

**UNIVERSIDADE SANTA CECILIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**HUGO VICENTE DA SILVA**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO FOSFOGESSO COMO ISOLANTE TÉRMICO  
ATRAVÉS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO**

**SANTOS/SP  
2013**

**HUGO VICENTE DA SILVA**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO FOSFOGESSO COMO ISOLANTE TÉRMICO  
ATRAVÉS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação de:  
Orientador: Prof. Dr. Aldo Ramos Santos  
Coorientador: Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior.

**SANTOS/SP  
2013**

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos ou científicos.

---

Hugo Vicente da Silva

Santos, \_\_\_/\_\_\_/ 2013.

Silva, Hugo Vicente

Análise experimental do fosfogesso como isolante térmico através da transferência de calor por condução. Hugo Vicente da Silva.

2013.

138 p.

Orientador: Prof. Dr. Aldo Ramos Santos

Coorientador: Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior

Dissertação (Mestrado) – Universidade Santa Cecília, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2013.

**UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO FOSFOGESSO COMO ISOLANTE TÉRMICO  
ATRAVÉS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO**

HUGO VICENTE DA SILVA

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica, defendida e aprovada em \_\_/\_\_/2013 pela Banca Examinadora.

Banca Examinadora:

---

---

Prof.(a). Dr(a)

Universidade de Origem

---

---

Prof.(a). Dr(a)

Universidade de Origem

---

---

Prof.(a). Dr(a).

Universidade de Origem

**O orientador declara que a Dissertação tem a aprovação** para digitalização (02 cópias em CD), a fim de serem entregues na Secretaria para o início do processo de pedido de diploma, com o prazo máximo de **30 dias** a contar da defesa.

**O orientador declara que a Dissertação tem a aprovação condicionada às reformulações solicitadas pela Banca Examinadora** no prazo máximo de **90 dias** a contar da defesa, tendo o aluno, obrigatoriamente, que apresentar a dissertação com as reformulações aprovadas até \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_\_. O aluno tem, a partir desta data-limite, o prazo máximo de **30 dias** para a entrega de 02 cópias em CD da dissertação, a serem entregues na Secretaria para o início do processo de pedido de diploma.

\_\_\_\_\_  
Assinatura do Orientador

Data: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / 2013.

*Dedico este trabalho aos meus pais (in memoriam) a minha esposa e aos meus filhos que tiveram paciência para suportar minha ausência.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos orientadores Professores Doutor Aldo Ramos Santos e Doutor Deovaldo de Moraes Júnior pela destreza, pelo apoio incondicional e pela generosidade em compartilharem seu respectivo conhecimento sobre a matéria ora desenvolvida, que culminou na presente Dissertação.

Ao Coordenador do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu, Professor Doutor Marcos Tadeu Tavares Pacheco, pelas constantes diligências para manter um alto nível docente e curricular, e também aos Professores Dr. Thiago César de Souza Pinto e Dra. Karina Tamião de Campos Roseno pela constante e valiosa colaboração técnica.

À COPEBRÁS pelo fornecimento do fosfogesso.

À Universidade Santa Cecília pelo pioneirismo em estabelecer na cidade de Santos um curso de tão alto viés intelectual e experimental, bem como seus funcionários, principalmente nas pessoas das Secretárias do Curso Sandra Helena Aparecida de Araújo e Imaculada Scorza.

Aos técnicos do Laboratório de Operações Unitárias Gilmar Alcântara, Volnei de Lemos e Irineu da Ressurreição, por todo suporte técnico na construção das unidades experimentais.

Aos alunos estagiários do Laboratório de Operações Unitárias pela ajuda a realização dos experimentos.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

## RESUMO

O fosfogesso é o subproduto primário para produção de ácido fosfórico pelo processo por via úmida, através da rocha fosfática, para a produção de fertilizante. Como se trata essencialmente de um sulfato de cálcio é denominado de fosfogesso. Para cada tonelada de ácido fosfórico produzido, são geradas cerca de 4 a 5 toneladas de fosfogesso. Assim, a produção de fertilizantes fosfatados gera grandes volumes de fosfogesso que são estocados em grandes pilhas a céu aberto, e que cobrem largas áreas pela grande geração do subproduto em todo o mundo. Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas com base na possibilidade do uso do fosfogesso como material para diversas aplicações. Este trabalho objetivou determinar a constante de condutividade térmica ( $k$ ) do fosfogesso visando a sua utilização como isolante térmico, tanto na construção civil como no setor industrial. Para tanto, dois experimentos foram realizados resultando em uma comparação entre os coeficientes de condutividade térmica ( $k$ ) do fosfogesso com outros materiais termoisolantes comerciais. A quantidade do calor produzido foi gerada por resistência elétrica a qual fluiu através das amostras para determinar a medição do coeficiente de condutividade térmica da primeira equação de Fourier. Com base nos resultados que foram auferidos, é possível afirmar que o fosfogesso não poderá ser aplicado como material termoisolante em escala comercial, mas pode pertencer a outros grupos de materiais semi-isolantes.

Palavras-Chave: 1. Fosfogesso 2. Ácido Fosfórico 3. Isolante térmico  
4. Condutividade térmica 5. Transferência de Calor.

## **ABSTRACT**

Phosphogypsum is the primary by-product of the wet-acid process for producing phosphoric acid from phosphate rock for obtaining fertilizer. As it is largely calcium sulfate it has been given the name phosphogypsum. For every ton of phosphoric acid produced, some four to five tons of phosphogypsum are also manufactured. So, phosphate production generates very large volumes of phosphogypsum, which is stored in huge piles called "stacks" outdoors, and that cover large areas worldwide. Many researches have been developed due to the possibility of the use of phosphogypsum as matter for several industrial uses. This study had been undertaken to set the constant of the thermal conductivity ( $k$ ) of phosphogypsum due to the possibility of its application as thermal-isolating material in building or in industrial sector. So far, two experiments were achieved, resulting in a comparison between the thermal conductivity coefficient ( $k$ ) of phosphogypsum with other commercial thermal-isolating material. The quantity of produced heat has been generated by electrical resistance which flows through the samples and determines the measuring of the thermal conductivity coefficient of the Fourier equation. Due to the final results, it will be possible to affirm that phosphogypsum cannot be applied as thermal-isolating material although it may belong to other semi-isolating materials group.

Key-words: 1. Phosphogypsum 2. Phosphoric Acid 3. Thermal Isolator  
4. Thermal Conductivity 5. Heat transfer.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Pilha de fosfogesso estocado em Imbituba – SC .....	20
Figura 2 – Sistema em equilíbrio térmico .....	27
Figura 3 – Transferência de calor por condução .....	28
Figura 4 – Transferência de calor por convecção .....	29
Figura 5 – escoamento de fluido sobre uma superfície .....	30
Figura 6 – Camada limite na transferência de calor por convecção .....	32
Figura 7 – Variação da condutividade térmica com a temperatura .....	34
Figura 8 – Sistema para determinação da condutividade térmica .....	34
Figura 9 – Características de um isolante térmico .....	36
Figura 10 – Ilustração geral dos elementos que compõem o primeiro experimento .....	42
Figura 11 – Ilustração da resistência elétrica que divide o dispositivo em duas seções .....	44
Figura 12 – Ilustração do sistema elétrico para alimentação do experimento .....	44
Figura 13 – Transmissão de calor em parede plana .....	45
Figura 14 – Ilustração do fosfogesso após a secagem e apassivação com carbonato de cálcio .....	51
Figura 15 – Condutividade térmica do fosfogesso no Sistema Parede Plana tendo como temperatura de estabilização $T = 68,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	60
Figura 16 – Gráfico da condutividade térmica no sistema de parede plana com temperatura de estabilidade de $T = 251\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	62
Figura 17 – Ilustra a fabricação do tampo do cilindro do dispositivo onde está contida a amostra .....	63
Figura 18 – Ilustra a fabricação do dispositivo do sistema radial .....	64
Figura 19 – Ilustração a fabricação do dispositivo do sistema radial .....	65
Figura 20 – Ilustra o dispositivo experimental montado .....	65
Figura 21 – Ilustração geral dos elementos que compõem o banho termostatizado .....	66
Figura 22 – Ilustração do sensor de temperatura digital .....	66
Figura 23 – Ilustração dos termopares .....	67
Figura 24 – Ilustração da resistência elétrica tipo cartucho .....	67
Figura 25 – Ilustrativa do sistema radial – unidade experimental .....	68
Figura 26 – Desenho esquemático do sistema radial .....	70

Figura 27 – Ilustrativa da mistura de fosfogesso com $\text{CaCO}_3$ para ajuste do pH neutro .....	73
Figura 28 – Ilustra a balança de laboratório .....	74
Figura 29 – Equipamento vibratório de peneiramento .....	74
Figura 30 – Curva representativa da amostra granulométrica do fosfogesso .....	75
Figura 31 – Gráfico da Equação de Fourier construídos com os pontos levantados no ensaio do fosfogesso em regime permanente .....	80
Figura 32 – Gráfico do sistema cilíndrico do fosfogesso tendo a variação da temperatura com o tempo do experimento na bancada – legenda para os sensores da figura 28 .....	81
Figura 33 – Condutividade do fosfogesso para sistema parede plana e cilíndrico	86
Figura 34 – Gráfico comparativo entre a condutividade térmica do fosfogesso x material isolante .....	89
Figura 35 – Gráfico comparativo da condutividade térmica do fosfogesso com materiais de construção civil .....	90
Figura 36 – Gráfico comparativo da condutividade térmica do fosfogesso com material industrial .....	91

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Primeiro ensaio com uso do Picnômetro de 50 ml .....	46
Tabela 2 – Dados obtidos com a areia grossa: granulometria - mesh 24 .....	47
Tabela 3 – Dados obtidos com a areia fina: granulometria - mesh 42/60 .....	49
Tabela 4 – Dados de temperatura, corrente e tensão elétrica obtidos com a areia fina: granulometria - mesh 42/60 .....	49
Tabela 5 – Distribuição do fosfogesso retido nas malhas dos peneiros .....	52
Tabela 6 – Resultado obtido no ensaio com fosfogesso - mesh 100/140 .....	53
Tabela 7 – Resultado obtido no ensaio com fosfogesso - mesh 100/140 .....	54
Quadro 1 – Determinação do valor médio do K, W/m. C para areia grossa .....	55
Quadro 2 – Determinação do valor médio do K, W/m. C para areia fina .....	56
Tabela 8 – Resumo do experimento das areias fina e grossa .....	57
Quadro 3 – Condutividade térmica do fosfogesso pelo sistema plano .....	59
Quadro 4 – Determinação do K, W/m. C .....	60
Quadro 5 – Resumo da condutividade térmica (k) do fosfogesso .....	62
Tabela 9 – Dados coletados no ensaio da amostra fosfogesso da corrente e tensão elétrica, com temperatura estabilizada em 122 °C no primeiro termopar – data – 14/10/1012 .....	71
Tabela 10 – Dados coletados no ensaio da amostra fosfogesso da temperatura, corrente e tensão elétrica, com temperatura estabilizada em 122 °C no primeiro termopar em 14/10/1012 .....	75
Tabela 11 – Condutividade Térmica de Materiais – construção civil, refratário, isolante térmico e outros materiais .....	76
Quadro 6 – Determinação dos valores de K da areia grossa em relação à posição relativa dos termopares – W/m. C .....	78
Quadro 7 – Determinação dos valores de K do fosfogesso com temperatura de estabilização no 1º termopar de 122 °C em relação à posição dos termopares – W/m. C .....	82
Quadro 8 – Resumo da condutividade térmica do fosfogesso na parede plana e no sistema radial cilíndrico .....	86
Tabela 12 – Condutividade térmica de materiais .....	87

