentes, metálicas* (fortes) e as de *van der Waals* (fracas) (Tabela 2.9).

TABELA 2.9 – Energias de ligação para os quatro mecanismos de ligação.

<i>Tipo de Ligação</i>	<i>Energia de Ligação (Kcal/mol)</i>
Iônica	150-370
Covalente	125-300
Metálica	25-200
Van der Waals	<10

Fonte: ASKELAND (1994).

De acordo com MARINO & BOSCHI (1998), cada tipo de cristal tem um comportamento próprio e a dilatação é dependente da direção cristalográfica, exceto nos cristais com simetria cúbica onde a dilatação é isotrópica. Isso quer dizer que, nos cristais cúbicos o coeficiente de dilatação ao longo dos diferentes eixos cristalinos são iguais, e as mudanças nas dimensões com a temperatura são simétricas.

Em cristais anisométricos (não cúbicos), que é o caso da grande maioria dos materiais e minerais, a dilatação térmica varia com a orientação cristalográfica. Desta forma, não se deve apresentar o coeficiente de dilatação de um cristal anisométrico sem mencionar a direção cristalográfica a que ele se refere.

### 2.3.3.2 – Dilatação Térmica dos Minerais e das Rochas

O coeficiente de dilatação térmica linear ( $\beta$ ) é a característica termo-física mais importante que governa a capacidade de transformar calor em energia mecânica, quer dizer, no trabalho externo associado com o rompimento das rochas. O coeficiente de dilatação decresce com o aumento de energia na estrutura, então, com o aumento de densidade de minerais, cai seu valor até certo ponto (RZHEVSKY & NOVIK, 1971).

As rochas formadas por diversos minerais, tais como, granito, gnaisse, sienito, etc. sofrem mais com a ação térmica do que as rochas formadas, essencialmente, por um único mineral, tais como, os arenitos (argilosos, carbonáticos e os muito porosos), os mármores e os calcários, além disso, os maiores coeficientes de dilatação têm sido obtidos nas rochas que apresentam maior coeficiente de condutividade térmica (CAVALCANTI, 1951 e CARUSO *et al.*, 1978).

De acordo com CAVALCANTI (1951), a dilatação térmica é um dos fatores de deterioração da rocha, visto que, conduzindo mal o calor, a rocha sofre ação térmica mais intensa na superfície do que no interior, desenvolvendo-se tensões diversas que provocam fendilhamentos, concorrendo igualmente, para esse efeito, a dilatação heterogênea dos minerais constituintes da rocha.

A dilatação térmica é um fenômeno que no mineral, depende do sistema cristalino e das ligações interatômicas. Nas rochas esse fenômeno depende da composição mineral (conteúdo de quartzo e calcita principalmente) e do arranjo espacial destes, ou seja, da estrutura. Porém, é influenciada ainda pela porosidade (RZHEVSKY & NOVIK, 1971; RICHTER & SIMMONS, 1974; LO & WAI, 1982 e FRAZÃO & FARJALLAT, 1995b), tamanho dos grãos (RICHTER & SIMMONS, 1974 e FRAZÃO & FARJALLAT, 1995b) e temperatura (RZHEVSKY & NOVIK, 1971; LO & WAI, 1982 e GASCON & BALBAS, 1983).

#### *Composição Mineral*

Segundo RZHEVSKY & NOVIK (1971), a calcita e o quartzo têm valores altos de  $\beta$ , como consequência quartzitos, granitos e mármores têm coeficientes de dilatação térmica linear alto,  $11 \times 10^{-3}$ ,  $8 \times 10^{-3}$  e  $9 \times 10^{-3}$  mm/(m. $^{\circ}$ C), respectivamente.

GRIFFITH (1936), determinou o coeficiente de dilatação térmica de várias rocha, em corpos de prova prismáticos de 1x1x10 cm, chegando aos seguintes resultados: quartzitos igual a  $12 \times 10^{-3}$  mm/(m. $^{\circ}$ C), gabros, diabásios e basaltos igual a  $4 \times 10^{-3}$  mm/(m. $^{\circ}$ C) e granitos, arenitos, calcários e mármore iguais a  $8 \times 10^{-3}$  mm/(m. $^{\circ}$ C). E conclui que a dilatação térmica das rochas varia na razão direta da quantidade de sílica livre que contêm.

SMITH & COLLIS (1993), ao analisarem os coeficientes de dilatação térmica de diferentes tipos de rochas para usá-las como agregado em concreto, concluíram que o aumento no valor de  $\beta$  está relacionado com o aumento de SiO<sub>2</sub> presente nas rochas (Tabela 2.10).

TABELA 2.10 – Dilatação térmica de rochas e seus conteúdos relativos SiO<sub>2</sub>.

<i>Rocha</i>	<i>Conteúdo de SiO<sub>2</sub> (%)</i>	$\beta$ médio $\times 10^{-3}$ [mm/(m. $^{\circ}$ C)]
Chert	94	11,8
Quartizito	94	10,3
Arenito	84	9,3
Granito	66	6,8
Basalto	51	6,4
Calcário	traço	5,5

Fonte: SMITH & COLLIS (1993).

### *Estrutura*

A dilatação térmica em cristais e nas rochas foliadas varia em direções diferentes. Assim, um único cristal de calcita alonga-se mais em uma só direção quando aquecido, do que nas outras. A dilatação do quartzo em uma direção (maior eixo) é maior que o dobro da dilatação nas outras direções (RZHEVSKY & NOVIK, 1971).

PERES-RODRIGUES & SOUZA (1983), realizaram ensaios de dilatação térmica linear, num intervalo de temperatura de 60 °C, em corpos-de-prova (5x5x14cm) extraídos de um bloco de granito, em nove direções no espaço (Figura 2.6). Os resultados mostraram que não é acentuada a influência da estrutura nos

valores dos coeficientes de dilatação térmica do granito estudado, com exceção das direções 5 e 6, que exibiram valores superiores às demais direções (Tabela 2.11).

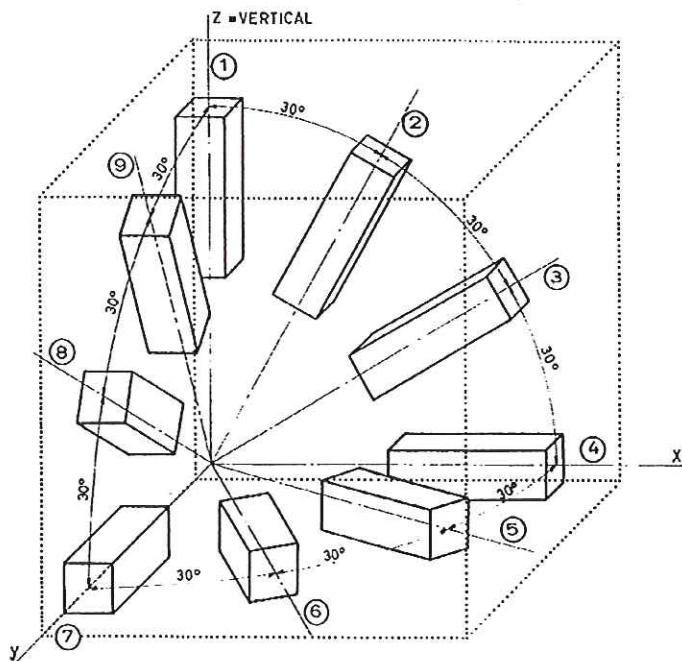


FIGURA 2.6 – Esquema de extração dos corpos-de-prova (PERES-RODRIGUES & SOUZA, 1983).

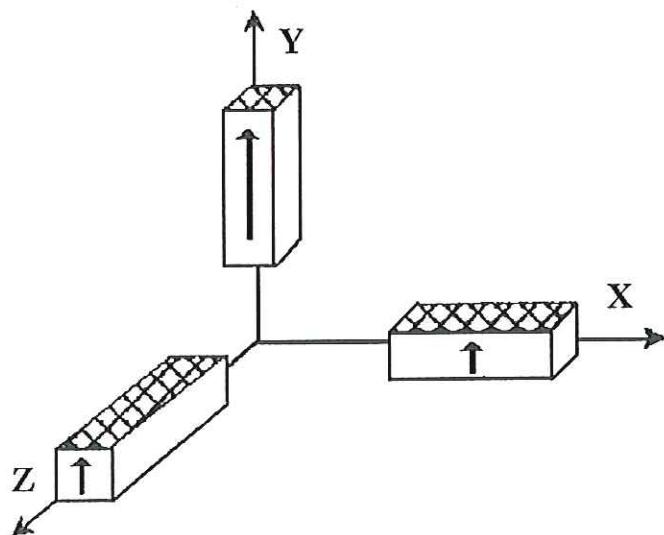
TABELA 2.11 – Valores experimentais dos coeficientes de dilatação térmica.

<i>Direções</i>	<i>Coeficiente de Dilatação Térmica</i> $\times 10^3 [mm/(m ^\circ C)]$
1 = OZ	7,55
2	7,66
3	7,82
4 = OX	7,72
5	9,08
6	8,03
7 = OY	7,06
8	7,08
9	7,39

Fonte: PERES-RODRIGUES & SOUZA (1983).

Para RIVAS *et al.* (2000), embora as rochas graníticas geralmente são analisadas como homogênea, elas podem mostrar anisotropia devido aos efeitos de fluxos magmáticos durante a sua cristalização.

Com isso, esses pesquisadores, determinaram várias propriedades fisico-mecânicas, de caráter direcional, em três tipos de granitos. Entre essas propriedades está o coeficiente  $\beta$ , que foi determinado paralelo e perpendicular aos planos preferenciais de orientação, com a finalidade de determinar o caráter anisotrópico dessas rochas (Figura 2.7).



**FIGURA 2.7 – Esquema de extração de corpos-de-prova (RIVAS *et al.*, 2000).**

A determinação do coeficiente  $\beta$  foi executado em corpos-de-prova de 4x4x16 cm, no intervalo de temperatura de 20 a 60 °C (Tabela 2.12).

**TABELA 2.12 – Resultado da dilatação térmica de 4 amostras de granito.**

Granito	$\times 10^3 \beta [mm/(m. °C)]$		
	X	Y	Z
SM	6,4	8,6	nd
RS	5,5	6,2	5,8
BS	5,5	6,6	6,4
BW	4,8	6,3	6,2

X, Y e Z, direção de determinação; SM, San Martín; RS, Rodamine sã; BS, Baleante sã; BW, Baleante alterado; nd, não disponível.

Fonte: RIVAS *et al.*(2000).

Ao final, estes autores, concluíram que as rochas graníticas estudadas são fortemente anisotrópicas e que esta anisotropia foi refletida na maioria das propriedades estudadas, em especial, na dilatação térmica.

### *Porosidade*

Segundo RZHEVSKY & NOVIK (1971), o verdadeiro valor do coeficiente de dilatação térmica linear ( $\beta$ ) não depende da porosidade, pois, só é governado pela estrutura mineral da rocha. Porém, na realidade, medidas mostram que o valor de  $\beta$  decresce com aumento da porosidade, devido os espaços vazios entre as partículas minerais que fazem as rochas refletirem um pequeno aumento nas suas dimensões externas. Porém, a queda no parâmetro  $\beta$  com aumento de porosidade é principalmente devido a redução do módulo de elasticidade ( $E$ ).

Para RICHTER & SIMMONS (1974), a dilatação térmica das rochas depende inversamente da porosidade, ou seja, rochas que inicialmente contém grande quantidade de fissuras (p. ex. rochas da lua) apresentam valores de  $\beta$  menores do que a mesma rocha em seu estado não fissurado. A Tabela 2.13 mostra os valores medidos e calculados, através da equação de Turner's, para três amostras de rochas lunares.

TABELA 2.13 – Valores do coeficiente de dilatação térmica volumétrico para as rochas lunares.

<i>Amostras</i>	$\gamma$ (25 – 200 °C)	$\gamma^*$ (calculado)
A	6,8	17,0
B	10,9	18,4
C	4,8	14,4

$\gamma$ , coeficiente de dilatação térmica volumétrico medido;  $\gamma^*$ , coeficiente de dilatação térmica volumétrico calculado pela equação de Turner's.

Fonte: RICHTER & SIMMONS (1974).

A equação de Turner's usada para determinação do coeficiente de dilatação térmica volumétrico é a seguinte:

$$\gamma = \frac{\sum \gamma_i K_i V_i}{\sum K_i V_i} \quad \text{sendo } i = 1 \text{ a } n$$

onde:

$\gamma$  = coeficiente de dilatação térmica volumétrico;

$\gamma_i$  = coeficiente de dilatação térmica volumétrico de cada mineral;

$K_i$  = módulo volumétrico (*Bulk modulus*);

$V_i$  = fração volumétrica de cada mineral.

### *Tamanho dos Grãos*

Segundo RICHTER & SIMMONS (1974), os dados de suas pesquisas são insuficientes para fazer uma discussão quantitativa do efeito do tamanho dos grãos na dilatação térmica das rochas. Porém, dados da literatura na área de cerâmica, sugere que tal efeito existe. Além disso, seus estudos mostraram que o gáboo *Cape Neddick* tem composição mineral modal semelhante ao diabásio *Frederick*, e apresentam coeficiente de dilatação térmica volumétrica de 25,5 e 18,8, respectivamente, sendo que esta variação foi atribuída à diferença na granulação entre as rochas.

### *Temperatura*

De acordo com RZHEVSKY & NOVIK (1971), a dilatação das rochas também é afetada por fatores externos, o mais significante é a variação de  $\beta$  em condições de temperaturas diferentes. A elevação de temperatura aumenta  $\beta$  grandemente até 600 °C. Para rochas contendo quartzo o ponto de transformação polimórfica de quartzo- $\beta$  para quartzo- $\alpha$  a 573 °C é acompanhado por uma curva com uma subsequente queda pronunciada no valor de  $\beta$  (Figura 2.8).

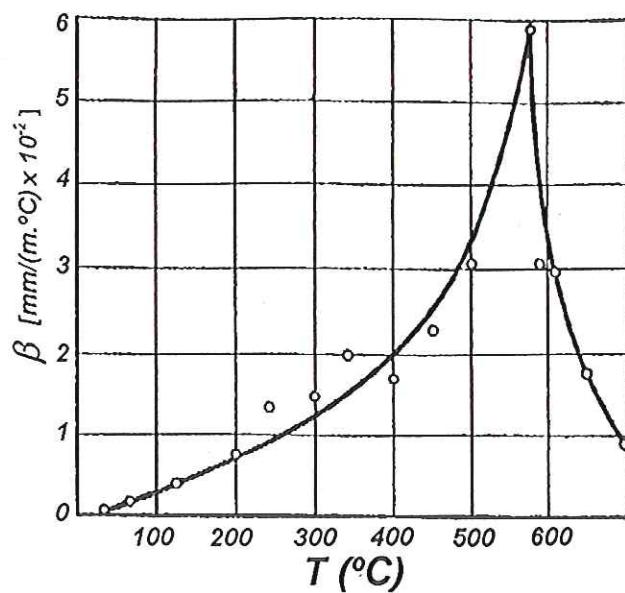


FIGURA 2.8 – Dependência do coeficiente de dilatação térmica linear com a temperatura em quartzo pórfiro (RZHEVSKY & NOVIK, 1971).

Com a finalidade de observar o aumento da dilatação térmica com a temperatura, LO & WAI (1982), analisaram seis espécies de granito gnaisse, num intervalo de temperatura de 20° a 80 °C, e concluíram que a média do coeficiente de dilatação térmica linear à 70 °C é de 30 a 40% maior que à 30 °C.

Para verificar a influência da temperatura na dilatação térmica, GASCON & BALBAS (1983), fizeram determinações de  $\beta$  no intervalo de 20° a 90 °C, a cada 10 °C, realizando séries de cinco medidas em cada corpo-de-prova, a uma taxa de 0,5 °C/min. O resultado desse trabalho está sintetizado na Tabela 2.14.

TABELA 2.14 – Valores médios de  $\beta$  determinados para diferentes temperaturas.

Temperatura	$\beta$ médio $\times 10^3$ [mm/(m.°C)]	Incremento Relativo (%)
20 °C	6,1638	+7,2
30 °C	6,1610	-0,35
40 °C	6,4898	+4,59
50 °C	7,0582	+0,18
60 °C	7,8558	+3,38
70 °C	8,1408	+3,20
80 °C	8,5762	+4,62

Fonte: GASCON & BALBAS (1983).

### 2.3.3.3 – Determinação da Dilatação Térmica

#### Equipamento

O princípio básico da construção de um equipamento para a determinação da dilatação térmica, deve conter componentes de baixa dilatação (p. ex. quartzo fundido). Isto é importante para reduzir a dilatação do sistema durante a determinação e, assim minimizar as correções de erros sistemáticos (PINCUS & HOSKINS, 1985).

No estudo de RICHTER & SIMMONS (1974), a determinação da dilatação térmica foi realizada em um dilatômetro TD-IX modificado, com resolução de  $0,001^{\circ}\text{C}^{-1}$ . A Figura 2.9 é um bloco diagrama simplificado do aparato. O sistema de medida do equipamento consiste em um tubo de sílica fundido (onde a amostra é acondicionada) e uma haste de sílica interna que desloca um dispositivo dentro do LVDT.

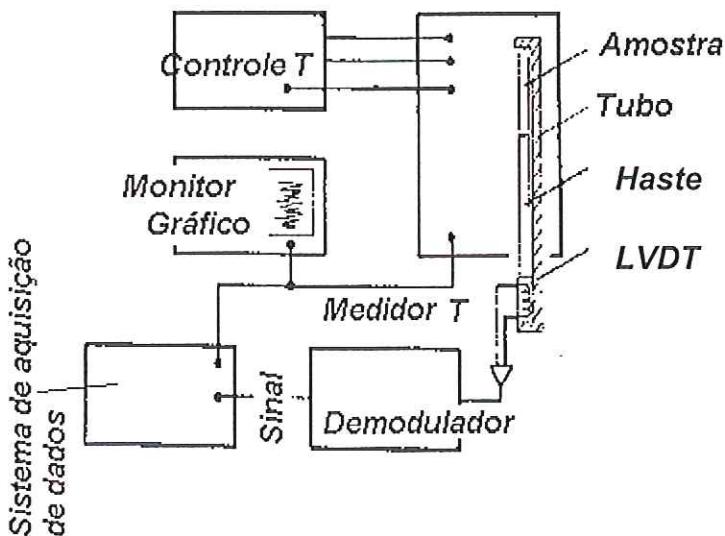
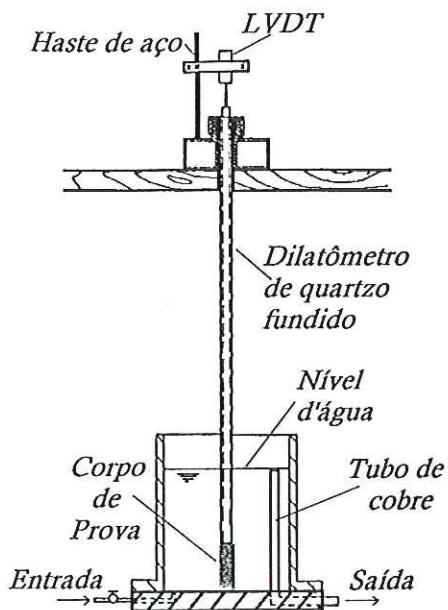


FIGURA 2.9 – Esquema simplificado dos aparelhos experimentais (RICHTER & SIMMONS, 1974).

LO & WAI (1983), determinaram os coeficientes de dilatação térmica linear de suas amostras, por meio de um dilatômetro de quartzo fundido (Figura 2.10). Foram executadas as determinações usando banho em água, com a finalidade de aquecer e resfriar as amostras e ao mesmo tempo controlar a temperatura do sistema.



**FIGURA 2.10 - Dilatômetro de quartzo fundido, com transdutores do tipo *LVDT*** (LO & WAI, 1983).

Quando o corpo-de-prova é acondicionado dentro de um tubo de quartzo, geralmente, não se leva em consideração a dilatação sofrida pelo tubo, o que faz com que os valores de dilatação encontrados sejam menores que os reais. Com isso, GASCON & BALBAS (1983), utilizaram a fórmula a baixo para fazer essa correção.

$$\beta = \frac{\Delta L_M + \Delta L_q}{L_0 \Delta T} = \beta_M + \beta_q$$

Onde:

$\beta$  = coeficiente de dilatação real;

$\Delta L_M$  = incremento de comprimento medido;

$\Delta L_q$  = incremento de comprimento do tubo de quartzo;

$L_0$  = comprimento inicial;

$\Delta T$  = variação de temperatura;

$\beta_M$  = coeficiente de dilatação medido;

$\beta_q$  = coeficiente de dilatação do tubo de quartzo.

Para fazer essas correções tomaram-se os seguintes valores, obtidos da curva experimental do equipamento:

$$\begin{array}{lll} \beta_{q20} = 0,46 \times 10^{-6} & \beta_{q50} = 0,54 \times 10^{-6} & \beta_{q80} = 0,62 \times 10^{-6} \\ \beta_{q30} = 0,49 \times 10^{-6} & \beta_{q60} = 0,57 \times 10^{-6} & \\ \beta_{q40} = 0,51 \times 10^{-6} & \beta_{q70} = 0,59 \times 10^{-6} & \end{array}$$

### *Taxa de aquecimento*

Para RICHTER & SIMMONS (1974), a taxa de mudança de temperatura, aquecimento ou resfriamento, é extremamente importante na determinação da dilatação térmica. Em seus experimentos, as amostras foram aquecidas a uma taxa de 5 °C/min., que acreditam ser muito alta. Essa elevada taxa pode introduzir a formação de novas fissuras na rocha, sendo assim, esses autores passaram a usar uma taxa de 1 a 2 °C/min.

LO & WAI (1982), recomendam que a determinação de  $\beta$  seja executado com mudança de temperatura na taxa de 2 °C/min.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR – 12756), especifica uma taxa de 0,3 °C/min., para determinações da dilatação térmica das rochas.

### *Sistema de calibração*

RICHTER & SIMMONS (1974), utilizaram um cilindro de quartzo monocristalino cortado paralelo ao eixo-c, usando os dados de KOZU & TAKANE (1929) para corrigir a dilatação do quartzo entre as temperaturas de 25 a 450 °C (Figura 2.11).

