

Universidade Federal de
Santa Catarina
Programa de Pós-
Graduação em Ciência
e Engenharia de
Materiais
Campus Universitário
Trindade
Florianópolis- SC

Dissertação apresentada ao programa de Pós-
Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais
da Universidade Federal de Santa Catarina como
parte dos requisitos para a obtenção do título de
Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Celso Peres Fernandes

Coorientador: Prof. Dr. Saulo Güths

Florianópolis, 2013

ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM ROCHAS SEDIMENTARES
EURIDES DE SOUZA NUNES

ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM ROCHAS SEDIMENTARES

EURIDES DE SOUZA NUNES

Uma das áreas de
pesquisa em materiais é
a de materiais
porosos, tendo como
uma das aplicações o
estudo da condutividade
térmica em rochas
porosas. Neste trabalho,
utilizou-se o método
transiente da sonda
térmica, por meio do
qual foi determinada
experimentalmente a
condutividade térmica
efetiva de seis amostras
testemunhos: uma de
argamassa, uma de gel
e quatro de rochas
sedimentares.

Orientador: Prof. Dr.
Celso Peres Fernandes

Coorientador: Prof. Dr.
Saulo Güths



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

EURIDES DE SOUZA NUNES

ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM ROCHAS
SEDIMENTARES

Florianópolis, 2013

EURIDES DE SOUZA NUNES

ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM ROCHAS
SEDIMENTARES

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Celso Peres Fernandes

Coorientador: Prof. Dr. Saulo Güths

Florianópolis, julho de 2013

Nunes, Eurides de Souza
ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM ROCHAS
SEDIMENTARES

/ Eurides de Souza Nunes; orientador, Celso
Peres Fernandes; co-orientador, Saulo Güths.
- Florianópolis, SC,
2013.

97 p.

Dissertação (mestrado) -
Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico.
Programa de Pós-Graduação em Ciência
e Engenharia de Materiais.

Inclui referências

1. Ciência e Engenharia de
Materiais. 2. Determinação
experimental da condutividade térmica
efetiva de rochas sedimentares e de
argamassa. 3. Determinação com uso
dos modelos matemáticos das
condutividades térmicas das matrizes
sólidas de rochas sedimentares e de
argamassa. 4. Análise da
aplicabilidade de modelos matemáticos
para a condutividade térmica de
rochas sedimentares. I.
Fernandes, Celso Peres. II. Güths,
Saulo. III. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Ciência e Engenharia de
Materiais. IV. Título.

Eurides de Souza Nunes

ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM ROCHAS
SEDIMENTARES

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais e aprovada, em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, julho de 2013

Prof. Antônio Pedro Novaes de Oliveira, Dr.-Ing.-
Coordenador do Curso

Banca Examinadora

Prof. Celso Peres Fernandes, Dr.-Ing.- Orientador

Prof. Saulo Güths, Dr.-Ing.- Coorientador

Prof. Celso Peres Fernandes, Dr.-Ing.- Presidente

Prof. Carlos Antônio Queiroz, Dr.-Eng. - Membro Externo

Prof. Márcio Celso Fredel, Dr.-Ing. - Membro

Prof. Vicente de Paulo Nicolau, Dr.-Ing. - Membro Externo

“A minha mãe que sempre me apoiou
e incentivou a lutar pelo meu espaço”

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde e energia suficientes para o enfrentamento dos obstáculos encontrados;

A minha esposa Rosemeri, por ter me auxiliado na diagramação deste trabalho;

As minhas filhas: Mellissa, Fernanda e Sara por me escutarem, em momentos difíceis;

Ao meu orientador Celso Peres Fernandes, pelo apoio e a oportunidade oferecida;

Ao meu coorientador Saulo Güths, pela ajuda e pelo acompanhamento durante toda pesquisa;

A banca, pela contribuição na melhoria da qualidade desta pesquisa;

Ao professor André R. de Sousa pelo apoio em metrologia;

A todos os colegas do LMPT, pelo “bate papo” e momentos de convívio;

À funcionária Helenita, pela simpatia e competência;

Aos meus colegas: Marcão, Ivan, Ida, Cesar e Jaime, que, de uma forma ou de outra, contribuíram nesta minha pesquisa;

À Universidade Federal de Santa Catarina, ao Departamento de Engenharia Mecânica e ao programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho;

Ao IFSC pelo afastamento das minhas atividades como docente;

A todos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

“Nem tudo que se enfrenta pode ser modificado, mas nada pode ser modificado até que seja enfrentado.”

Albert Einstein

RESUMO

Uma das áreas de pesquisa em materiais é a de materiais porosos, tendo como uma das aplicações o estudo da condutividade térmica em rochas porosas. Neste trabalho, utilizou-se o método transiente da sonda térmica, por meio do qual foi determinada experimentalmente a condutividade térmica efetiva de seis amostras testemunhos: uma de argamassa, uma de gel e quatro de rochas sedimentares. Inicialmente determinou-se a condutividade térmica efetiva da argamassa seca, por meio do método transiente da sonda térmica e do método fluximétrico, em seguida a condutividade térmica efetiva da argamassa saturada com água deionizada e das quatro amostras de rochas nas condições de rochas secas e saturadas com água deionizada e, por último, de uma amostra de gel. As porosidades das amostras porosas foram obtidas utilizando o método baseado na densidade. Aproximadamente, a porosidade da argamassa determinada foi de 26%, das rochas SDO 335 e SDO 342 de 10%, e das rochas WLO 307, WLO 342 de 15%. Finalmente, utilizando a equação de Maxwell modificada e os modelos estruturais básicos: modelo paralelo, modelo série, EMT (teoria do meio efetivo) e modelo de Maxwell-Eucken, determinaram-se as condutividades térmicas das matrizes sólidas das amostras porosas: argamassa do tipo comercial e das rochas sedimentares identificadas como, ROCHA SDO 335, SDO 342, WLO 307 e WLO 342, todas fornecidas pelo CENPES/PETROBRAS.

Palavras-chave: Sonda térmica, materiais porosos, método transiente térmico.

ABSTRACT

Porous materials represents one area of research and it is one of its applications the study of thermal conductivity in porous rocks. In this study, using the transient method of thermal probe, determined the effective thermal conductivity of six sample testimonies experimentally: a mortar one, a gel one and four made of sedimentary rocks. Initially, it was determined the effective thermal conductivity of the dry mortar by using the transient thermal probe method and the fluxmetric method. Then, it was determined the effective thermal conductivity of the mortar saturated with deionized water; of the four rock samples in the conditions of rocks dried and saturated with deionized water. Lastly the effective thermal conductivity of a gel sample. The porosity of the porous samples was obtained by using the method based on density. Approximately, the porosity of the mortar determined was of 26% in SDO 335 rocks, 10% in SDO 342 and 15% in WLO 307 and WLO 342 rocks. Finally, by using the modified Maxwell equation and the basic structural models: parallel model, series model, EMT (effective medium theory) and Maxwell-Eucken model. It was established the thermal conductivity of the porous samples solid matrices: business mortar and the sedimentary rocks identified as SDO 335, SDO 342, WLO WLO 307 and WLO 342 ROCKS, all supplied by CENPES / PETROBRAS.

Keywords: Thermal probe, porous materials, thermal transient method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Representação dos diferentes tipos de poros.....	26
Figura 2	Fratura e porosidade total.....	27
Figura 3	Seção ilustrativa de um sólido poroso com representação dos diferentes tipos de poro.....	28
Figura 4	Experimento de condução térmica em regime estacionário.....	31
Figura 5	Ilustração: modelo paralelo.....	34
Figura 6	Ilustração modelo série.....	35
Figura 7	Ilustração modelo EMT.....	35
Figura 8	Ilustração modelo Maxwell-Eucken.....	36
Figura 9	Ilustração Placa Quente Protegida.....	39
Figura 10	Ilustração: modelo Fluximétrico.....	41
Figura 11	Diagrama esquemático do arranjo experimental- Universidade de Manchester.....	43
Figura 12	Transiente de temperatura adimensional.....	45
Figura 13	Curva típica de evolução de temperatura na sonda....	49
Figura 14	Amostras de rochas.....	51
Figura 15	Amostra de argamassa.....	51
Figura 16	Aparato experimental.....	52
Figura 17	Ilustração da sonda térmica utilizada.....	53
Figura 18	Sonda térmica.....	54
Figura 19	Varição de temperatura da sonda em função do $\ln t$..	61
Figura 20	Segmentos de retas obtidos a partir da Figura 19 em intervalos de tempo diferentes.....	62
Figura 21	Varição de temperatura da sonda em função do $\ln t$..	66
Figura 22	Reta obtida a partir da Fig.21.....	66
Figura 23	Varição de temperatura da sonda em função do $\ln t$..	68

Figura 24	Reta obtida a partir da Fig.23.....	68
Figura 25	Varição de temperatura da sonda em função do lnt..	70
Figura 26	Reta obtida a partir da curva da Fig.25.....	70
Figura 27	Varição de temperatura da sonda em função do lnt..	71
Figura 28	Reta obtida a partir da curva da Fig. 27.....	72
Figura 29	Varição de temperatura da sonda em função do lnt..	73
Figura 30	Reta obtida a partir da curva da Fig. 29.....	73
Figura 31	Varição de temperatura da sonda em função do lnt..	74
Figura 32	Reta obtida a partir da curva da Fig.31.....	75
Figura 33	Varição de temperatura da sonda em função do lnt..	76
Figura 34	Reta obtida a partir da Fig.33.....	76
Figura 35	Varição de temperatura da sonda em função do lnt..	77
Figura 36	Reta obtida a partir da Fig.35.....	78
Figura 37	Varição de temperatura da sonda em função do lnt..	79
Figura 38	Reta obtida a partir da Fig.37.....	79
Figura 39	Varição de temperatura da sonda em função do lnt..	80
Figura 40	Reta obtida a partir da Fig.39.....	81
Figura 41	Varição de temperatura da sonda em função do lnt..	82
Figura 42	Reta obtida a partir da Fig.41.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Informações técnicas da pasta térmica.....	54
Tabela 2	Dimensões das amostras de rochas.....	56
Tabela 3	Análise da repetitividade da sonda térmica.....	58
Tabela 4	Determinação da incerteza combinada.....	60
Tabela 5	Condutividade térmica efetiva para um tempo muito grande, tomado oito intervalos de tempos diferentes, SDO 335 seca.....	63
Tabela 6	Condutividade térmica efetiva para argamassa seca e fora da estufa sem preenchimento, com preenchimento de gel e preenchimento de pasta térmica.....	65
Tabela 7	Condutividade térmica efetiva - argamassa seca.....	67
Tabela 8	Condutividade térmica efetiva - argamassa saturada....	69
Tabela 9	Condutividade térmica efetiva – rocha SDO 335 seca..	71
Tabela 10	Condutividade térmica efetiva – rocha SDO 335 saturada.....	72
Tabela 11	Condutividade térmica efetiva - rocha SDO 342 seca..	74
Tabela 12	Condutividade térmica efetiva – rocha SDO 342 saturada.....	75
Tabela 13	Condutividade térmica efetiva – rocha WLO 307 seca.	77
Tabela 14	Condutividade térmica efetiva - rocha WLO 307 saturada.....	78
Tabela 15	Condutividade térmica efetiva - rocha WLO 342 seca.	80
Tabela 16	Condutividade térmica efetiva- rocha WLO 342 saturada.....	81
Tabela 17	Condutividade térmica efetiva - Carbogel pH neutro...	83
Tabela 18	Porosidades e as densidades das matrizes sólidas.....	84
Tabela 19	Condutividades térmicas das matrizes sólidas.....	85
Tabela 20	Condutividade da matriz sólida argamassa.....	86

Tabela 21	Condutividade da matriz sólida rocha SDO 335.....	86
Tabela 22	Condutividade da matriz sólida rocha SDO 342.....	86
Tabela 23	Condutividade da matriz sólida rocha WLO 307.....	87
Tabela 24	Condutividade da matriz sólida rocha WLO 342.....	87

LISTA DE SIGLAS

AQUIS	Sistema de Aquisição de Sinais;
CENPES	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello, Petrobrás;
EES	Engineering Equation Solver;
GEL	CARBOGEL;
Grad	Gradiente;
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement;
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia;
ISO	International Organization for Standardization;
LABTERMO	Laboratório de Ciências Térmicas, UFSC;
LMPT	Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas, UFSC;
PIM	Processo de Injeção de Mercúrio;
S	Propriedade da parte sólida;
Sat	Saturada;
SI	Sistema Internacional de Unidades;
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina.

LISTA DE SÍMBOLOS

T	Temperatura [K]
T_s	Temperatura da sonda [K]
ΔT	Variação de temperatura [K]
$T(x, y, z)$	Campo de temperatura
t	Intervalo de tempo [s]
Δx	Comprimento [m]
x, y, z	Posição [m]
A	Área [m ²]
A	Coefficiente angular
q''_x	Taxa de transferência de calor na direção x [W]
\bar{q}''_x	Fluxo de calor na direção x [Wm ⁻²]
Q	Potência térmica da sonda por unidade de comprimento da sonda [Wm ⁻¹]
R_m	Resistência elétrica por unidade de comprimento do fio [Ωm ⁻¹]
i	Corrente elétrica [A]
λ	Condutividade térmica [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
λ_s	Condutividade térmica da parte sólida [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
λ_m	Condutividade térmica efetiva média [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
$\bar{\nabla}$	Gradiente
$\bar{\nabla}T$	Gradiente de temperatura [Km ⁻¹]
$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$	Vetores unitários
f	Fator de estrutura (ponderação) empírico
v	Fração de volume
ρ	Densidade [kgm ⁻³]
ρ_s	Densidade da parte sólida [kgm ⁻³]
ε	Porosidade
V_P	Volume ocupado, geralmente por gás ou óleo [m ³]

V_{Bulk}	Volume total [m ³]
ε_{ef}	Porosidade efetiva
ε_{nef}	Porosidade não efetiva
ε_{t}	Porosidade total
$\varepsilon_{\text{aber}}$	Porosidade aberta
$\varepsilon_{\text{fech}}$	Porosidade fechada
V_{S}	Volume da parte sólida [m ³]
V_{P}	Volume de poros [m ³]
R	Resistência térmica [m ² KW ⁻¹]
L	Comprimento [m]
M	Massa [kg]
α, a	Difusividade térmica [m ² s ⁻¹]
C	Calor específico [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
R_e	Repetitividade
N	Número de medidas
T	Coefficiente de Student para 95,45% de probabilidade e n-1 grau de liberdade
u_c	Incerteza combinada
U	Incerteza expandida

SUBSCRITOS

1	Propriedade da componente 1/ ponto1
2	Propriedade da componente 2/ ponto2
E	Efetiva
S	Propriedade da parte sólida
Sat	Estado saturado
Seca	Estado seco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	22
1.1	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	23
1.2	OBJETIVOS.....	24
1.2.1	Objetivo geral.....	24
1.2.2	Objetivos específicos.....	24
2	DESENVOLVIMENTO TEÓRICO.....	25
2.1	SÓLIDOS POROSOS.....	25
2.2	POROSIDADE.....	26
2.2.1	Porosidades de rochas.....	26
2.3	CONDUÇÃO TÉRMICA.....	30
2.4	CONDUÇÃO TÉRMICA EM ESTADO ESTACIONÁRIO E TRANSIENTE.....	30
2.5	LEI DE <i>FOURIER</i>	30
2.6	DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA FASE SÓLIDA DE MATERIAIS POROSOS.....	33
2.6.1	Materiais multifásicos.....	33
2.6.2	Modificação no modelo de Maxwell.....	36
2.6.3	Determinação da Porosidade.....	37
2.6.4	Determinação da condutividade da matriz sólida (λ_s).....	37
2.7	MÉTODOS ESTACIONÁRIOS NA FORMA DE PLACAS PLANAS.....	38
2.7.1	Método da Placa Quente Protegida.....	38
2.7.2	Método fluximétrico.....	40
2.8	MÉTODO TRANSIENTE.....	41
2.8.1	O método de pulso de energia.....	42
2.8.1.1	Equação do método de pulso de energia.....	43

2.8.2	Método da sonda cilíndrica ou térmica.....	46
2.8.2.1	Equação da sonda cilíndrica.....	47
3	MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS.....	50
3.1	MEDIÇÃO.....	50
3.2	MÉTODO UTILIZADO.....	52
3.3	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	55
3.3.1	Argamassa.....	55
3.3.2	Rochas Sedimentares.....	55
3.3.3	Gel ou Carbogel.....	56
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES.....	57
4.1	ANÁLISE DA SONDA TÉRMICA.....	57
4.1.1	Análise da repetitividade.....	57
4.1.2	Análise da incerteza combinada (u_c).....	58
4.1.3	Incerteza Expandida (U).....	60
4.1.4	Análise da escolha do intervalo de tempo.....	60
4.1.5	Comparação com ensaio fluximétrico.....	63
4.1.6	Análise da influência da resistência térmica de contato.....	63
4.2	ARGAMASSA.....	65
4.2.1	Argamassa seca.....	65
4.2.2	Argamassa saturada.....	67
4.3	ROCHAS.....	69
4.3.1	SDO 335 Seca.....	70
4.3.2	SDO 335 Saturada.....	71
4.3.3	SDO 342 Seca.....	73
4.3.4	SDO 342 Saturada.....	74

4.3.5	WLO 307 Seca.....	75
4.3.6	WLO 307 Saturada.....	76
4.3.7	WLO 342 Seca.....	78
4.3.8	WLO 342 Saturada.....	79
4.4	GELOU CARBOGEL.....	81
4.5	CÁLCULOS DAS POROSIDADES.....	82
4.6	CÁLCULOS DA CONDUTIVIDADE DA MATRIZ SÓLIDA.....	83
4.6.1	Utilizando a equação de Maxwell modificada.....	83
4.6.2	Utilizando os modelos estruturais básicos.....	84
5	CONCLUSÕES.....	87
	Sugestões para trabalhos futuros.....	89
	REFERÊNCIAS	90
	APÊNDICE A.....	94
	APÊNDICE B.....	96

1- INTRODUÇÃO

O estudo de materiais porosos é extremamente relevante em diversas áreas do conhecimento, como na mecânica das rochas, biomecânica, engenharia do petróleo e na construção civil. A pesquisa sobre materiais porosos vem tomando espaço de destaque no campo científico. Entre suas aplicações, pode-se mencionar o estudo de paredes de alvenaria, destacando-se a crescente importância do desempenho térmico com o objetivo de levar à introdução de novas soluções ao estudo de diferentes técnicas construtivas.