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>NPK</b>	Composição de Nitrogênio+Fósforo+Potássio
$\dot{q}$	Taxa de transferência de calor na direção x (Kcal/h)
<b>Q</b>	Fluxo de calor (Kcal/h)
<b>k</b>	Coeficiente de condutividade térmica (Kcal/h.m.K)
<b>A</b>	Área da secção transversal ao fluxo térmico em m <sup>2</sup>
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura (K/m)
$T_s$	Temperatura da superfície (K)
$T_\infty$	Temperatura do fluido distante da área de troca de calor (K)
<b>K</b>	Grau Kelvin
<b>Q</b>	Taxa de transferência de calor por convecção (Kcal/h)
<b>A<sub>s</sub></b>	Área da secção da transferência de calor por convecção (m <sup>2</sup> )
<b>T</b>	Temperatura do fluido na temperatura global (K)
<b>h</b>	Coeficiente de transferência de calor por convecção (kcal/h.m <sup>2</sup> .K)
$\dot{q}_{rad}$	Taxa de transferência de calor por radiação
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann (Kcal/h.m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> )
$\epsilon$	Emissividade (adimensional)
<b>A<sub>r</sub></b>	Área da secção do calor por radiação (m <sup>2</sup> )
<b>T<sub>1</sub></b>	Temperatura de superfície 1 (K)
<b>T<sub>2</sub></b>	Temperatura de superfície 2 (K)
<b>V<sub>∞</sub></b>	Velocidade distante da superfície aquecida (m/s)
<b>V(y)</b>	Distribuição de velocidade
<b>T(y)</b>	Distribuição de temperatura
$\Delta T$	Diferença de temperatura
<b>L</b>	Espessura da parede por onde flui o calor (m)
<b>°C</b>	Grau Celsius
<b>H</b>	Altura (m)
<b>DN</b>	Diâmetro nominal (m)
<b>UCOS</b>	Umedecimento, compactação e secagem
<b>Pol.</b>	Polegada – medida de comprimento usada no sistema imperial de medidas britânico
<b>Seg.</b>	Segundo – unidade de medida de tempo do Sistema Internacional de Medidas
<b>pH</b>	Potencial hidrogeniônico – unidade que indica o nível de acidez, neutralidade ou alcalinidade de um meio qualquer – a escala varia 0 a 14
<b>min.</b>	Minuto – unidade de medida de tempo.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	15
1.1 OBJETIVOS .....	18
1.1.1 OBJETIVO GERAL .....	18
1.1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO .....	18
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	19
2.1 FOSFOGESSO .....	19
2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	27
2.2.1 Transferência de calor por condução .....	28
2.2.2 Transferência de calor por convecção .....	29
2.2.3 Transferência de calor por radiação .....	31
2.3 CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE MATERIAIS .....	32
2.4 ISOLANTES TÉRMICOS .....	35
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	41
3.1 PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA PAREDE PLANA .....	41
3.1.1 Equipamentos e instrumentos .....	41
3.1.2 Preparação para o ensaio com a amostra areia .....	46
3.1.2.1 Primeiro ensaio com areia grossa .....	46
3.1.2.1.1 Determinação da granulometria da areia grossa .....	46
3.1.2.1.2 Determinação da densidade real da areia grossa .....	46
3.1.2.1.3 Determinação da condutividade térmica da areia grossa .....	47
3.1.2.2 Segundo ensaio com areia fina .....	48
3.1.2.2.1 Determinação da granulometria da areia fina .....	48
3.1.2.2.2 Determinação da densidade real da areia fina .....	48
3.1.2.2.3 Determinação da condutividade térmica da areia fina .....	49
3.1.3 Fosfogesso .....	50
3.1.3.1 Coleta do material e preparação .....	50
3.1.3.2 Determinação do pH, apassivação e ajuste do fosfogesso .....	50
3.1.3.3 Granulometria – Método de Peneiração .....	52
3.1.3.4 Dados experimentais .....	53
3.1.4 Apresentação dos resultados da parede plana .....	54

3.1.4.1 Ensaio para aferição do dispositivo.....	54
3.2 SEGUNDO EXPERIMENTO PARA SISTEMA RADIAL .....	62
3.2.1 Equipamentos e instrumentos .....	62
3.2.2 Método .....	69
3.2.2.1 Ensaio com areia grossa para calibração do dispositivo radial .....	71
3.2.2.2 Levantamento de dados para a determinação da condutividade térmica em regime permanente da areia grossa pelo método do sistema radial .....	71
3.2.3 Fosfogesso .....	72
3.2.3.1 Coleta do material e preparação da amostra .....	72
3.2.3.2 Determinação do pH, apassivação e ajuste do fosfogesso .....	72
3.2.3.3 Granulometria – Método de Peneiração .....	73
3.2.3.4 Dados experimentais .....	76
3.2.4 Apresentação dos resultados do sistema radial .....	77
3.2.4.1 Ensaio com areia grossa para aferição do dispositivo do experimento cilíndrico .....	77
3.2.4.2 Ensaio com o fosfogesso .....	79
3.2.4.2.1 Estabilidade unidimensional do fluxo de calor no sistema cilíndrico ...	79
3.2.4.2.2 Estabilidade da temperatura do sistema .....	80
3.2.4.2.3 Determinação da condutividade térmica do fosfogesso pelo sistema cilíndrico .....	82
4 DISCUSSÃO DOS EXPERIMENTOS .....	84
4.1 PRIMEIRO EXPERIMENTO – CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO FOSFOGESSO PELO SISTEMA DE PAREDE PLANA .....	84
4.2 SEGUNDO EXPERIMENTO – CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO FOSFOGESSO PELO SISTEMA RADIAL CILÍNDRICO .....	85
4.3 COMPARAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO FOSFOGESSO NO PRIMEIRO E SEGUNDO EXPERIMENTO .....	85
4.4 COMPARAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO FOSFOGESSO $K = 0,2899$ COM OUTROS MATERIAIS ISOLANTES TÉRMICOS .....	87
5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....	92
REFERÊNCIAS .....	94
APÊNDICES .....	98
Apêndice 1: Cálculo da densidade real da areia grossa .....	98

Apêndice 2: Cálculo da densidade real da areia fina .....	100
Apêndice 3: Determinação da condutividade térmica da areia grossa – dispositivo placa plana .....	102
Apêndice 4: Determinação da condutividade térmica da areia fina – mesh 42/60 – placa plana .....	110
Apêndice 5: Determinação da condutividade térmica do fosfogesso – placa plana .....	117
Apêndice 6: Determinação da condutividade térmica do fosfogesso – mesh 100/140 - Placa plana.....	122
Apêndice 7: Determinação da condutividade térmica da areia grossa – mesh 12/24 – sistema radial .....	127
Apêndice 8: Determinação da condutividade térmica do fosfogesso – sistema radial .....	131
ANEXOS .....	135
Anexo A: Primeiro Experimento – dispositivo parede plana .....	135
Anexo B: Primeiro Experimento – desenho esquemático .....	136
Anexo C: Segundo Experimento – desenho esquemático .....	137
Anexo D: Dispositivo – sistema cilíndrico .....	138

## 1 INTRODUÇÃO

É compreensível a importância do ácido fosfórico no contexto mundial, considerando a demanda do mercado para a produção de fertilizantes agrícolas, como o adubo fosfatado. O adubo fosfatado (composto pela mistura de NPK, nitrogênio, fósforo e potássio) é um importante fertilizante que repõe o ácido fosfórico no solo, considerado uma das principais matérias nutritivas extraídas pelas plantas (FERNANDES; CASTILHOS, 2010).

A produção industrial de ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) por via úmida realiza-se pela reação química entre a rocha fosfática, representada pelo fosfato tricálcico [ $Ca_3(PO_4)_2$ ], e o ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) gerando, como subproduto indesejável, o fosfogesso, representado pelo sulfato de cálcio di-hidratado ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) (OLIVEIRA, 2005).

Assim, a produção de fertilizantes fosfatados, obtida por meio da reação de rochas fosfáticas que originam o ácido fosfórico, cresce geometricamente em termos mundiais.

No Brasil, as principais fábricas de produção de ácido fosfórico estão localizadas nas Regiões Sudeste (Uberaba – MG – 675.000 t/ano, Cubatão – SP – 128.000 t/ano, Cajati – SP – 180.000 t/ano) e Centro-Oeste (Catalão). Essas fábricas foram implantadas há cerca de 20 anos quando a questão de ocupação de espaço com os depósitos de fosfogesso não era um problema.

Este resíduo necessita de um cuidadoso monitoramento por se tratar de um material que contém elementos radioativos e alguns metais pesados em sua composição (PINTO, 2002a).

O contexto que se apresenta, pela justificativa do tema, infere que o descarte final do fosfogesso, pelas indústrias geradoras desse subproduto, é realizado em empilhamento próximo à fonte geradora, ou ainda descarregado em rios ou oceanos, causando impacto ambiental no solo, subsolo, flora, fauna, corpos d'água e águas subterrâneas, além da poluição visual causada pela formação de enormes áreas degradadas.

Dados de 2010 referem que, no Brasil, há um estoque de fosfogesso de cerca de 150 milhões de toneladas. A produção anual é de cerca de 5 milhões de

toneladas por ano. E a tendência é de aumento, já que a indústria de fertilizantes tende a crescer (FERNANDES et al., 2010).

Diante do problema ambiental gerado pela produção excessiva desse resíduo, surge a preocupação em se reutilizar o mesmo de maneira adequada.

Relevantes pesquisas sobre o assunto e reutilização do fosfogesso estão em andamento, e, para esse trabalho em questão, o objetivo principal é contemplar a possibilidade de utilização do fosfogesso como material isolante térmico, para diversas aplicações industriais, como isolamento térmico de tubulações, caldeiras, máquinas térmicas e refrigeradas, e outros.

O isolamento térmico de alta qualidade frequentemente constitui a base de processos técnicos complexos e aplicações na indústria. O isolamento limita a perda do calor e do frio, minimiza a oscilação da temperatura quando os materiais são transportados.

Daí surge o interesse da pesquisa na determinação da condutividade térmica do fosfogesso.

Os diferentes processos de transferência de calor são referidos como mecanismos de transferência de calor. Existem três mecanismos, que podem ser reconhecidos assim: transferência de calor por condução; transferência de calor por convecção e transferência de calor por radiação.

O coeficiente de condutividade térmica, propriedade física dos materiais, denominado de “k”, indica a capacidade que um determinado meio possui para conduzir calor entre duas áreas em temperaturas diferentes, conforme expressa a Equação de Fourier (Equação 1).

Os valores numéricos de k variam em extensa faixa dependendo da composição química, estado físico e temperatura dos materiais. Quando o valor de k é elevado, o material é considerado condutor térmico e, caso contrário, isolante térmico.

$$\dot{q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Sendo:

$\dot{q}$  – fluxo de calor ou taxa de transferência de calor na direção x (kcal/h),

$k$  – coeficiente de condutividade térmica, sendo uma propriedade importante de qualquer material seja sólido, líquido e gasoso (Kcal/h.m.K) ou (W/m. °C)

$A$  – a área de secção transversal ao fluxo térmico ( $m^2$ ),

$\frac{dT}{dx}$  – gradiente de temperatura negativo pois  $T_2 < T_1$  - (K/m).

Para se determinar a qualidade de condutividade térmica de um material, é necessário se conhecer as ligações em sua estrutura atômica ou molecular como também o seu coeficiente de condutividade térmica.

Por esse entendimento, os metais são excelentes condutores de calor por possuírem os elétrons mais externos levemente ligados, tornando-se livres para transportar energia por meio de colisões através do metal. Contudo, materiais como lã, madeira, vidro, papel e isopor são maus condutores de calor e considerados isolantes térmicos, pois, os elétrons mais externos de seus átomos estão firmemente ligados. Essas assertivas podem ser comprovadas quando da determinação do coeficiente de condutividade térmica, por meio de experimentos laboratoriais.

A maioria dos isolantes térmicos usados industrialmente é feita dos seguintes materiais: amianto, carbonato de magnésio, sílica diatomácea, vermiculita, lã de rocha, lã de vidro, cortiça, plásticos expandidos, aglomerados de fibras vegetais, silicato de cálcio, perlita expandida, fibra cerâmica. Os isolantes térmicos podem ser adquiridos em diversas formas, dependendo da constituição e da finalidade à qual se destinam. Alguns exemplos de formatos comumente encontrados são: calhas, mantas, placas, flocos, cordas, papel, pulverizados ou granulados e pré-moldados.

O presente estudo se fundamentou em duas etapas: a revisão de literatura e a pesquisa laboratorial.

A revisão de literatura foi resultante de pesquisa investigativa bibliográfica e documental para a fundamentação do desenvolvimento do tema.

A pesquisa laboratorial foi elaborada por meio de dois métodos experimentais, sendo parede plana e radial, realizados no laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília no período de março a novembro de 2012, divididos em duas fases.

Inicialmente, ajustando e neutralizando o pH do fosfogesso com cal ou carbonato de cálcio. Em um segundo momento, com a finalidade de determinar o

coeficiente de condutividade térmica, em diferentes gradientes de temperatura, devendo o  $k$  variar entre 0,02 a 0,05 [J/s.(m.K)] ou [W/(m.K)], ou [Kcal/h.m.K], conforme a classificação de outros isolantes térmicos como o elemento ar, espuma de poliuretano, espuma de polietireno, lã de rocha, lã de vidro, fibra cerâmica, perlita expandida, isopor e outros.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

- Avaliar a possibilidade da utilização do fosfogesso como material de isolante térmico.

