



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Condutividade Térmica de Rochas: Uma aplicação para Granitos Ornamentais

Autor:

Edgar Romeo Herrera de Figueiredo

Orientador:

Dr. Antonio Carlos Galindo

Dissertação nº 55/PPGG

Natal, Agosto de 2006.

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Condutividade Térmica de Rochas: Uma aplicação para Granitos Ornamentais

Autor:

Edgar Romeo Herrera de Figueiredo

Dissertação de Mestrado apresentada em 24 de agosto de 2006, para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN.

Comissão Examinadora:

Dr. Antonio Carlos Galindo (PPGG/UFRN)
Dr. Fernando Pessoa Lira Lins (PPGG/UFRN)
Dr. Adejardo Francisco da Silva Filho (UFPE)

Natal, Agosto de 2006.

Agradecimentos

Gostaria de expressar aqui os meus profundos agradecimentos a todos que apoiaram este trabalho, em especial aos meus pais Gilvan Assunção de Figueiredo e Rosilda Carvalho de Figueiredo por tudo que construímos juntos, pelas noites acordadas e pelo incansável incentivo a educação que nos fez chegar onde chegamos.

Gostaria de agradecer ainda ao Professor Dr. Antonio Carlos Galindo pela dedicação profissional, orientação, objetividade e paciência em todas as etapas do trabalho. A esse Professor Educador o meus mais sinceros agradecimentos.

A Marmoraria Stone Line, na pessoa do Professor Msc. Francisco Augusto pelo apoio, disponibilidade e atenção durante todas as fases deste trabalho. Pelo fornecimento de várias amostras sem as quais não seria possível a realização deste trabalho. Agradeço ainda a todos os funcionários representados por Ednalva Lopes Lucena pela simpatia, paciência e agilidade na entrega das amostras.

Ao colega Luiz Gustavo pelo apoio e auxílio na descrição de algumas seções delgadas e pela paciência em dividir a mesma sala.

Ao professor José Antonio de Moraes Moreira do DFTE pelas sugestões, correções e co-orientação informal que foram de fundamental importância para o andamento deste trabalho.

Ao Professor Dr. George Santos Marinho do Departamento de Mecânica pelo apoio e liberação de equipamentos para realização dos ensaios de densidade e pelas sugestões que foram de grande valia para este trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de estudo e ao PPGG/UFRN por todo o apoio logístico.

Aos amigos Marcelo Camilo e Flávio Barbosa Pinheiro Junior pela amizade e conselhos de todos esses anos.

A todos os meus familiares pelo incansável apoio em especial a Fabiane Domenech Silva e aos seus pais Flávio José de Araújo Silva e Maria Francisca Domenech Silva pelo apoio durante esses últimos 5 anos.

RESUMO

Esta dissertação aborda o tema condutividade térmica de rochas e sua correlação com aspectos petrográficos, texturais e geoquímicos principalmente em rochas graníticas. O intuito é demonstrar as relações destas variáveis tentando elucidar o comportamento do efeito térmico nas rochas. Os resultados poderão ser úteis em diversas aplicações, por exemplo, no entendimento e aferição de resultados de fluxo térmicos regionais, na predição do comportamento térmico de rochas baseados na avaliação macroscópica (textura e mineralogia), no segmento de construção civil com o objetivo de fornecer informações mais precisas no que diz respeito ao refinamento de dados sobre propriedades térmicas enfatizando a condutividade térmica de materiais rochosos e ainda especialmente na indústria de rochas ornamentais com o objetivo de se abrir uma discussão sobre a utilização destas variáveis como novo parâmetro tecnológico diretamente relacionado ao conforto térmico.

Os dados de condutividade térmica foram obtidos a partir de um equipamento medidor de propriedades térmicas da marca Anter Corporation, modelo Quickline™ -30. As medidas foram realizadas a temperaturas variando entre 25 e 38 °C em amostras com 2cm de espessura e área com pelo menos 6cm de diâmetro.

Quanto aos dados petrográficos os resultados demonstraram haver boas correlações com o quartzo e máficos. A correlação linear entre a mineralogia e a condutividade térmica revelou uma relação positiva do aumento da condutividade térmica em função do aumento da percentagem de quartzo e diminuição com o aumento de minerais máficos. Já os feldspatos (K-feldspato e plagioclásio) mostram dispersão. A relação do quartzo fica mais evidente quando são comparados os conjuntos de amostras com >20% e <20%. O conjunto com mais de 20% de quartzo (sienogranitos, monzogranitos, granodioritos, etc.), exibe em sua grande maioria, valores de condutividade que variam acima de 2,5 W/mK, já o conjunto com menos de 20% (sienitos, monzonitos, gabros, dioritos, etc.) tem condutividade térmica média abaixo de 2,5 W/mK.

Quanto as texturas verificou-se que os litotipos considerados grossos/porfíricos demonstraram no conjunto geral melhores correlações quando comparados com os litotipos considerados finos/médios. No caso do quartzo os litotipos grossos/porfíricos mostraram maior fator de correlação, quando comparados com os finos/médios. Quanto

aos feldspatos (K-feldspato e plagioclásio) houve novamente dispersão. Para os máficos, tanto os tipos grossos/porfíricos quanto os finos/médios, mostraram correlações negativas com fator de correlação menor do que os obtidos em relação ao quartzo. Quanto aos litotipos, relacionados ao diagrama QAP de Streckeisen (1976), há uma tendência de queda no sentido dos alcali-feldspatos granitos para os tonalitos, e dos sienitóides para os gabros, dioritos, etc.

A correlação dos dados de condutividade térmica com os de geoquímica confirmou em grande parte, os resultados de mineralogia. Observou-se que a correlação, quando existe, é linear. Este comportamento foi verificado principalmente com o SiO_2 . Neste caso nota-se uma correlação similar a observada com o quartzo, ou seja, aumento da condutividade térmica com o incremento de SiO_2 .

Um outro aspecto observado é que rochas básicas a intermediárias apresentaram valores sempre inferiores a 2,5 W/mK, comportamento similar ao observado em rochas com quartzo <20%. Já as rochas ácidas apresentaram valores acima de 2,5 W/mK, comportamento similar ao observado em rochas com quartzo >20% (graníticas). Nos demais casos os fatores de correlação são sempre baixos apresentando comportamento inverso, sendo observado para Fe_2O_3 , CaO, MgO, e TiO_2 . Quanto ao Al_2O_3 , K_2O e Na_2O os resultados não são conclusivos havendo estatisticamente dispersão.

O conhecimento das propriedades térmicas em especial a condutividade térmica e sua aplicação na construção civil mostrou-se bastante satisfatória, pois, envolve tanto aspectos tecnológicos quanto aspectos do conforto térmico favorecendo em todos os casos resultados rápidos, baratos e precisos. A relação da condutividade térmica, com a dilatação térmica linear também mostrou resultados satisfatórios em especial quando fica demonstrado o papel do quartzo como fase comum e determinante entre as duas variáveis. O estudo da condutividade térmica aliada a densidade dos materiais rochosos poderá servir como ferramenta adicional na escolha de materiais quando se levar em consideração aspectos do cálculo estrutural e do conforto térmico, pois no caso das rochas ornamentais há uma pequena variação da densidade em detrimento da variação considerável da condutividade térmica.

ABSTRACT

This dissertation focuses on rock thermal conductivity and its correlations with petrographic, textural, and geochemical aspects, especially in granite rocks. It aims at demonstrating the relations of these variables in an attempt to enlighten the behavior of thermal effect on rocks. Results can be useful for several applications, such as understanding and conferring regional thermal flow results, predicting the behavior of thermal effect on rocks based upon macroscopic evaluation (texture and mineralogy), in the building construction field in order to provide more precise information on data refinement on thermal properties emphasizing a rocky material thermal conductivity, and especially in the dimension stone industry in order to open a discussion on the use of these variables as a new technological parameter directly related to thermal comfort.

Thermal conductivity data were obtained by using Anter Corporation's Quickline™ -30 –a thermal property measuring equipment. Measurements were conducted at temperatures ranging between 25 to 38 °C in samples with 2cm in length and an area of at least 6cm of diameter.

As to petrography data, results demonstrated good correlations with quartz and mafics. Linear correlation between mineralogy and thermal conductivity revealed a positive relation of a quartz percentage increase in relation to a thermal conductivity increase and its decrease with mafic minerals increase. As to feldspates (K-feldspate and plagioclase) they show dispersion. Quartz relation gets more evident when compared to sample sets with >20% and <20%. Sets with more than 20% quartz (sienogranites, monzogranites, granodiorites, etc.), exhibit to a great extent conductivity values which vary from 2,5 W/mK and the set with less than 20% (sienites, monzonites, gabbros, diorites, etc.) have an average thermal conductivity below 2,5 W/mK.

As to textures it has been verified that rocks considered thick/porphyry demonstrated in general better correlations when compared to rocks considered thin/medium. In the case of quartz, thick rocks/porphyry showed greater correlation factors when compared to the thin/medium ones. As to feldspates (K-feldspate and plagioclase) again there was dispersion. As to mafics, both thick/porphyry and thin/medium showed negative correlations with correlation factor smaller than those obtained in relation to the quartz. As to rocks related to the Streckeisen's QAP diagram

(1976), they tend to fall from alkali-feldspates granites to tonalites, and from sienites to gabbros, diorites, etc.

Thermal conductivity data correlation with geochemistry confirmed to a great extent mineralogy results. It has been seen that correlation is linear if there is any. Such behavior could be seen especially with the SiO_2 . In this case similar correlation can be observed with the quartz, that is, thermal conductivity increases as SiO_2 is incremented.

Another aspect observed is that basic to intermediate rocks presented values always below 2,5 W/mK, a similar behavior to that observed in rocks with quartz <20%. Acid rocks presented values above 2,5 W/mK, a similar behavior to that observed in rocks with quartz >20% (granites). For all the other cases, correlation factors are always low and present opposite behavior to Fe_2O_3 , CaO , MgO , and TiO_2 . As to Al_2O_3 , K_2O , and Na_2O results are not conclusive and are statistically disperse.

Thermal property knowledge especially thermal conductivity and its application in the building construction field appeared to be very satisfactory for it involves both technological and thermal comfort aspects, which favored in all cases fast, cheap, and precise results. The relation between thermal conductivity and linear thermal dilatation have also shown satisfactory results especially when it comes to the quartz role as a common, determining phase between the two variables. Thermal conductivity studies together with rocky material density can function as an additional tool for choosing materials when considering structural calculation aspects and thermal comfort, for in the dimension stone case there is a small density variation in relation to a thermal conductivity considerable variation.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO	i
ABSTRACT	iii

Capítulo 1 – Introdução, Objetivos e Fundamento Teórico

1.1 Aspectos do Trabalho.....	01
1.2 Introdução.....	02
1.3 Objetivos.....	04
1.4 Fundamento Teórico.....	06

Capítulo 2 – Condutividade Térmica

2.1 Condutividade Térmica dos Elementos Químicos.....	09
2.2 Condutividade Térmica dos Minerais.....	13
2.3 Condutividade Térmica das Rochas.....	16

Capítulo 3 – Materiais e Métodos e Aspectos do Equipamento

3.1 Aspectos Gerais.....	21
3.2 Aspectos Técnicos do Equipamento.....	22
3.2.1 Acuracidade e Reprodutibilidade.....	24
3.3 Procedimento de Aquisição dos Dados.....	25
3.4 Procedimento da Análise Microscópica.....	26
3.5 Procedimento de aquisição dos dados de densidade.....	27

Capítulo 4 – Avaliação macro e microscópica e relação com a condutividade térmica

4.1 Introdução.....	31
4.2 Aspectos Macroscópicos.....	36
4.2.1 Cinza Elite (A01).....	36
4.2.2 Ocre Itabira (A02).....	37
4.2.3 Branco Dallas (A04).....	38
4.2.4 Dourado Carioca (A07).....	40
4.2.5 Juparaná Gold (A08).....	41
4.2.6 Cinza Wave (A27).....	42
4.2.7 Juparaíba (A37).....	43

4.3 Aspectos Microscópicos.....	44
4.3.1 Discussão dos Dados Microscópicos.....	45
4.4 Correlação com os litotipos.....	49
Capítulo 5 – Correlação da Geoquímica com a Condutividade Térmica	
5.1 Geoquímica vs Condutividade Térmica.....	55
Capítulo 6 – Condutividade Térmica e sua Aplicação na Construção Civil.	
6.1 Introdução.....	63
6.2 Condutividade Térmica.....	64
6.3 Dilatação Térmica Linear.....	66
6.4 Correlação entre a Condutividade Térmica e a Dilatação Térmica Linear.....	67
6.5 Rochas Ornamentais e sua aplicação na Construção Civil.....	69
6.5.1 Condutividade Térmica e Aplicações na Construção Civil.....	70
6.6 Condutividade Térmica vs Isolamento térmico em habitações.....	72
6.7 Condutividade Térmica vs Densidade.....	78
Capítulo 7 – Considerações Finais e Sugestões.....	83
Referências Bibliográficas.....	86

Lista de Figuras

Capítulo 1 – Introdução, Objetivos e Fundamento Teórico

Figura 1.1 – Algumas áreas de atuação do tema “transferência de calor”.....	04
Figura 1.2 – Desenho esquemático mostrando dois sistemas em contato térmico.....	06

Capítulo 2 – Condutividade Térmica

Figura 2.1 – Tabela periódica dos elementos químicos e respectivas condutividades térmicas..	10
Figura 2.2 – Principais elementos da crosta terrestre e suas respectivas condutividades.....	11
Figura 2.3 – Domínio das condutividades térmicas de diversos estados da matéria a CNTP.....	12
Figura 2.4 – Condutividade térmica de alguns materiais em função da temperatura.....	12
Figura 2.5 – Condutividade térmica das principais classes minerais a 300 K.....	14
Figura 2.6 – Principais tipos de rochas e seus intervalos de condutividade térmica.....	17
Figura 2.7 – Determinantes do comportamento físico, mecânico e químico das rochas.....	20

Capítulo 3 – Materiais e Métodos e Aspectos do Equipamento

Figura 3.1 – Detalhe do equipamento, do sensor e da amostra polida de granito.....	21
Figura 3.2 – Procedimento de aquisição dos dados de condutividade térmica.....	26
Figura 3.3 – Balanço de Forças na amostra.....	25
Figura 3.4 – Metodologia empregada neste trabalho.....	30

Capítulo 4 – Avaliação macro e microscópica e relação com a condutividade térmica

Figura 4.1 – Granito Cinza Elite e respectivas regiões de medida.....	37
Figura 4.2 – Granito Ocre Itabira e respectivas regiões de medida.....	38
Figura 4.3 – Granito Branco Dallas e respectivas regiões de medida.....	39
Figura 4.4 – Detalhe da região de medição (Branco Dallas).....	39
Figura 4.5 – Granito Dourado Carioca e respectivas regiões de medida.....	40
Figura 4.6 – Detalhe da região de medição (Dourado Carioca).....	41
Figura 4.7 – Granito Juparaná Gold e respectivas regiões de medida.....	42
Figura 4.8 – Detalhe da região de medição (Juparaná Gold).....	42
Figura 4.9 – Granito Cinza Wave e respectivas regiões de medida.....	43
Figura 4.10 – Detalhe da região de medição (Cinza Wave).....	43
Figura 4.11 – Granito Juparaíba e respectivas regiões de medida.....	44
Figura 4.12 – Relação entre a CT e a % de Qz, K-f, Pl e máficos.....	47
Figura 4.13 – Relação entre a CT e a % de Qz, K-f, Pl e máficos para ambas as texturas.....	48
Figura 4.14 – Relação entre Condutividade Térmica e a % de Qz e máficos.....	49
Figura 4.15 – Diagrama QAP e Q-A+P-M e respectivas condutividades térmicas.....	53
Figura 4.16 – Relação da dimensão e percentagem de uma determinada fase mineral.....	54

Capítulo 5 – Correlação da Geoquímica com a Condutividade Térmica

Figura 5.1 – Relação entre CT e a química da rocha (elementos maiores).....	56
Figura 5.2) Relação entre Condutividade Térmica e a média da % de SiO ₂ (A), % de Fe ₂ O ₃ +MgO+CaO+TiO ₂ vs a % de SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +K ₂ O+Na ₂ O enfatizando as amostras básicas, intermediárias e ácidas (B), % de Al ₂ O ₃ +K ₂ O+Na ₂ O - félsicos (C), % de Fe ₂ O ₃ +MgO+CaO+TiO ₂ - máficos (D).....	58
Figura 5.3) Relação entre Condutividade Térmica e: % de SiO ₂ (A), % de Al ₂ O ₃ (B), % de Fe ₂ O ₃ (C), % CaO (D), % de TiO ₂ (E), % de K ₂ O (F), % de Na ₂ O (G), e MgO (H), destacando apenas as rochas ácidas.....	60
Figura 5.4) Relação entre Condutividade Térmica e: % de Al ₂ O ₃ +K ₂ O+Na ₂ O (A), % de Fe ₂ O ₃ +MgO+CaO+TiO ₂ (B).....	60

Capítulo 6 – Condutividade Térmica aplicada ao uso e aplicação em Rochas Ornamentais

Figura 6.1 – Respectivas equações de reta das texturas fina/média e grossa/porfiritica.....	64
---	----

Figura 6.2 – Média das duas texturas para os intervalos de 0-10, 10-20, 20-30 e >30% de Qz..	65
Figura 6.3 – Equações de reta obtidas a partir da % de quartzo e respectivas Cond. Term.....	66
Figura 6.4 – Reta de correlação entre a % de Qz (X) e a dilatação térmica linear (Y).....	67
Figura 6.5 – Relação entre a CT e DTL e respectivas % de Qz.....	68
Figura 6.6 – Zonas bioclimáticas brasileiras, modificado de Givoni 1992.....	75
Figura 6.7 – Condutividade térmica vs densidade de alguns dos principais materiais utilizados na construção civil.....	82

Lista de Tabelas

Capítulo 2 – Condutividade Térmica

Tabela 2.1 – Condutividade Térmica para alguns dos principais minerais.....	15
Tabela 2.2 – Anisotropia da condutividade térmica de algumas rochas metamórficas.....	19

Capítulo 3 – Materiais e Métodos e Aspectos do Equipamento

Tabela 3.1 – Variáveis medidas pelo equipamento medidor de propriedades térmicas.....	22
Tabela 3.2 – Resultados de condutividade obtidos em diferentes superfícies e espessuras.....	23
Tabela 3.3 – Condutividade térmica de materiais cerâmicos.....	24

Capítulo 4 – Avaliação macro e microscópica e relação com a condutividade térmica

Tabela 4.1 - Dados mineralógicos e respectivos valores de condutividade térmica.....	32
Tabela 4.2 – Amostras selecionadas para discussão dos parâmetros macroscópicos.....	36
Tabela 4.3 – Granitóides e respectivas médias de condutividade térmica.....	50
Tabela 4.4 – Amostras com < 20% de Qz e respectivas médias de condutividade térmica.....	50

Capítulo 5 – Correlação da Geoquímica com a Condutividade Térmica

Tabela 5.1 – Dados geoquímicos (elementos maiores) e respectivas condutividades térmicas...61	
---	--

Capítulo 6 - Condutividade Térmica aplicada ao uso e aplicação de Rochas Ornamentais

Tabela 6.1 – Ensaio recomendados por diversas associações internacionais.....	70
Tabela 6.2 – Condutividade Térmica de Granitos Ornamentais do Brasil.....	72
Tabela 6.3 – Tipos de paredes sugeridas para cada zona bioclimática e respectivos valores de transmitância térmica.....	76
Tabela 6.4 – Propriedades térmicas de alguns granitos ornamentais brasileiros.....	80
Tabela 6.5 – Amostras selecionadas para os ensaios de densidade.....	82

Capítulo 1

**Introdução, Objetivos e fundamento
Teórico**



CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1 Aspectos do Trabalho

Esta dissertação representa o primeiro trabalho que aborda o tema petrofísica com enfoque a condutividade térmica desenvolvido pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, constituindo-se parte das exigências do Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) para conclusão do curso de mestrado. A orientação foi realizada pelo professor Dr. Antonio Carlos Galindo (DG-PPGG-UFRN) com a colaboração do professor José Antonio de Moraes Moreira (DFTE-UFRN). Os custos para realização desta pesquisa foram em parte do próprio programa de pós-graduação e em parte da CAPES através do fornecimento de uma bolsa de estudo ao autor. Este trabalho foi ainda apoiado pela Marmoraria StoneLine que auxiliou cedendo grande parte das amostras de granitos e ainda na etapa de serragem e dimensionamento dos corpos de prova estudados.

Adotou-se o formato tradicional para esta dissertação que foi dividida em 7 capítulos. Neste capítulo pretende-se dar ao leitor uma visão geral do trabalho, demonstrando os objetivos principais, comentando-se por fim a respeito de aspectos relacionados a algumas propriedades térmicas e suas definições. O capítulo 2 trata da condutividade térmica dos elementos químicos, dos minerais, das rochas e os principais fatores determinantes sugeridos pela literatura. O capítulo 3 aborda aspectos relacionados ao equipamento e os métodos utilizados. Já o capítulo 4 discute a avaliação mineralógica macro e microscópica e sua relação com a condutividade térmica. O capítulo 5 aborda a geoquímica de rochas enfatizando o papel dos elementos maiores sobre a condutividade térmica. No capítulo 6 são discutidos brevemente a relação da *condutividade térmica* e da *dilatação térmica linear* onde são sugeridas de forma preliminar algumas fórmulas de correlação entre a mineralogia (quartzo) e ambas as variáveis. Este capítulo demonstra ainda a aplicação da variável *condutividade térmica* na construção civil especialmente na área de conforto ambiental e apresenta uma tabela com 55 granitos ornamentais brasileiros e algumas de suas principais propriedades térmicas, que poderão servir como fonte de pesquisa e referência para trabalhos futuros. Na etapa final é abordada a questão da relação da densidade e da condutividade térmica de alguns materiais utilizados na

construção civil dentre eles os materiais rochosos. Por fim no capítulo 7 são apresentadas as considerações finais do trabalho e algumas sugestões para pesquisas futuras.

1.2 Introdução

A Termodinâmica é conhecida a muitos séculos, contudo seu estudo formal começou no século XIX, motivado pela utilização do *calor* como força motriz. Dessa forma esta ciência nasceu como resultado das preocupações relativas às máquinas a vapor, dos laços entre os fenômenos mecânicos e os térmicos assim como da evolução da calorimetria.

Atualmente possui espectro bastante abrangente, como ciência da *energia* e das relações entre as *propriedades* da matéria. Especificamente na Física fica evidente o interesse em compreender os fundamentos do comportamento físico-químico da matéria e usar os princípios termodinâmicos para estabelecer relações entre as propriedades da matéria.

A discussão formal dos parâmetros físicos de rochas é recente quando se comparada com o tempo de utilização destes materiais pelo homem. Em todo o mundo é possível reconhecer grandes obras arquitetônicas, peças de arte, esculturas, materiais de revestimento ou adornos confeccionados por civilizações antigas que procuravam expressar e/ou registrar traços de sua cultura. Dentre estas obras destacam-se as pirâmides do Egito, o Coliseu em Roma, Acrópole em Atenas, a Catedral de Milão, a estátua de Davi, a estátua de Moisés, os Moais na Ilha de Páscoa (Oceano Pacífico), diversas obras de arte do Império Romano e da Grécia e em diversas outras civilizações.

Contudo a utilização das rochas com aplicação ornamental só ganhou impulso significativo no início do século XX, mesmo assim com preferência para os mármore. Com o avanço da tecnologia de extração, a descoberta de novos materiais (granitos, gnaisse, etc.) e novas jazidas os custos caíram permitindo o acesso de uma parcela maior da população a compra de rochas ornamentais.

No Brasil a década de 70 foi o marco inicial da extração de rochas ornamentais o que possibilitou o barateamento de custos e preços ao consumidor final, pois grande parte dos materiais era importada em especial da Europa (Itália). O aumento do consumo em todo o mundo e a diversificação dos materiais e de sua aplicação começou a trazer alguns transtornos no que se refere a mudança de cor, resistência, durabilidade, alterabilidade,

etc. Entretanto só apenas a partir da década de 80 e mais fortemente na década de 90 notou-se uma preocupação efetiva em especial de profissionais da área de engenharia civil, geologia e arquitetura preocupados com os aspectos tecnológicos, fato que foi evidenciado principalmente pelo incremento de trabalhos em congressos científicos nacionais e internacionais.

Dentre os vários parâmetros físicos aplicados a rochas ornamentais que ainda não foram discutidos como parâmetro tecnológico pela comunidade científica destacam-se as variáveis térmicas (condutividade térmica, difusividade térmica, capacidade térmica volumétrica, etc.), podendo ser uma nova vertente de estudos, aplicada a rochas e direcionada a diversas áreas inclusive ao conforto térmico.

O estudo das propriedades térmicas dos minerais e rochas é antigo e coincide com os primeiros estudos mineralógicos realizados. Entretanto só a partir do século XX ganhou notoriedade e importância com estudos e pesquisas patrocinados em especial pela indústria do petróleo. A área de geofísica, incentivada por todo esse contexto, desenvolveu-se enormemente mostrando grandes avanços nos métodos diagnósticos das propriedades entre eles a *termometria*. Tais pesquisas procuravam fornecer informações mais precisas sobre os litotipos, principalmente os de origem sedimentar, sempre tendo como objetivo final a melhor caracterização possível dos reservatórios. Esse quadro tornou-se mais evidente a partir do início da década de 70, após a grande crise do petróleo, a necessidade de se encontrar novas reservas ficou evidente, a produção científica voltada para o setor cresceu resultando em diversos trabalhos nas áreas de geologia, geoquímica e em especial a geofísica. É importante destacar que outras áreas também contribuíram com o avanço das técnicas tais como: estudos de metamorfismo, recursos energéticos geotermiais, etc. Grandes campos de atuação do tema “transferência de calor” são sumarizados na figura 1.1, destacando aqueles direta ou indiretamente relacionados a Geologia.

A condutividade térmica das rochas é um tema relativamente complexo, pois, depende de vários fatores dentre eles se destacam a mineralogia, composição química, porosidade, tipo fluido no espaço poroso, densidade, pressão, temperatura, textura, estrutura, grau de consolidação, grau de alteração, etc. Como se sabe uma rocha é constituída por um agregado de minerais, cada um com valores característicos (ou intervalo) de condutividade térmica, portanto é de se esperar que ao se variar as

proporções entre os minerais ou a orientação dos cristais, mesmo que minimamente, a condutividade também sofrerá modificações, mostrando uma complexa interação de variáveis, exigindo para tanto, não só o estudo de tais propriedades mas também o entendimento das leis que regem a termodinâmica.

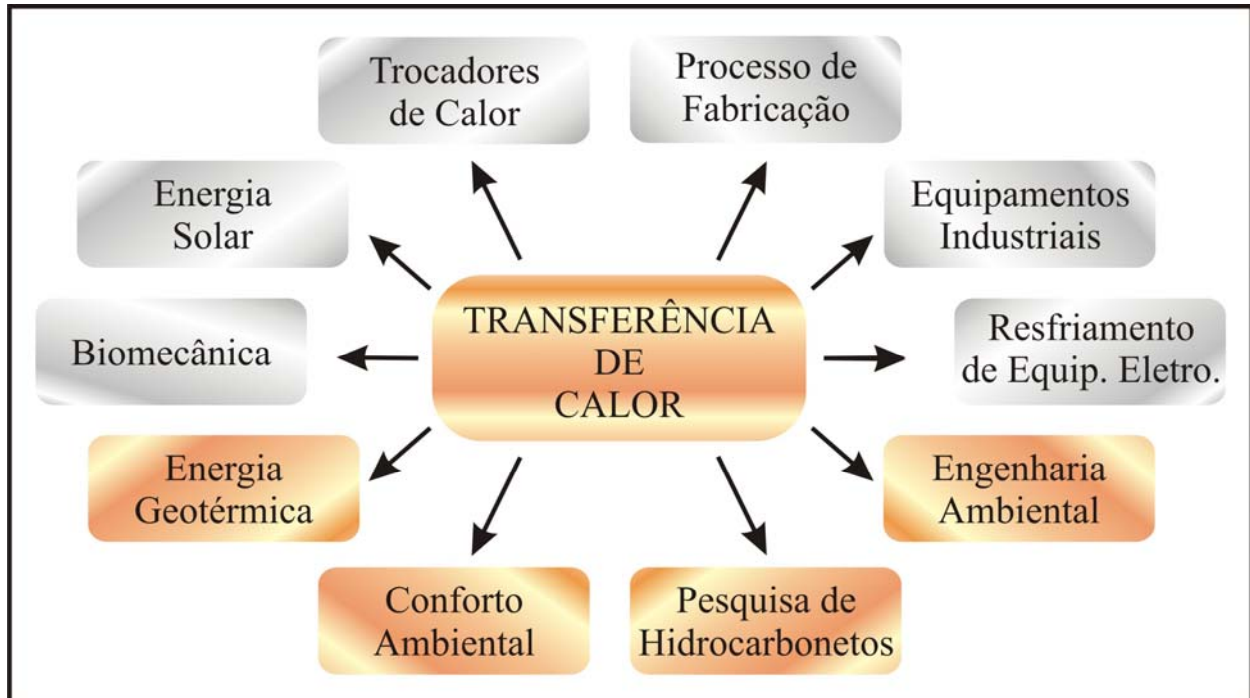


Figura 1.1 – Algumas áreas de atuação do tema “transferência de calor”, em destaque aquelas relacionadas direta e indiretamente a geologia.

1.3 Objetivos

O intuito desse trabalho é realizar, a partir de uma análise petrográfica macro e microscópica de diversos litotipos em especial de origem granítica, uma comparação com os resultados obtidos de condutividade térmica, correlacionando-os com a mineralogia, textura, etc. Esses resultados serão importantes para o entendimento do comportamento dos diversos tipos rochosos diante os efeitos térmicos, podendo ser úteis em várias aplicações como, por exemplo: 1) No entendimento e aferição de resultados de fluxo térmicos regionais; 2) na predição do comportamento térmico de rochas baseados na avaliação macroscópica (textura e mineralogia); 3) Em estudos de sensoriamento remoto fornecendo dados de propriedades térmicas para uma melhor compreensão do comportamento dos litotipos sob as diversas bandas em especial no infravermelho termal; 4) No segmento de construção civil com o objetivo de fornecer informações mais precisas no que diz respeito ao refinamento de dados sobre propriedades térmicas enfatizando a condutividade térmica de materiais rochosos e; 5) Na indústria de rochas

ornamentais com o intuito de se abrir uma discussão sobre a utilização destas variáveis como novos parâmetros tecnológicos diretamente relacionados ao conforto térmico.

Quando o tema é parâmetro térmico a literatura especializada contribui muito pouco em termos qualitativos, principalmente quando se trata de “rochas”, pois quase sempre os minerais são privilegiados, em todos os casos fornecendo apenas dados quantitativos. A idéia é correlacionar parâmetros quantitativos (dados numéricos) com os qualitativos (textura, tamanho do grão, mineralogia, etc.) que serão avaliados, em grande parte, a partir de superfícies polidas de chapas de rochas utilizadas com fins ornamentais e em seções delgadas. Dentre os objetivos principais deste trabalho destacam-se:

- ✚ Determinar de forma quantitativa e qualitativa a condutividade térmica em rochas, em especial em litotipos graníticos;
- ✚ Avaliar o comportamento da condutividade nos diversos litotipos e definir quais os principais parâmetros (variáveis) determinantes de uma maior ou menor condutividade;
- ✚ Entender e definir o intervalo de variação da condutividade térmica numa mesma amostra e para os grupos de rochas (granodioritos, granitos, monzonitos, etc).
- ✚ Definir o papel da mineralogia e textura a partir de avaliações macro e microscópicas;
- ✚ Correlacionar a condutividade térmica com a química da rocha.
- ✚ Correlacionar os dados de condutividade deste trabalho com os da literatura com o objetivo de se conhecer e definir melhor os intervalos de condutividade.
- ✚ Analisar a possível utilização do parâmetro “condutividade térmica” em aplicações na construção civil enfatizando o conforto térmico, abrindo assim uma possível discussão sobre a criação de mais um parâmetro tecnológico (condutividade térmica).
- ✚ Criar uma tabela de referência de dados térmicos com o objetivo de fornecer informações de granitos ornamentais mais precisas e detalhadas para cálculos de conforto térmico em edificações.

1.4 Fundamento Teórico

As leis da termodinâmica prevêm um fluxo de calor quando dois sistemas, a temperaturas diferentes, se encontram em contato térmico. Esse fluxo processa-se do sistema à temperatura mais elevada para o sistema à temperatura mais baixa (figura 1.2). O transporte de calor modificará as temperaturas dos dois sistemas, os quais tenderão a ficar à mesma temperatura final. Quando esta situação é atingida diz-se que os sistemas estão em “**equilíbrio térmico**”. A taxa de transporte de calor entre os dois sistemas pode ser alterada se entre eles for colocada uma barreira que ofereça alguma resistência à passagem da energia. Estas barreiras de separação entre dois subsistemas são designadas “**paredes**”, de acordo com a nomenclatura usada habitualmente em termodinâmica. A taxa a que a energia térmica é transferida através destas paredes é função, entre outras coisas, do material de que é constituída (propriedades físicas) e das suas características geométricas.

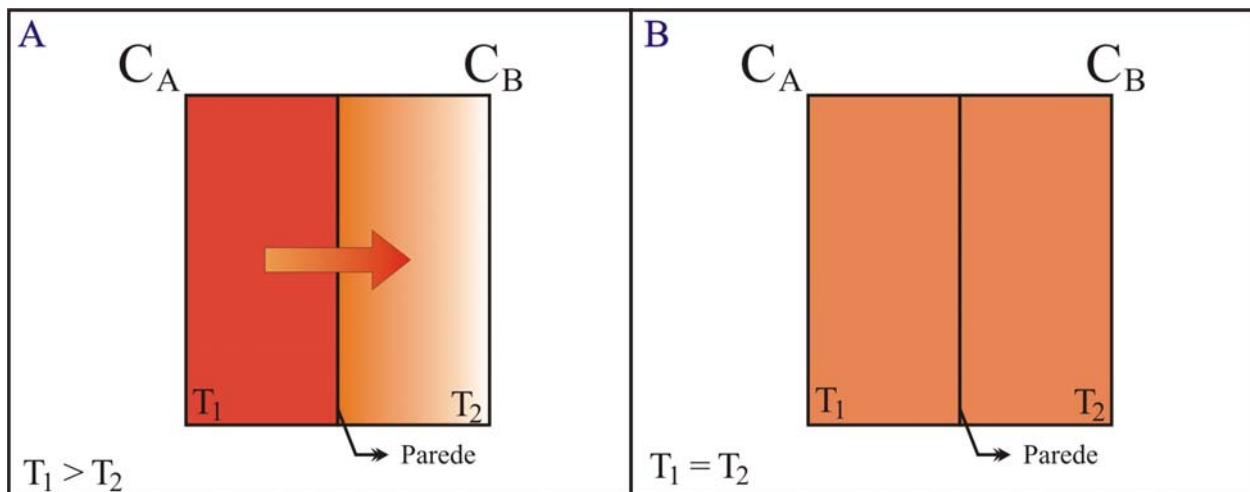


Figura 1.2 – Desenho esquemático mostrando dois sistemas C_A e C_B com temperaturas T_1 e T_2 , respectivamente. Em “A” o fluxo de calor migra de C_A para o C_B pois $T_1 > T_2$. Já em “B” $T_1 = T_2$, portanto não há mais fluxo de calor e os sistemas encontram-se em equilíbrio térmico.

Um importante passo em toda análise em engenharia é a identificação precisa do objeto a ser estudado. Em termodinâmica, o termo **sistema** identifica o objeto da análise. No caso específico deste trabalho o sistema é a amostra de rocha onde foram realizadas as medidas. Obviamente o sistema em análise foi considerado fechado não havendo, portanto, entrada nem saída de massa (quantidade fixa de matéria).

Os três mecanismos essenciais de transporte do calor são: a *radiação*, a *convecção* e a *condução*. O transporte **radiativo** de calor faz-se através do espaço sob a forma de ondas eletromagnéticas. Não há necessidade, portanto, de um meio material como

suporte. O transporte por **convecção** é o mecanismo geralmente mais importante quando o meio que lhe serve de suporte é um fluido. Neste tipo de transporte, um corpo a certa temperatura está em contato com um fluido a uma temperatura diferente. As camadas de fluido em contato com o corpo estão constantemente sendo renovadas devido à alteração das propriedades do fluido induzidas por via da transferência do calor. Estabelecem-se correntes ditas de convecção, em que camadas de fluido a diferentes temperaturas circulam, fazendo o transporte do calor. A transmissão de calor por **condução** é característica do transporte através dos sólidos. As entidades responsáveis por este transporte são os elétrons de condução e/ou as vibrações da rede cristalina, Incropera & Witt (1981).