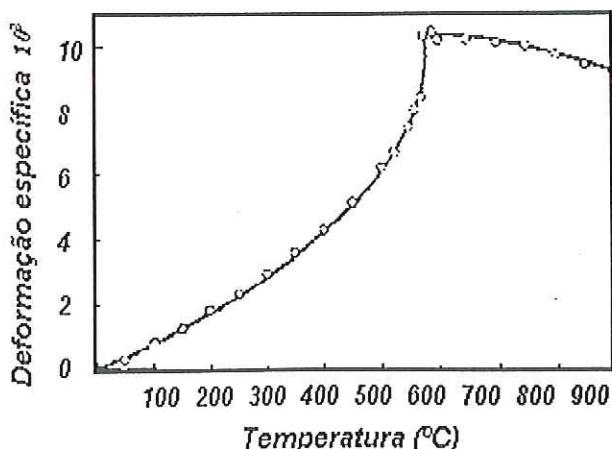
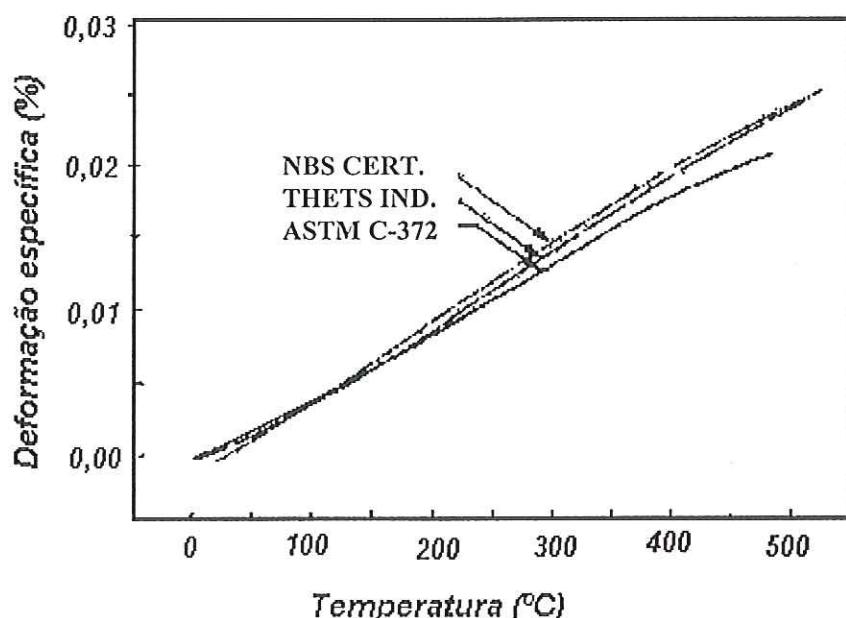


FIGURA 2.11 – Dilatação térmica do quartzo segundo KOZU & TAKANE (1929) (*apud* RICHTER & SIMMONS, 1974).

PINCUS & HOSKINS (1985), recomendam que a calibração do sistema seja realizada usando corpos-de-prova de dilatação térmica conhecida. O uso do quartzo fundido é importante, devido seu coeficiente de dilatação ser baixo  $0,53 \pm 0,03 \times 10^{-3}$  mm/(m. °C) e relativamente bem conhecido. Contudo, o cobre e outros metais que tenham a dilatação térmica bem definida podem ser usados.

A Figura 2.12 exibe os dados de dilatação térmica para o quartzo fundido segundo três fontes: ASTM (C 372), Industria THETA e *National Bureau of Standards* (NBS).

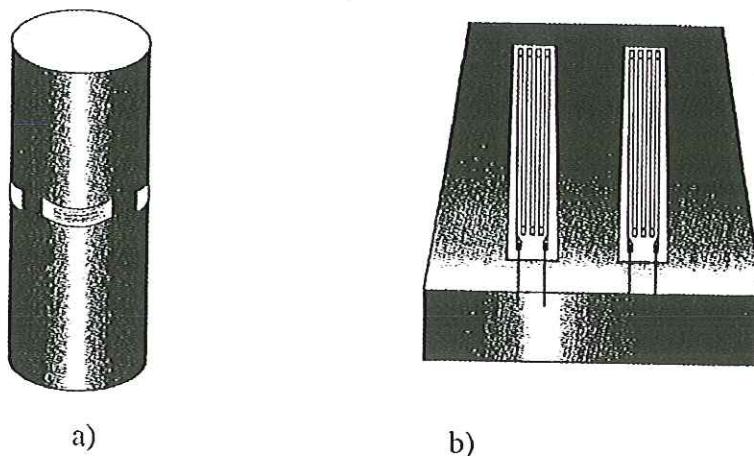


**FIGURA 2.12 –** Comparação da dilatação térmica do quartzo fundido (PINCUS & HOSKINS, 1985).

O trabalho da EQUIPE DE FURNAS (1997) apresenta uma outra forma usada na determinação de  $\beta$ , pouco conhecida, cujo os resultados são usados em agregado para concreto. É o método CRD C-125, que determina o valor desse coeficiente em testemunhos de sondagem ou em partículas de maiores dimensões do agregado graúdo, especialmente preparados, com a colagem de extensômetros elétricos e fio.

### *Corpos-de-prova*

No estudo de agregado para concreto de barragem, o material usado para determinação de  $\beta$  pode ser o mesmo preparado para os ensaios de compressão ou módulo de elasticidade. Quando a determinação é realizada em fragmentos de maiores dimensões do agregado graúdo, os mesmos são cortados de forma prismática de 5 x 5 x 1 cm. A Figura 2.13 ilustra a colagem de extensômetros elétricos de fio nos dois tipos de corpos-de-prova.

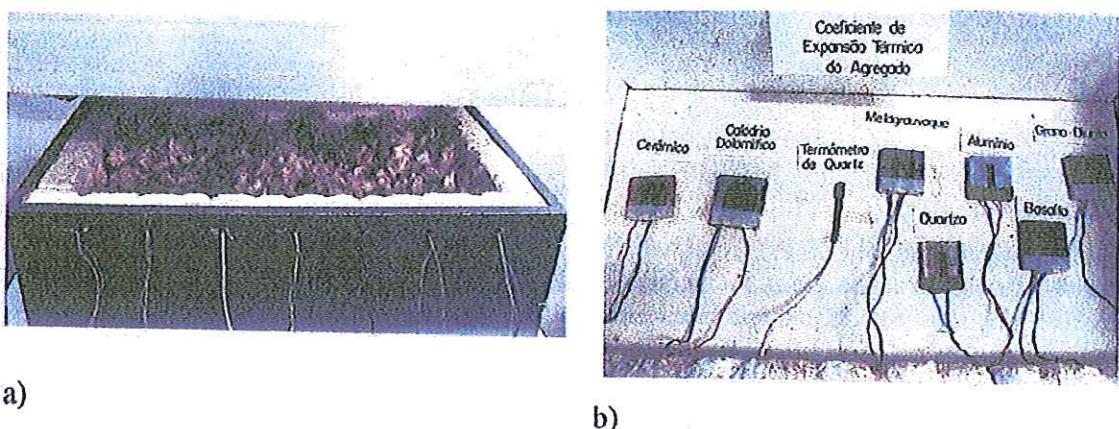


**FIGURA 2.13 – Posicionamento dos extensômetros elétricos de fio:**  
a) corpo-de-prova cilíndrico; b) corpo-de-prova prismático (EQUIPE DE FURNAS, 1997).

### *Temperatura*

Os corpos-de-prova são submetidos a vários ciclos de temperatura, em salas climatizadas a 4 °C, 21 °C e 40 °C.

Para diminuir a influência de variações de temperatura na sala de ensaio, os corpos-de-prova são estocados em caixas térmicas de madeira, revestidas com isopor e isoladas com paina em seu interior (Figura 2.14).



a)

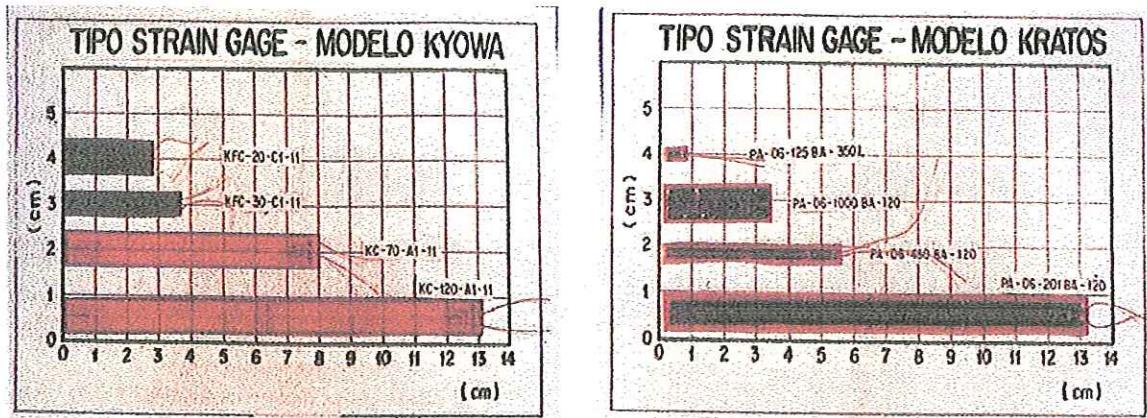
b)

**FIGURA 2.14 – Equipamentos:** a) caixa térmica com os corpos-de-prova e b) corpos-de-prova com extensômetros colados no fundo da caixa (EQUIPE DE FURNAS, 1997).

### Sistema de medida

A medição de temperatura é feita por termômetros de quartzo com leitura digital. O sensor de temperatura é colocado dentro da caixa térmica, junto com os corpos-de-prova. Podem ser realizadas as determinações em vários corpos-de-prova ao mesmo tempo.

A Figura 2.15 mostra os modelos de extensômetros elétricos de fio mais utilizados.



a)

b)

**FIGURA 2.15 – Modelos de extensômetros:** a) modelo Kyowa e b) modelo Kratos (EQUIPE DE FURNAS, 1997).

### Cálculo

Como há uma pequena variação na resistência dos fios, provocada pelas variações de temperatura, umidade e qualidade dos contatos, não é correto calcular o

$\beta$  dividindo-se a diferença de deformação obtida nas leituras dos extensômetros pela diferença de temperatura.

Para calcular corretamente o  $\beta$ , utiliza-se um corpo-de-prova compensador de quartzo, com coeficiente de dilatação térmica linear conhecido de  $7,74 \times 10^{-3}$  mm/(m. °C).

Além do mais, determina-se paralelamente em um corpo-de-prova de alumínio o seu  $\beta$ , para avaliar se houve alguma imprecisão na condução da determinação.

#### 2.3.4 – VALORES DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS

RZHEVSKY & NOVIK (1971), através de experimentos determinaram alguns valores das propriedades térmicas (*capacidade térmica, condutividade térmica e dilatação térmica*) para os minerais e as rochas (Tabela 2.15).

TABELA 2.15 – Propriedades térmicas de alguns minerais e rochas.

<i>Minerais e Rochas</i>	<i>Condutividade Térmica [W/(m. °C)]</i>	<i>Capacidade Térmica [J/(g. °C)]</i>	$\beta \times 10^3$ [mm/(m. °C)]
Grafite	116 – 174	0,67	7,9
Halita	5,37	0,84	32
Gipso	1,3	0,84 - 1,04	2,2
Dolomita	3,26	0,93	12
Calcita*	3,49	0,84	26
Calcita**	4,2	nd	5,4
Quartzo***	7,1	0,71	13,7
Quartzo****	12	1	7,5
Pirita	38	0,54	8,4
Micas	0,7 - 0,73	0,87	21 – 34
Enxofre	0,21	0,72 - 0,74	74 – 80
Basalto	1,25 - 2,93	0,63 - 0,89	5,4
Gabro	2	0,172	nd
Gnaisse	1,67 - 3,45	0,174	nd
Granito	2,2 - 4,05	0,55 - 0,79	6 - 9
Diabásio	3,35	0,17	5,4
Calcário	0,98 - 2,3	0,88 - 1,04	5 – 12
Quartzito	6,28	0,22	11
Mármore	1,3	0,42	3 – 15
Arenito	1,28 - 4,18	0,84	5 – 12
Folhelho argiloso	1,55 - 2,19	0,77	9
Carvão duro	0,9 - 0,5	1,29	nd

nd, não disponível; \*, paralelo a clivagem; \*\*, perpendicular a clivagem; \*\*\*, perpendicular ao plano axial; \*\*\*\*, paralelo ao plano axial.

Fonte: RZHEVSKY & NOVIK (1971).

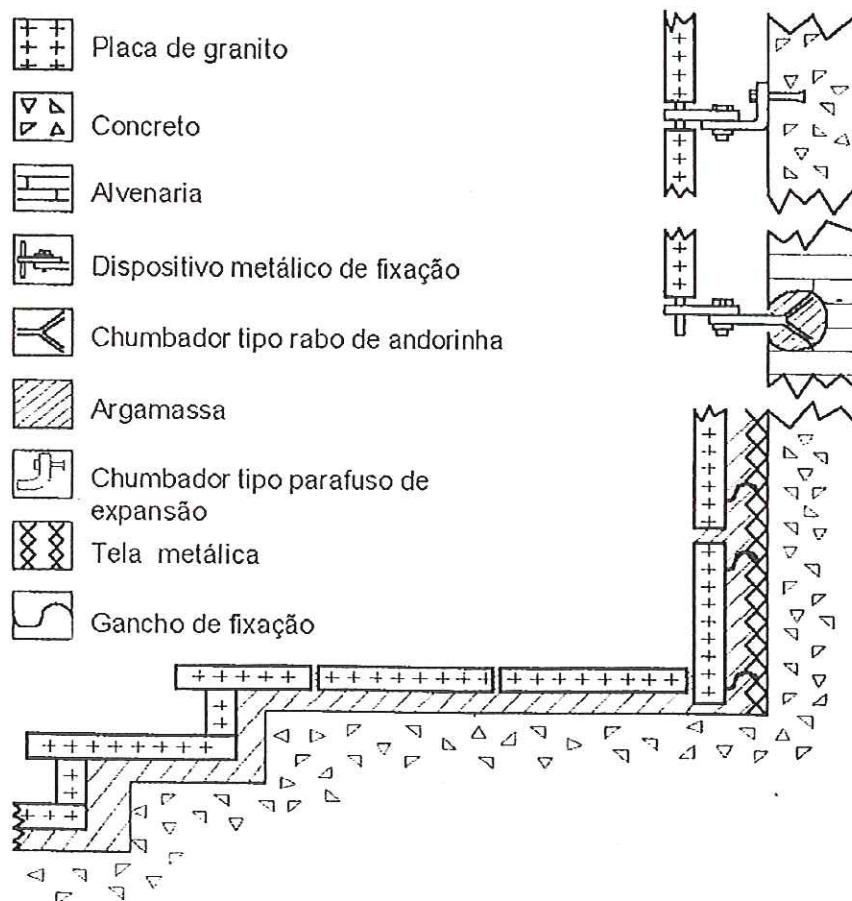
## 2.4 - Assentamento das Rochas de Revestimento

### 2.4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A fixação das rochas de revestimento pode ser feita de duas maneiras, por colagem com ou sem ancoragem de segurança e por ancoragem metálica.

Na colagem utiliza-se argamassa convencional, argamassas colantes ou colas especiais. Por outro lado, na ancoragem metálica, utiliza-se componentes metálicos (Figura 2.16).

Atualmente, no Brasil, segundo FLAIN (1997), as técnicas mais utilizadas para a fixação das rochas de revestimento em vedação vertical exterior são a colagem, com ou sem grampos, utilizando argamassa convencional (processo tradicional), e por ancoragem metálica com auxílio de dispositivos de fixação (processo racionalizado).

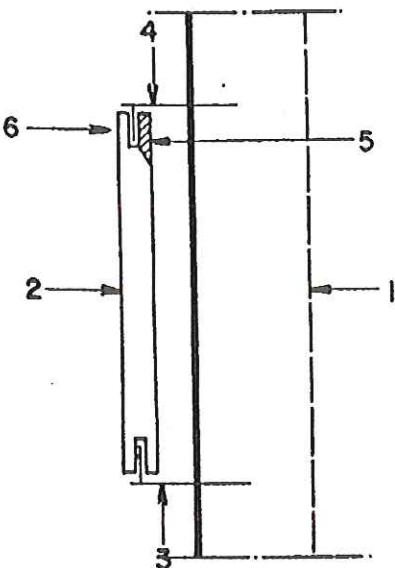


**FIGURA 2.16 – Processos de revestimento de uma edificação com placas de rocha (FRAZÃO & PARAGUASSU, 1998).**

#### 2.4.2 – ANCORAÇÃO METÁLICA

De acordo com ROCHAS DE QUALIDADE (1987), o sistema de ancoragem metálica foi introduzido nos Estados Unidos, no final da década de 60, e começou a ser utilizado 20 anos mais tarde no Brasil, sendo que o Estado de São Paulo, foi o pioneiro em sua utilização.

Segundo FLAIN (1997), pode-se considerar a fixação das placas de pedra através de componentes metálicos como sendo um processo racionalizado; pois a fixação se dá no momento do assentamento das placas, sendo que a camada de regularização, quando existente, é previamente executada. Também pode ser considerado racionalizado porque são utilizados componentes metálicos, fabricados fora do canteiro de obra e previamente definidos em projeto, aumentando assim o nível de organização do processo. A Figura 2.17 mostra um exemplo do esquema de funcionamento dos dispositivos de fixação.



**FIGURA 2.17** - Esquema de funcionamento dos dispositivos de fixação, retenção e sustentação de placas. 1-suporte; 2-placa de revestimento; 3-dispositivo metálico de sustentação; 4-dispositivo metálico de retenção; 5-partes resistentes da placa; 6-sentido de inclinação da placa (FLAIN, 1995).

Através da racionalização dos processos construtivos e da adoção de inovações tecnológicas associadas à consolidação nos canteiros de obras, acredita-se que se pode obter maior qualidade, desempenho, produtividade, menores

desperdícios de materiais e mão-de-obra. A seguir, serão apresentados dois exemplos de dispositivos de fixação metálica (Figura 2.18 e 2.19).

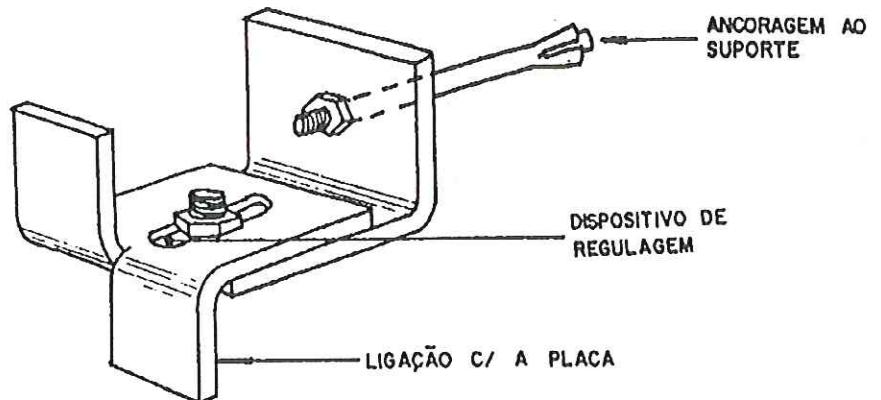


FIGURA 2.18 – Dispositivo de fixação metálica (FLAIN, 1995).

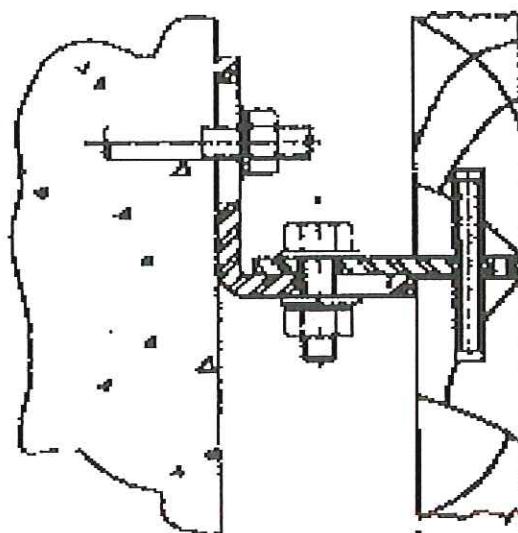


FIGURA 2.19 – Esquema do assentamento de placa usando dispositivo de fixação metálica (ROCHAS DE QUALIDADE, 2001).

Algumas vantagens na utilização da fixação de placas (granitos, mármores, etc.) através da ancoragem metálica, estão enumerados a seguir:

- a) não utiliza argamassas;
- b) maior velocidade no assentamento;
- c) inexistência de manchas e escorrimientos causados pela ação da umidade *versus* argamassa;

- d) apresenta maior segurança em termos de fixação de placas, quando comparado com a fixação comum através de argamassa;
- e) evita problemas como infiltração de água na argamassa de assentamento, que provocando reação com cimento com a cal provoca manchas nas placas;
- f) esse processo permite o emprego de placas de maiores dimensões, uma vez que cada placa tem sua sustentação independente;
- g) como as placas são auto fixadas, qualquer movimentação da estrutura do prédio não vai abalar a estabilidade da fixação;
- h) em caso de incêndio, as placas protegem o concreto não só pela sua resistência ao fogo (placas de 3 cm, p. ex.) como também devido ao espaço existente entre a placa e a face do concreto.

Os componentes metálicos de fixação devem ser constituídos de metais inalteráveis, isto é, que não sofram degradação devido ao ataque de substâncias existentes na atmosfera, em forma de gás ou vapor, dissolvidos na água da chuva ou na água de limpeza. Os principais metais que poderão ser utilizados para os componentes metálicos de fixação, são: aço inoxidável; cobre e suas ligas e alumínio (CONSIGLIO, 1972) (*apud* FLAIN, 1995).

PATTON (1978), estabeleceu o número de ancoragens metálica necessário para a fixação dos revestimentos de pedra dependendo do tamanho da placa (Tabela 2.16).

TABELA 2.16 – Exibe o número de ancoragens em função do tamanho da placa.

<i>Tamanho da Placa (m<sup>2</sup>)</i>	<i>Nº de ancoragens</i>
Até 0,18	2
0,18 – 0,37	3
0,37 – 1,10	4
1,10 – 1,80	6
Acima de 1,80	1 ancoragem extra para cada 0,3 m <sup>2</sup> adicional

**Fonte:** PATTON (1978).

#### 2.4.3 – ARGAMASSAS

São misturas aglomerantes destinadas a ligar tijolos, pedras, blocos ou outras unidades cerâmicas de alvenarias.

A NBR-7200 define argamassas como a mistura de aglomerantes e agregados com água, possuindo capacidade de endurecimento e aderência (FIORITO, 1994).

No Brasil, o processo tradicional de fixação das placas de rocha é, ainda hoje, muito utilizado, principalmente nas regiões mais afastadas dos grandes centros, onde há maior dificuldade de obtenção de novos materiais e mão-de-obra especializada (FLAIN, 1997).