Na indústria da construção, a argamassa ocupa uma posição de destaque devido a sua grande importância, como nos revestimentos e enchimentos, com isso despertando um grande interesse no campo da pesquisa (SIMÕES *et al*, 2010).

Na prospecção de petróleo, o conhecimento das propriedades térmicas, como a condutividade térmica das rochas e da porosidade, são propriedades importantes na caracterização das rochas.

As propriedades térmicas das rochas são fundamentais no estudo geotérmico da crosta terrestre, bem como em estudos de evolução geológica de bacias sedimentares. Entre estas, a condutividade térmica apresenta um papel fundamental quando se consideram os modelos matemáticos para a simulação da evolução de bacias sedimentares (OUALI, 2009).

Nas duas situações mencionadas, a porosidade do material é determinante na geração da condutividade. O tema escolhido para este trabalho, “Análise da Condutividade Térmica em Rochas Sedimentares”, é importante uma vez que a condutividade térmica controla o campo de temperaturas em uma bacia sedimentar. Segundo Midtømme e Roaldset (1999), as informações acerca da condutividade de rochas sedimentares são bastante escassas, envolvendo incertezas significativas na sua determinação. O conhecimento das propriedades das rochas é importante para o setor de petróleo: estas propriedades, sejam de origem experimental ou de modelamento matemático, são utilizadas para a simulação numérica em várias escalas, desde bacias sedimentares até a escala de poro.

A condutividade térmica das rochas é um dos parâmetros mais importantes em estudos de evolução de bacias e é um tema relativamente complexo, pois depende de vários fatores, dentre eles destacam-se, porosidade, distribuição e tamanho de grãos (a noção de porosidade é estendida em sentido amplo para microporos, vazios e trincas), a mineralogia, composição química, tipo de fluido no espaço

poroso, densidade, pressão, temperatura, textura, estrutura, grau de consolidação, grau de alteração, etc.

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, a condutividade também apresente modificações, mostrando uma complexa interação de variáveis (Revista Brasileira de Geofísica, July/Sept., 2008).

Entre as possibilidades de investigação da condutividade térmica de rochas, utilizou-se o método da sonda térmica, devido às grandes vantagens oferecidas, como baixo custo, adaptação da estrutura experimental à amostra.

1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A Dissertação está, assim, estruturada:

Introdução;

Desenvolvimentos Teóricos;

Materiais e Métodos Utilizados;

Resultados Experimentais e Discussão;

Conclusões e sugestões para futuros trabalhos;

Referências.

No capítulo “Desenvolvimentos Teóricos” são abordados os conceitos fundamentais para determinação da condutividade térmica de materiais porosos, a Lei de Fourier, a definição de condutividade térmica e os modelos matemáticos para a determinação das condutividades térmicas das matrizes porosas;

Já, no capítulo “Materiais e Métodos Utilizados” são apresentados os principais métodos para determinação das condutividades térmicas efetivas de materiais porosos, as amostras testemunhos, a preparação das mesmas e o aparato experimental;

No capítulo “Resultados Experimentais e Discussão” são apresentados e analisados os dados obtidos a partir dos experimentos realizados com as amostras (argamassa, rochas e gel), e os valores calculados das condutividades térmicas efetivas das amostras e as condutividades térmicas das partes sólidas das matrizes porosas, através

dos modelos estruturais básicos e da equação de Maxwell modificada; Em seguida, são apresentadas as considerações finais desta pesquisa, bem como sugestões para futuros trabalhos, seguidas das referências bibliográficas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste na determinação das condutividades térmicas das matrizes sólidas de rochas sedimentares e de argamassa.

1.2.2 Objetivos específicos

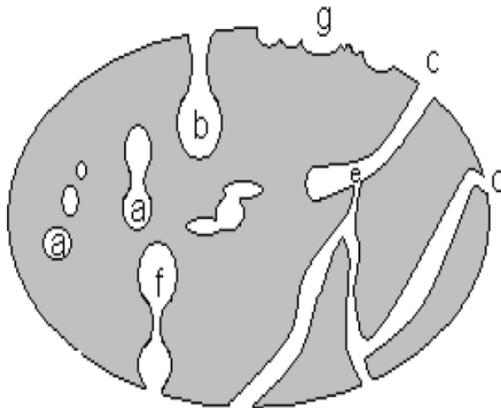
- Determinação experimental da condutividade térmica efetiva de rochas sedimentares e de argamassa;
- Determinação, com uso dos modelos matemáticos, das condutividades térmicas das matrizes sólidas de rochas sedimentares e de argamassa;
- Análise da aplicabilidade de modelos matemáticos para a condutividade térmica de rochas sedimentares.

2 - DESENVOLVIMENTOS TEÓRICOS

2.1 SÓLIDOS POROSOS

A condutividade de um material poroso está diretamente associada a sua porosidade, presente em qualquer sólido, e resultante da existência de cavidades, canais ou interstícios. A porosidade de um material exerce influência sobre suas propriedades físicas, tais como: densidade, condutividade térmica e resistência mecânica. Como consequência, o controle da estrutura porosa é de grande importância industrial, como por exemplo, no design de catalisadores, adsorventes industriais, membranas e cerâmicas. Os poros podem ser classificados como abertos ou fechados, segundo a sua disponibilidade a um fluido externo.

Na Figura 1 podem ser vistos vários tipos de poros abertos (b, c, d, e, f, g) e fechados (a). Os poros fechados são inativos quanto ao fluxo de líquidos e gases, mas exercem influência sobre as propriedades mecânicas. Por outro lado, poros como os representados por (b) e (f) são chamados de poros “cegos”, visto que não têm abertura em uma das extremidades. Os poros também podem ser interconectados, como mostrado em (e). Outra forma de classificação dos poros está relacionada à forma dos mesmos: gargalo de garrafa (b), cilíndricos (c), afunilados (d) e irregulares (f). A rugosidade da superfície (g) também pode ser considerada como porosidade (GIMENEZ *et al*).



Tipos de poros:

- (a) fechados
- (b) gargalo de garrafa
- (c) cilíndricos
- (d) afunilados
- (e) interconectados
- (f) irregulares
- (g) representa a rugosidade da superfície

Figura 1- Representação dos diferentes tipos de poros

Fonte: Gimenez et al (2007)

2.2 POROSIDADE

A porosidade é definida como a razão entre o volume do espaço poroso e o volume total (volume de *bulk*) de um corpo sólido.

$$\varepsilon = \frac{V_P}{V_{BULK}} \quad (2.1)$$

Onde:

ε - porosidade;

V_P - volume do espaço poroso;

V_{Bulk} - volume total ou volume de *bulk* (da amostra).

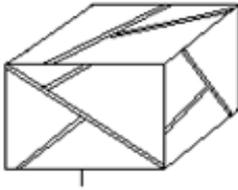
A porosidade é uma fração entre 0 e 1 (ou 0 - 100%)

2.2.1 Porosidade de rochas

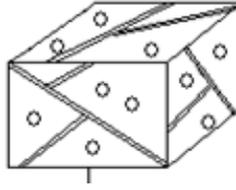
As rochas apresentam um grau de porosidade detectável, resultante da existência de microporos, vazios, trincas.

A porosidade é a propriedade associada ao espaço disponível para o armazenamento de fluido em um meio poroso. A Figura 2 mostra dois

tipos de poros que são fraturas e fratura interconectada por poros. A porosidade é a soma de ambos (OUALI, 2009).



Porosidade de Fratura



Porosidade Total

Figura 2- Fratura e porosidade total
Fonte: Ouali (2009)

Nas rochas destacam-se dois tipos ou grupos de porosidades de acordo com a sua origem:

- 1 - A porosidade primária é aquela que a rocha herda do processo de sedimentação e evolui durante sua compactação; como exemplo tem-se a porosidade intergranular dos arenitos;
- 2 - A porosidade secundária, resultante de algum processo físico-químico que a rocha sofre subsequentemente à sua formação (diagênese). Exemplificando, têm-se as fraturas nos arenitos, calcários, folhetos; e cavidades causadas pelo ataque químico em calcários e, em menor proporção, em arenitos (ROSA, 2004).

Para as rochas reservatórios (rocha que acumula petróleo), de acordo com a interconexão entre os poros, definimos dois tipos de porosidade:

A- Porosidade absoluta (total): quando todos os poros presentes da amostra são considerados, estejam ou não conectados.

B- Porosidade efetiva: se apenas os poros conectados entre si e com a superfície são considerados, conforme pode ser observado na Figura 3.

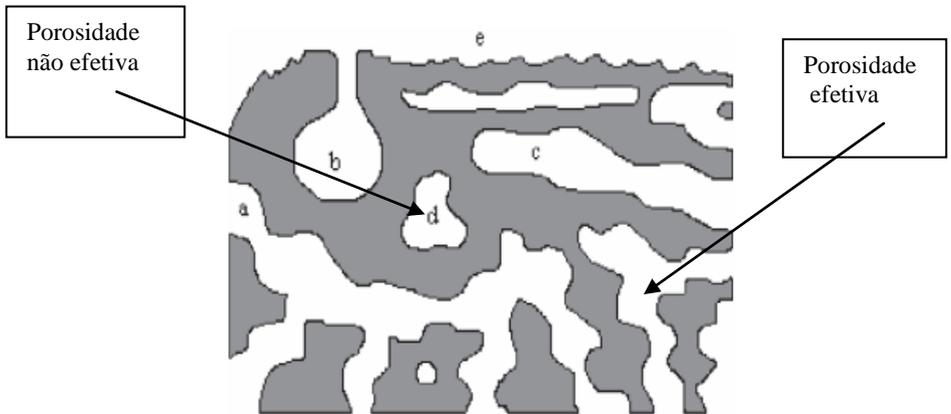


Figura 3- Seção ilustrativa de um sólido poroso com representação dos diferentes tipos de poros: (a), (b), (c) abertos, sendo (b) gargalo de garrafa, (c) cilíndrico; (d) fechado; (e) rugosidade da superfície.

Fonte: Pastor et al (2006)

A diferença entre as porosidades total e efetiva revela a quantidade de poros isolados, obtendo-se a porosidade não-efetiva.

As relações a seguir são válidas:

$$\varepsilon_{nef} = \varepsilon_t - \varepsilon_{ef} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{aber} + \varepsilon_{fech} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_t = \frac{V_P}{V_t} = \frac{V_t - V_S}{V_t} = 1 - \frac{V_S}{V_t} \quad (2.4)$$

Onde:

ε_{nef} - Porosidade não efetiva;

ε_{ef} - Porosidade efetiva;

ε_t - Porosidade total;

V_P - Volume de poros;

V_S - Volume de sólido;

V_t - Volume total;

ε_{aber} - Porosidade aberta;

ε_{fech} - Porosidade fechada.

Vários são os métodos utilizados para se determinar a porosidade e destacam-se:

- a- Método de embebição;
- b- Injeção de mercúrio (PIM);
- c- Expansão de gás;
- d- Método baseado na densidade;
- e- Análise de imagens.

Neste trabalho, utilizou-se o método das densidades para determinação da porosidade, considerando que a amostra é composta por duas componentes (fases).

Nomenclatura:

m_e - massa efetiva da mistura;

m_1 - massa da componente 1;

m_2 - massa da componente 2;

V - volume da mistura;

V_1 - volume da componente 1;

V_2 - volume da componente 2;

ρ_e - densidade efetiva da mistura;

ρ_1 - densidade da componente 1;

ρ_2 - densidade da componente 2.

Pode-se escrever que:

$$m_e = m_1 + m_2 \quad (A) \quad \text{como : } m = \rho \cdot V, \text{ então:}$$

$$m_e = \rho_e V; \quad m_1 = \rho_1 V_1; \quad m_2 = \rho_2 V_2 \quad (B)$$

Substituindo (B) em (A), tem-se:

$\rho_e V = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2$, fazendo, $V=1$, $V_1 = \varepsilon$ e $V_2 = 1 - \varepsilon$, conclui-se que:

$$\rho_e = \rho_1 + \varepsilon + \rho_1 (1 - \varepsilon) \quad (2.5)$$

2.3 CONDUÇÃO TÉRMICA

Em transferência de calor, **condução térmica** ou **difusão térmica** (ou ainda **condução** ou **difusão de calor**) é a transferência de energia térmica entre átomos e/ou moléculas vizinhas em um material devido a um gradiente de temperatura. Em outras palavras, é um fenômeno de transferência térmica causado por uma diferença de temperatura entre duas regiões em um mesmo meio, ou entre dois meios em contato e sem a ocorrência de movimento global da matéria (na escala macroscópica).

Neste trabalho será considerada transferência de calor apenas por condução, as demais formas serão consideradas como desprezíveis.

2.4 CONDUÇÃO TÉRMICA EM ESTADO ESTACIONÁRIO E TRANSIENTE

A condução em estado estacionário ocorre quando a variação de temperatura é constante depois de certo tempo de equilíbrio. Assim, a derivada parcial da temperatura em relação ao tempo é nula. Na transferência de calor em regime transiente, a temperatura e o fluxo de calor no interior dos corpos mudam com o tempo em uma mesma posição.

2.5 LEI DE *FOURIER*

A lei da condução térmica, de 1822, estabelecida por Jean Baptiste Joseph Fourier, também conhecida como lei de Fourier, estabelece que a taxa da transferência de calor através de um material é proporcional ao gradiente negativo na temperatura, da área em ângulos retos e inversamente proporcional ao comprimento, através do qual o

calor está sendo transferido. Como exemplo, considere o experimento de condução de calor em regime estacionário, mostrado na Figura 4. Um bastão cilíndrico de material conhecido tem a sua superfície lateral isolada termicamente, enquanto as duas faces restantes são mantidas a diferentes temperaturas, com $T_1 > T_2$. A diferença de temperatura causa transferência de calor por condução no sentido positivo do eixo x .

Podemos medir a taxa de transferência de calor q_x . Esta taxa de transferência de calor depende das variáveis: ΔT , diferença de temperatura; Δx , comprimento do bastão; e A , área da seção transversal do bastão e do tipo de material.

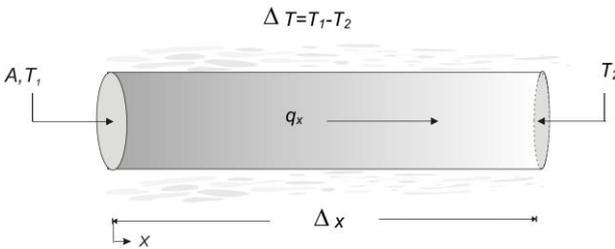


Figura 4- Experimento de condução térmica em regime estacionário

Fonte: Incropera e DeWitt (2008)

Pode-se escrever:

$$q_x = \lambda A \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (2.6)$$

onde λ , é a condutividade térmica, uma importante propriedade do material. Levando a expressão acima ao limite quando $\Delta x \rightarrow 0$, obtemos a taxa de transferência de calor:

$$q_x = -\lambda A \frac{dT}{dX} \quad (2.7)$$

Ou para o fluxo de calor:

$$q''_x = \frac{q_x}{A} = -\lambda \frac{dT}{dX} \quad (2.8)$$

Onde:

O sinal negativo é uma consequência da segunda lei da termodinâmica, exigindo que o calor deva fluir na direção da temperatura mais alta para a mais baixa. A lei de Fourier apresentada na Equação (2.8) implica que o fluxo térmico seja uma grandeza direcional, em particular, a direção de q''_x é normal à área da seção transversal A. A direção do fluxo de calor, de uma maneira mais geral, será sempre normal a uma superfície de temperatura constante, chamada de superfície isotérmica.

Como o fluxo térmico é uma grandeza vetorial, pode-se escrever, de uma forma mais geral, a equação da taxa da condução (*lei de Fourier*) da seguinte maneira:

$$\vec{q}'' = -\lambda \vec{\nabla} T = -\lambda (\vec{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (2.9)$$

Onde $\vec{\nabla}$ é o operador "grad" tridimensional e $T(x,y,z)$ é o campo escalar de temperatura.

O vetor fluxo térmico pode ser decomposto em componentes, de tal forma que, em coordenadas cartesianas, a expressão geral \vec{q}'' é:

$$\vec{q}'' = \vec{i} q''_x + \vec{j} q''_y + \vec{k} q''_z \quad (2.10)$$

Onde, a partir da Equação (2.9), tem-se:

$$q''_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad q''_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \quad q''_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.11)$$

Cada uma dessas expressões relaciona o fluxo térmico através de uma superfície ao gradiente de temperatura, em uma direção perpendicular à superfície. Também está explícito na Equação (2.9) que o meio através do qual a condução ocorre é isotrópico. Em tal meio, o valor da condutividade independe da direção de coordenada. A condutividade térmica é constante, embora isso nem sempre seja verdade. Enquanto a condutividade de um material varia com a temperatura, a variação pode ser pequena, para uma significativa faixa de temperatura para alguns materiais comuns. Em materiais anisotrópicos, a condutividade térmica varia tipicamente com a

orientação; nesse caso λ é representada por um tensor de segunda ordem.

Em materiais não uniformes, λ varia com a localização espacial (INCROPERA e DeWitt, 2008).

2.6 DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA FASE SÓLIDA DE MATERIAIS POROSOS

2.6.1 Materiais multifásicos

As condutividades térmicas de materiais multifásicos, baseando-se nos componentes, são frequentemente modeladas por equações algébricas simples CARSON, (2010).

A maioria dos modelos de condutividade térmica encontrada na literatura é baseada em um dos quatro modelos estruturais básicos: Modelo paralelo, Modelo série, EMT (teoria do meio efetivo), Maxwell-Eucken .

Para o cálculo de condutividade térmica efetiva, considerar-se-ão materiais com duas fases. Considerando o fluxo de calor na direção vertical, cada um desses modelos assume certa estrutura física. No modelo série e paralelo, as camadas das componentes são alinhadas perpendicularmente ou paralelas ao fluxo de calor, como o seu nome indica. No modelo EMT, as componentes assumem uma distribuição completamente aleatória e o modelo de *Maxwell-Eucken* é formado por pequenas esferas dispersas dentro de uma matriz contínua de diferentes componentes, de maneira que cada esfera não interfira na distribuição de temperatura de seus vizinhos. Para materiais com duas componentes, os modelos assumem as formas seguintes. No apêndice B, procurou-se analisar com mais detalhes CARSON, (2010).