Para um melhor entendimento de alguns parâmetros discutidos neste trabalho serão definidas algumas variáveis termodinâmicas, baseado nas definições de Incropera & Witt, (1981), e Serway, (1992) tais como: capacidade calorífica, condutividade térmica, difusividade térmica, etc.

A quantidade de energia térmica necessária para elevar a temperatura de certa massa de uma substância, de um certo incremento, varia de substância para substância. Por exemplo, são necessários 4,186 J de calor para se elevar em 1 °C a temperatura de 1 kg de água, mas de 387 j de calor para se elevar em 1 °C a temperatura de 1 kg de cobre.

- A *capacidade calorífica*, “C”, de uma amostra de uma substância se define como a quantidade de energia térmica necessária para elevar de um grau Celsius a temperatura da amostra. A capacidade calorífica de um corpo é proporcional a sua massa, “m”. Por isso, é conveniente definir a capacidade calorífica por unidade de massa de uma substância, “c”, o *calor específico*, equação 1.

$$c = \frac{C}{m} \quad \text{eq.1}$$

A *Condutividade Térmica* (λ) é definida como a taxa à qual o calor flui através de uma certa área de um corpo. A definição precisa é dada pela equação de Fourier, equação 2:

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{eq. 2}$$

Onde: Δq é a energia calorífica fluindo na direção x através da área A durante o tempo Δt , dado em Joules por segundo, ou Watts. $\Delta T/\Delta x$ é o gradiente de temperatura por unidade de distância que é dado em graus Kelvin, ou Celsius, por metro. E λ é a condutividade térmica do material. Isto sugere que para medir a condutividade térmica tudo o que se precisa é estabelecer um fluxo de calor estável através de uma amostra e então medir a potência que está entrando, a queda de temperatura da amostra e sua área.

Um outro parâmetro importante é a *difusividade térmica* (α) que mede a capacidade do material de conduzir a energia térmica em relação a sua capacidade de armazená-la. Materiais com valores elevados de difusividade térmica responderão rapidamente a mudanças nas condições térmicas a eles impostas, enquanto materiais com valores reduzidos de difusividade térmica responderão mais lentamente, levando mais tempo para atingir a uma nova condição de equilíbrio. A difusividade térmica é importante na determinação da evolução de sistemas que sofrem processos de aquecimento e/ou resfriamento. Este parâmetro está relacionado com a condutividade térmica “ λ ”, com o calor específico “ c ” e com a densidade ρ pela equação 3.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \text{ eq. 3}$$



Capítulo 2

Condutividade Térmica

CAPÍTULO 2 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA

2.1 Condutividade Térmica dos Elementos Químicos

Algumas propriedades dos elementos variam periodicamente em função de suas massas atômicas, raio atômico, potencial de ionização, afinidade eletrônica, eletronegatividade, etc, Fonseca (1992). Os poucos mais de 110 elementos estão divididos em 5 categorias, levando-se em conta suas propriedades químicas e características físicas, são elas: metais, semi-metais, ametais, gases nobres e o hidrogênio que possui comportamento diferenciado em relação aos demais grupos. Como não poderia ser diferente a condutividade térmica dos elementos também varia de acordo com sua característica dentro de um mesmo grupo ou período da tabela periódica, figura 2.1.

No que diz respeito à condutividade térmica o grupo dos metais é de longe o mais expressivo condutor, destacando-se a Prata (Ag, 429 W/mK), Cobre (Cu, 401 W/mK), Ouro (Au, 317 W/mK) e Alumínio (Al, 237 W/mK), já o grupo dos semi-metais exibe valores relativamente baixos quando se comparado com a média dos metais, mas ainda sim podem ser destacados elementos tais como o Silício (Si, 148 W/mK) Germânio (Ge, 59,9 W/mK) e Astató (As, 50 W/mK). O grupo dos não-metais, gases nobres e o próprio hidrogênio (H) mostram valores muito baixos de condutividade destacando-se os gases nobres como péssimos condutores (isolantes). Os dois elementos da tabela periódica que exibem os valores extremos de condutividade são a Prata (Ag) com 429 W/mK e o Radônio (Rn) com 0,00364 W/mK, mostrando assim uma diferença de comportamento de aproximadamente 120.000 vezes, entre ambos, Massachusetts Institute of Technology, (2005). É importante destacar que estas condutividades térmicas são referentes as condições normais de temperatura e pressão (CNTP), obviamente deve ser considerando o estado físico dos elementos nestas condições, figura 2.1. Dessa forma como sugerido no capítulo 1, item 1.4, a condução térmica em sólidos se dá principalmente por vibração da rede cristalina e/ou pelos elétrons de condução, Incropera & Witt (1981). Destaca-se ainda que aquelas substâncias com maiores números de elétrons livres tenderão a potencializar a condução térmica como o caso dos metais que associado ao tipo de ligação (metálica) justificaria suas altas condutividades térmicas. No caso dos gases nobres a própria natureza física (gás), torna-os isolantes térmicos, sendo a transferência de calor realizada principalmente por convecção e não por condução.

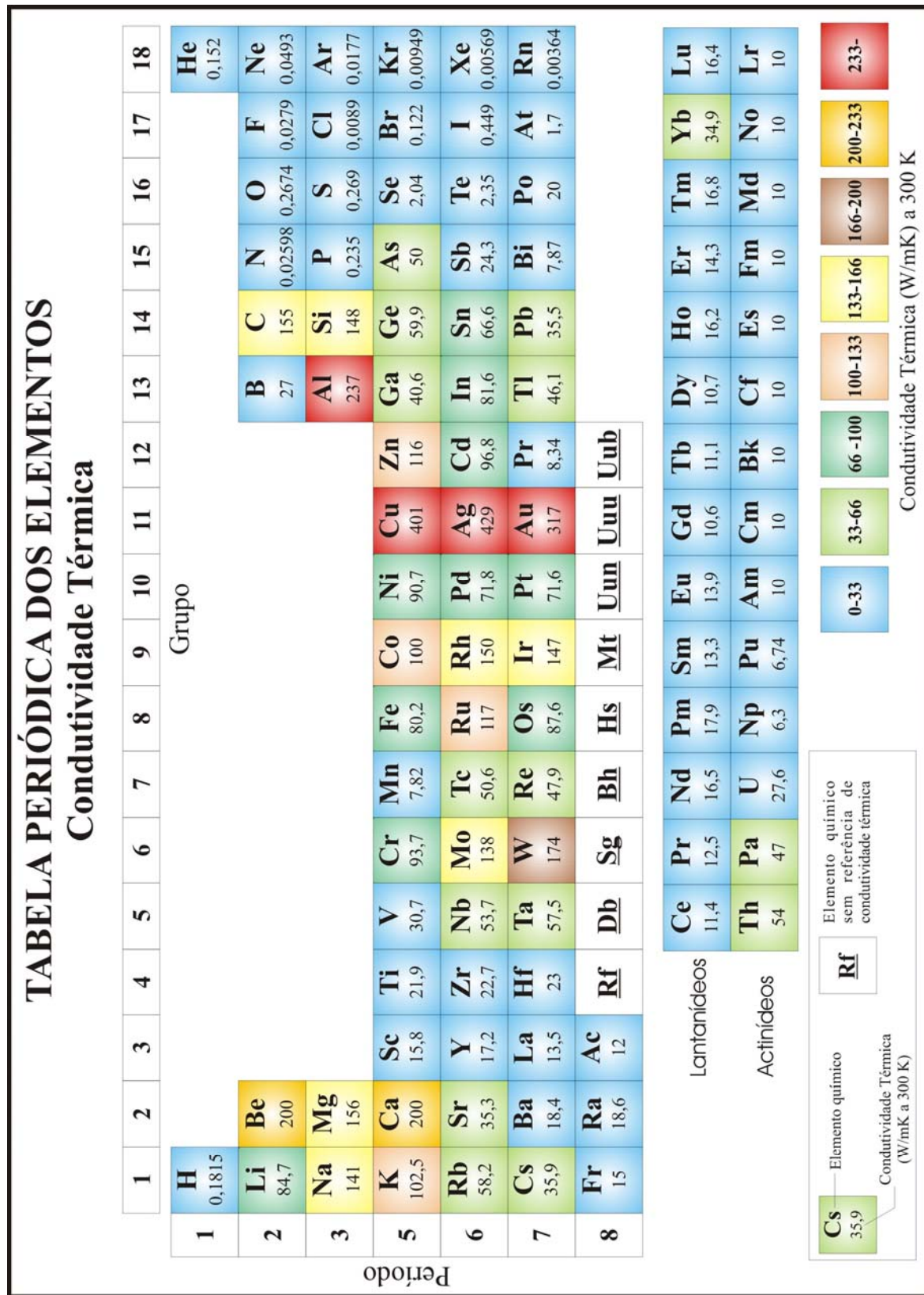


Figura 2.1 - Tabela Periódica dos Elementos Químicos e respectivas condutividades Térmicas modificado do Massachusetts Institute of Technology, 2005. <http://web.mit.edu/3.091/www/pt/pert14.html>

Se levarmos em consideração os principais elementos formadores de minerais na crosta terrestre ficará claro o domínio de elementos tais como o Si, Al, Fe, Mg, Ca, K, Na e Ti, Kirsh, (1965). Os dois elementos mais abundantes, Si e Al, apresentam condutividade térmica de 148 e 237 W/mK, respectivamente. Dentre os demais elementos se destacam o Ca, Mg, Na, K e Fe com elevadas condutividades, 200, 156, 141, 102,5 e 80,2 W/mK, respectivamente. Em comparação com os elementos citados o Titânio (Ti) é o que apresenta menor condutividade atingindo 21,9 W/mK e o alumínio (Al) a maior chegando a 237 W/mK. A figura 2.2 mostra a relação entre os elementos maiores da crosta terrestre supracitados, e as respectivas condutividades térmicas.

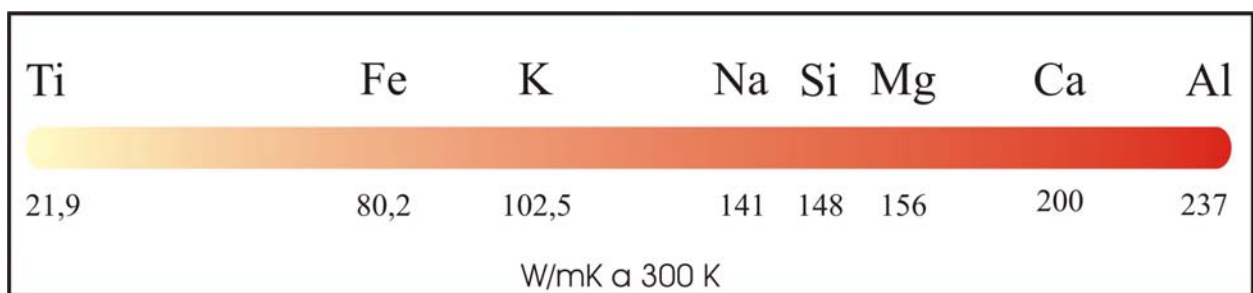


Figura 2.2 – Relação entre os elementos químicos principais na crosta terrestre e suas respectivas condutividades térmicas.

Em teoria é de se esperar, portanto, que minerais como o quartzo, feldspatos e granadas, por exemplo, provoquem uma relativa subida nas medidas de condutividade térmica em rochas, quando se levando em consideração apenas os aspectos químicos. Todavia os valores medidos para os elementos químicos associados (silicatos, óxidos, etc.) estão quase sempre muito abaixo dos elementos no estado nativo, mostrando assim, uma complexa relação dos tipos de ligações envolvidas (metálica, van der Waals, etc.) e rede cristalina formada (retículos de Bravais), sendo quase sempre inferiores em relação aos elementos no estado puro. A figura 2.3 mostra a relação da condutividade térmica dos mais variados tipos de materiais e o intervalo em que se situam as amostras deste trabalho.

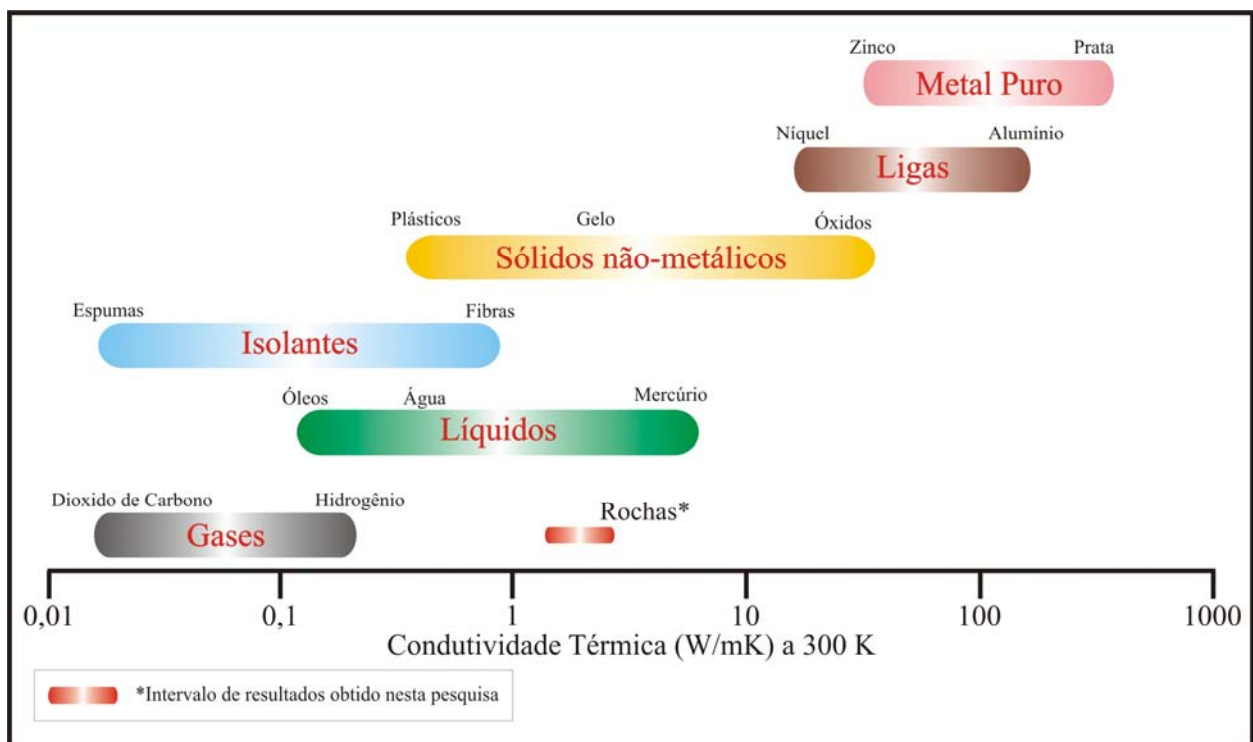


Figura 2.3 - Domínio das condutividades térmicas a 300 K, de diversos estados da matéria e alguns materiais a 1ATM, enfatizando o intervalo de medidas desta pesquisa. Modificado de Incropera & Witt, (1981).

As substâncias, segundo Incropera & Witt (1981), tem uma condutividade térmica bastante variável com as diferentes temperaturas impostas, tendo na grande maioria uma tendência de queda com o aumento da temperatura. Todavia materiais como a platina o aço inoxidável e o quartzo fundido, por exemplo, mostram comportamentos diferenciados. A figura 2.4 mostra a relação da temperatura vs a condutividade e o comportamento de vários materiais.

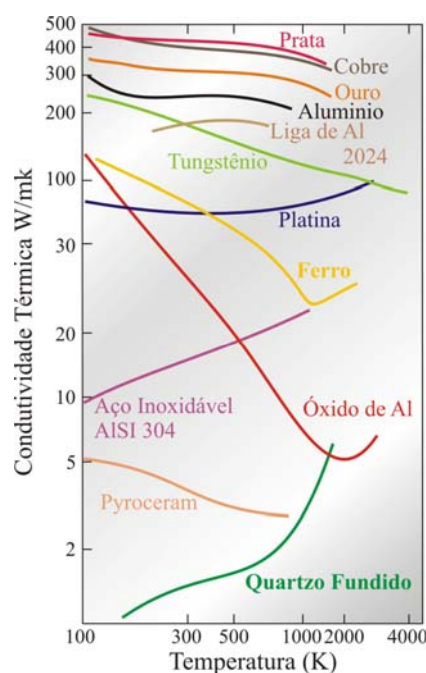


Figura 2.4 - Dependência da condutividade térmica de alguns materiais em função da temperatura. Modificado de Incropera & Witt, (1981).

2.2 Condutividade Térmica dos Minerais

A condutividade térmica de um mineral é a habilidade deste em conduzir calor. Ela é uma propriedade vetorial e depende da composição e estrutura interna do cristal, Dana, (1969). Todos os sistemas cristalográficos, exceto o sistema cúbico, são anisotrópicos, ou seja: o calor propaga-se diferentemente nas diversas direções. Em outras palavras, quanto maior o valor da condutividade térmica de um mineral maior será sua habilidade em conduzir calor, e esta propriedade será sempre relacionada as suas características físicas, químicas e cristalográficas.

A condutividade térmica de minerais é muito melhor definida e estudada quando se comparada com a de rochas, pois as características físicas, químicas e cristalográficas são geralmente melhor controladas, mas quando se trata de minerais, segundo Clauser & Hueges (1995), o principal problema na aquisição dos dados de condutividade térmica são a pureza e o tamanho das amostras.

Vários autores avaliaram a condutividade térmica dos minerais tentando definir os parâmetros térmicos para cada mineral e ou/grupo mineral, todos utilizando técnicas mais ou menos similares onde as medidas eram realizadas levando em consideração a anisotropia dos cristais, sendo na grande parte realizadas a temperatura ambiente, Dreyer (1974), Cermak & Rybach (1982), Diment & Pratt (1988), entre outros. Contudo, Horai (1971), realizou medidas em pó de minerais, onde os resultados refletiam na verdade uma média de condutividade térmica, uma vez que todos os dados referentes a propriedades físicas dos cristais haviam sido destruídas. Em comparação com os demais trabalhos os resultados de Horai (1971) se mostraram dentro da média e bastante coerentes sendo utilizados por este trabalho como uma das principais referências de dados. Os resultados disponibilizados na tabela 2.1 servem como parâmetro comparativo uma vez que o objetivo aqui é o estudo em rochas e não a avaliação em minerais especificamente. Fica claro nestes dados que existe um intervalo mais ou menos definido para cada mineral, ou grupo mineral, onde a condutividade térmica sofrerá variações. Os resultados dos diferentes autores mostraram por vezes algumas variações (em torno de 10%), mas sempre boas correlações, entre minerais com altas e baixas condutividades. Por exemplo, minerais como quartzo e cianita mostraram sempre altas condutividades, e apatita e microclina baixas condutividades.

Guéguen & Palciauskas (1992) entre outros temas, abordaram a condutividade térmica em minerais e baseados em dados da literatura separam estes em grupos (olivinas, piroxênios, etc.) definindo as condutividades térmicas e calor específico de alguns dos principais constituintes. Estes autores mostram ainda a correlação da condutividade térmica com outros parâmetros físicos, como por exemplo, massa atômica, densidade, pressão, etc.

As propriedades termais dos minerais são sumarizadas e tabuladas em alguns trabalhos como os de Clark, (1966), Horai, (1971), Kappelmeyer & Haenel (1974), Dortman, (1976), Cermak & Rybach (1982) e por fim Kobranova (1989) que hierarquizou as principais classes mineralógicas e suas respectivas condutividades térmicas, sugerindo valores médios para cada classe, figura 2.5.

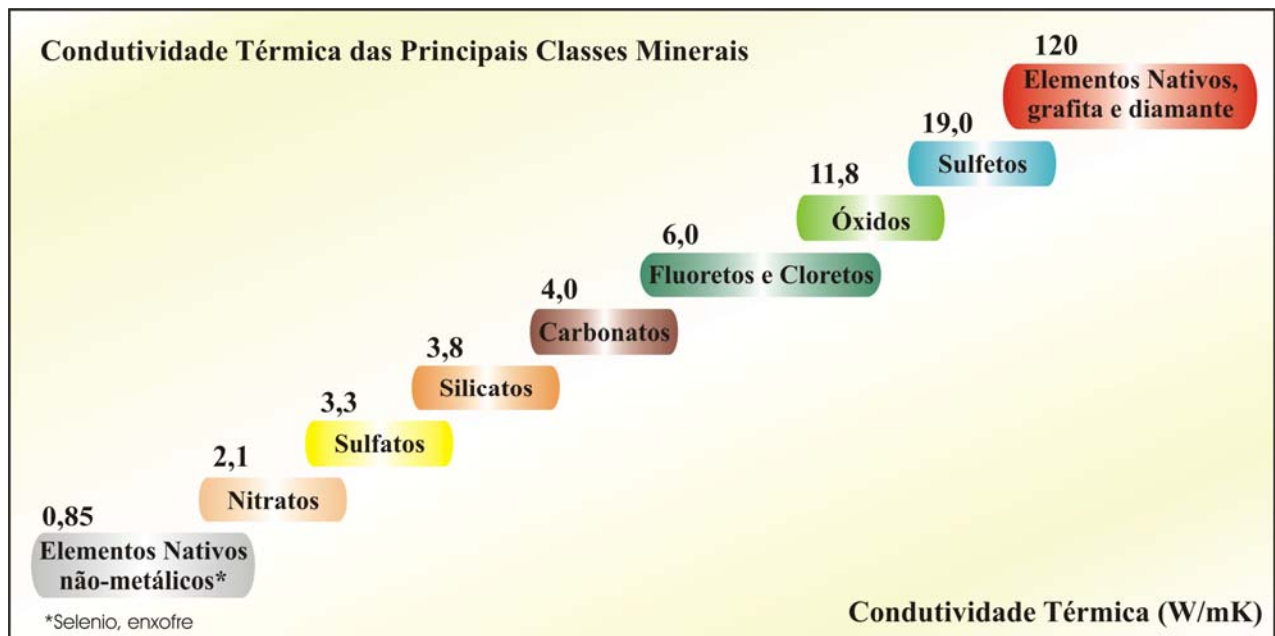


Figura 2.5 – Condutividade térmica das principais classes mineralógicas (300 K, 1Atm). Modificado de Kobranova (1989).

Tabela 2.1 – Valores de Condutividade Térmica (W/mK) para alguns dos principais minerais formadores de rochas

Minerais	Horai (1971)	Dreyer (1974)	Melnikov et al. (1975)	Cermak and Rybach (1982)	Diment & Pratt (1988)
Olivina Forsterita (Mg)	5,03±0,18		6,0	5,06	4,65±0,33
Olivina Faialita (Fe)	3,16		3,0	3,16	3,85±0,07
Granada Almandina (Fe)	3,31	3,6	3,3	3,31	3,56
Granada Grossulária (Ca)	5,48±0,21				5,32
Zircão	5,54	3,9 – 4,8			
Titanita	2,34				
Cianita	14,16		14,2	14,2	7,15±0,14 – 12,45±0,58
Andalusita	7,58				6,56±0,42
Silimanita	9,10				10,73±0,52
Epídoto	2,83±0,21			2,82	2,50 – 3,10
Enstatita	4,47±0,30			4,34	
Diopsídio/Augita	4,66±0,31		5,1-4,1	5,02	4,23±0,05
Hornblenda	2,81±0,27	2,81±0,41	2,3-3,0	2,85	2,91±0,09
Muscovita	2,28±0,07		1,7	2,32	3,89 (//) 0,62±0,11 (⊥)
Biotita	2,02±0,32			1,17	3,14 (//) 0,52±0,01 (⊥)
Ortoclásio	2,31		3,2	2,31	2,68 – 2,34
Microclina	2,49±0,08				2,04
Albita	2,14±0,19	2,0±0,1	2,05-2,4	2,31	2,34
Anortita		2,1	1,88-1,95	1,68	2,72
Quartzo	7,69	6,5 – 11,3	8,0-13,0	7,69	6,15 (⊥) – 10,17 (//)
Magnetita	5,10	9,7	4,7-5,28	5,10	4,61±0,42
Ilmenita	2,38±0,18				1,49±0,02
Hematita	11,28	12,1 – 14,7	11,2-13,9	12,1-14,7	12,42±1,74
Espinélio	9,48	13,8			12,14±1,23
Rutilo		9,3 – 12,9			7,95±0,84(⊥) – 13,19±0,63(//)
Calcita	3,59	4,2 -5,0	3,25-3,9	3,57	3,16(⊥) – 3,63 (//)
Aragonita	2,24			2,23	2,37±0,22
Dolomita	5,51	4,9	3,9-5,5	5,5	4,78±0,54
Apatita	1,38±0,01		1,4	1,38	1,27±0,02

2.3 Condutividade Térmica das Rochas

O tema condutividade térmica de rochas é menos explorado quando se comparado com os minerais e ainda carece de informações mais precisas e detalhadas, em especial de dados qualitativos. Alguns trabalhos abordam o assunto destacando-se os de Grolier *et al.* (1991), Guéguen & Palciauskas (1992), Clauser & Huenges (1995), Schön (1996), Seipold & Huenges (1997), Vosteen & Schellschmidt, (2003), Maqsood *et al.* (2003), Maqsood *et al.* (2004)**a**, **b** e **c**, Adl-Zarrabi, (2004), entre outros.

No que diz respeito à avaliação da condutividade térmica Clauser & Huenges (1995), descreveram o comportamento dos 4 grupos de rochas: sedimentares, vulcânicas, plutônicas e metamórficas. A partir de uma análise estatística foram investigadas a variação da condutividade térmica e os principais fatores que a influenciavam cada grupo de rocha. No caso específico de rochas sedimentares os fatores determinantes seriam a porosidade e origem da partícula sedimentar, já em rochas vulcânicas o fator determinante seria a porosidade, em rochas plutônicas o ponto principal seria a fase mineral dominante e por fim as rochas metamórficas que seriam influenciadas pela anisotropia e pela fase mineral predominante. Estes autores tratam ainda da influência da temperatura e pressão sobre a condutividade térmica para vários tipos de rochas. Para a variável temperatura notou-se uma queda da condutividade térmica com o incremento de temperatura (0 a 1000 °C), entretanto, as variações são muito pequenas no intervalo de 0 a 100 °C mostrando que neste intervalo a condutividade térmica é praticamente a mesma sofrendo insignificante variação. Já o efeito da pressão é muito menos evidente, mas no geral mostra um discreto aumento de condutividade térmica com o aumento da pressão, no intervalo de 0 a 500 Mpa. Por fim a porosidade mostrou excelente correlação com a condutividade térmica, onde baixos valores de porosidade estavam sempre associados a altos valores de condutividade térmica e altas porosidades correlacionavam-se a baixas condutividades. A relação com a porosidade foi analisada ainda com o preenchimento dos poros por fluidos (água e óleo) e em todos os casos foram constatados aumentos na condutividade térmica, em especial para os líquidos mais densos.

A avaliação da condutividade em rochas também é discutida por Schön (1996) que analisou vários parâmetros tais como: *fabric*, composição mineralógica, fraturamento, porosidade, temperatura, etc. Inicialmente este autor sugere o intervalo principal de

condutividade térmica que caracteriza alguns dos principais tipos rochosos tentando correlacionar com os parâmetros supracitados, figura 2.6.

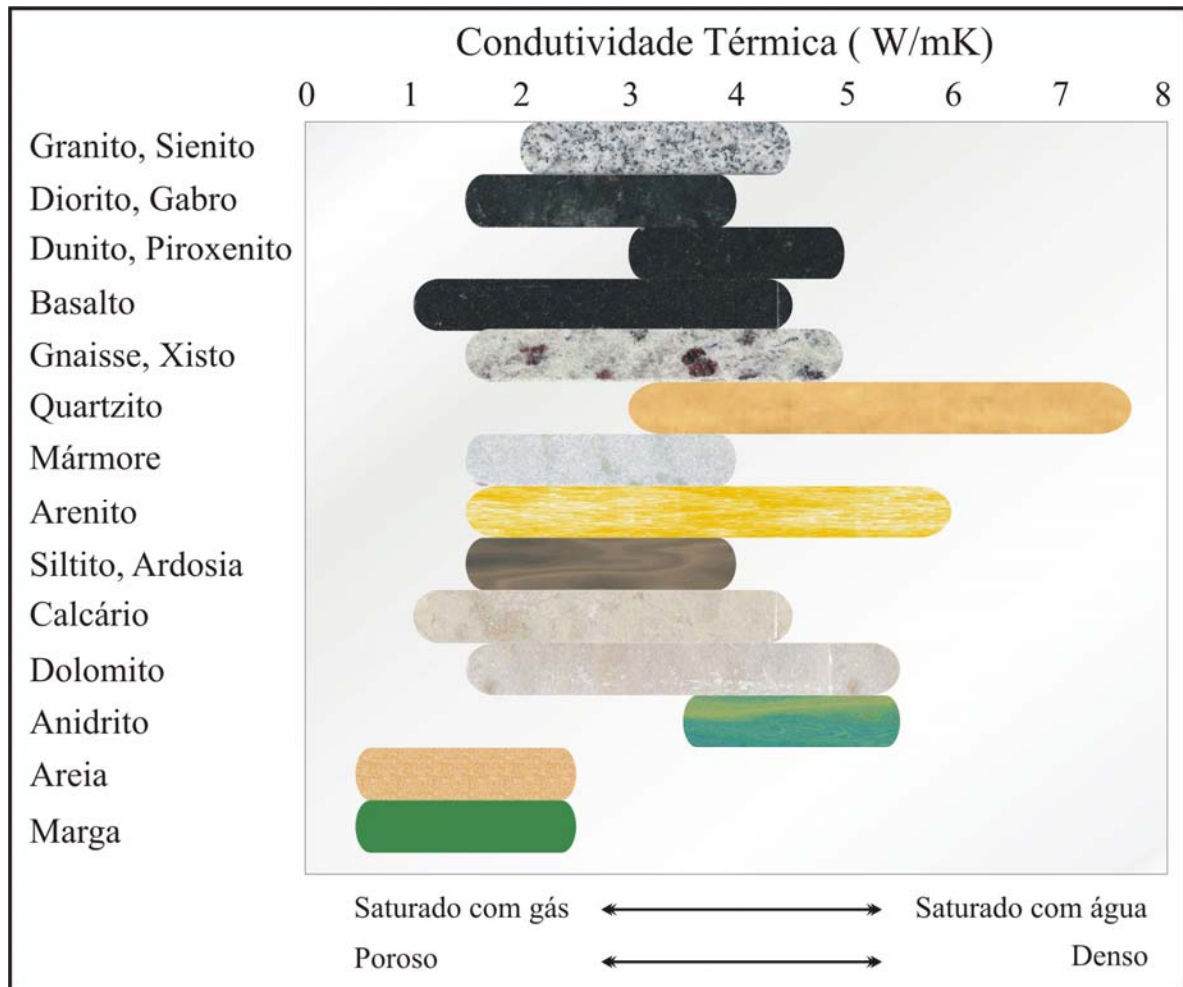


Figura 2.6 – Principais tipos de rochas e seus intervalos de condutividade térmica, modificado de Schön, (1996).

No que tange as rochas ígneas e metamórficas o referido autor sugere que a condutividade é fortemente controlada pelo conteúdo mineralógico, propriedades térmicas dos minerais e estrutura interna, enfatizando o contexto de rochas não alteradas e não fraturadas. Quanto ao conteúdo mineralógico deixa claro que o incremento de quartzo está sempre associado a um aumento da condutividade térmica, em contrapartida o aumento de plagioclásio está associado a uma diminuição da condutividade. Já no que cabe ao tema fraturamento é proposto que a geometria, distribuição, preenchimento das cavidades e pressão são as principais variáveis determinantes, tratando-se portanto, de uma avaliação complexa tendo-se que analisar cada caso em particular. Todavia em termos gerais propõe uma correlação direta e positiva com a pressão, ou seja, quanto maior a pressão maior a condutividade térmica. Já quanto a densidade de fraturamentos há uma relação inversa, ou seja, quanto maior este parâmetro menor a condutividade

térmica. Um outro parâmetro abordado foi a relação da temperatura em função da condutividade. É proposta uma correlação com o tipo de fase mineral dominante, assim foram sugeridos 3 tipos, de acordo com o comportamento termal, são elas:

- ✚ Tipo 1: Formado apenas por cristais (condutividades altas);
- ✚ Tipo 2: Formado apenas por material amorfo (condutividades baixas);
- ✚ Tipo 3: Formado por cristais + material amorfo (condutividades intermediárias);

A organização da rede cristalina e a predominância de cristais tende a facilitar a condução de calor. A vibração da rede cristalina e dos elétrons livres são os processos básicos para explicar a condução térmica em sólidos cristalinos e/ou metálicos, portanto aqueles materiais com maior organização cristalina e maior quantidade de elétrons livres, de modo geral, tenderão a possuir maiores valores de condutividade térmica. Assim é fácil perceber que com o aumento da temperatura a organização da rede cristalina ficará comprometida a ponto de prejudicar o fluxo de calor. Portanto em grande parte dos sólidos, inclusive as rochas, quanto maior a temperatura menor será a capacidade de transferir calor.

Por fim os resultados diferenciados da condutividade térmica, em direções distintas, numa mesma rocha pode ser justificado por três parâmetros principais segundo Schön (1996), são elas:

- ✚ Anisotropia dos cristais formadores da rocha;
- ✚ Anisotropia da rocha (acamamento, foliação, lineação, etc.);
- ✚ Orientação de falhas, fraturas e outras imperfeições;

Clauser & Huenges (1995), Schön (1996), Guéguen & Palciauskas, (1992) e Wienand *et al.* (1989), mostram claramente o efeito da anisotropia, em especial de rochas metamórficas, sobre a condutividade térmica. No geral os resultados de condutividade térmica tendem a ser maiores quando realizados paralelos a foliação e menores quando são realizados perpendiculares a esta. A tabela 2.2 mostra alguns dados de condutividade térmica vs anisotropia realizados por vários autores.

Rocha	Amostras	$\lambda_{//}$	λ_{\perp}	Referência
Gnaisse 1	55	2,12	1,74	W 69
Gnaisse 2	22	3,73	2,65	C 56
Gnaisse 3	9	3,49	2,61	C 66
Gnaisse 4	SI	2,92	2,18	D 76
Gnaisse Qz diorítico	11	3,36	3,01	B 50
Gnaisse 5	34	3,61	2,77	D 64
Mica Xisto	10	2,94	2,31	D 65
Xisto 1	18	2,88	2,05	W 69
Xisto 2	39	3,84	2,86	R 76

Tabela 2.2 – Anisotropia da condutividade térmica de algumas rochas metamórficas, modificado de Schön (1996). B50, D64, D65, R76 – Cermak & Rybach, (1982); C56, C66, Clark (1966); W69 – Wenk & Wenk (1969); D76 – Dortman (1976).

Seipold & Huenges (1997) ratificam o efeito da anisotropia (foliação) e afirmam que geralmente a condutividade térmica é baixa na direção perpendicular e mais alta na direção paralela ao plano de foliação. Estes autores afirmam ainda que este efeito pode sofrer variações importantes quando a lineação for bem marcada.

Outros autores fizeram abordagens mais específicas como por exemplo, Maragoni & Raposo (1988), Maqsood *et al* (2003), Maqsood *et al*, (2004)**a,b e c**, Adl-Zarrabi, (2004).

Maragoni & Raposo (1988) estudaram litotipos vulcânicos e tentaram mostrar a relação de parâmetros químicos, físicos e petrográficos. Os resultados sugeriram que a relação entre a condutividade térmica e os parâmetros químicos foi pouco acentuada, por outro lado a correlação foi mais evidente com os parâmetros petrográficos em especial com o teor de material vítreo. Os autores mostraram que quanto maior for a quantidade de material vítreo maior será a condutividade térmica e afirmaram ainda que as rochas mais ácidas tendem a apresentar menores valores de condutividade térmica do que as intermediárias e básicas.