O sistema de fixação com argamassa (por colagem) constitui-se do suporte, de uma tela previamente fixada a este, da camada de fixação e da camada de acabamento (placas de pedra e juntas). A seguir, serão apresentados os métodos convencionais usados no assentamento de revestimentos de paredes e pisos (Figuras 2.20 e 2.21).

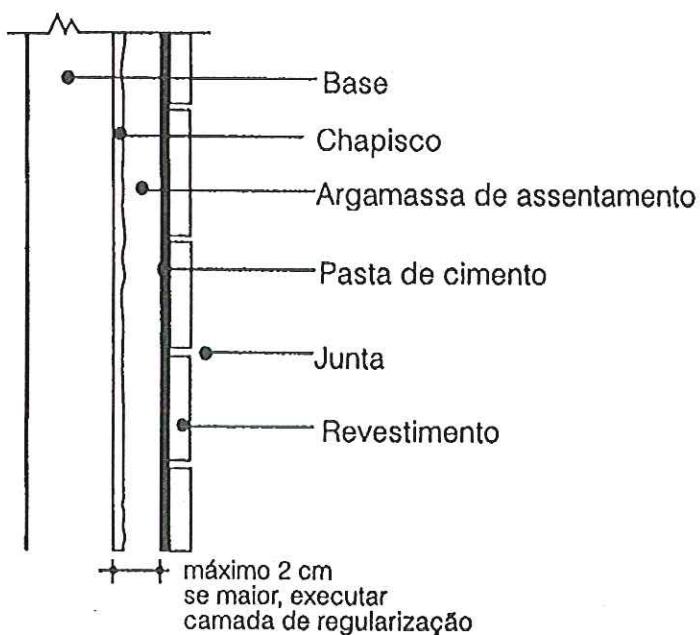
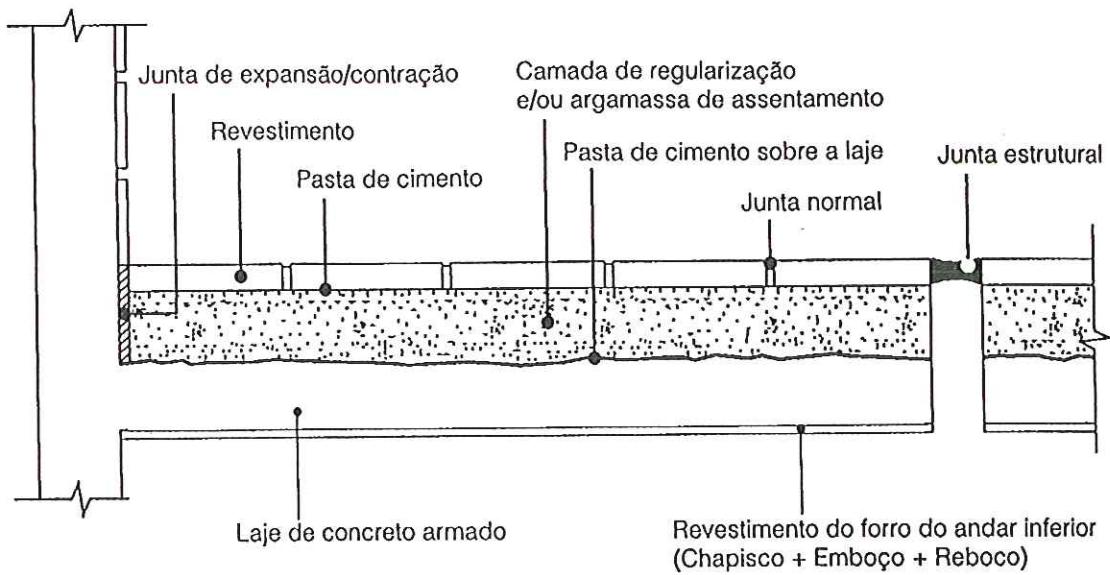


FIGURA 2.20 – Método convencional usado no revestimento de paredes (FIORITO, 1994).



**FIGURA 2.21 –** Método convencional usado no revestimento de piso sobre laje (FIORITO, 1994).

O suporte é responsável pela sustentação das camadas subsequentes; a tela tem por função proporcionar maior aderência entre a camada de fixação e o suporte, bem como servir de ancoragem para as placas de pedra que posteriormente serão amarradas à mesma. A camada de fixação, por sua vez, é responsável pela ligação da camada de acabamento ao suporte, proporcionando a aderência ao conjunto. A última camada é a de acabamento – que constitui o próprio revestimento.

PATTON (1978), definiu que na escolha da argamassa, devem ser considerados alguns fatores:

- resistência da argamassa;
- aparência;
- penetração de água e das chuvas;
- custo;
- a ligação entre a argamassa e o tijolo;
- trabalhabilidade, isto é, características de plasticidade de uma argamassa que permitem ocupar completamente a junta;
- retenção de água, ou seja, sua capacidade de reter água e impedir que ela passe para as unidades da alvenaria.

#### 2.4.4 - AS JUNTAS NOS REVESTIMENTOS

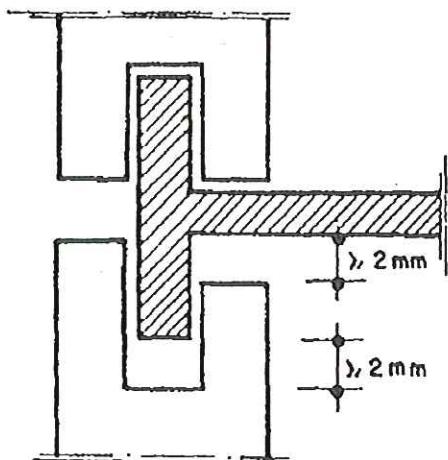
A dilatação térmica deve ser levada em conta mediante precauções, ditadas pela técnica, no sentido de evitar rupturas em alvenarias ou revestimentos, como no caso de revestimento de fachadas ou de pisos externos, expostos à ação direta do sol e à variação de temperatura. A boa técnica preconiza que sejam previstas juntas, afim de permitirem a dilatação das pedras que constituem o revestimento (CAVALCANTI, 1951).

De acordo com ROCHAS DE QUALIDADE (1987), o espaçamento das juntas entre as placas, que deve ser constante, é dimensionado em função do coeficiente de dilatação linear das pedras naturais (granitos ou mármores). A junta mínima que se observa normalmente é de 4 mm, porque abaixo desse valor não haveria espaço para absorver o aumento das placas.

Segundo FLAIN (1995), as juntas que compõem o revestimento podem ser: entre *componentes*, de *movimentação* ou *estruturais*. As juntas têm função de acabamento estético, de estanqueidade e de absorver as deformações possíveis de ocorrer no revestimento. O acabamento estético é exigido principalmente na uniformidade de espessura das juntas.

Entre *componentes*: são as juntas entre as placas que constituem o revestimento, as quais devem ser assentadas mantendo, entre si, a largura das juntas especificadas em projeto, que é calculada através do *coeficiente de dilatação térmica linear*.

Quando a fixação das placas é feita por componentes metálicos, e esses têm a função de retentor e sustentador, é recomendada que seja previsto a livre movimentação da placa inferior no sentido vertical, por meio de folgas (ABNT - NBR - 13708) (Figura 2.22).



**FIGURA 2.22 – Folgas mínimas especificada entre a placa e o componente de fixação (ABNT – NBR - 13708).**

Para que as juntas de *movimentação* ou *construtivas* exerçam suas funções, no seu dimensionamento devem ser consideradas as diversas solicitações a que as camadas do revestimento estarão sujeitas durante a vida útil, bem como as características dos materiais utilizados nessas camadas.

As juntas *estruturais* são as previstas nos encontros de materiais distintos e em elementos que se projetem para além do plano do revestimento. Quando previstas devem ser respeitadas em posição e largura no revestimento.

Quando se estuda as tensões que atuam sobre o revestimento, nota-se a importância das juntas entre as peças, as quais são indispensáveis por serem um elemento determinante da estabilidade dos revestimentos (FIORITO, 1994).

Desta forma, as juntas podem ser classificadas em:

- a) *juntas de assentamento*: são juntas entre as peças que compõem o revestimento;
- b) *juntas estruturais*: são juntas já existentes na estrutura do concreto. Na posição onde estiverem devem ser mantidas e com a mesma largura, em todas as camadas que constituem o revestimento;
- c) *juntas de expansão/contração*: devem ser projetadas em pisos e paredes revestidas, em todo perímetro do piso; no encontro do revestimento com pilares e vigas; no encontro com outros tipos de revestimentos;
- d) *juntas especiais*: em diversos tipos de indústrias e laboratórios, quando o revestimento estiver sujeito a agentes agressivos como ácidos, bases, óleos etc., as

juntas de assentamento e as demais devem ter a largura mínima de 7 mm, a fim de facilitar o perfeito preenchimento com materiais antiácidos apropriados.

Quanto ao emprego de selantes no rejuntamento das juntas de movimentação, o fator de forma (proporção largura/profundidade) deve estar compreendido entre 2 e 1, conforme recomendações do fabricante do selante. Deve-se prever a utilização de material de enchimento quando for necessário adaptar o perfil das juntas às dimensões ideais do cordão de selante.

Esse rejuntamento é feito apropriadamente com material que tenha elasticidade suficiente para permitir a contração e dilatação da rocha, de acordo com a variação da temperatura ambiente, sem que haja prejuízo para a montagem global de uma fachada e não se verifique esforços na estrutura do edifício (CUNHA & NEUMANN , 1979).

As características que os selantes devem apresentar, segundo FLAIN (1997), são as seguintes:

- a) serem resistentes aos agentes atmosféricos;
- b) apresentarem boa aderência aos materiais nos quais são aplicados;
- c) serem estanques ao ar e à água e não causarem manchas ou alterações nos materiais aos quais são aplicados;
- d) serem inertes na presença de substâncias químicas normalmente encontradas nos edifícios (alcalinidade das argamassas e produtos de limpeza);
- e) terem elasticidade suficiente e mantê-la ao longo do tempo.

## **CAPÍTULO 3**

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

---

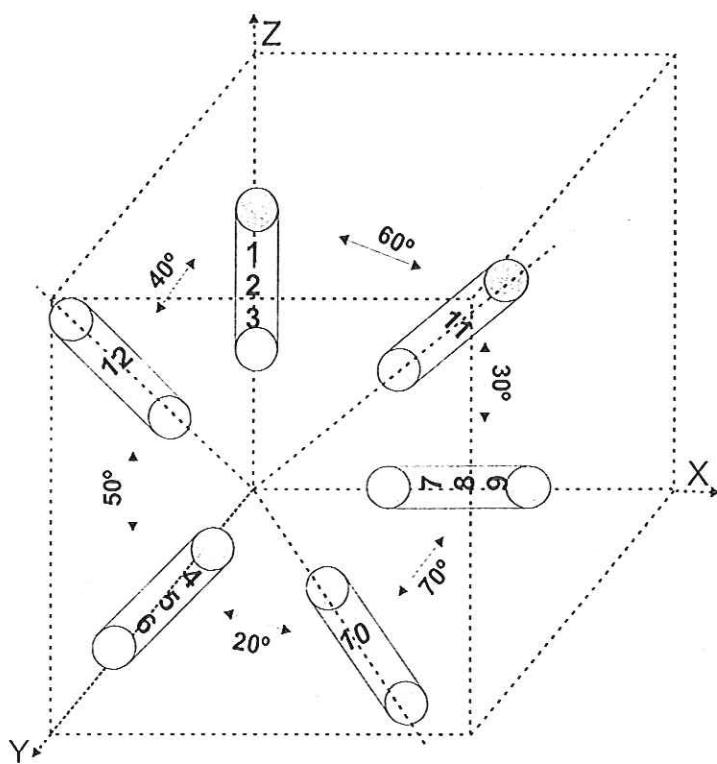
Este trabalho foi desenvolvido através de uma parceria entre o Departamento de Geotecnia (EESC/USP), a Divisão de Geologia do IPT e o Instituto de Geociências da Unesp-Rio Claro.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) forneceu 79 corpos-de-prova (58 de granito e 21 de gnaisse), suas respectivas lâminas delgadas e os valores do coeficiente de dilatação térmica ( $\beta$ ) de cada corpo-de-prova. Essas amostras fazem parte do conjunto de rochas que compõem os catálogos de rochas ornamentais e de revestimento dos Estados de São Paulo (IPT, 2000) e Mato Grosso (DNPM, 1998).

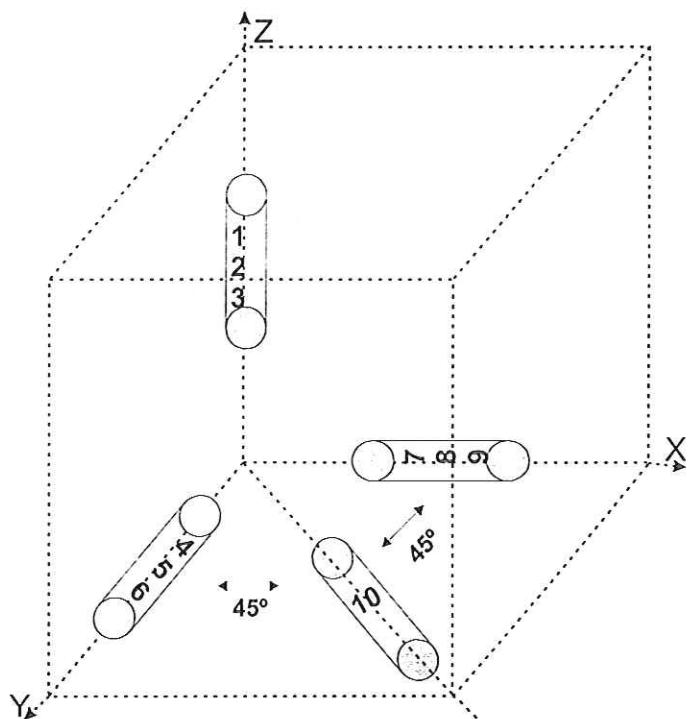
A esse conjunto de 79 corpos-de-prova foi adicionado mais 22 corpos-de-prova (CP) extraídos de dois blocos de rocha, sendo 12 CP do granito “Prata Interlagos” do Estado de São Paulo (Figura 3.1) e 10 CP do gnaisse “Cinza Corumbá” do Estado do Espírito Santo (Figura 3.2). O coeficiente de dilatação térmica dessas 22 amostras foi determinado na Universidade Estadual Paulista (Unesp).

Com isso, utilizou-se nessa pesquisa 101 corpos-de-prova de 20 tipos de granito (70 corpos-de-prova) e 10 tipos de gnaisse (31 corpos-de-prova).

Os índices físicos e a velocidade de propagação de ondas de todos os 101 corpos-de-prova, foram determinados na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC).



**FIGURA 3.1** - Esquema de extração dos corpos-de-prova do granito “Prata Interlagos”. 1 a 12 corpos-de-prova (comprimento de 90 mm e diâmetro de 27 mm), 20° a 70° ângulos entre os CP.



**FIGURA 3.2** - Esquema de extração dos corpos-de-prova do gnaisse “Cinza Corumbá”. 1 a 10 corpos-de-prova (comprimento de 90 mm e diâmetro de 27 mm), 45° ângulo entre os CP.

### **3.1 - Análise e Determinações Realizadas**

Foram realizadas as *análises petrográficas* e as determinações dos *índices físicos*, da *dilatação térmica linear* e da *velocidade de propagação de ondas longitudinais*.

A *análise petrográfica* e a determinação do *coeficiente de dilatação térmica linear* de 79 corpos-de-prova foram feitas na Divisão de Geologia no IPT; a determinação dos *índices físicos* e a *velocidade de propagação de ondas* foram realizadas no Departamento de Geotecnia da EESC/USP e o *coeficiente de dilatação térmica linear* dos 22 corpos-de-prova restantes, no Laboratório de Rochas Ornamentais da Unesp – Rio Claro.

Uma particularidade desse trabalho é que todas essas determinações foram realizadas utilizando os mesmos corpos-de-prova, ou seja, ao final da determinação dos coeficientes de dilatação térmica linear, os corpos-de-prova foram submetidos à determinação dos índices físicos e posteriormente da velocidade de propagação de ondas longitudinais.

#### **3.1.1 - ANÁLISE PETROGRÁFICA**

Esta análise foi realizada através do exame microscópico de 19 lâminas delgadas confeccionadas e cedidas pelo IPT, conforme a norma ABNT-NBR 12768.

Foram identificados e descritos as espécies minerais com ênfase na análise de suas formas e dimensões, seu estado de alteração, suas relações de contatos e o modo de distribuição na rocha.

Realizou-se análise qualitativa do microfissuramento e a quantificação mineralógica através de análises modais por contagem. A classificação petrográfica das rochas, foi feita através das proporções relativas de quartzo, K-feldspato e plagioclásio, obedecendo os critérios estabelecidos por STRECKEISEN (1976).

#### **3.1.2 - ÍNDICES FÍSICOS**

O termo *índices físicos* é usado para denominar algumas propriedades da rocha, tais como: massa específica aparente seca, porosidade aparente e absorção d'água aparente. Nessa pesquisa utilizam-se apenas os valores encontrados da

porosidade aparente, a qual foi correlacionada com a velocidade de propagação de ondas e com o coeficiente de dilatação térmica das rochas.

A determinação desses índices foram feitos, individualmente, em cada corpo-de-prova, seguindo as recomendações da norma ABNT - NBR 12766.

### 3.1.3 - COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR

A determinação da dilatação térmica linear está fundamentado na variação de volume que a rocha sofre quando submetida às variações de temperatura, podendo dilatar e/ou contrair. Embora, essa dilatação/contração se manifeste de forma tridimensional, a medida é feita de forma linear e expressa através do coeficiente de dilatação térmica ( $\beta$ ).

Os valores de  $\beta$  foram determinados, na Unesp, em corpos-de-prova cilíndricos, com diâmetro de 27 mm e comprimento de 90 mm. Estes corpos-de-prova foram aquecidos em água a partir de 0º até 50 ºC (taxa de aquecimento 0,3 ºC/min.), e resfriados de 50 até 0 ºC, de acordo com a norma ABNT NBR - 12765.

As determinações feitas pelo IPT foram realizadas em corpos-de-prova, também, cilíndricos, com diâmetro de 32 mm e comprimento de 90 mm.

A unidade de medida usada para esse coeficiente é mm/(m.ºC).

### 3.1.4 - VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS

O pulso ultra-sônico permite calcular a velocidade de propagação de ondas, a qual em primeira instância é usada para avaliar as condições de sanidade da rocha. Ela é influenciada pela estrutura, porosidade e pela presença ou não de água nos poros.

Nesta pesquisa a velocidade de propagação, em algumas amostras, foi determinada antes e depois do coeficiente  $\beta$ , para verificar se houve a formação de novas fissuras ou expansão de outras preexistentes, provocadas pela taxa de aquecimento usada (0,3ºC/min). Além disso, procurou-se observar a existência de relação entre a velocidade de propagação e a porosidade aparente nos granitos, e dessa velocidade com a direção de gnaissificação dos gnaisses.

A determinação da velocidade de propagação foi realizada seguindo as diretrizes da ASTM D 2845/95.

### 3.2 - Integração dos Resultados

Inicialmente agrupou-se os resultados dos 79 corpos-de-prova dos catálogos (DNPM, 1998 e IPT, 2000) com os valores obtidos dos 22 corpos-de-prova extraídos dos blocos de granito e gnaisse. Desse total, os valores de  $\beta$  foram separados em dois grupos, o do granito e o do gnaisse. O grupo do granito foi separado em dois subgrupos, o de granulação média (1 a 10 mm) e o de granulação grossa (10 a 30 mm).

Dos 101 corpos-de-prova estudados, foram separados 4 deles para determinação de  $\beta$  nos dilatômetros da Unesp-Rio Claro e do IPT, para verificar se os valores obtidos são os mesmos em ambos aparelhos. Além disso, fez-se um estudo de probabilidade dos valores de  $\beta$  com os 101 CP, para estabelecer o valor característico desse coeficiente.

As correlações feitas para os granitos e gnaisses separadamente, serão mostradas a seguir:

#### 3.2.1 – ROCHAS GRANÍTICAS

A seguir, serão descritos os procedimentos usados para correlacionar os parâmetros estudados para as rochas graníticas.

- a) Para observar se durante a determinação do coeficiente  $\beta$  ocorreu a formação de microfissuras ou expansão de microfissuras preexistentes, em função da taxa de aquecimento usada ( $0,3\text{ }^{\circ}\text{C/min.}$ ), mediu-se a velocidade de propagação de ondas antes (VPA) e depois (VPD) da determinação desse coeficiente;
- b) Como um dos fatores que influencia na velocidade de propagação de ondas (VP) é a porosidade, procurou-se estabelecer uma relação entre VP e a porosidade aparente ( $\eta$ ) para os granitos estudados;
- c) Fez-se uma copilação de pares de corpos-de-prova extraídos perpendicularmente entre si, ou seja, com tamanho dos grãos e conteúdo em quartzo constantes, exibindo porosidade aparente ( $\eta$ ) que não apresentou variação dentro da precisão em que foi feita a medida. Nessas condições, pode-se determinar a influência da estrutura da rocha no valor de  $\beta$ ;
- d) Foram gerados dois gráficos  $\beta$  versus  $\eta$ , um para rochas com granulação média e outro para granulação grossa, que apresentam conteúdo em quartzo de 30%. Por

regressão linear em ambos os gráficos foi possível determinar a influência da porosidade aparente ( $\eta$ ) no valor de  $\beta$ ;

e) Os valores de  $\beta$  foram transformados em  $\beta$  *equivalente* ( $\eta=0\%$ ), por meio da relação  $1\% \eta = 2,3 \times 10^{-3} \text{ mm}/(\text{m.}^{\circ}\text{C})$  (item 5.4). Em seguida, foram calculados os valores médios do  $\beta$  *equivalente* para rochas com textura média e grossa, com conteúdo em quartzo de 25 e 30%. Desta forma, foi possível determinar a influência do tamanho dos grãos minerais no valor de  $\beta$ ;

f) Por fim, gerou-se duas curvas, uma para rocha com granulação média e outra para rocha com granulação grossa, entre o  $\beta$  *equivalente* *versus* percentual de quartzo, e por regressão linear foi possível quantificar de forma relativa a influência do conteúdo de quartzo no valor de  $\beta$ .

### 3.2.2 – ROCHAS GNÁISSICAS

A seguir, serão descritos os procedimentos usados para correlacionar os parâmetros estudados para os gnaisses.