Nomenclatura:

f - Fator de estrutura (ponderação) empírico;

λ - Condutividade térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$);

v - Fração de volume;

ρ - Densidade (kgm^{-3}).

Subscritos:

- 1 - propriedade da componente 1/ponto1;
- 2 - propriedade da componente 2/ponto2;
- e - efetiva ou propriedade de *bulk*;
- s - propriedade da fase sólida;
- sat - saturada.

De modo geral, pode-se representar a condutividade térmica de materiais porosos em dependência das fases como:

$$\lambda_e = \lambda_e(\lambda_1, \lambda_2, \dots, v_1, v_2, \dots) \quad (2.12)$$

1 - Modelo paralelo

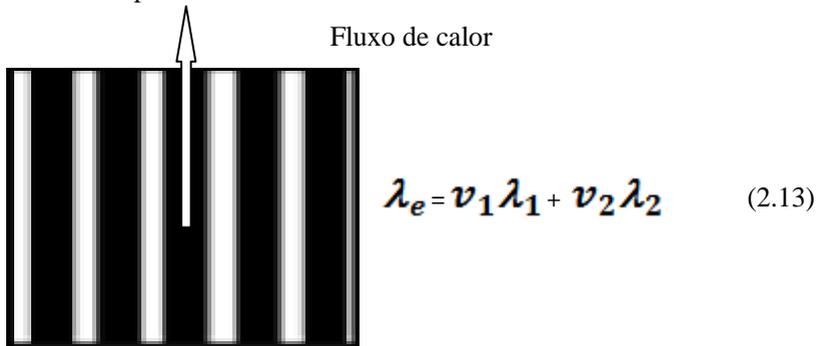
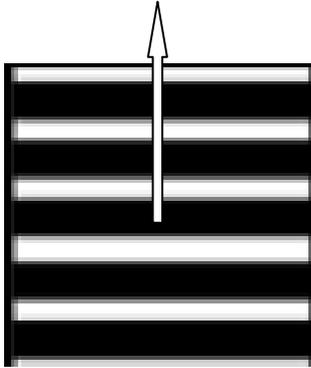


Figura 5- Ilustração: modelo paralelo

Fonte: Wang (2006)

2- Modelo série

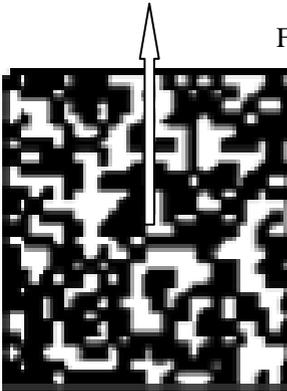


Fluxo de calor

$$\lambda_e = \frac{1}{v_1/\lambda_1 + v_2/\lambda_2} \quad (2.14)$$

Figura 6- Ilustração modelo série**Fonte:** Wang (2006)

3- EMT (teoria do meio efetivo)



Fluxo de calor

$$v_1 \frac{\lambda_1 - \lambda_e}{\lambda_1 + 2\lambda_e} + v_2 \frac{\lambda_2 - \lambda_e}{\lambda_2 + 2\lambda_e} = 0 \quad (2.15)$$

Figura 7- Ilustração modelo EMT**Fonte:** Wang (2006)

4- Maxwell-Eucken

(λ_1 = fase contínua, λ_2 = fase dispersa)

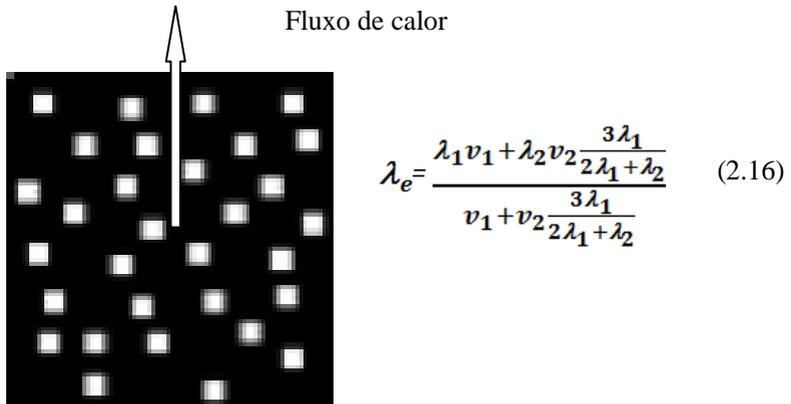


Figura 8- Ilustração modelo Maxwell-Eucken

Fonte: Wang (2006)

2.6.2 Modificação no modelo de Maxwell

Para tornar esses modelos mais flexíveis ou genéricos, um fator de estrutura empírica (f) é introduzido, de tal forma que:

$$\lambda_e = \lambda_e(\lambda_1, \lambda_2, \dots, v_1, v_2, \dots, f) \quad (2.17)$$

O modelo de Maxwell tem sido modificado por diferentes autores, como Fricke (1924), Carson (2002), essencialmente como segue:

$$\lambda_e = \lambda_1 \left(\frac{f\lambda_1 + \lambda_2 - f(\lambda_1 - \lambda_2)v_2}{f\lambda_1 + \lambda_2 + (\lambda_1 - \lambda_2)v_2} \right) \quad (2.18)$$

Para determinar a condutividade da matriz sólida, utiliza-se a equação de Maxwell modificada, nas condições de amostra seca e saturada de água, assumindo que f seja o mesmo para ambos os casos.

2.6.3 Determinação da Porosidade

Será utilizado o método das densidades das misturas, Equação (2.5), nas condições de amostra seca e saturada com água para determinação da porosidade (CARSON, 2010).

$$\rho_e = \rho_1 v_1 + \rho_2 v_2 + \dots \quad (2.19)$$

Para amostra seca:

$$\rho_{seca} = \rho_{ar} \epsilon + (1 - \epsilon) \rho_s \quad (2.20)$$

Similarmente para rocha saturada de água:

$$\rho_{sat} = \rho_{\acute{a}gua} \epsilon + (1 - \epsilon) \rho_s \quad (2.21)$$

Como ρ_{ar} e $\rho_{\acute{a}gua}$ encontram-se na literatura, com as duas equações (2.20) e (2.21), pode-se determinar ϵ e ρ_s , baseado na medida do valor de ρ_{seca} e ρ_{sat} da amostra.

2.6.4 Determinação da condutividade da matriz sólida (λ_s)

Da equação de Maxwell modificada têm-se:

$$\lambda_{seca} = \lambda_{ar} \frac{f \lambda_{ar} + \lambda_s - f(\lambda_{ar} - \lambda_s)(1 - \epsilon)}{f \lambda_{ar} + \lambda_s + (\lambda_{ar} - \lambda_s)(1 - \epsilon)} \quad (2.22)$$

$$\lambda_{sat} = \lambda_{\acute{a}gua} \frac{f \lambda_{\acute{a}gua} + \lambda_s - f(\lambda_{\acute{a}gua} - \lambda_s)(1 - \epsilon)}{f \lambda_{\acute{a}gua} + \lambda_s + (\lambda_{\acute{a}gua} - \lambda_s)(1 - \epsilon)} \quad (2.23)$$

Medindo a condutividade efetiva da amostra seca e saturada com água, utilizando o modelo de Maxwell modificado, e tomando a condutividade da água e do ar na literatura, pode-se determinar o fator de estrutura (f) e a condutividade da matriz sólida (λ_s).

2.7 MÉTODOS ESTACIONÁRIOS NA FORMA DE PLACAS PLANAS

Esses métodos apresentam algumas vantagens, como simplicidade nas equações matemáticas e alto grau de controle das variáveis experimentais que geram bons resultados. Apresentam um grande campo de aplicação na determinação da condutividade térmica para painéis planos com dimensões grandes.

Apresentam desvantagem ou limitações: longo tempo para atingir o estado estacionário (horas e até dias), necessidade de geometria definida pela amostra, a eventual migração da umidade da amostra, devido ao tempo. No caso de materiais com alto conteúdo de água, ocorre a presença de mecanismo de convecção (QUEIROZ, 2001).

2.7.1 Método da Placa Quente Protegida

A determinação da condutividade térmica por esse método envolve a medição do gradiente de temperatura média estabelecida sobre o corpo de prova, a partir de certo fluxo de calor e em condições de regime permanente. A condução unidimensional é conseguida a partir do uso de um anel de guarda, de modo a restringir as perdas laterais de calor e tendo-se o comportamento térmico de uma placa infinita, conforme indicado na Figura 9.

A placa quente é formada por duas seções de aquecimento independentes, sendo a central, denominada de seção de medição e a externa de anel de guarda. Este é separado da seção de medição por um espaço de 1,5 mm. Pode ser assumido um fluxo de calor unidimensional na seção de medição quando sensores de temperaturas instalados nesta e no anel de guarda indicarem os mesmos valores.

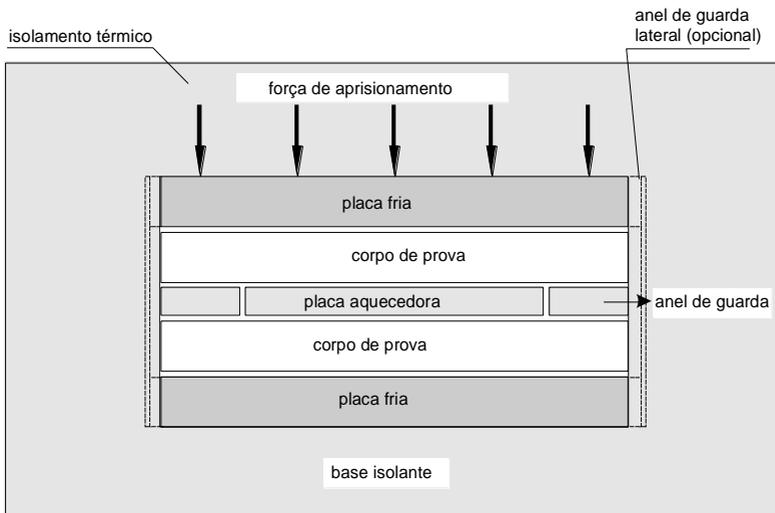


Figura 9- Ilustração Placa Quente Protegida

Fonte: ABNT NBR 15220-4, ISO 8302:1991, ASTM C177

Conforme mostrado na Figura 9, dois corpos-de-prova idênticos com superfícies planas e paralelas são dispostos horizontalmente em cada lado da placa quente central e colocados entre as duas placas frias isotérmicas. Placas de borracha deformável são introduzidas entre as superfícies dos corpos-de-prova e as placas do equipamento, sempre que necessário, de modo a melhorar o contato térmico entre essas superfícies. Para minimizar as perdas de calor, o conjunto é envolvido por isolante.

Com as placas frias controladas a uma temperatura apropriada, fornece-se uma potência elétrica constante, estabilizada, na seção de medição da placa quente de modo a estabelecer, em regime permanente, uma diferença de temperatura adequada através dos corpos-de-prova.

Um equilíbrio de temperatura entre a seção de medição e o anel de guarda é conseguido através de um controle automático da potência do anel. Somente a potência dissipada na seção de medição é usada na determinação das propriedades térmicas dos corpos-de-prova. A diferença média de temperatura através dos corpos-de-prova é determinada usando-se os termopares montados nas suas superfícies. A diferença entre as temperaturas das faces dos corpos-de-prova é compreendida entre 15 K e 20 K. Para ensaios, a temperaturas mais elevadas, essa diferença pode ser maior. A resistência térmica é

determinada a partir da *lei de Fourier*:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{q}{A}\right)}, \quad (2.24)$$

onde, R é a resistência térmica (m^2KW^{-1}), q é o fluxo de calor dissipado (W), e T_1 e T_2 as temperaturas médias nas superfícies das amostras.

Considerando que a amostra é homogênea, é possível determinar a condutividade térmica do material (λ):

$$\lambda = \frac{L}{R}, \quad (2.25)$$

onde, λ é a condutividade térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) e L é a espessura da amostra (m).

2.7.2 Método Fluximétrico

O funcionamento do método fluximétrico é mais simples do que o da placa quente protegida, pois o regime permanente é atingido mais rapidamente. A amostra é submetida a um fluxo de calor gerado por uma resistência elétrica que é alimentada por uma fonte regulável. O calor flui pela amostra e, com o auxílio dos fluxímetros, determinam-se os valores dos fluxos de calor (figura 10).

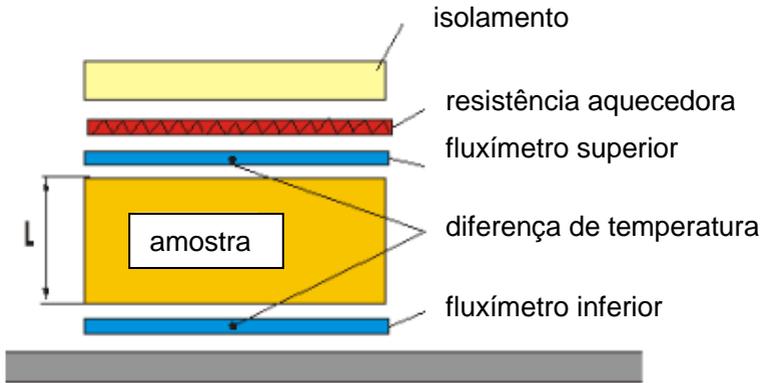


Figura 10- Ilustração: modelo fluximétrico

Fonte: ABNT NBR 15220-5, ASTM C518, ISO 8301(1991), ASTM C518

A condutividade térmica da amostra é determinada a partir da resistência térmica, e a resistência térmica, a partir da lei de Fourier:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{q_1 + q_2}{2}\right)}, \quad (2.26)$$

onde, R é a resistência térmica (m^2KW^{-1}), q_1 e q_2 a densidade de fluxo de calor medido pelos fluxímetros 1 e 2 (Wm^{-2}), respectivamente e T_1 e T_2 as temperaturas superficiais da amostra.

Considerando que a amostra seja homogênea, é possível determinar a condutividade térmica do material (λ), sendo L a espessura da amostra (m).

$$\lambda = \frac{L}{R} \quad (2.27)$$

2.8 MÉTODO TRANSIENTE

O método transiente requer pouco tempo na realização das medidas, porém os resultados são menos precisos, apresentando até 10% de erro. No método estacionário, 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 e caro (FIGUEREDO, 2006).

No método transiente destacam-se o método da sonda térmica e o método de pulso de energia.

2.8.1 O Método de Pulso de Energia

O método de pulso de energia foi apresentado por Santos apud Parker e seus colaboradores em 1961. Na época, já se conheciam muitos métodos estacionários e transientes para determinação da condutividade e da difusividade térmica.

No método de pulso de energia, um pulso de energia radiante e de curta duração incide na face frontal de uma amostra em forma de disco; o fluxo de radiação na face posterior é registrado. Santos apud Parker e seus colaboradores determinaram experimentalmente a difusividade térmica de vários metais à temperatura ambiente, mas afirmou que o método poderia ser aplicado para outros tipos de materiais, qualquer que sejam os intervalos de temperaturas, desde que a amostra fosse aquecida ou resfriada. No seu trabalho, foi usada como fonte pulsada de energia radiante uma lâmpada flash de xenônio. Com o surgimento do raio laser, este passou a substituir as lâmpadas de xenônio na técnica de pulso de energia. Ainda hoje existem equipamentos que utilizam lâmpadas de xenônio devido ao seu baixo custo comparado ao raio laser. As razões que levaram a substituição das lâmpadas de xenônio pelo raio laser foram algumas propriedades do feixe de laser, entre elas: o laser é monocromático, colimado e concentra uma grande quantidade de energia em uma área pequena.

Os elementos básicos que formam esse equipamento são: fonte pulsada de energia, porta amostra e sistema de aquecimento, sistema de detecção e amplificação do sinal e sistema de análise e processamento dos dados.

A fonte de energia é um laser Nd: glass ($\lambda = 1,067 \mu\text{m}$), sendo de 16 mm o diâmetro do feixe. A energia dissipada pode variar de 5 a 95 J, e o tempo de dissipação do pulso é nominalmente 0,6 m s. A Figura 11 mostra o diagrama esquemático SANTOS, (2005).

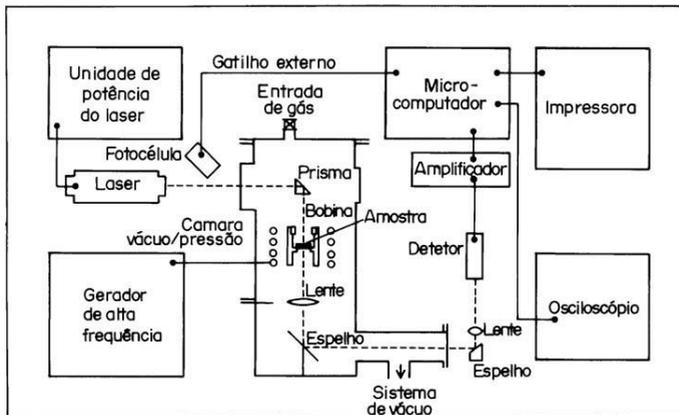


Figura 11- Diagrama esquemático do arranjo experimental-Universidade de Manchester

Fonte: Santos (2005)

2.8.1.1 Equação do método de pulso de energia

O método de pulso de energia é um método indireto para determinação da condutividade térmica. É determinado experimentalmente o valor da difusividade térmica e, a partir do conhecimento do valor do calor específico e da densidade do material, determina-se a condutividade térmica.

Considerando a distribuição de temperatura dentro de um corpo sólido termicamente isolado (Santos, 2005):

$$T(x,t) = \frac{1}{L} \int_0^L T(x,0) dx + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 a t}{L^2}\right) \cos \frac{n\pi x}{L} \int_0^L T(x,0) \cos \frac{n\pi x}{L} dx \quad (2.28)$$

onde:

$T(x, t)$ - distribuição de temperatura em um instante t ;

L - espessura da amostra;

a - difusividade térmica do material;

t - tempo;

x - posição, coordenada espacial com origem na superfície.