### 1.1.2 Objetivo específico

- Avaliar as características técnicas do fosfogesso como material isolante térmico determinando o coeficiente de condutividade térmica pelos métodos da parede plana e do sistema radial.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Não seria possível relatar sobre o resíduo fosfogesso sem conotar a importância da rocha fosfática e do ácido fosfórico. Isto porque as rochas, por meio de reações, originam o ácido ortofosfórico, conhecido como ácido fosfórico.

O Brasil é o quarto maior consumidor mundial de ácido fosfórico, atendendo a 80% da demanda interna, sendo que o uso principal, estimado em 68% da rocha fosfática, é na indústria de fertilizantes, mas apresenta também um conjunto grande de outras aplicações, como na alimentação animal e nas indústrias químicas. A produção brasileira de rocha fosfática cresceu 43,6% em 7 anos, de 2001 a 2008 (BRASIL, 2009).

E assim se procedendo, no Brasil e no mundo, deve haver tecnologia sustentável para garantir solos férteis para a indústria da agropecuária mundial, ter condições de manter o contingente de mais de 6,5 bilhões de seres humanos alimentados, e preservando a fauna, o ar e a flora do globo terrestre.

A produção nacional de ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), principal matéria-prima na fabricação de todos os principais fertilizantes fosfatados, foi de 2,128 milhões de toneladas em 2008 e de 2,123 milhões de toneladas em 2010. A produção nas mineradoras de concentrado  $P_2O_5$  – pentóxido fosfórico, que é o insumo primário para produção do ácido fosfórico, foi no ano de 2008 de 6,727 milhões de toneladas e 2010 foi de 6,192 milhões de toneladas (DNPM, 2009a).

As empresas produtoras desses insumos fosfatados também são as mesmas que produzem as matérias-primas (concentrado de rocha e ácido fosfórico), onde a cada ano incrementam melhorias em processos tecnológicos, produzindo também as matérias-primas amônia anidra, e o ácido sulfúrico a partir do enxofre importado, que é utilizado na fabricação de fertilizantes industriais e na de ácido fosfórico (DNPM, 2009a).

### 2.1 FOSFOGESSO

A apresentação sobre o fosfogesso (sulfato de cálcio di-hidratado) visa a sua origem e ao seu descarte, principalmente no que diz respeito aos aspectos ambientais, de forma a se buscar seu reaproveitamento, conforme os autores

revisados nessa pesquisa e como material a ser utilizado como possível isolante térmico.

Como exemplo quanto ao descarte, Cajazeiras e Castilhos Jr. (2010) denotam que, no Sul do Estado de Santa Catarina, estava instalada a Indústria Carboquímica Catarinense (ICC), que produzia o ácido fosfórico em grandes quantidades, gerando o fosfogesso como subproduto.

Embora a ICC tenha cessado completamente suas atividades industriais, existe um estoque significativo de fosfogesso à espera de uma solução (Figura 1). A quantidade de material depositado, conforme Cajazeiras e Castilhos Jr. (2010), já alcança cerca de 3 milhões de toneladas.



**Figura 1 – Pilha de fosfogesso estocado em Imbituba – SC**

Fonte: Cajazeiras & Castilhos Jr. (2010)

Pinto (2007) refere que, desde a década de 1980, diversos empreendimentos têm sido testados com a finalidade de minimizar a geração de resíduos industriais, tanto pela melhoria de processos de extração quanto pela reutilização dos resíduos em outras atividades.

Embora atualmente procure-se aliar a tecnologia no gerenciamento desses resíduos industriais, é fato que as indústrias geram cada vez mais um considerado montante de resíduos e privam-se de mercados que os reaproveitem, sendo

obrigadas a dispor esses resíduos de forma adequada, arcando com os custos e seu gerenciamento (OLIVEIRA, 2005; PINTO, 2007; SILVA e GIULIETTI, 2010).

Um exemplo disto é o caso do fosfogesso, resíduo proveniente da indústria de fertilizantes. Cajazeiras e Castilhos Jr. (2010) e Sartori (2009) atestam que os fertilizantes são produzidos a partir da fabricação do ácido fosfórico, que por sua vez, usa como matéria-prima as rochas fosfáticas. A rocha fosfática ocorre sob duas formas, uma sedimentar, constituída basicamente de restos de peixes e outros organismos marinhos, e a outra de origem ígnea, através de intrusões magmáticas.

Santos (2001) complementa que o termo fosfogesso é frequentemente referenciado na literatura técnica como subproduto de gesso, gesso químico, resíduo de gesso, gesso agrícola e gesso sintético. Por conter resíduos de fósforo na sua composição (0,7% a 0,9%) este é chamado de fosfogesso. Todas essas denominações se referem a um mesmo produto, diferente do gesso no seu estado natural.

A NBR 10004 da ABNT (2004) que trata da classificação de resíduos, registra que o fosfogesso é classificado como resíduo classe IIa não inerte, e assim, necessita de cuidados especiais para seu manuseio e armazenamento.

Na literatura atual a adoção dos termos: resíduo, rejeito ou subproduto é usualmente empregue para referenciar o material fosfogesso. Neste trabalho, adotou-se o termo “resíduo”, pois trata-se de um material que ainda não possui um uso técnico e ecologicamente correto e consolidado, nem devidamente aprovado por órgãos de fiscalização e controle ambiental.

A norma brasileira NBR 10004 - *Resíduos Sólidos: classificação* (ABNT, 2004) define o que é resíduo sólido:

“Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviço e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistema de tratamento de água”.

O reaproveitamento de um resíduo e o melhor aproveitamento das matérias-primas são vistos por especialistas como a única saída para a continuidade do processo tecnológico já implementado, pois atuam em perfeita sintonia com as necessidades do mundo atual (DNPM, 2009).

Matos (2011) explica que a estocagem final do resíduo fosfogesso é sempre acompanhada de elevados gastos às empresas. A disposição em pilhas exige quase

sempre, a disponibilidade de grandes áreas, que, dependendo do preço das terras, pode elevar muito o custo da disposição.

Para o autor, há uma exigência dos órgãos ambientais, devendo ser realizado um projeto de impermeabilização bem como estrutural das pilhas, como forma de evitar possíveis acidentes no local.

O monitoramento das pilhas através de profissionais especializados também se faz necessário. As áreas de estocagem, preferencialmente, devem estar localizadas próximas às fábricas, caso o contrário o gasto operacional pode ser até cinco vezes maior.

Conforme a Resolução 307/02 do CONAMA (2002), o gerador deve garantir o confinamento dos resíduos após a geração até a etapa de transporte, assegurando em todos os casos em que sejam possíveis, as condições de reutilização e de reciclagem.

Constatadas a abundância e a falha no aproveitamento e armazenamento do material em pauta, priorizou-se, neste trabalho, a busca por uma alternativa economicamente viável para o reaproveitamento do fosfogesso depositado no Brasil.

Algumas pesquisas realizadas com foco na análise radioquímica feita no fosfogesso, indicam que esse material tem uma reatividade natural, porém, ainda não se apurou a incidência de riscos à saúde humana (AQUINO, 2005; PINTO, 2007; SARTORI, 2009).

Conforme resultados obtidos por diversas pesquisas, e comparados com as normas brasileiras de resíduos sólidos, por exemplo, quanto à utilização na construção civil, as pesquisas denotam que ambientalmente o fosfogesso pode ser utilizado na construção civil (PET, 2011).

Silva e Giulietti (2010) ressaltam que comparações feitas com fosfogesso, analisado em outros países, mostram que esse material varia bastante sua composição, de acordo com a rocha do fosfato e o seu processo de exploração empregado. Portanto, recomenda-se analisar o fosfogesso antes de sua aplicação.

Dependendo da origem, os autores acreditam que podem ocorrer teores diferenciados de anidro fosfórico –  $P_2O_5$  – que varia de 22 a 45 %. A diferença entre estas rochas também se torna interessante devido a outros elementos em sua composição, principalmente aqueles indesejados, que influenciarão diretamente na qualidade do fosfogesso estocado, como destaca Pinto (2007).

Esta diferença deve ser considerada, uma vez que no Brasil as rochas são de origem ígnea, possuindo menor radioatividade e menores teores de flúor (AQUINO, 2005; PINTO, 2007; SARTORI, 2009).

A mudança de processo para retirada de ácido fosfórico, descrita por Sartori (2009), seria muito difícil, já que as tecnologias existentes datam da década de 1970 e pouco se tem feito para mudanças nestes processos.

Entre os diversos experimentos realizados, denote-se o de Pinto (2007), estudando a possibilidade de cobertura vegetal de pilha de fosfogesso. Como exemplo, o autor relata sobre a pilha de fosfogesso da unidade da Fosfértil, que foi considerada por muitos ambientalistas da região e do estado como um dos maiores impactos negativos de natureza visual no estado, além de ser uma fonte de particulados e de fornecimento de sedimentos. Apesar dos inúmeros esforços da empresa no tocante ao seu controle ambiental, a percepção da sociedade era esta.

Em 1999, Pinto (2007) refere que a promotoria de meio ambiente de Uberaba acionou a empresa a dar solução aos impactos da pilha. Além disto, a cobertura vegetal das pilhas de fosfogesso passou a ser uma das condicionantes da licença ambiental no Complexo industrial de Uberaba, exigência esta feita pela Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM, órgão ambiental do estado de Minas Gerais.

Considere-se que no Brasil, não havia nenhuma experiência de cobertura vegetal neste tipo de depósito, conforme atesta Pinto (2007). Os técnicos da empresa conheciam apenas o processo de implantação de cobertura vegetal em pilhas de fosfogesso da Flórida nos Estados Unidos, que utilizava uma metodologia bastante onerosa para as condições brasileiras.

O fosfogesso, apesar de ter inúmeras aplicações, tem uma demanda de mercado hoje muito pequena em relação à quantidade produzida. Tomaz (2006) mostra que a produção mundial aumentou para aproximadamente 40 milhões de toneladas de anidro fosfórico, que equivalia a uma produção de 160 milhões de toneladas de fosfogesso em 2005.

Smith (2005), citado por Pinto (2007), apresenta as diversas formas de disposição de fosfogesso nas principais plantas de ácido fosfórico no mundo, sendo que seu lançamento em corpos hídricos era muito comum até a década de 1960. Na Europa, verificava-se o lançamento do fosfogesso no mar, aproveitando a grande capacidade de diluição do oceano. No entanto, devido à presença de radionuclídeos, de flúor e de metais pesados, este procedimento foi proibido a partir dos anos 80.

Pinto (2007) refere que o lançamento de fosfogesso no mar ainda é verificado no Marrocos. Na Austrália, verifica-se o lançamento de fosfogesso em forma de retentores ou muros (denominados de *dry-stack*), nas áreas desérticas próximas às plantas de produção de ácido fosfórico, bem como o empilhamento a seco, mas sem controle.

Pet (2011) e Fernandes et al. (2010) apresenta pesquisas sobre o fosfogesso, realizadas principalmente quanto ao seu aproveitamento em outras atividades, como na agricultura e na construção civil, como forma de eliminar os estoques existentes e evitar a formação de novos estoques.

Myamoto (1980), citado por Pinto (2007), mostra que no Japão, a produção e o consumo de fosfogesso são praticamente iguais, sendo que os principais usos são na indústria de cimento, na produção de painéis e na agricultura.

Beretka (1980), citado por Pinto (2007), informa que na Austrália são produzidos cerca de 840.000 t de fosfogesso por ano, sendo que 150.000 t são usados na indústria de painéis, de cimento e o “Florida Institute Research Phosphate” - FIRP, instituição criada pelo governo da Flórida com apoio das indústrias de Fosfato, desenvolve diversos estudos de utilização de fosfogesso nos Estados Unidos.

Para Chang e Chin (1989), citados por Tomaz (2006), há muitas vantagens na utilização do fosfogesso, comparativamente a outros materiais, em mistura com o asfalto, bem como no preparo de base para estradas vicinais na Flórida. Além da durabilidade destas estradas há uma redução dos custos de implantação. Este trabalho faz um comparativo do fosfogesso em substituição ao cascalho de calcário, principal rocha disponível na região da Flórida, para este tipo de construção. Isto permitiu uma destinação mais nobre para pilhas de fosfogesso e reduziu os impactos pela exploração de recursos naturais, neste caso o calcário. Os trabalhos desenvolvidos no FIRP para a produção de agregados para base em rodovias, para produção de painéis entre outros, mostram um espectro muito grande de aplicação deste produto neste ramo de atividade.