- a) Foi gerado um gráfico VP *versus*  $\eta$  para observar se a porosidade aparente interfere na VP dessas rochas;
- b) Fez-se a comparação entre o valor médio de  $\beta$  de dois corpos-de-prova extraídos perpendiculares entre si (norma NBR – 12765) e os valores individuais de cada corpo-de-prova, com a finalidade de verificar se o valor de  $\beta$  estava sendo subdimensionado;
- c) Além disso, os valores de  $\beta$  determinados paralelos à gnaissificação, foram comparados com os perpendiculares, com a finalidade de observar a influência da estrutura (gnaissificação) no valor desse coeficiente.

### 3.3 - Equipamentos Usados na Determinação de $\beta$

A seguir, serão descritos os equipamentos alocados no IPT e na Unesp, que foram usados para determinação do coeficiente de dilatação térmica linear ( $\beta$ ) das rochas analisadas.

### 3.3.1 – EQUIPAMENTO DO IPT

É composto por um sistema de refrigeração e aquecimento, onde a temperatura do corpo-de-prova (comprimento de 90 mm e diâmetro de 32 mm) é elevado através do banho (água) a uma taxa de 2 a 2,5 °C/min. (Figura 3.3). Para abaixar a temperatura a água é substituída por gelo, desta forma, poderia causar um choque térmico na amostra, o que não é desejado.

Os limites de temperatura superior e inferior são de 50 e 0 °C, respectivamente. Contudo, nesse equipamento esses valores dificilmente podem ser alterados.

As deformações do corpo-de-prova são medidas com transdutores do tipo *LVDT* (*Linear Variable Differential Transducer*) e com registro simultâneo X-Y.

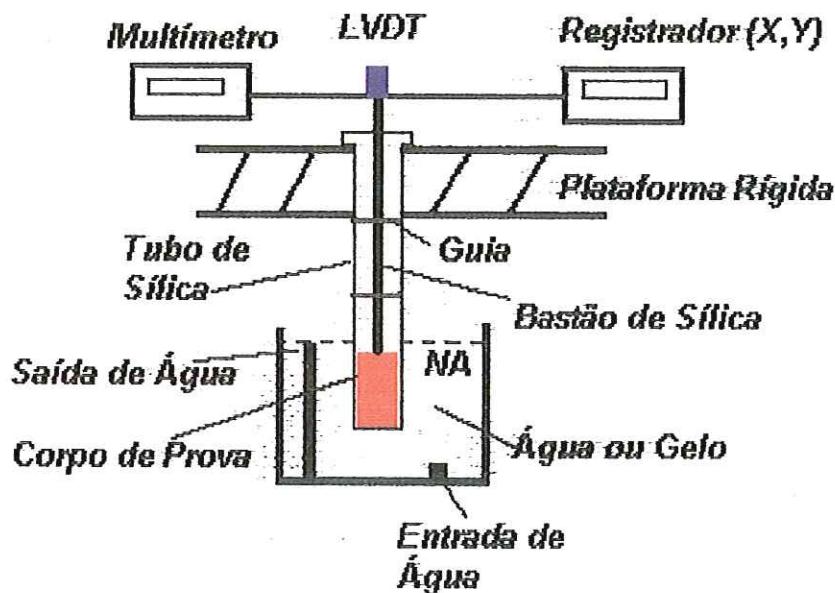


FIGURA 3.3 – Esquema do dilatômetro do IPT.

#### Sistema de Calibração

A calibração do dilatômetro alocado no IPT é realizada utilizando um corpo-de-prova de alumínio, que tem coeficiente de dilatação conhecido. Utiliza-se ainda um corpo-de-prova de quartzo (que apresenta coeficiente de dilatação bem definido) com as mesmas dimensões das rochas ensaiadas.

### **Procedimento**

Após a colocação do corpo-de-prova no tubo de quartzo, e a montagem do bastonete (haste de sílica) na superfície do mesmo, o tubo é colocado dentro do banho (água) até que atinja a estabilização, em torno de 50 °C.

Nesse momento, a água é substituída por gelo moído e então inicia-se efetivamente a leitura dos dados que serão usados no cálculo de  $\beta$ . Ao mesmo tempo, o registrador X-Y está traçando o gráfico de contração da amostra.

Cerca de 20 a 25 minutos mais tarde, o sistema começa a estabilizar, novamente, e o gelo é trocado por água. Dando início, então, à fase de aquecimento.

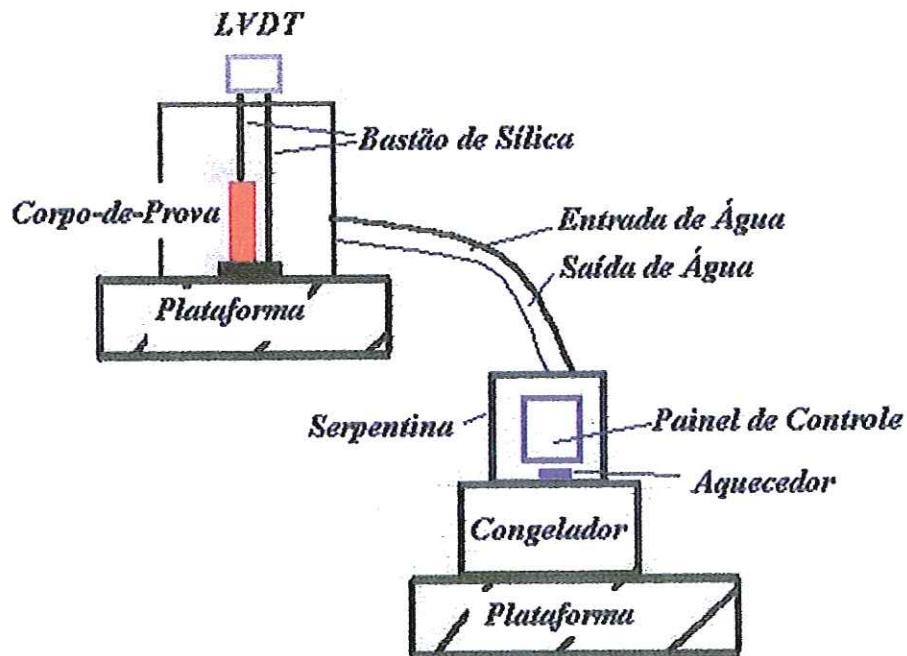
Os valores da temperatura e do deslocamento continuam a serem lidos para que se calcule o valor do segundo  $\beta$ , ou seja, na dilatação. Além disso, o gráfico de dilatação é traçado simultaneamente. Essa etapa é finalizada, também, cerca de 25 minutos depois, quando for detectado uma nova estabilização do sistema, isto é, o deslocamento fica constante um certo período de tempo.

Com isso, a determinação é finalizada e o valor do coeficiente é calculado manualmente.

#### **3.3.2 – EQUIPAMENTO DA Unesp**

É constituído por um sistema de refrigeração e aquecimento projetado para elevar e abaixar a temperatura do banho (água) com uma taxa de 0,3 °C/min. (Figura 3.4). Os limites de temperatura superior e inferior são de 50° e 0 °C, respectivamente. No entanto, esses valores podem ser facilmente alterados, através de um controlador digital do tipo PID com o *setpoint* programável e variável ao longo dos dois limites.

Essa determinação é realizada em conjunto com um computador, o qual contém um programa para calcular os coeficientes de dilatação e traça o gráfico da dilatação em função do tempo e da temperatura.



**FIGURA 3.4 – Esquema do dilatômetro da Unesp-Rio Claro.**

### *Sistema de Calibração*

A calibração do sistema é feita de maneira semelhante a do equipamento do IPT, usando-se corpos-de-prova de dilatação térmica conhecida.

### *Alteração das Variáveis do Sistema*

O controlador digital permite a modificação de suas variáveis através do seu próprio teclado do painel de controle (Figura 3.4) que é usado para alterar o valor superior ( $50^{\circ}\text{C}$ ), inferior ( $0^{\circ}\text{C}$ ) e a taxa de aquecimento ( $0,3^{\circ}\text{C/min.}$ ) para os valores que se deseja trabalhar. Existem botões no painel de controle que são setas auxiliares, para cima e para baixo, que têm a função de alterar o valor da variável em visualização.

### *Procedimento*

A determinação realizada por esse equipamento pode ser dividida em 4 partes:

### a) Estabilização Inicial do Sistema

Comprime-se o botão *iniciar* da janela principal do programa e o ensaio será iniciado. O programa monitora o equipamento até que é detectada a estabilização no deslocamento do corpo-de-prova.

Quando o sistema estiver estabilizado inicia-se efetivamente a leitura dos dados que serão utilizados para calcular o  $\beta$ . O sistema envia uma mensagem para a tela do computador, e pergunta se o usuário deseja ou não que o ensaio continue. Feito essa confirmação, será solicitado que seja invertida a posição da chave de *setpoint* que encontra-se no painel de controle.

### b) Primeira Leitura (aquecimento ou resfriamento)

Nesta fase os valores de temperatura e deslocamento usado para o cálculo de  $\beta$  começam a ser lidos. O gráfico deslocamento *versus* tempo será traçado e atualizado aproximadamente de 15 em 15 segundos.

Decorrido cerca de 3 horas, o sistema chega novamente ao ponto de estabilização, ou seja, a um valor de deslocamento constante durante um período de tempo de mais ou menos 20 minutos.

Percebida a estabilização do sistema, solicita-se que se inverta a chave *setpoint* do painel e dará início a terceira parte do ensaio.

### c) Segunda Leitura (aquecimento ou resfriamento)

Os valores de temperatura e deslocamento continuarão a ser lidos para que se calcule o segundo valor de  $\beta$ . Este valor será referente ao aquecimento ou resfriamento, dependendo da leitura realizada anteriormente.

Esta etapa será finalizada também, 3 horas depois, quando o programa do computador detectar uma nova estabilização do sistema. Com isso, a determinação será realizado e os resultados obtidos mostrados em uma nova janela que será aberta.



#### d) Visualização dos Resultados

Nesta janela são exibidos os valores máximos e mínimos da temperatura e deslocamento tanto do aquecimento quanto do resfriamento. Os valores de  $\beta$  de dilatação e contração são automaticamente calculados e exibido o valor de  $\beta$  final, através da seguinte expressão:

$$\beta = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T}$$

Onde:

$\Delta L$  = incremento de comprimento do corpo-de-prova (m);

$L_0$  = comprimento do corpo-de-prova (m);

$\Delta T$  = incremento de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Para observar a repetitividade dos valores de  $\beta$  entre esses dois equipamentos, foram feitas determinações com um e com outro usando os mesmos corpos-de-prova (item 5.1).

## **CAPÍTULO 4**

### **CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DAS ROCHAS ESTUDADAS**

---

#### **4.1 - Análise Petrográfica**

##### *Rochas Graníticas*

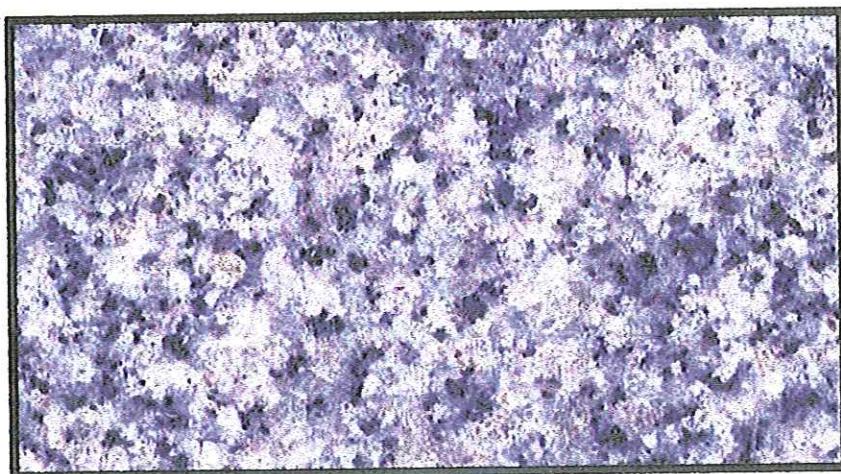
Este exame permitiu determinar a composição mineralógica, definir a natureza, as relações texturais e o estado microfissural das rochas analisadas.

As rochas estudadas são constituídas essencialmente por quartzo, plagioclásio e feldspatos, além da biotita, minerais acessórios (titanita, allanita, zircão, turmalina, etc.) e secundários (argilominerais, sericita, carbonatos, hidróxido de ferro, etc.) em proporções bastante variáveis.

A classificação petrográfica dessas rochas, baseou-se nas proporções relativas de quartzo, plagioclásio e feldspatos, e obedeceu os critérios estabelecidos por STREICKEISEN (1976). Enquadando-as como sienogranitos, monzogranitos e alcali-feldspato-granito.

Em termos gerais, essas rochas apresentam as seguintes características: coloração variando do cinza ao vermelho, estrutura maciça, textura equi e inequigranular xenomórfica fina a grossa e microfissuramento variado (Tabela 4.1).

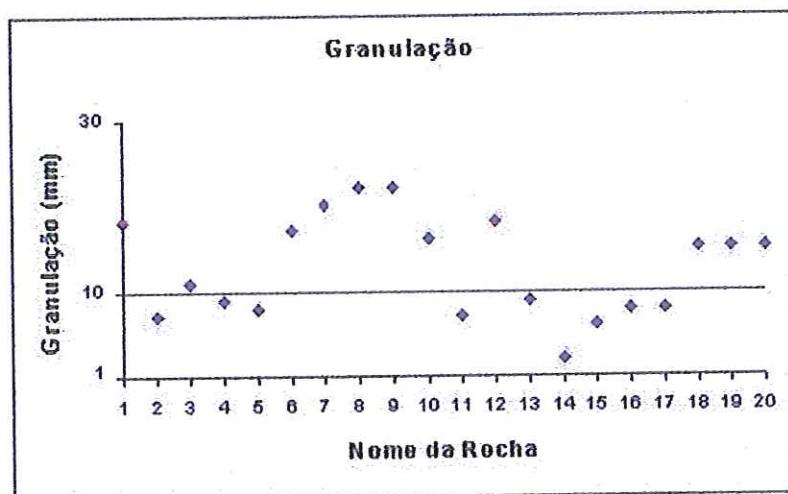
A Figura 4.1 é um exemplo de um dos granitos estudados (“Prata Interlagos”).



**FIGURA 4.1** – Detalhe do Granito “Prata Interlagos”, mostrando o aspecto maciço da rocha.

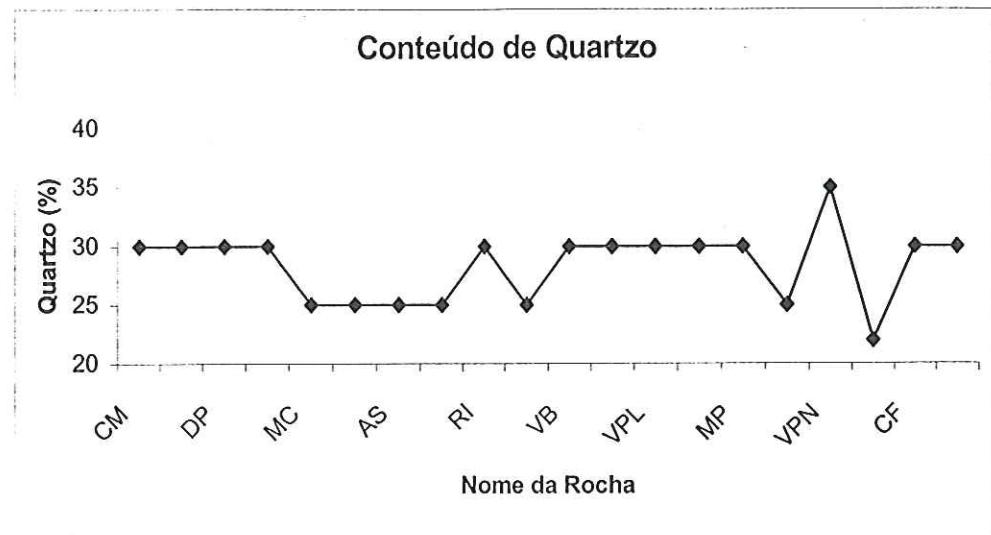
Além da composição mineralógica essa análise foi executada com a finalidade de se obter, principalmente, informações sobre o tamanho dos grãos minerais e o conteúdo em quartzo.

De acordo com o tamanho dos grãos, os granitos (sienogranitos, monzogranitos e alcali-feldspato-granito) foram divididos em dois grupos: os de granulação média (1 a 10 mm) e os de granulação grossa (10 a 30 mm), segundo a Figura 4.2.



**FIGURA 4.2** – Distribuição da granulação dos granitos estudados: 1-CM, Cinza Mauá; 2-PI, Prata Interlagos; 3-DP, Doré Paulista; 4-DC, Dourado Caju; 5-MC, Marrom Caju; 6-MSP, Marrom São Paulo; 7-AS, Amêndoas Sorocaba; 8-RB, Rosa Biritiba; 9-RI, Rosa Itupeva; 10-RMB, Rosa Monte Belo; 11-VB, Vermelho Bragança; 12-VCB, Vermelho Capão Bonito; 13-VPL, Vinho Paulista; 14-QM, Quatro Marcos; 15-MP, Marrom Pantanal; 16-VMT, Vermelho Mato Grosso; 17-VPN, Vermelho Pantanal; 18-VU, Vermelho Urutau; 19-CF, Cinza Francês; 20-J, Jauru.

Com relação ao conteúdo em quartzo nos granitos observou-se que esses são constituídos, predominantemente, por 25 e 30% (Figura 4.3).



**FIGURA 4.3 – Conteúdo de quartzo nos granitos estudados.** CM, Cinza Mauá; PI, Prata Interlagos; DP, Doré Paulista; DC, Dourado Caju; MC, Marrom Caju; MSP, Marrom São Paulo; AS, Amêndoas Sorocaba; RB, Rosa Biritiba; RI, Rosa Itupeva; RMB, Rosa Monte Belo; VB, Vermelho Bragança; VCB, Vermelho Capão Bonito; VPL, Vinho Paulista; QM, Quatro Marcos; MP, Marrom Pantanal; VMT, Vermelho Mato Grosso; VPN, Vermelho Pantanal; VU, Vermelho Urutau; CF, Cinza Francês; J, Jauru.

TABELA 4.1 - Síntese dos aspectos petrográficos dos granitos estudados.

<i>Estado Produtor</i>	<i>Nome Comercial</i>	<i>Cor</i>	<i>Estrutura/Textura</i>	<i>Granulação Média (mm)</i>	<i>Microfissuras</i>	<i>Composição Mineralógica</i>	<i>Classificação Petrográfica</i>
S Ã O  P A  U L O	CM	Cinza médio	Maciça hipidiomórfica/porfirítica	18	Numerosas, intra e intergranular, preenchida por calcita	Q (30%); Pl (30%); F (25%); B (15%); outros (opacos, apatita, sericita, etc.)	Biotita monzogranito porfirítico
	PI	Cinza claro amarelado	Maciça, inequigranular hipidiomórfica	7	Raras, intragranular, preenchida por material argilo-ferruginoso	Q (30%); Pl (30%); F (20-25%); B (15%); outros (titanita, apatita, argilominerais, etc.)	Biotita monzogranito
	DP	Rosa amarronzado	inequigranular hipidiomórfica	11	Comuns intra e transgranulares, preenchida por calcita e/ou hidróxido de ferro	Q (30%); Pl (20-25%); F (35-40%); B (10%); outros (opacos, titanita, clorita, etc.)	Biotita monzogranito
	DC	Marrom médio avermelhado	inequigranular hipidiomórfica	9	Raras, intragranulares, preenchida por calcita	Q (30%); Pl (20-25%); F (35-40%); B (10%); outros (opacos, sericita, hidróxido de ferro, etc.)	Monzogranito
	MC	Marrom médio	Maciça inequigranular	8	Raras, intragranulares, preenchida por calcita	Q (25%); Pl (30%); F (35%); B (5%); outros (apatita, titanita, sericita, etc.)	Monzogranito

Q, quartzo; Pl, plagioclásio; F, feldspato; B, biotita; anfibólito; CM, Cinza Mauá; PI, Prata Interlagos; DP, Doré Paulista; DC, Dourado Caju; MC, Marrom Caju; (Continua).

Fonte: IPT (2000) – modificada.

TABELA 4.1 – Continuação

<i>Estado Produtor</i>	<i>Nome Comercial</i>	<i>Cor</i>	<i>Estrutura/Textura</i>	<i>Granulação Média (mm)</i>	<i>Microfissuras</i>	<i>Composição Mineralógica</i>	<i>Classificação Petrográfica</i>
S Ã O  P A U  L O	MSP	Marrom claro	Maciça inequigranular	17	Raras, transgranulares, preenchida por carbonato	Q (25%); Pl (25%); F (45%); B (5%); outros (opacos, apatita, carbonatos, etc.)	Monzogranito
	AS	Rosa amarronzado	Maciça, inequigranular hipidiomórfica	20	Comuns, intra e transgranulares, preenchida por carbonato, hidróxido de ferro	Q (25%); Pl (20%); F (45%); B (10%); outros (opacos, apatita, clorita, etc.)	Biotita sienogranito profírtico
	RB	Rosa avermelhado	Maciça, inequigranular xenomórfica	22	Comuns, intra e transgranulares, preenchida por carbonato e hidróxido de ferro	Q (25-30%); Pl (15%); F (35-40%); B (15%); outros (allanita, epidoto, sericita, etc.)	Biotita sienogranito
	RI	Vermelho claro	Maciça, inequigranular	22	Comuns, intra e transgranulares, preenchida por calcita	Q (30%); Pl (25%); F (35-40%); B (5-10%); outros (apatita, zircão, carbonato, etc.)	Monzogranito
	RMB	Marrom claro avermelhado	Maciça inequigranular, hipidiomórfica/porfíritica	16	Freqüente, inter e intragranulares, preenchida por hidróxido de ferro	Q (25%); Pl (25%); F (40%); B (10%); outros (titanita, apatita, clorita, tec.)	Biotita monzogranito profírtico

Q, quartzo; Pl, plagioclásio; F, feldspato; B, biotita; MSP, Marrom São Paulo; AS, Amêndoa Sorocaba; RB, Rosa Biritiba; RI, Rosa Itupeva; RMB, Rosa Monte Belo; (Continua).

Fonte: IPT (2000) – modificada.

TABELA 4.1 – Continuação.