Se um pulso de energia Q instantâneo é uniformemente absorvido em uma pequena espessura g da face frontal em $x=0$, de uma espessura uniforme L termicamente isolado, a distribuição de temperatura neste instante é dada por:

$$T(x, 0) = \frac{Q}{\rho c L} \text{ para } 0 < x < g \quad (2.29)$$

$$T(x, 0) = 0 \text{ para } g < x < L$$

Aplicando a condição inicial dada pela Equação (2.29), a Equação (2.28) pode ser escrita na seguinte forma:

$$T(x, t) = \frac{Q}{\rho c L} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi x \operatorname{sen}(n\pi g/L)}{L (n\pi g)} \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2}{L^2} at\right) \right] \quad (2.30)$$

A série da equação Q converge rapidamente, e assim poucos termos são considerados na prática. Sendo g muito pequeno, a aproximação para materiais opacos pode ser feita:

$$\operatorname{sen} n\pi g/L \approx n\pi g/L \quad (2.31)$$

Assim sendo, na ausência de perdas de calor, o acréscimo de temperatura na face posterior da amostra em $x = L$ é dado por:

$$T(L, t) = \frac{Q}{\rho c L} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2}{L^2} at\right) \right] \quad (2.32)$$

Definindo-se os parâmetros adimensionais:

$$V(L, t) = T(L, t) / T_m \quad (2.33)$$

$$\omega = \pi^2 at / L^2 \quad (2.34)$$

a Equação (2.32) pode ser escrita na forma:

$$V = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 \omega) \quad (2.35)$$

onde:

$V = T/T_m$ - acréscimo adimensional de temperatura na face posterior da amostra;

$T = Q/\rho c_p L$ - acréscimo instantâneo de temperatura na face posterior;

T_m - máximo acréscimo de temperatura na face posterior;

Q - energia do feixe incidente;

ρ - densidade;

c_p - calor específico à pressão constante;

L - espessura da amostra;

$\omega = 2\pi at/L^2$ - tempo adimensional;

a - é a difusividade térmica;

t - é o tempo decorrido a partir do disparo do pulso de energia.

O gráfico da Equação (2.35) é mostrado na Figura 12.

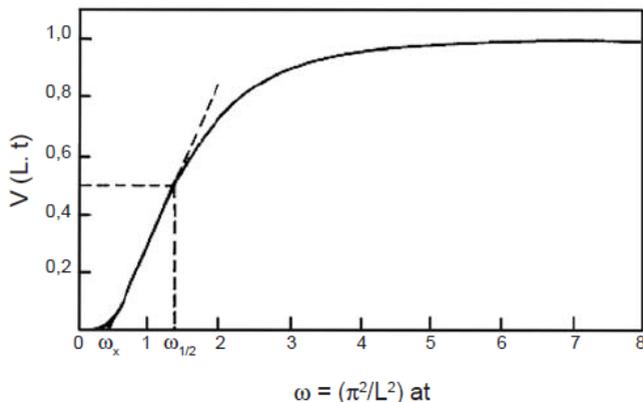


Figura 12- Transiente de temperatura adimensional

Fonte: Santos (2005)

Santos apud Parker et al (1961) sugeriu duas maneiras distintas para se determinar a difusividade térmica. Tomando-se a Equação (2.35), quando V é igual a 0,5, ω é igual a 1,38 assim, da Equação (2.34) obtém-se:

$$a = 1,38 L^2 / \pi^2 t_{1/2} \quad (2.36)$$

Sendo $t_{1/2}$ o tempo necessário para que o aumento de temperatura na face posterior da amostra atinja a metade do seu valor máximo. Outra relação útil pode ser obtida de acordo com a segunda sugestão dada por Santos apud Parker et al, quando o prolongamento da porção linear da curva da Fig.12, intercepta o eixo ω tem-se que ω_x é igual a 0,48 e a partir da Equação (2.34) obtém-se:

$$a = 0,48 L^2 / \pi^2 t_x, \quad (2.37)$$

sendo t_x o tempo obtido a partir da interseção do prolongamento da porção linear da curva com o eixo ω . Uma vez conhecida a difusividade do material, tomando o calor específico e a densidade da amostra na literatura, então, com o auxílio da Equação (2.38), pode-se calcular a condutividade térmica do material.

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (2.38)$$

Algumas desvantagens dessa técnica (SANTOS, 2005):

- não é adequada para materiais refratários com granulometria grossa;
- materiais isolantes com alto nível de porosidade

As vantagens principais dessa técnica são (SANTOS, 2005):

- curto tempo de medição;
- pequenas massas de material necessárias para amostragem;
- processo sem contato;
- possibilidades de medições próximas à transição de fase;
- técnica padrão, segundo o INMETRO.

2.8.2 Método da Sonda Cilíndrica ou Térmica

O primeiro desenvolvimento da sonda linear (cilíndrica) foi realizado em 1948 pelo Dr Van Der Held, pesquisador da Universidade de Utrecht na Holanda. O objetivo era desenvolver um instrumento de engenharia que fosse útil nos testes de materiais isolantes de construção, de sólidos úmidos em locais naturais e de sólidos úmidos e secos. O instrumento chamado de sonda de condutividade térmica foi desenvolvido na Universidade de Toronto (QUEIROZ, 2001).

O método da sonda térmica para a medição da condutividade térmica de materiais porosos tem sido utilizado por diversos autores, dentre os quais, citam-se: ZARCONI et al. (1982), LAURENT (1986), PERRIN & JAVELAS (1983), FERNANDES (1990), JANSEN (2007). Ela é composta de um elemento dissipador de calor e de um termopar para o registro da evolução da temperatura da sonda com o tempo. A sonda cilíndrica é constituída de um tubo de aço inoxidável, tendo em seu interior um fio de *constantan* e um termopar. O fio de *constantan* é conectado a uma fonte de tensão e o termopar a um multímetro.

Quando a fonte é ligada, uma corrente elétrica percorre o fio de *constantan* e, devido ao efeito *Joule*, dissipa calor. A sonda é colocada

no interior do material a ser analisado para que o calor gerado pelo fio seja dissipado para a amostra, medindo-se a variação da temperatura com o tempo.

O método da sonda térmica apresenta algumas conveniências em relação a outros:

- Aparelhagem de fácil transporte, uma vez que um computador portátil pode ser a maior parte do equipamento;
- Rapidez, ou seja, em pouco tempo é obtida uma medida confiável e com boa precisão;
- Baixo custo, quando comparado com outros métodos;
- É adequado para pequenas amostras, é possível dimensionar a sonda de acordo com o tamanho da amostra e não adequar a amostra ao aparelho, (QUEIROZ, 2001). No capítulo “Materiais e Métodos Utilizados”, será descrito o método da sonda térmica com mais detalhes.

2.8.2.1 Equação da sonda cilíndrica

PERRIN (1985) resolveu o problema de difusão de calor para o sistema sonda-material, adotando as seguintes hipóteses:

- Taxa de calor constante e uniforme na sonda;
- Temperatura uniforme na sonda;
- Fluxo de calor por condução radial;
- No instante inicial ($t=0$), todo o sistema se encontra na mesma temperatura;
- Meio infinito.

A equação obtida por PERRIN (1985), (veja também FERNANDES, 1990), para a temperatura da sonda em função do tempo, pode ser escrita como na Equação (2.39):

$$T_S(t) = A_1 \ln t + A_2 + \frac{A_3}{t} (\ln t + A_4) \quad (2.39)$$

Onde:

$$A_1 = \frac{Q}{4\pi\lambda_2}; \quad A_2 = \frac{Q}{4\pi\lambda_2} \left[\ln \frac{4a_2}{r_2^2} - \gamma + \frac{2\lambda_2}{r_2 H} \right];$$

$$A_3 = \frac{Q}{4\pi\lambda_2} \left[\frac{\lambda_1[r_1^2 - r_2^2]}{2\lambda_2 a_1} - \frac{M_0 C_0}{2\pi\lambda_2} \right];$$

$$A_4 = \frac{4a_2}{r_2^2} - \gamma + \left[\frac{\frac{\lambda_2 r_2}{Ha_1} + \frac{r_2^2}{4a_1} \ln \frac{r_2}{r_1} - \frac{2M_0 C_0}{\pi r_2 H} - \frac{[r_2^2 - r_1^2]}{a_1} - \frac{\lambda_1[r_2^2 - r_1^2]}{r_2 Ha_1}}{\frac{\lambda_1[r_1^2 - r_2^2]}{2\lambda_2 a_1} - \frac{M_0 C_0}{2\pi\lambda_2}} \right],$$

sendo:

$T_S(t)$ - Temperatura da sonda em função do tempo;

$\ln(t)$ - Logaritmo natural do tempo;

Q - Potência gerada por unidade de comprimento da sonda;

r_1 - Raio da sonda;

r_2 - Raio do furo da amostra;

λ_1 - Condutividade térmica da fase1;

a_1 - Difusividade térmica da fase1;

λ_2 - Condutividade térmica da fase 2;

a_2 - Difusividade térmica da fase 2;

M_0 - Massa da sonda por unidade de comprimento;

C_0 - Calor específico da sonda;

H - Coeficiente de troca de calor superficial entre as fases 1 e 2;

γ - Constante de Euler, igual 0,5772.

Os coeficientes A_1 , A_2 , A_3 e A_4 são parâmetros dependentes das propriedades térmicas da amostra do material, bem como da geometria do sistema. A resistência térmica de contato sonda-meio e a capacidade térmica da sonda estão representadas no terceiro termo do lado direito da Equação (2.39), proporcional a t^{-1} . Após um intervalo de tempo suficientemente longo, a contribuição desse termo desaparece e a Equação (2.39) assume a forma linear, conforme FERNANDES (1990):

$$T_S(t) = A_1 \ln t + A_2 \quad (2.40)$$

Esse comportamento está representado na Figura 13, onde a parte linear está compreendida entre t_i e t_f .

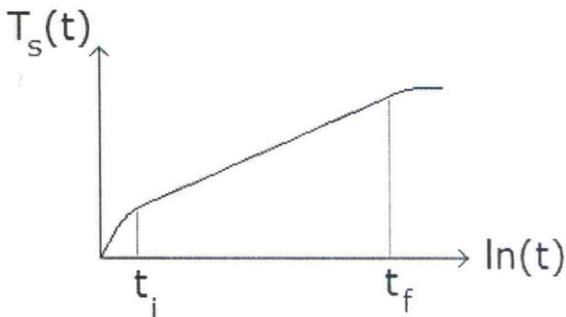


Figura 13- Curva típica de evolução de temperatura na sonda
Fonte: Fernandes (1990)

Para $t < t_i$, a evolução de temperatura é condicionada pela capacidade térmica da sonda e pela resistência térmica ao contato sonda-meio, associadas aos coeficientes A_3 e A_4 da Equação (2.39).

Para $t > t_f$, as condições de contorno da amostra modificam a evolução de temperatura (efeito de borda).

Observando a curva, verifica-se que entre $t_i < t < t_f$ há um comportamento linear; a partir daí se pode determinar a condutividade térmica do material.

A inclinação da reta entre os instantes t_i e t_f é dada pela Equação (2.41):

$$A_1 = \frac{Q}{4\pi\lambda_2} \quad (2.41)$$

A partir da Equação (2.41) determina-se a condutividade térmica, sendo a potência dada pela Equação (2.42).

$$Q = 2 \times i^2 \times R_m; \quad (2.42)$$

onde:

λ_2 - Condutividade térmica efetiva do material;

Q - Potência térmica gerada pela sonda por unidade de comprimento do fio;

A_1 - Coeficiente angular da reta;

R_m - Resistência por unidade de comprimento do fio;

i - Corrente elétrica.

3- MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

3.1 MEDIÇÃO

O objetivo geral deste trabalho é determinar as condutividades térmicas das matrizes sólidas de cinco amostras de materiais porosos, sendo quatro de rochas sedimentares e uma de argamassa. No decorrer dos experimentos, foi acrescentada uma amostra de gel, material não poroso, para uma análise comparativa da condutividade térmica desse material com as demais amostras. A determinação da condutividade térmica efetiva do gel serviu como parâmetro comparativo para análise das condutividades dos materiais porosos, pois as curvas obtidas através dos gráficos $\Delta T \times \ln t$, tanto para o gel como nos materiais porosos, apresentaram características semelhantes.

Utilizando-se a sonda térmica, foram medidas as condutividades térmicas efetivas da amostra de gel, da argamassa seca e saturada com água deionizada e das quatro amostras de rochas também secas e saturadas.

As amostras de rochas (fotos) são apresentadas na Figura 14. A Figura 15 apresenta a amostra de argamassa utilizada (foto). As amostras de rochas foram fornecidas pela CENPES/PETROBRAS, identificadas como SDO 335, SDO 342, WLO 307 e WLO 342. O aparato experimental é formado pelas amostras, sonda térmica, sistema de aquisição de sinais, uma fonte de tensão e um multímetro que são mostrados na Figura 16.



Figura 14- Amostras de rochas

Fonte: Elaborada pelo autor



Figura 15- Amostra de argamassa

Fonte: Elaborada pelo autor

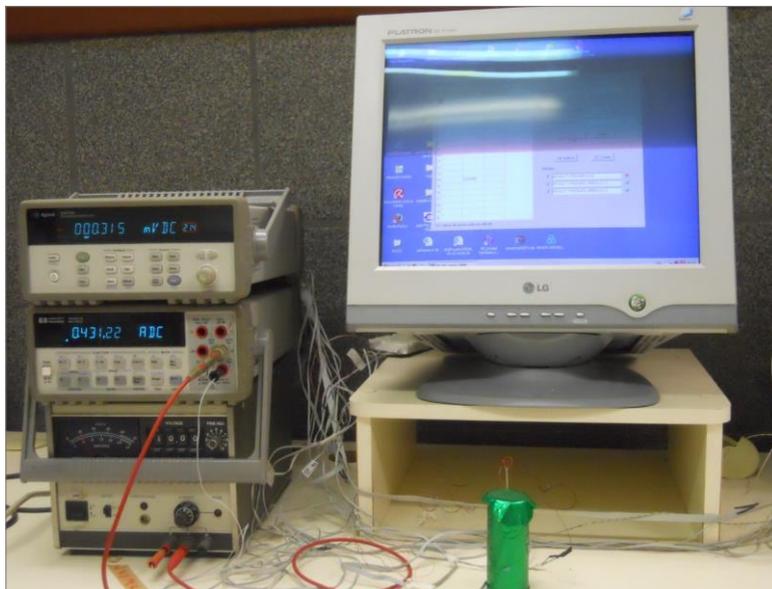


Figura 16- Aparato experimental

Fonte: Elaborada pelo autor

3.2 MÉTODO UTILIZADO

O método utilizado para determinação da condutividade térmica, nesta pesquisa, foi o método transiente da sonda térmica. De uma maneira simples, procurou-se destacar a seguir os elementos básicos que compõem a sonda térmica. O corpo da sonda foi construído com um tubo de aço inoxidável, um fio resistivo e um termopar, indicado na Figura 17. A Figura 18 mostra a sonda utilizada.

Em seu interior foi colocado o fio resistivo (*constantan*) isolado eletricamente com uma resina, funcionando como resistor, gerando calor (efeito *Joule*), e um termopar para medir a evolução da temperatura com o tempo. O termopar utilizado foi do tipo *cobre-constantan*, isolado eletricamente. O *constantan* possui resistividade elétrica de $4,9 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}$ a 20°C , e composição: 53 - 57% Cu; 43 - 45% Ni; 0,5 - 1,2% Mn; e $< 0,5 \%$ Fe. Após a colocação dos fios no interior do tubo de aço inoxidável, os espaços vazios foram preenchidos com pasta térmica, com o objetivo de evitar a propagação de calor por convecção e atenuar

a resistência térmica de contato. A base inferior do cilindro de aço inoxidável foi vedada por meio de resina de epóxi.

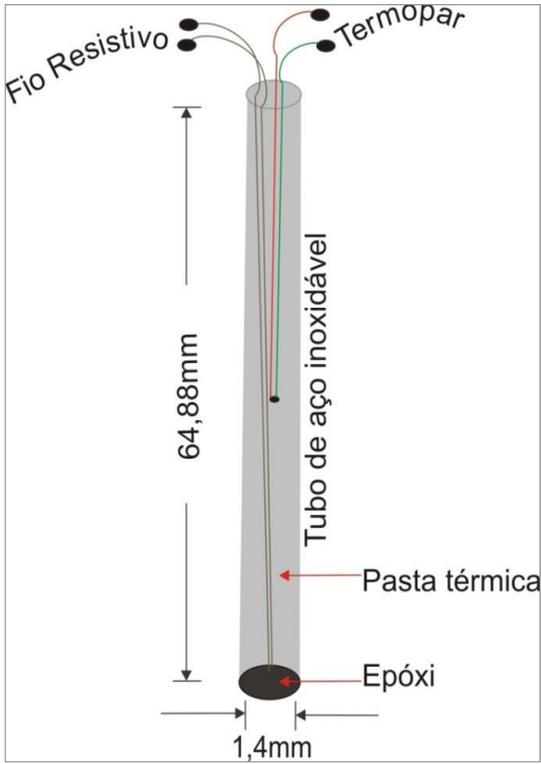


Figura 17- Ilustração da sonda térmica utilizada

Fonte: Elaborada pelo autor

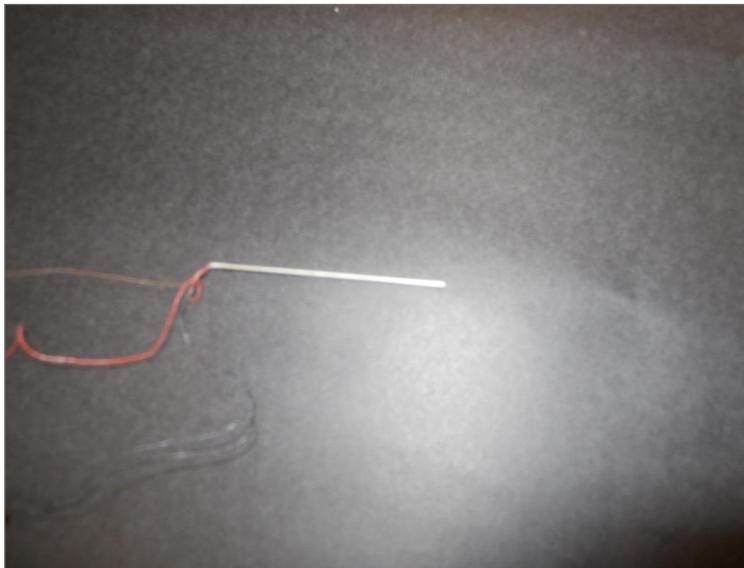


Figura 18- Sonda térmica

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 1 mostra as características básicas da pasta térmica.