Maqsood *et al* (2003) e (2004)**a**, abordaram em rochas vulcânicas, parâmetros como composição química, densidade, massa específica e porosidade aparente, correlacionando-os com a condutividade térmica. Esse estudo foi realizado a temperatura entre -20 e 60 °C. Os resultados preliminares mostraram uma queda da condutividade

térmica com o aumento da temperatura e da porosidade. Estes autores abordaram ainda a relação entre a densidade e a composição química, mostrando haver excelente correlação destes parâmetros, comparando dados medidos com resultados matemáticos.

Maqsood *et al.* (2004)b e (2004)c, avaliaram a predição da condutividade térmica em rochas graníticas, a partir dos dados de porosidade e densidade nas condições normais de pressão e temperatura (1 Atm, 27°C). Concluíram que para rochas com baixa porosidade (<1%), como é o caso de grande parte das rochas graníticas (sã), os modelos são pouco eficientes mostrando uma correlação ruim. No caso da densidade a correlação entre os dados medidos e estimados mostrou-se consideravelmente boa havendo uma correlação positiva.

Em termos gerais é possível demonstrar que, assim como outros parâmetros físicos, a relação das variáveis térmicas dependerão fundamentalmente das características físicas, mecânicas e químicas da rocha e que estas características estarão intimamente relacionadas a estrutura, textura e composição mineralógica, figura 2.7, Navarro (2002).

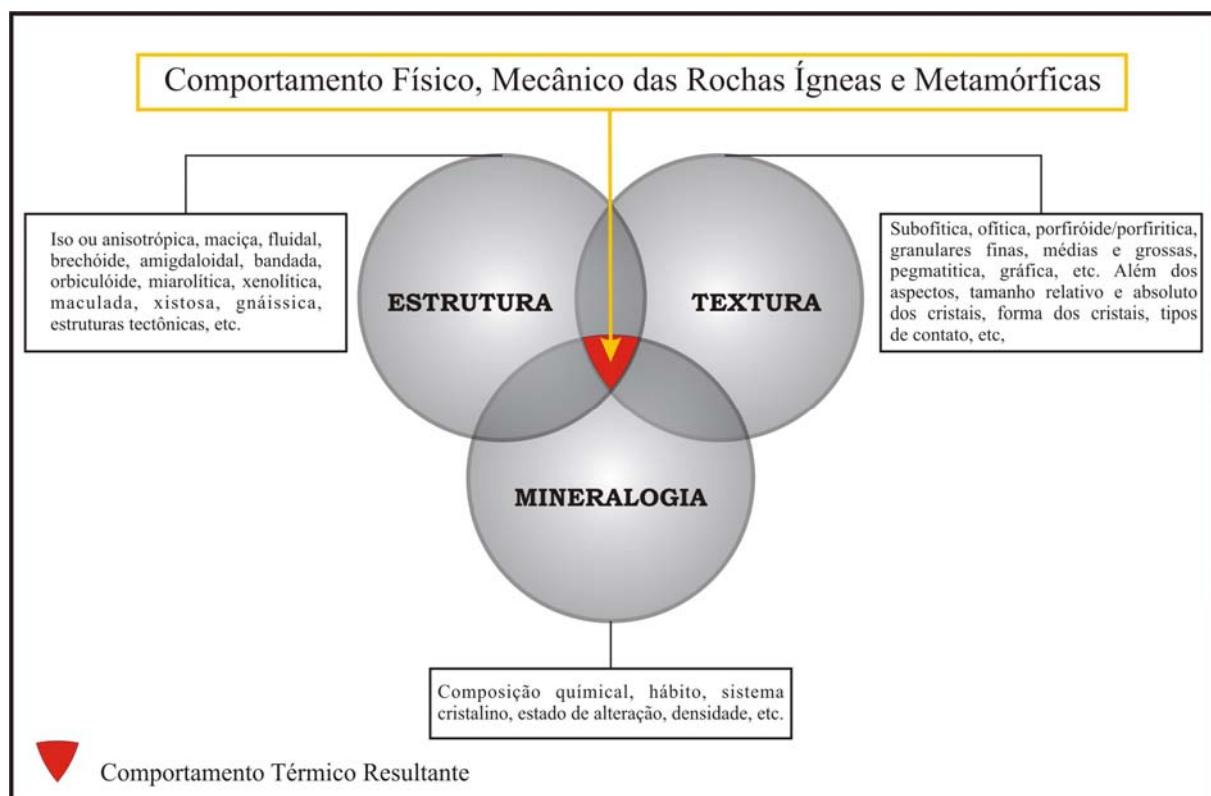


Figura 2.7 - Variáveis determinantes do comportamento físico, mecânico e químico das rochas ígneas e metamórficas, modificado de Navarro, 2002.

Capítulo 3

Materials, Métodos e Aspectos do Equipamento

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS, MÉTODOS E ASPECTOS DO EQUIPAMENTO

3.1 Aspectos Gerais

Neste capítulo serão tratados os aspectos do equipamento medidor de propriedades térmicas utilizado por este trabalho e suas especificações técnicas assim como os aspectos metodológicos deste trabalho.

As várias técnicas de medida de parâmetros térmicos dividem-se em duas categorias principais, são elas: regime dinâmico e regime estacionário. As técnicas dinâmicas (transientes) podem ser usadas para a determinação da difusividade térmica e da condutividade térmica. Para tal, faz-se necessário o conhecimento do tempo para o distúrbio se propagar por uma distância conhecida. Nas técnicas estacionárias o conhecimento do fluxo de calor e do gradiente de temperatura são indispensáveis para a obtenção da condutividade térmica. As técnicas dinâmicas (variação temporal de temperatura) requerem pouco tempo na realização das medidas, porém os resultados são menos precisos possuindo até 10% de erro. Nas técnicas estacionárias, as medidas possuem melhor precisão em torno de 5% de erro, mas para atingir o regime estacionário leva-se tempo, tornando o processo muito mais lento caro. O método realizado aqui envolve a teoria dinâmica e para tanto foi utilizado o equipamento da marca Anter Corporation, modelo Quickline™ -30, figura 3.1.

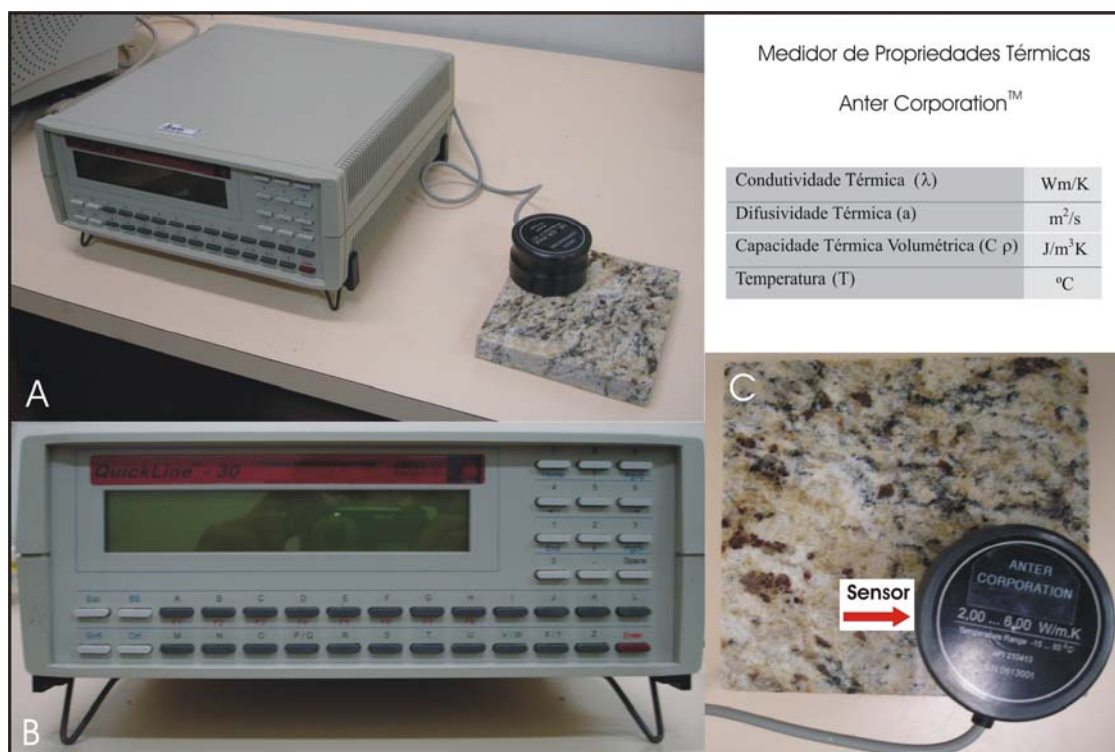


Figura 3.1 – A) Equipamento medidor de propriedades térmicas, vista geral. B) Vista frontal do equipamento. C) Detalhe do sensor sobre amostra polida de granito ornamental.

3.2 Aspectos Técnicos do Equipamento

As medidas de propriedades térmicas são baseadas na análise da resposta térmica do material com relação a excitação através de um fluxo térmico. Este fluxo de calor é produzido por aquecimento elétrico de um resistor inserido no sensor o qual entra em contato direto com o material em análise. A avaliação e medição da condutividade térmica e dos demais parâmetros são baseadas em amostragens periódicas da temperatura em função do tempo. A tabela 3.1 mostra os parâmetros medidos pelo equipamento e suas respectivas unidades.

Condutividade Térmica (λ)	Wm/K
Difusividade Térmica (a)	m ² /s
Capacidade Térmica Volumétrica (C_p)	J/m ³ K
Temperatura (T)	°C

Tabela 3.1 – Variáveis medidas pelo equipamento medidor de propriedades térmicas da Anter Corporation™.

São sugeridas pelo fabricante, amostras com espessuras mínimas de 1 cm e diâmetro de 6 cm, em função dos resultados serem fortemente influenciados no caso de dimensões menores em especial para materiais muito condutores. Estas dimensões garantem uma boa qualidade e confiabilidade dos resultados. Um outro aspecto a ser levado em consideração é o da superfície de contato entre a amostra e o sensor. É proposto o uso de pastas térmicas no caso de superfícies irregulares para que exista o perfeito acoplamento entre o sensor e a amostra. Todavia no caso específico deste trabalho grande parte das amostras são de rochas utilizadas com fins ornamentais, possuindo uma das faces polidas (planas e regulares) tendo assim uma excelente superfície de contato, o que dispensou a utilização de qualquer pasta térmica (55 amostras). No restante das amostras (41 amostras) foi utilizada uma pasta térmica (Votorantim) comumente utilizada no mercado de manutenção de eletro-eletrônicos.

As variáveis térmicas anteriormente citadas (tabela 3.1) foram testadas e avaliadas com o intuito de se conhecer melhor o fenômeno da condutividade e ainda de se comprovar as especificações sugeridas pelo fabricante e o funcionamento do equipamento. Os testes constaram na realização de medições num mesmo litotipo com textura e mineralogia bastante homogêneas. A amostra selecionada foi o Granito Flores com 3 superfícies e espessuras distintas, são elas: serrada (3cm), serrada com pasta (3cm)

e polida (1, 2 e 3cm de espessura), todas com pelo menos 6 cm de diâmetro. A amostra “serrada” tem 3 cm de espessura com a superfície de medição correspondente a uma superfície de corte de serra diamantada, a “serrada com pasta” é a mesma superfície só que agora com pasta térmica para auxiliar o contato com o sensor e por fim a “polida” que constitui-se na mesma superfície daquelas encontradas em chapas tradicionais de rochas ornamentais. Os resultados mostraram ser influenciados no caso da superfície “serrada” evidenciando o baixo acoplamento com o sensor como mostra a tabela 3.2. Já a amostra “polida 1” mostrou uma forte influência devido a baixa espessura. Assim os ensaios mostraram que a superfície “polida 2” e a “serrada com pasta” deram os melhores resultados médios, devido ao excelente acoplamento, sendo portanto o padrão aqui utilizado. A amostra “polida 3” mostrou resultado bastante similar com a “polida 2” e a “serrada com pasta” deixando claro que a partir da espessura de 2 cm os resultados não são afetados por esta variável.

Superfície	Espessura	Condutividade Térmica (W/mK)
Serrada	3 cm	2,82
Polida 1	1 cm	2,40
Polida 2	2 cm	3,46
Polida 3	3 cm	3,44
Serrada com pasta	3 cm	3,35

Tabela 3.2 – Resultados de condutividade obtidos em diferentes superfícies e espessuras.

Foram ainda realizadas medições em 2 amostras de cerâmicas encontradas no mercado de construção civil (revestimentos e pisos), são elas: Azul Bahia (**AB**) da marca “CEUSA” e Diamante Frost (**DF**) da “ELIANE”, ambas com espessuras aproximadas de 1,2 cm. Neste caso em especial as 8 medidas realizadas em cada amostra não mostraram variação significativa devido a homogeneidade do material. Esses dados foram utilizados apenas com o objetivo de comparação dos resultados e entendimento do processo de condução térmica em diferentes materiais (condutores *vs* isolantes). A tabela 3.3 exhibe os dados obtidos ficando claro o comportamento isolante de tais materiais e suas respectivas diferenças com os materiais rochosos anteriormente citados. As medidas foram realizadas tanto nas superfícies brilhosas quanto nas superfícies inferiores (não brilhosa) com auxílio de pasta térmica. Todos os resultados se mostraram coerentes e compatíveis com o tipo de material em análise (isolante). Vale salientar que os dados apresentados são na

verdade uma média de 4 medidas realizadas em cada superfície tendo os valores variados apenas na segunda casa decimal (variação desprezível) evidenciando a homogeneidade dos materiais.

Superfície	Espessura	Condutividade Térmica (W/mK)
AB Brilho	1,2 cm	0,97
AB Inferior	1,2 cm	0,95
DF Brilho	1,2 cm	0,65
DF Inferior	1,2 cm	0,64

Tabela 3.3 – Condutividade térmica de materiais cerâmicos. Medições realizadas nas faces “Brilho” e “Inferior”.

3.2.1 Acuracidade, Reprodutibilidade e Temperatura de medição

As medidas das propriedades termofísicas podem ser influenciadas por diversos fatores e estes poderão afetar a acuracidade e a reprodutibilidade dos dados. Os fatores que afetam mais significativamente as medidas, são:

- Qualidade do contato térmico entre a amostra e o sensor;
- Flutuações na temperatura e perturbações no sensor;
- Dimensões da amostra;
- Anisotropia do material e;
- Umidade;

Em condições normais de medição o fabricante especifica erros para os diferentes intervalos de medida, estando este trabalho inserido no intervalo de 0,70 a 6 W/mK, correspondendo a um erro máximo de 10% na leitura (acuracidade). Já para a reprodutibilidade são especificados erros de até 3% para a condutividade térmica. Para a capacidade térmica volumétrica são especificados um erro de 15% na leitura (acuracidade) e de 3 % na reprodutibilidade. Os trabalhos da literatura que utilizaram a mesma técnica de medição propõem erros de até 15% para medidas de condutividade térmica, trabalhos que utilizam técnicas mais precisas sugerem erros de 5%, estando portanto este trabalho dentro da média de erro.

As temperaturas de medição oscilaram em média de 25 à 38^o C e foram reguladas pelo próprio equipamento sofrendo pequenas variações de acordo com a característica de cada amostra.

3.3 Procedimento de Aquisição dos Dados

Para os procedimentos de medição foram selecionadas 55 amostras polidas de rochas graníticas utilizadas com fins ornamentais no mercado brasileiro. Estas possuem em média 15x15x2 cm, assim dimensionadas de forma a permitir pelo menos 4 medidas em locais distintos, figura (3.2). Para efeito estatístico foram ainda selecionadas 41 amostras utilizadas pelo projeto CRNOBORO (2005), que também utilizou a mesma metodologia e equipamento deste estudo, contudo para este conjunto foi preciso a utilização de pasta térmica para favorecer o contato entre as amostras e o sensor. Este conjunto de amostras possui dimensões aleatórias, mas sempre superiores as sugeridas pelo fabricante.

Para as amostras polidas o passo inicial foi demarcar arbitrariamente o vértice mestre, ponto de partida para determinação dos demais parâmetros. Como mostrado na figura 3.2 a posição desse vértice é fixa localizada na porção superior e do lado esquerdo da amostra. A partir desse vértice foram determinados as 4 regiões onde seriam realizadas as medidas, sendo estas auxiliadas pelo pontos de amarração (tangente as bordas da amostra) totalizado assim 8 pontos, sendo dois por medida. O procedimento de aquisição dos dados foi realizado no sentido horário e repetido em todas as 55 amostras, de forma que é possível realizar novas medidas para controle e/ou verificação dos resultados e ainda avaliar quais foram as possíveis variáveis (fase mineral, fissuramentos, etc.) que mais influenciaram os resultados.

Para se verificar o parâmetro “acuracidade” foram selecionadas aleatoriamente 30 amostras, foram realizadas 2 medidas numa mesma região, as pequenas variações ficaram na segunda casa decimal, portanto dentro da margem de erro de 3% proposta pelo fabricante.

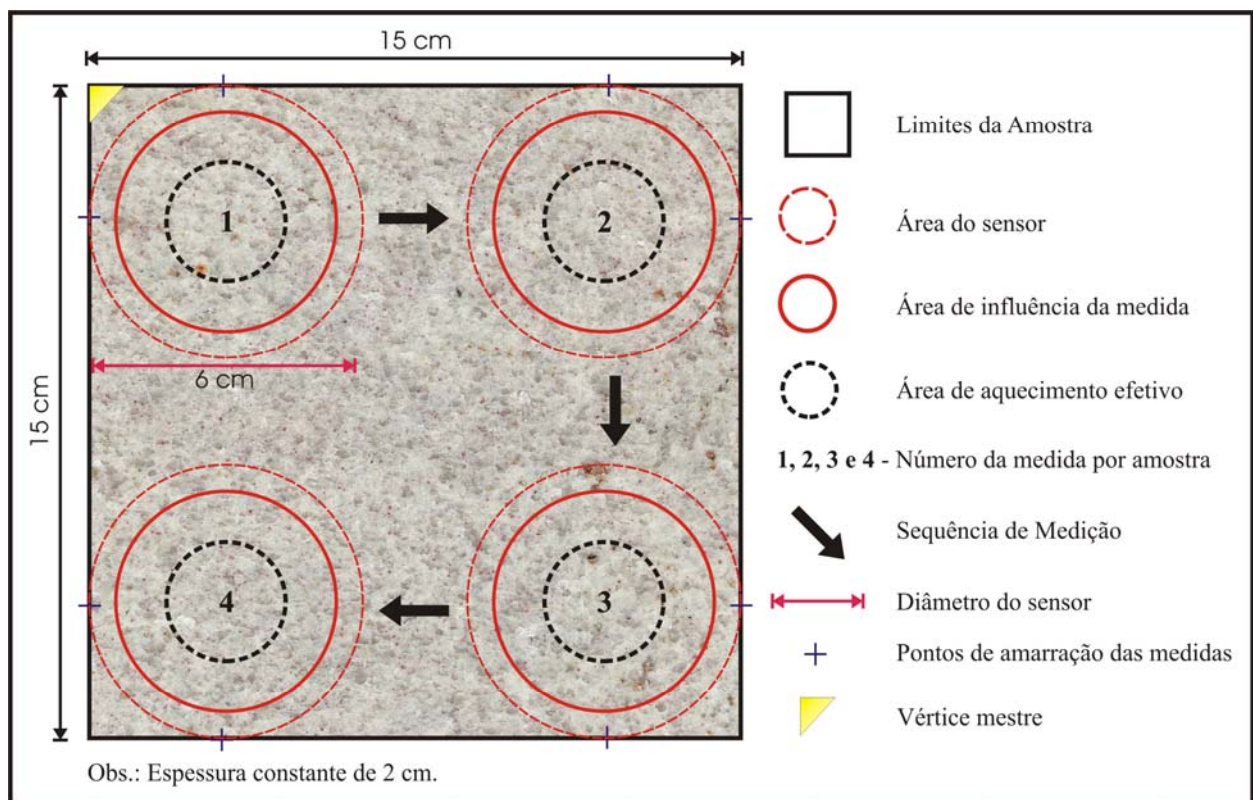


Figura 3.2 – Procedimento de aquisição dos dados de condutividade térmica realizado nas amostras deste trabalho.

Após a aquisição os dados foram arquivados e trabalhados em softwares tais como o Excel e Grapher. Estes programas permitiram a avaliação das variáveis estatísticas tais como, média, mediana, variância, desvio padrão, além de permitir a construção de gráficos onde foram correlacionados os resultados de mineralogia e condutividade térmica.

3.4 Procedimento da Análise Microscópica

Para realização desta análise foram confeccionadas pelo menos 2 seções delgadas por amostra. Com auxílio de um contador de pontos da marca SWIFT foram contados 1000 pontos por seção delgada, com o intuito de se quantificar a percentagem mineralógica e conseqüentemente tentar avaliar microscopicamente o efeito da mineralogia sobre a condutividade. Para a classificação e nomenclatura das rochas, foi utilizada a terminologia proposta pelo IUGS (Streckeisen, 1976). Foram identificadas e descritas as paragênese félsica e máfica primárias das rochas, bem como seus produtos de alteração. Definidas as percentagens a partir da contagem modal foram determinadas as mineralogias principais, secundárias e acessórias, definindo-se assim a influência de cada uma. Com o objetivo de verificação dos resultados realizou-se uma comparação com dados de diversos autores que trabalharam com os mesmos litotipos, incluindo dados

do CETEM, 2002 (Catálogo de Rochas Ornamentais do Brasil). Todos os resultados foram ainda comparados com os resultados das análises macroscópicas realizadas por este trabalho. Em todos os casos os resultados foram muito similares.

Por fim, foi feito um levantamento na literatura, de trabalhos que realizaram pesquisas relativas a geoquímica de granitóides, preferencialmente em rochas utilizadas com fins ornamentais, com o objetivo de se tentar comparar os parâmetros térmicos com os parâmetros químicos de tais rochas. Os dados de geoquímica passaram por uma triagem onde foram selecionados 29 litotipos, posteriormente foram realizadas medições em amostras similares desses mesmos granitos e gerados na etapa final, gráficos de correlação no software Excel entre a geoquímica (elementos maiores) e a condutividade térmica.

3.5 Procedimento de aquisição dos dados de densidade

Com o objetivo de correlacionar a condutividade térmica com a densidade foram realizados ensaios de densidade aparente com 16 amostras. A técnica baseia-se na determinação da massa específica, através do “*método da densidade aparente utilizando água e parafina*”.

Existem dois tipos de densidades: aparente e absoluta. Na aparente são considerados os interstícios vazios do material em estudo, enquanto que na absoluta é necessário se eliminar o volume desses espaços, que de outra forma alterariam os resultados, já que o volume é um dos fatores levados em consideração na determinação da densidade. Primeiramente se verificou a validade do mesmo utilizando para isto uma amostra de material com densidade conhecida ($\rho_{\text{parafina}} = 910 \text{ Kg/m}^3$) onde foi verificado que a densidade calculada pelo método foi o esperado. Em seguida foram preparadas 8 amostras por cada litotipo e posteriormente medidas suas massas. Cada amostra foi medida 2 duas vezes, totalizando assim 16 medidas por litotipo. Posteriormente as amostras foram cobertas com uma fina camada de parafina que serviu única e exclusivamente para impermeabilização das amostras, podendo assim ser imersa na água, sem haver absorção do líquido. Novamente foram medidas suas massas (16 medidas). O tempo de endurecimento da película de parafina é praticamente instantâneo. Impermeabilizando-os de forma a garantir que as amostras não irão absorver água durante o processo de determinação da densidade aparente figura, 3.3.

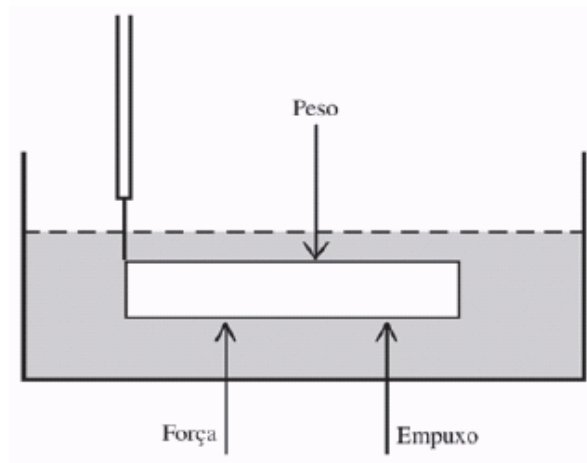


Figura 3.3 - Balanço de Forças na amostra.

$$P = E + F$$

$$P = \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{AP}} \cdot g + F$$

$$V_{\text{AP}} = \frac{P - F}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot g}$$

(2)

Neste novo método, o volume aparente da amostra engloba o volume da amostra e o volume da parafina isolante, então:

$$V_{\text{AP}} + V_{\text{Parafina}} = \frac{P - F}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot g}$$

$$V_{\text{AP}} = \frac{P - F}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot g} - V_{\text{Parafina}}$$

(3)

Sabendo que a densidade da parafina pode ser escrita como:

$$\rho_{\text{Parafina}} = \frac{m_{\text{Parafina}}}{V_{\text{Parafina}}}$$

A equação fica:

$$V_{\text{AP}} = \frac{P - F}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot g} - \frac{m_{\text{Parafina}}}{\rho_{\text{Parafina}}}$$

$$V_{\text{AP}} = \frac{M' \cdot g}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot g} - \frac{m_{\text{Parafina}}}{\rho_{\text{Parafina}}}$$

$$V_{\text{AP}} = \frac{M'}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} - \frac{m_{\text{Parafina}}}{\rho_{\text{Parafina}}}$$

(4)

Temos então que a densidade aparente pode ser expressa como:

$$\rho_{AP} = \frac{m}{V_{AP}}$$

Substituindo na Equação (4), obtém-se:

$$\rho_{AP} = \frac{m \cdot \rho_{H_2O} \cdot \rho_{Parafina}}{M' \cdot \rho_{Parafina} - m_{Parafina} \cdot \rho_{H_2O}} \quad (5)$$

A eq. 5 representa a densidade aparente da amostra, onde:

ρ_{AP} = Densidade Aparente da amostra (kg/m^3);

$\rho_{Parafina}$ = Densidade da parafina (g/cm^3);

ρ_{H_2O} = Densidade da água na temperatura do experimento (g/cm^3);

m = Massa do bloco (g);

$m_{Parafina}$ = Massa da parafina que impermeabilizou o suporte (g);

M' = Massa de água deslocada pela amostra (g).

Este procedimento de aquisição dos dados de densidade é amplamente realizado em materiais utilizados na construção civil, tais como, cimentos e concretos especiais e é amplamente aplicado pelo Laboratório de Energia Mecânica da UFRN em especial pela equipe do CT ENER G.

A figura 3.4 resume todo o procedimento metodológico desde a análise bibliográfica até a integração dos dados e conclusões, destacando cada etapa citada neste capítulo.

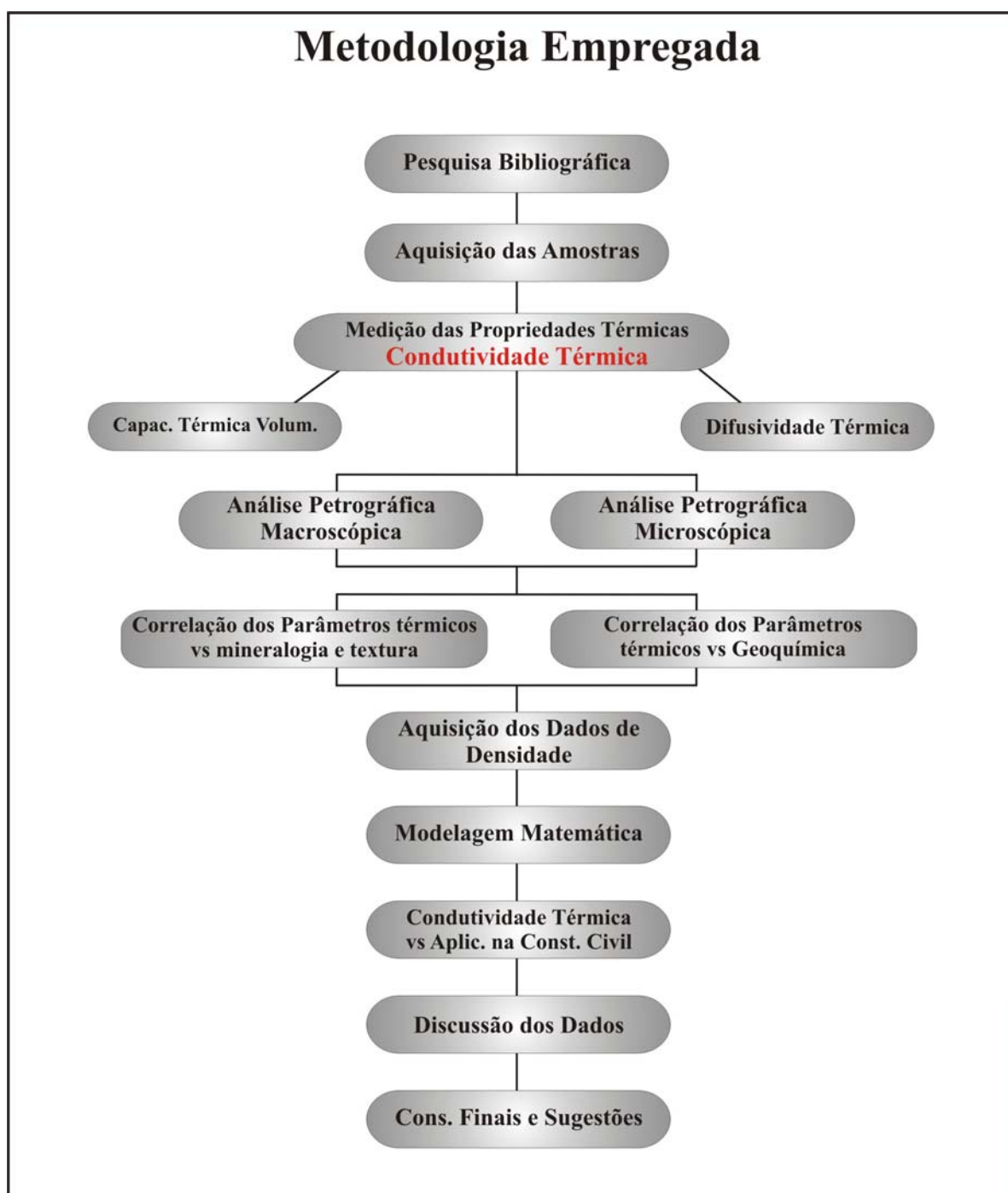


Figura 3.4 – Metodologia empregada neste trabalho.



Capítulo

4

*Avaliação Macro e Microscópica e Correlação
com a Condutividade Térmica*

CAPÍTULO 4 – AVALIAÇÃO MACRO E MICROSCÓPICA E RELAÇÃO COM A CONDUTIVIDADE TÉRMICA

4.1 Introdução

Para se entender o efeito e a relação da mineralogia com a condutividade térmica foram realizadas avaliações macro e microscópicas, para tanto, levou-se em consideração possíveis implicações, tais como, tamanho do grão, fissuramentos, mineralogia e alterações, etc. As discussões realizadas levaram em consideração aspectos didáticos, enfatizando sempre que possível, resultados pioneiros principalmente no que diz respeito a avaliações macroscópicas e suas relações com a condutividade térmica.

O conjunto avaliado constitui-se de 96 amostras sendo 55 correspondentes a rochas utilizadas como revestimento na construção civil, denominadas genericamente como “granitos ornamentais”. Este conjunto na verdade é constituído por sienogranitos, granodioritos, monzogranitos, gabros, sienitos, etc. O restante do conjunto, 41 litotipos, corresponde a diversos litotipos (sienitos, sienogranito, granodiorito, etc.) utilizados pelo projeto CRNOBORO (2005) e fornecidas a este trabalho, contudo não possuem aplicação como rocha ornamental. Estas amostras foram da mesma forma submetidas a ensaios de condutividade térmica com a mesma metodologia e objetivo deste trabalho. Neste último caso foi necessário a utilização de pasta térmica devido a irregularidade da superfície das amostras (superfície similar a encontrada na parte posterior das chapas de granitos ornamentais), não havendo portanto perda da qualidade dos resultados. A tabela 4.1 exibe os dados resumidos de mineralogia e condutividade térmica de todas as 96 amostras, hierarquizados do maior para o menor valor, seu respectivo nome científico (simplificado) seguido do seu nome comercial, quando houver.

Considerou-se para a avaliação macroscópica apenas aquelas amostras de “granitos ornamentais” (55 amostras), por possuírem superfícies adequadas para tal avaliação e por permitirem a realização de pelo menos 4 medidas por amostra. Inicialmente foram separados dois grupos principais baseados principalmente em sua granulometria e sua resposta a condutividade térmica. No primeiro grupo foram inseridas as rochas com textura grossa/porfiritica, no segundo grupo ficaram as de textura fina/média.

Do ponto de vista geológico-petrográfico, o termo “textura” trata-se de uma designação utilizada para caracterizar o arranjo existente entre os diferentes minerais

TABELA 4.1 - Dados mineralógicos e respectivos valores de condutividade térmica para as amostras estudadas.