<i>Estado Produtor</i>	<i>Nome Comercial</i>	<i>Cor</i>	<i>Estrutura/Textura</i>	<i>Granulação Média (mm)</i>	<i>Microfissuras</i>	<i>Composição Mineralógica</i>	<i>Classificação Petrográfica</i>
S Ã O  P A U L O	VB	Vermelho alaranjado	Maciça, granular, hipidiomórfica/porfíritica	7	Abundantes, inter e intragranulares, preenchida por filossilicatos e hidróxido de ferro	Q (30%); Pl (25-30%); F (35-40%); B (<5%); outros (opacos, apatita, carbonato, etc.)	Monzogranito porfíritico
	VCB	Vermelho médio a escuro	Maciça, inequigranular hipidiomórfica	18	Frequentes, intra, inter e transgranulares preenchidas por sericita, calcita e hidróxido de ferro	Q (30%); Pl (25%); F (35%); B (10%); outros (opacos, fluorita, sericita, etc.)	Biotita monzogranito
	VPL	Vermelho com pintas brancas	Maciça, granular, xenomórfica a hipidiomórfica	9	Raras, intragranulares, preec. por calcita	Q (30%); Pl (15%); F (50-55%); B (15%); outros (magnatita, biotita, clorita)	Sienogranito
MATO GROSSO	QM	Rosa escura	Maciço, equigranular	2	nd	Q (30%); Pl (35%); F (30%); outros (epidoto, sericita e muscovita)	Monzogranito
	MP	Marrom claro	Maciço, equigranular	6	nd	Q (30%); Pl (15%); F (45%); B (5%); outros (sericita, clorita, zircão)	Sienogranito

nd; não disponível; Q, quartzo; Pl, plagioclásio; F, feldspato; B, biotita; VB, Vermelho Bragança; VCB, Vermelho Capão Bonito; VPL, Vinho Paulista (Fonte: IPT, 2000 - modificada); QM, Quatro Marcos; MP, Marrom Pantanal (Fonte: DNPM, 1998 – modificada); (Continua).

TABELA 4.1 – Continuação.

<i>Estado Produtor</i>	<i>Nome Comercial</i>	<i>Cor</i>	<i>Estrutura/Textura</i>	<i>Granulação Média (mm)</i>	<i>Microfissuras</i>	<i>Composição Mineralógica</i>	<i>Classificação Petrográfica</i>
<b>MATO GROSSO</b>	VMT	Avermelhada com tons branco-esvedeado	Maciça, equigranular	8	nd	Q (25%); Pl (12%); F (45%); M (6%); outros (titanita, epídoto e opacos)	Sienogranito
	VPN	Rosada	Maciça, equigranular	8	nd	Q (35%); Pl (18%); F (45%); B (4%); outros (sericita, clorita, opacos, etc.)	Sienogranito
	VU	Vermelho escuro	Maciça, equigranular	15	nd	Q (22%); Pl (5%); F (73%); outros (clorita e opacos)	Alcali-feldspato-granito
	CF	Cinza	Maciça, granular, porfirítica	15	nd	Q (30%); Pl (30%); F (35%); B + Ep (5%); outros (esfeno, turmalina e óxidos)	Monzogranito
	J	Rosa escuro	Maciça, granular	15	nd	Q (30%); Pl + F (46%); B (10%); A (5%); outros (zircão, apatita e opacos)	Sienogranito

nd; não disponível; Q, quartzo; Pl, plagioclásio; F, feldspato; B, biotita; M, muscovita; A, anfibólito; Ep, epídoto; VMT, Vermelho Mato Grosso; VPN, Vermelho Pantanal; VU, Vermelho Urutau; CF, Cinza Francês; J, Jauru.

Fonte: DNPM (1998) – modificada.

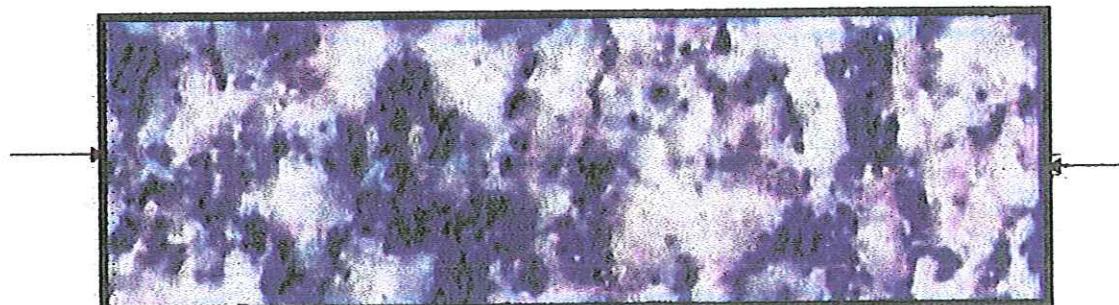
## *Rochas Gnaissicas*

Os gnaisses estudadas são constituídos essencialmente por quartzo, plagioclásio e K-feldspatos, além da biotita, anfibólio e piroxênio. Os minerais acessórios presentes são os opacos, apatita, allanita, etc. e alguns secundários como a sericita, clorita, hidróxido de ferro, etc. em proporções bastante variáveis.

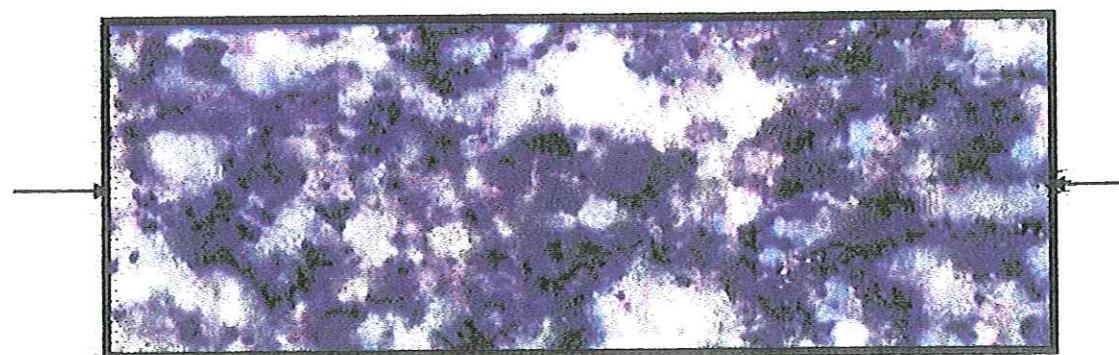
A classificação petrográfica dessas rochas, baseou-se nas proporções relativas de quartzo, plagioclásio e feldspatos. Estas rochas foram enquadradas como monzogranitos, sienogranitos e granodiorito gnaisse.

As características observadas nessas rochas foram as seguintes: coloração que vai do cinza ao vermelho; bastante orientados, apresentando textura granoblástica muito fina a grossa, com grau de microfissuramento bastante variado (Tabela 4.2).

Utilizou-se a orientação mineral, principalmente, do K-feldspato e das micas, para estabelecer a direção de determinação de  $\beta$ , ou seja, perpendicular (Figura 4.4) e paralela (Figura 4.5) à gnaissificação das rochas.



**FIGURA 4.4 – Determinação de  $\beta$  perpendicular à estrutura do gneisse “Cinza Corumbá”.**



**FIGURA 4.5 - Determinação de  $\beta$  paralela à estrutura do gneisse “Cinza Corumbá”.**

O conteúdo de quartzo nos gnaisses (monzogranitos, sienogranitos e granodiorito) variam de 15 a 35 %, apresentando a maior freqüência em 25% (Figura 4.6).

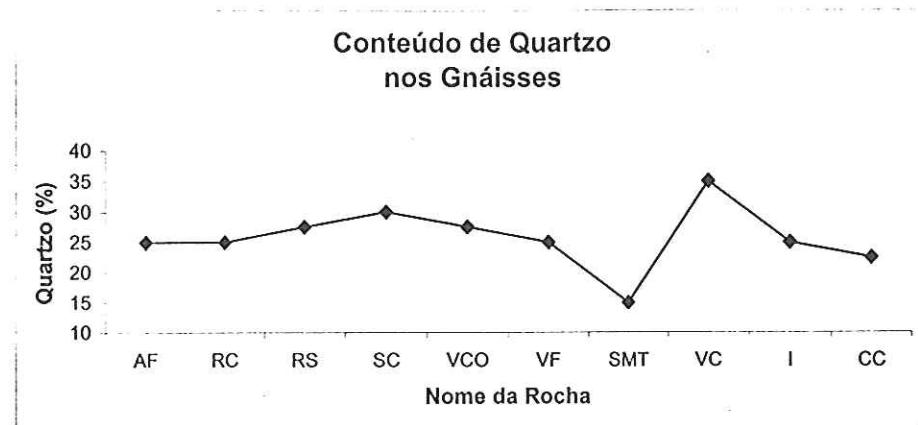


FIGURA 4.6 – Conteúdo de quartzo nos gnaisses estudados. AF, Azul Fantástico; RC, Rosa Cedro; RS, Rosa Salmão; SC, Salmão Cardeal; VCO, Vermelho Coral; VF, Vermelho Fartura; SMT, Salmão Mato Grossense; VC, Vila Cardoso; I, Ipiranga; CC, Cinza Corumbá.

Os gnaisses são constituídos, predominantemente, por minerais de granulação grossa (10 a 30 mm), seguido pela granulação média (1 a 10 mm), de acordo com Figura 4.7.

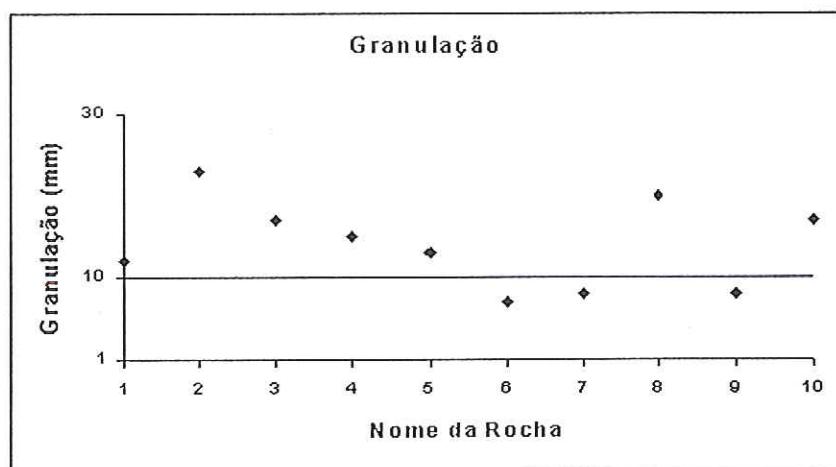


FIGURA 4.7 – Distribuição da granulação nos gnaisses estudados. 1-AF, Azul Fantástico; 2-RC, Rosa Cedro; 3-RS, Rosa Salmão; 4-SC, Salmão Cardeal; 5-VCO, Vermelho Coral; 6-VF, Vermelho Fartura; 7-SMT, Salmão Mato Grossense; 8-VC, Vila Cardoso; 9-I, Ipiranga; 10-CC, Cinza Corumbá.

TABELA 4.2 – Síntese dos aspectos petrográficos dos gnaisses estudados.

<i>Estado Produtor</i>	<i>Nome Comercial</i>	<i>Cor</i>	<i>Estrutura/Textura</i>	<i>Granulação Média (mm)</i>	<i>Microfissuras</i>	<i>Composição Mineralógica</i>	<i>Classificação Petrográfica</i>
S Ã O  P A U L O	AF	Rosa acinzentado/a zul	Gnáissica granoblástica/porfiroclástica	12	Poucas, intra e transgranulares, preenchidas por calcita	Q (25%); Pl (15-20%); F (40%); B (15%); outros (opacos, titanita, carbonatos, etc.)	Biotita granodioito gnáissico
	RC	Alaranjado	Granoblástica seriada	23	Raras, preenchida por calcita	Q (25%); Pl (30%); F (35%); B (5-10%); outros (opacos, apatita, sericita, etc.)	Biotita gnáissico monzogranítico
	RS	Rosa amarronzado	Granoblástica inequigranular/porfiroblástica	17	Comuns, intra e transgranulares, preenchida por calcita	Q (25-30%); Pl (30%); F (20-25%); B (10%); outros (opacos, zircão, argilominerais, etc.)	Biotita monzogranito gnáissico
	SC	Rosa amarronzada	Orientada, gnáissica e bandada, granoblástica	15	Comuns, intra, inter e transgranulares, preenchida por hidróxido de ferro	Q (30%); Pl (15%); F (40%); B (5%); outros (allanita, magnetita, hidróxido de ferro, etc.)	Hornblendita gnaisse sienogranítico

Q, quartzo; Pl, plagioclásio; F, feldspato; B, biotita; AF, Azul Fantástico; RC, Rosa Cedro; RS, Rosa Salmão; SC, Salmão Cardeal; (Continua).

Fonte: IPT (2000) – modificada.

TABELA 4.2 – Continuação.

<i>Estado Produtor</i>	<i>Nome Comercial</i>	<i>Cor</i>	<i>Estrutura/Textura</i>	<i>Granulação Média (mm)</i>	<i>Microfissuras</i>	<i>Composição Mineralógica</i>	<i>Classificação Petrográfica</i>
S Â O  P A U L O	VCO	Vermelho claro/marrom	Granoblástica	13	Comuns, intra e transgranulares, preenchida por calcita e filossilicatos	Q (25-30%); Pl (20%); F (40%); outros (hornblenda, opacos, clorita, etc.)	Sienogranítico gnássico
	VF	Vermelho escuro	Gnássica, granoblástica/ Granonematoblástica		Freqüente, intragranulares, preenchida por carbonato	Q (25%); Pl (15%); F (45%); outros (piroxênio, allanita, clorita, etc.)	Sienogranítico gnássico
M A T O  G R O  S S O	SMT	Avermelhada com bandas escuras	nd	8	nd	Q (15%); Pl (18%); F (42%); B (15%); outros (anfibólio, titanita, apatita, etc.)	Biotita sienogranito gnássico
	VC	Rosa pálido	nd		nd	Q (35%); Pl (15%); F (25%); B (15%); Ep (5%); outros (opacos)	Monzogranito gnássico
	I	Cinza avermelhada	nd	8	nd	Q (25%); Pl (35%); F (35%); outros (epídoto, sericita e muscovita)	Monzogranito gnássico

nd, não disponível; Q, quartzo; Pl, plagioclásio; F, feldspato; B, biotita; Ep, epídoto; VCO, Vermelho Coral; VF, Vermelho Fartura (Fonte: IPT, 2000 – modificada); SMT, Salmão Mato-Grossense; VC, Vila Cardoso; I, Ipiranga (Fonte: DNPM, 1998 – modificada); (Continua).

TABELA 4.2 – Continuação.

<i>Estado Produtor</i>	<i>Nome Comercial</i>	<i>Cor</i>	<i>Estrutura/Textura</i>	<i>Granulação Média (mm)</i>	<i>Microfissuras</i>	<i>Composição Mineralógica</i>	<i>Classificação Petrográfica</i>
ESPIRITO SANTO	CC	Cinza claro	Gnáissica granoblástica	17	nd	Q (20-25%); Pl (20-25%); F (25-30%); B (15-20%); outros (opacos, titanita, muscovita, etc.)	Biotita monzogranito gnáissico

nd, não disponível; Q, quartzo; Pl, plagioclásio; F, feldspato; B, biotita; CC, Cinza Corumbá.

Fonte: IPT (1993) – modificada.

## 4.2 - Índices Físicos

### *Rochas Graníticas*

Os valores de massa específica aparente seca, porosidade aparente e absorção d'água aparente, para cada corpo-de-prova, estão representados na Tabela 4.3. Desses três parâmetros, a porosidade aparente ( $\eta$ ) foi a única usada nas correlações.

A porosidade aparente oscila entre 0,32 e 1,4 %, valores esses relacionados, às amostras MSP (CP 02) e VPN (CP 02), respectivamente.

TABELA 4.3 - Valores de massa específica aparente seca ( $\rho$ ), porosidade aparente ( $\eta$ ) e absorção d'água aparente ( $\alpha$ ) dos granitos estudados.

<i>Nome Comercial</i>	<i>Corpos-de-prova</i>	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$\eta$ (%)	$\alpha$ (%)
CM	01	2.672	0,59	0,22
	02	2.647	0,56	0,21
PI	01	2.624	0,87	0,33
	02	2.508	0,81	0,32
	03	2.619	0,85	0,32
	04	2.628	0,63	0,24
	05	2.625	0,68	0,26
	06	2.564	0,63	0,24
	07	2.633	0,76	0,29
	08	2.625	0,80	0,30
	09	2.630	0,74	0,28
	10	2.629	0,69	0,26
	11	2.630	0,84	0,32
	12	2.623	0,84	0,32
	13	2.636	0,48	0,18
	14	2.634	0,48	0,18
	15	2.637	0,45	0,17
DP	16	2.635	0,56	0,21
	17	2.636	0,52	0,19
	18	2.637	0,53	0,20
DC	01	2.634	0,66	0,25
	02	2.632	0,68	0,26
DC	01	2.634	0,77	0,29
	02	2.630	0,87	0,33
	03	2.636	0,78	0,29

$\rho$ , massa específica aparente seca;  $\eta$ , porosidade aparente;  $\alpha$ , absorção d'água aparente; CM, Cinza Mauá; PI, Prata Interlagos; DP, Dorê Paulista; DC, Dourado Caju; (Continua).

TABELA 4.3 – Continuação

<i>Nome Comercial</i>	<i>Corpos-de-prova</i>	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\eta$ (%)	$\alpha$ (%)
<b>MC</b>	01	2.648	0,56	0,21
	02	2.649	0,53	0,20
<b>MSP</b>	01	2.635	0,39	0,15
	02	2.642	0,32	0,12
	03	2.639	0,36	0,14
<b>AS</b>	01	2.647	0,45	0,17
	02	2.666	0,48	0,18
<b>RB</b>	01	2.646	0,51	0,19
	02	2.652	0,50	0,19
<b>RI</b>	01	2.644	0,44	0,16
	02	2.640	0,47	0,18
<b>RMB</b>	01	2.620	0,66	0,25
	02	2.626	0,66	0,25
<b>VB</b>	01	2.643	0,66	0,25
	02	2.644	0,68	0,26
	03	2.640	0,70	0,26
<b>VCB</b>	01	2.647	0,57	0,22
	02	2.640	0,48	0,18
	03	2.638	0,55	0,21
	04	2.636	0,64	0,24
	05	2.643	0,63	0,24
	06	2.644	0,64	0,24
	07	2.631	0,55	0,21
	08	2.638	0,63	0,24
	09	2.636	0,42	0,16
	10	2.645	0,42	0,16
	11	2.636	0,43	0,16
	12	2.637	0,46	0,19
<b>VPL</b>	01	2.636	0,39	0,15
	02	2.633	0,33	0,12
	03	2.629	0,36	0,14
<b>QM</b>	01	2.628	0,82	0,31
	02	2.628	0,82	0,31
<b>MP</b>	01	2.605	0,90	0,35
	02	2.600	0,95	0,36
<b>VMT</b>	01	2.621	0,38	0,14
	02	2.618	0,40	0,15
<b>VPN</b>	01	2.590	1,3	0,51
	02	2.591	1,4	0,53
<b>VU</b>	01	2.622	0,68	0,26
	02	2.623	0,58	0,22

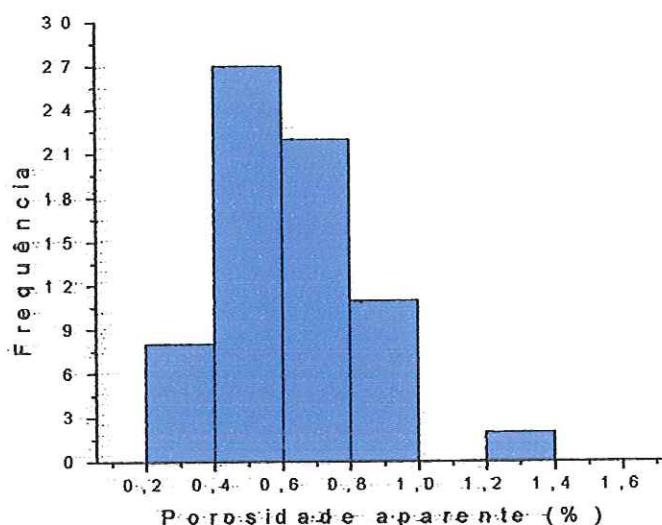
$\rho$ , massa específica aparente seca;  $\eta$ , porosidade aparente;  $\alpha$ , absorção d'água aparente; MC, Marrom Caju; MSP, Marrom São Paulo; AS, Amêndoa Sorocaba; RB, Rosa Biritiba; RI, Rosa Itupeva; RMB, Rosa Monte Belo; VB, Vermelho Bragança; VCB, Vermelho Capão Bonito; VPL, Vinho Paulista; QM, Quatro Marcos; MP, Marrom Pantanal; VMT, Vermelho Mato Grosso; VPN, Vermelho Pantanal; VU, Vermelho Urutau; (Continua).

TABELA 4.3 – Continuação

<i>Nome Comercial</i>	<i>Corpos-de-prova</i>	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$\eta$ (%)	$\alpha$ (%)
<b>CF</b>	01	2.718	0,40	0,14
	02	2.715	0,39	0,14
<b>J</b>	01	2.621	0,69	0,26
	02	2.621	0,68	0,26

$\rho$ , massa específica aparente seca;  $\eta$ , porosidade aparente;  $\alpha$ , absorção d'água aparente; CF, Cinza Francês; J, Jauru.

A Figura 4.8 ilustra a distribuição dos valores de  $\eta$  onde observa-se uma maior concentração no intervalo de 0,4 a 0,6% representando 38,57% do total de corpos-de-prova estudados.



**FIGURA 4.8** – Distribuição dos valores de porosidade aparente dos granitos estudados.

#### Rochas Gnaissicas

Os valores dos índices físicos (massa específica aparente seca, porosidade aparente e absorção d'água), para cada corpo-de-prova, estão apresentados na Tabela 4.4.

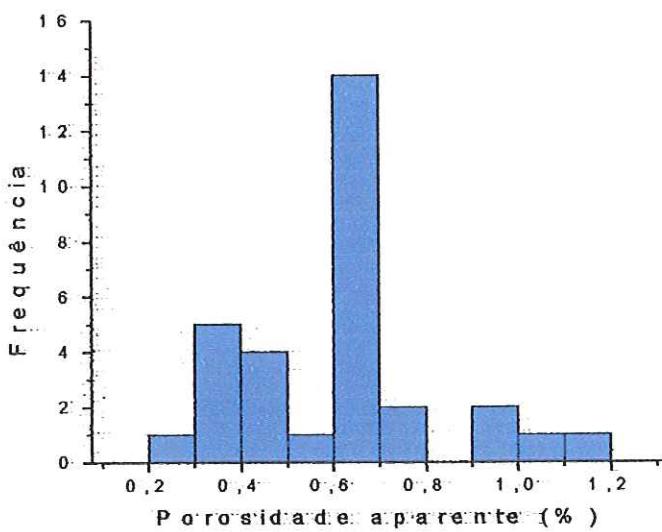
Entre os parâmetros estudados, a porosidade aparente é o mais importante, em função de sua relação direta com as microfissuras presentes nas rochas. Os valores desse parâmetro para os gnaisses variam de 0,28 a 1,1%, sendo esses relacionados, respectivamente, às amostras SMT (CP 01) e VC (CP 01).