Tabela 1- Informações técnicas da pasta térmica

Propriedades	Características
Consistência	Pastosa
Cor	Branca
Condutividade térmica	$2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Temperatura de trabalho	-40 a 200 °C
Componente básico	Silicone de alto peso molecular

Fonte: Jansen (2007, p.80)

3.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

3.3.1 Argamassa

A amostra de argamassa comercial foi colocada a secar em uma estufa, a uma temperatura de aproximadamente 105 °C no Labtermo-EMC. A massa da argamassa foi medida a cada três dias, estabilizando-se após vinte dias, depois mantida na estufa. A amostra de argamassa apresenta um formato cilíndrico com altura de 16,11 cm e 7,14 cm de diâmetro. Para a introdução da sonda térmica na amostra, foi realizado na amostra um furo central, com 5,24 cm de profundidade e 0,38 cm de diâmetro. O espaço vazio no interior da amostra foi preenchido com pasta térmica e a amostra foi envolvida com várias camadas de papel celofane e laminado.

A amostra foi saturada em um recipiente com água deionizada, nas condições normais de temperatura e pressão. Medidas da massa foram realizadas periodicamente. Em aproximadamente 45 dias, a massa se estabilizou. Após a saturação, a amostra foi envolvida em várias camadas de papel celofane e papel laminado e mantida em recipiente com água deionizada em todo o período experimental. Em seguida realizaram-se medidas da variação de temperatura em função do tempo.

Os mesmos procedimentos foram utilizados com a amostra de argamassa seca.

3.3.2 Rochas Sedimentares

As rochas foram classificadas, para fins de ensaios, em seca e saturada com água deionizada. As amostras secas foram mantidas a uma temperatura de aproximadamente 80°C no laboratório LMPT- EMC. Os experimentos foram realizados nas mesmas condições da argamassa, com as amostras de rochas apresentando formato cilíndrico, com furo no centro. As dimensões das amostras estão mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dimensões das amostras de rochas

Amostra	Altura (cm)	Diâmetro da amostra (cm)	Diâmetro do furo (cm)	Profundidade do furo (cm)
SDO 335	6,97	3,83	0,15	3,92
SDO 342	8,67	3,84	0,15	3,80
WLO 307	7,25	3,81	0,15	4,11
WLO 342	8,69	3,84	0,15	3,6

Fonte: Elaborada pelo autor

As amostras de rochas foram saturadas em um recipiente com água deionizada, nas condições normais de temperatura e pressão. Os tempos de saturação foram diferentes. As rochas SDO 335 e SDO 342 levaram aproximadamente um mês para saturar, a rocha WLO 307 quarenta dias e WLO 342 dois meses e meio.

3.3.3 Gel ou Carbogel

Para a preparação da amostra com gel, tomou-se um recipiente com formato cilíndrico, colocando-se o gel em seu interior; em seguida, foi introduzida na sonda térmica. Os ensaios foram realizados nas mesmas condições das demais amostras e os resultados obtidos foram muito importantes para análise de todos os experimentos deste trabalho, pois o gel é um material mais homogêneo.

4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

Este trabalho determinou a condutividade térmica das matrizes sólidas de uma amostra de argamassa e de quatro amostras de rochas. Inicialmente, utilizando-se o método transiente da sonda térmica, foi determinada a condutividade térmica efetiva das amostras, por meio de medidas de temperatura em função do tempo.

Os experimentos foram realizados em sala climatizada, as amostras secas mantidas em estufas e as amostras saturadas em recipientes com água deionizada, sob pressão atmosférica normal. Foram selecionados os cinco últimos testes de cada amostra seca e saturada para análise da condutividade térmica.

Os gráficos do comportamento da variação da temperatura (K) em função do logaritmo natural do tempo (s) foram obtidos utilizando-se o software Excel 2010.

4.1 ANÁLISE DA Sonda Térmica

4.1.1 Análise da repetitividade

Para análise da repetitividade, tomaram-se os testes realizados com a rocha SDO 335, na condição de rocha seca. A corrente elétrica utilizada foi 0,434 A, tensão 10 V. Para a escolha do intervalo de tempo, realizou-se análise de correlação entre a variação de temperatura e o tempo e observou-se um bom coeficiente de correlação. Como mostrado na Tabela 3, os intervalos de tempo ficaram entre 6 s e 80 s, aproximadamente. Os coeficientes angulares dos segmentos de retas obtidos tiveram valores bem próximos e a temperatura ambiente foi constante em 23 °C.

A partir das medições repetidas nessa amostra, aplicando a Equação (4.1) e consultando a bibliografia (ALBERTAZZI, et al, 2008), ISO GUM, foi determinada a repetitividade da sonda térmica, apresentada na Tabela 3.

$$R_e = \pm t \sigma \quad (4.1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - I_m)^2}{n - 1}} \quad (4.2)$$

Onde:

σ - Desvio padrão;

n - Número de medidas;

R_e - Repetitividade;

$R_e(\%)$ - Percentual da repetitividade do coeficiente angular;

t - Coeficiente de Student para 95,45% de probabilidade e n-1 graus de liberdade;

I_i - I-ésima indicação;

I_m - Média das indicações;

A_1 - Coeficiente angular;

A_m - Coeficiente angular médio.

Tabela 3- Análise da repetitividade da sonda térmica

Testes	1	2	3	4	5
A_1	0,4344	0,4288	0,4372	0,4346	0,4310
R^2	0,9956	0,9991	0,9962	0,9901	0,9980
A_m	0,4332				
R_e	0,0095				
$R_e(\%)$	2,2				

Fonte: Elaborada pelo autor

4.1.2 Análise da incerteza combinada (u_c)

Para a análise da incerteza combinada, tomaram-se os testes realizados com a rocha SDO 335 na condição de rocha seca. Na medição direta, os efeitos associados às várias fontes de incerteza se manifestam sobre a indicação do sistema de medição de forma acumulativa. No caso da sonda térmica, tem-se a incerteza associada à

corrente elétrica, resistência elétrica e o coeficiente angular da reta, havendo um efeito acumulativo dessas variáveis aleatórias. Todas essas fontes de incerteza foram obtidas com uma confiança estatística de 95,45% (2 σ). A incerteza combinada (u_c) gerada pela influência das várias fontes de incerteza pode ser estimada a partir das incertezas padronizadas de cada fonte de erro (ALBERTAZZI, et al, 2008), ISO GUM.

Pode-se determinar a incerteza combinada através da Equação (4.3):

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots} \quad (4.3)$$

De uma forma geral:

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot u(x_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot u(x_2)\right)^2 + \dots} \quad (4.4)$$

Onde:

u_1, u_2, u_3 - Incerteza padronizada de cada fonte de erro;

$\frac{\partial f}{\partial x_1}$ - Coeficiente de sensibilidade;

$u(x_1), u(x_2) \dots$ - São as incertezas das grandezas de entrada;

u_c - É a incerteza combinada.

Da Equação (2.41) e (2.42), tem-se o modelo matemático que relaciona as variáveis medidas com a condutividade térmica:

$$\lambda = \frac{2i^2 R_m}{4\pi A_1} \quad (4.5)$$

Tomando a Equação (4.5) e fazendo analogia com a Equação (4.4), resulta:

$$u^2 c = \left(u(i) \frac{\partial \lambda}{\partial i}\right)^2 + \left(u(R) \frac{\partial \lambda}{\partial R}\right)^2 + \left(u(A_1) \frac{\partial \lambda}{\partial A_1}\right)^2 \quad (4.6)$$

Tomando os valores das incertezas padronizadas de cada fonte de

erro, utilizando a Equação (4.6), determinou-se a incerteza combinada, Tabela 4:

Tabela 4- Determinação da incerteza combinada

i	0,4344 A
R	51,52 (Ω/m)
u(i)	0,0043 A
u(R)	0,5152 Ω/m
u(A ₁) = Re	0,0095
U _C	0,11 $Wm^{-1}K^{-1}$

Fonte: Elaborada pelo autor

Onde:

uc - Incerteza combinada da condutividade da rocha SDO 335;

u (R) - Medida incerteza padrão associada à resistência;

u(i) - Medida incerteza padrão associada à corrente;

u (a) - Medida incerteza padrão associada ao coeficiente angular da reta.

4.1.3 Incerteza Expandida (U)

Nas análises de incerteza realizadas no item anterior, todas as fontes de incerteza utilizadas já estavam estimadas com uma confiança estatística de 95,45% ($k=2$). Portanto, a incerteza expandida será a própria incerteza combinada (u_c), o que equivale a 3,1 % do valor da condutividade térmica efetiva da rocha SDO 335.

4.1.4 Análise da escolha do intervalo de tempo

Para uma avaliação mais criteriosa foi tomado um teste com intervalo de tempo muito grande, utilizando a amostra de rocha SDO

335 seca. A figura 19 mostra o comportamento da variação da temperatura em função do logaritmo natural do tempo em segundos.

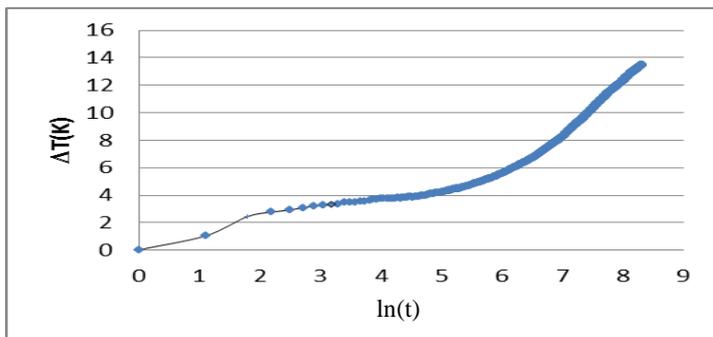


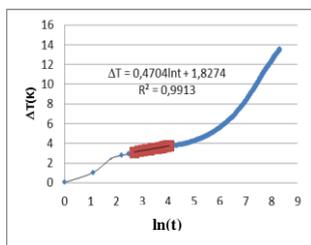
Figura 19- Variação de temperatura da sonda em função do $\ln(t)$

Fonte: Elaborada pelo autor

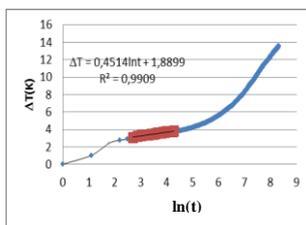
Um problema enfrentado nesta pesquisa foi encontrar a melhor reta para determinação da condutividade térmica efetiva. Para isso, foi realizado um experimento, com um tempo de duração muito grande, com a amostra de rocha SDO 335 seca. O experimento foi realizado nas mesmas condições dos demais. Foram tomados oito intervalos de tempos entre 12 s e 160 s aproximadamente e encontrados os devidos segmentos de retas correspondentes e, em seguida, foram construídos gráficos da variação de temperatura em função do logaritmo natural do tempo em segundos para cada intervalo, conforme mostrado na Figura 20.

Abaixo de 12 s [$\ln(t) = 2,48$], observam-se claramente os efeitos da resistência térmica de contato, capacidade térmica da sonda e convecção térmica, acima de 160 s [$\ln(t) = 5,07$] efeito de borda. Então, para retardar tais efeitos, é importante utilizar amostras com dimensões grandes. Com os dados obtidos, foi determinada a condutividade térmica efetiva para cada segmento de reta, sendo os resultados mostrados na Tabela 5. A corrente elétrica permaneceu estável em 0,4322 A, tensão elétrica em 10V e a temperatura ambiente em 21 °C.

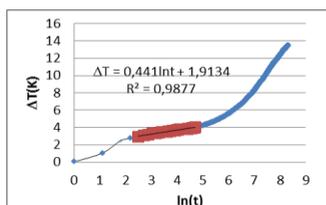
O valor encontrado para condutividade térmica efetiva em cada intervalo tomado foi diferente, ou seja, existe uma dependência direta com a escolha do intervalo de tempo escolhido. A diferença entre o maior e o menor valor da condutividade térmica foi $0,3048 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, esta diferença deve-se principalmente aos limites de intervalos tomados, o que exige do pesquisador certa habilidade na escolha do intervalo.



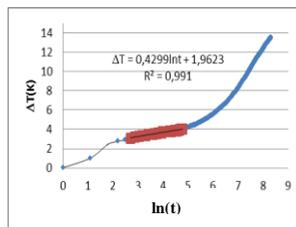
(a)



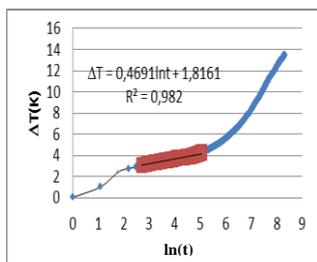
(b)



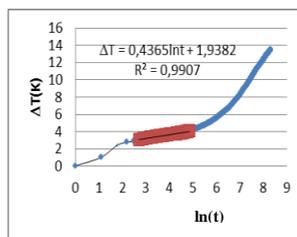
(c)



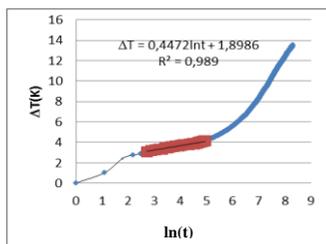
(d)



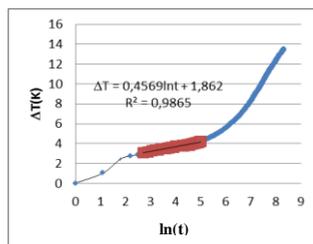
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 20- Segmentos de retas obtidos a partir da Figura 19 em intervalos de tempo diferentes

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 5- Condutividade térmica efetiva para um tempo muito grande, tomados oito intervalos de tempo diferentes, SDO 335 seca

Retas	t (s)	A ₁	R ²	λ (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
(a)	15 - 57	0,4704	0,9913	3,24
(b)	15 - 72	0,4514	0,9909	3,37
(c)	15 - 99	0,4299	0,9910	3,33
(d)	12 - 111	0,4410	0,9877	3,49
(e)	15 - 129	0,4365	0,9907	3,40
(f)	15 - 132	0,4691	0,9820	3,45
(g)	15 - 141	0,4472	0,9890	3,54
(h)	15 - 159	0,4405	0,9865	3,25
λ_m	3,38 Wm ⁻¹ K ⁻¹			
R _e	0,31 Wm ⁻¹ K ⁻¹			
U	0,32 Wm ⁻¹ K ⁻¹			
U(%)	9,6			

Fonte: Elaborada pelo autor

Onde:

λ_m - Condutividade térmica efetiva média;

R_e - Repetitividade da condutividade térmica efetiva;

U - Incerteza expandida;

U(%) - Percentual da incerteza expandida em relação à condutividade média.

4.1.5 Comparação com ensaio fluximétrico

Para avaliação do erro na medição da condutividade térmica através da sonda térmica, um mesmo material (argamassa seca) foi

ensaiado em um equipamento disponível no LMPT. Esse equipamento, fabricado pela empresa Laser Corporation (USA), Modelo FOX300, é baseado na Norma Técnica ASTM C518. Trata-se de um método estacionário, que utiliza amostras planas de 300 x 300 mm e espessura em torno de 50mm

As amostras de argamassa foram confeccionadas num formato prismático com dimensões 300mm x 300mm x 50mm, secadas numa estufa a uma temperatura de 105 °C no laboratório LABTERMO-EMC. Foram realizadas três medições, obtendo-se um valor médio de $0,88\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Na atual configuração desse equipamento, a incerteza de medição para a faixa de condutividade avaliada é de 6 % aproximadamente. A diferença entre os valores médios encontrados nas medições pela sonda térmica com preenchimento de pasta térmica e pelo Condutivímetro FOX300 foi de apenas 1,1 %.

4.1.6 Análise da influência da resistência térmica de contato

A resistência térmica de contato influencia a transferência de calor entre a sonda e o corpo de prova, alterando a curva de aquecimento, especialmente no período inicial do ensaio. Visando avaliar esse efeito, foi realizada uma análise comparativa entre os valores de condutividade de uma amostra de argamassa seca medidos pela sonda térmica com diferentes tipos de resistência de contato. No preenchimento do espaço vazio entre a sonda e a amostra de argamassa, inicialmente o espaço ficou sem preenchimento (ar). Em seguida foi preenchido com um gel aquoso e, por último, com a pasta térmica.

A amostra estava seca, fora da estufa. Primeiramente determinou-se a condutividade térmica efetiva sem preenchimento (com ar); em seguida, com gel, mas antes de colocar o gel, o espaço vazio foi impermeabilizado. Por último, o espaço foi preenchido com pasta térmica, em cinco testes para cada situação. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Condutividade térmica efetiva para argamassa seca e fora da estufa sem preenchimento, com preenchimento de gel e preenchimento de pasta térmica.

Amostras	$\lambda_e(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$
Argamassa-ar	0,96±0,03
Argamassa-gel	1,23±0,04
Argamassa-pasta térmica	1,19±0,04

Fonte: Elaborada pelo autor

Nos resultados encontrados das condutividades térmicas efetivas, utilizando-se pasta térmica, gel ou ar para amostra de argamassa, observou-se que os valores encontrados com pasta térmica e gel não apresentaram diferença significativa, ou seja, não se apresentou alteração considerável no efeito de convecção e da resistência térmica de contato. Entretanto, a condutividade térmica efetiva encontrada sem preenchimento (ar) teve uma diferença considerável, em relação aos resultados anteriores.

4.2 ARGAMASSA

4.2.1 Argamassa seca

Após a realização de vários testes, foram selecionados os últimos testes com a argamassa seca, os quais estão registrados na Tabela 7.

Embora o gráfico de $\Delta T = f[\ln(t)]$ não apresente um comportamento linear como um todo, é possível destacar um intervalo em que esse comportamento é observado, conforme indicado nas Figuras 21 e 22, que mostram o comportamento da variação de temperatura (K) em função do logaritmo natural do tempo em segundos para um teste específico.