Amostra	Q	K-F	PI	Felds Total	Total	Máficos	Q	K-F	PI	Σ	λ	Nome	Nome Comercial
A53	6,0	57,2	21,3	78,5	84,5	15,5	7,1	67,7	25,2	100,0	1,67	Quartzo sienito	Blue Pearl
LG-15C	15,5	6,3	42,2	48,5	64,0	36,0	24,2	9,8	65,9	100,0	1,79	Quartzo Diorito	
A02	7,5	36,1	26,0	62,1	69,6	30,5	10,8	51,9	37,3	100,0	1,87	Quartzo Monzonito	Ocre Itabira
I - 29	0,8	0,0	62	62,0	62,8	37,2	1,3	0,0	98,7	100,0	1,89	Gabro	
A23	0,0	0,3	49,0	49,3	49,3	50,7	0,0	0,6	99,4	100,0	1,93	Hornblenda Gabro	Preto Ónix
A46	3,0	50,0	26,4	76,4	79,4	20,6	3,8	63,0	33,2	100,0	2,00	Sienito	Branco Artico
I -08	1,2	0,6	54,4	55,0	56,2	43,8	2,1	1,1	96,8	100,0	2,01	Gabro	
LG-206	3,2	0,0	19,7	19,7	22,9	77,1	14,0	0,0	86,0	100,0	2,03	Norito	
A11	0,0	0,6	58,0	58,6	58,6	41,4	0,0	1,0	99,0	100,0	2,08	Gabro	Preto Absoluto
A19	13,1	6,0	77,2	83,2	96,3	3,7	13,6	6,2	80,2	100,0	2,08	Quartzo diorito	Ás de Paus
A15	6,5	62,9	4,7	67,6	74,1	25,9	8,8	84,9	6,3	100,0	2,14	Qz-alkali feldspato sienito	Morrom Brunet
A45	1,4	79,7	0,0	79,7	81,1	18,9	1,7	98,3	0,0	100,0	2,15	Alkali feldspato Sienito	Verde Navona
CR-108	18,2	9,1	46,3	55,4	73,6	26,4	24,7	12,4	62,9	100,0	2,18	Granodiorito	
A54	10,0	7,2	40,0	47,2	57,2	42,8	17,5	12,6	69,9	100,0	2,24	Quartzo Monzogabro	Preto São Marcos
A52	6,5	43,6	12,2	55,8	62,3	37,7	10,4	70,0	19,6	100,0	2,24	Quartzo Sienito	Azul Bahia
A26	10,8	59,1	8,0	67,1	77,9	22,1	13,9	75,9	10,3	100,0	2,29	Quartzo Sienito	Lilás Imperial
CR-105	19,2	19,2	33,9	53,1	72,3	27,7	26,6	26,6	46,9	100,0	2,29	Monzogranito	
118	15,6	59,4	19,5	78,9	94,5	5,5	16,5	62,9	20,6	100,0	2,35	Quartzo sienito	
CR-02	0	55	5,2	60,2	60,2	35,9	0,0	91,4	8,6	100,0	2,42	Alkali Feldspato Sienito	
A50	4,8	58	3,8	61,8	66,6	33,4	7,2	87,1	5,7	100,0	2,43	Qz Alkali Feldspato Sienito	Café Bahia
P-06	1,3	0,0	56,7	56,7	58,0	42,0	2,2	0,0	97,8	100,0	2,43	Gabro	
A05	7,7	28,7	33,6	62,3	70,0	30,0	11,0	41,0	48,0	100,0	2,44	Quartzo monzonito	Verde Ubatuba
CR-03	0	50,3	11,3	61,6	61,6	34	0,0	81,7	18,3	100,0	2,48	Sienito	
CR-104	22,7	22,7	21,7	44,4	67,1	32,9	33,8	33,8	32,3	100,0	2,52	Monzogranito	
CR-38	19,3	21,6	32,4	54,0	73,3	26,7	26,3	29,5	44,2	100,0	2,55	Monzogranito	

Tabela 4.1: continuação

Amostra	Q	K-F	Pl	Felds Total	Total	Máficos	Q	K-F	Pl	Σ	λ	Nome	Nome Comercial
LG 15a	15,0	25,9	47,2	73,1	88,1	11,9	17,0	28,4	54,6	100,0	2,56	Qz Monzodiorito	
CR-08	28,8	31,5	20,7	52,2	81,0	19,0	35,6	38,9	25,6	100,0	2,57	Monzogranito	
CR-73	21,8	26,4	34,3	60,7	82,5	17,5	26,4	32,0	41,6	100,0	2,57	Monzogranito	
A47	19,9	40,3	25,4	65,7	85,6	14,4	23,2	47,1	29,7	100,0	2,58	Monzogranito	Azul Patara
A09	16,6	47,8	25,4	73,2	89,8	10,2	18,5	53,2	28,3	100,0	2,59	Quartzo Sienito	Cinza Real
MA-112	26,5	43,8	25,4	69,2	95,7	4,3	27,7	45,8	26,5	100,0	2,59	Monzogranito	
A01	32,7	5,8	48,0	53,8	86,5	13,5	37,8	6,7	55,5	100,0	2,61	Tonalito	Cinza Elite
CR-09b	35,8	33,4	27,0	60,4	96,2	3,8	37,2	34,7	28,1	100,0	2,61	Monzogranito	
CR-17	29,1	12,0	37,2	49,2	78,3	21,7	37,2	15,3	47,5	100,0	2,66	Granodiorito	
MA-21	26,4	34,7	30,5	65,2	91,6	8,4	28,8	37,9	33,3	100,0	2,67	Monzogranito	
A27	27,7	38,4	23,3	61,7	89,4	10,6	31,0	43,0	26,1	100,0	2,68	Gn.Monzogranito	Cinza Wave
A38	22,3	21,6	33,1	54,7	77,0	23,0	29,0	28,1	43,0	100,0	2,68	Monzogranito	Cinza Corumbazinho
A35	28,9	20,2	45,3	65,5	94,4	5,6	30,6	21,4	48,0	100,0	2,69	Granodiorito	Branco Jabre
CR-56	35,0	22,6	18,3	40,9	75,9	24,1	46,1	29,8	24,1	100,0	2,72	Monzogranito	
A21	21,8	40,5	25,1	65,6	87,4	12,6	24,9	46,3	28,7	100,0	2,75	Monzogranito	Cinza Andorinha
A12	22,9	47,6	25,4	73,0	95,9	4,1	23,9	49,6	26,5	100,0	2,76	Sienogranito	Branco Pérola
CR-67	24,6	36,0	16,0	52,0	76,6	23,4	32,1	47,0	20,9	100,0	2,77	Sienogranito	
CR-23	24,0	37,4	24,6	62,0	86,0	14,0	27,9	43,5	28,6	100,0	2,79	Monzogranito	
CR-37	32,0	13,9	28,7	42,6	74,6	25,4	42,9	18,6	38,5	100,0	2,80	Granodiorito	
CR-18	28,6	33,4	28,5	61,9	90,5	9,5	31,6	36,9	31,5	100,0	2,80	Monzogranito	
CR-102	21,5	28,4	37,3	65,7	87,2	12,8	24,7	32,6	42,8	100,0	2,86	Monzogranito	
CR-100	37,0	20,1	31,9	52,0	89,0	11,0	41,6	22,6	35,8	100,0	2,86	Monzogranito	
CABO	26,2	49	21	70,0	96,2	3,8	27,2	50,9	21,8	100,0	2,87	Sienogranito	
A42	28,3	34,2	31,7	65,9	94,2	5,8	30,0	36,3	33,7	100,0	2,87	Monzogranito	Verde Top
A33	32,2	29,6	25,7	55,3	87,5	12,5	36,8	33,8	29,4	100,0	2,90	Monzogranito	Amarelo Minas

Tabela 4.1: continuação

Amostra	Q	K-F	PI	Felds Total	Total	Máficos	Q	K-F	PI	Σ	λ	Nome	Nome Comercial
A20	33,1	54,1	8,9	63,0	96,1	3,9	34,4	56,3	9,3	100,0	2,92	Sienogranito	Meruoça Clássico
CR-54A	34,1	13,2	27,7	40,9	75,0	25,0	45,5	17,6	36,9	100,0	2,96	Granodiorito	
A06	26,1	3,4	52,7	56,1	82,2	17,8	31,8	4,1	64,1	100,0	2,96	Tonalito	Cinza Brunet
A24	30,2	29,9	32,9	62,8	93,0	7,0	32,5	32,2	35,4	100,0	2,96	Monzogranito	Verde Caravelas
A08	28,9	54,7	11,6	66,3	95,2	4,8	30,4	57,5	12,2	100,0	2,98	Sienogranito	Juparaná Gold
CR-41	19,6	35,3	22,8	58,1	77,7	22,3	25,2	45,4	29,3	100,0	2,99	Monzogranito	
CR-106	35,9	15,7	28,8	44,5	80,4	19,6	44,7	19,5	35,8	100,0	3,04	Monzogranito	
CR-98	40,7	22,2	23,2	45,4	86,1	13,9	47,3	25,8	26,9	100,0	3,05	Monzogranito	
CR-25	28,5	10,1	37,6	47,7	76,2	23,8	37,4	13,3	49,3	100,0	3,07	Granodiorito	
A07	22,8	38,2	24,4	62,6	85,4	14,6	26,7	44,7	28,6	100,0	3,08	Monzogranito	Dourado Carioca
A49	29,0	43,9	22,1	66,0	95,0	5,0	30,5	46,2	23,3	100,0	3,09	Sienogranito	Amarelo Maracujá
A03	22,3	35,7	18,3	54,0	76,3	23,7	29,2	46,8	24,0	100,0	3,09	Sienogranito	Amarelo Laranjeira
A34	26,1	34,2	25,4	59,6	85,7	14,3	30,5	39,9	29,6	100,0	3,09	Monzogranito	Rosa Capri
CR-27A	20,9	28,7	32,4	61,1	82,0	18,0	25,5	35,0	39,5	100,0	3,10	Monzogranito	
CR-79	25,1	39,8	16,9	56,7	81,8	18,2	30,7	48,7	20,7	100,0	3,10	Sienogranito	
A37	24,2	39,2	33,0	72,2	96,4	3,6	25,1	40,7	34,2	100,0	3,11	Monzogranito	Amarelo Capri
CR-87	37,0	24,1	23,8	47,9	84,9	15,1	43,6	28,4	28,0	100,0	3,12	Monzogranito	
CR-19	35,8	10,6	37,9	48,5	84,3	15,7	42,5	12,6	45,0	100,0	3,12	Granodiorito	
A40	17,4	28,0	38,0	66,0	83,4	16,6	20,9	33,6	45,6	100,0	3,12	Gn. Monzogranito	Casablanca
CR-81	33,8	21,3	25,9	47,2	81,0	19,0	41,7	26,3	32,0	100,0	3,12	Monzogranito	
A04	32,1	42,3	14,8	57,1	89,2	10,8	35,9	47,4	16,6	100,0	3,12	Sienogranito	Branco Dallas
CR-63	35,4	24,0	29,9	53,9	89,3	10,7	39,6	26,9	33,5	100,0	3,14	Monzogranito	
A17	32,6	22,7	34,4	57,1	89,7	10,3	36,3	25,3	38,4	100,0	3,14	Monzogranito	Vermelho Imperial
A36	33,2	32,7	29,2	61,9	95,1	4,9	34,9	34,4	30,7	100,0	3,15	Monzogranito	Juparaíba

Tabela 4.1: Final

Amostra	Q	K-F	Pl	Felds Total	Total	Máficos	Q	K-F	Pl	Σ	λ	Nome	Nome Comercial
CR-107	33,3	22,5	26,3	48,8	82,1	17,9	40,6	27,4	32,0	100,0	3,16	Monzogranito	
A43	18,0	55,0	12,0	67,0	85,0	15,0	21,2	64,7	14,1	100,0	3,17	Sienogranito	Red Dragon
A28	27,5	56,1	8,3	64,4	91,9	8,1	29,9	61,0	9,0	100,0	3,18	Sienogranito	Amarelo Icarai
A41	27,3	33,0	24,1	57,1	84,4	15,6	32,3	39,1	28,6	100,0	3,20	Monzogranito	Caramelo Bahia
A10	32,1	36,7	24,7	61,4	93,5	6,5	34,3	39,3	26,4	100,0	3,23	Monzogranito	Rosa Iracema
A32	24,6	56,6	16,6	73,2	97,8	2,2	25,2	57,9	17,0	100,0	3,26	Sienogranito	Branco Aqualux
A48	34,3	44,1	17,2	61,3	95,6	4,4	35,9	46,1	18,0	100,0	3,29	Monzogranito	Juparaná Montiel
A13	27,6	15,1	47,5	62,6	90,2	9,8	30,6	16,7	52,7	100,0	3,32	Sienogranito	Branco Cristal
CR-301	35,2	35,8	26,4	62,2	97,4	2,6	36,1	36,8	27,1	100,0	3,32	Monzogranito	
A18	26,9	39,5	31,4	70,9	97,8	2,2	27,5	40,4	32,1	100,0	3,33	Monzogranito	Branco Savana
A31	37,8	48,4	5,4	53,8	91,6	8,4	41,3	52,8	5,9	100,0	3,33	Sienogranito	Verde Ceará
A44	29,1	33,1	29,0	62,1	91,2	8,8	31,9	36,3	31,8	100,0	3,38	Monzogranito	Verde Oceano
CR-300a	26,9	24,0	43,0	67,0	93,9	6,1	28,6	25,6	45,8	100,0	3,43	Monzogranito	
A22	34,2	50,1	6,5	56,6	90,8	9,2	37,7	55,2	7,2	100,0	3,50	Al. Felds. Gran	Amarelo St. Cecília
A16	24,8	27,0	37,7	64,7	89,5	10,5	27,7	30,2	42,1	100,0	3,52	Monzogranito	Vermelho Flores
A51	28,0	37,0	28,0	65,0	93,0	7,0	30,1	39,8	30,1	100,0	3,58	Monzogranito	Vino Bahia
A29	32,7	46,2	16,7	62,9	95,6	4,4	34,2	48,3	17,5	100,0	3,61	Sienogranito	Vermelho Brasília
A30	31,1	45,6	16,7	62,3	93,4	6,6	33,3	48,8	17,9	100,0	3,72	Sienogranito	Verde Meruoca
A14	33,3	39,1	16,5	55,6	88,9	11,1	37,5	44,0	18,6	100,0	3,72	Sienogranito	Capão Bonito
A25	23,1	33,5	0,4	33,9	57,0	43,0	40,5	58,8	0,7	100,0	3,79	Riolito	Sucuru
A55	29,8	41,9	23,4	65,3	95,1	4,9	31,3	44,1	24,6	100,0	3,88	Sienogranito	Chocolate Brasil
A39	33,3	2,2	14,4	16,6	49,9	50,1	66,7	4,4	28,9	100,0	3,93	Biotita Gnaisse	Preto Indiano

constituintes de uma rocha e que confere uma determinada aparência à esta. A textura grossa caracteriza-se por constituintes minerais com dimensões superiores a 5mm. A textura porfiritica é caracterizada pela presença de grandes cristais (pórfiros) dispersos em uma matriz de granulação mais fina (A02, A04, etc.). Já a textura fina/média os constituintes tem menos de 5 mm. (A01, A27, etc.).

As abordagens envolveram aspectos qualitativos e quantitativos observando parâmetros como tamanho do grão, textura, mineralogia, etc. e sua relação com a condutividade térmica, esta avaliação mostrou-se bastante satisfatória e em alguns casos complexa.

As interpretações levaram em consideração o erro máximo do equipamento (10%). O estudo realizado aqui trata dos aspectos da superfície, mas não negligencia o parâmetro tridimensional envolvido, levando em consideração os limites determinados pelo fabricante (capítulo 3).

4.2 Aspectos Macroscópicos

Para a discussão petrográfica foram selecionadas 7 amostras dentro do conjunto das 55. Os aspectos considerados aqui foram a homogeneidade/heterogeneidade, representatividade e ainda os aspectos didáticos que poderão contribuir com trabalhos futuros. As amostras selecionadas encontram-se na tabela 4.2. e estão hierarquizadas por número da amostra.

Amostras	λ	Nomenclatura	Nome Comercial
A01	2,61	Tonalito	Cinza Elite
A02	1,87	Quartzo monzonito	Ocre Itabira
A04	3,12	Granada Gnaisse	Branco Dallas
A07	3,08	Monzogranito	Dourado Carioca
A08	2,98	Sienogranito	Juparaná Gold
A27	2,68	Ganisse monzogranítico	Cinza Wave
A36	3,15	Ganisse monzogranítico	Juparaíba

Tabela 4.2 Relação das amostras selecionadas para discussão dos parâmetros macroscópicos.

4.2.1 Cinza Elite (A01)

É uma rocha, fanerítica, leucocrática, que apresenta cristais equigranulares finos a médios. Mineralogicamente é constituída por plagioclásio (48%), quartzo (32,7%), K-feldspato (5,8%), biotita (8,8%), opacos (1,9%), hornblenda (0,7%), titanita (0,6%) e outros (1,5%). Sua tonalidade predominante é cinza claro. Trata-se portanto, de um

tonalito de textura fina/média com condutividade térmica média de 2,61 W/mK. Os valores obtidos foram de 2,54, 2,61, 2,63 e 2,65 W/mK. Nota-se que a variação dos resultados é pequena refletindo a homogeneidade da amostra. A medida de condutividade térmica é considerada média o que foi creditado a presença marcante de plagioclásio e ainda por sua textura com tendência mais fina, figura 4.1. Em todos os outros casos onde há homogeneidade granulométrica e mineralógica, há em sua grande maioria um comportamento bastante homogêneo da condutividade térmica, não raro com variações menores que 5% entre as medidas.

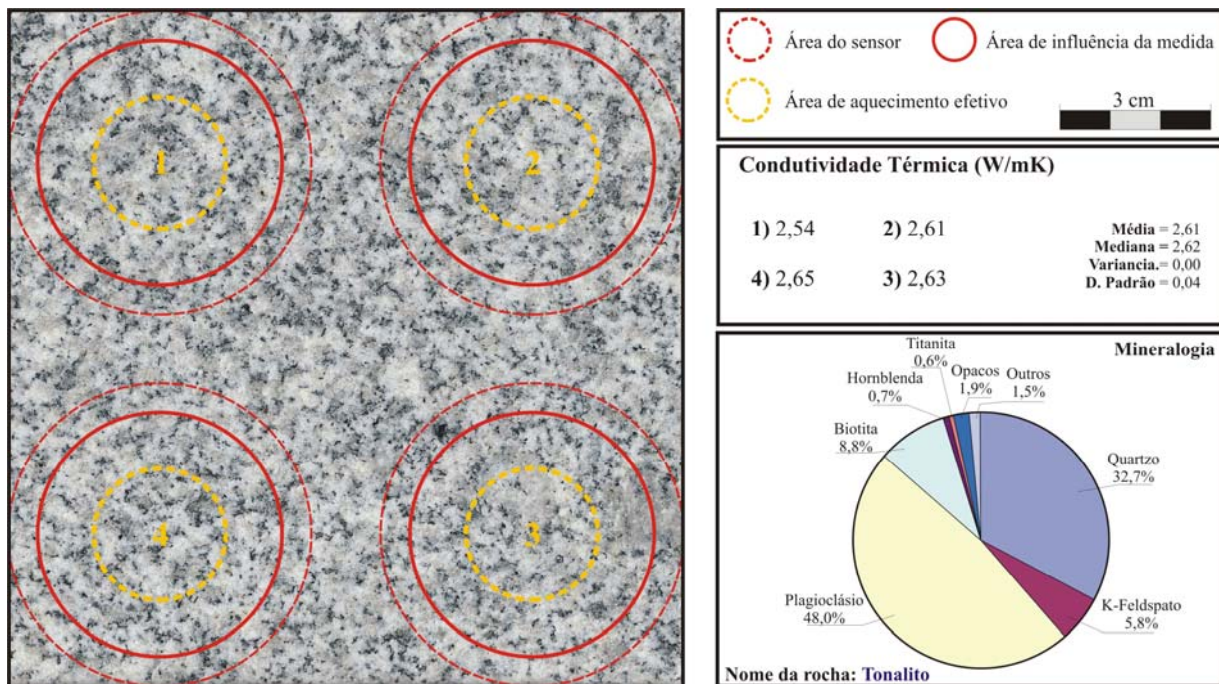


Figura 4.1 - Granito Cinza Elite e respectivas regiões de medida.

4.2.2 Ocre Itabira (A02)

Constitui-se numa rocha mesocrática, porfírica com matriz de textura fina/média, apresentando cor marrom predominante. A assembléia mineral principal é constituída por K-feldspato (36,1%), plagioclásio, (26%), hornblenda (15,1%), biotita (8,2%), quartzo (7,5%) e opacos (4,2%), titanita (2,1%) e outros (0,8%). Trata-se, portanto, de um quartzo monzonito.

A condutividade térmica mostrou uma pequena variação correspondendo a 0,05 W/mK, estando dentro da faixa de erro do equipamento ($\ll 10\%$). Os valores observados foram de 1,85, 1,85, 1,87 e 1,90 W/mK, nas regiões 1, 2, 3 e 4 respectivamente. Esta pequena variação também reflete o grau de homogeneidade da rocha e o baixo valor observado, em média 1,87 W/mK, pode ser justificado pela pequena percentagem de quartzo (não observado macroscopicamente) e presença importante de pórfiros de K-

feldspato, figura 4.2. Quando há ausência ou mesmo pequenas percentagens de quartzo (<10%) a fase mineral predominante, neste caso o K-feldspato, determinará como ocorrerá a condução do calor, o que justifica os baixos valores de condutividade térmica encontrados. Normalmente quando ocorre a predominância de K-feldspatos, plagioclásios e/ou máficos, os valores de condutividade raramente superam 2,5 W/mK, como observado em diversas rochas sieníticas e monzoníticas deste trabalho. O estudo em seção delgada mostrou se tratar de uma rocha muito pouco alterada com raros cristais de plagioclásio saussuritizados.

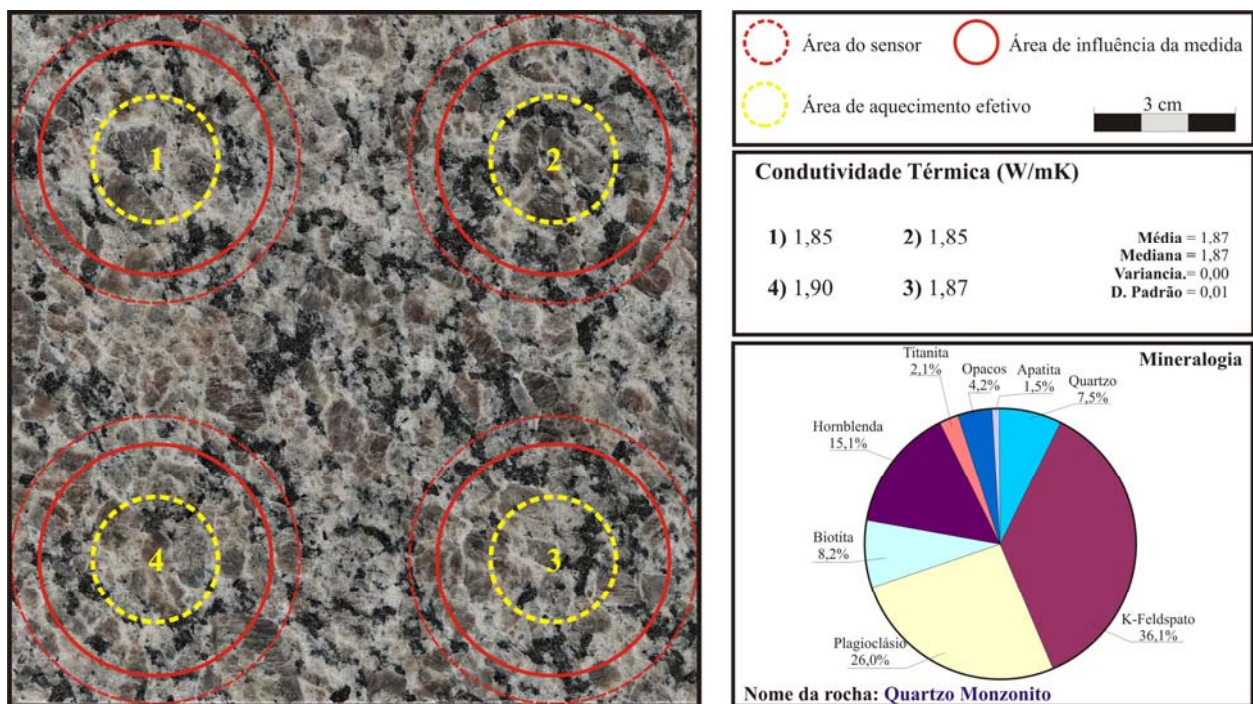


Figura 4.2 - Granito Ocre Itabira e respectivas regiões de medida.

4.2.3 Branco Dallas (A04)

Rocha gnáissica leucocrática, holocristalina, inequigranular apresentando porfiroblastos de granada dispersos que chegam a atingir 1cm segundo eixo maior. A textura da matriz mostra-se fina a média, com algumas regiões apresentando maiores concentrações de quartzo. Sua assembléia mineral é constituída por K-feldspato (42,3%), quartzo (32,1%), plagioclásio (14,8%), granada (5,7%), biotita, (3,9%) e sillimanita (1,2%).

Este granada gnaiss porfirítico de composição sienogranítica mostrou alta condutividade, em torno de 3,12 W/mK. Os valores medidos de condutividade térmica foram de 3,02, 3,34, 3,03 e 3,08 W/mK, nas regiões 1, 2, 3 e 4 respectivamente, figura 4.3. Especialmente na medida “2” onde ocorre um cristal de granada, nota-se um

aumento da condutividade para 3,34 W/mK, aumento relativo de 10%, figura 4.4. Apesar de ser observada ainda na região “1” uma granada anédrica, na região “2” a granada mostra-se mais bem formada e ocupando uma considerável área do sensor o que explicaria um relativo aumento da condutividade térmica nesta região. Em todos os casos onde foram observadas ocorrências de granada foram constatados também aumento da condutividade térmica, mostrando a importância do controle desse mineral. A seção delgada mostrou ainda que os processos de alteração são raros e pouco importantes e que ocorrem ainda granadas com 2,9 mm segundo eixo maior, em grande parte da matriz.

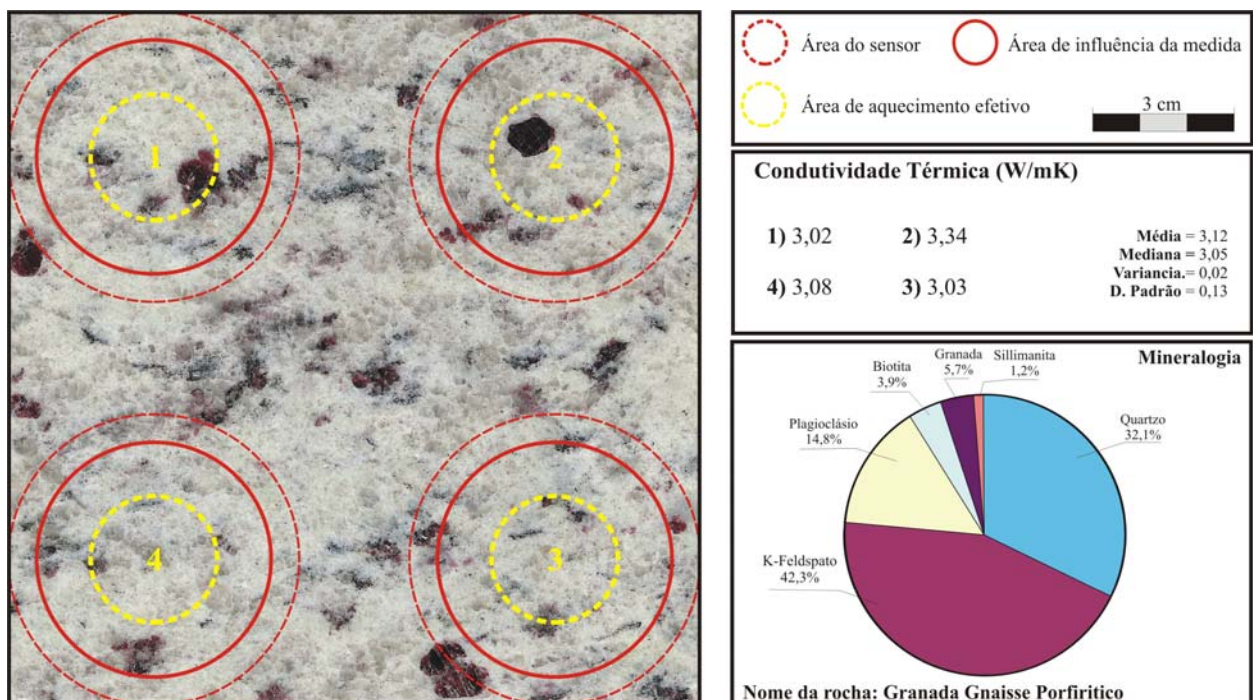


Figura 4.3 - Granito Branco Dallas e respectivas regiões de medida.

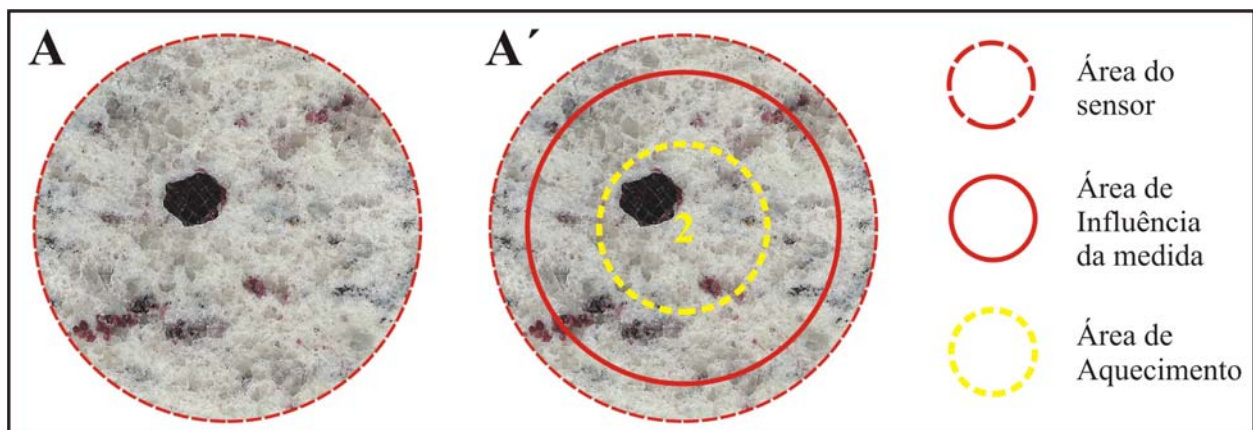


Figura 4.4 - A) Detalhe da região de medição A') Região de influencia da medida e de aquecimento efetivo

4.2.4 Dourado Carioca (A07)

Constitui-se numa rocha leucocrática, holocristalina, inequigranular apresentando pórfiros de K-feldspatos dispersos numa matriz de textura média. Os pórfiros chegam a atingir 4 cm segundo eixo maior. Sua mineralogia principal é constituída por, K-feldspato (38,2%), plagioclásio (24,4%) quartzo (22,8%), biotita, (10,9%), e outros (3,7%). Este monzogranito porfirítico possui como tonalidade predominante o amarelo.

A condutividade térmica média deste monzogranito porfirítico é de 3,08 W/mK, e as regiões 1, 2, 3 e 4 mostram condutividades de 3,33, 3,21, 2,65 e 3,12 W/mK respectivamente. Uma variação negativa importante foi constatada na medida “3”, correspondendo a 2,65 W/mK, figura 4.5. É neste setor que ocorre um aglomerado de cristais de K-feldspato circundando uma região central rica em cristais de quartzo, feldspato e mica (matriz). O que justificaria a variação negativa seria exatamente a disposição dos cristais de feldspato, circundando a matriz na parte central funcionando assim como barreiras dificultando a condução do calor, figura 4.6. A avaliação microscópica mostrou ainda que a região da matriz constitui importantes porções de alteração com a ênfase a saussuritização e muscovitização de plagioclásios.

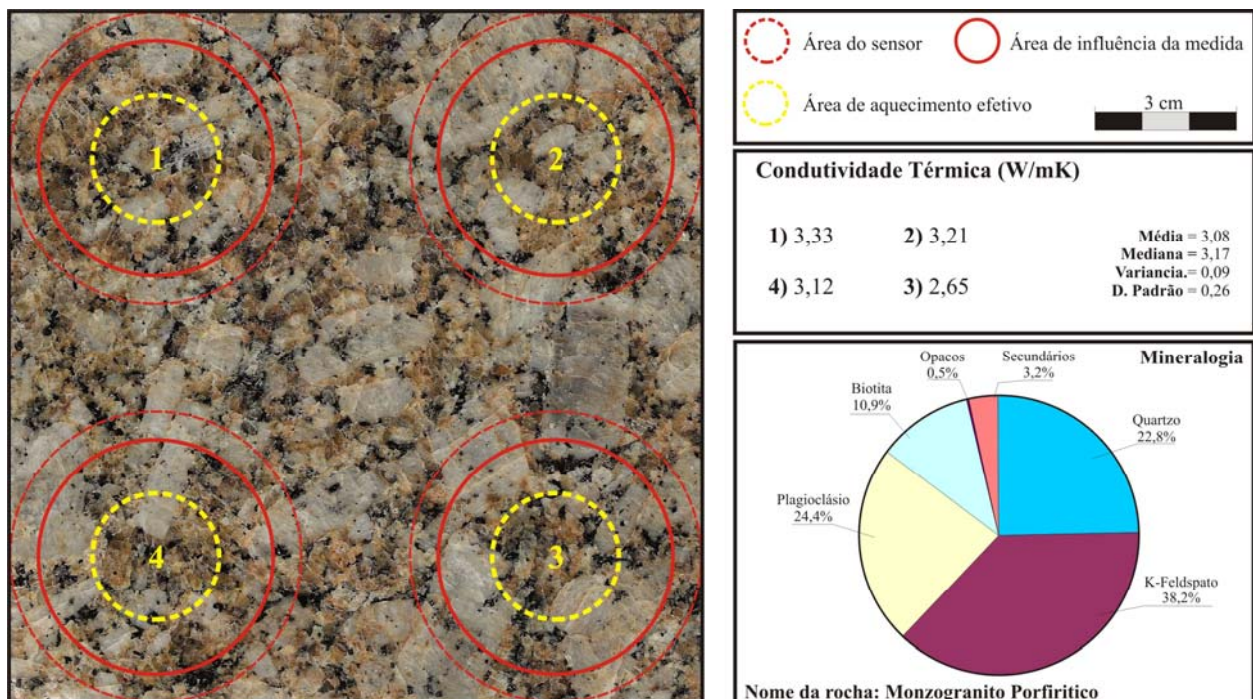


Figura 4.5 - Granito Dourado Carioca e respectivas regiões de medida.

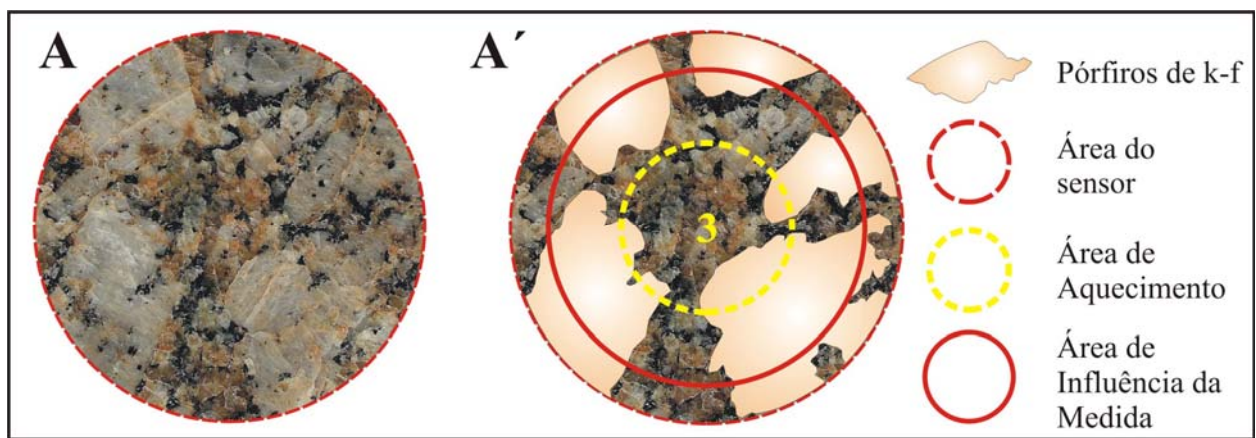


Figura 4.6 - A) Detalhe da região de medição A') Região de influencia da medida e de aquecimento efetivo circundada por pórfiros de K-feldspato.

4.2.5 Juparaná Gold (A08)

Constitui-se numa rocha leucocrática, holocristalina, equigranular com textura média/grossa. A assembléia mineral é constituída basicamente por K-feldspato (54,7), quartzo (28,9%), plagioclásio (11,6%) e biotita (4,8%). Este sienogranito mostra ainda porções bastante comuns com minerais opacos milimétricos com bordas de oxidação milimétricas a centimétricas. As regiões 1, 2, 3, e 4 mostraram condutividades de 3,06, 3,01, 2,69 e 3,17 W/mK, respectivamente. A condutividade térmica média é de 2,98 W/mK, entretanto a medida “3” mostrou uma baixa condutividade em torno de 2,69 W/mK, figura 4.7. No detalhe percebe-se que nesta região ocorre um mineral opaco oxidado atingindo uma considerável área do sensor, sendo creditado a este o motivo da queda da condutividade térmica, figura 4.8. Nas demais medidas ocorrem também níveis de oxidação, mas não tão expressivos. Em seção delgada observaram-se zonas com importantes concentrações de biotita, estas quase sempre associadas a óxido de ferro e a opacos possivelmente formados a partir desta última.

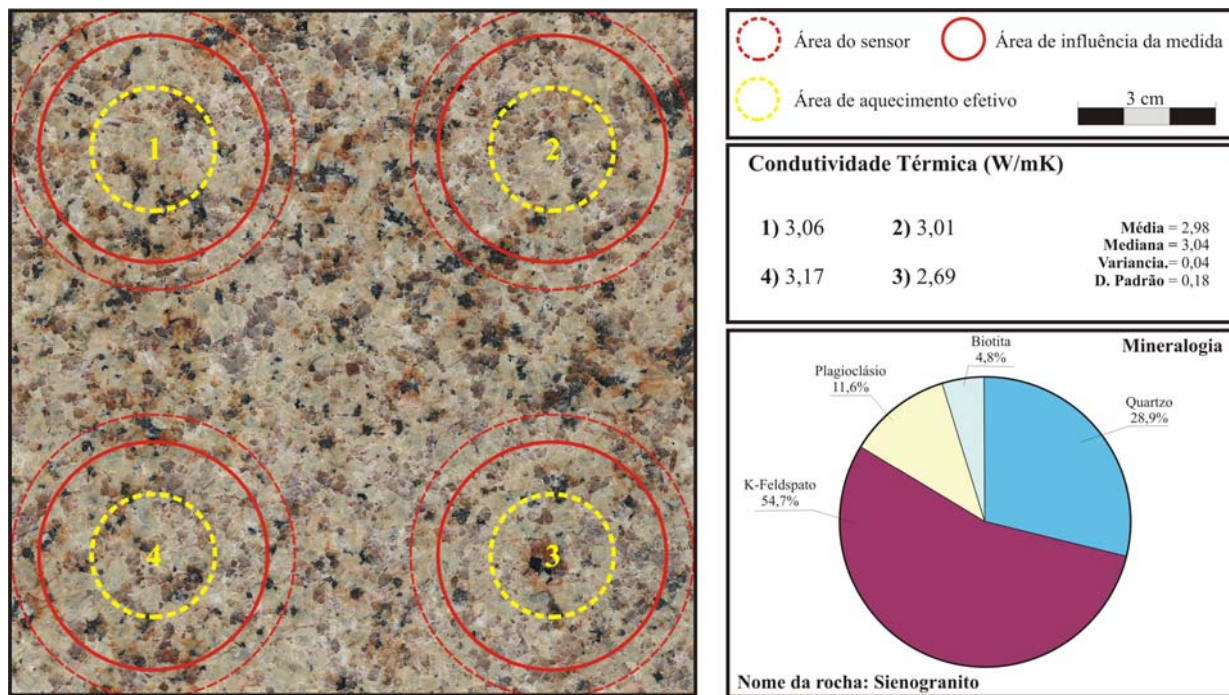


Figura 4.7 - Granito Juparaná Gold e respectivas regiões de medida.