Traxler (1996), também patrocinado pelo FIRP, fez um estudo econômico da utilização do gesso na agricultura, conforme cita Tomaz (2006), colocando o produto como fonte de enxofre, colaborando para a melhoria do solo. Verificou um acréscimo em produção de amendoim e a redução dos custos de estocagem daquele subproduto, permitindo um ganho de aproximadamente dezessete milhões de

dólares anualmente. Ainda quanto ao seu uso na agricultura, outros trabalhos foram realizados pelo FIRP, mostrando que o fosfogesso é um bom corretivo de solo quando usado com o calcário, excelente fonte de enxofre, além de um bom condicionador para reter mais água no perfil do solo.

Atualmente, nos Estados Unidos, a utilização do fosfogesso, segundo Rosnick (2006), citado por Pinto (2007), é bastante restrita, liberada apenas para o uso na agricultura e para a elaboração de pesquisas, quando comprovada baixa radioatividade. Qualquer outro uso deverá ser estudado caso a caso para sua liberação pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – EPA.

No Brasil, vários estudos vêm sendo desenvolvidos para aplicação de fosfogesso, principalmente na área da construção civil, na qual se destacam as pesquisas de Rosseto (2005) e de Silva (2005), conforme citado por PET (2011). Rosseto (2005) apresentou as propriedades construtivas do fosfogesso, e Silva (2005) realizou um experimento com o uso do fosfogesso em construção de casa popular, que vem sendo desenvolvido pela Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, no laboratório de Poços de Caldas, MG.

Garangani (2005) apresenta uma alternativa de utilização do fosfogesso como base e sub-base de leitos de estradas, sendo uma alternativa para as áreas do litoral paulista, principalmente na região da Baixada Santista, que dispõe de pouco material para este fim.

Diversos países possuem uma legislação diferenciada para a questão do fosfogesso. Pinto (2007) destaca que, no Canadá o uso do fosfogesso ainda é proibido, no Japão ele é incentivado, inclusive para evitar a formação de estoques, ao passo que no Marrocos, segundo produtor mundial de ácido fosfórico, o lançamento deste produto ainda é feito no oceano Atlântico, não havendo ainda nenhuma regulamentação a este respeito.

No Brasil, a questão de resíduos é regulamentada pelas seguintes leis: lei nº. 6.938, de 31 de agosto de 1981 – política nacional do meio ambiente; lei nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998 – lei de crimes ambientais; resolução CONAMA 313/2002 que dispõe sobre o "Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais"; resolução CONAMA 06 de 15 de junho de 1988, que disciplina o processo de licenciamento ambiental de atividades industriais (CONAMA, 2012).

Atualmente, existe um grupo no Brasil, a Rede Cooperativa Fosfogesso Brasil, que está tentando criar uma regulamentação sobre o fosfogesso,

principalmente devido à presença de radionuclídeos em sua composição. Este grupo promoveu um *workshop*, denominado “Desafios tecnológicos para o reaproveitamento do fosfogesso” e o “Seminário Internacional sobre o uso do fosfogesso”, cujo objetivo final foi estabelecer critérios para o uso deste subproduto, pois atualmente não possui nenhuma restrição. Durante estes eventos, nem um trabalho foi apresentado que evidenciasse algum tipo de problema com a utilização do fosfogesso (PINTO, 2007).

Como ressalta Canut (2010), na Pontifícia Universidade Católica de Poços de Caldas no Estado de Minas Gerais, a construção de uma casa modelo com estrutura metálica e vedação com uso de divisórias de fosfogesso já é uma realidade. Neste trabalho estão sendo avaliados todos os parâmetros relativos às divisórias fabricadas com o fosfogesso, envolvendo estudos relativos à exalação de radônio até as propriedades físicas e mecânicas do novo material.

Também, segundo Canut (2010), na cidade de São Carlos, uma empresa concebeu um novo método de fabricação de pré-moldados à base de gesso e fosfogesso denominado de “UCOS”. O novo método desenvolvido consiste na hidratação do hemidrato com somente 20% da massa de água em relação a sua massa. Em seguida, o gesso hidratado é compactado e finalmente seco a 50°C. Esse processo é capaz de produzir pré-fabricados à base de fosfogesso com resistência à compressão de até 100 MPa e resistência à tração de até 35 MPa.

Oliveira (2005) observa que o uso de fosfogesso em base e sub-base de pavimentos urbanos e rodoviários é uma realidade em alguns países. Nos Estados Unidos, trechos de rodovias foram construídos utilizando o resíduo fosfogesso. Um exemplo do sucesso alcançado pelo uso do fosfogesso está localizado na cidade de La Porte no estado do Texas. Após cinco anos da construção, a pavimentação apresenta boa capacidade de suporte, em que se utilizou na base misturas de fosfogesso e cimento nas proporções de 90% e 10%, respectivamente.

Aquino (2005) revela que uma grande fonte de aplicação do resíduo fosfogesso é a indústria cimenteira. O consumo de fosfogesso por parte das indústrias cimenteiras nacionais chega a 1,7 milhões de toneladas por ano. Para ser aplicado na indústria cimenteira, o fosfogesso necessita de um índice de acidez superior a 4 e um teor de ácido fosfórico menor que 0,8%. Um pH ácido contribui para um ataque químico da armadura de aço em estruturas de concreto armado e conseqüentemente para a redução da resistência inicial dos concretos. Algumas

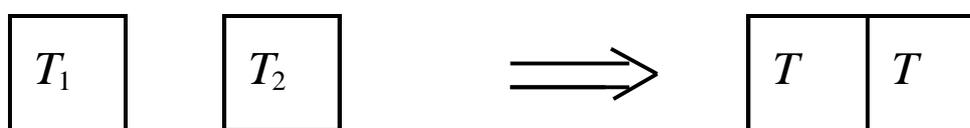
impurezas encontradas no fosfogesso podem também alterar as propriedades dos concretos e argamassas produzidos pelo cimento ativado com fosfogesso, sobretudo na redução na resistência inicial e no retardo do tempo de pega.

De acordo com os estudos de Matos (2011), há ampla possibilidade de uso de gesso na agricultura. As aplicações de gesso, se praticadas de acordo com as recomendações oficiais, são seguras e não devem trazer problemas de perdas de nutrientes por lixiviação. Contudo, há evidências de que maiores aplicações podem ser vantajosas. Para verificar essa hipótese, são necessárias amostragens mais profundas de solos, para verificar a ocorrência de barreira química no subsolo e, se necessário, empregar doses mais elevadas de calcário e gesso, almejando correções mais amplas do perfil do solo.

## 2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Conforme definição já apresentada, a transferência de calor é uma energia em trânsito obtida por um gradiente de temperatura em um meio ou entre meios. Como exemplo, havendo dois corpos a diferentes temperaturas, e sendo colocados em contato direto, como mostra a Figura 2, ocorrerá uma transferência de calor do corpo de temperatura mais elevada para o corpo de menor temperatura, até que haja um equilíbrio de temperatura entre os mesmos (ÇENGEL, 2009).

Por este entendimento, denota-se que o sistema tende a atingir o equilíbrio térmico.



$$\text{Se } T_1 > T_2 \rightarrow T_1 > T > T_2$$

**Figura 2 - Sistema em equilíbrio térmico**

Fonte: Adaptado de Çengel (2009)

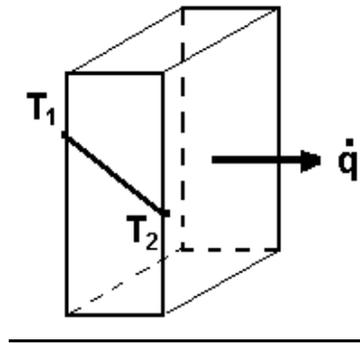
Está implícito na definição acima que um corpo nunca contém calor, porém, o calor é identificado como tal quando cruza a fronteira de um sistema.

Portanto, o calor é um fenômeno transitório, que cessa quando não existe mais uma diferença de temperatura.

Os diferentes processos de transferência de calor são referidos como mecanismos de transferência de calor. Existem três mecanismos, que podem ser reconhecidos, conforme Çengel (2009), pelo que segue:

### 2.2.1 Transferência de calor por condução

Transferência de calor por condução é quando a transferência de energia ocorre em um meio estacionário, podendo ser um sólido ou um fluido, em virtude de um gradiente de temperatura entre as faces. A Figura 3 ilustra a transferência de calor por condução através de uma parede sólida submetida à uma diferença de temperatura entre suas faces.



**Figura 3 - Transferência de calor por condução**

Fonte: Adaptado de Çengel (2009)

Conforme Incropera (2008), temperaturas mais altas estão associadas às moléculas mais energéticas e moléculas próximas se chocam transferindo energia da molécula mais energética para a menos energética.

Considerando a Figura 3, um corpo sólido e sendo  $T_1 > T_2$  tem-se um gradiente de temperatura e conseqüentemente uma transferência de energia ( $\dot{q}$ ) por condução na direção da diminuição de temperatura. Colisões moleculares melhoram essa transferência de energia. Tais colisões podem ser observadas nos líquidos, embora as moléculas estejam muito próximas e as interações moleculares sejam mais fortes e mais frequentes. Em um sólido, a condução de energia pode ser atribuída à atividade atômica na forma de vibração dos retículos. A visão moderna associa a transferência de energia a ondas na estrutura de retículos, induzida pelo movimento atômico das moléculas como ocorre em um material não condutor elétrico; em um

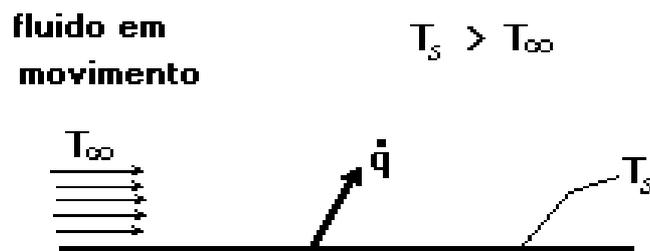
condutor, a transferência ocorre através do movimento de translação dos elétrons livres.

A lei Fourier, Equação 1 (pág. 13), estabeleceu o fundamento da transferência de calor por condução, e suas características são: não uma expressão derivada de princípios fundamentais, ao contrário, fundamentada em princípios experimentais; é uma equação que define uma importante propriedade física dos materiais sendo a capacidade térmica de conduzir calor.

Também, a lei de Fourier é uma grandeza vetorial indicando que o fluxo térmico é normal à área isoterma e no sentido da diminuição das temperaturas.

### 2.2.2 Transferência de calor por convecção

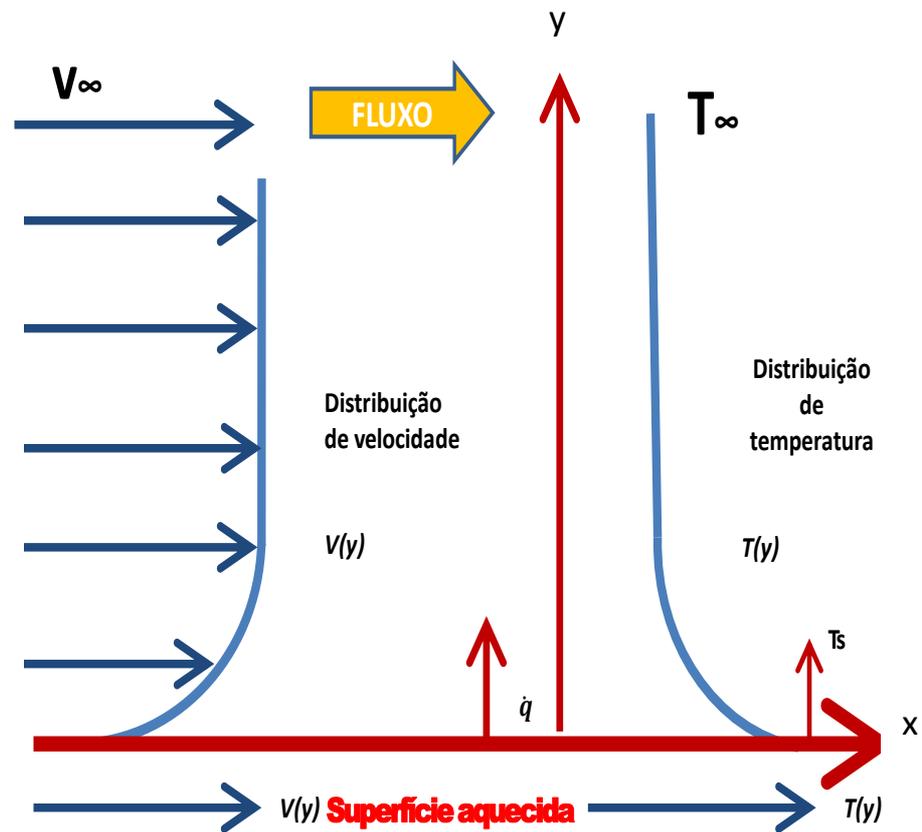
A transferência de calor por convecção é quando a transferência de energia ocorrer entre uma superfície e um fluido em movimento, em virtude da diferença de temperatura entre os mesmos. A Figura 4 ilustra a transferência de calor por convecção quando um fluido escoar sobre uma placa aquecida.