TABELA 4.4 - Valores de massa específica aparente seca ( $\rho$ ), porosidade aparente ( $\eta$ ) e absorção d'água aparente ( $\alpha$ ) dos gnaisses estudados.

<i>Nome Comercial</i>	<i>Corpos-de-prova</i>	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\eta$ (%)	$\alpha$ (%)
AF	01	2.721	0,41	0,15
	02	2.720	0,35	0,13
	03	2.724	0,35	0,12
RC	01	2.632	0,79	0,30
	02	2.615	0,73	0,28
RS	01	2.639	0,65	0,25
	02	2.643	0,61	0,23
SC	01	2.623	0,91	0,35
	02	2.623	0,68	0,26
	03	2.622	0,96	0,36
VCO	01	2.645	0,43	0,16
	02	2.642	0,42	0,16
	03	2.649	0,48	0,18
VF	01	2.676	0,38	0,14
	02	2.655	0,35	0,13
SMT	01	2.651	0,28	0,10
	02	2.646	0,32	0,12
VC	01	2.660	1,1	0,41
	02	2.659	1,0	0,38
I	01	2.630	0,62	0,24
	02	2.621	0,64	0,24
CC	01	2.687	0,60	0,22
	02	2.697	0,65	0,24
	03	2.702	0,63	0,23
	04	2.690	0,63	0,23
	05	2.697	0,63	0,23
	06	2.692	0,66	0,25
	07	2.693	0,68	0,25
	08	2.675	0,70	0,26
	09	2.683	0,66	0,25
	10	2.697	0,66	0,24

$\rho$ , massa específica aparente seca;  $\eta$ , porosidade aparente;  $\alpha$ , absorção d'água aparente; AF, Azul Fantástico; RC, Rosa Cedro; RS, Rosa Salmão; SC, Salmão Cardeal; VCO, Vermelho Coral; VF, Vermelho Fartura; SMT, Salmão Matogrossense; VC, Vila Cardoso; I, Ipiranga; CC, Cinza Corumbá.

Na Figura 4.9 encontram-se representados os valores correspondentes a  $\eta$  dos gnaisses, onde se observa a maior moda no intervalo de 0,6 a 0,7 %, os quais correspondem a 45,16% dos corpos-de-prova analisados.



**FIGURA 4.9** – Distribuição dos valores de porosidade aparente dos gnaisse estudados.

#### 4.3 - Coeficiente de Dilatação Térmica Linear ( $\beta$ )

A Tabela 4.5 mostra os valores de  $\beta$  de 4 corpos-de-prova (3 granitos e 1 gnaisse) que foram determinados tanto no equipamento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), quanto no dilatômetro da Universidade Estadual Paulista (Unesp - Rio Claro).

**TABELA 4.5** - Valores de  $\beta$  determinados na Unesp e no IPT.

Nome Comercial	Corpos-de-prova	$\beta \times 10^3$ [mm/(m. °C)]	
PI	01	6,7*	6,5**
	04	7,2*	7,0**
	07	7,1*	7,1**
CC	06	6,4*	5,8**

PI, Prata Interlagos; CC, Cinza Corumbá; \* Unesp - Rio Claro; \*\* IPT.

#### Rochas Graníticas

Os valores dos coeficientes de dilatação térmica linear de 58 corpos-de-prova determinados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), e de 12 corpos-de-prova determinados no dilatômetro da Universidade Estadual Paulista (Unesp-Rio Claro), estão mostrados na Tabela 4.6.

O coeficiente de dilatação térmica linear dos granitos varia entre 5,2 e 7,8, sendo esses valores correspondentes, às amostras PI (CP 06) e VPL (CP 02), respectivamente.

TABELA 4.6 – Valores do coeficiente de dilatação térmica linear ( $\beta$ ) dos granitos estudados.

<i>Nome Comercial</i>	<i>Corpos-de-prova</i>	$\beta$ $\times 10^{-3}$ [mm/(m. $^{\circ}$ C)]
CM	01	7,5
	02	6,0
PI	01*	6,7
	02*	7,1
	03*	7,0
	04*	7,2
	05*	7,6
	06*	7,8
	07*	7,1
	08*	7,0
	09*	7,0
	10*	7,2
	11*	7,8
	12*	7,2
	13	7,0
	14	7,3
	15	6,6
	16	6,7
	17	7,3
	18	6,3
DP	01	7,4
	02	6,3
DC	01	7,1
	02	5,7
	03	7,3
MC	01	7,4
	02	6,1
MSP	01	6,7
	02	6,0
	03	6,3
AS	01	6,3
	02	6,2
RB	01	5,8
	02	6,0

$\beta$ , coeficiente de dilatação térmica linear; \*, determinados na Unesp; CM, Cinza Mauá; PI, Prata Interlagos; DP, Dorê Paulista; DC, Dourado Caju; MC, Marrom Caju; MSP, Marrom São Paulo; AS, Amêndoa Sorocaba; RB, Rosa Biritiba; (Continua).

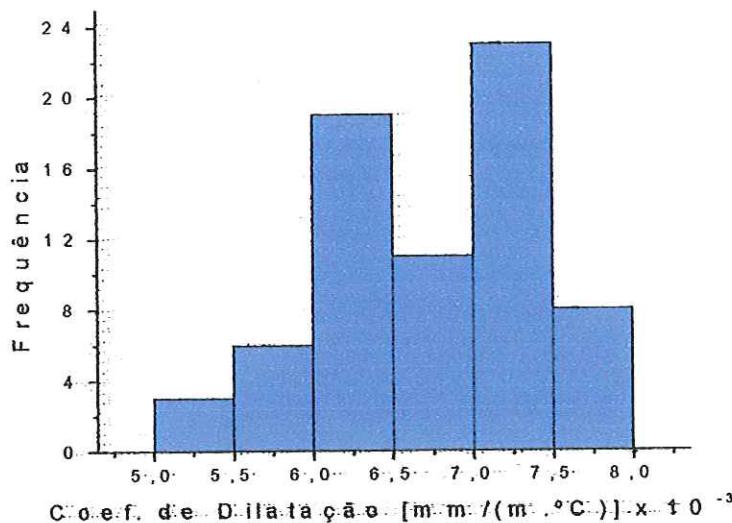
TABELA 4.6 – Continuação

<i>Nome Comercial</i>	<i>Corpos-de-prova</i>	$\beta \times 10^{-3} [\text{mm}/(\text{m. }^\circ\text{C})]$
<b>RI</b>	01	7,5
	02	6,1
<b>RMB</b>	01	6,5
	02	6,4
<b>VB</b>	01	6,8
	02	6,1
	03	6,4
<b>VCB</b>	01	6,9
	02	7,0
	03	7,9
	04	6,3
	05	6,9
	06	5,9
	07	7,2
	08	6,8
	09	6,3
	10	7,5
	11	6,3
	12	6,7
<b>VPL</b>	01	5,3
	02	5,2
	03	5,7
<b>QM</b>	01	7,2
	02	7,1
<b>MP</b>	01	5,5
	02	5,2
<b>VMT</b>	01	6,4
	02	6,1
<b>VPN</b>	01	6,1
	02	5,7
<b>VU</b>	01	7,4
	02	7,6
<b>CF</b>	01	7,1
	02	7,2
<b>J</b>	01	6,8
	02	7,3

$\beta$ , coeficiente de dilatação térmica linear; **RI**, Rosa Itupeva; **RMB**, Rosa Monte Belo; **VB**, Vermelho Bragança; **VCB**, Vermelho Capão Bonito; **VPL**, Vinho Paulista; **QM**, Quatro Marcos; **MP**, Marrom Pantanal; **VMT**, Vermelho Mato Grosso; **VPN**, Vermelho Pantanal; **VU**, Vermelho Urutau; **CF**, Cinza Francês; **J**, Jauru.

A Figura 4.10 exibe os valores de  $\beta$  para os 70 corpos-de-prova de granito estudados, onde pode-se constatar que os maiores valores encontram-se na classe de

6 a  $6,5 \times 10^{-3}$  mm/(m. $^{\circ}$ C) com freqüência de 27,14% e de 7 a  $7,5 \times 10^{-3}$  mm/(m. $^{\circ}$ C) com freqüência de 32,86% do total de determinações.



**FIGURA 4.10**— Distribuição de valores do coeficiente de dilatação térmica linear dos granitos estudados.

#### Rochas Gnáissicas

Os valores do coeficiente de dilatação térmica linear ( $\beta$ ) para os 31 corpos-de-prova de gnaisse, encontram-se na Tabela 4.7.

O  $\beta$  dessas rochas varia entre 3,6 e 9,3, sendo esses valores correspondente, às amostras SMT (CP 02) e CC (CP 01), respectivamente.

**TABELA 4.7** - Valores do coeficiente de dilatação térmica linear ( $\beta$ ) dos gnaisses estudados.

Nome Comercial	Corpos-de-prova	$\beta$ $\times 10^{-3}$ [mm/(m. $^{\circ}$ C)]
AF	01	6,0
	02	5,2
	03	6,6
RC	01	7,5
	02	6,2

$\beta$ , coeficiente de dilatação térmica linear; AF, Azul Fantástico; RC, Rosa Cedro; (Continua).

TABELA 4.7 – Continuação.

<i>Nome Comercial</i>	<i>Corpos-de-prova</i>	$\beta \times 10^3 [mm/(m.^{\circ}C)]$
RS	01	6,3
	02	7,0
SC	01	4,7
	02	4,8
	03	4,4
VCO	01	5,7
	02	6,8
	03	5,9
VF	01	5,5
	02	5,1
SMT	01	3,7
	02	3,6
VC	01	7,1
	02	7,9
I	01	8,5
	02	8,2
CC	01*	9,3
	02*	7,3
	03*	8,1
	04*	6,5
	05*	6,4
	06*	6,4
	07*	8,0
	08*	7,9
	09*	6,6
	10*	5,3

$\beta$ , coeficiente de dilatação térmica linear; \*, determinados na Unesp; RS, Rosa Salmão; SC, Salmão Cardeal; VCO, Vermelho Coral; VF, Vermelho Fartura; SMT, Salmão Mato-Grossense; VC, Vila Cardoso; I, Ipiranga; CC, Cinza Corumbá.

Na Figura 4.11 encontram-se representados os valores obtidos para o  $\beta$  dos gnaisses, onde se observa que os valores mais freqüentes variam de  $6$  a  $7 \times 10^{-3}$  mm/(m. $^{\circ}$ C) com freqüência de 29,03 % do total de 31 corpos-de-prova estudados.

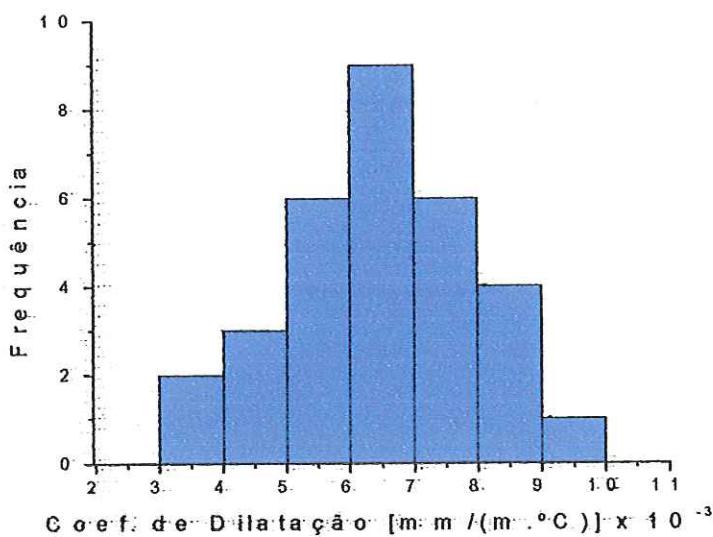


FIGURA 4.11 - Distribuição de valores do coeficiente de dilatação térmica linear dos gnaisses estudados.

#### 4.4 - Velocidade de Propagação de Ondas

##### Rochas Graníticas

Os valores da velocidade de propagação de ondas longitudinais (VP) para os granitos estudados, encontram-se na Tabela 4.8. Observa-se que a velocidade de propagação de ondas varia de 2993,9 a 6435,7 m/s, sendo esses valores correspondentes, às amostras J (CP-01) e VU (CP-02), respectivamente.

TABELA 4.8 - Valores de velocidade de propagação de ondas (VP) dos granitos estudados.

Nome Comercial	Corpos-de-prova	Velocidade de Propagação (m/s)
CM	01	5.329,6
	02	5.623,7
DP	01	4.555,9
	02	4.885,1
DC	01	5.421,7
	02	4.977,8
	03	5.448,5
MC	01	5.390,1
	02	5.450,3
MSP	01	5.592,7
	02	5.844,1
	03	5.718,9

CM, Cinza Mauá; DP, Dorê Paulista; DC, Dourado Caju; MC, Marrom Caju; MSP, Marrom São Paulo; (Continua).

TABELA 4.8 - Continuação

<i>Nome Comercial</i>	<i>Corpos-de-prova</i>	<i>Velocidade de Propagação (m/s)</i>
<b>PI</b>	01	4.466,2
	02	4.544,4
	03	4.451,2
	04	4.822,2
	05	4.647,2
	06	4.751,3
	07	4.782,4
	08	4.661,5
	09	4.782,4
	10	4.838,9
	11	4.616,0
	12	4.751,1
	13	5.428,7
	14	5.505,0
	15	5.287,2
	16	5.341,6
	17	5.424,8
	18	4.682,4
<b>AS</b>	01	5.310,8
	02	5.751,3
<b>RB</b>	01	4.157,4
	02	4.370,9
<b>RI</b>	01	5.154,7
	02	5.680,9
<b>RMB</b>	01	4.819,7
	02	5.217,9
<b>VB</b>	01	5.992,6
	02	5.196,3
	03	5.816,7
<b>VCB</b>	01	5.686,3
	02	5.459,5
	03	5.732,7
	04	5.232,5
	05	4.935,4
	06	5.341,6
	07	4.620,5
	08	4.487,5
	09	6.126,5
	10	5.773,0
	11	5.255,8
	12	5.098,0

**PI**, Prata Interlagos; **AS**, Amêndoa Sorocaba; **RB**, Rosa Biritiba; **RI**, Rosa Itupeva; **RMB**, Rosa Monte Belo; **VB**, Vermelho Bragança; **VCB**, Vermelho Capão Bonito; (Continua).

TABELA 4.8 – Continuação:

<i>Nome Comercial</i>	<i>Corpos-de-prova</i>	<i>Velocidade de Propagação (m/s)</i>
<b>VPL</b>	01	5.231,9
	02	5.459,9
	03	5.028,1
<b>QM</b>	01	4.426,2
	02	4.523,6
<b>MP</b>	01	4.351,6
	02	4.411,7
<b>VMT</b>	01	5.410,6
	02	5.625,0
<b>VPN</b>	01	5.120,4
	02	4.707,8
<b>VU</b>	01	5.844,1
	02	6.435,7
<b>CF</b>	01	5.177,1
	02	5.024,3
<b>J</b>	01	2.993,9
	02	3.191,6

**VPL**, Vinho Paulista; **QM**, Quatro Marcos; **MP**, Marrom Pantanal; **VMT**, Vermelho Mato Grosso; **VPN**, Vermelho Pantanal; **VU**, Vermelho Urutau; **CF**, Cinza Francês; **J**, Jauru.

Pode ser observado na Figura 4.12 que a maior distribuição dos valores da velocidade de propagação de ondas encontra-se no intervalo de 5000 a 5500 m/s representando cerca de 35,71% do total de 70 corpos-de-prova estudados.

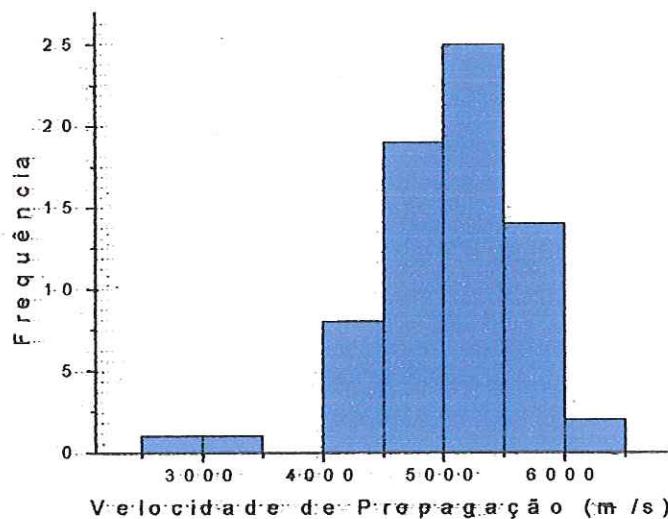


FIGURA 4.12 - Distribuição dos valores da velocidade de propagação de ondas dos granitos estudados.

### *Rochas Gnáissicas*

A Tabela 4.9 apresenta os valores da velocidade de ondas longitudinais determinados para os gnaisses estudados.

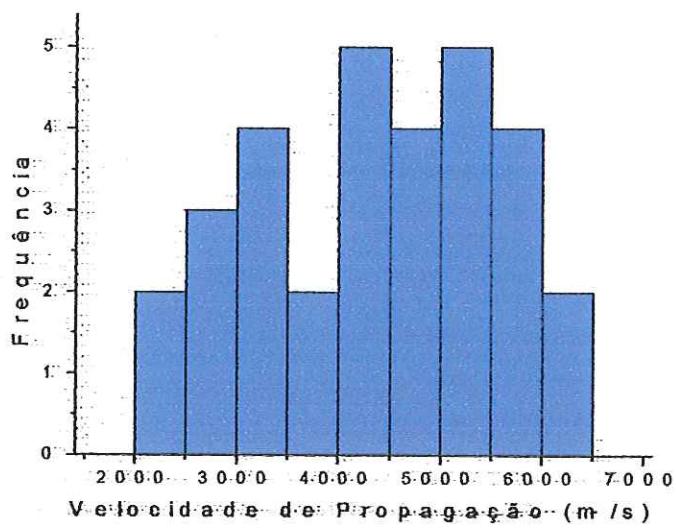
Os valores da velocidade de propagação de ondas dos gnaisses varia de 2294,0 a 6293,7 m/s, sendo elas correspondentes, às amostras VC (CP 01) e VCO (CP 01), respectivamente.

TABELA 4.9 - Valores de velocidade de propagação de ondas (VP) dos gnaisses estudados.

<i>Nome Comercial</i>	<i>Corpos-de-prova</i>	<i>Velocidade de Propagação (m/s)</i>
AF	01	4.556,9
	02	5.199,2
	03	5.345,2
RC	01	5.597,5
	02	4.615,4
RS	01	6.146,8
	02	5.903,2
SC	01	4.710,5
	02	4.159,4
	03	4.709,8
VCO	01	6.293,7
	02	5.805,1
	03	5.793,1
VF	01	5.459,4
	02	4.424,8
SMT	01	4.457,4
	02	4.017,8
VC	01	2.294,0
	02	2.306,1
I	01	5.119,3
	02	5.005,5
CC	01	3.844,3
	02	4.108,7
	03	3.920,4
	04	3.151,7
	05	2.906,1
	06	2.790,4
	07	3.166,5
	08	3.177,7
	09	3.155,1
	10	2.987,4

AF, Azul Fantástico; RC, Rosa Cedro; RS, Rosa Salmão; SC, Salmão Cardeal; VCO, Vermelho Coral; VF, Vermelho Fartura; SMT, Salmão Mato-Grossense; VC, Vila Cardoso; I, Ipiranga; CC, Cinza Corumbá.

A Figura 4.13 mostra a distribuição dos valores da velocidade de propagação de ondas das rochas gnáissicas, onde se nota que os maiores valores estão nas classes de 4000 a 4500 m/s (com freqüência de 16,13%) e de 5000 a 5500 m/s (também com freqüência de 16,13%).



**FIGURA 4.13** - Distribuição dos valores da velocidade de propagação de ondas dos gnáisses estudados.

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISE DOS RESULTADOS

---

#### 5.1 - Análise dos Valores do Coeficiente de Dilatação

Para verificar se existe repetitividade nos valores de  $\beta$  das rochas estudadas foram realizadas determinações em 4 corpos-de-prova, em dois equipamentos diferentes (Unesp e IPT). O resultado apresentado na Tabela 5.1 mostrou que, em média, houve uma diferença de 4% entre os valores de  $\beta$  medidos nos diferentes dilatômetros, o que é aceitável. Com isso, pode-se concluir que as determinações feitas no IPT e na Unesp, incluindo os dados desse trabalho, são bastante satisfatórios.

TABELA 5.1 – A média e o desvio-padrão dos valores de  $\beta$  determinados na Unesp e no IPT.

<i>Nome Comercial</i>	<i>Corpos-de-prova (CP)</i>	$\beta$ $\times 10^{-3}$ [mm/(m. °C)]		<i>Razão</i>
PI	01	6,7*	6,5**	1,03
	04	7,2*	7,0**	1,03
	07	7,1*	7,1**	1,00
CC	06	6,4*	5,8**	1,10
<i>Média</i>				1,04
<i>Desvio-padrão</i>				0,042

CP, corpos-de-prova; PI, Prata Interlagos; CC, Cinca Corumbá; \* Unesp – Rio Claro;

\*\* IPT.

## 5.2 – Estudo de Probabilidade do Coeficiente de Dilatação

A análise dos valores do coeficiente de dilatação térmica linear dos 101 corpos-de-prova estudados, sendo 70 granitos e 31 gnaisses, mostrou que esse coeficiente varia de  $3,6$  a  $9,3 \times 10^{-3}$  mm/(m.ºC). Esses valores foram tratados estatisticamente, usando um ajuste Gaussiano (Figura 5.1).

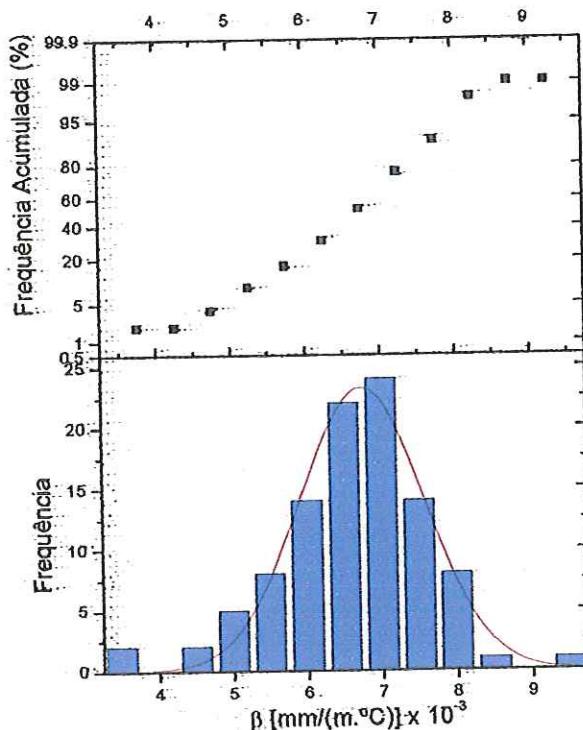


FIGURA 5.1 – Distribuição dos 101 corpos-de-prova estudados e a curva de ajuste de Gauss.