O coeficiente angular (A_1) foi obtido por meio da reta da Figura 22; a corrente (i), a tensão (V) e a resistência elétrica foram determinadas com auxílio do multímetro; a resistência elétrica (R_m) do fio de constantan por unidade de comprimento foi 51,22 Ω / m ; o

coeficiente de correlação (R) obtido por meio da linha de tendência do gráfico da Figura 22, e a condutividade térmica efetiva a partir das equações (2.41) e (2.42).

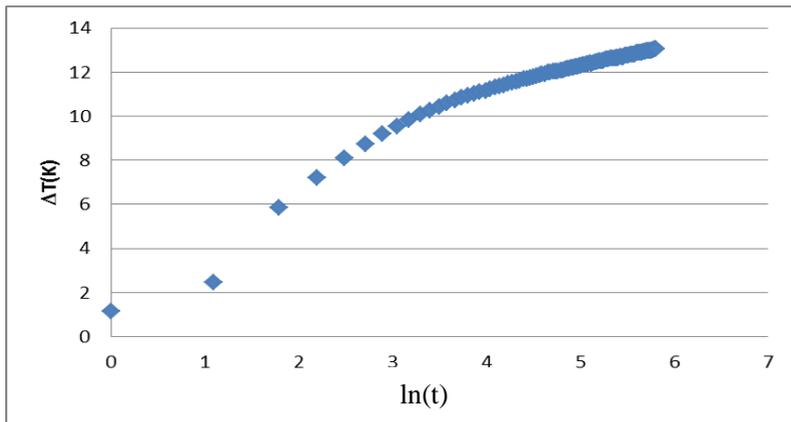


Figura 21- Variação de temperatura da sonda em função do ln(t)

Fonte: Elaborada pelo autor

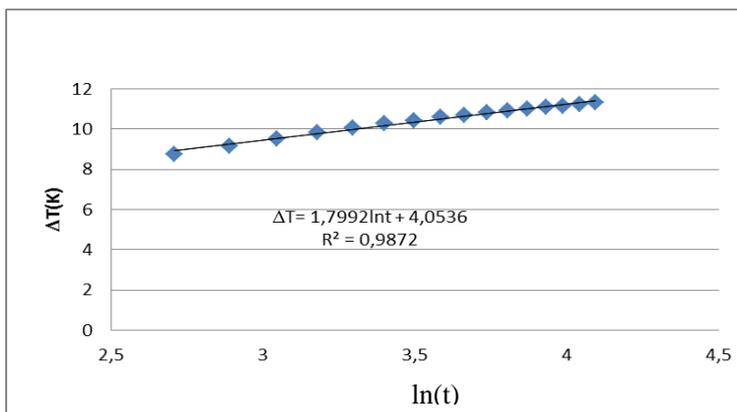


Figura 22- Reta obtida a partir da Figura 21

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 7- Condutividade térmica efetiva - argamassa seca

Testes	i (A)	A ₁	R ²	λ (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	λ_e (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	Temperatura ambiente (°C)
1	0,4386	1,7942	0,9941	0,8737	0,87±0,03	26,0
2	0,4386	1,7992	0,9872	0,8713		26,0
3	0,4386	1,7902	0,9899	0,8757		26,0
4	0,4386	1,8048	0,9907	0,8686		26,0
5	0,4386	1,7922	0,9861	0,8747		27,0

Fonte: Elaborada pelo autor

4.2.2 Argamassa saturada

Repetindo os testes para argamassa saturada, obteve-se resultado semelhante ao da argamassa seca. A única diferença está relacionada aos valores encontrados para a condutividade térmica efetiva. Esses valores foram maiores, tendo em vista que a condutividade térmica da água é maior que a condutividade térmica do ar.

A Figura 23 mostra o comportamento da variação de temperatura em função $\ln(t)$. A Figura 24 apresenta a reta obtida a partir da Figura 24 e a Tabela 8 apresenta a condutividade efetiva da argamassa saturada.

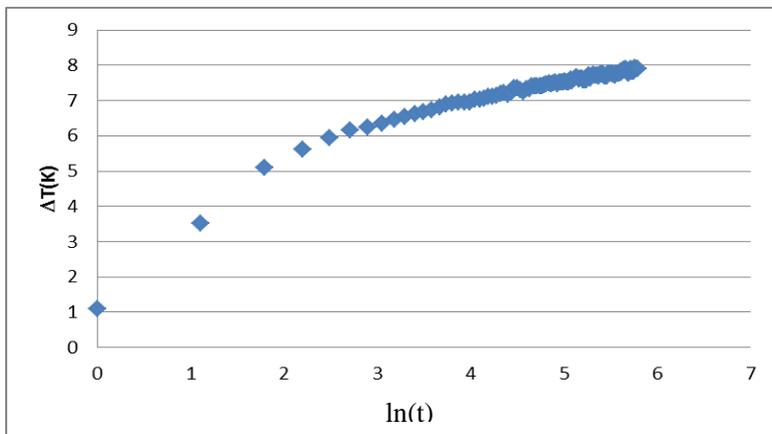


Figura 23- Variação de temperatura da sonda em função do $\ln(t)$

Fonte: Elaborada pelo autor

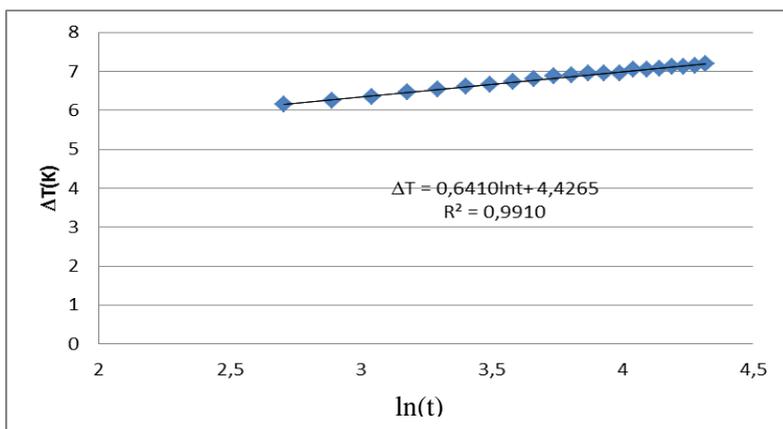


Figura 24- Reta obtida a partir da Figura 23

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 8- Condutividade térmica efetiva - argamassa saturada

Testes	i (A)	a	R ²	λ (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	λ_e (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	Temperatura ambiente (°C)
1	0,4280	0,6495	0,9852	2,2986	2,33±0,07	21,0
2	0,4285	0,6410	0,9910	2,3346		21,0
3	0,4286	0,6424	0,9832	2,3305		21,5
4	0,4300	0,6365	0,9901	2,3675		22,0
5	0,4300	0,6502	0,9760	2,3176		22,0

Fonte: Elaborada pelo autor

Tanto na argamassa seca como na saturada, o gráfico $\Delta T = f[\ln(t)]$ não apresenta um comportamento linear como um todo. Para a escolha do intervalo, procurou-se tomar testes em intervalos de tempo aproximadamente iguais, na ordem de 60s, o que foi mencionado por Fernandes (1990). O intervalo linear ficou entre 15 s e 60 s. Num intervalo de zero a 15 s aproximadamente, apresenta um comportamento não linear em função dos efeitos de resistência térmica ao contato e convecção térmica, pois a pasta térmica não consegue eliminar totalmente tais efeitos. Após 60 s a curva volta a não ter um comportamento linear devido ao efeito de borda.

4.3 ROCHAS

Os experimentos foram repetidos com as rochas nas mesmas condições realizadas com a argamassa.

4.3.1 Rocha SDO 335 Seca

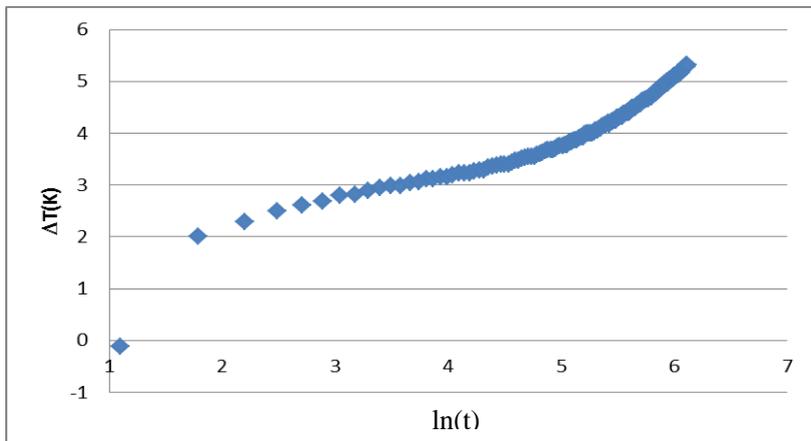


Figura 25- Variação de temperatura da sonda em função do $\ln(t)$

Fonte: Elaborada pelo autor

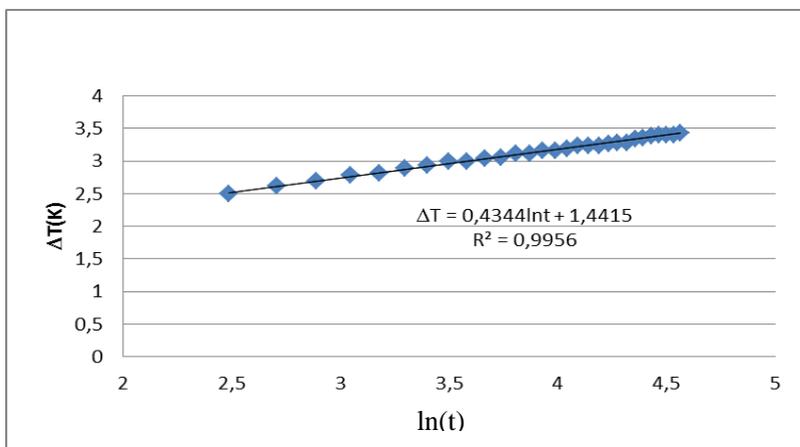


Figura 26- Reta obtida a partir da curva da Figura 25

Fonte: Elaborada pelo autor

A condutividade térmica efetiva foi determinada seguindo o mesmo procedimento utilizado para a argamassa.

Tabela 9- Condutividade térmica efetiva – rocha SDO 335 seca

Testes	i (A)	A ₁	R ²	λ (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	λ_e (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	Temperatura ambiente (°C)
1	0,4340	0,4344	0,9956	3,5338	3,56±0,11	23,0
2	0,4350	0,4288	0,9991	3,5965		
3	0,4340	0,4372	0,9962	3,5112		
4	0,4340	0,4346	0,9901	3,5322		
5	0,434	0,4310	0,9980	3,5617		

Fonte: Elaborada pelo autor

4.3.2 Rocha SDO 335 Saturada

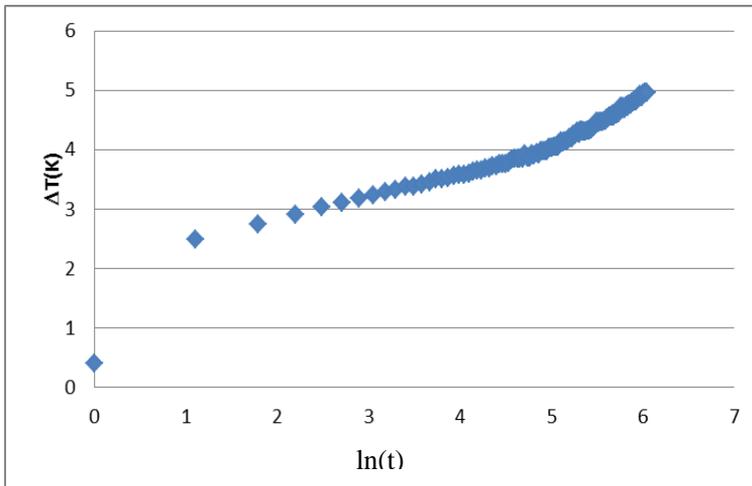


Figura 27- Variação de temperatura da sonda em função do $\ln(t)$

Fonte: Elaborada pelo autor

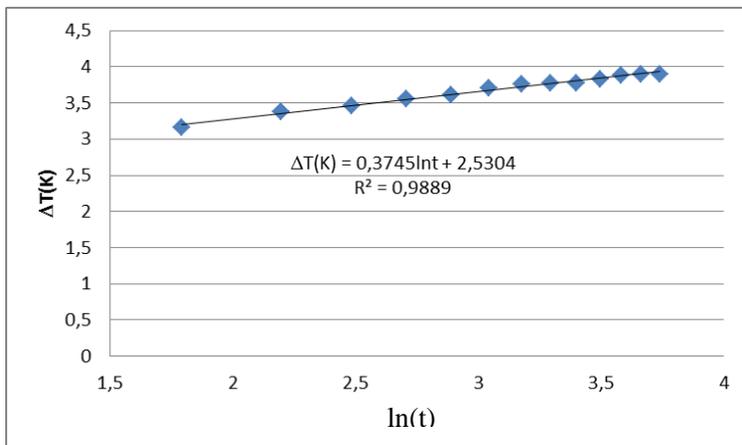


Figura 28- Reta obtida a partir da curva da Figura 27

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 10- Condutividade térmica efetiva – rocha SDO 335 saturada

Testes	i (A)	A_1	R^2	λ ($Wm^{-1}K^{-1}$)	λ_e ($Wm^{-1}K^{-1}$)	Temperatura ambiente (°C)
1	0,4308	0,3724	0,9925	4,0607	4,05±0,13	20,0
2	0,4303	0,3733	0,9916	4,0415		21,0
3	0,4294	0,3709	0,9922	4,0520		21,0
4	0,4292	0,3709	0,9860	4,0486		21,0
5	0,4295	0,3745	0,9889	4,0524		21,5

Fonte: Elaborada pelo autor

4.3.3 Rocha SDO 342 Seca

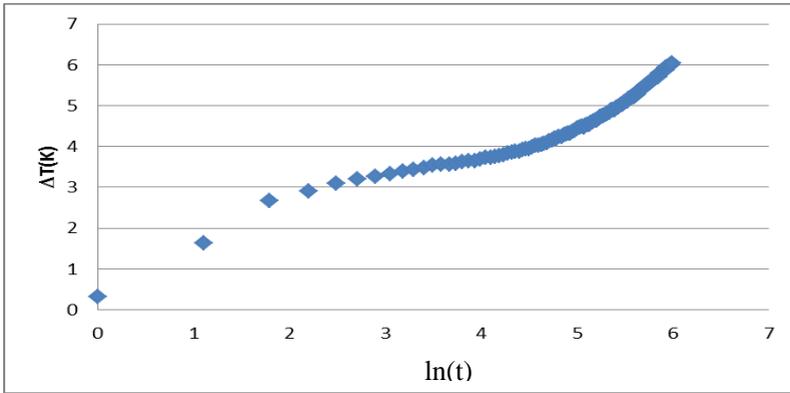


Figura 29- Variação de temperatura da sonda em função do $\ln(t)$

Fonte: Elaborada pelo autor

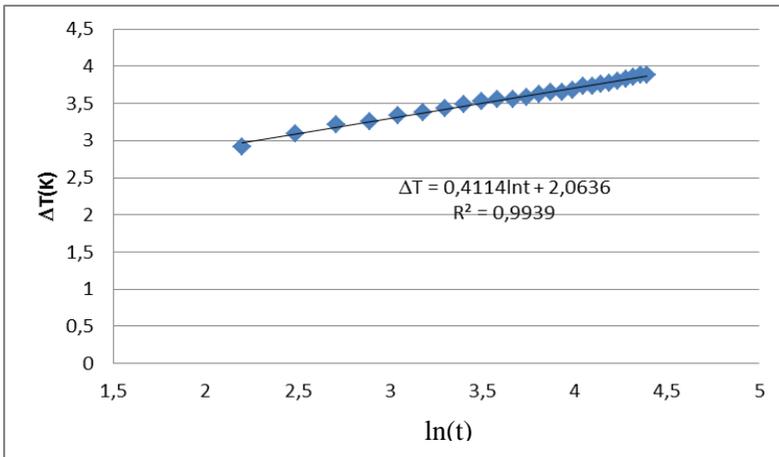


Figura 30- Reta obtida a partir da curva da Figura 29

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 11- Condutividade térmica efetiva - rocha SDO 342 seca

Testes	i (A)	A_1	R^2	λ ($Wm^{-1}K^{-1}$)	λ_e ($Wm^{-1}K^{-1}$)	Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
1	0,4340	0,4484	0,9954	3,4235	3,46 \pm 0,11	22,0
2	0,4340	0,4407	0,9971	3,4833		22,0
3	0,4320	0,4291	0,9901	3,5446		22,0
4	0,4320	0,4851	0,9913	3,1354		22,0
5	0,4320	0,4114	0,9939	3,6971		22,0