**Figura 4 - Transferência de calor por convecção**  
Fonte: Adaptado de Çengel (2009)

O estado fluido da matéria inclui tanto os líquidos quanto os gases. Conforme Incropera (2008), o calor por convecção abrange dois mecanismos, sendo: a transferência de energia que se dá por difusão, quando ocorre movimento molecular aleatório, e também quando ocorre por movimento global do fluido. Tal movimento, na presença de um gradiente de temperatura, contribui para a transferência de calor.

Considere um escoamento de um fluido sobre uma superfície conforme a Figura 5.



12

Figura 9 - Mecanismo de transferência de calor sobre uma superfície.  
 Fonte: Adaptado de Çengel (2009)

Próximo à superfície ocorre o movimento molecular aleatório (difusão), onde a velocidade do fluido é baixa.

Na interface entre o fluido e a superfície, a velocidade do fluido é nula ( $y=0$ ), portanto, o calor é transferido somente pelo movimento molecular. A contribuição do movimento global origina-se no fato de que a camada limite cresce na medida em que o escoamento cresce na direção  $x$ .

Pode-se classificar a convecção de duas maneiras, sendo: convecção natural (ou livre) se o movimento do fluido for oriundo de uma força de flutuação induzidas por diferença de densidade devido variação da temperatura do fluido; convecção

forçada quando o fluido é forçado a fluir por meio de força externa, tal como exaustor, resfriador e outros.

O processo de transferência de calor que envolve mudança de fase de um fluido pode ser considerado por convecção devido ao movimento induzido do fluido ao longo do processo.

A taxa de transferência de calor por convecção é expressa pela Lei de Newton do resfriamento tendo como Equação (2):

$$Q = h A_s ( T_s - T_\infty ) \quad (2)$$

Sendo:

$Q$  – Taxa de transferência de calor por convecção (W),

$A_s$  – Área da seção da transferência de calor ( $m^2$ ),

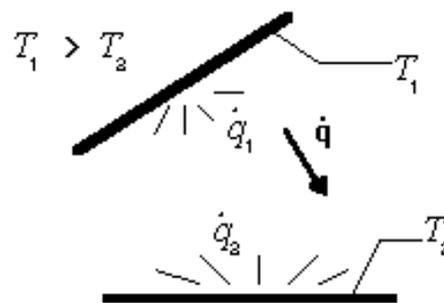
$T_s$  – Temperatura da superfície (K),

$T_\infty$  – Temperatura do fluido na temperatura global, ou seja, distante da área de troca de calor – (K),

$h$  – coeficiente de transferência de calor por convecção ou coeficiente de película que depende das propriedades físicas do fluido, tais como, a temperatura e o estado físico em que ocorre a convecção. Portanto, o coeficiente de película deve ser encontrado experimentalmente para cada sistema analisado ( $W/m^2.K$ ).

### 2.2.3 Transferência de calor por radiação

A transferência de calor por radiação é quando na ausência de um meio interveniente, há uma troca líquida de energia (emitida na forma de ondas eletromagnéticas) entre duas superfícies a diferentes temperaturas (KREITH, 2001). A Figura 6 ilustra a transferência de calor por radiação entre duas superfícies a diferentes temperaturas.



**Figura 6 - Transferência de calor por radiação**  
 Fonte: Adaptado de Çengel (2009)

Conforme a lei de Stefan-Boltzmann, a quantidade total de energia emitida por unidade de área de um corpo negro e na unidade de tempo é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo a taxa de transferência de calor por radiação, quando um corpo não for negro, sendo determinada pela Equação (3) (KERN, 1987).

$$\dot{q}_{(rad)} = \sigma \epsilon A_r (T_1^4 + T_2^4) \quad (3)$$

Sendo:

$\dot{q}_{rad}$  é a taxa de transferência de calor por radiação (W);

$\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $W/m^2 \cdot K^4$ );

$\epsilon$  é a emissividade;

$A_r$  é a área da secção por onde o calor flui ( $m^2$ );

$T_1$  é a temperatura de superfície 1 (K);

$T_2$  é a temperatura de superfície 2 (K).

### 2.3 CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE MATERIAIS

Segundo Çengel (2009), a condutividade térmica é uma propriedade física dos materiais que descreve a habilidade desta de conduzir calor. Equivale à quantidade de calor ( $\dot{q}$ ) transmitida através de uma espessura (L), em uma direção normal a superfície de área (A), por diferença de temperatura ( $\Delta T$ ), em condições de

estado fixo e quando a transferência de calor é dependente apenas da diferença de temperatura e independente da variável tempo.

O coeficiente de condutividade térmica, denominado de “k”, indica a capacidade que um determinado meio possui para conduzir calor entre duas áreas em temperaturas diferentes.

Assim, o fator de proporcionalidade k (condutividade térmica) que surge da Equação de Fourier (Equação 1), é uma propriedade de cada material e vem exprimir a maior ou menor facilidade que o material apresenta à condução de calor.

A Equação de Fourier é *fenomenológica*, isto é, ela evoluiu a partir de fenômenos observados nos experimentos, ao contrário de ter sido desenvolvida por princípios fundamentais da física. Por este motivo, vemos a equação da taxa de variação térmica como uma generalização baseada em vasta evidência experimental.

Os valores numéricos de k variam em extensa faixa dependendo da composição química, estado físico e temperatura dos materiais. Quando o valor de k é elevado o material é considerado condutor térmico e, caso contrário, isolante térmico (Equação 4).

$$k = - \frac{q}{A} \frac{dx}{dT} \quad (4)$$

Em que:

k – condutividade térmica - W/m.° C,

q – fluxo de calor (W),

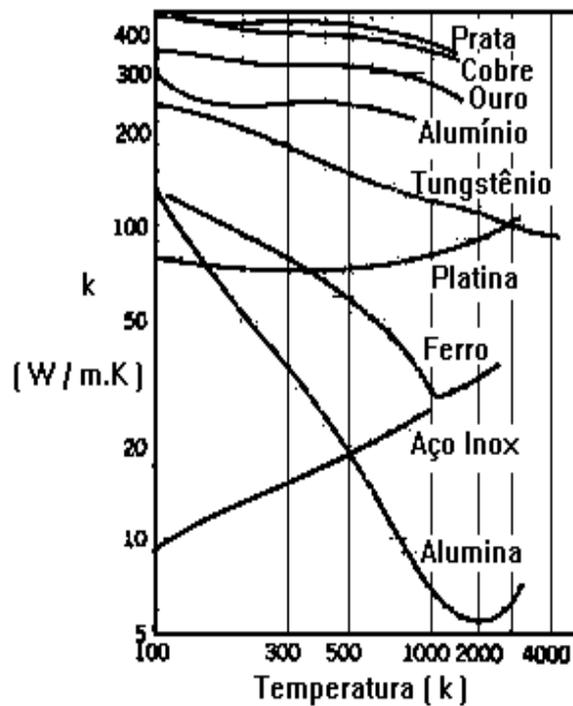
A – área da seção transversal perpendicular ao fluxo de calor – m<sup>2</sup>,

$\frac{dx}{dT}$  = variação da distância em uma única direção em relação a temperatura.

Com relação à temperatura, em alguns materiais como o alumínio e o cobre, k varia muito pouco, porém, em outros materiais como o aço, alumínio, cobre e outros, k varia significativamente com a temperatura.

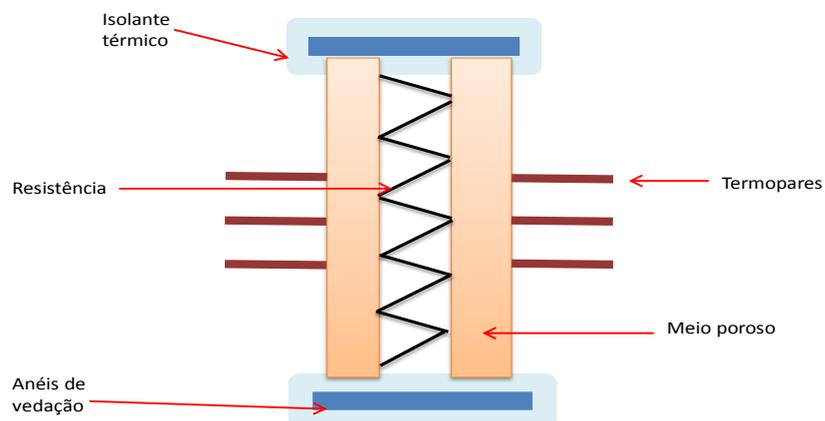
Nestes casos, adota-se comumente, como solução de engenharia, um valor médio de k em um intervalo de temperatura, como atesta Çengel (2009).

A variação da condutividade térmica com a temperatura para alguns materiais é mostrada na Figura 7.



**Figura 7 – Variação da condutividade térmica com a temperatura**  
 Fonte: Adaptado de Çengel (2009)

Nogueira et al. (2010) realizaram experimentos para determinar a condutividade térmica em um sistema radial, utilizando como meio um material poroso, no caso, a areia fina. Para realização do experimento, foi montado um sistema constituído de dois cilindros concêntricos com uma resistência elétrica tipo cartucho no centro dos cilindros conforme Figura 8.



Para determinar experimentalmente o coeficiente de condutividade térmica da areia fina, foi necessária a aplicação da Equação de Fourier na sua forma unidimensional e em regime permanente onde a temperatura não varia com o tempo. Neste experimento, determinou-se o coeficiente térmico de condutividade térmica da areia  $k=0,750 \text{ W/m.K}$ , com temperatura da fonte quente e fria de  $71^\circ \text{C}$  e  $57^\circ \text{C}$ , respectivamente.

## 2.4 ISOLANTES TÉRMICOS

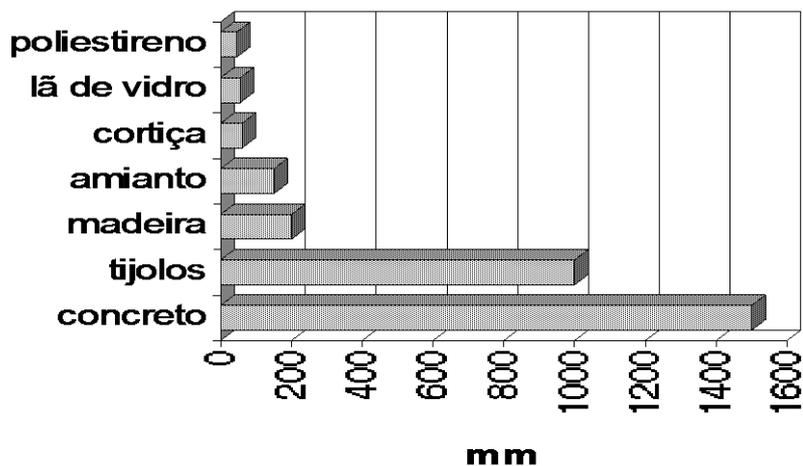
Çengel (2009) explica que o isolamento térmico consiste em proteger as superfícies aquecidas, como a parede de um alto forno da siderurgia ou uma caldeira, ou resfriadas, como a parede de um refrigerador e a caixa fria de uma fábrica de oxigênio, através da aplicação de materiais de baixa condutividade térmica ( $k$ ).

Objetiva-se, portanto, minimizar os fluxos de calor, quer por problemas técnicos (segurança, evitar condensação), quer por problemas econômicos (economizar energia), ou ainda por critério de conforto térmico.

Geralmente, os materiais isolantes são porosos, e aprisionam o ar ( $k = 0,02 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ ), quando parado nas pequenas cavidades (poros) do material sólido, evitando sua movimentação, e impedindo a convecção. Por isto, materiais porosos com poros pequenos e paredes finas de materiais possuem baixo valor de  $k$ .

De acordo com Incropera e Dewitt (2008), as principais características de um isolante térmico são:

- a. baixo valor do coeficiente de condutividade térmica  $k$ , pois, quanto menor o  $k$ , menor será a espessura necessária para uma mesma capacidade isolante. A Figura 9 mostra algumas espessuras em [mm] de alguns materiais, baseados na mesma capacidade de isolamento.