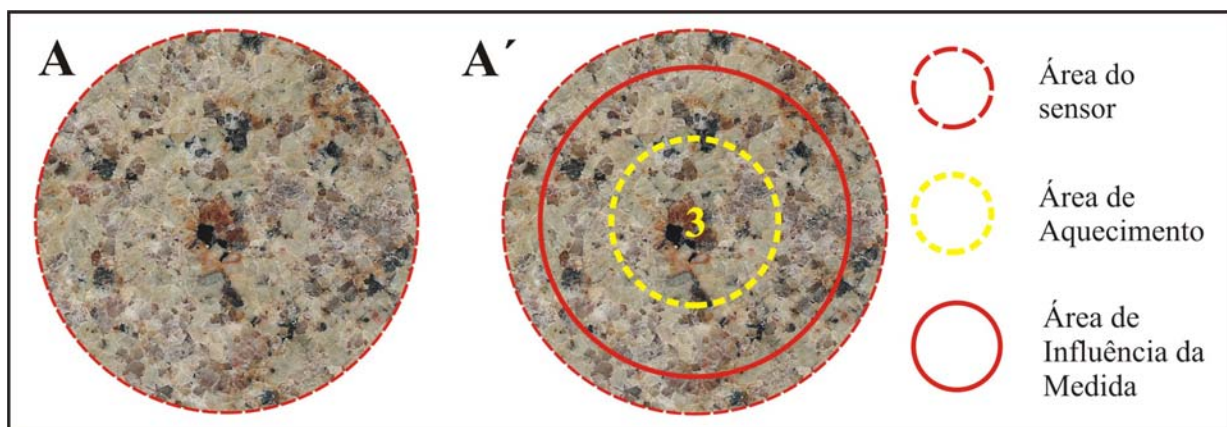


Figura 4.8 - A) Detalhe da região de medição A') Região de influencia da medida e de aquecimento efetivo.

4.2.6 Cinza Wave (A 27)

Trata-se de uma rocha gnaissica leucocrática, holocristalina, equigranular. Sua mineralogia é constituída por quartzo (27,7%), K-feldspato (38,4%), plagioclásio (23,3%), biotita (9,5%) e outros (1,1%). Este gnaiss de composição monzogranítica tem cor predominante cinza claro, entretanto apresentando porções bem distintas ricas em minerais máficos (biotita) e félsicos (quartzo e feldspatos).

As regiões 1, 2, 3, e 4 apresentaram condutividades térmicas de 2,71, 2,70, 2,56 e 2,75 W/mK, possuindo média de 2,68 W/mK, figura 4.9. A medida de número “3” mostra uma queda da condutividade térmica que foi creditada a um nível de máficos (biotita) que corta transversalmente toda a região de medida figura 4.10. Em todos os

casos onde foram observados aumentos em máficos, em especial filossilicatos (biotita, muscovita, etc.) verificou-se também uma queda da condutividade térmica.

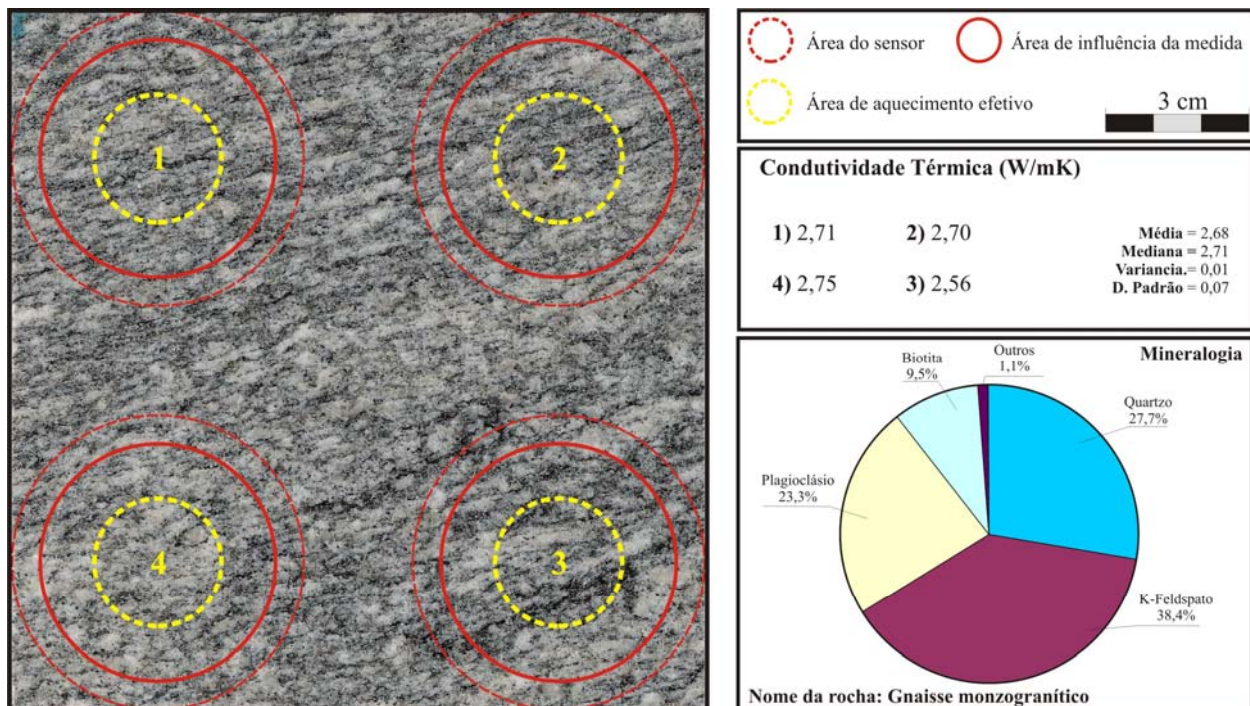


Figura 4.9 - Granito Cinza Wave e respectivas regiões de medida.

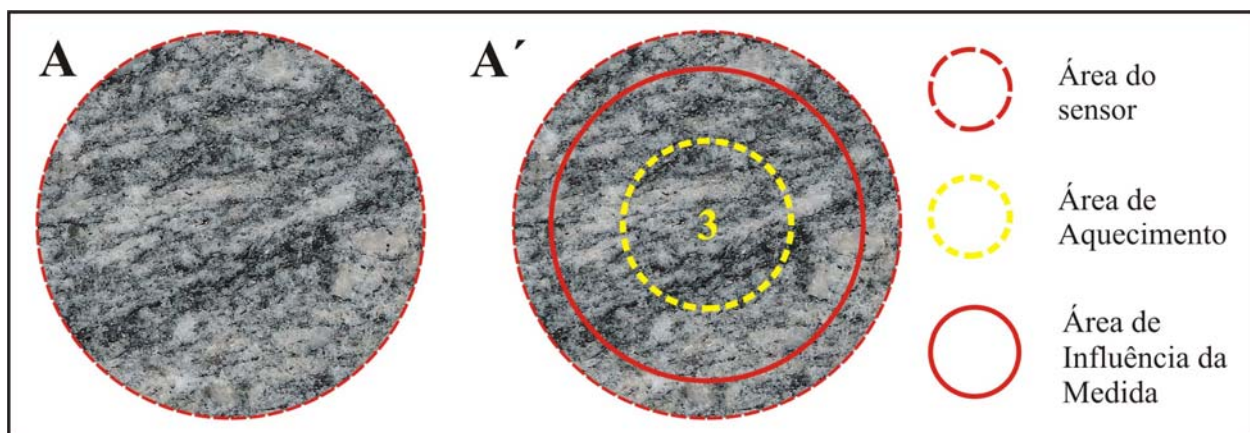


Figura 4.10 - A) Detalhe da região de medição A) Região de influencia da medida e de aquecimento efetivo.

4.2.7 Juparaíba (A 36)

Trata-se de uma rocha holocristalina, equigranular, composta por quartzo (33,2%) K-feldspato (32,7%), plagioclásio (29,2%), biotita (4%) e titanita (0,8%). Já para porção mais máfica a mineralogia é constituída por quartzo (28,1%), K-feldspato (29,8%), plagioclásio (27,7%), biotita (11,9%) e titanita (2,5%). Trata-se portanto de um gnaiss de composição monzogranítica.

As quatro regiões de medida mostram valores de 3,47, 3,40, 2,99 e 2,73 W/mK, respectivamente, com média de 3,15 W/mK. As duas primeiras medidas de

condutividade térmica foram realizadas na porção superior da amostra onde a percentagem de máficos não ultrapassa 5%. Nestas duas regiões foram obtidos os dois maiores resultados de condutividade térmica da amostra, 3,47 e 3,40 W/mK. Já nas medidas “3” e “4” a percentagem de máficos chega a atingir 12% nota-se uma queda considerável da condutividade térmica para 2,99 e 2,73 W/mK respectivamente, deixando claro o comportamento dos máficos atuando de forma a prejudicar a condução do calor, figura 4.11. É preciso enfatizar que o aumento de máficos está associado a uma queda da percentagem de quartzo o que acentuaria ainda mais a diminuição, em especial na medida de número “4”, onde ocorre um nível de máficos mais expressivo, cortando transversalmente a região de medida, resultando num valor mais baixo em torno de 2,73 W/mK.

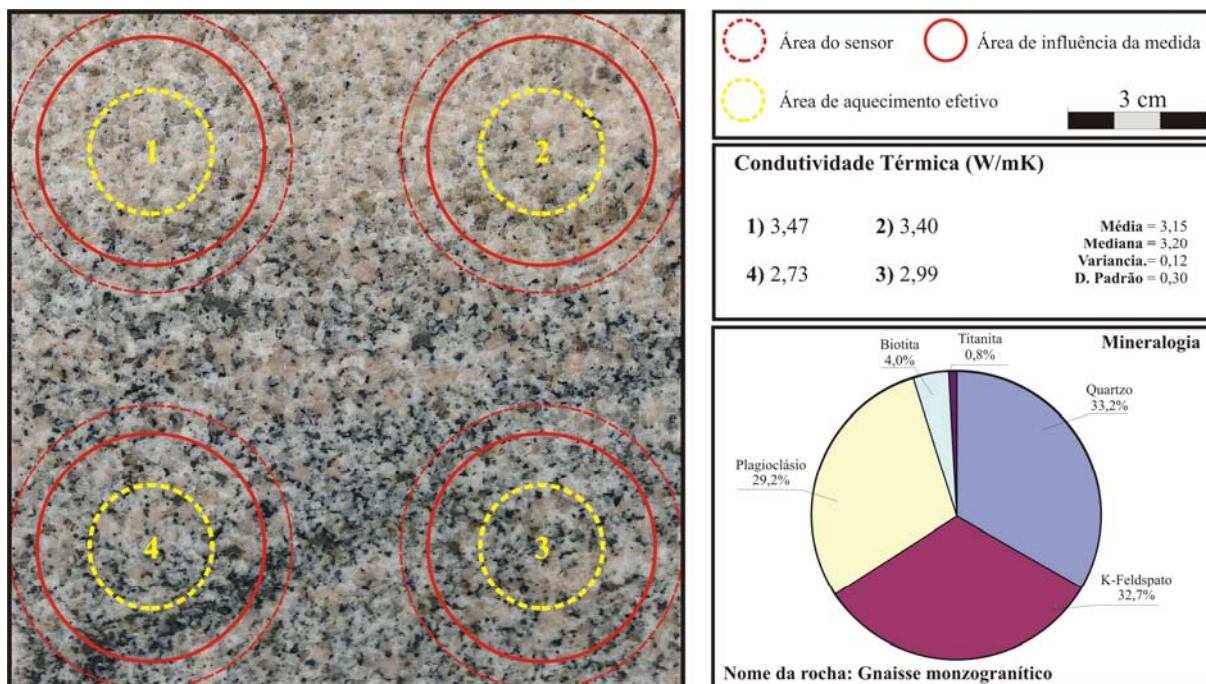


Figura 4.11 - Granito Jupaíba e respectivas regiões de medida.

4.3 Aspectos Microscópicos

Composicionalmente, as rochas apresentam-se em sua maioria como monzogranitos, sienogranitos e granodioritos. Foram ainda avaliadas amostras de outros litotipos como: quartzo-monzonito, gabro, diorito, quartzo-sienitos, sienitos, etc.

Moore & Twiss (1995) propõem um intervalo médio de condutividade térmica para litotipos constituintes da crosta terrestre da ordem de 2,0 a 3,0 W/mK. Numa avaliação geral, o conjunto das amostras mostrou um intervalo de condutividade térmica que variou de 1,67 W/mK, valor médio obtido em um sienito a 3,92 W/mK média em um

biotita gnaissé, com média geral de 2,79 W/mK, estando a média desta pesquisa dentro da faixa sugerida.

4.3.1 Discussão dos Dados Microscópicos

Com o objetivo de se entender o efeito da mineralogia sobre a condutividade térmica, foram confeccionados gráficos de correlação linear (mineralogia vs condutividade térmica) com todo o conjunto de amostras. Observou-se uma relação positiva do aumento da percentagem de quartzo em função do aumento da condutividade térmica, mostrando que litotipos mais ricos neste mineral possuem, no geral, maiores condutividades térmicas, figura 4.12-A. Esta relação fica mais evidente quando são comparadas as amostras com menos de 20% e mais de 20% de quartzo onde é possível observar comportamentos claramente distintos. O conjunto com mais de 20% de quartzo (sienogranitos, monzogranitos, granodioritos, etc.), mostra em sua grande maioria, valores de condutividade que variam acima de 2,5 W/mK. Já o conjunto com menos de 20% (sienitos, monzonitos, gabros, dioritos, etc.) tem condutividade térmica média abaixo de 2,5 W/mK, figura 4.12-A. Notadamente para as médias entre os intervalos de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35 e 35-40 % de quartzo a correlação com a condutividade térmica é muito boa, ratificando assim a importância deste mineral no controle da condutividade térmica, figura 4.12-B.

A relação dos feldspatos (K-feldspato e plagioclásio) com a condutividade térmica não evidenciou correlação alguma mostrando, portanto, uma dispersão dos dados, figura 4.12-C e D. Por fim os máficos apresentam um comportamento oposto ao do quartzo, ou seja, quanto maior a percentagem de máficos menor a condutividade térmica da rocha, figura 4.12-E. Para as médias dos intervalos de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35 e 35-40 e >40% de máficos a correlação também é excelente e demonstra sua influência sobre a condutividade térmica, figura 4.12-F. No que diz respeito aos máficos dois fatores principais estariam influenciando os resultados obtidos. O primeiro seria que a um aumento de máficos associa-se uma queda relativa de quartzo e o segundo seria o aumento da percentagem de filossilicatos em especial biotitas e muscovitas. Estes dois fatores potencializariam uma queda da condutividade térmica.

Agora com o objetivo de compreender melhor a condutividade térmica nos litotipos, avaliaram-se suas respectivas texturas. Foram definidos dois grupos principais:

litotipos fino/médio e grosso/porfirítico. No caso do quartzo os litotipos grossos/porfiríticos mostraram maior fator de correlação, quando comparados com os finos/médios, figura 4.13 **A** e **B**. Quanto aos feldspatos (K-feldspato e plagioclásio) os dados não mostraram boas correlações, figura 4.13 **C**, **D**, **E** e **F**. Para os máficos, tanto os tipos grossos/porfiríticos quanto os finos/médios, mostraram correlações negativas com fator de correlação menor do que os obtidos em relação ao quartzo, figura 4.13 **G** e **H**.

Quando avaliados os dois grupos (fino/médio + porfirítico), agora apenas para aqueles litotipos com mais de 20% de quartzo nota-se uma dispersão dos dados não mostrando, portanto, nenhuma correlação. Especificamente para o conjunto de rochas de textura fina/média com mais de 20% de quartzo o intervalo de condutividade térmica ficou entre 2,57 W/mK e 3,58 W/mK com média para o conjunto de 3,07 W/mK, já para o conjunto de rochas grossas/porfiríticas os resultados mostraram um intervalo de condutividade térmica entre 2,52 W/mK e 3,93 W/mK com média de 3,22 W/mK, evidenciando portanto um importante intervalo de sobreposição dos dados.

Quando são evidenciadas as duas texturas, para este conjunto de amostras (quartzo >20%), as grossas/porfiríticas, figura 4.14 **A**, mostram uma correlação de aumento, mas com fator de correlação relativamente baixo, enquanto as finas/médias mostram comportamento de dispersão, figura 4.14 **B**, mas sempre com valores de condutividade superiores a 2,5 W/mK. Para os feldspatos (K-feldspato + plagioclásio) o comportamento das amostras é de dispersão quer seja para os litotipos finos/médios ou grossos porfiríticos, assim como observado nos casos anteriores. Especificamente para os minerais máficos ocorre uma correlação negativa para as de textura grossa/porfirítica, e uma dispersão para as de textura fina/média, figura 4.14 **C** e **D**.

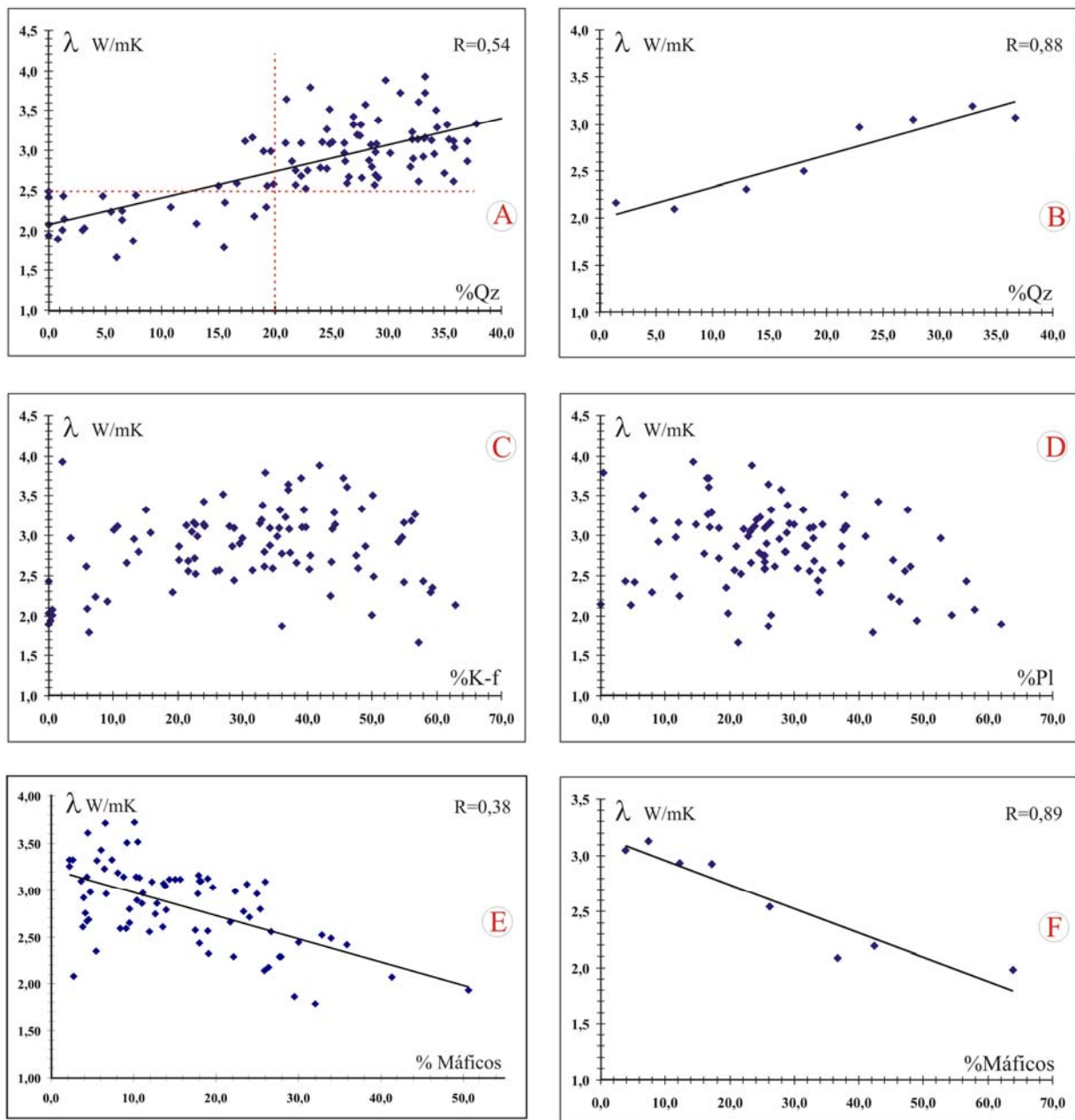


Figura 4.12) Relação entre Condutividade Térmica e: % de Qz (A), média da % de quartzo para os intervalos 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40% de quartzo (B), % de K-feldspato (C), % de plagioclásio (D), % de máficos (E) e média da % de máficos para os intervalos 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40, 40-45 e >40% de máficos.

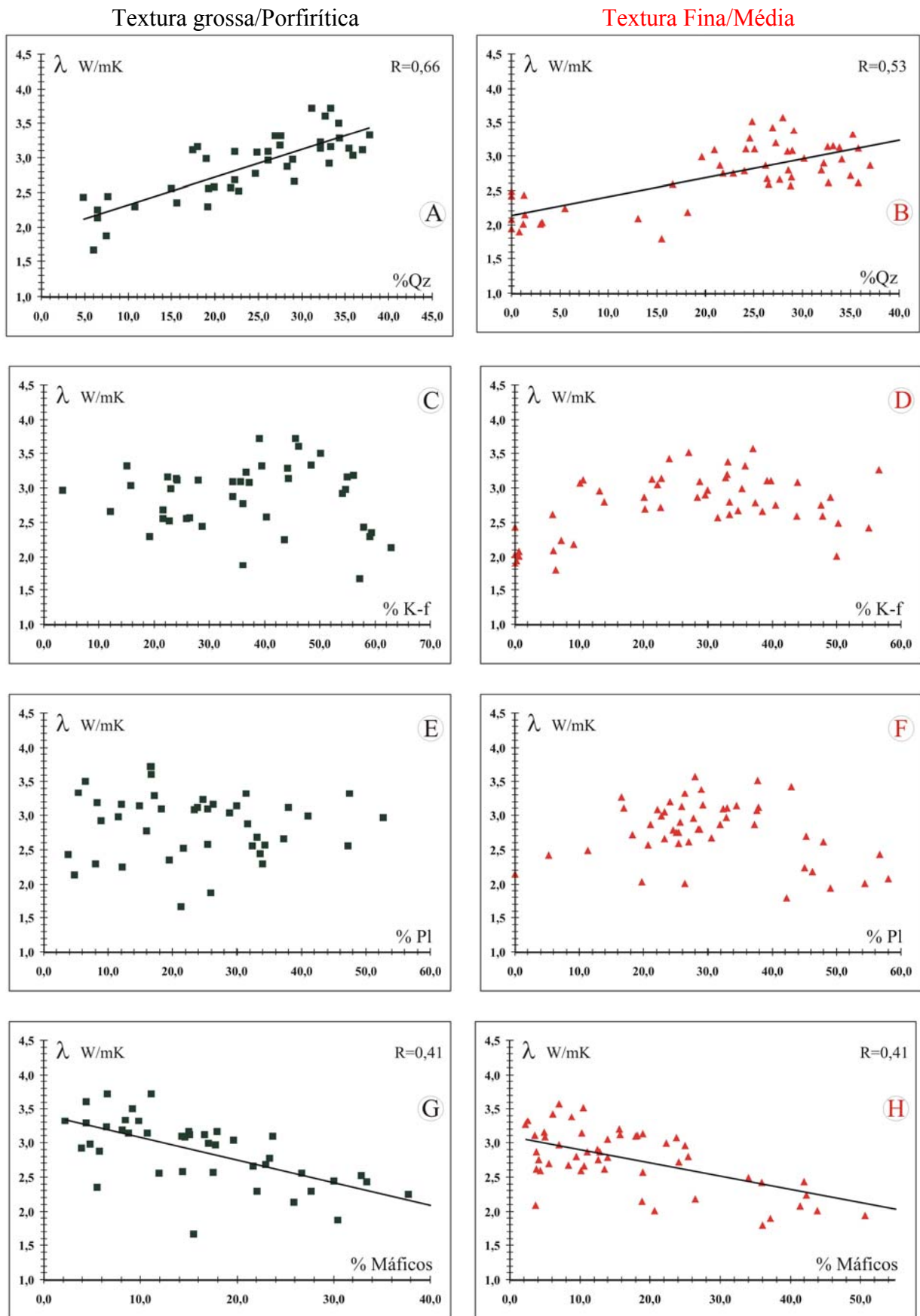


Figura 4.13) Relação entre Condutividade Térmica e: % de Qz (A) e (B), % de K-feldspato (C) e (D), % de plagioclásio (E) e (F), % de máficos (G) e (H) para as texturas **grossas/porfíricas** e **finas/médias**.

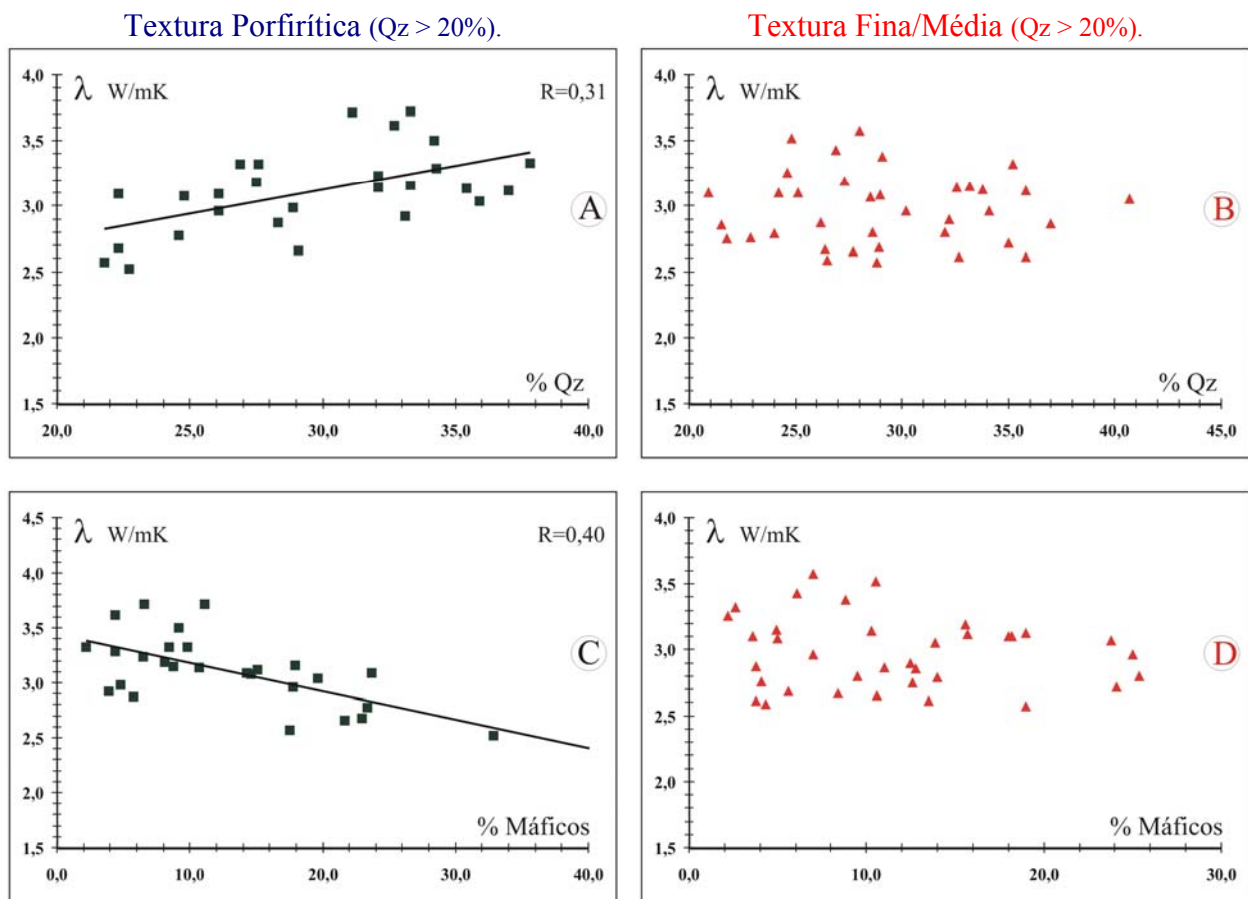


Figura 4.14) Relação entre Condutividade Térmica e: % de Qz (A) e (B), % de Máficos (C) e (D) para as texturas grossas/porfíricas e finas/médias com quartzo >20%.

4.4 Correlação com os Litotipos

Num segundo momento foram separados os 4 principais conjuntos de amostras deste trabalho, foram eles:

- 📌 Conjunto 1 – Graníticas (álcali-feldspato-granito, sienogranito, monzogranito, granodiorito e tonalito);
- 📌 Conjunto 2 – Sienitos (quartzo-álcali-feldspato sienito, quartzo-sienito, álcali-feldspato sienito e sienito);
- 📌 Conjunto 3 – Monzonitos (quartzo-monzonito e monzonitos);
- 📌 Conjunto 4 – Intermediária/Básica (Quartzo monzodiorito – Monzogabro)
dioritos, gabros, quartzo diorito, quartzo gabro, etc.

Considerou-se agora apenas os litotipos com mais de 20% de quartzo (estatisticamente o conjunto com maior volume de dados), relacionados ao QAP, Streckeisen (1976). Observa-se que o conjunto mostrou os maiores valores médios de

condutividade térmica, ficando claro uma tendência de queda no sentido dos alcali-feldspatos granitos para os tonalitos (usualmente há um aumento dos máficos neste sentido), corroborando assim com os dados de correlação entre condutividade térmica e mineralogia discutidos nos itens anteriores, (tabela 4.3). A média das 73 amostras deste conjunto (graníticas) foi de 3,08 W/mK, enquanto que para as rochas com <20% de quartzo (22 amostras) ficou em torno de 2,14 W/mK.

	AFG*	Sienogranito	Monzogranito	Granodiorito	Tonalito
Cond. Térmica	3,64	3,22	2,98	2,78	2,79
Nº de Amostras	2	17	43	8	2

Tabela 4.3 – Granitóides e respectivas médias de condutividade térmica e número de amostras.

*Álcali Feldspato Granito

Por sua vez o conjunto com menos de 20% de quartzo foi subdividido em 3 outros sub-conjuntos: sienitóides, monzonitos e por último dioritos, gabros, quartzo diorito, quartzo gabro, etc. Da mesma forma como verificado nas amostras com mais de 20% de quartzo aqui também foi constatado uma queda no sentido da esquerda para direita no diagrama QAP, Streckeisen (1976), onde os sienitos e monzonitos se mostraram pouco mais susceptíveis a condução de calor que os litotipos do conjunto 4, tabela 4.4.

	Sienitóides	Monzonitos	Conjunto 4
Cond. Térmica	2,30	2,15	2,00
Nº de Amostras	11	2	10

Tabela 4.4 – Amostras com menos de 20% de quartzo e respectivas médias de condutividade térmica e número de amostras.

Notadamente a relação da percentagem de quartzo e a condutividade térmica fica ainda mais evidente quando são plotados os resultados da contagem de pontos no diagrama “Q-A-P”, Streckeisen, 1976 (figura 4.15). Verifica-se claramente na figura 4.15 “A” que aquelas amostras com condutividades térmicas inferiores a 2,5 W/mK possuem quase sempre percentagens inferiores a 20% de quartzo. Aquelas com condutividades superiores a 2,5 W/mK sempre possuem percentagens maiores que 20%, dividindo portanto o diagrama em duas regiões principais de condutividade térmica, aquelas com condutividades altas (>2,5 W/mK) com percentagens sempre superiores a 20% de quartzo e aquelas com condutividades baixas (<2,5 W/mK) sempre com percentagens

inferiores a 20% de quartzo, ratificando assim os dados de mineralogia anteriormente citados. O diagrama Q–A+P–M, figura 4.15 “B”, confirma estes dados na medida que mostra os litotipos com altíssimas condutividades ($>3,5$ W/mK) apresentando baixos valores de máficos, estes nunca ultrapassando 12%. Os litotipos com condutividade térmica entre 3,0 e 3,49 W/mK mostram em grande parte percentagens de máficos até 20%. Em contrapartida aqueles litotipos com mais de 20% de máficos apresentam quase sempre valores abaixo de 3,0 W/mK, com tendência de queda com o aumento destes.

Com base nos resultados observados nota-se, de maneira geral, que maior será condutividade térmica, quanto maiores forem as percentagens de quartzo e ainda menores serão estes valores quando forem observados os incrementos em máficos. Desta forma sugere-se como mostrado na figura 4.15 “C”, que o sentido de aumento da condutividade seria dado da direita para esquerda, do vértice “P” (Pl) para o vértice “A” (K-F), pois num contexto mais amplo haveria uma diminuição relativa da proporção de máficos e ainda um aumento para o vértice “Q” (quartzo) que resultaria na curva “L” de aumento de condutividade térmica. Destaca-se ainda que aqueles litotipos com condutividades térmicas altas, maiores que 3,5 W/mK tendem a acompanhar o sentido de queda da percentagem de plagioclásio, corroborando assim com as interpretações supracitadas.

O comportamento da percentagem de quartzo ($>20\%$) ou da presença de máficos ($>20\%$) pode ser explicado através da figura 4.16 “A”, onde é possível notar que a partir da percentagem de 15% já ocorrem contatos entre os minerais, o que não se observa (probabilidade muito pequena) nas percentagens de 1, 5 e 10%, por exemplo. Já a percentagem correspondente a 20%, os contatos entre os cristais já são mais pronunciados (probabilidade maior), sendo formados “canais” que funcionarão como facilitadores da condução do calor, no caso do quartzo, ou como barreiras no caso dos filossilicatos (biotitas, muscovitas, etc). Nos valores correspondentes a 25 e 30%, por exemplo, os contatos já são muito abundantes (probabilidade muito maior). Em resumo, pode-se sugerir a existência de uma zona de controle de condutividade térmica que estaria localizada em torno de 20% de quartzo, correspondente a aproximadamente 2,5 W/mK.

Tão importante quanto a percentagem absoluta ou modal é a forma como encontra-se distribuída determinada fase mineral. A figura 4.16 B e C demonstra bem tal problemática onde é possível perceber que uma mesma percentagem mineral pode

ocorrer concentrada em poucos cristais de tamanho grande ou em muitos cristais de tamanho pequeno. Especificamente para a condutividade térmica parece haver um favorecimento da condução de calor quando os cristais são bem desenvolvidos justificando em algumas situações, por exemplo, no caso de rochas de textura grossa/porfírica os valores médios superiores, (>10%) aos encontrados nas de textura fina/média. Rochas com composição mineralógica similar, mas com texturas distintas apresentam resultados muitas vezes diferenciados como é o caso, por exemplo, das amostras **A07 (3,08 W/mK)** e *A12 (2,76 WmK)*, **A18 (3,33 W/mK)** e *MA-112 (2,59 W/mK)*, **A10 (3,23 W/mK)** e *CR-9b (2,61Wm/K)*, **grossa/porfíricas** e *fina/média*, respectivamente. Esses resultados se repetem quando levam-se em consideração apenas as rochas com mais de 20% de quartzo. O comportamento relativo do tamanho do grão em função da condutividade pode ser explicado pela relação da superfície de contato entre os grãos, ou seja, quanto menor a granulometria maior seria a superfície de contato dificultando o fluxo de calor entre os grãos, sendo assim aqueles litotipos com granulometria mais grossas teriam em tese menos descontinuidades (superfícies de contato) e portanto, mais facilidade em conduzir calor. As superfícies entre os grãos funcionariam como barreiras resistindo a condução do calor. Especificamente para os litotipos mais finos a maior quantidade de superfícies de contato, somada em alguns casos a natureza microcristalina de alguns constituintes e a ausência de constituintes mineralógicos com alta condutividade, por exemplo o quartzo, contribuiriam negativamente para a passagem do calor, justificando os baixos valores observados, neste conjunto. Estas justificativas podem ajudar a explicar a dificuldade em si obter em alguns casos, boas correlações, pois litotipos com percentagens mineralógicas similares podem responder de forma muito diferente, apenas variando um desses parâmetros supracitados.