Fonte: Elaborada pelo autor

4.3.4 Rocha SDO 342 Saturada

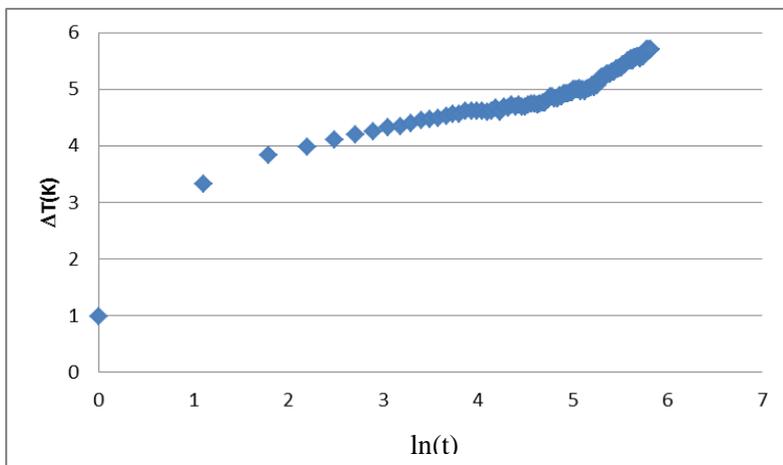


Figura 31- Variação de temperatura da sonda em função do $\ln(t)$

Fonte: Elaborada pelo autor

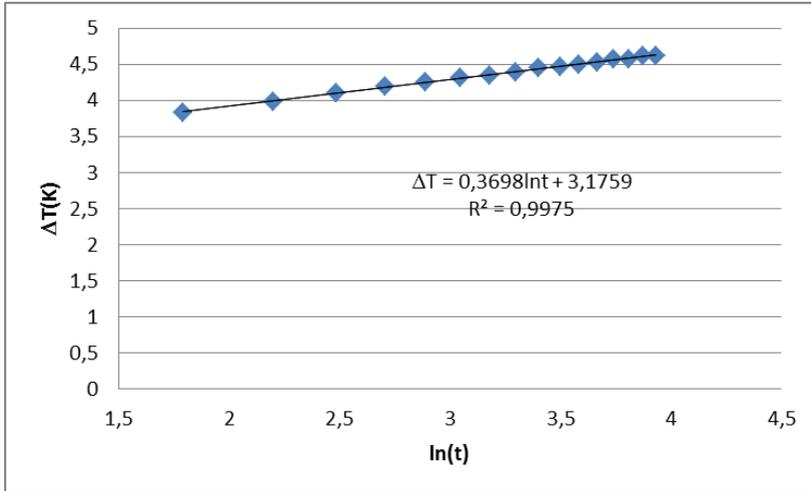


Figura 32- Reta obtida a partir da curva da Figura 31

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 12- Condutividade térmica efetiva – rocha SDO 342 saturada

Testes	i (A)	A ₁	R ²	λ (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	λ_e (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	Temperatura ambiente (°C)
1	0,4302	0,3613	0,9776	4,1747	4,11±0,13	23,0
2	0,4302	0,3653	0,9756	4,1298		23,0
3	0,4299	0,3635	0,9755	4,1441		24,0
4	0,4296	0,3717	0,9783	4,0457		24,0
5	0,4295	0,3698	0,9975	4,0657		24,0

Fonte: Elaborada pelo autor

4.3.5 Rocha WLO 307 seca

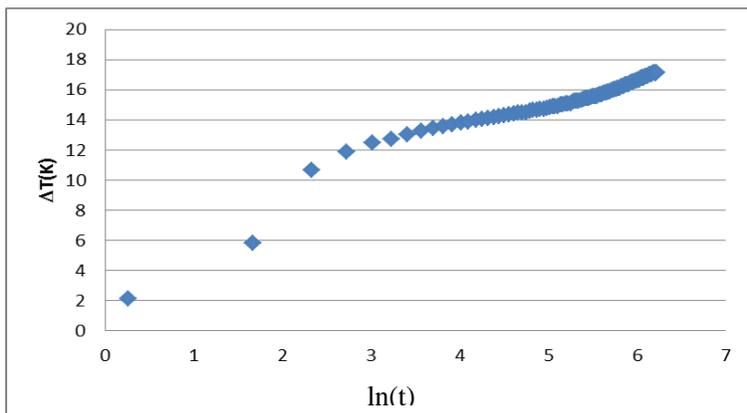


Figura 33- Variação de temperatura da sonda em função do $\ln(t)$

Fonte: Elaborada pelo autor

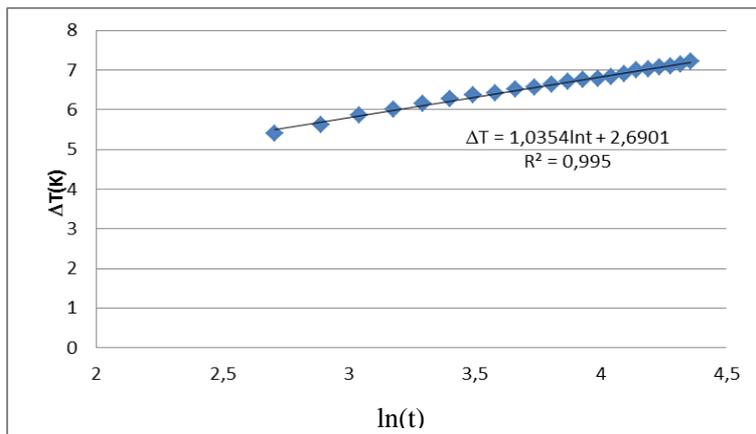


Figura 34- Reta obtida a partir da Figura 33

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 13- Condutividade térmica efetiva – rocha WLO 307 seca

Testes	i (A)	A ₁	R ²	λ (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	λ_e (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	Temperatura ambiente (°C)
1	0,4340	1,0331	0,9966	1,4859	1,49±0,05	21,0
2	0,4320	1,0340	0,9937	1,4710		
3	0,4350	1,0292	0,9941	1,4984		
4	0,4350	1,0354	0,9950	1,4895		
5	0,4340	1,0253	0,9971	1,4972		

Fonte: Elaborada pelo autor

4.3.6 Rocha WLO 307 Saturada

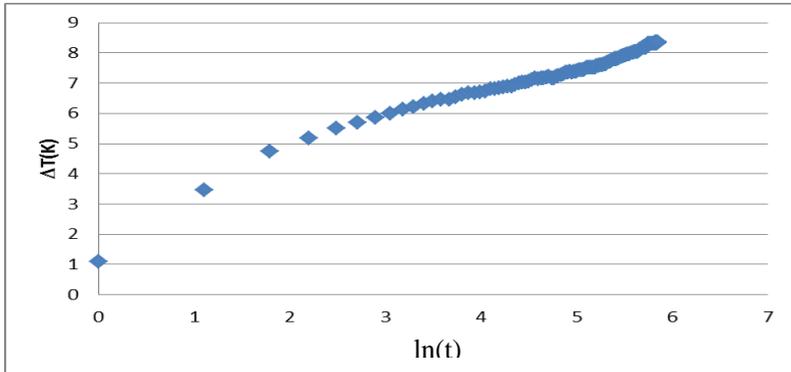


Figura 35- Variação de temperatura da sonda em função do ln(t)

Fonte: Elaborada pelo autor

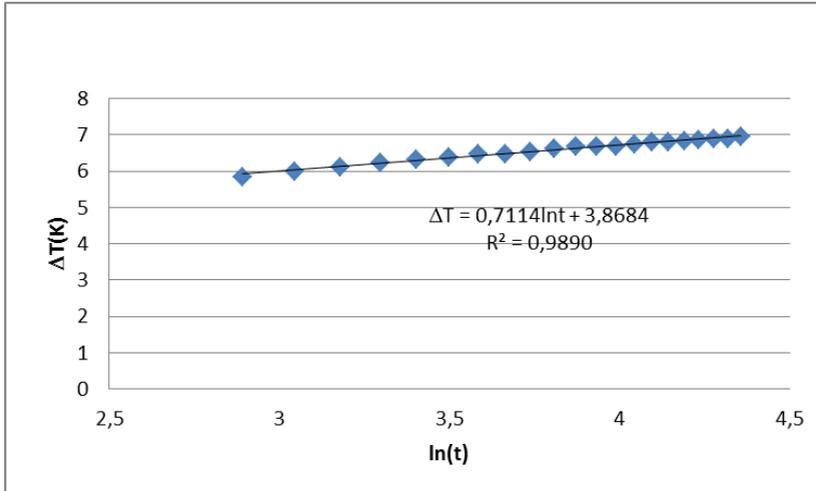


Figura 36- Reta obtida a partir da Figura 35

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 14- Condutividade térmica efetiva - rocha WLO 307 saturada

Testes	i (A)	A ₁	R ²	λ (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	λ_e (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	Temperatura ambiente (°C)
1	0,4313	0,7243	0,9887	2,0932	2,11±0,06	22,0
2	0,4316	0,7225	0,9956	2,1015		22,0
3	0,4311	0,7195	0,9924	2,1050		22,0
4	0,4309	0,7122	0,9957	2,1247		22,5
5	0,4304	0,7114	0,9890	2,1223		23,0

Fonte: Elaborada pelo autor

4.3.7 WLO 342 Seca

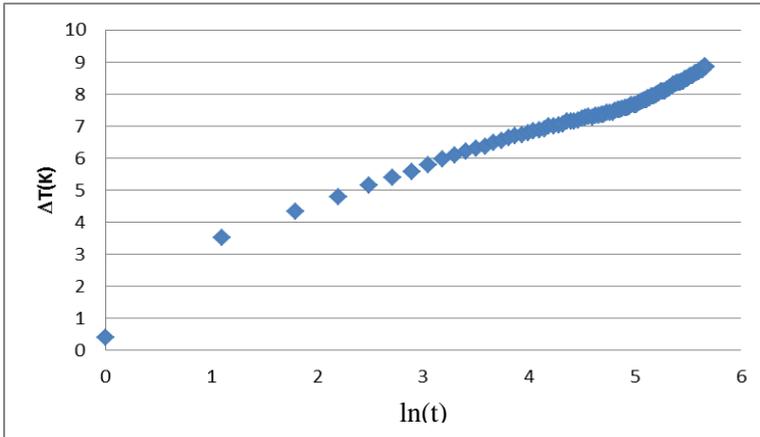


Figura 37- Variação de temperatura da sonda em função do $\ln(t)$

Fonte: Elaborada pelo autor

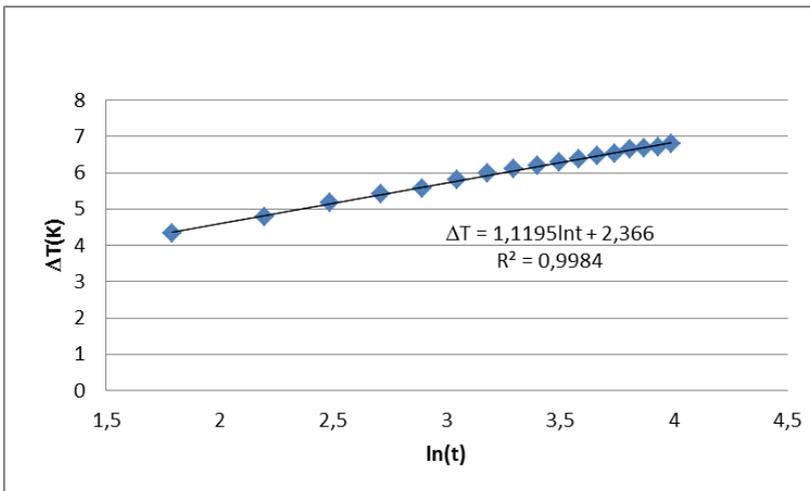


Figura 38- Reta obtida a partir da Figura 37

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 15- Condutividade térmica efetiva - rocha WLO 342 seca

Testes	i (A)	A ₁	R ²	λ (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	λ _e (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	Temperatura ambiente (°C)
1	0,4320	1,1164	0,9974	1,3624	1,36±0,04	22,0
2	0,4320	1,1195	0,9984	1,3586		
3	0,4320	1,1161	0,9943	1,3628		
4	0,4310	1,1128	0,9936	1,3605		
5	0,4310	1,1133	0,9925	1,3599		

Fonte: Elaborada pelo autor

4.3.8 Rocha WLO 342 Saturada

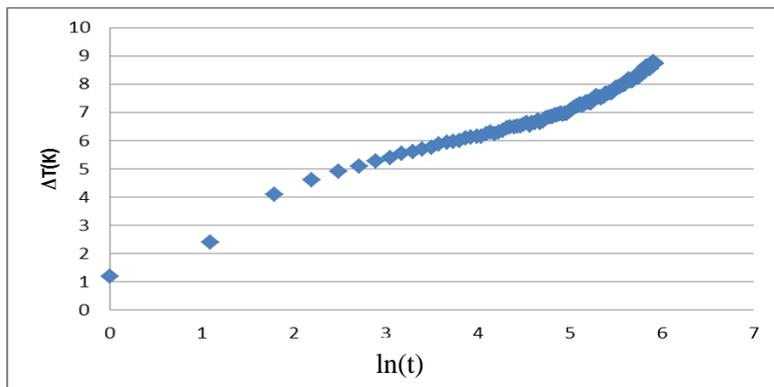


Figura 39- Variação de temperatura da sonda em função do ln(t)

Fonte: Elaborada pelo autor

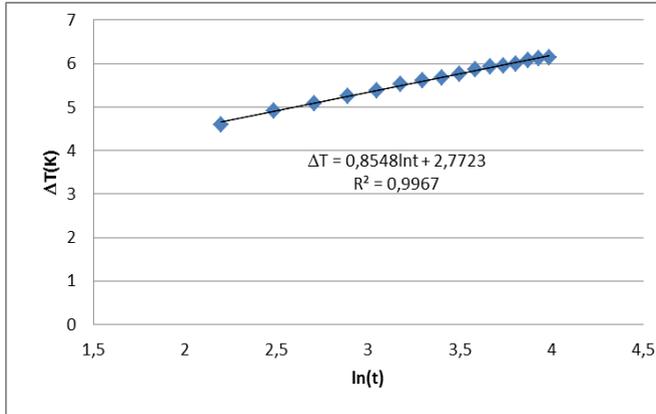


Figura 40- Reta obtida a partir da Figura 39

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 16- Condutividade térmica efetiva- rocha WLO 342 saturada

Testes	i (A)	A_1	R^2	λ ($Wm^{-1}K^{-1}$)	λ_e ($Wm^{-1}K^{-1}$)	Temperatura Ambiente ($^{\circ}C$)
1	0,4330	0,8532	0,9806	1,7909	1,79±0,06	21,0
2	0,4345	0,8697	0,9860	1,7691		21,0
3	0,4345	0,8538	0,9919	1,8022		22,0
4	0,4342	0,8542	0,9861	1,7991		21,5
5	0,4338	0,8548	0,9967	1,7940		22,0

Fonte: Elaborada pelo autor

Através dos resultados obtidos, podemos observar que o método transiente da sonda térmica possibilita a medição da condutividade térmica efetiva de materiais porosos. As retas foram obtidas dentro de um intervalo de tempo em torno de 80 s, intervalo aproximado que foi utilizado em todos os testes. Fazendo uma análise comparativa com os dados da literatura, verifica-se que os valores encontrados para as condutividades térmicas efetivas das rochas sedimentares estão dentro de uma faixa esperada. Segundo INCROPERA e DeWitt (2008), a condutividade térmica de rochas (arenitos) é $2,90 Wm^{-1}K^{-1}$ e rochas

quartzitos $5,38 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Para Luciano (2004), apud Carvalho (1981) e Carvalho e Vacquier (1997), a condutividade térmica média de arenitos de diversas formações da bacia sedimentar do Recôncavo Baiano varia de $(1,66 \pm 0,31) \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e $(3,97 \pm 0,31) \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

4.4 Gel ou Carbogel

O Gel ou Carbogel pH neutro, apresenta como composição: água, polímero, umectante, conservante e neutralizante. O experimento realizado com gel serviu como parâmetro comparativo para análise das amostras porosas. No gráfico da Figura 41, a relação variação de temperatura com logaritmo natural tempo é como um todo praticamente linear, não apresentando dificuldades para determinar o segmento de reta para determinação da condutividade térmica efetiva. Essa propriedade está associada ao fato do gel ser um material praticamente homogêneo. A Tabela 17 mostra que o coeficiente de correlação (R) é aproximadamente 1 (um) para cada teste, isto não aconteceu com os materiais não homogêneos (porosos).

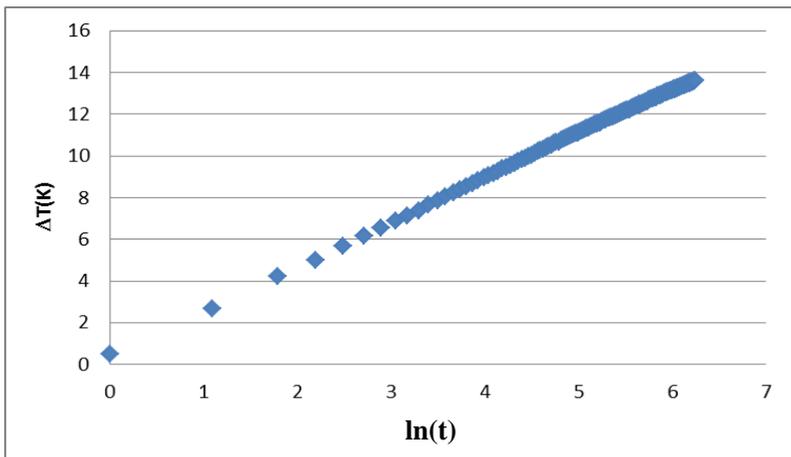


Figura 41- Variação de temperatura da sonda em função do $\ln(t)$

Fonte: Elaborada pelo autor

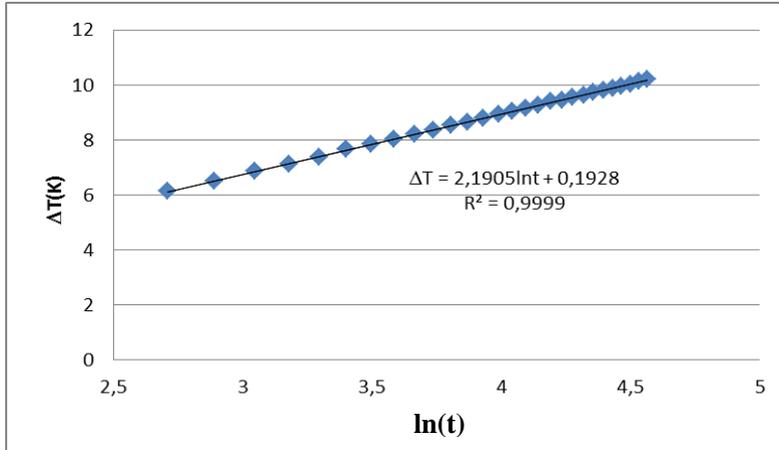


Figura 42- Reta obtida a partir da Figura 41

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 17- Condutividade térmica efetiva - Carbogel

Testes	i(A)	A ₁	R ²	λ (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	λ_e (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	Temperatura ambiente (°C)
1	0,4290	2,3700	0,9999	0,6329	0,66±0,20	26,0
2	0,4290	2,2500	1,0000	0,6666		26,0
3	0,4300	2,1535	0,9998	0,6998		26,0
4	0,4310	2,1905	0,9999	0,6911		26,0
5	0,4310	2,3162	0,9995	0,6536		27,0

Fonte: Elaborada pelo autor

4.5 CÁLCULOS DAS POROSIDADES

Usando-se o método baseado nas densidades das misturas, podemos determinar a porosidade, conforme Equação (2.20) e Equação (2.21):

Para amostra seca:

$$\rho_{seca} = \rho_{ar} \epsilon + (1 - \epsilon)\rho_s$$

Similarmente para rocha saturada de água:

$$\rho_{ssat} = \rho_{\acute{a}gua} \epsilon + (1 - \epsilon)\rho_s$$

Tomando os valores das densidades das amostras secas e saturadas, no Apêndice A, e a densidade do ar na literatura INCROPERA e DeWitt (2008) e a densidade da água (KREITH, 2003), utilizando o software EES: Engineering Equation Solver, encontrou-se as porosidades das amostras e as densidades das matrizes sólidas, conforme consta na Tabela 18.