**Figura 9 - Características de um isolante térmico**  
 Fonte: Adaptado de Incropera e Dewitt (2003)

- b. baixa capacidade higroscópica, sendo a capacidade higroscópica a propriedade do material relacionada à absorção de água. A água, ao penetrar nos poros, substitui o ar, aumentando o valor do coeficiente de condutividade térmica  $k$ . Além disto, quando se tratar de isolamento de ambientes cuja temperatura seja inferior a  $10^{\circ}\text{C}$ , existe a possibilidade de a água absorvida passar para o estado sólido com consequente aumento de volume e consequentemente aumento da espessura em mm, das tensões internas, o que causará ruptura das paredes isolantes.
- c. baixa massa específica, pois, em certas aplicações, um bom isolante precisa ser leve, de modo a não sobrecarregar desnecessariamente o corpo isolado, principalmente no caso de aviões, barcos, automóveis, ou ainda no caso de forros ou outras partes de fábricas e edifícios onde o material terá de ficar suspenso.
- d. resistência mecânica compatível com o uso, uma vez que, de maneira geral, quanto maior a resistência mecânica do material isolante, maior será o número de casos que ele poderá resolver, além do que apresentará menor fragilidade, o que é conveniente nos processos de transportes e no tocante à facilidade de montagem.

- e. incombustibilidade, estabilidade química e uma série de outras características serão necessárias, dependendo da aplicação a que o material isolante se destina.

Quanto aos materiais isolantes básicos, Incropera e Dewitt (2008) relatam que muitos dos isolantes usados industrialmente são feitos dos seguintes materiais: amianto, carbonato de magnésio, sílica diatomácea, vermiculita, lã de rocha, lã de vidro, cortiça, plásticos expandidos, aglomerados de fibras vegetais, silicato de cálcio, perlita expandida, fibra cerâmica, como segue:

- a. O amianto, ou asbesto, é uma fibra mineral que possui uma estrutura fibrosa, do qual se obtém fibras individuais. É extraído fundamentalmente de rochas compostas de silicatos hidratados de magnésio, onde apenas de 5 a 10% se encontram em sua forma fibrosa de interesse comercial. O amianto de boa qualidade deve possuir fibras longas e finas e, além disto, infusibilidade, resistência e flexibilidade.
- b. O carbonato de magnésio é obtido do mineral "dolomita", e deve sua baixa condutividade ao grande número de microscópicas células de ar que contém.
- c. A sílica diatomácea é uma forma de sílica hídrica oriunda de antigos organismos unicelulares fossilizados, material esse que se depositou no fundo dos lagos e mares.
- d. A vermiculita é um mineral semelhante à "mica", formada essencialmente por silicatos hidratados de alumínio e magnésio. Quando submetida a um aquecimento adequado, a água contida entre as suas milhares de lâminas se transforma em vapor fazendo com que as partículas explodam e se transformem em flocos sanfonados. Cada floco expandido aprisiona consigo células de ar inerte, o que confere ao material excepcional capacidade de isolamento.
- e. A lã de rocha ou lã mineral, assim como a lã de vidro, é obtida fundindo minerais de sílica em um forno e vertendo a massa fundida em um jato de vapor a grande velocidade. É indicada para isolamento térmico,

principalmente de temperaturas na faixa de 50° C até 600° C. É caracterizada por baixa condutibilidade térmica e elevado índice de absorção acústica. O produto resultante, parecido com a lã, é quimicamente inerte e incombustível.

- f. A cortiça é proveniente de uma casca de uma árvore (sobreiro) e apresenta uma estrutura celular em forma alveolar, semelhante a um favo de mel, constituída por cinco camadas. As primeiras duas camadas são constituídas essencialmente por gases semelhantes ao ar, a terceira camada protege as duas anteriores, e as duas últimas camadas, que, sendo constituídas essencialmente por Suberina (substância graxa encontrada em alguns vegetais), garantem a rigidez e a textura características da cortiça. Dessa forma, sua constituição mantém o ar encerrado entre as células, o que a torna um isolante térmico.
- g. Os plásticos expandidos são essencialmente poliestireno expandido e poliuretano expandido, que são produzidos destas matérias plásticas. Durante a fabricação sofrem uma expansão com formação de bolhas internas microscópicas. A propriedade mais importante dos plásticos expandidos é a capacidade de resistir à passagem de calor, devido a sua estrutura celular, que é constituída por milhões de células fechadas com diâmetros de alguns décimos de milímetro e com paredes de 1 mm. Esta espuma é composta aproximadamente por 2% de poliestireno e 98% de ar. O fator decisivo para a boa capacidade de isolamento térmico é o de manter, permanentemente, uma grande quantidade de ar, quase imóvel, dentro das suas células.
- h. A perlita é um mineral de origem vulcânica inerte, que, expandido através do calor, resulta em um produto leve e branco em forma de grãos. É inorgânica, não deteriorando, O isolamento com perlita expandida oferece vantagens adicionais, sendo superior ao plástico expandido ou a vermiculita. Ela é facilmente aplicada e não requer capacitação técnica ou equipamento adicional. Estudos independentes demonstram que o desempenho contra o fogo de sistemas preenchidos com perlita aumenta até 4 horas. É incombustível com ponto de fusão de 1.260 °C.

- i. Fibra cerâmica - Os Flocos de Fibra Cerâmica são obtidos a partir da fusão de alumina e sílica de alta pureza e podem ser utilizados continuamente em temperaturas até 1260 °C ou, por um certo período, em temperaturas superiores a esta. Foram desenvolvidos para atender à crescente necessidade dos padrões de desempenho dos materiais alternativos ao uso do asbesto. Pet Civil (2011) ressalta que essa fibra, devido às suas características térmicas e à sua alta pureza, possui as seguintes propriedades: estabilidade sob altas temperaturas 1.260 °C; baixa condutividade térmica; baixo peso; baixo calor armazenado; excelente resistência ao choque térmico; superior resistência à corrosão; excelente absorção de som.

Ainda, de acordo com Pet Civil (2011), os isolantes térmicos podem ser adquiridos em diversas formas, dependendo da constituição e da finalidade à qual se destinam. Alguns exemplos comumente encontrados são:

- a. Calhas: aplicadas sobre paredes cilíndricas, e fabricadas a partir de cortiça, plásticos expandidos, fibra de vidro impregnada de resinas fenólicas, etc.
- b. Mantas: aplicadas no isolamento de superfícies planas, curvas ou irregulares, como é o caso de fornos, tubulações de grande diâmetro, etc.
- c. Placas: normalmente aplicadas no isolamento de superfícies planas, como é o caso de câmaras frigoríficas, estufas, fogões, etc.
- d. Segmentos: geralmente aplicados em tubulações de grande diâmetro, tanques e equipamentos cilíndricos de grandes dimensões, onde é difícil aplicar calhas pré-moldadas. Em geral, são feitos a partir de silicato de cálcio ou lã de vidro. Oferecem grande durabilidade e podem ser utilizados tanto em ambientes internos quanto externos.
- e. Flocos: normalmente aplicados para isolar locais de difícil acesso, ou ainda na fabricação de mantas costuradas com telas metálicas. São fabricados a partir de lãs de vidro e de rocha.
- f. Cordas: utilizadas no isolamento de registros, válvulas, juntas, cabeçotes, etc.

- g. Papel de fibra de cerâmica: é um material refratário, apresenta baixo peso, e é processado a partir de uma mistura de fibras de sílica e alumina de alta pureza em uma folha uniforme, altamente flexível. Sua flexibilidade permite que seja dobrado e enrolado para adaptar-se às configurações mais complexas, principalmente em locais sujeitos à desmontagem para manutenção periódica.
- h. Pulverizados ou granulados: utilizados no isolamento de superfícies com configurações irregulares, ou ainda no preenchimento de vãos de difícil acesso.
- i. Pré-moldados (ou pré-formados): peças especiais, fabricadas conforme especificações e desenhos solicitados pelo cliente, podendo apresentar uma variedade de formatos.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Para determinação da condutividade térmica do fosfogesso foram realizados dois experimentos com características físicas diferentes, sendo um mecanismo voltado para condução de calor através de parede plana e o outro para condução de calor radial através de uma configuração cilíndrica. Ainda que diferentes os mecanismos testados, o resultado esperado é obter o mesmo coeficiente de condutividade térmica do fosfogesso.

Os dois experimentos foram conduzidos por meio de diferentes dispositivos experimentais, cujos protótipos foram fabricados e montados no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília (UNISANTA), os quais são descritos a seguir.

#### 3.1 PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA PAREDE PLANA

##### 3.1.1 Equipamentos e instrumentos

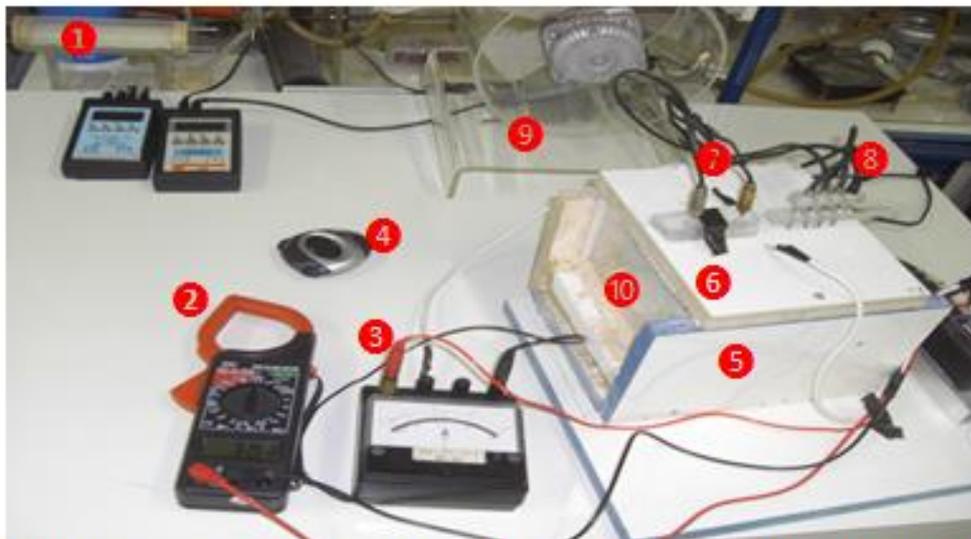
O sistema experimental desenvolvido para determinação da condutividade térmica de calor, através da parede plana, consistiu de uma caixa de madeira revestida internamente por uma camada de lã de rocha de  $\frac{3}{4}$  pol. de espessura e, sobrepondo esta, uma camada de hidro-silicato de cálcio de  $\frac{1}{2}$  pol. de espessura.

As extremidades da caixa de madeira foram fechadas com uma chapa de alumínio de 2 mm de espessura e, na parte superior, foi colocada uma tampa de madeira revestida também internamente com uma camada de lã de rocha e uma placa de hidro-silicato de cálcio com as mesmas espessuras relatadas.

No meio da caixa de madeira, foi instalada uma resistência elétrica de dimensão retangular de 75 x 45 mm (LxH) – potência elétrica 150 Watts, frequência 60 Hz, tensão 220 Volts.

Tomou-se o cuidado de utilizar, neste experimento, um triplo isolante térmico para evitar a fuga de calor durante o desenvolvimento experimental, proporcionando assim a confiabilidade de que todo o fluxo calorífico gerado pela fonte quente, no caso a resistência elétrica, percorreria o material da amostra.

A Figura 10, apresenta o dispositivo montado, e denominados todos os elementos que contribuirão para a realização do experimento.



**Figura 10 – Ilustração geral dos elementos que compõem o primeiro experimento** sendo: (1) termopares tipo J; (2) aparelho multiteme para medição da voltagem; (3) aparelho para medição da corrente elétrica; (4) cronômetro; (5) caixa de madeira do dispositivo; (6) tampa da caixa de madeira do dispositivo; (7) dois termopares para medição da temperatura de um dos lados do dispositivo; (8) quatro termopares para medição da temperatura do lado oposto; (9) ventilador para dissipação do calor na placa de alumínio; (10) placa de alumínio na extremidade da caixa para retenção da amostra.

10

Memorial descritivo dos elementos e suas respectivas funções:

1 – sensor digital dos termopares para medição de temperatura em seis pontos – marca Salgas, modelo Salvterm, tipo 704, sensor tipo J (Fe – Co), escala - 40°C a 700°C, nº de série 75.145, País de origem Brasil, data de fabricação 02/12/2010.

2 – multiteme clamp digital para medição da tensão na resistência elétrica, marca Mirupa, nº de série ET 3110, escalas adotadas para medição – 0 a 20 Amperes e 0 a 750 Volts.