Isso demonstra a complexa interação de diversos fatores, tais como, tamanho dos cristais, distribuição, tipo de contato, grau de alteração, etc. Portanto é possível sugerir alguns resultados baseando-se principalmente na percentagem de quartzo e máficos, mas mesmo assim com fator de correlação em algumas situações baixo.

Diagrama Q-A-P e Q-A+P-M para Rochas Plutônicas e Respective Intervalos de Condutividade Térmica

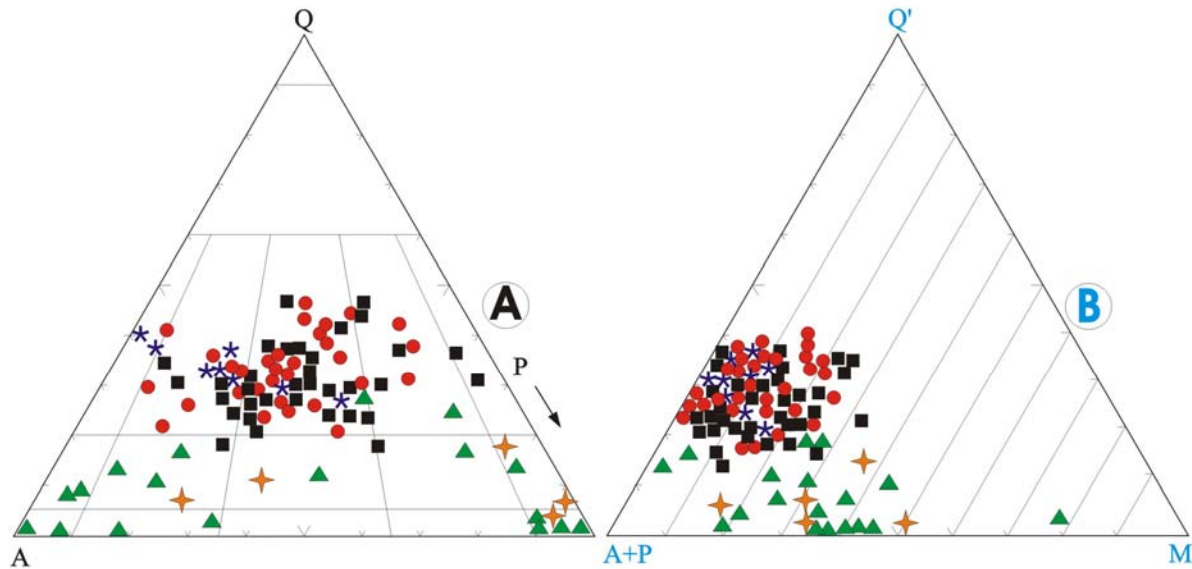
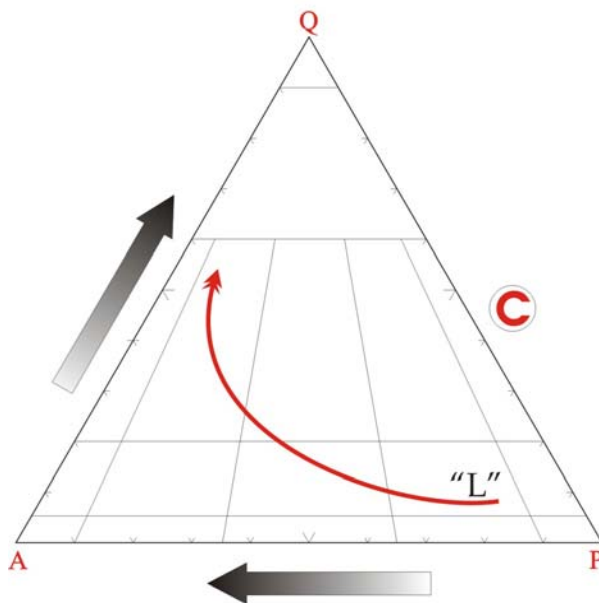


Diagrama Q-A-P e Sentido do Aumento da Condutividade Térmica para os litotipos estudados.



Legenda

Intervalos de Condutividade Térmica W/mK			
★	<2,0	▲	2,0 - 2,49
●	3,0 - 3,49	■	2,5 - 2,99
✱	>3,5		

← Sentido do aumento da Condutividade Térmica

↪ Curva associada ao aumento da Condutividade Térmica

Condutividade Térmica para os grupos de rochas

	AFG	Senogranito	Monzogranito	Granodiorito	Tonalito
Cond. Térmica	3,64	3,22	2,98	2,78	2,79
Nº de Amostras	2	17	43	8	2

	Sienitóides	Monzonitos	Conjunto 4
Cond. Térmica	2,30	2,15	2,00
Nº de Amostras	11	2	10

AFG=Alcali Feldspato Granito; Conjunto 4 = Dioritos, gabros, quartzo diorito, etc.

Figura 4.15) “A” e “B” conjunto de amostras e respectivo intervalo de condutividade térmica. “C” Sentido de aumento da condutividade térmica.

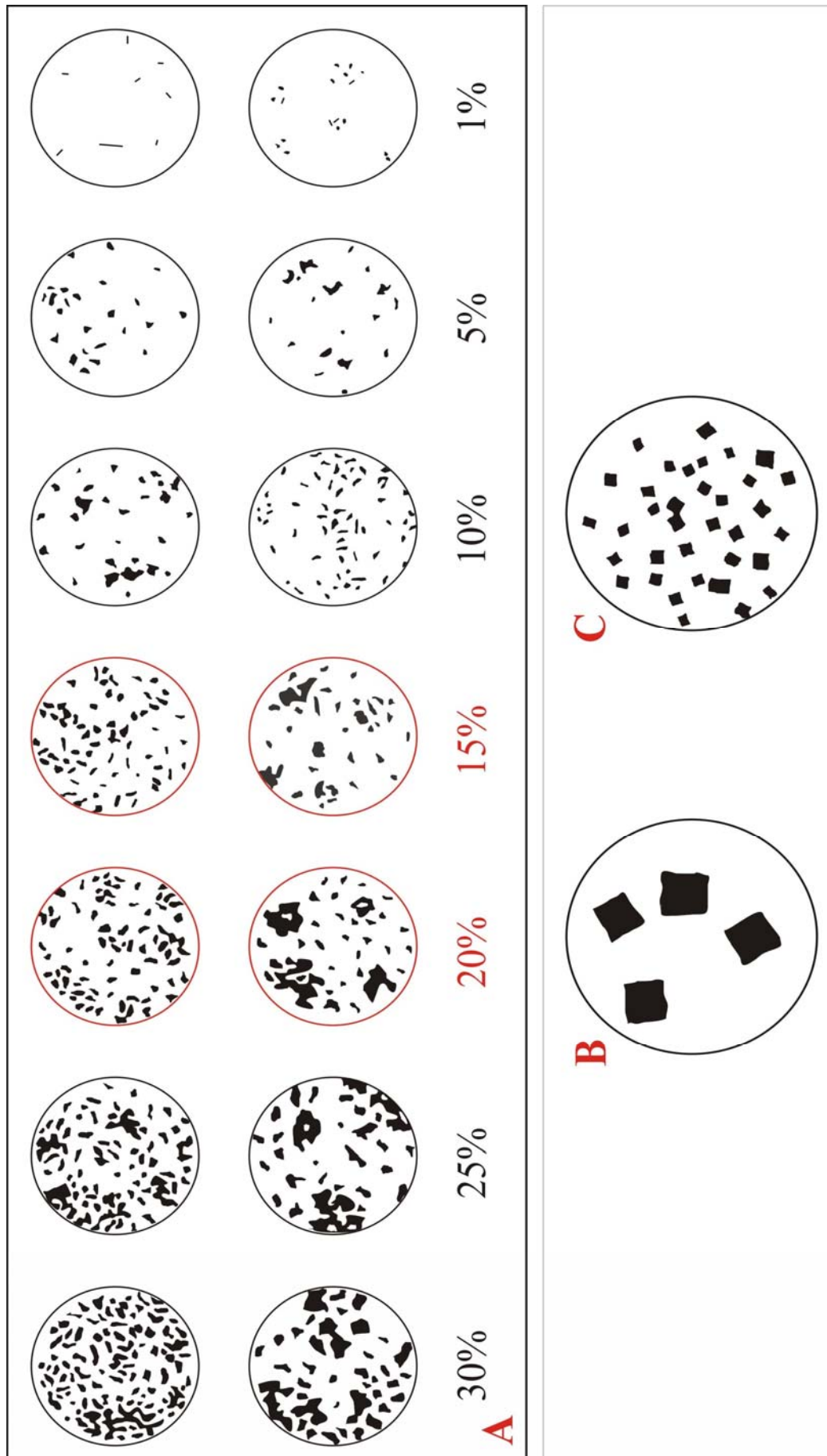


Figura 4.16: Modificado de BEST, M.G (1982) **A)** Padrões de referência para determinação da percentagem de minerais. **B)** Poucos cristais com grandes dimensões. **C)** Numerosos cristais com pequenas dimensões.

Two vertical decorative bars with a gradient from light to dark grey, positioned on the left side of the page.

Capítulo 5

**Correlação da Geoquímica com a
Condutividade Térmica**

CAPÍTULO 5 – Correlação da Geoquímica com a Condutividade Térmica

5. 1 Geoquímica vs Condutividade Térmica (elementos maiores)

O objetivo deste capítulo é avaliar as possíveis correlações existentes entre a condutividade térmica e a química da rocha, enfatizando em especial os elementos maiores. Os dados de geoquímica são de diversos autores, mas a maioria das medidas de condutividade térmica foram realizadas por esta pesquisa em amostras representativas dos mesmos materiais. São discutidos aqui os óxidos/elementos principais formadores de rochas (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , Na_2O , K_2O , MgO e TiO_2). Selecionou-se 29 amostras sendo 15 de rochas ácidas ($\text{SiO}_2 > 63\%$), 7 de rochas intermediárias ($63\% > \text{SiO}_2 > 52\%$) e 7 de rochas básicas ($\text{SiO}_2 < 52\%$) tabela 5.1. Os litotipos ácidos são representados por sienogranitos, monzogranitos, granodioritos, quartzo monzodiorito, e leucognaisse os intermediários são representados por sienitos, gabronorito e fonólitos e as básicas por basaltos, microgabros e quartzo diorito. Inicialmente foi possível observar que a correlação, quando existe, é do tipo linear, assim como aquelas observadas com a mineralogia. Este comportamento foi verificado principalmente na correlação com o SiO_2 . Neste caso nota-se um comportamento bastante similar ao observado com o quartzo (capítulo 4), ou seja, aumento da condutividade térmica com o incremento de SiO_2 . A figura 5.1 **A**, mostra que há tendência de aumento das rochas básicas para as intermediárias e ácidas, nestas últimas são encontrados os maiores valores de condutividade térmica. Notar ainda que o fator de correlação é de 0,67, superior ao encontrado na correlação com o quartzo que foi de 0,52. Um outro aspecto observado é que rochas básicas a intermediárias apresentaram valores sempre inferiores a 2,5 W/mK comportamento similar ao observado em rochas com menos de 20 % de quartzo. Já as rochas ácidas apresentaram em sua maioria valores acima de 2,5 W/mK, comportamento similar ao observado em rochas com mais de 20% de quartzo. Quanto ao Al_2O_3 , K_2O e Na_2O os resultados não são conclusivos havendo estatisticamente dispersão, com fator de correlação igual ou muito próximo a zero, figura 5.1 **B**, **C** e **D**. Nos demais casos os fatores de correlação são sempre baixos todavia apresentando no geral comportamento inverso, ou seja, tendência de queda da condutividade térmica com o incremento do óxido, sendo observado para Fe_2O_3 , CaO , MgO , e TiO_2 , figura 5.1 **E**, **F**, **G**, **H**. Em todas as situações verificam-se comportamentos distintos entre os três grupos de rochas, onde as básicas apresentam em sua maioria condutividades térmicas baixas e as ácidas

condutividades sempre mais altas. O grupo de rochas intermediárias (52 a 63% de SiO_2) possuem comportamento relativamente variável, mas com valores de condutividade térmica em sua grande parte não superiores aos verificados nas ácidas.

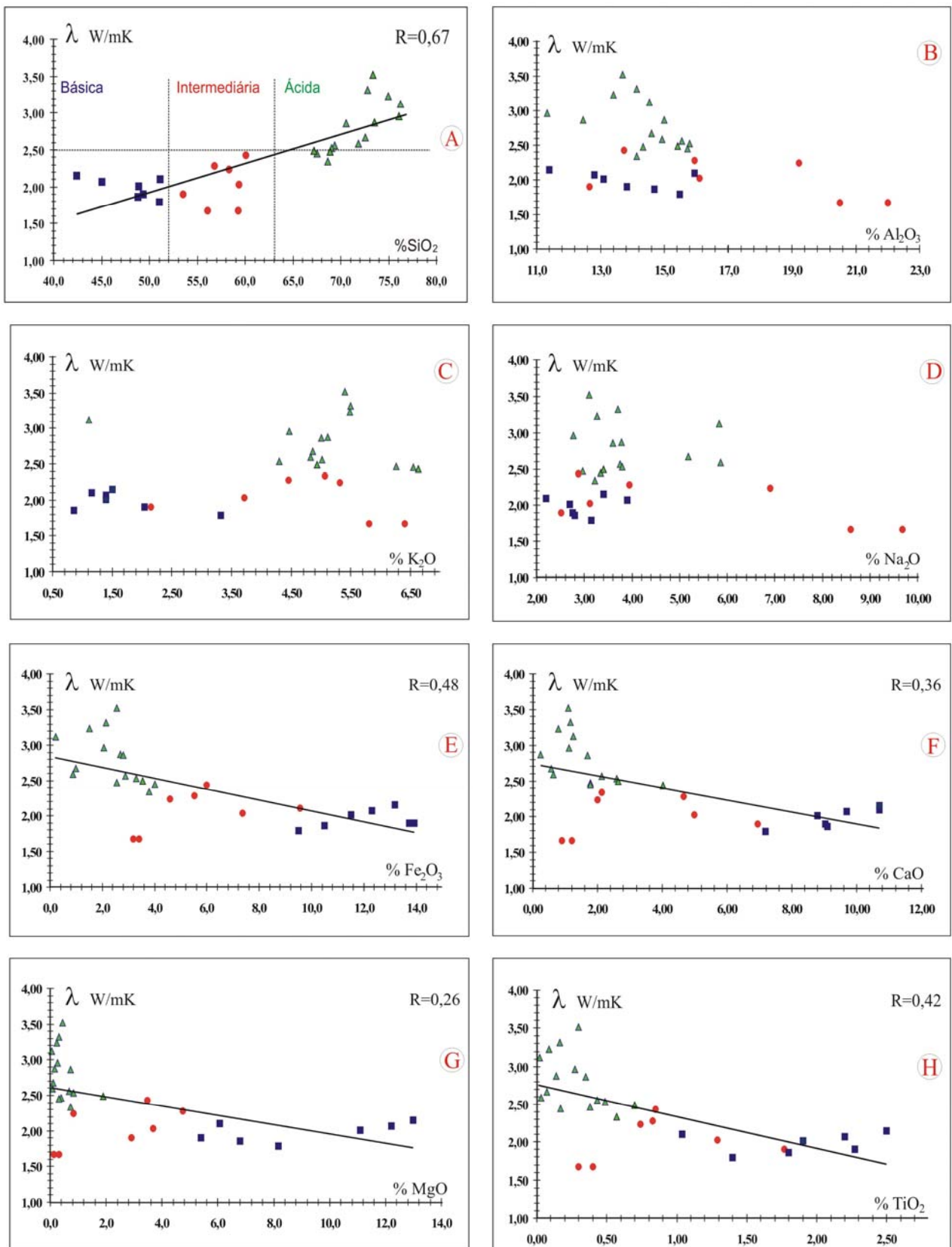


Figura 5.1) Relação entre Condutividade Térmica e: % de SiO_2 (A), % de Al_2O_3 (B), % de K_2O (C), % de Na_2O (D), % de Fe_2O_3 (E), % CaO (F), % de MgO (G) e TiO_2 (H), destacando as rochas ácidas, intermediárias e básicas.

A figura 5.2 **A** expressa a média da % de SiO_2 para os intervalos de 40-45, 45-50, 50-55, 55-60, 60-65, 65-70, 70-75 e 75-80%. Assim como verificado com o quartzo a correlação é boa exibindo fator de 0,80. Já a figura 5.2 **B** exhibe a relação entre os óxidos que predominam nos minerais máficos ($\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}+\text{CaO}+\text{TiO}_2$), e os óxidos predominantes nos félsicos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$). Neste gráfico fica clara a relação entre os dois grupos de minerais (máficos e félsicos) demonstrando que as mais baixas condutividades estão sempre associadas a um aumento da mineralogia máfica. Este grupo, assim como os das rochas intermediárias mostrou condutividades térmicas baixas, média em torno de 2,0 W/mK. Já as rochas félsicas mostraram sempre condutividades térmicas altas com média de 2,86 W/mK. Na tentativa de se entender o comportamento dos óxidos predominantes nos feldspatos ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) e dos óxidos predominante nos máficos ($\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}+\text{CaO}+\text{TiO}_2$) foram avaliados os gráficos 5.2 **C** e **D**, para todo o conjunto de amostras. No primeiro ocorre dispersão, já no segundo ocorre uma tendência de queda com correlação baixa e fator igual a 0,38. Todavia ambos os comportamentos são similares aos observados com a mineralogia ou seja, dispersão para os feldspatos ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$), e tendência de queda para os máficos, todavia com fator de correlação baixo.

Visando agora um enfoque apenas nas rochas ácidas (conjunto maior de dados) foram isolados os dados referentes a estes litotipos ($\text{SiO}_2 > 63\%$). Neste momento quando realizada uma comparação entre todos os resultados fica evidente novamente a importância do SiO_2 no aumento da condutividade térmica, pois, apenas neste caso observa-se uma tendência de aumento direto expressivo (figura 5.3 **A**). Em quase todas as situações os fatores de correlação são relativamente baixos com tendências discretas de queda, como é o caso do Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , e TiO_2 (figura 5.3 **B**, **C**, **D** e **E**), já para, K_2O , Na_2O , e MgO a dispersão predomina, figura 5.3 **F**, **G** e **H**. Estes resultados em grande parte corroboram os dados anteriores de química e os de mineralogia, pois as relações com o quartzo e o SiO_2 são de aumento da condutividade térmica, e queda para Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , (máficos) novamente as relações com Na_2O e K_2O (feldspatos) mostraram-se complexas, havendo portanto uma dispersão.

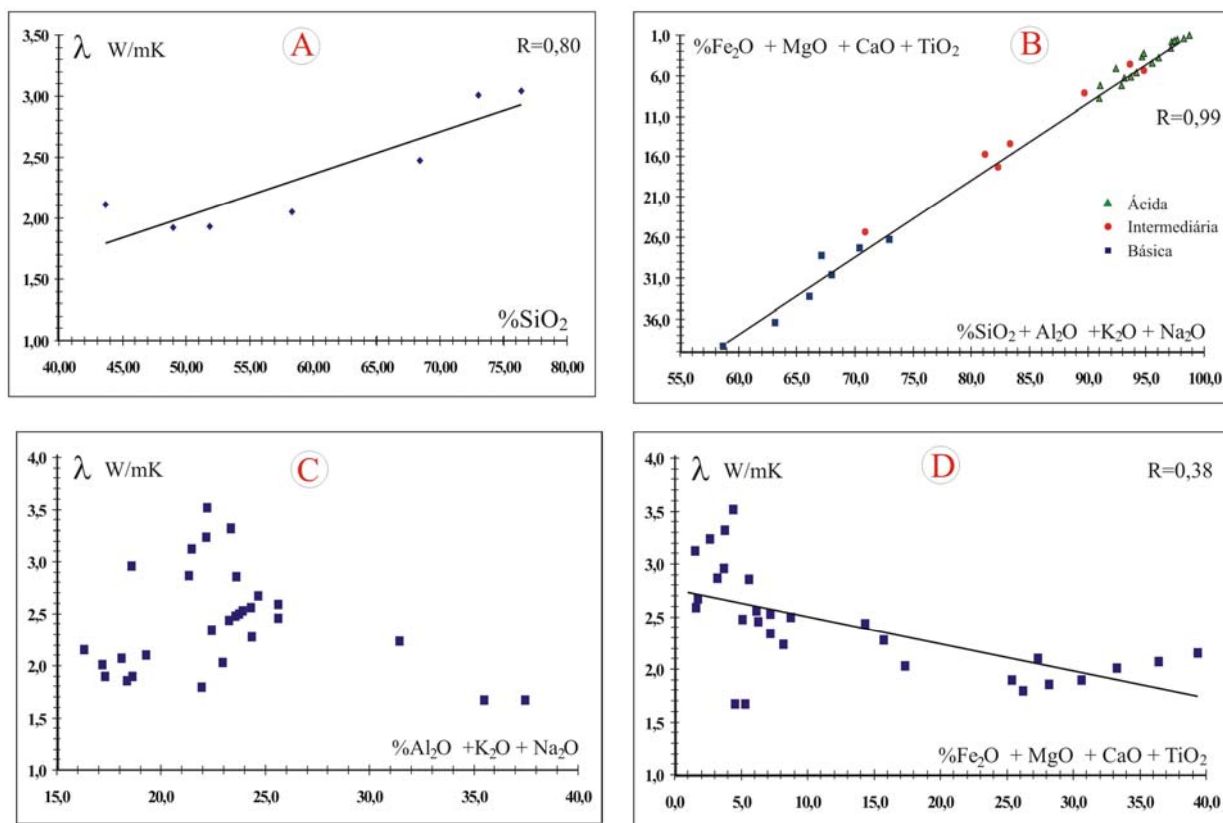
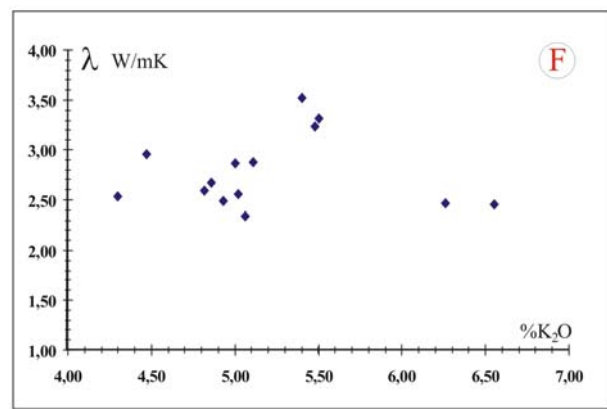
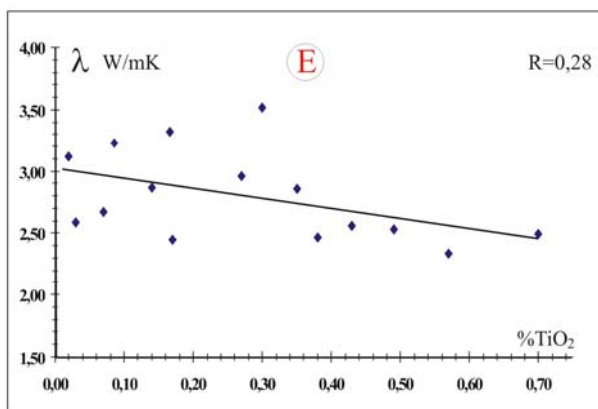
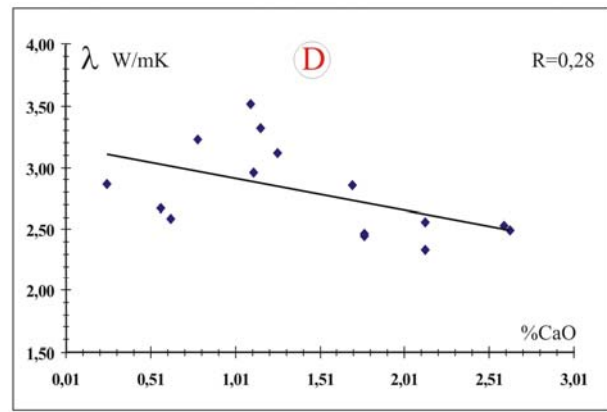
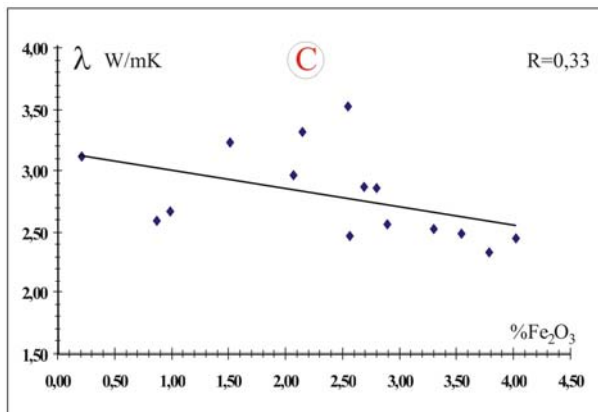
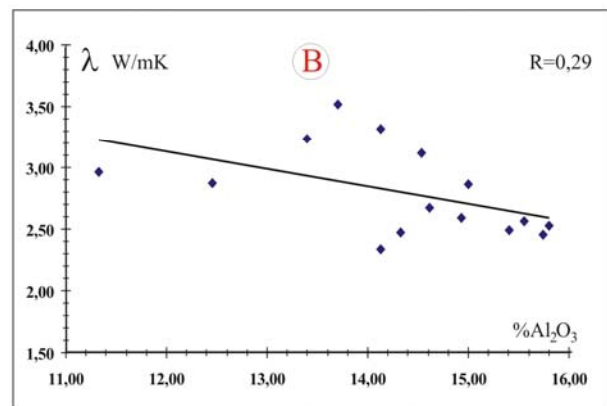
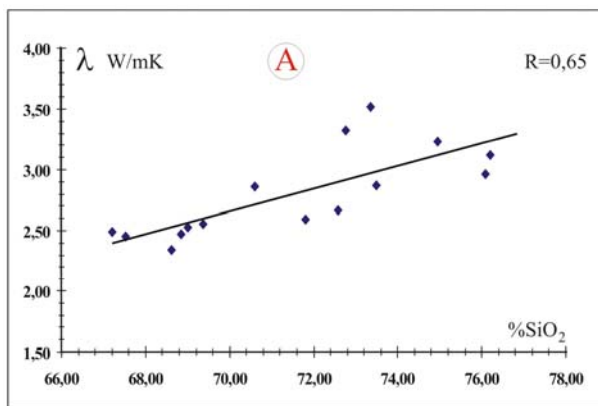


Figura 5.2) Relação entre Condutividade Térmica e: média da % de SiO_2 (A), % de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{TiO}_2$ vs a % de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ enfatizando as amostras básicas, intermediárias e ácidas (B), % de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ - felsícos (C), % de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{TiO}_2$ - máficos (D), para todo o conjunto de amostras.

Novamente na tentativa de compreender o comportamento dos óxidos predominantes nos feldspatos ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) e nos máficos ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{TiO}_2$), agora apenas para as rochas ácidas, avaliaram-se os gráficos 5.4 A e B. Quanto aos óxidos ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) notou-se dispersão. Já para os óxidos encontrados principalmente nos minerais máficos verifica-se uma discreta queda da condutividade térmica com o aumento de ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{TiO}_2$), o que corrobora novamente os resultados obtidos na mineralogia com os feldspatos e máficos respectivamente.

Sendo assim a relação da química da rocha vs condutividade térmica pode ser resumida da seguinte forma: os valores de condutividade térmica aumentam das rochas básicas para as ácidas. Este resultado é bem marcado no gráfico de correlação com o SiO_2 , ratificado pelo Fe_2O_3 , CaO , MgO e TiO_2 , corroborando assim com as correlações observadas com o quartzo e os máficos. Os diagramas para Al_2O_3 , Na_2O e K_2O exibem relações mais complexas, figura 5.1 B, C e D. Estes elementos são dominantes nos feldspatos, minerais que apresentam correlações ainda não muito bem definidas com a condutividade térmica, ou seja, a geoquímica de elementos maiores confirma os

resultados obtidos com a mineralogia. O gráfico 5.2 A e B reafirma ainda mais estes resultados mostrando que ocorrem excelentes correlações entre a média dos intervalos de SiO_2 e a condutividade térmica (gráfico 5.2 A) e demonstram ainda que a relação entre os óxidos máficos vs félsicos evidenciam altas condutividades para as ricas em $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$. Por fim rochas com mais de 62% de SiO_2 (ácidas) tendem a apresentar valores de condutividade térmica acima de 2,5 W/mK e rochas com menos de 63% de SiO_2 (intermediárias e básicas) tendem a apresentar valores menores que 2,5 W/mK.



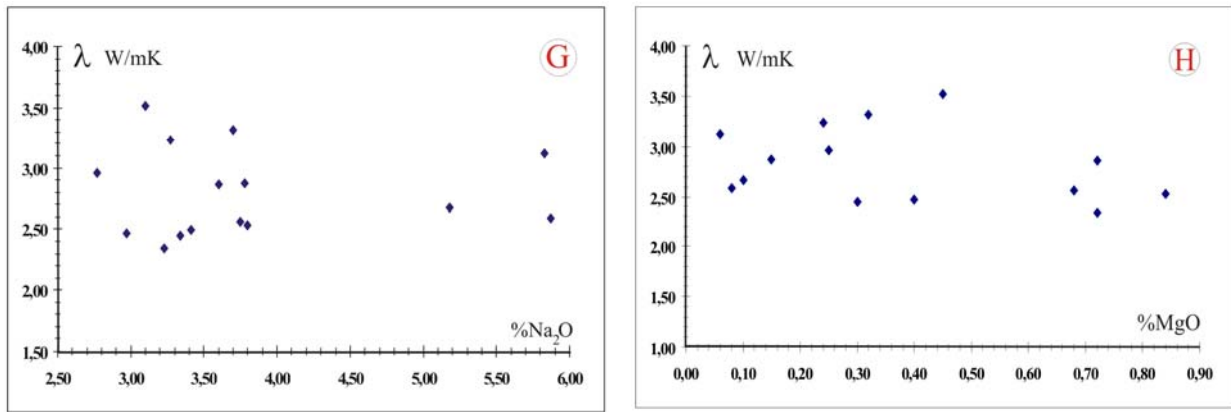


Figura 5.3) Relação entre Condutividade Térmica e: % de SiO₂ (A), % de Al₂O₃ (B), % de Fe₂O₃ (C), % CaO (D), % de TiO₂ (E), % de K₂O (F), % de Na₂O (G), e MgO (H), destacando apenas as rochas ácidas.

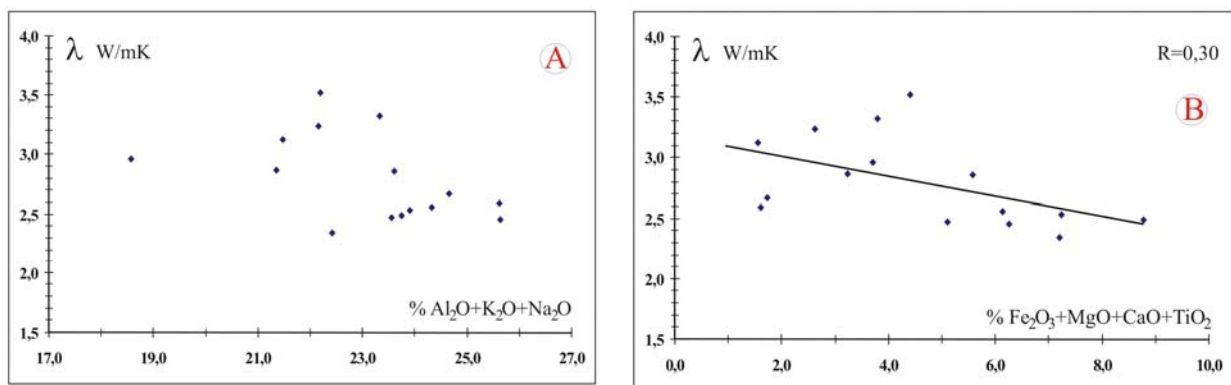


Figura 5.4) Relação entre a Condutividade Térmica e: % de Al₂O₃+K₂O+Na₂O (A), % de Fe₂O₃+MgO+CaO+TiO₂ (B).

Os óxidos SiO₂, Fe₂O₃, CaO, K₂O, Na₂O e TiO₂, somados representam mais de 85% da composição química das rochas e mostraram numa primeira análise, serem os mais significantes no que diz respeito a correlação com condutividade térmica. Portanto os dados de geoquímica (elementos maiores) podem ajudar a ratificar os resultados da avaliação macroscópica e microscópica, podendo servir como diretriz para uma melhor compreensão do fenômeno da condutividade térmica em rochas, contudo não deve ser levado como único parâmetro determinante da condutividade térmica, devendo ser estudado como ferramenta adicional no estudo desta variável.

Tabela 5.1 - Dados Geoquímicos dos Litotipos Ácidos, Intermediários e Básicos (Elementos Maiores) e Respectivas Condutividades Térmicas


Litotipos Ácidos

Elementos (% peso)	Casablanca	CR-105	R. Iracema	Cabo	Flores	B.Cristal	MA-21	MA-112	CR 102	LG 15 A	RC 65	CR 106	CR 103	118	LG 01
SiO ₂	76,21	76,09	74,96	73,49	73,35	72,76	72,59	71,81	70,60	69,37	69,00	68,84	68,61	67,53	67,20
Al ₂ O ₃	14,53	11,33	13,40	12,46	13,70	14,13	14,61	14,93	15,00	15,55	15,8	14,33	14,13	15,74	15,41
Fe ₂ O _{3t}	0,21	2,07	1,51	2,69	2,55	2,15	0,99	0,87	2,80	2,89	3,3	2,56	3,79	4,02	3,54
MnO	0,02	0,03	0,02	0,04	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,04	0,04	0,02	0,05	0,06	0,05
MgO	0,06	0,25	0,24	0,15	0,45	0,32	0,10	0,08	0,72	0,68	0,84	0,40	0,72	0,30	1,90
CaO	1,26	1,12	0,79	0,25	1,10	1,16	0,57	0,63	1,70	2,13	2,6	1,77	2,13	1,77	2,63
Na ₂ O	5,83	2,77	3,27	3,78	3,10	3,70	5,18	5,87	3,60	3,75	3,8	2,97	3,23	3,34	3,41
K ₂ O	1,11	4,47	5,48	5,11	5,40	5,50	4,86	4,82	5,00	5,02	4,3	6,26	5,06	6,55	4,93
TiO ₂	0,02	0,27	0,09	0,14	0,30	0,17	0,07	0,03	0,35	0,43	0,49	0,38	0,57	0,17	0,70
P ₂ O ₅	0,03	0,13	0,01	0,01	0,10	0,05	0,02	0,01	0,12	0,14	0,18	0,17	0,29	0,44	0,23
PF	0,33	0,12		0,64	0,38		0,10	0,20	0,22	0,38	0,55	0,65	0,46	0,25	0,56
Total	99,61	98,65	99,77	98,76	100,45	99,96	99,07	99,21	100,14	100,38	100,90	98,35	99,04	100,17	100,56
Cond. Térmica	3,12	2,96	3,23	2,87	3,52	3,32	2,67	2,59	2,86	2,56	2,53	2,47	2,34	2,45	2,49
Referência	Lima (2006)	Galindo (1993)	Mattos (2005)	Nascimento (2000)	Galindo et al (2005a)	Mattos (2005)	Nascimento (2000)	Nascimento (2000)	Galindo et al (2005b)	Silveira (2006)	Galindo et al (2005c)	Galindo (1993)	Galindo (1993)	Galindo (1993)	Silveira (2006)

Tabela 5.1: Final

Litotipos Intermediários**Litotipos Básicos**

Elementos (% peso)	Café Bahia	LG 206	Fonólito A	Azul Bahia	Lilás Imperial	Fonólito B	728	602	LG 15C	2053	Basalto A	Microgabro	Basalto B	Basalto C
SiO ₂	60,08	59,34	59,30	58,30	56,80	56,1	53,53	51,09	51,01	49,37	48,90	48,80	45,00	42,40
Al ₂ O ₃	13,73	16,10	20,50	19,23	15,96	22,0	12,65	15,94	15,48	13,83	13,10	14,7	12,81	11,4
Fe ₂ O _{3t}	6,00	7,36	3,40	4,59	5,52	3,2	13,74	9,56	9,50	13,94	11,50	10,50	12,30	13,20
MnO	0,15	0,09	0,30	0,15	0,08	0,2	0,2	0,16	0,15	0,22	0,20	0,13	0,2	0,2
MgO	3,48	3,67	0,30	0,82	4,74	0,1	2,91	6,07	8,17	5,38	11,10	6,8	12,2	13
CaO	4,03	4,99	1,20	2,00	4,65	0,9	6,95	10,7	7,18	9,04	8,80	9,1	9,7	10,7
Na ₂ O	2,88	3,12	8,60	6,90	3,95	9,7	2,52	2,2	3,14	2,75	2,70	2,8	3,9	3,4
K ₂ O	6,63	3,72	6,40	5,31	4,46	5,8	2,15	1,16	3,32	2,04	1,40	0,86	1,4	1,5
TiO ₂	0,85	1,29	0,40	0,74	0,83	0,3	1,77	1,04	1,40	2,27	1,90	1,8	2,2	2,5
P ₂ O ₅	0,60	0,32	0,00	0,29	0,55	0,1	0,33	0	0,65	0,32	0,40	0,28	0,8	1
PF	0,58	0,56	1,10	1,26	0,52	2,9	0	0	0,41		1,50	5,59	1,5	1,9
Total	99,01	100,56	101,50	99,59	98,06	101,31	96,75	98,10	100,41	99,16	101,50	101,36	102,01	101,17
Cond. Térmica	2,43	2,03	1,67	2,24	2,28	1,67	1,90	2,10	1,79	1,90	2,01	1,86	2,07	2,15
Referência	Paim et al (1998)	Silveira (2006)	Cronoboro (2005)	Rosa et. al (2004)	Guimarães (1989)	Cronoboro (2005)	Raposo & Marangoni (1988)	Marangoni & Raposo (1988)	Silveira (2006)	Marangoni & Raposo (1988)	Cronoboro (2005)	Cronoboro (2005)	Cronoboro (2005)	Cronoboro (2005)

Two vertical decorative bars with a gradient from light to dark grey are positioned on the left side of the page.