Com o ajuste da curva de Gauss, eliminou-se os valores extremos ( $3,6$  e  $9,3$ ), e, então, calculou-se a média ( $6,7$ ) e o desvio-padrão ( $0,831$ ) para o  $\beta$ . Com isso, determinou-se o valor característico,  $8,105 \times 10^{-3}$  mm/(m.ºC), para essas rochas, usando esses dois parâmetros (Tabela 5.2).

TABELA 5.2 – Valores de probabilidade para as rochas estudadas.

Dados de Probabilidade					
Número de corpos-de-prova	Média	Desvio-padrão	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Característico
101	6,738	0,831	9,3	3,6	8,105

### 5.3 - Taxa de Aquecimento Usada na Determinação de $\beta$

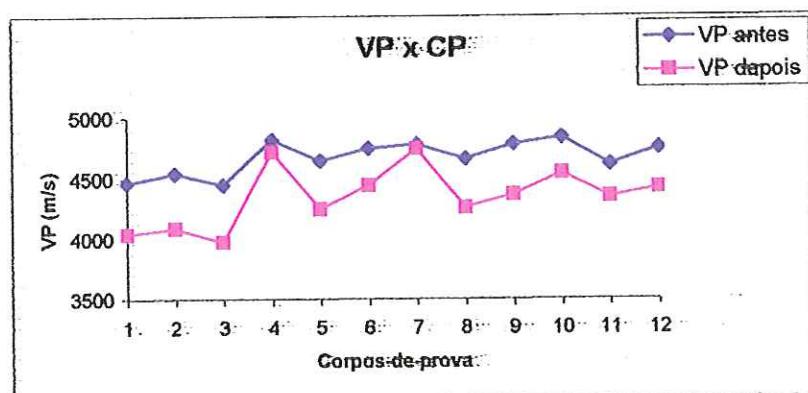
Para observar se durante a determinação do coeficiente  $\beta$  ocorreu algum tipo de modificação nos corpos-de-prova ensaiados, em função da taxa de aquecimento utilizada, 0,3 °C/min.(na Unesp), determinou-se a velocidade de propagação nos corpos-de-prova, antes e depois dos ensaios de dilatação térmica nos granitos (Tabela 5.3). Os valores encontrados mostraram uma redução variando de 2% a 12% na VP, com média de 7%, o que indica alterações nos corpos-de-prova durante aquecimento/resfriamento. Essas alterações podem ser provocadas pela expansão de fissuras preexistentes ou formação de novas.

TABELA 5.3 – Valores de velocidade de propagação de ondas determinados antes e depois de  $\beta$ .

<i>Nome Comercial</i>	<i>Corpos-de-prova (CP)</i>	<i>VPA (m/s)</i>	<i>VPD (m/s)</i>	<i>VPA/VPD</i>
PI	01	4.466,2	4.043,7	1,10
	02	4.544,4	4.090,0	1,11
	03	4.451,2	3.976,4	1,12
	04	4.822,2	4.721,9	1,02
	05	4.647,2	4.250,7	1,09
	06	4.751,3	4.445,5	1,07
	07	4.782,4	4.747,3	1,00
	08	4.661,5	4.261,9	1,09
	09	4.782,4	4.364,5	1,09
	10	4.838,9	4.544,1	1,06
	11	4.616,0	4.347,1	1,06
	12	4.751,1	4.421,8	1,07
<i>Média</i>				1,07
<i>Desvio-padrão</i>				0,0352

CP, corpos-de-prova; PI, Prata Interlagos; VPA, velocidade de propagação de ondas determinada antes de  $\beta$ ; VPD, velocidade de propagação de ondas determinada depois de  $\beta$ .

A Figura 5.2 permite visualizar, de forma mais clara, a redução na velocidade de propagação de ondas encontrada nos 12 corpos-de-prova do granito “Prata Interlagos”.

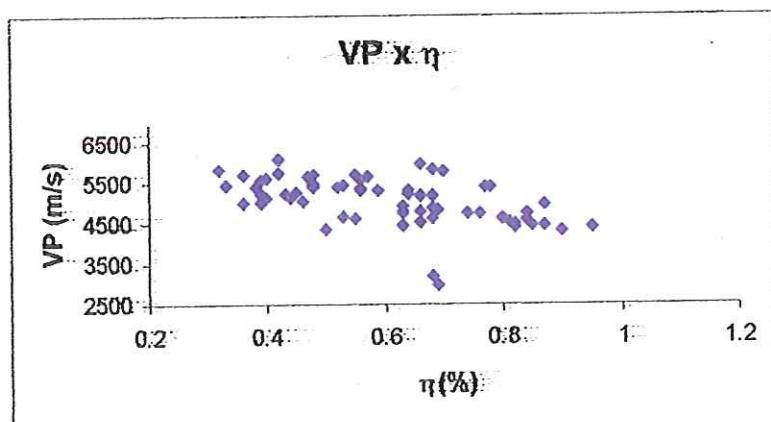


**FIGURA 5.2:** Gráfico comparativo entre a velocidade de propagação determinada antes (em azul) e depois (em rosa) da determinação de  $\beta$ .

#### 5.4 – Análise dos Resultados das Rochas Graníticas

##### *Velocidade de Propagação versus Porosidade Aparente*

Com a finalidade de se observar a existência de uma eventual relação entre a velocidade de propagação de ondas (VP) e a porosidade aparente ( $\eta$ ), nas rochas graníticas (70 CP), gerou-se um gráfico com esses dois parâmetros (Figura 5.3).



**FIGURA 5.3** – Velocidade de propagação de ondas (VP) versus porosidade aparente ( $\eta$ ) para os granitos.

A Figura 5.3 mostra, que existe uma relação linear e inversa entre esses parâmetros, o que já era de se esperar, haja visto que os espaços vazios das rochas (microfissuras), encontra-se, geralmente, preenchidos por ar que é menos resistivo que a rocha.

### *Estrutura das Rochas Graníticas*

Para verificar possíveis variações no valor de  $\beta$  nos granitos (estrutura homogênea), fez-se a copilação dos valores de  $\beta$  obtidos de pares de corpos-de-prova, amostrados perpendiculares entre si, admitindo, terem o tamanho dos grãos e conteúdo de quartzo constante. Os corpos-de-prova (CP) selecionados apresentam pequena variação no grau de microfissuramento. Isso foi verificado através da porosidade aparente ( $\eta$ ), que não apresentou variação dentro da precisão em que foi feita a medida (Tabela 5.4).

Nessas condições, pode-se determinar a anisotropia dos granitos, ou seja, a influência da estrutura no valor de  $\beta$ , uma vez que todas essas variáveis poderiam mascarar o efeito da estrutura na dilatação térmica. A anisotropia foi avaliada em função do coeficiente de anisotropia (CA), definido como sendo a razão entre os  $\beta$  de pares de CP extraídos em direções perpendiculares entre si.

Os valores encontrados mostram que o CA situa-se no intervalo de 1,01 a 1,03, com valor médio de 1,02, demonstrando que para os granitos, a influência da estrutura no  $\beta$  mostrou-se desprezível.

Conclui-se que o  $\beta$  pode ser considerado uniforme em todas as direções, para as rochas graníticas analisadas.

TABELA 5.4 – Anisotropia de  $\beta$  nas rochas graníticas.

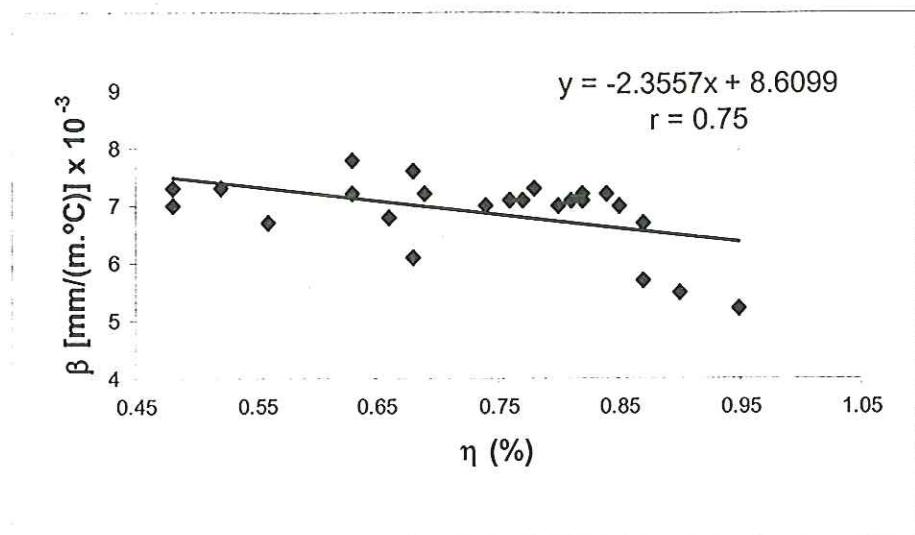
<i>Nome Comercial</i>	$\eta$ (%)	$\beta$ [mm/(m. $^{\circ}$ C)] $\times 10^{-3}$	<i>Coeficiente de anisotropia</i>
PI	0,81	7,1	
	0,80	7,0	1,01
	0,85	7,0	
	0,84	7,2	1,03
DC	0,77	7,1	
	0,78	7,3	1,03
AS	0,17	6,3	
	0,18	6,2	1,01
RB	0,51	5,8	
	0,50	6,0	1,03
RMB	0,66	6,5	
	0,66	6,4	1,01
QM	0,82	7,2	
	0,82	7,1	1,01
CF	0,40	7,1	
	0,39	7,2	1,01
<i>Média</i>			1,02
<i>Desvio-padrão</i>			0,010

$\eta$ , porosidade aparente;  $\beta$ , coeficiente de dilatação térmica linear; PI, Prata Interlagos; DC, Dourado Caju; AS, Amêndoas Sorocaba; RB, Rosa Biritiba; RMB, Rosa Monte Belo; QM, Quatro Marcos; CF, Cinza Francês.

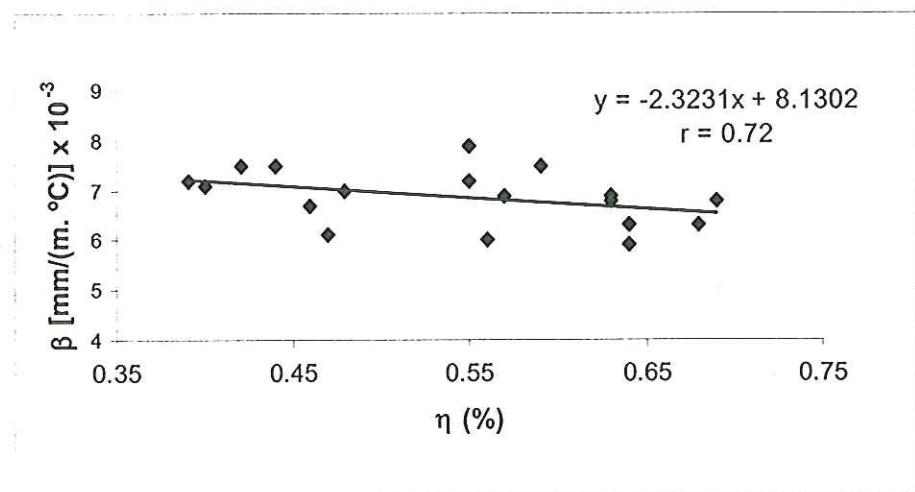
### *Porosidade Aparente*

Para conhecer a influência da porosidade na dilatação térmica, as rochas que apresentam conteúdo de 30% em quartzo foram separadas em dois grupos em função do tamanho de grãos (textura média, 1 a 10 mm e textura grossa, 10 a 30 mm).

Com isso, foram gerados dois gráficos  $\beta$  versus  $\eta$  (Figuras 5.4 e 5.5), e por meio de regressão linear em ambos os gráficos, pode-se observar que para 1% de  $\eta$  ocorre a redução de  $2,3 \times 10^{-3}$  mm/(m. $^{\circ}$ C) no  $\beta$  dos granitos.



**FIGURA 5.4** -  $\beta$  versus  $\eta$  para os granitos com granulação média e conteúdo em quartzo de 30%. r, coeficiente de correlação.



**FIGURA 5.5** -  $\beta$  versus  $\eta$  para os granitos com granulação grossa e conteúdo em quartzo de 30%. r, coeficiente de correlação.

### Tamanho dos Grãos

A fim de quantificar a influência do tamanho dos grãos no valor de  $\beta$  das rochas, foram transformados os valores de  $\beta$  em  $\beta$  *equivalente* ( $\eta=0\%$ ), por meio da relação encontrada anteriormente, ou seja,  $1\%\eta = -2,3 \times 10^{-3} \text{ mm}/(\text{m.}^{\circ}\text{C})$ .

As Tabelas 5.5 e 5.6 mostram os conteúdos em quartzo e os valores médios de  $\beta$  *equivalente*.

TABELA 5.5 - Valores médios de  $\beta$  equivalente ( $\eta=0\%$ ), para granitos com granulação média e conteúdo em quartzo de 25, 30 e 35%.

<i>Nome Comercial</i>	<i>Quartzo (%)</i>	$\beta$ equivalente $\times 10^{-3}$ [mm/(m. $^{\circ}$ C)] média
MC		
VMT	25	7,57
PI		
DC		
VB	30	8,58
QM		
MP		
VPN	35	9,0

MC, Marrom Caju; VMT, Vermelho Mato Grosso; PI, Prata Interlagos; DC, Dourado Caju; VB, Vermelho Bragança; QM, Quatro Marcos; MP, Marrom Pantanal; VPN, Vermelho Pantanal.

TABELA 5.6 - Valores médios de  $\beta$  equivalente ( $\eta=0\%$ ), para rochas de granulação grossa e conteúdo em quartzo de 25 e 30%.

<i>Nome Comercial</i>	<i>Quartzo (%)</i>	$\beta$ equivalente $\times 10^{-3}$ [mm/(m. $^{\circ}$ C)] média
AS		
RB	25	7,41
RMB		
MSP		
CM		
DP		
RI	30	8,08
VCB		
CF		
J		

AS, Amêndoas Sorocaba; RB, Rosa Biritiba; RMB, Rosa Monte Belo; MSP, Marrom São Paulo; CM, Cinza Mauá; DP, Doré Paulista; RI, Rosa Itapeva; VCB, Vermelho Capão Bonito; CF, Cinza Francês; J, Jauru.

A Tabela 5.7 apresenta os valores médios do  $\beta$  equivalente para rochas com textura média e grossa, com conteúdo em quartzo de 25 e 30%.

Desta forma, observou-se que a redução no tamanho dos grãos aumenta o valor de  $\beta$ , em média 4%.

TABELA 5.7 - Influência do tamanho dos grãos minerais no  $\beta$ .

Quartzo (%)	$\beta$ equivalente $\times 10^3$ [mm/(m. $^{\circ}$ C)]		Razão média/grossa
	Textura média (média)	Textura grossa (média)	
25	7,57	7,41	1,02
30	8,58	8,08	1,06
		Média	1,04
		Desvio-padrão	0,028

$\beta$ , coeficiente de dilatação térmica linear.

#### Conteúdo de Quartzo

Para quantificar a influência do conteúdo de quartzo no valor de  $\beta$  das rochas estudadas, foram geradas duas curvas, de  $\beta$  equivalente versus percentual de quartzo (Figura 5.6).

Desta forma, verificou-se por regressão linear, que para um incremento de 5% no conteúdo de quartzo, o  $\beta$  aumenta em média 16,5 %.

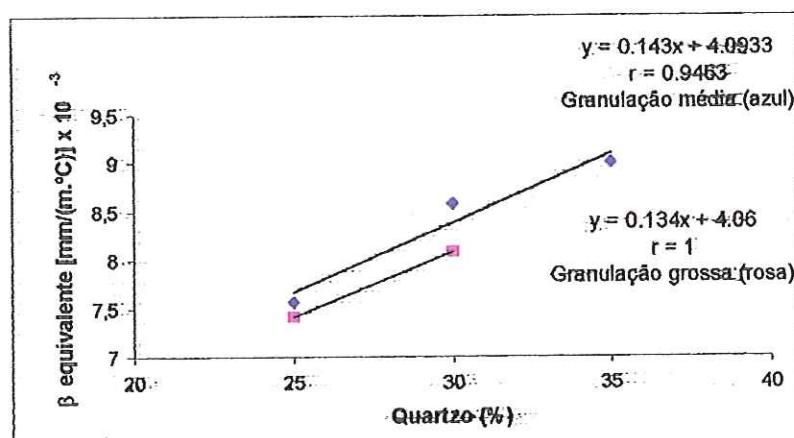
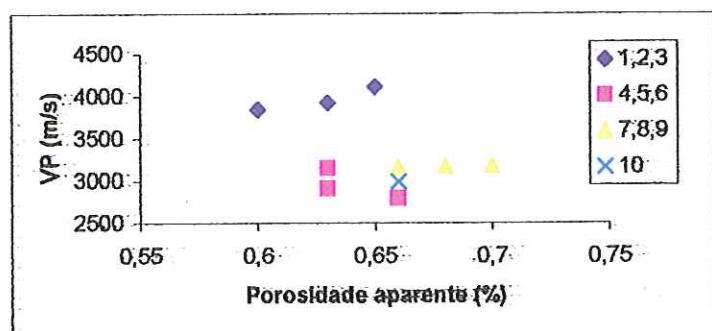


FIGURA 5.6 -  $\beta$  equivalente versus percentual de quartzo para os granitos com granulação média e grossa.

## 5.5 – Análise dos Resultados das Rochas Gnáissicas

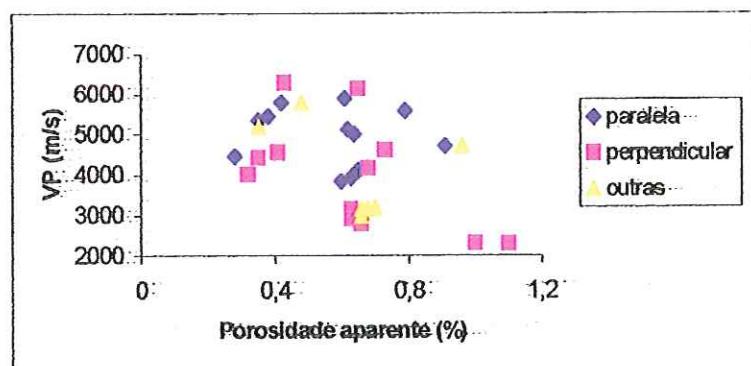
### *Porosidade Aparente versus Velocidade de Propagação*

Com o objetivo de verificar a existência de uma relação entre a velocidade de propagação de ondas (VP) e a porosidade aparente ( $\eta$ ), nos gnaisse, geraram-se dois gráficos com esses parâmetros. O primeiro representando os 10 corpos-de-prova do gnaisse “Cinza Corumbá” (Figura 5.7) e o segundo todos os 31 corpos-de-prova dos gnaisse estudados (Figura 5.8).



**FIGURA 5.7 – VP versus Porosidade aparente para o gnaisse “Cinza Corumbá”. Com VP medida paralela (1, 2 e 3) e perpendicular (4, 5 e 6) à gnaissificação e em outras direções (7, 8, 9 e 10).**

Ao contrário do que se esperava, a relação entre esses dois parâmetros não foi observada, porque ela foi mascarada pela estrutura da rocha. Porém, observa-se que a velocidade de propagação (VP) é sempre maior quando medida paralela à estrutura da rocha (em azul) e menor quando determinada perpendicular à estrutura (rosa).



**FIGURA 5.8 – VP versus Porosidade aparente para os 31 CP de gnaisse. Com VP medida paralela (azul) e perpendicular (rosa) à gnaissificação e em outras direções (amarelo).**

A Figura 5.8 exibe, também, uma tendência de que a velocidade de propagação (VP) é sempre maior quando medida paralela à estrutura da rocha (em azul) e menor quando determinada perpendicular à estrutura (rosa). Contudo, observa-se algumas superposições de pontos no gráfico, que pode ser explicado pelo grau de gnaissificação bastante variado nos gnaisses estudados.

### *Estrutura das Rochas Gnássicas*

Com a finalidade de observar a influência da estrutura dos gnaisses no valor de  $\beta$ , foram agrupados valores obtidos a partir de pares de corpos-de-prova, amostrados perpendiculares entre si, ou seja, paralelo e perpendicular à gnaissificação (Tabela 5.8).

TABELA 5.8 – Copilação dos valores de  $\beta$  determinados paralelo (//) e perpendicular (⊥) à estrutura dos gnaisses.

<i>Nome Comercial</i>	$\beta (//)$ $\times 10^{-3}$ [mm/(m. °C)]	$\beta (\perp)$ $\times 10^{-3}$ [mm/(m. °C)]	Razão // / ⊥	<i>Valor médio</i> $\times 10^{-3}$ [mm/(m. °C)]
CC	9,3	6,5	1,43	7,9
	7,3	6,4	1,14	6,8
	8,1	6,4	1,26	7,2
AF	6,6	6,0	1,10	6,3
RC	7,5	6,2	1,21	6,8
RS	7,0	6,3	1,11	6,6
SC	4,7	4,8	0,98	4,7
VCO	6,8	5,7	1,19	6,2
VF	5,5	5,1	1,08	5,3
SMT	3,7	3,6	1,03	3,6

CC, Cinza Corumbá; AF, Azul Fantástico; RC, Rosa Cedro; RS, Rosa Salmão; SC, Salmão Cardeal; VCO, Vermelho Coral; VF, Vermelho Fartura; SMT, Salmão Mato Grossense.

Os resultados mostraram que o valor de  $\beta$  é sempre maior quando medido paralelo (//) à gnaissificação e menor determinado perpendicular (⊥) a essa estrutura. Nesse estudo, essa diferença varia de 3% (SMT) a 43% (CC) para os gnaisses estudados.

Além disso, observa-se que o valor médio de  $\beta$  calculado a partir de dois corpo-de-prova, extraídos perpendiculares entre si, é sempre menor que o valor encontrado na determinação de  $\beta$  de um único corpo-de-prova amostrado paralelo à estrutura da rocha. Nesse estudo, essa diferença chegou a 18%. Isso indica que se for

adotado o valor médio como o representante dos gnaisses, o  $\beta$  nesses casos estará sendo subdimensionado.