3 – amperímetro analógico para medir a corrente elétrica na resistência, marca YEM, país de origem China, nº série 01194 U, sendo adotado no experimento a menor escala de 0 a 1,5 A.

4 – cronômetro digital, marca Instrutherm, modelo CD 2800.

5 – caixa de madeira protegida com isolante térmico lã de rocha e placa de hidro-silicato de cálcio, dividida pela resistência elétrica em duas seções nas quais serão colocados os materiais da amostra.

6 – tampa da caixa confeccionada em madeira e revestida com lã de rocha e placa de silicato de cálcio.

7 – duas hastes de termopares, tendo em sua extremidade a tomada para o ponto quente da temperatura, fabricante Salgas, dimensões DN 1,5 mm x 150 mm (L) com penetração de 25 mm na amostra. Os termopares foram aferidos com gelo a 0° C, e com água em ebulição a 100° C.

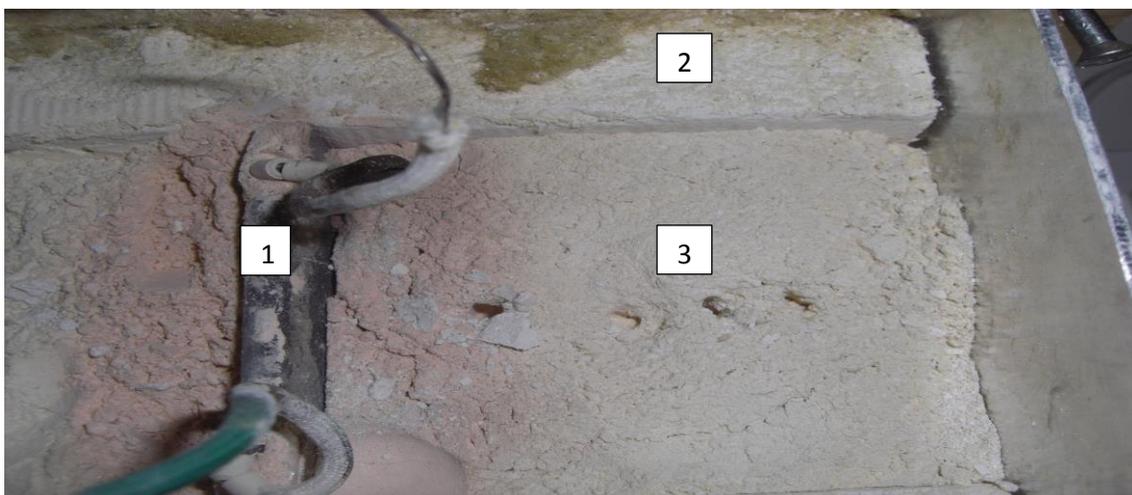
8 – quatro hastes de termopares, tendo em sua extremidade a tomada para o ponto quente da temperatura, fabricante Salgas, dimensões DN 3 mm x 100 mm (L) com penetração de 25 mm na amostra. Os termopares foram aferidos com gelo a 0° C, e com água em ebulição a 100° C.

9 – ventilador para retirada do calor por convecção da placa de alumínio que separa os meios – amostra e ambiente externo.

10 – duas placas de alumínio de dimensão 70 x 45 x 2 mm.

Para alimentação elétrica e aquecimento deste experimento, foi elaborado um diagrama funcional composto por um transformador estabilizador 220 Volts, controlador de energia e um potenciômetro conforme Figuras 11 e 12. Durante a execução dos testes o circuito elétrico regulador e controlador de energia não conseguiu reduzir a corrente elétrica a níveis 1 e 2 da escala do potenciômetro e conseqüentemente dificultando realizar os testes com temperaturas abaixo de 100°C.

A solução adotada foi trabalhar com temperatura um pouco mais elevada e controlando constantemente as pequenas oscilações de tensão e corrente da rede.



**Figura 11 – Ilustração da resistência elétrica que divide o dispositivo em duas seções** para receber a amostra, composto por: (1) resistência elétrica; (2) placa de isolamento térmico; (3) recipiente para a colocação do fosfogeno.



**Figura 12 - Ilustração do sistema elétrico para alimentação do experimento.** Composto por: (1) Potenciômetro para ajuste de temperatura; (2) Controle de energia.

Memorial descritivo dos elementos e suas respectivas funções.

1 – Resistência Elétrica que tem a função de gerar calor para o sistema. Ela é instalada no centro da caixa dividindo o dispositivo em duas seções. Característica técnica – potência: 150 Watts; tensão: 220 Volts; frequência: 60 Hertz; dimensão: 75(L) x 45(H) mm.

2 - O material isolante térmico hidro-silicato de cálcio fixado internamente à caixa do dispositivo de  $\frac{3}{4}$  pol. de espessura.

3 – Recipiente da caixa para receber a amostra a ser testada tendo cada lado a dimensão 70 (L) x 70 (W) x 45 (H) mm.

...

1 – Regulador de energia elétrica ou potenciômetro para ajuste da temperatura do sistema em dez posições. A temperatura é alterada variando a geração de energia da resistência elétrica através da variação da corrente elétrica. O dispositivo é da marca Martronic.

2 – Controlador de energia elétrica tem como função também alterar a geração de energia – capacidade máxima para: potência 5.500 W – tensão 220 V – frequência 60Hz., marca Martronic.

A Figura 13 apresenta o desenho esquemático do sistema montado para determinação da condutividade térmica de materiais com o método de chapa plana.

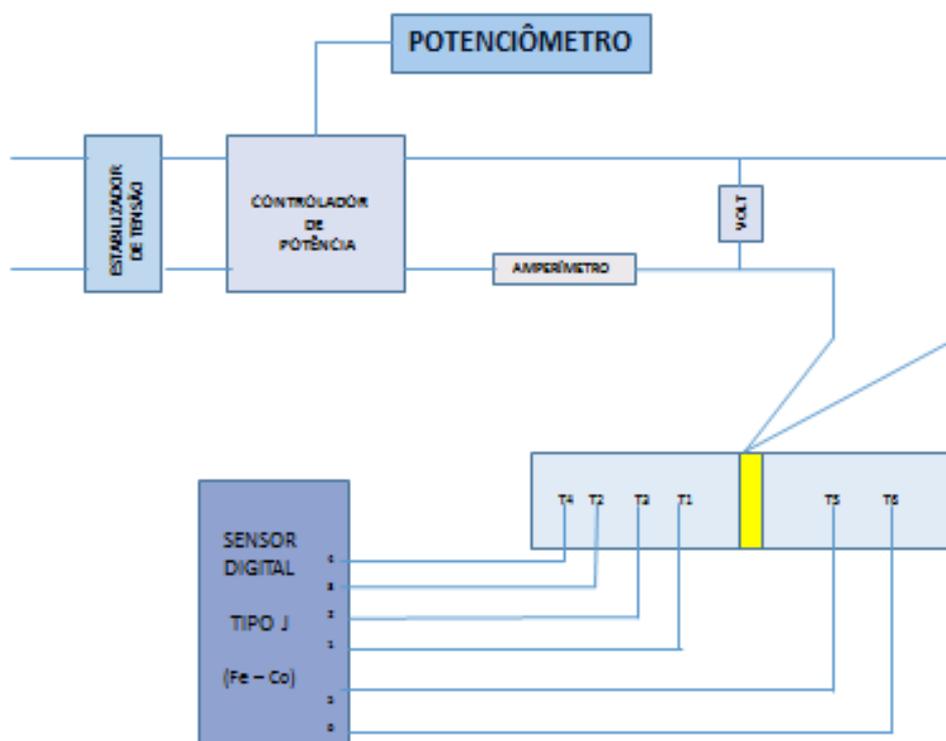


Figura 13 – Transmissão de calor em parede plana

### 3.1.2 Preparação para o ensaio com a amostra areia

Foram realizados dois ensaios com areia para a aferição do dispositivo para medição da condutividade térmica do fosfogesso.

#### 3.1.2.1 Primeiro ensaio com areia grossa

##### 3.1.2.1.1 Determinação da granulometria da areia grossa

No primeiro ensaio foi utilizada areia de granulometria grossa e lavada. O material foi colocado em uma estufa a uma temperatura de 60° C por um período de aproximadamente 48 horas. Na sequência das atividades da pesquisa, foi realizada análise granulométrica por meio do ensaio de granulometria conjunta, ou seja, peneiramento com sedimentação do material nas peneiras. Desta forma, obteve-se, como resultado, uma areia grossa, seca, mesh 24/14, uma vez que 70% das partículas da areia passaram pela peneira 14 e foi retida na peneira 24.

##### 3.1.2.1.2 Determinação da densidade real da areia grossa

Para determinação da massa específica da areia foram realizados três ensaios com amostras distintas, sendo:

1ª Ensaio – Foi adotado um picnômetro de 50 ml e utilizado aproximadamente 50% em volume da areia grossa, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Primeiro ensaio com uso do Picnômetro de 50 ml

1º Ensaio - Picnômetro de 50 ml			
Item	Etapa	Quant.	Unid.
a	Peso picnômetro vazio	43,270	g
b	Peso picnômetro + água	94,440	g
c	Peso picnômetro + 50 % amostra	82,721	g
d	Peso picnômetro + água + 50% amostra	118,917	g

Da mesma maneira foram realizados os outros dois ensaios cujos dados constam do Apêndice 01.

Com os dados dos três ensaios, foi possível calcular a densidade absoluta da areia grossa seca, sendo:  $d = 2,63 \text{ g/cm}^3$ , coerente com os valores encontrados na literatura  $d=2,6 \text{ g/cm}^3$  a  $2,65 \text{ g/cm}^3$  (PINTO, 2012); (DNER, 1994).

### 3.1.2.1.3 Determinação da condutividade térmica da areia grossa

Após o conhecimento de sua densidade foi realizado teste para determinação da condutividade térmica da areia grossa, tendo esta sido colocada no dispositivo experimental, tamponado e ligado à resistência elétrica. Conforme Apêndice 3, foi elevada a temperatura da areia até  $268 \text{ }^\circ\text{C}$  por um período de tempo de 193 minutos e após este tempo iniciou-se a leitura dos dados – corrente, tensão e temperatura – a cada um minuto por um período de 1320 segundos de aquecimento tendo como resultado a Tabela 2.

Tabela 2 – Dados obtidos com a areia grossa: granulometria - mesh 14/24

Tempo (seg.)	Termopares						Corrente (A)	Tensão (V)
	Temperatura - Termopar lado 1 ( $^\circ\text{C}$ )				Temperatura - Termopar lado 2 - ( $^\circ\text{C}$ )			
	1	2	3	4	1	2		
0	264	181,7	142,8	107,3	257	263	0,16	57
60	265	182,3	143,4	107,9	258	264	0,16	57
120	266	182,7	143,7	108,1	258	264	0,16	57
180	266	183	144	108,4	259	264	0,16	57
240	266	183,3	144,3	108,8	259	265	0,16	57
300	267	183,7	144,7	109,0	260	265	0,16	57
360	267	183,9	144,9	109,3	260	266	0,16	57
420	267	184,3	145,2	109,5	260	266	0,16	57
480	268	184,5	145,5	109,7	261	266	0,16	57
540	268	184	145	109	261	267	0,16	57
600	268	185	146	110	261	267	0,16	57

(cont.)

660	269	185	146	110	262	267	0,16	57
780	269	186	146	110	262	268	0,16	57
900	270	186	147	111	263	269	0,16	57
960	270	186	147	111	263	269	0,16	57
1020	270	186	147	111	263	269	0,16	57
1080	271	187	147	111	264	270	0,16	57
1140	271	187	148	111	264	270	0,16	57
1200	271	187	148	112	264	270	0,16	57
1260	272	188	148	112	265	270	0,16	57
1320	272	188	148	112	265	270	0,16	57

### 3.1.2.2 Segundo ensaio com areia fina

#### 3.1.2.2.1 Determinação da granulometria da areia fina

O segundo ensaio de granulometria com areia fina, foi elaborado de acordo com a norma DER/SP M 6-61, que inclui uma série padronizada de sete peneiras n<sup>os</sup>. 16, 42, 60, 80, 100 e 200, conforme recomenda Oliveira (2005). Também, o material foi colocado em uma estufa a uma temperatura de 60<sup>o</sup> C por um período de aproximadamente 48 horas. Dessa forma, obteve-se, como resultado, uma areia fina, seca com mesh 60/42.