Capítulo 6

***Condutividade Térmica e sua aplicação
na Construção Civil***

CAPÍTULO 6 – Condutividade Térmica e sua aplicação na construção civil

6.1 Introdução

No passado as casas eram construídas fundamentalmente para proteger da chuva e da neve, sem atenção especial ao isolamento térmico. No decurso do século XX a consciência da limitação dos recursos energéticos, o aumento do preço da energia, bem como uma procura cada vez mais acentuada de conforto térmico levou à implementação de códigos que especificam níveis mínimos de isolamento térmico em paredes, telhados, janelas, etc.

Na linguagem dos dias de hoje, a transferência de calor é, na realidade, uma questão relevante, além de ser uma parte fascinante das ciências da engenharia. Os fenômenos da transferência de calor representam papel importante em muitos problemas industriais e ambientais. Esses problemas, segundo Incropera & Witt (1981), envolvem processos de condução, convecção e de radiação e estão ligados ao projeto de sistemas como caldeiras, condensadores, turbinas, etc. Assim muitas vezes o objetivo é tornar máximas as taxas de transferência de calor e manter a integridade dos materiais em meios a alta temperatura. Em outros casos, fica-se diante de um problema de poluição térmica associado à descarga de grandes quantidades de calor rejeitado por uma usina de força para o ambiente. Na literatura são feitas numerosas considerações sobre a transferência de calor relacionadas a projetos de torres de resfriamento que diminuem os problemas ambientais associados a esta descarga.

Numa escala menor, há muitos problemas de transferência de calor relacionados ao desenvolvimento de sistemas de conversão de energia solar para o aquecimento ambiental e para o condicionamento de ar, e também para a produção de energia elétrica. Os processos de transferência de calor podem afetar o desempenho de sistemas de propulsão, como os motores de combustão interna e de foguetes. Aparecem problemas de transferência de calor no projeto de sistemas convencionais de aquecimento ambiental e de aquecimento de água, em conforto térmico e em outras diversas áreas. Na construção civil o problema está intimamente relacionado ao conforto térmico e abordam questões relativas a propriedades térmicas dos materiais e ainda aspectos associados ao clima.

O objetivo é fornecer uma diretriz do comportamento da condutividade térmica em alguns tipos de rochas e demonstrar sucintamente sua relação com a dilatação térmica

linear, densidade e ainda mostrar a importância do conhecimento da condutividade térmica e suas aplicações em especial na construção civil.

6.2 Condutividade Térmica

A partir da identificação e quantificação dos fatores que influenciam a condutividade térmica, foi possível obter através de regressão linear simples, uma fórmula para estimar este parâmetro e numa etapa seguinte, correlacionar com a dilatação térmica linear. No que diz respeito a correlação entre a condutividade térmica e a dilatação térmica foi levado em consideração o fator “*mineralogia*” em especial a percentagem de quartzo, parâmetro comum entre as duas variáveis. Os valores correspondentes a porosidade aparente são menores que 1%, valor muito pequeno e portanto desprezível para rochas granitóides, Clauser & Huenges (1995).

Para uma maior confiabilidade dos dados e ainda para uma melhor interpretação dos resultados, foram criadas médias para 4 conjuntos: 0-10%, 10-20%, 20-30% e >30% de quartzo, para ambas as texturas (fina/média e grossa/porfirítica). O gráfico de regressão linear obtido, figura 6.1, mostra que as rochas grossas/porfiríticas apresentam melhor fator de correlação do que as finas/médias, como já demonstrado nos capítulos anteriores. De maneira geral, para as rochas de textura grossa/porfirítica, com o incremento de 10% de quartzo nota-se um aumento de 16% da condutividade térmica, já para as rochas de textura fina/média com esse mesmo incremento observa-se um aumento de 10%.

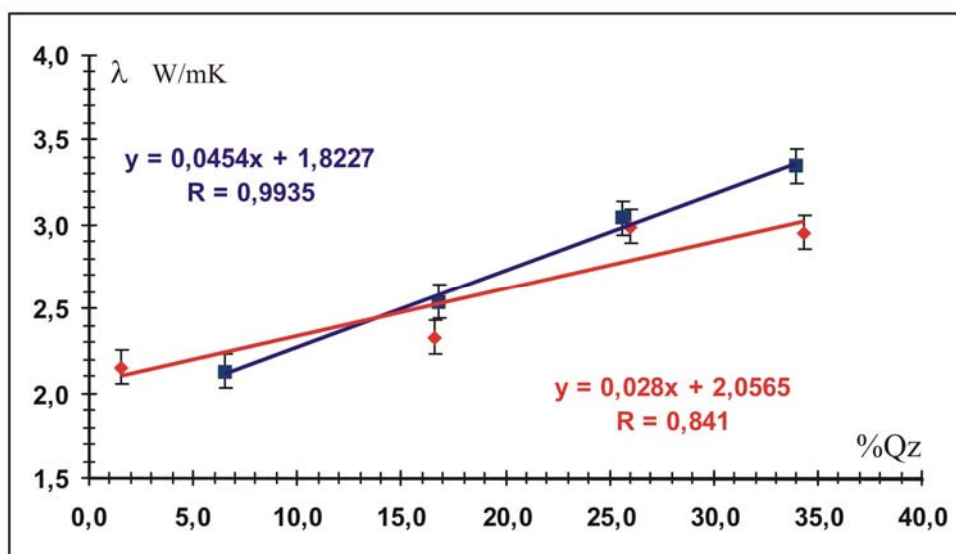


Figura 6.1 – Retas de correlação e respectivas equações de reta das texturas **fina/média** e **grossa/porfirítica**.

Com o intuito de comparação dos dados desta pesquisa com os dados de Lima (2002), e ainda com o objetivo de gerar apenas uma equação de reta, optou-se por criar um gráfico de correlação gerado a partir da média dos litotipos para cada intervalo, 0-10, 10-20, 20-30 e >30% de quartzo, figura 6.2.

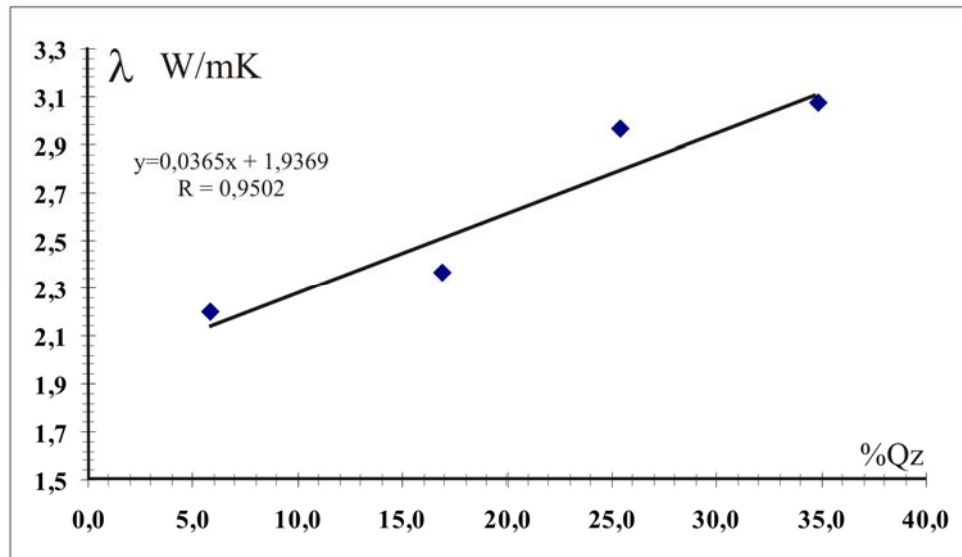


Figura 6.2 - Média para o conjunto de amostras (intervalos de 0-10, 10-20, 20-30 e >30% de quartzo).

Portanto, a partir da equação de reta obtida na figura 6.2, é possível obter-se os valores de condutividade térmica necessitando apenas os respectivos valores de quartzo. Na equação de reta deve-se substituir os valores referentes a “Y” e “X” por “λ” e Qz, respectivamente, como mostra a equação 6.1:

$$\text{Eq. 6.1 : } \quad \lambda = 0,0365 \text{ Qz} + 1,9369 \pm 0,2 \text{ W/mK}$$

Onde:

λ = Condutividade térmica em W/mK

Qz = porcentagem de quartzo

0,2 W/mK = erro aproximado do equipamento

Roy *et al* (1981) analisaram a correlação entre a condutividade térmica e a porcentagem de quartzo em 100 amostras de granitos e quartzo monzonitos e chegou a seguinte equação de reta:

$$\text{Eq.: 6.2} \quad \lambda = 0,0245 \text{ Qz} + 2,59 \text{ W/mK}$$

A figura 6.3 exibe as duas equações de reta sendo uma obtida por este trabalho, reta (1) e a outra obtida por Roy *et al* (1981), reta (2). Fica claro que as retas são relativamente similares mas com deslocamento para baixo da reta (1), o que pode ser explicado pela maior variação de tipos de rochas (gabros, sienitos, álcali-feldspato sienito, dioritos, etc.) com características mineralógicas e petrográficas distintas, em especial aquelas com menos de 20% de quartzo o que provocaria uma queda geral da média. Contudo observa-se um aumento da condutividade térmica com o incremento de quartzo em ambos os casos.

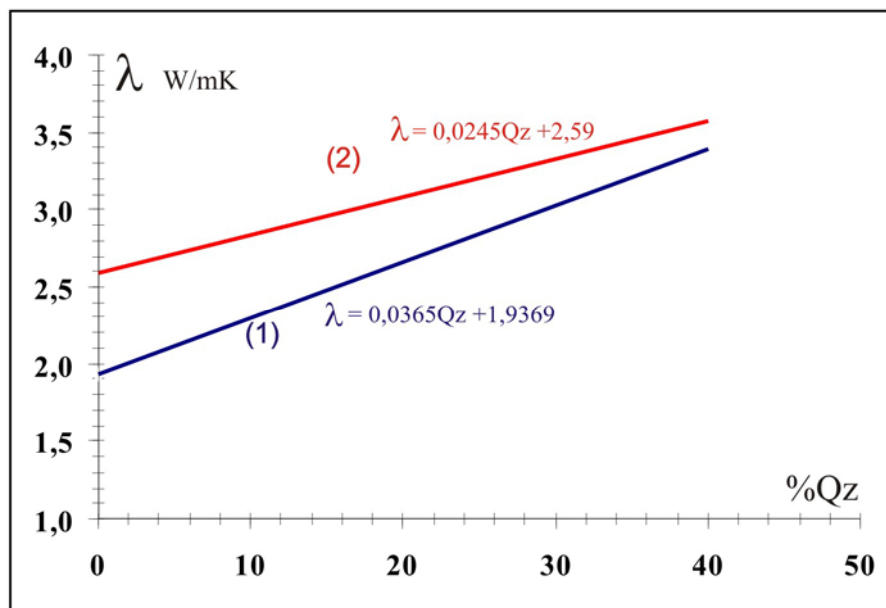


Figura 6.3 – Equações de reta obtidas a partir da % de quartzo e respectivas condutividades térmicas. (1) Equação obtida por este trabalho. (2) Equação obtida por Roy *et al* (1981).

6.3 Dilatação Térmica Linear (β)

A determinação do coeficiente de dilatação térmica linear (β) foi realizada por Lima (2002), em aproximadamente 20 granitos ornamentais. Nesse trabalho foram identificados os fatores que mais influenciavam os resultados, foram eles: quartzo e porosidade aparente.

Os litotipos de granulação média apresentaram valores médios 4% superiores em relação aos de granulometria grossa, resultado considerado desprezível por este autor. A reta de correlação foi gerada a partir da média entre as duas texturas, figura 6.4. Verificou-se que o incremento de 5% no conteúdo de quartzo implica num aumento médio de 16,5% da dilatação térmica linear.

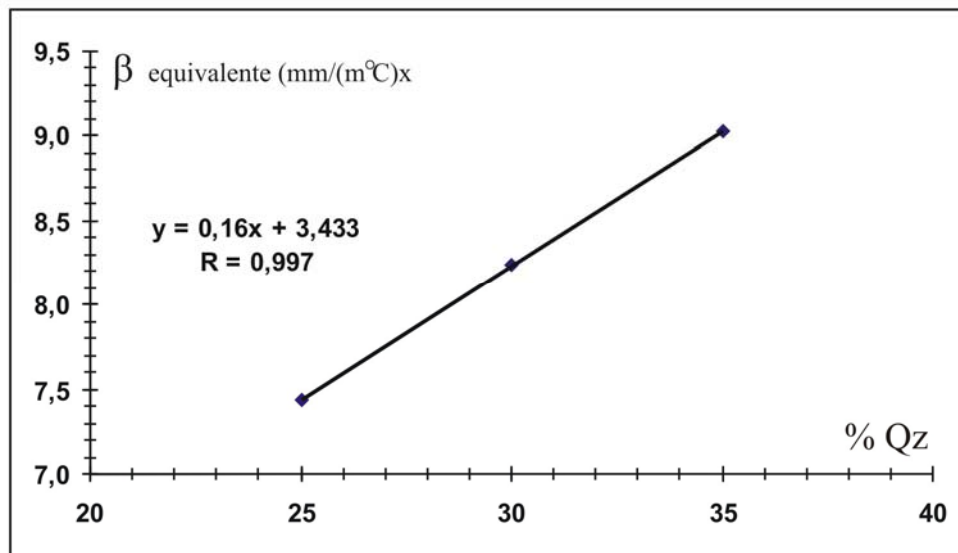


Figura 6.4 - Reta de correlação entre a % de quartzo (X) e a dilatação térmica linear (Y), média entre as duas texturas. R = Fator de correlação. Modificado de Lima (2002).

Com isso o coeficiente de dilatação térmica linear (β) pode ser então determinado a partir da equação 6.3 substituindo os valores referentes a “Y” e “X” por “ β ” e Qz, respectivamente:

$$\text{Eq. 6.3} \quad \beta = 0,16 \text{ Qz} + 3,433 - (A) \pm 15\%$$

Onde:

β = Dilatação térmica Linear em mm/(m. C)

Qz = % de quartzo

(A) = 2,3n; erro = $\pm 15\%$

n = porosidade aparente (considerada aqui = 0)

6.4 Correlação entre a Condutividade Térmica (λ) e a Dilatação Térmica Linear (β)

O objetivo aqui é demonstrar a importância da mineralogia, simplificada representada pelo quartzo, sobre a condutividade térmica e a dilatação térmica linear. É importante destacar que resultados a seguir servem apenas como indicador da correlação existente entre as duas variáveis através de um parâmetro em comum, % de quartzo. Estudos mais específicos são necessários para uma melhor aproximação entre os resultados e compreensão de outras possíveis variáveis diretamente relacionadas.

Substituindo, (equação 6.3):

$$Qz = \beta - 3,433 / 0,16$$

em: (equação 6.1)

$$\lambda = 0,0365 Qz + 1,9369$$

tem-se:

$$\lambda = 0,2294 \beta + 1,1528$$

Portanto o coeficiente de dilatação térmica linear (β) ou a condutividade térmica (λ) podem ser então obtidos de forma aproximada a partir da equação de reta proposta acima,

Onde:

λ = Condutividade térmica em W/mK.

β = Dilatação térmica Linear em mm/(m. C).

A figura 6.5 correlaciona os valores de condutividade térmica e dilatação térmica linear, calculados a partir das fórmulas propostas anteriormente.

Obs.: (fator de correlação = 1)

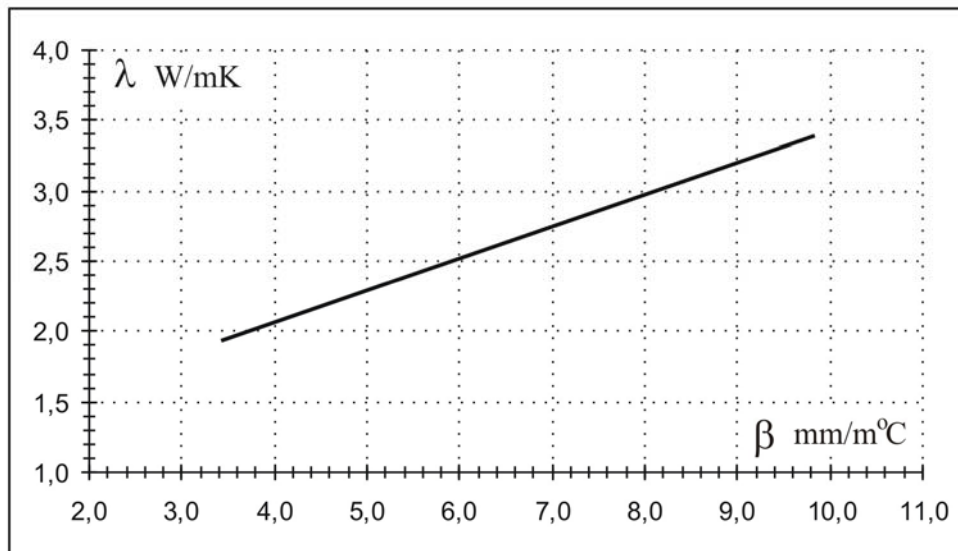


Figura 6.5 – Correlação entre a condutividade térmica e dilatação térmica linear calculada a partir das fórmulas propostas (variável comum % de quartzo).

6.5 Rochas Ornamentais e sua aplicação na Construção Civil

As rochas ornamentais quando utilizadas como revestimento na construção civil, além de seu papel decorativo servem de elemento durável protegendo superfícies externas e internas. Neste caso as rochas exercem as seguintes funções segundo Frazão & Paraguassu (1998):

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

Desta maneira devem atender vários requisitos de qualidade para que possam apresentar bom desempenho;

- a) Alta resistência ao intemperismo (exteriores);
- b) Baixa capacidade de absorção de líquidos;
- c) *Baixa dilatação térmica para garantir estabilidade do revestimento;*
- d) Alta resistência a abrasão;
- e) Alta resistência a flexão; e
- f) Aspecto estético agradável.

Portanto para se definir as características técnicas de cada litotipo, são recomendadas, diversas análises para a caracterização das rochas, tais como: resistência ao desgaste Amsler, análise petrográfica, coeficiente de dilatação térmica linear, índices físicos, resistência ao impacto de corpo duro, resistência a flexão, resistência a compressão uniaxial, etc. Os procedimentos para verificação destes parâmetros são normatizados e comumente seguem rigoroso controle. Diversas associações, dentre elas a ABNT, estabelecem os ensaios a serem realizados, tabela 6.1.

ENSAIOS	ASTM	DIN	AFNOR	UNI	ABNT	AENOR
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 a 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 a compressão	D-2938 C-170	52105	B-10509	9724/4	12767	22.185
Coefficiente 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 Amsler	C-241	52108	B-10518	2232	6481	23.183
Módulo de deformabilidade estática	D-3148	nd	nd	2234	nd	nd
Micro Dureza Knoop	nd	nd	nd	9724/6	nd	22,188

Tabela 6.1) Ensaios recomendados por diversas associações internacionais. ASTM: American Society for Testing and Material; DIN: Deustches Institut fur Norming; AFNOR: Association Français du Normalisation; UNI: Ente Nazionali in unificazione e Normazione di Itália; ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas, AENOR: Associacion Española de Normalizacion y Certificacion; nd: não disponível.

6.5.1 Condutividade Térmica e Aplicações na Construção Civil

Uma aplicação imediata do parâmetro condutividade térmica é no coeficiente de dilatação térmica linear que é solicitado por pelo menos duas associações: ASTM e ABNT. Este ensaio tem como principal finalidade avaliar a variação de volume da rocha quando submetida a mudanças de temperatura podendo dilatar ou contrair. Essa dilatação/contração, embora se manifeste de forma tridimensional, é medida de modo linear e expressa na forma de um coeficiente. Esse parâmetro é muito importante, especialmente quando se trata de materiais a serem utilizados tanto em revestimentos exteriores quanto interiores, uma vez que, se houver subdimensionamento das juntas de dilatação, poderá ocorrer deslocamento ou deformação das mesmas, Vidal *et. al* 1999.

Dessa forma quando tratamos da dilatação térmica estamos abordando o efeito físico da ação do calor sobre uma determinada amostra. Em grande parte dos casos, são tratados apenas os efeitos (dilatação) e não a causa (condutividade térmica). Na verdade deveriam ser avaliados inicialmente os fenômenos relacionados à condução do calor e sua relação com as propriedades da matéria (mineralogia, textura, granulometria, etc.) e só posteriormente os seus efeitos físicos.

Assim, em caso de contenção de custos e/ou escassez de tempo poderiam ser avaliados inicialmente os dados de condutividade térmica por possuírem baixos custos e serem de rápida execução, para que de forma indireta fossem obtidos os dados de dilatação térmica linear aproximados. Deve-se enfatizar que esses dados de

condutividade térmica poderiam ser utilizados ainda como importante parâmetro para o cálculo de conforto térmico em edificações como será visto no item a seguir. Destaca-se ainda que os ensaios de condutividade térmica, com o equipamento utilizado por este trabalho, podem ser realizados antes ou depois da aplicação do material evidenciando sua versatilidade, constituindo-se num método, rápido, fácil e não destrutivo.

Nos ensaios de alteração acelerada, além de outros parâmetros, é avaliada a resistência ao choque térmico após ciclos de aquecimento, em temperaturas elevadas e resfriamento imediato em água. Portanto há uma simulação de variações térmicas bruscas que propiciam dilatação e contração constantes, situação considerada uma das maiores causas de degradação de materiais rochosos na construção civil. Na aferição dessa degradação são realizadas avaliações visuais, testes com ondas ultra-sônicas e ainda teste da resistência mecânica para que seja determinada o grau de alteração da rocha. A determinação da condutividade térmica antes e depois dos ensaios de alteração poderiam servir como mais um parâmetro de avaliação nos ensaios de alteração acelerada, principalmente devido ao baixo custo e tempo de realização dos ensaios.

Lima (2006) realizando um estudo do comportamento do gnaiss Casa Blanca e suas variações faciológicas (Delicado e Falésia) em atmosferas agressivas demonstrou que entre esses três litotipos os resultados dos testes tecnológicos foram melhores para o Delicato, seguido pelo Casa Blanca e Falésia (fácies de um mesmo batólito). Notadamente a condutividade térmica medida (utilizando o mesmo equipamento desta pesquisa) mostrou uma correlação entre os resultados, ou seja, condutividade térmica mais alta para o delicato seguido pelo Casablanca e Falésia. Este comportamento demonstra que o parâmetro “condutividade térmica” poderá servir como ferramenta preditiva e avaliativa no que se refere aos resultados de ensaios tecnológicos e ainda no reconhecimento da integridade física de rochas.

O conhecimento das propriedades térmicas das rochas, tais como, condutividade e difusividade térmica, são importantes ainda para estudos de perfuração de rochas a jato supersônico quente quando se necessita determinar as taxas de penetração e área do corte assim como a temperatura de descamação. O conhecimento de tais parâmetros são determinantes na evolução do corte da rocha como sugerido por Viegas (2004).

No que diz respeito a aplicação de rochas ornamentais em especial mármore e granitos (granitos no sentido comercial) e sua relação com o conforto térmico tem-se

raríssimos registros na literatura especializada Caruso & Taioli (1982) trataram várias características tecnológicas de rochas ornamentais brasileiras dentre elas destacaram o problema da dilatação térmica linear e apresentam ainda alguns dados de condutividade térmica. Todavia não são realizadas discussões ou mesmo correlações entre os parâmetros, pois tratam-se de dados preliminares, possivelmente os primeiros diretamente relacionados a granitos ornamentais. A tabela 6.2 exhibe os dados obtidos (13 granitos ornamentais) de condutividade térmica onde são divididos em 4 grupos principais de acordo com os intervalos de condutividade. Notar que os valores possuem uma variação considerável e que provavelmente devem estar relacionados a medições pontuais de condutividade térmica em minerais sendo os resultados representativos dos limites mínimo e máximo encontrados em cada litotipo.

Grupo	Descrição		Condutividade Térmica	
	Nacional	Internacional	Varição	Valor Médio
1	Negro Tijuca	Tijuca Black	1,64 – 1,88	1,76
	Verde Ubatuba	Ubatuba Green	1,74 – 2,60	1,84
2	Roxo Gaúcho	Violet Purple	1,92 – 2,52	2,11
	Preto São Gabriel	S. Gabriel Black	1,92 – 2,98	2,32
	Cinza Mauá	Mauá Grey	2,34 – 2,40	2,36
	Champagne	Champagne	2,28 – 2,86	2,50
3	Vermelho Imperial	Imperial Red	2,34 – 2,70	2,53
	Cinza Continental	Continental Grey	2,12 – 2,96	2,58
	Juparaná	Juparana	2,64 – 3,08	2,81
	Dourado Carioca	Golden Carioca	2,38 – 3,26	2,82
	Rosa Biritiba	Biritab Pink	2,16 – 3,56	2,89
4	Capão Bonito	Capão Bonito	2,50 – 6,20	3,40
	Vermelho Bragança	Bragança Red	2,70 – 5,40	3,40

Tabela 6.2 – Condutividade Térmica de alguns Granitos ornamentais do Brasil, modificado de Caruso & Taioli (1982).

6.6 Condutividade Térmica vs Isolamento térmico em habitações

O isolamento térmico em habitações deve ser tratado com critério e levar em consideração vários aspectos. Por exemplo, as janelas segundo Serway (1992), são os elementos de um edifício que oferecem menos resistência ao fluxo de calor. Numa casa típica, cerca de um terço do calor total perdido durante o inverno ocorre através das janelas, os outros dois terços são perdidos por portas, paredes, etc. Por outro lado, no verão o fluxo de radiação solar para o interior aquece indesejavelmente as casas.

As rochas ornamentais são apenas um dos vários materiais utilizados na construção e representam diversos tipos litológicos que são extraídos em blocos para

posterior beneficiamento em diversas formas, principalmente em chapas. Seus principais campos incluem, a aplicação em edificações (revestimento de pisos e paredes), destacando revestimentos internos e externos, entre outros, Vidal et al. (1999).

Primeiramente se faz necessário uma avaliação dos intervalos de medidas dos vários materiais propostos no capítulo 2, figura 2.3. Se observarmos o intervalo dos materiais considerados bons isolantes térmicos, portanto, adequados para aplicação em ambientes, veremos o destaque de materiais como espumas, fibras, gases, etc. Sabe-se, entretanto, que materiais como as cerâmicas também funcionam como bons isolantes térmicos, sendo estes materiais um dos principais revestimentos de edificações assim como os materiais rochosos (piso, parede, etc.).

Enquanto a grande parte dos materiais isolantes não atingem 1 W/mK como o caso dos materiais cerâmicos, o intervalo de condutividade térmica das rochas pode variar entre $1,2$ a $7,5 \text{ W/mK}$ (Shön, 1996), mostrando assim uma variação bastante considerável. Numa avaliação crítica da aplicação de materiais rochosos nos mais variados ambientes deve-se levar em consideração que estes não são os melhores isolantes térmicos e que existem materiais com a mesma função (revestimento) com menores condutividades térmicas como, por exemplo, as porcelanas e porcelanatos. Entretanto a beleza estética dos materiais naturais e a resistência ao atrito em muitos casos superior ao de algumas cerâmicas induz o comprador a adquirir materiais rochosos como revestimento.

A idéia portanto é tentar unir parâmetros importantes tais como: resistência a abrasão, beleza estética, índices físicos, etc. com a condutividade térmica e sugerir parâmetros para as melhores aplicações possíveis culminando numa melhor aplicação e conforto térmico.

Como sugerido no capítulo 1, os três mecanismos de transporte de calor são condução, radiação e convecção. Este último mecanismo não será tratado por estarmos abordando um meio sólido. A condutividade térmica aplicada ao conforto térmico deve ser levada em consideração quando se tem o objetivo de avaliar o fluxo de calor, por exemplo, entre a parte externa e parte interna de uma parede, neste caso tentando diminuir ao máximo o efeito do calor sobre o ambiente desejado, externo ou interno. Já a radiação térmica deve ser levada em consideração principalmente em ambientes externos (pisos ou paredes) que recebem alta incidência solar durante o dia com o objetivo de

diminuir o efeito da temperatura sobre o corpo humano ou mesmo sobre ambientes externos como terraços, varandas, etc.

O estudo, avaliação e aplicação dos parâmetros térmicos em edificações já são previstos pela ABNT (2003)*a, b, c, d*, e abrangem muitas variáveis que vão desde o levantamento do tipo de material utilizado até o zoneamento bioclimático de várias cidades brasileiras e ainda recomendações e diretrizes construtivas para adequação da edificação ao clima local. A ABNT estabelece tais parâmetros para adequação climática de habitações com vários pavimentos.

O nivelamento dos picos de carga térmica é um importante fator para a concepção de sistemas de coberturas e paredes, uma vez que ele terá influência decisiva no dimensionamento de eventuais sistemas de condicionamento térmico artificial. Todavia pouca importância se tem dado no Brasil para a concepção de sistemas de coberturas e paredes e seus revestimentos, que leve em conta a influência destes no desempenho térmico e energético da edificação como um todo. Uma parede concebida erroneamente pode atuar como um painel radiante em horas impróprias, fazendo com que o usuário seja obrigado a recorrer a um sistema artificial de condicionamento térmico, que muitas vezes não resolve o problema. A concepção de paredes e coberturas com base no coeficiente global de transmitância térmica em regime permanente (U) é o mínimo que se espera como parâmetro de tomada de decisões dos projetistas, Granja & Labaki, (2003). Segundo a ABNT (2003)*b*, quanto aos materiais de construção que compõem a envoltória (paredes, piso e cobertura), duas características termofísicas seriam relevantes: a transmitância (U) e o atraso ou inércia térmica (ϕ).

Porém, análises que considerem a variação periódica dos parâmetros climáticos externos, e a capacidade de armazenamento térmico de coberturas e paredes, fazendo uso desta energia armazenada no momento apropriado, são primordiais para o projetista com consciência energética e ambiental. Quando se trata de conforto térmico variáveis como a transmitância térmica, resistência térmica, difusividade térmica, atraso térmico, etc. necessitam diretamente do parâmetro *condutividade térmica* sendo, portanto, de fundamental importância a determinação prévia desta variável.

A avaliação de desempenho térmico de uma edificação pode ser feita tanto na fase de projeto quanto após a construção e em relação à edificação construída, a avaliação pode ser feita através de medições *in-loco* de variáveis representativas do desempenho,

enquanto que na fase de projeto esta avaliação pode ser feita por meio de simulação computacional ou através da verificação do cumprimento de diretrizes construtivas.

A norma sugere, então, a divisão do território brasileiro em oito zonas relativamente homogêneas quanto ao clima e, para cada uma destas zonas, formulou-se um conjunto de recomendações técnico-construtivas que otimizam o desempenho térmico das edificações, através de sua melhor adequação climática. A norma adaptou ainda uma Carta Bioclimática a partir da sugerida por Givoni (1992), detalhada na figura 6.6.

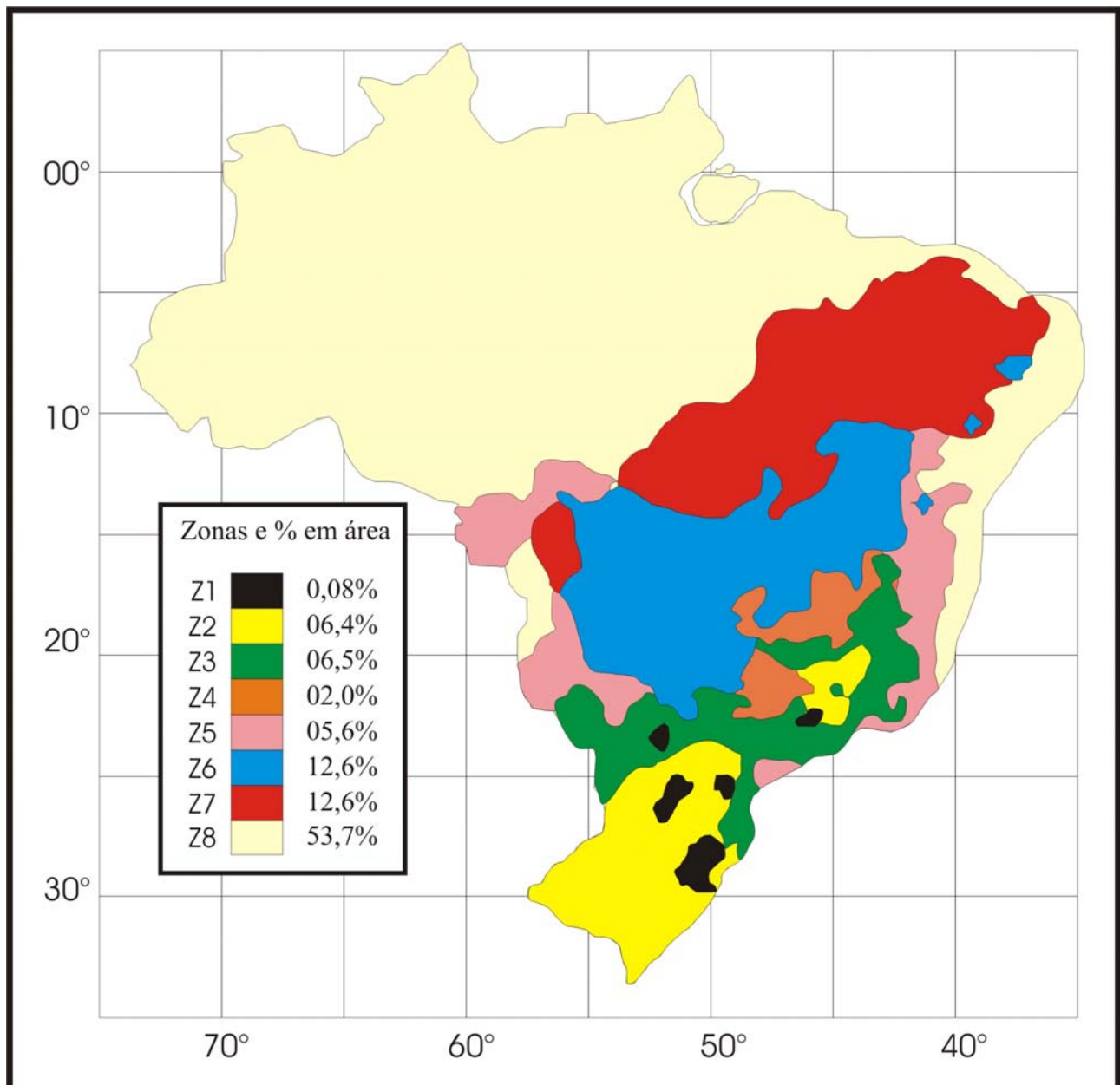


Figura 6.6 – Zonas bioclimáticas brasileiras, modificado de Givoni 1992.