Tabela 18- Porosidades e as densidades das matrizes sólidas

Amostra	Porosidade (ϵ)	Densidade da matriz sólida ($\rho_s \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$)
Argamassa	0,261	2,433
Rocha SDO 335	0,105	2,592
Rocha SDO 342	0,081	2,572
Rocha WIO 307	0,142	2,108
Rocha WIO 342	0,156	2,177

Fonte: Elaborada pelo autor

4.6 CÁLCULOS DA CONDUTIVIDADE DA MATRIZ SÓLIDA

4.6.1 Utilizando a equação de Maxwell modificada

Tendo os valores das condutividades térmicas efetivas das amostras nas condições de secas e saturadas, das porosidades e consultando os valores da condutividade térmica do ar ($0,026 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) e da água ($0,61 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), na literatura INCROPERA e DeWitt (2008), utilizando a equações de Maxwell modificada Equações (2.22) e (2.23), determinam-se as condutividades das cinco matrizes sólidas e os fatores de estruturas

empíricos conforme consta na Tabela 19.

$$\lambda_{\text{seca}} = \lambda_{\text{ar}} \frac{f\lambda_{\text{ar}} + \lambda_s - f(\lambda_{\text{ar}} - \lambda_s)(1 - \varepsilon)}{f\lambda_{\text{ar}} + \lambda_s + (\lambda_{\text{ar}} - \lambda_s)(1 - \varepsilon)}$$

$$\lambda_{\text{sat}} = \lambda_{\text{água}} \frac{f\lambda_{\text{água}} + \lambda_s - f(\lambda_{\text{água}} - \lambda_s)(1 - \varepsilon)}{f\lambda_{\text{água}} + \lambda_s + (\lambda_{\text{água}} - \lambda_s)(1 - \varepsilon)}$$

Para a resolução das equações, foi utilizado o *software EES: Engineering Equation Solver*.

Tabela 19- Condutividades térmicas das matrizes sólidas

Amostras	$\lambda_s(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$	f
Argamassa	3,09	17,63
Rocha SDO 335	4,47	139,10
Rocha SDO 342	4,49	50,96
Rocha WLO 307	2,39	33,04
Rocha WLO 342	2,03	45,27

Fonte: Elaborada pelo autor

4.6.2 Utilizando os modelos estruturais básicos

Utilizando-se os modelos estruturais básicos, para determinação das condutividades térmicas das cinco amostras de materiais porosos, de maneira similar ao processo realizado para a equação de Maxwell modificada, determinam-se as condutividades das matrizes sólidas das amostras. Os dados são apresentados nas tabelas abaixo:

Tabela 20- Condutividade da matriz sólida argamassa

Modelo	$\lambda_{seca}(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$	$\lambda_{saturada}(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$
Maxwell	1,32	1,99
Paralelo	1,18	2,96
Série	-0,08	-592,30
Meio efetivo	1,42	3,26

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 21- Condutividade da matriz sólida rocha SDO 335

Modelo	$\lambda_{seca}(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$	$\lambda_{saturada}(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$
Maxwell	4,10	3,41
Paralelo	3,97	4,46
Série	-0,24	11,99
Meio efetivo	4,21	4,64

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 22- Condutividade da matriz sólida rocha SDO 342

Modelo	$\lambda_{seca}(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$	$\lambda_{saturada}(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$
Maxwell	3,88	3,62
Paralelo	3,77	4,52
Série	-0,24	8,76
Meio efetivo	3,94	4,67

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 23- Condutividade da matriz sólida rocha WLO 307

Modelo	$\lambda_{seca}(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$	$\lambda_{saturada}(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$
Maxwell	1,84	1,94
Paralelo	1,74	2,37
Série	-0,18	3,59
Meio efetivo	1,89	2,46

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 24- Condutividade da matriz sólida rocha WLO 342

Modelo	$\lambda_{seca}(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$	$\lambda_{saturada}(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$
Maxwell	1,73	1,68
Paralelo	1,62	2,02
Série	-0,16	2,82
Meio efetivo	1,78	2,10

Fonte: Elaborada pelo autor

Sabendo-se que cada um desses modelos assume certa estrutura física, influenciando no valor da condutividade, a condutividade encontrada foi na condição de amostra seca ou saturada. Analisando os resultados obtidos e comparando com os encontrados através da equação de Maxwell modificada, nas condições de amostra seca e saturada, observa-se, com exceção do modelo série, que os resultados encontrados foram próximos, podendo-se dizer que o modelo série não é indicado para esses tipos de materiais.

James K., et al (2010), sugere a aplicação do modelo de Maxwell modificado na condição de amostra seca e saturada para materiais granulares.

5 - CONCLUSÕES

Neste trabalho determinaram-se as condutividades térmicas efetivas de cinco amostras de materiais porosos e uma de gel. Foram determinadas também as condutividades térmicas das partes sólidas das matrizes porosas. As amostras de materiais porosos são formadas por uma amostra de argamassa do tipo comercial e quatro de rochas sedimentares cedidas pelo CENPES/PETROBRAS. As condutividades térmicas efetivas foram determinadas por meio do método transiente da sonda térmica descrita no capítulo “Materiais e Métodos Utilizados”. Inicialmente mediu-se a condutividade efetiva da argamassa na condição de amostra seca.

A avaliação do erro experimental intrínseco no uso da sonda térmica foi efetuado utilizando-se o método fluximétrico, encontrando-se um erro de 1%. Na sequência, determinou-se a condutividade térmica efetiva da argamassa na condição de saturada com água deionizada. Na análise do gráfico variação de temperatura versus logaritmo natural do tempo em segundos [$\Delta T(K) \times \ln(t)$], observou-se que o intervalo de tempo que determinou o segmento de reta foi muito pequeno, entre 15s e 60s aproximadamente, com isso apresentando certa dispersão no valor da condutividade térmica efetiva.

Para uma melhor análise, foi repetido o experimento utilizando Gel ou Carbogel, por ser um material homogêneo. Os resultados obtidos indicaram uma configuração linear, e esta dispersão ocorreu pelo fato da argamassa não apresentar uma estrutura homogênea, a porosidade da argamassa determinada é de aproximadamente 26%. Na sequência determinaram-se as condutividades térmicas efetivas das quatro amostras de rochas nas condições de rocha seca e saturada. Observou-se que os intervalos nos quais foi obtido o segmento de reta eram pequenos, a maioria entre 6s e 80s. Ocorreu uma dispersão similar à argamassa; isso indica que as rochas analisadas também não apresentavam uma estrutura homogênea, as porosidades das rochas SDO 335 e SDO 342 são de aproximadamente 10%, enquanto das rochas WLO 307 e WLO 342 de aproximadamente 15%. Após conhecidas as condutividades térmicas efetivas das amostras dos materiais porosos nas condições de amostra seca e saturada, utilizando a equação de Maxwell modificada e os modelos estruturais básicos, foram determinadas as condutividades térmicas das matrizes sólidas.

Os resultados encontrados para as condutividades térmicas efetivas das rochas sedimentares seca variaram de $(1,36 \pm 0,04) \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e $(3,56 \pm 0,11) \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$; comparados com os valores da literatura, estão na

faixa de valores esperados.

Segundo INCROPERA e DeWitt (2008) a condutividade térmica de rochas (arenitos) é $2,90 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e rochas quartzitos $5,38 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Para LUCIANO (2004), apud Carvalho (1981) e CARVALHO e Vacquier (1997), a condutividade térmica média de arenitos de diversas formações da bacia sedimentar do Recôncavo Baiano varia de $(1,66 \pm 0,31) \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e $(3,97 \pm 0,31) \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. A partir do que se conclui que o método transiente da sonda térmica possibilita a medição da condutividade da matriz sólida de materiais porosos.

Sugestões para trabalhos futuros

O método transiente da sonda térmica oferece algumas condições favoráveis em relação a outros e destacam-se sua praticidade, custos, etc. como já mencionado anteriormente. A partir disso, como continuação deste trabalho, colocam-se, como sugestões, alguns tópicos:

- Um estudo mais completo, levando em conta outras propriedades termodinâmicas, como calor específico e difusividade térmica, com análise de mineralogia;
- Estudo e análise dos erros encontrados na sonda térmica;
- Estudo e análise entre sondas produzidas de forma artesanal e de escala industrial;
- A partir da caracterização, encontrar um modelo adequado;
- Uso da simulação numérica para melhorar o conhecimento da interação transiente entre a sonda térmica e a amostra.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15220-4 - Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida (2005).

ABNT NBR 15220-5 - Desempenho térmico de edificações - Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico (2005).

ALBERTAZZI, G. Jr. A., SOUZA, A. R. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**, Manoli. SP. 2008.

ASTM C177 - Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus(1997).

ASTM C518 - Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus,1991.

CARSON, J. K. Sekhon J. P. **Simple determination of the thermal conductivity of the solid phase of particulate materials, 2010.**

CARSON, J. K. **Prediction of the Thermal conductivity of Porous Foods.** Phd Thesis, Massey University, New Zealand, 2002

CLAUSER, C.; Huenges, E. *Thermal Conductivity of Rocks and Minerals.* AGU Handbook f Physical Constant. Am. Geophys. American Geophysical Union. Secion 39. p. 105-126,1995.

FERNANDES, C. P. **Estudo do processo de condensação e migração de umidades em meios porosos consolidados. Análise experimental de uma argamassa de cal e cimento.** Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1990.

FERREIRA O. P.; Alves O. L.; Macedo J. S.; Gimenez I. F. e Barreto L. S. **Ecomateriais: desenvolvimento e aplicação de materiais porosos funcionais para proteção ambiental.** Instituto de Química, UJniversidade Estadual de Campinas, CP 6154, 13084-971 Campinas –

SP, Brasil. Departamento de Química, Universidade Federal de Sergipe, Av. Marechal Rondon, s/n, 49100-000 São Cristóvão – SE, Brasil, 2007.

FIGUEIREDO, E. R. **Condutividade térmica de rochas: uma aplicação para granitos ornamentais**. Dissertação de mestrado, centro de ciências exata da Terra, programa de pós graduação em geodinâmica e geofísica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

FRICKE, H. **The electrical conductivity of two-phase materials**, Physical Reviews 24 575-587, 1924.

GIMENEZ I. F.; Ferreira O. P.; Alves O. L. **Desenvolvimento de ecomateriais: materiais porosos para aplicação em green chemistry (química verde)**. LQES–Laboratório de Química do Estado Sólido, Instituto de Química UNICAMP, CP6154 Campinas, SP 13081-970, Brasil, 2007.

INCROPERA F. P.; DeWitt D. P.; Bergman T. L.; Lavine A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, sexta edição, LTC, Rio de Janeiro**, 2008.

ISO 8301- Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus, 1991.

ISO 8302- Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus, 1991.

JANSEN, G. H. **Caracterização microestrutural e determinação de propriedades higrotérmicas de argamassas com adição de cinzas pesadas. Dissertação de mestrado**, Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

KREITH, F. et al. **Princípios de Transferência de Calor**. Tradução All Tasks. Pioneira Thomson Learning. São Paulo, 2003.

LAURENT, J. P. **Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires: Optimisation d'outils de mesures "in-situ" des paramètres thermiques. Application à l'étude des propriétés thermiques du matériau terre**. Tese de doutorado, Institute National Polytechnique d Grenoble, França 1986.

LUCIANO, C. de J. **Determinação da condutividade Térmica de rochas sedimentares a partir de perfilagem elétrica de poços.** Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

MATTIO, F.; Matuda T. G.; Tadini C. C. **construção de uma sonda linear de aquecimento para determinação da condutividade térmica da massa de pão congelada, pic-epusp nº 3, 2006.**

MIDITTØMME, K.; Roaldset . E. Thermal conductivity of sedimentary rocks: uncertainties in measurement and modelling. In: Muds and mudstones: physical and fluid-flow properties **Edited by Andrew C. Aplin, A. J. Fleet, Joe H. S. Macquaker, 1999.**

OUALI, S. **Thermal Conductivity in Relation to Porosity and Geological Stratigraphy.** Geothermal Training Programme. Reports Number 23, 2009.

PERRIN, B. **Etude des transferts couplés de chaleur et de masse dans de materiaux poreux consolidés non saturés utilises em gênie civil.** Tese de doutorado, Université Paul Sabatier de Toulouse, França, 1985.

QUEIROZ, G. M. **Determinação de propriedades termométricas do pão tipo francês durante o processo de assamento.** Dissertação de mestrado em engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.

Revista Brasileira de Geofísica. Vol.26. nº 3 São Paulo . July/Sept . 2008.

ROSA, E. S. **Avaliação hidrogeológica do aquífero São Sebastião na falha de Olindina utilizando geofísica de poço e de superfície,** Dissertação, Universidade Federal da Bahia. 2004.

SANTOS, W.N. **Métodos transientes de troca de calor na determinação das propriedades térmicas de materiais cerâmicos: O método de pulso de energia.** Departamento de Engenharia de Materiais. Universidade Federal de S. Carlos, São Paulo, 2005.

SIMÕES N.; Coelho D.; Martins S.; Tadeu A. **Influência das juntas de Argamassa no desempenho térmico de paredes de alvenarias.** CICC-Centro de Investigação em Ciências da Construção, Dep. de Eng. Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2010.

VIANA, M. M., **Materiais Porosos.** Monografia, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Engenharia Química, UFMG, 2004.

Wang J.; Carson J. K.; North M. F.; Cleland D. J. **A new approach to modelling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials.** Institute of Technology and Engineering, Massey University, Private Bag 11-222, Palmerston North, New Zealand, 2006.

ZARCONÉ, et al. **Mesure des caractéristiques termophysiques en milieux poreux par la méthode des chocs thermiques.** Colloque transfert de chaleur et de masse em milieu poreux non saturé. Lausanne Février.1982.

APÊNDICE A

CÁLCULO DA DENSIDADE DE SÓLIDO POROSO

A densidade (ρ) de um sólido é definida como a razão da massa pelo volume, como mostrado na expressão:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

A massa é determinada de maneira direta através de uma balança. Para sólidos regulares, determinamos o volume a partir de suas dimensões e as dimensões foram medidas utilizando um paquímetro digital. Na determinação da densidade de um material poroso é necessário considerar a existência das definições de densidade real e densidade aparente. A densidade aparente é o valor encontrado quando se considera o volume de determinado sólido, considerando todos os poros presentes. Na densidade real, somente se considera o volume de matéria sólida, sem considerar os poros presentes na amostra sólida. O volume medido pela densidade real é sempre menor que o medido pelo método da densidade aparente (VIANA, 2004).

CÁLCULO DA DENSIDADE APARENTE DAS AMOSTRAS:

Argamassa e Rochas

As amostras apresentam formas geométricas regulares (cilíndricas) facilitando os cálculos dos volumes. Os volumes foram determinados através da equação:

$$V = \frac{1}{4}\pi d^2 h$$

As massas foram determinadas através de uma balança. Para calcular os volumes, foram medidos o diâmetro e a altura dez vezes e tomados os valores médios. A densidade aparente foi calculada pela equação abaixo. A Tabela 25 mostra os valores das densidades aparentes.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Tabela 25- Densidades aparentes das amostras sólidas

Amostras	V(m³) x 10⁻⁶	m_{seca}(kg) x 10⁻³	m_{sat}(kg) x 10⁻³	ρ_{seca}(kg m⁻³) x 10³	ρ_{sat}(kg m³) x 10³
Argamassa	644,436	1159,000	1326,460	1,798	2,058
Rocha SDO 335	80,230	184,956	193,286	2,305	2,409
Rocha SDO 342	100,341	237,159	245,268	2,363	2,444
Rocha WLO 307	82,582	149,507	161,085	1,810	1,951
Rocha WLO 342	100,576	184,866	200,494	1,838	1,993

Fonte: Elaborada pelo autor

APÊNDICE B

DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS

Equação unificadora dos modelos estruturais básicos

Para Wang J., et al.2006 apud Brailsford e Major, cada equação mostrada para duas componentes na seção 2.6 pode ser derivada para um material de multicomponentes a partir da equação abaixo por escolha adequada dos parâmetros d_i e $\tilde{\lambda}$.

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i v_i \frac{d_i \tilde{\lambda}}{(d_i - 1)\tilde{\lambda} + \lambda_i}}{\sum_{i=1}^m v_i \frac{d_i \tilde{\lambda}}{(d_i - 1)\tilde{\lambda} + \lambda_i}}$$

Nomenclatura:

$\lambda \rightarrow$ Condutividade térmica;

$v \rightarrow$ Fração de volume;

$m \rightarrow$ Número de componentes;

$\tilde{\lambda} \rightarrow$ Condutividade térmica da fase.

O modelo série é obtido quando $d_i = 1$ e $\tilde{\lambda} \rightarrow 0$, o modelo paralelo quando $d_i \rightarrow \infty$ ou $\tilde{\lambda} = \lambda_i$, o Maxwell – Eucken quando $d_i = 3$, $\tilde{\lambda} = \lambda_{\text{contínuo}}$ e o EMT para $d_i = 3$, $\tilde{\lambda} = \lambda$.

O parâmetro d_i pode ter uma interpretação física. Para Wang J. et al.2006 apud Kirkpatrick ele está relacionado com o número semelhante de dimensões Euclidiana do sistema envolvido. Enquanto que para Wang J. et al.2006 apud Fricke e Hamilton e Crosser ele está relacionado à esfericidade da fase dispersa. No entanto, pode ser possível definir um parâmetro que combine ambos os aspectos de forma de componentes e o número de dimensões Euclidianas.