Desta forma, nesse trabalho é sugerido que seja adotado o critério Europeu, ou seja, faz-se a medida em dois corpos-de-prova, extraídos perpendiculares entre si, desprezando-se o menor valor de  $\beta$  encontrado e usa-se o maior.

### 5.6 - Sugestão de Fórmula Empírica Para Determinação de $\beta$

A determinação do coeficiente de dilatação das rochas é feita de duas formas, ou seja, pela medida direta em corpos-de-prova, geralmente, com auxílio de dilatômetro de quartzo fundido ou através da equação de Turner's (item 2.3.3.2), que é usada para calcular a dilatação volumétrica da rocha. Porém, essa ultima, fornece bons resultados para rochas monominerálica (p. ex. calcários e quartzitos), mas para as polimineralíca (p. ex. granitos e gnaisses), os resultados são, normalmente, mais baixos do que os das medidas diretas.

Nesse trabalho foram identificados e quantificados os fatores que influenciam no valor de  $\beta$  dos granitos e com isso foi possível estabelecer uma fórmula para determinar esse coeficiente, utilizando-se apenas o conteúdo em quartzo e o valor da porosidade aparente ( $\eta$ ) da rocha.

A seguir serão descritos os passos utilizados para chegar à fórmula sugerida nesse trabalho:

- a) Fez-se a média entre os valores do  $\beta$  *equivalente* das Tabela 5.6 e 5.7, para 25 e 30% de quartzo, onde foi desprezada a influência do tamanho dos grãos (4%), para facilitar a determinação;
- b) Gerou-se um gráfico entre o  $\beta$  *equivalente* *versus* percentual de quartzo, com conteúdo em quartzo de 25, 30 e 35 % (Figura 5.9);

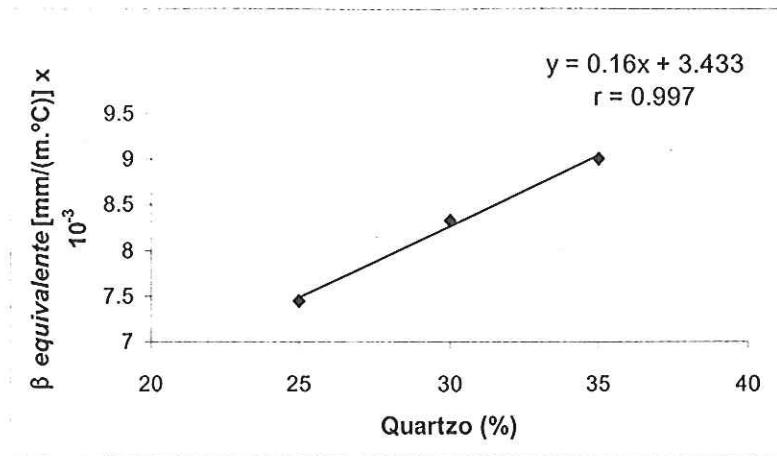


FIGURA 5.9 -  $\beta$  equivalente médio versus percentual de quartzo. r, coeficiente de correlação.

c) Por regressão linear encontrou-se a seguinte relação entre o  $\beta$  equivalente e o conteúdo em quartzo:

$$\beta \text{ equivalente} = 0,16Q + 3,433$$

onde: Q = percentual de quartzo.

d) O passo seguinte, foi substituir o  $\beta$  equivalente por  $\beta$ . Para isso, adicionou-se um outro termo (A) nessa equação, ou seja, a relação encontrada entre a porosidade aparente e o  $\beta$  [ $1\% \eta = -2,3 \times 10^{-3}$  mm/(m. $^{\circ}$ C)];

$$\beta = (0,16Q + 3,433) - (A)$$

onde:  $A = 2,3\eta$ .

e) Por fim, calculou-se o erro através de  $\beta$  medidos (em laboratório) e calculados (por essa fórmula), que foi de  $\pm 15\%$  (Figura 5.10).

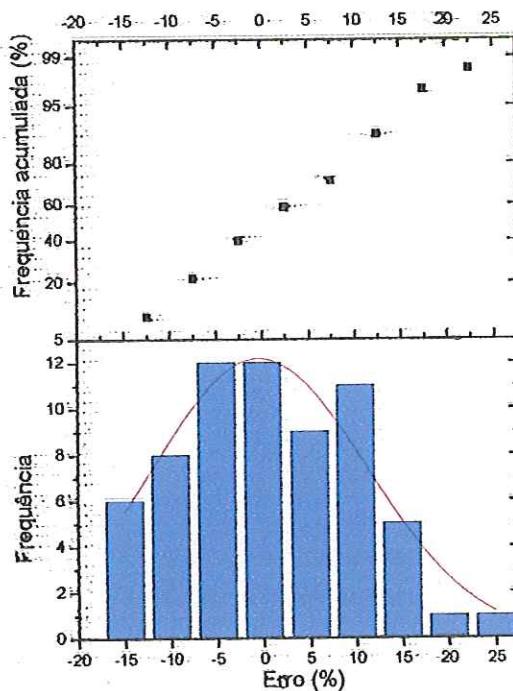


FIGURA 5.10 - Distribuição do erro da fórmula e a curva de ajuste de Gauss.

Com isso, o coeficiente de dilatação térmica linear ( $\beta$ ) dos granitos pode ser então determinado a partir da seguinte fórmula:

$$\beta = (0,16Q + 3,433) - (A) \pm \text{erro}$$

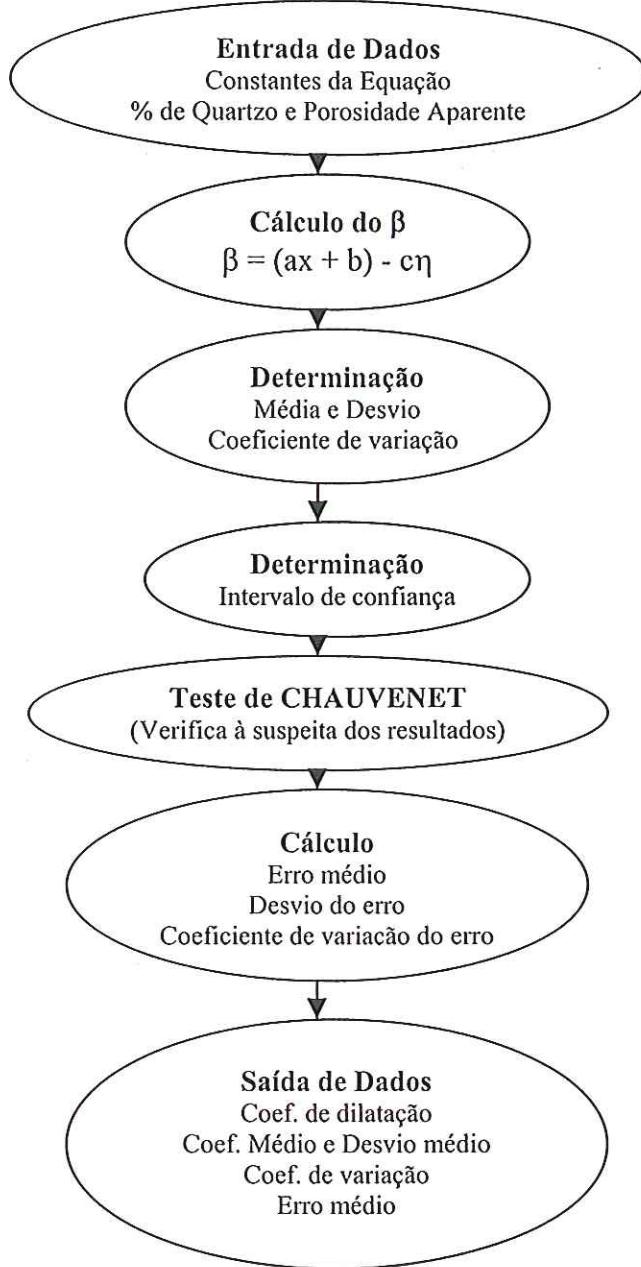
onde:  $Q$  = percentual de quartzo;

$A = 2,3\eta$ ; erro. =  $\pm 15\%$

### 5.7 - Previsão do Coeficiente de Dilatação Térmica Linear

Com a finalidade de facilitar a previsão do coeficiente de dilatação térmica linear ( $\beta$ ) de granitos, foi elaborado um programa computacional em linguagem FORTRAN 6.0.

A rotina do programa encontra-se representada, de forma simplificada, na Figura 5.11.



**FIGURA 5.11 – Fluxograma da rotina usada no programa.**

### *Cálculo do Coeficiente $\beta$*

Como visto no item 5.4.1 foi proposta uma fórmula empírica para calcular o coeficiente de dilatação térmica linear em função do conteúdo em quartzo e da porosidade aparente.

$$\beta = (0,16Q + 3,433) - (A)$$

onde: Q = percentual de quartzo;

$$A = 2,3\eta.$$

### *Média, Desvio-Padrão e Coeficiente de Variação*

Estes parâmetros estatísticos são, normalmente, calculados para avaliar a qualidade de ensaios e determinações, além de condensar a apresentação dos resultados.

$$\text{Média: } \bar{x} = \frac{\sum_i^n x_i}{n}$$

$$\text{Desvio-Padrão: } s = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

$$\text{Coeficiente de variação: } \delta = \frac{s}{\bar{x}}$$

### *Intervalo de Confiança da Média*

Segundo TAKEYA (2001), com a média e o desvio-padrão calculados, e utilizando a curva de distribuição  $t$  de Student, pode-se estimar o intervalo de confiança da média, da seguinte forma:

- a) Calcula-se o número de graus de liberdade  $v = n - 1$ ;
- b) Fixa-se o grau de confiança  $P$  desejado, p. ex. 95%;
- c) Utilizando a distribuição de Student, determina-se o valor  $t$  em função de  $v$  e  $P$ ;

d) Determina-se  $\Delta = \frac{ts}{\sqrt{v}}$ ;

e) O intervalo de confiança será igual a  $\bar{x} \pm \Delta$ .

### *Critério de Chauvenet*

É um critério que pode ser empregado para descartar resultados suspeitos. Este critério tem o seguinte enunciado: “se em uma série de  $n$  medições, a probabilidade de ocorrência de um desvio de valor  $x$  é menor do que  $\frac{1}{2n}$ , então a medição que apresentar tal desvio deverá ser rejeitada” (TAKEYA, 2001).

O procedimento para aplicar o critério de Chauvenet é o seguinte:

- a) Calcula-se o valor de probabilidade  $P = \frac{1}{2n}$ ;
- b) Utilizando a curva de distribuição de Gauss, determina-se o valor  $x$  em função de  $P$ ;
- c) Calcula-se o valor do desvio máximo admissível  $s.x$ ;
- d) Os valores das medições que estiverem fora do intervalo  $(\bar{x} \pm s.x)$  devem ser rejeitados.

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSÕES**

---

A análise dos resultados desse trabalho permite que se faça algumas conclusões para as rochas estudadas:

#### **6.1 - Geral**

- a) O tratamento estatístico feito com os valores de  $\beta$  para todas as rochas estudadas, revelou que o valor característico do coeficiente de dilatação térmica linear é de  $8,105 \times 10^{-3}$  mm/(m. $^{\circ}$ C), com uma probabilidade de 95% de que na determinação de  $\beta$  em granitos e gnaisses, o valor encontrado seja inferior ao valor característico;
- b) A norma NBR - 12765 estabelece uma taxa de aquecimento de 0,3 $^{\circ}$ C/min. na determinação do coeficiente  $\beta$ , porém, observou-se que essa taxa provocou a formação de novas fissuras ou abertura de fissuras preexistente. O que foi verificado através da determinação da velocidade de propagação de ondas realizada nos corpos-de-prova, antes e depois da determinação de  $\beta$ ;
- c) Os equipamentos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e da Universidade Estadual Paulista (Unesp-Rio Claro), que diferem entre si quanto aos aspectos construtivos, forneceram valores semelhantes e satisfatórios para o coeficiente  $\beta$  das rochas estudadas.

## 6.2 – Rochas Graníticas

- a) Nas rochas graníticas, como já era esperado, existe uma relação direta e inversa entre a velocidade de propagação de ondas e a porosidade aparente;
- b) A porosidade é a propriedade que mais influencia no valor de  $\beta$ , ou seja, para um aumento de 1% na porosidade aparente, o  $\beta$  diminui  $2,3 \times 10^{-3}$  mm/(m. °C), o que corresponde em média a 27,5%;
- c) Para um incremento de 5% no conteúdo de quartzo o  $\beta$  aumenta em média 16,5%;
- d) Com a diminuição do tamanho dos grãos ocorre um aumento de 2 a 6% no valor de  $\beta$ ;
- e) O  $\beta$  pode ser considerado uniforme em todas as direções para os granitos estudados;
- f) O coeficiente de dilatação térmica das rochas pode ser determinado através de ensaios ou usando a equação de Turner's. Nesse trabalho é apresentada uma outra maneira de determinação, que é através de fórmula empírica usando os valores da porosidade aparente e o conteúdo em quartzo da rocha.

## 6.3 – Rochas Gnáissicas

- a) Não foi possível quantificar nos gnaisses a influência dos fatores (estrutura, porosidade, tamanho dos grãos e conteúdo em quartzo) no valor de  $\beta$ , porque o grau de gnaissificação presente nas rochas estudadas é bastante variado;
- b) O valor de  $\beta$  é sempre maior quando determinado paralelo à gnaissificação, e menor quando medido perpendicular;
- c) Diferentemente do que se encontrou para os granitos, nos gnaisses não existe relação entre o velocidade de propagação de ondas (VP) e a porosidade aparente ( $\eta$ ), mas sim com a direção da gnaissificação, ou seja, a VP é sempre maior desta direção;
- d) A norma NBR – 12765 sugere que o valor de  $\beta$  seja a média de dois corpos-de-prova amostrados ortogonalmente, sendo que, geralmente, essa amostragem é feita uma paralela à gnaissificação e a outra perpendicular a ela. Esta média gera um subdimensionamento desses valores. Na presente pesquisa sugere-se a representação dos valores igual ao adotado na Europa, ou seja, faz-se as duas medidas da dilatação térmica de um gnaisse e descarta-se a de menor valor.

## **CAPÍTULO 7**

### **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

---

A experiência adquirida na realização dessa pesquisa, permite que sejam feitas algumas sugestões:

- a) Estudo semelhante deve ser realizado com outros tipos litológicos, p. ex., o charnoquito, por se tratar de uma rocha bastante utilizada em revestimento externo e que por apresentar coloração escura, sofre maior aquecimento quando exposta ao sol;
- b) Sugere-se que sejam realizadas determinações da dilatação térmica em rochas sãs e no estado alterado, porque é marcante a influência da porosidade (no estado alterado) nos valores de dilatação térmica linear;
- c) Procurar formas de realizar medidas no campo, ou seja, um monitoramento diurno da placa já assentada.

## **CAPÍTULO 8**

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

- ALENCAR, C. R. A. (1996). Tecnologia de lavra e beneficiamento de rochas ornamentais. Instituto Euvaldo Lodi - IEL, p. 153 - 164. (Série Estudos Econômico de Rochas Ornamentais. V. 3).
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM (1995) – D 2845. Standard specification for granite dimension stone, 3p.
- ASKELAND, D. R. (1993). The science and engineering of materials. 2. ed. London, Chapman & Hall, p. 760 – 771.
- ASKELAND, D. R. (1994). The science and engineering of materials. 2. ed. Boston, Plus, 812p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1992) - NBR 12765. Rochas para revestimento – Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear, 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1992) - NBR 12768. Rochas para revestimento – Análise petrográfica, 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1992) - NBR 12766. Rochas para revestimento – Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente, 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1996) - NBR 13708. Execução e inspeção de revestimento de paredes e estruturas com placas de rocha, 3p.

→ CARUSO, L. G.; TAIOLI, F. (1982). Os mármore e granitos brasileiros – Seu uso e suas características tecnológicas. Revista Rochas de Qualidade. São Paulo, nº 67, p. 11-22.

→ CARUSO, L. G.; TAIOLI, F.; FARJALLAT, J. E. S. (1978). Os mármore e granitos brasileiros - Seu uso e suas características tecnológicas. Revista Rochas de Qualidade. São Paulo, nº 47, p. 36-45.

CAVALCANTI, A. M. S. (1951). Tecnologia da pedra. Rio de Janeiro. Pongetti, 309p.

CLAUSER, C.; HUENGES, E. (1995). Thermal conductivity of rocks and minerals. Rock physics and phase relations: a handbook of physical constants, p. 105-117.

→ CUNHA, A. G.; NEUMANN, W. (1979). Manual de impermeabilização e isolamento térmico. 5. ed. Rio de Janeiro, Texsa brasileira Ltda, 227p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM (1998). Catálogo de Rochas Ornamentais do Estado de Mato Grosso. Cuiabá, 78p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM (2000). Rochas ornamentais e de revestimento. <http://www.dnpm.gov.br> (Fevereiro/2001).

EQUIPE DE FURNAS (1997). Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades. São Paulo, Pini, p. 1/12-17/1.

→ FIORITO, J. S. I. (1994). Manual de argamassas e revestimentos: Estudos e Procedimentos de Execução. São Paulo, Pini, 221p.

FLAIN, E. P. (1995). Tecnologia de produção de revestimentos de fachadas de edifícios com placas pétreas. São Paulo, Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 180p.

- FLAIN, E. P. (1997). Recomendações para revestimentos de fachadas de rochas ornamentais. Revista Rochas de Qualidade. São Paulo, nº 132, p. 76-92.
- FRAZÃO, E. B.; FARJALLAT, J. E. S. (1995a). Características tecnológicas das principais rochas silicáticas brasileiras usadas como pedra de revestimento. I Congresso Internacional da Pedra Natural. Lisboa, p. 47-58.
- FRAZÃO, E. B.; FARJALLAT, J. E. S. (1995b). Seleção de pedras para revestimentos e prioridades requeridas. Revista Rochas de Qualidade. São Paulo, nº 124, p. 80-94.
- FRAZÃO, E. B.; FARJALLAT, J. E. S. (1996). Proposta de especificação para rochas silicáticas de revestimento. VIII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. Rio de Janeiro. 1v, p. 369-380.
- FRAZÃO, E. B.; PARAGUASSU, A. B. (1998). Materiais rochosos para construção geologia de engenharia. São Paulo, ABGE/CNPq/FAPESP. Cap. 20, p. 331-342.
- GALAN, C. G. (2001). Avaliação do desempenho de produtos químicos hidro-óleo-repelentes como fator de proteção e valorização de rochas ornamentais. São Paulo, Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista –Unesp – Rio Claro, 85p.
- GASCON, F.; BALBAS, M. (1983). Dilatación linear térmica del granito. Boletín geológico y minero, p. 61-67.
- GASPAR, A. (2000). Física: ondas, óptica, termodinâmica. 1. ed. São Paulo, Ática, 2 v, p. 272-275.
- GRIFFITH, J. H. (1936). Thermal expansion of typical american rocks. Bulletin 128, p. 25-55.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT (1990). Catálogo das rochas ornamentais do Estado de São Paulo. São Paulo. Secretaria da Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico, 122p.



INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO  
– IPT (1993). Catálogo das rochas ornamentais do Estado do Espírito Santo. São Paulo. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico (Publicação IPT 2048), 79p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO  
– IPT (1994). Catálogo de rochas ornamentais da Bahia. Salvador. Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, 148p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO  
– IPT (2000). Catálogo das rochas ornamentais do Estado de São Paulo. São Paulo, (CD ROM). Publicação IPT 2651, 2 ed.

LO, K. Y.; WAI, R. S. C. (1982). Thermal expansion, diffusivity, and cracking of rock cores from Darling, Ontario. Canadian geotechnical journal. 19.v, p. 154-166.

MARINO, L. F. B.; BOSCHI, A. O. (1998). A expansão térmica de materiais cerâmicos parte II: Efeito das Condições de Fabricação. Revista Cerâmica Industrial. São Paulo, nº 3, 3v, p. 23-33.

PADILHA, A. F. (1997). Materiais de engenharia: microestrutura e propriedades. São Paulo, Hemus Ltda., 349p.

PATTON, W. J. (1978). Materiais de construção para engenharia civil. São Paulo, Universidade de São Paulo, 366p.

PERES-RODRIGUES, F.; SOUZA, M. R. (1983). Correlação entre as anisotropias de deformabilidade, de rotura e de dilatação térmica de um granito. Revista da sociedade portuguesa de geotecnia, nº 39, p. 23-35.

PETRUCCI, E. G. R. (1975). Materiais de construção. 10. ed. São Paulo, Globo S.A., p. 263-304.

- PINCUS, H. J.; HOSKINS, E. R. (1985). Measurement of rock properties at elevated pressures and temperatures. ASTM special technical publication 869. Texas, p. 108-127.
- RICHTER, D.; SIMMONS, G. (1974). Thermal expansion behavior of igneous rocks. International journal of rock mechanics and mining sciences. New York, nº 10, 11v, p. 403-411.
- RIVAS, T.; PRIETO, B.; SILVA, B. (2000). Influence of rift and bedding plane on the physico-mechanical properties of granitic rocks. Implications for the deterioration of granitic monuments. <http://www.elsevier.com/locate/buildenv> (Março/2001).
- ROCHAS DE QUALIDADE (1987). Revestimento de fachadas por fixação metálica, Revista Rochas de Qualidade. São Paulo, p. 11-16.
- ROCHAS DE QUALIDADE (2001). GMM fixações de granitos para fachadas, Revista Rochas de Qualidade. São Paulo, nº 156, p. 73.
- RZHEVSKY, Y.; NOVIK, G. (1971). The physics of rocks. A. A. Beknazarov. Moscow, p. 137-287.
- SMITH, M. R.; COLLIS, L. (1993). Aggregates: sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes 2. ed. London, The geological society, 339p.
- STRECKEISEN, A. (1976). To each rock its proper name. Earth Science Review, p. 1-33.
- TAKEYA, T. (2001). Análise experimental de estruturas. São Paulo, Apostila – Departamento de Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 50p.
- VIDAL, F. W. H.; BESSA, M. F.; LIMA, M. A. B. (1999). Avaliação das rochas ornamentais do Ceará através de suas características tecnológicas. Rio de Janeiro. CETEM/MCT (Série Tecnologia Mineral – 74), 30p.

VIDAL, F. W. H.; BESSA, M. F.; LIMA, M. A. B. (2001). Avaliação tecnológica das rochas graníticas do Ceará. Revista Rochas de Qualidade. São Paulo, nº 156, p. 76-86.