Para a formulação das diretrizes construtivas - para cada Zona Bioclimática Brasileira e para o estabelecimento das estratégias de condicionamento térmico passivo, foram considerados os parâmetros (A, B, C e D) e condições de contorno seguintes:

- A) tamanho das aberturas para ventilação;
- B) proteção das aberturas;
- C) *vedações externas (tipo de parede externa e tipo de cobertura); e*
- D) estratégias de condicionamento térmico passivo.

Para efeito de estudo, para cada zona bioclimática, só será levado em consideração o parâmetro “C” supracitado, item diretamente ligado ao objetivo deste trabalho. A tabela 6.3 mostra o tipo de parede sugerida para cada zona bioclimática.

ZONA	1	2	3	4	5	6	7	8
Parede	Leve	Leve	Leve Refletora	Pesada	Leve Refletora	Pesada	Pesada	Leve Refletora
Transmitância Wm²/K	≤3,00	≤3,00	≤3,60	≤2,20	≤3,60	≤2,20	≤2,20	≤3,60

Tabela 6.3 – Tipos de paredes sugeridas para cada zona bioclimática e respectivos valores de transmitância térmica.

Na tabela 6.4 é possível observar ainda os dados referentes a resistência térmica e transmitância referentes as amostras de granitos ornamentais deste trabalho para uma espessura de 2 cm, (espessura padrão do mercado).

Portanto fica evidente que para o cálculo do tipo de parede a ser utilizada em cada zona bioclimática deve-se conhecer a sua respectiva transmitância térmica que dependerá da transmitância dos materiais envolvidos, que por sua vez dependerá diretamente dos respectivos valores de condutividade térmica.

Todavia se faz necessário primeiramente a obtenção da resistência térmica (**R**) que é a razão da sua espessura “e” de um dado corpo por sua condutividade térmica (**λ**) evidenciando que para uma mesma espessura menor será sua resistência térmica quanto maior for o valor de **λ**, e para um mesmo valor de condutividade térmica maior será sua resistência quanto maior for sua espessura, equação 6.1.

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad \text{eq.6.1}$$

A transmitância térmica por sua vez representa o inverso da resistência térmica, equação 6.2:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad \text{eq.6.2}$$

Onde:

U = Transmitância térmica;

R_T = Resistência térmica;

Com o objetivo de esclarecer os parâmetros propostos pela norma serão feitas algumas considerações e definidos alguns conceitos:

Em projetos de arquitetura, o importante é que a condução de calor constitui o mais poderoso instrumento, junto à radiação para controle das condições higrotérmicas internas das edificações, instrumentos extremamente necessários para se obter o conforto por meios passivos ou o mais baixo consumo de energia elétrica nos casos onde serão utilizados resfriamento ativo (ar condicionado), Krause *et. al.* (2005).

Apenas para efeito ilustrativo será proposto o exemplo de uma sala onde o ar será condicionado artificialmente (sala de computadores, por exemplo) e sua temperatura será mantida a 18 °C para que a temperatura resultante fique em torno dos 20-21 °C. Se as temperaturas das paredes desta sala forem muito superiores a 18 °C, ocorrerão trocas por convecção e o ar da sala não ficará naquele patamar exigido pelo projeto de 18 °C. Imaginemos que estamos em um instante que o Sol aparece e o exterior está a 37 °C. No instante seguinte a parede externa, em função do material que escolhemos sofre um incremento de temperatura e chega, a 40 °C. Tendo de um lado 40 °C e de outro 18 °C, inicia-se um fluxo de calor de fora para dentro que só irá parar quando as duas superfícies limites da parede estiverem em uma temperatura de equilíbrio.

Apenas para efeito de cálculo, simplificada mente imagina-se que a temperatura da superfície interna da parede seja a média entre a temperatura externa 40 °C e a temperatura do ambiente que é de 18 °C, ou seja, média de 29°C. A nova temperatura resultante de equilíbrio será $(18^\circ + 29^\circ)/2 = 23,5^\circ \text{C}$, obrigando portanto, o sistema de condicionamento de ar ser projetado para uma temperatura de entrada mais fria, o que gerará:

- um consumo maior de energia;

- um desconforto no usuário provocado pelo insuflamento de um ar a uma temperatura muito mais baixa que a circundante.

Desta forma, Krause *et al.* (2005), sugere que:

- os materiais devem ter o mínimo de absorção solar na superfície externa;
- *devem ser escolhidos materiais de baixa condutividade térmica (as menores possíveis);*
- ou na pior das hipóteses trabalhar com a espessura das paredes (quanto maior a espessura maior será a dispersão do calor).

Vale salientar que naturalmente a situação é ainda mais importante quando o ambiente não for climatizado, pois não teremos uma “fonte de frio” para compensar o fluxo de calor que estará chegando e outras alternativas deverão ser adotadas como por exemplo o incremento da ventilação cruzada.

Em termos gerais o que se pretende é fornecer dados de propriedades térmicas em especial de condutividade térmica de alguns dos principais granitos ornamentais utilizados no mercado brasileiro, com o intuito de favorecer os resultados de desempenho térmico pois os dados existentes na literatura são resultados aproximados, representativos de uma média realizada entre vários tipos de rochas. A idéia é fornecer dados mais específicos e precisos sobre 55 dos principais granitos ornamentais brasileiros permitindo uma melhor exatidão dos resultados de desempenho térmico de edificações, tabela 6.4.

Notadamente estes dados possuem ampla utilização, pois como já verificado podem ser aplicados em cálculos de resistência térmica, transmitância térmica e ainda em estudos que envolvam o atraso térmico, etc. fornecendo informações para cálculos de conforto térmico e ainda para dilatação térmica linear e índices físicos.

6.7 Condutividade Térmica vs Densidade

Um outro ponto a se destacar é o que tange a relação entre a densidade e a condutividade térmica de alguns dos materiais utilizados na construção civil. Sabe-se que além de outros parâmetros a condutividade térmica está intimamente relacionada a densidade dos materiais. Nota-se que ao se variar a densidade de um determinado material, por exemplo, um determinado tipo de espuma, ocorre claramente um aumento

da condutividade térmica associado. Contudo não se observam discussões a respeito de espumas com densidade similares, mas com variações muito importantes na condutividade térmica. Outros materiais como por exemplo, concretos podem sofrer variações importantes de condutividade térmica mas sempre com variações significativas na densidade. Este mesmo resultado vale para o gesso, madeiras, EPS, etc. ou seja, podemos observar variações importantes na condutividade térmica dos principais materiais, utilizados na construção civil mas as variações de densidade para um mesmo material são também relativamente consideráveis.

No caso de rochas ornamentais o que se quer demonstrar é que a variação da densidade é muito pequena com média entre 2,6 e 2,7 g/cm³, contudo, tem-se uma variação considerável na condutividade térmica o que pode ser de grande interesse no momento do cálculo estrutural associado ao conforto térmico e a parâmetros estéticos do material, permitindo assim, uma melhor avaliação dos resultados, pois pode-se associar parâmetros térmicos com a densidade e ainda com as características estéticas do “granito”. Os intervalos de condutividade térmica podem variar grandemente indo de 1,67 a 3,93 W/mK, como verificado na tabela 6.4. No conjunto de 55 amostras de granitos ornamentais foram selecionadas 16, tabela 6.5. Levou-se em consideração a representatividade mineralógica, química e textural dos litotipos de forma a cobrir todo o intervalo de variação de condutividade térmica. A figura 6.7 mostra a relação entre a condutividade térmica e a densidade de alguns materiais utilizados na construção civil, onde é possível observar a pequena variação da densidade dos granitos em função do grande intervalo de condutividade térmica.

Tabela 6.4 – Propriedades térmicas de alguns dos principais granitos ornamentais utilizados no mercado brasileiro.

Amostra	Condutividade Térmica (W/mK)	Capacidade Térmica Volumétrica (J/m ³ K)	Difusividade Térmica(m ² /s)	*Resistência Térmica (m ² K/W)	Transmitância Térmica (W/m ² K)	Nome Comercial	Nome	Local
A01	2,61	2,08	1,25	0,008	125,0	Cinza Elite	Tonalito	RN
A02	1,87	2,03	0,91	0,011	90,9	Ocre Itabira	Quartzo monzonito	ES
A03	3,09	2,14	1,44	0,006	166,7	Amarelo Laranjeira	Sienogranito	ES
A04	3,12	2,12	1,48	0,006	166,7	Branco Dallas	Sienogranito	BA
A05	2,44	2,10	1,16	0,008	125,0	Verde Ubatuba	Quartzo monzonito	ES
A06	2,96	2,19	1,35	0,007	142,9	Cinza Brunet	Tonalito	RN
A07	3,08	2,00	1,54	0,006	166,7	Dourado Carioca	Monzogranito	ES
A08	2,98	1,71	1,74	0,007	142,9	Juparaná Gold	Sienogranito	CE
A09	2,59	1,81	1,43	0,008	125,0	Cinza Real	Quartzo Sienito	ES
A10	3,23	1,87	1,73	0,006	166,7	Rosa Iracema	Monzogranito	CE
A11	2,08	1,85	1,10	0,010	100,0	Preto Absoluto	Gabro	PB
A12	2,76	1,96	1,41	0,007	142,9	Branco Pérola	Sienogranito	ES
A13	3,32	2,01	1,65	0,006	166,7	Branco Cristal	Sienogranito	CE
A14	3,72	2,08	1,79	0,005	200,0	Capão Bonito	Sienogranito	SP
A15	2,14	1,99	1,08	0,009	111,1	Morrom Brunet	Qz-alkali felds sien.	PE
A16	3,52	2,13	1,65	0,006	166,7	Vermelho Flores	Monzogranito	RN
A17	3,14	2,10	1,50	0,006	166,7	Vermelho Imperial	Monzogranito	RN
A18	3,33	2,12	1,57	0,006	166,7	Branco Savana	Monzogranito	CE
A19	2,08	2,03	1,02	0,010	100,0	Ás de Paus	Quartzo diorito	ES
A20	2,92	2,10	1,39	0,007	142,9	Meruoca Clássico	Sienogranito	CE
A21	2,75	2,04	1,35	0,007	142,9	Cinza Andorinha	Monzogranito	ES
A22	3,50	2,12	1,65	0,006	166,7	Amarelo St. Cecília	Al. Felds. Gran	BA
A23	1,93	2,10	0,92	0,010	100,0	Preto Ónix	Horn. gabro	ES
A24	2,96	2,19	1,35	0,007	142,9	Verde Caravelas	Monzogranito	BA
A25	3,79	2,23	1,70	0,005	200,0	Sucuru	Riolito	PB
A26	2,29	2,09	1,10	0,009	111,1	Lilás Imperial	Quartzo Sienito	PE
A27	2,68	2,08	1,28	0,008	125,0	Cinza Wave	Gnaisse monzo.	ES
A28	3,18	2,21	1,44	0,006	166,7	Amarelo Icarai	Sienogranito	ES
A29	3,61	2,26	1,60	0,006	166,7	Vermelho Brasília	Sienogranito	ES
A30	3,72	2,23	1,67	0,005	200,0	Verde Meruoca	Sienogranito	CE
A31	3,33	2,07	1,61	0,006	166,7	Verde Ceará	Sienogranito	CE
A32	3,26	2,01	1,62	0,006	166,7	Branco Aqualux	Sienogranito	ES
A33	2,90	2,04	1,42	0,007	142,9	Amarelo Minas	Monzogranito	ES

Tabela 6.4: Final

Amostra	Condutividade Térmica (W/mK)	Capacidade Térmica Volumétrica (J/m ³ K)	Difusividade Térmica (m ² /s)	*Resistência Térmica (m ² K/W)	Transmitância Térmica (W/m ² K)	Nome Comercial	Nome	Local
A34	3,09	2,10	1,47	0,006	166,7	Rosa Capri	Monzogranito	ES
A35	2,69	2,08	1,29	0,006	166,7	Branco Jabre	Granodiorito	PB
A36	3,15	2,12	1,49	0,007	142,9	Juparaíba	Monzogranito	PB
A37	3,11	2,16	1,44	0,006	166,7	Amarelo Capri	Monzogranito	N.D.
A38	2,64	2,14	1,23	0,008	125,0	Cinza Corumbazinho	Monzogranito	ES
A39	3,93	2,27	1,73	0,005	200,0	Preto Indiano	Biotita Gnaiss	ES
A40	3,12	2,19	1,42	0,006	166,7	Casablanca	Gn. Monzogranito	CE
A41	3,20	2,19	1,46	0,006	166,7	Caramelo Bahia	Monzogranito	BA
A42	2,87	2,18	1,32	0,007	142,9	Verde Top	Monzogranito	RN
A43	3,17	2,08	1,52	0,006	166,7	Red Dragon	Sienogranito	CE
A44	3,38	2,14	1,58	0,006	166,7	Verde Oceano	Monzogranito	N.D.
A45	2,15	2,05	1,05	0,009	111,1	Verde Navona	Alcali felds. Sienito	PR
A46	2,00	2,06	0,97	0,010	100,0	Branco Artico	Sienito	N.D.
A47	2,58	2,11	1,22	0,008	125,0	Azul Patara	Monzogranito	RO
A48	3,29	2,23	1,48	0,006	166,7	Juparaná Montiel	Monzogranito	CE
A49	3,09	2,19	1,41	0,006	166,7	Amarelo Maracujá	Sienogranito	ES
A50	2,43	2,13	1,14	0,008	125,0	Café Bahia	Qz Alca. Felds Sien.	BA
A51	3,58	2,25	1,59	0,006	166,7	Vino Bahia	Monzogranito	BA
A52	2,24	2,13	1,05	0,009	111,1	Azul Bahia	Quartzo Sienito	BA
A53	1,67	2,02	0,83	0,012	83,3	Blue Pearl	Quartzo sienito	Noruega
A54	2,24	2,14	1,05	0,009	111,1	Preto São Marcos	Qz Monzogabro	PB
A55	3,88	2,31	1,68	0,005	200,0	Chocolate Brasil	Sienogranito	ES
A56	3,69	2,11	1,75	0,005	200,0	Delicato	Gn. Monzogranito	CE
A57	2,99	2,04	1,47	0,007	142,9	Falésia	Gn. Monzogranito	CE

(*Resistência térmica de uma chapa de 2 cm de espessura)

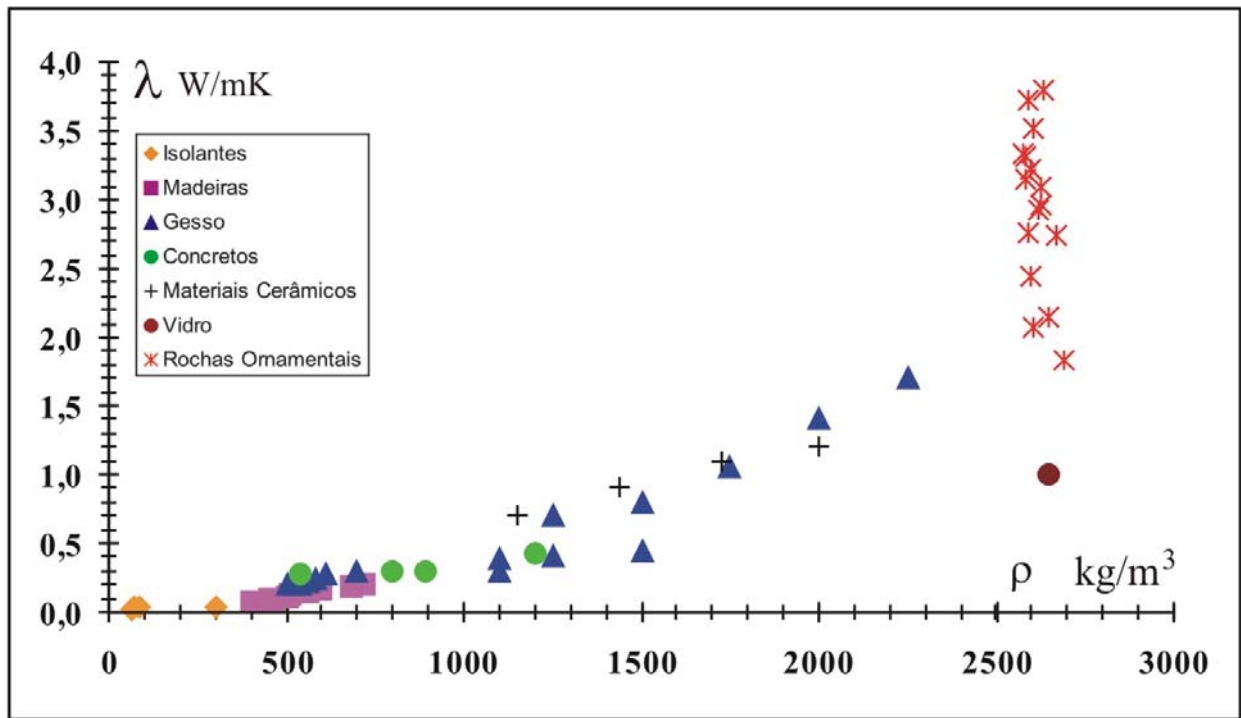


Figura 6.7 – Condutividade térmica vs densidade de alguns dos principais materiais utilizados na construção civil, incluindo 16 amostras de “granitos ornamentais”. Modificado do Laboratório de eficiência energética em edificações (2006).

Amostra	Nome Comercial	Densidade Kg/m ³
A02	Ocre Itabira	2691
A03	Amarelo Larajeira	2605
A04	Branco Dallas	2586
A05	Verde Ubatuba	2599
A06	Cinza Brunet	2626
A10	Rosa Iracema	2600
A12	Branco Perola	2588
A13	Branco Cristal	2585
A14	Vermelho Capão Bonito	2591
A15	Marrom Imperial	2651
A16	Vermelho Flores	2605
A19	Ás de Paus	2605
A21	Cinza Andorinha	2671
A24	Sucuru	2630
A30	Verde Meruoca	2616
A31	Verde Ceará	2575

Tabela 6.5 – Amostras selecionadas para os ensaios de densidade.



Capítulo 7

Considerações Finais e Sugestões

CAPÍTULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

A integração dos dados e posterior avaliação permitiram tecer algumas considerações e ainda sugestões para trabalhos futuros. As considerações finais abordaram os parâmetros mineralógicos, texturais (grosso/porfirítico e fino/médio) e suas relações com a condutividade térmica, enfatizando em alguns casos, resultados pioneiros sobre o tema propriedade térmica de rochas. A discussão dos dados permitiram ainda iniciar um debate a respeito do estudo das propriedades térmicas como parâmetro tecnológico com ênfase a área de conforto térmico e em outras áreas diretamente relacionadas a construção civil.

Os aspectos macroscópicos permitiram avaliar e correlacionar com bom grau de precisão o efeito da mineralogia (quartzo, plagioclásio, granada, etc.) de alterações (oxidações, etc.) com o aumento ou queda da condutividade térmica, servindo assim como ferramenta preditiva para o comportamento da condutividade térmica no meio rochoso.

Primeiramente no que diz respeito aos aspectos mineralógicos o quartzo mostrou as melhores correlações, sendo um mineral importante e decisivo no controle da condutividade térmica sua ausência ou presença implicarão em resultados muito diferenciados de condutividade térmica. Quando ausente a nova fase dominante (feldspatos, máficos, etc.) determinarão o comportamento da condução de calor, entretanto sempre com valores mais baixos quando comparados com os resultados obtidos com o quartzo.

Verificou-se que litotipos com mais de 20% de quartzo apresentaram condutividades térmicas superiores a 2,5 W/mK. Este resultado quando visualizado no diagrama QAP, (Streckeisen 1976) demonstra que as rochas graníticas (alcali-feldspato-granito, sienogranito, monzogranito, granodiorito e tonalito) tenderão a apresentar condutividades térmicas superiores as rochas com menos de 20% de quartzo (sienitóides, monzonitos, gabros, dioritos, etc.).

Os resultados observados para o plagioclásio e K-feldspato não são satisfatórios e mostram em todos os casos uma dispersão. Esta correlação é evidenciada em todos os gráficos inclusive no diagrama QAP (Streckeisen 1971). Os máficos, por fim, mostram

um papel decisivo na queda da condutividade, resultados confirmados ainda pelo QAP e pelas avaliações macroscópicas.

Quanto as texturas, nota-se uma melhor correlação para aquelas com tendência mais grossa ou porfirítica, mostrando em muitos casos melhores fatores de correlação quando se comparadas com as finas/médias.

A relação do tamanho dos minerais e a forma como estão distribuídos é determinante no comportamento da condutividade térmica. Proporções com mais de 20% de quartzo e com textura porfirítica tendem a favorecer a condução do calor quando comparadas com aquelas com menos de 20 % de quartzo e com textura fina/média.

No que diz respeito a geoquímica os dados serviram em grande parte para ratificar os dados de mineralogia e mostrou ser uma ferramenta que poderá servir como suporte para uma melhor compreensão da condutividades térmica em rochas. Ficou demonstrado a relação de alta condutividade em litotipos ácidos e baixas condutividades em litotipos intermediários a básicos. Em todos os casos ratificaram a importância do controle do SiO_2 no aumento da condutividade térmica. O aumento significativo de Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , TiO_2 (óxidos dominantes em minerais ferromagnesianos) implicam sempre numa queda relativa da condutividade térmica;

Rochas ácidas (>63% SiO_2) apresentaram no geral médias de condutividade térmica superiores a 2,5 W/mK, corroborando mais uma vez a mineralogia.

A relação da condutividade térmica e dilatação térmica linear mostrou-se satisfatória na medida que demonstra, a partir de uma variável comum (quartzo), ser possível obter resultados aproximados apenas com uma destas variáveis, o que poderá em algumas situações reduzir tempo e custos com ensaios de laboratório, tendo a vantagem de ser um ensaio não destrutivo.

Quanto aos aspectos relacionados a condutividade térmica fica clara a importância do conhecimento desta variável em aplicações na construção civil. Os resultados são úteis na medida que demonstram o comportamento da condutividade térmica a partir das principais variáveis envolvidas (mineralogia, textura, etc.) fornecendo assim dados mais aproximados dos mais variados materiais o que favorecerá cálculos mais precisos de desempenho térmico de edificações, dilatação térmica linear, estudos de perfuração de rochas a jato quente supersônico, etc.

Estudos mais aprofundados da condutividade térmica aliada a densidade dos materiais rochosos poderão servir como ferramenta adicional na escolha de materiais quando se levar em consideração aspectos do cálculo estrutural e do conforto térmico podendo ser determinante na escolha de um material mais adequado para cada situação.

Sugere-se para trabalhos futuros a ampliação das medidas de condutividade térmica e de outras propriedades térmicas para um maior conjunto de amostras de granitos ornamentais utilizados no mercado brasileiro, o que poderá favorecer a criação de um banco de dados de propriedades termofísicas de rochas com fins ornamentais.

A realização de trabalhos que enfoquem as rochas metamórficas e suas características (foliação, bandamento, lineação, etc.) podem contribuir significativamente inclusive com avaliações macroscópicas (qualitativas) comparando com resultados de condutividade térmica (quantitativos) e outros parâmetros térmicos.

Referências Bibliográficas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A

ABNT (2003)a. “*Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades*” Projeto 02:135.07-001. p.7.

ABNT (2003)b. “*Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*” Projeto 02:135.07-001/2. p.21.

ABNT (2003)c. “*Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social*” Projeto 02:135.07-001/3. p.23.

ABNT (2003)d. “*Desempenho térmico de edificações Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida*” Projeto 02:135.07-001/4. p.8.

Adl-zarrabi, B. (2004). “*Thermal Properties: heat conductivity and heat capacity determined using the TPS method and mineralogical composition by modal analysis*”. Swedish Nuclear Fuel. p.2-29.

B

Best, M.G. (1982). “*Igneous and Metamorphic Petrology*”. San Francisco: W.H. Freeman and Company. 630p.

C

Caruso, L,G; & Taioli, F, (1982). “*Os mármore e granitos brasileiros: seu uso e suas características tecnológicas*”. Rochas de Qualidade, V 12, n67, p 11-22.

Cermak, V. L. & Rybach, (1982). “*Thermal properties, In: Landolt-Börnstein numerical Data and Funtional relationships in science and technology*”. Ed. K-H. Hellwege, New series; group V. Geophysics and Space Research, vol. 1 Physical Properties of Rocks,. Springer-Verlag Berlin. Heidelberg. New York. p, 305-371.

CETEM (2002) – “*Catálogo de Rochas Ornamentais do Brasil*”. CD-ROM – CETEM/ABIROCHAS/APEX – São Paulo.

Clark, JR. S.P. (1966). “*Handbook of Physical Constants*“. The geological Soc. Am., Inc; New York.

Clauser, C. & Hueges, E; (1995). “*Thermal Conductivity of Rocks and Minerals*”. AGU Handbook of Physical Constants. Am. Geophys. American Geophysical Union. Section 39. p. 105-126.

CRONOBORO (2005) – “*Distribuição dos sedimentos cenozóicos nas bacias Pernambuco-paraíba, Potiguar e ceará, como função da epirogenia cenozóica da província borborema*”. Relatório Técnico Final inédito – PETROBRAS/PPGG-UFRN.

D

Dana, J.D. (1969). “*Manual de Mineralogia*”. Ed. Livros Técnicos e Científicos. São Paulo. cap 2, p.4-35.

Dortman, N.B. (1976). “*Fizicheskie svoystva gornich porod i polenich isiskopamysh*”. Izdat. Nedra, Moskva, p. 93-105.

Diment, W. H., & H. R. Pratt. (1988). “*Thermal conductivity of some rock-forming minerals: a Tabulation, U.S.G.S*”. Open report, Denver Co. pp 88-690.

Dreyer, W., (1974). “*Properties of Anisotropic Solid-State Materials: Thermal and Electric Properties*” (Materialverhalten anisotroper Festkörper: Thermische und elektrische Eigenschaften), Springer, Wien, (in German), 295 pp.

F

Fonseca, M. R. M. (1992). “*Química Geral. Físico-Química*”, Ed. FTD, São Paulo. cap. 1. p.8-34.

Frazão, E.B. & Paraguassu, A.B. (1998). “*Materiais rochosos para construção*”. Geologia de Engenharia. São Paulo, ABGE/CNPq/FAPESP. cap.20 p.331-342.

G

Galindo, A.C. (1993). “*Petrologia dos Granitóides Brasileiros da região de Caraúbas-Umarizal (Oeste do Rio Grande do Norte)*”. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 144 p. il. Tese (Doutorado em Geoquímica e Petrologia) - Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, CG, UFPA.

Galindo, A.C.; Silva, Dantas, E. L.; Laux, J.H.; Maia, S.M.C.; Souza, Z.S.; Silva, F.C.A.; (2005)a. “*Magmatismo Anorogênico Ordoviciano na Porção Centro Norte do Domínio Seridó, Província Borborema: O Granito Flores*”. Simp. de Geol. do NE. Resumos expandidos. Bol.19 p.133.

Galindo, A.C; Silva, F.C.A; Plácido, J.S; Cavalcante, R; Jardim de Sá, E.F (2005)b. “*Diques Micrograníticos da Região de Angicos (RN): Aspectos Geológicos, Petrográficos e Litogeoquímicos*”. Simp. de Geol. do NE. Resumos expandidos. Bol.19 p.147.

Galindo, A.C; Cavalcante, R. Silva, F.C.A; Souza, Z.S; Lins, F.A.P.L; Sousa, A.A.T; Costa, L.S. (2005)c. “*Magmatismo Granítico Tipo Itaporanga no Maciço São José do Campestre (Leste da Faixa Seridó): Litogeoquímica e Condições de cristalização do Batólito Barcelona*”. Simp. de Geol. do NE. Resumos expandidos. Bol.19 p.143.

Givoni. (1992). “*Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines*”. Energy and Building, 18 (1), p.11-23.

Granja, A. D. & C.L. Labaki. (2003). “*Duas paredes idênticas em regime permanente: comparação de desempenho em regime periódico*”. VII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído (ENCAC) e III Conferência Latino Americana sobre Conforto e Desempenho Energético de Edificações (COTEDI), Vol. 1, pp.1269-1276, Curitiba, PR, Brasil.

Grolier, J.; Fernandez, A.; Hucher, M; Riss, J. (1991). “*Les Proprietes Physiques des Roches*” – Theories et Modèles. Éditeurs Masson. cap 17. p 285-319.

Guéguen, Y & Palciauskas, V. (1992). “*Introduction à la Physique dès Roches*”. Hermann Éditeurs des Sciences et des Arts, Paris. Cap 10 p. 257-279.

Guimarães, I.P. (1989). “*The petrological evolution and tectonic association of the Bom Jardim Complex, Pernambuco State, NE-Brasil*”. (Doctor’s Thesis). London Imperial College. Royal School of Mines Depto. Geol. 33p.

H

Horai, Ki-iti. (1971). “*Thermal Conductivity of Rock-Forming Minerals*”. Journ Geophys. Research, 76, NO. 5, p. 1278-1308.

I

Incropera, F & Witt, D.P. (1981). “*Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*”. Ed. Livros Técnicos e Científicos. São Paulo. cap. 1, p. 2-14.

K

Kapelmeyer, O.R. & Haenel. (1974). “*Geotermics*”. Geop exploration Monographs. Series 1 – No. 4 (O. Rosenbach, C. Morelli, eds), Gebr. Borntraeger, Berlin, Stuttgart.

KIRSCH, H. (1965). “*Mineralogia Aplicada*”. Ed. USP. São Paulo p. 46-52.

- Kobranova, V. N. (1989). “*Petrophysics*”. MIR Publ. Moscow, Springer-Verlag Berlin-Heildlberg-New York-London-Paris-Tokyo-Hong Kong, 376p.
- Krause, C.B.; Santos M,J,O; Niemeyer, M.L; Porto, M.M; Gomes, A.M.R.C; Teixeira, K.C; Gomes, J.C.P, (2005). “*Bioclimatismo no projeto de arquitetura: dicas de projeto*”. PROARQ-DTC-UFRJ. p. 82

L

- LABORATÓRIO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (2006). “*Condutividade térmica vs densidade de alguns dos principais materiais utilizados na construção civil.*” www.labeee.ufsc.br. Data do último acesso: 09/01/2006.
- Lima, M.A.B (2006) “*Estudo do Comportamento dos Gnaisses Casablanca, Juparaná Delicato e Giallo Falésia (Ceará-Brasil) em Atmosfera Salina.*”. Tese de Doutorado. Unesp. p. 150.
- Lima, J.J.C. (2002). “*Estudo da dilatação térmica de rochas usadas em revestimentos de edificações*” Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Paulo. 121p.

M

- Mattos, I.C. (2005). “*Geologia, Petrografia, geoquímica, comportamento físico-mecânico e alterabilidade das rochas ornamentais do stock granítico Serra do Barriga, Sobral (CE)*” Tese 206 (Doutorado em Geologia Regional). Instituto de geociências e ciências exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- Maqsood, A; Rehman, M.A; Gul, I, H. (2003). “*Chemical Composition, Density, Specific Gravity, Apparent Porosity, and Thermal Transport Properties of Volcanic Rocks in the Temperature Range 253 to 333 K*”. *J. Chem. Eng. Data*, 48, 1310-1314.
- Maqsood, A; Gul, I, H.; Rehman, M.A; (2004)a. “*Measurement and Analysis of Thermophysical Properties of Diorites in the Temperature Range from 253 to 333K*”. *International Journal of Thermophysics*, vol. 25, No. 6, November.
- Maqsood, A; Gul, I, H.; Rehman, M.A; (2004)b. “*Thermal transport properties of granites in the temperature range 253–333K*”. *J. Phys. D: Appl. Phys.* vol 37, 1405–1409.
- Maqsood, A; Karam, K; Gul, I, H. (2004)c. “*Prediction of thermal conductivity of granite rocks from porosity and density data at normal temperature and pressure: in situ thermal conductivity measurements*”. *Journal of Physics D: Applied Physics*. p. 3396-3401.
- Maragoni, Y.R; & M.I.B. Raposo (1988). “*Condutividade térmica dos diferentes litotipos vulcânicos da bacia do Paraná*”. *Rev. Bras. de Geof*”. vol. 6. p. 25-31.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. (2005). “*Thermal Conductivity of periodic table elements*”. Disponível em: <<http://web.mit.edu/3.09/www/pt/pertl4.html>> último acesso em 30 de dezembro de 2005.

Melnikov, N.W., W.W. Rshewski, M.M. Prodotjakonov (1975). “*Fiziceskich svoistv gornich porod, Izdat*”. Nedra, Moskva.

N

Nascimento, M.A.L. (2000). “*Petrologia do Magmatismo Tardi-Brasiliano no Maciço São José de Campestre (RN/PB), com ênfase no Plúton Alcalino Caxexa*”. Tese de Doutorado - Curso de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, UFRN. Natal, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. 164 p.

Navarro, F.C. (2002). “*Caracterização petrográfica como técnica para a previsão do comportamento físico e mecânico de granitos ornamentais*” Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. 88p.

P

Paim, M.M, Conceição, H. Rosa, M.L.S, Filho, B.E.C, Santos, E.B, Peixoto, A.A, Leahy, G.A.S. (1998). “*Café Bahia maciço de cara suja: petrologia de uma intrusão tardia do batólito monzonítico de guanambi-urandi (sudoeste da Bahia) e implicações geoquímicas para a gênese dos magmas sieníticos alcalino-potássicos*”. Contribuição ao estudo dos granitos e rochas correlatas. n 5 p.44-60.

R

Rosa, M.L.S, Conceição, H., Macambira, M.J.B., Marinho, M.M, Cunha, M.P, Menezes, R.C.L (2004). “*Azul Bahia: Idade Pb-Pb e Aspectos petrológicos da mineralização em sodalita azul do maciço nefelina-sienítico itarantim, sul do estado da Bahia*”, Rev. Brás. de Geoc. vol. 34(3):347-354.

S

Seipold, U. & Huenges, E. (1997). “*Thermal properties of gnaisses and amphibolites – high pressure and high temperature investigations of KTB-rock samples*”. Elsevier, Tectonophysics, 291, p. 173-178.

Serway, R.A. (1992). “*Movimento Ondulatório e Termodinâmica*”. Ed. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro. cap. 19, p. 65-92.

Schön, J.H. (1996). “*Physical Properties of Rocks: Fundamentals and principles of petrophysics*”. Ed. Pergamon. cap 8. p.323-378.

Silveira, L.G.D. (2006). “*Caracterização geológica, geoquímica e geocronológica do Granitóide Neoproterozóico Serrinha, Leste do Rio Grande do Norte. Dissertação de Mestrado, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica.*

Streckeisen, A.L. (1976). “*To Each Plutonic Rock Its Proper Name*”. Earth Sci. Rev., 12: 1-33.

V

Vidal, F.W.H., Bessa, M.F., Lima, M.A.B. (1999). “*Avaliação das Rochas Ornamentais do Ceará através de suas características tecnológicas*”. CETEM/MCT (Série Tecnológica Mineral – 74), Rio de Janeiro. 30p.

Viegas, F. L. (2004) “*Perfuração de Rochas por Jato Supersônico Quente*”. Dissertação de Mestrado. INPE. São José dos Campos. 145 p.

Vosteen, H.D & Schellschmidt, R. (2003). “*Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and diffusivity for different types of rocks*”. Physics and Chemistry of the Earth. p. 499-509.

W

Wienand, J. A.; Rauen, E.; Huenges, C.; Bucker, K.E (1989). “*Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor: 3000-3500 m*”. KTB-Report 89-5, D1-D50, Hannover.

Wenk, H.R., E. & Wenk (1969). “*Physical Constants of Alpine Rocks (density, Porosity, Specific Heat, Thermal Diffusivity and Conductivity)*”, Beitrage zur Geology der Schweiz Nr. 45 Leemann AG Zürich, p. 343-357.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)