#### 3.1.2.2.2 Determinação da densidade real da areia fina

Para determinação da massa específica da areia fina foram realizados três ensaios com amostras distintas, sendo:

1<sup>a</sup> Ensaio – Foi adotado um picnômetro de 50 ml e utilizado aproximadamente 50% em volume da areia fina, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Dados obtidos com a areia fina: granulometria - mesh 60/42

1º Ensaio - Picnômetro de 50 ml			
Item	Etapa	Quant.	Unid.
a	Peso picnômetro vazio	26,38	g
b	Peso picnômetro + água	66,84	g
c	Peso picnômetro + 50 % amostra	52,77	g
d	Peso picnômetro + água + 50% amostra	80,04	g

Os dados obtidos nos outros dois ensaios estão no Apêndice 1.

Com os dados dos três ensaios, foi possível calcular a densidade absoluta da areia fina seca, sendo:  $d = 2,56 \text{ g/cm}^3$ , coerente com os valores encontrados na literatura  $2,6 \text{ g/cm}^3$  (DNER, 1994) e muito próximo ao valor encontrado nesta pesquisa para densidade da areia grossa conforme item 3.1.2.1.2.

### 3.1.2.2.3 Determinação da condutividade térmica da areia fina

Na sequência, foi realizado teste com a areia fina, sendo colocada dentro do dispositivo plano, tamponado e energizada a resistência elétrica. Conforme Apêndice 4, após 380 minutos de aquecimento, apurou-se o que segue:

Tabela 4 – Dados de temperatura, corrente e tensão elétrica obtidos com a areia fina: granulometria - mesh 60/42 com temperatura de estabilização de  $134 \text{ }^\circ\text{C}$ 

Tempo (min.)	Termopares						Corrente (A)	Tensão (V)
	Temperatura – lado 1 ( $^\circ\text{C}$ )				Temperatura lado 2 - ( $^\circ\text{C}$ )			
	1	2	3	4	1	2		
380	127	83	66	52	143	69	0,12	30
390	128	84	67	53	143	69	0,16	30
400	128	85	68	53	143	68	0,16	29
410	129	86	68	54	143	68	0,16	30
400	130	86	69	54	144	69	0,17	31
430	131	87	70	55	144	69	0,16	31
440	132	88	71	56	145	69	0,16	31
450	133	88	72	56	146	69	0,16	30

(cont.)

460	133	90	72	57	146	69	0,16	30
470	133	90	72	57	146	69	0,16	30
480	133	90	73	57	146	69	0,16	30
490	133	90	73	58	147	70	0,16	30
500	134	91	73	58	147	70	0,16	30
510	134	91	73	58	147	70	0,16	30
520	134	91	74	58	147	70	0,16	30
530	134	91	74	58	147	70	0,16	30
540	133	91	74	58	147	70	0,16	31
550	134	91	74	58	147	70	0,16	30
560	134	91	74	58	147	70	0,16	30

### 3.1.3 Fosfogesso

Na pesquisa para determinação do coeficiente de condutividade térmica, foi utilizado amostra de fosfogesso classificado como material di-hidratado tendo a mesma procedência do fosfogesso utilizado na pesquisa por Santos (2001).

#### 3.1.3.1 Coleta do material e preparação

A coleta do material foi feita no seu estado natural, fornecido pela indústria de fertilizante COPEBRÁS, localizada no bairro industrial de Cubatão/SP.

Terminada esta fase, procedeu-se aos ensaios de laboratório para determinação do levantamento e ajuste do pH, granulometria e a densidade aparente e real do fosfogesso conforme segue.

#### 3.1.3.2 Determinação do pH, apassivação e ajuste do fosfogesso

Foi realizado teste de pH no fosfogesso e obteve-se pH igual a 4, caracterizando um meio ácido e dentro do intervalo entre 2,0 a 5,5, valores do pH pesquisados oriundos de diversas procedências do fosfogesso, conforme citado na revisão bibliográfica. De acordo com Takeda (1998, citado por OLIVEIRA, 2005),

mediu-se a acidez de duas amostras do material fosfogesso di-hidratado de idades diferentes e provido pela indústria de fertilizante FOSFERTIL; uma delas apresentou um pH de 2,4 e a outra pH de 5,0, sendo que esta diferença é caracterizada pelo tempo de estocagem do fosfogesso em área aberta sujeita a intemperes, isto demonstra que o fosfogesso da amostra encontra-se neste intervalo.

Para o presente experimento, as amostras do fosfogesso foram apassivadas de duas maneiras, sendo uma com componente químico hidróxido de sódio (NaOH) e a outra com carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

Para mistura com o hidróxido de sódio a proporção foi de 150 g de fosfogesso para 61,8 g de NaOH. Inicialmente com um pH de 4 e após a mistura gradativa com NaOH com o controle do pH em todas fases até que atingisse o pH 7,5. Para determinação do pH em cada uma das fases foi utilizado tira de papel indicador universal. Portanto:

150 g (fosfogesso)  $\longrightarrow$  61,8 g (NaOH)  $\longrightarrow$  pH = 7,5

Com a mistura do componente  $\text{CaCO}_3$ , temos que, para cada 150 g de fosfogesso, foram adicionados 7,96 g de  $\text{CaCO}_3$  obtendo um pH da ordem 7,0.

150 g (fosfogesso)  $\longrightarrow$  7,96 g ( $\text{CaCO}_3$ )  $\longrightarrow$  pH = 7,0

A Figura 14 ilustra o fosfogesso após a secagem e apassivado com carbonato de cálcio (pH de 7,0).



**Figura 14 – Ilustração do fosfogesso após a secagem e apassivação com carbonato de cálcio**

### 3.1.3.3 Granulometria – Método de Peneiração

Para determinação da granulometria do fosfogesso foi adotado o ensaio de granulometria conjunta que consiste em peneiramento mais sedimentação, em conformidade com a norma DER/SP M 6-61 e procedimento de trabalho análogo denominado “A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos” (ALVEIRINHO DIAS, 2004) o qual elencou uma série padronizada de sete peneiras de números 32, 42, 50, 60, 100, 140 e 200.

Para análise do tamanho da partícula do fosfogesso, foi adotado no ensaio peneiras de meia altura com armação de aço inoxidável de 100 mm de diâmetro que serviu como suporte a uma rede metálica de malha calibrada. As peneiras foram projetadas para poderem ser encaixadas umas nas outras, de modo a formarem uma coluna conforme a Figura 29.

A parte superior da referida coluna foi fechada com uma tampa metálica para evitar perda de material e na base tem-se uma peneira cega, denominado “pan”, o qual recebeu as partículas menores que atravessaram toda a coluna de peneiras. A coluna de peneiração foi agitada por um aparelho vibratório, designado de “agitador vibratório” que, por sistema mecânico de cames, comumente produziu um movimento vertical e horizontal de alta frequência nas peneiras da coluna.

Após diversas etapas de peneiramento por batelada de material (pequenas quantidades de material) os seguintes resultados foram obtidos, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Distribuição do fosfogesso retido nas malhas dos peneiras

Tyler/ Mesh	Abertura mm/ $\mu$ m	Peso da peneira vazia (g)	Peso da peneira c/material (g)	Peso do material retido (g)	Percentual % do material retido
32	500	351	363	12,0	0,7
42	355	352	355	3,0	0,2
50	300	305	307	2,4	0,1
60	250	358	361	2,5	0,1

(cont.)

100	150	293	780	487	29
140	106	291	1194	903	54
200	75	390	525	134	8

Obteve-se como resultado que 62% do fosfogesso peneirado passou pela peneira 100 e ficou retido nas peneiras 140 e 200. Parente (2002), Oliveira (2005) e Matos (2011) classificam o fosfogesso como material pertencente a classe dos Siltes.

### 3.1.3.4 Dados experimentais colhidos no laboratório

Após todo preparativo para o ensaio, foi realizado teste com o fosfogesso, tendo este sido colocado no dispositivo experimental, tamponado e energizada a resistência elétrica. Foram realizados dois experimentos sendo:

- no primeiro experimento foi elevado a temperatura do fosfogesso até a temperatura de estabilização que ocorreu à temperatura de 68,3 °C no tempo de 300 minutos; obtendo os valores da Tabela 6 abaixo:

Tabela 6 – Resultado de temperatura, corrente e tensão obtidos no ensaio com fosfogesso – mesh 140/100. Temperatura de estabilização - 68,3 °C

Tempo (min.)	Termopares						Corrente (A)	Tensão (V)
	Temperatura - lado 1 (°C)				Temperatura lado 2 (°C)			
	1	2	3	4	1	2		
300	68,3	49,7	41,4	35,1	83	40,1	0,03	15,9
310	68,4	49,6	41,3	35,0	83,2	40	0,03	15,4
320	69,0	50,2	41,9	35,5	83,7	40,6	0,03	15,1
330	69,3	50,6	42,3	35,8	83,8	41,1	0,03	15,0
340	69,3	50,8	42,5	36,1	84,1	41,3	0,03	15,1
350	69,5	51,0	42,6	36,1	84,3	41,5	0,03	15,6
360	69,5	51,0	42,6	36,0	84,5	41,6	0,03	15,0

(cont.)

370	69,5	50,9	42,4	35,7	84,4	41,5	0,03	15,2
380	69,4	50,8	42,2	35,5	84,4	41,2	0,03	15,1
390	69,4	50,8	42,2	35,5	84,4	41,2	0,03	15,0

No segundo experimento, foi elevada a temperatura do fosfogesso até a temperatura de estabilização que ocorreu a 252 °C no tempo de 390 minutos; apurou-se os resultados no intervalo de tempo de 390 a 440 minutos conforme segue:

Tabela 7 – Resultado da temperatura, corrente e tensão obtidos no ensaio com fosfogesso – mesh 140/100. Temperatura estabilização 251 °C

Tempo (min.)	Termopares						Corrente (A)	Tensão (V)
	Temperatura (C)				Temperatura de estabilização (C)			
	1	2	3	4	1	2		
360	251	163	118	85	283	89	0,11	45
370	252	164	119	85	284	90	0,10	45
380	252	165	120	86	284	91	0,10	45
390	252	165	121	86	284	91	0,10	45
400	252	166	121	86	284	92	0,10	45
410	252	166	122	86	285	92	0,10	45
420	252	167	122	86	285	92	0,10	45
430	252	167	123	86	285	92	0,11	45
440	253	168	123	86	285	93	0,11	45

### 3.1.4. Apresentação dos resultados da parede plana

#### 3.1.4.1 Ensaio para aferição do dispositivo

Durante o período de aferição do equipamento experimental foi utilizada areia grossa e fina conforme dados coletados nos Apêndices 3 e 4 , e utilizada a equação de Fourier (1) para calcular a condutividade térmica (k):

Para a areia grossa, e com dados experimentais obtidos do Apêndice (3), tem-se:

$$\dot{q} = kA \frac{dT}{dl} \quad (1)$$

$$k = \frac{\dot{q}}{A} \frac{dl}{dT} \quad (5)$$

Substituindo-se os valores das tabelas 6 e 7 na equação de Fourier têm-se os seguintes valores de k:

Quadro 1 – Determinação do valor médio do k, W/m.°C para areia grossa

q, W	A,m <sup>2</sup>	ΔT, C	ΔL, m	k (1-4), W/m.°C
4,56	0,003574	158,1	0,03755	0,303014955
				k (1-2), W/m.°C
4,56	0,003574	83,2	0,01715	0,263140601
				k (1-3),W/m.°C
4,56	0,003574	122,2	0,0275	0,287226969
				k (2-3),W/m.°C
4,56	0,003574	39,0	0,0104	0,340215992
				k (2-4),W/m. °C
4,56	0,003574	75,0	0,02140	0,364273961
				k (3-4),W/m.°C
4,56	0,003574	36,0	0,01100	0,390373009
			Média K	0,32162 W/m.°C
			Desvio Padrão	0,04855

Portanto a condutividade térmica para areia grossa a uma temperatura média de estabilização de 268 °C é de  $k = 0,32162 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$ .

Para a areia fina, substituindo na equação de Fourier os valores experimentais obtidos da tabela do Apêndice 4, tem-se

Quadro 2 – Determinação do valor médio do  $k$ ,  $\text{W/m}\cdot\text{°C}$  para areia fina

$q$ , W	$A$ , $\text{m}^2$	$\Delta T$ , C	$\Delta L$ , m	$k$ (1-4), $\text{W/m}\cdot\text{°C}$
2,49	0,003574	75,7	0,0382	0,351784475
				$k$ (1-2), $\text{W/m}\cdot\text{°C}$
2,49	0,0035742	83,2	0,01885	0,1579543
				$k$ (1-3), $\text{W/m}\cdot\text{°C}$
2,49	0,0035742	60,5	0,02845	0,327521925
				$k$ (2-3), $\text{W/m}\cdot\text{°C}$
2,49	0,0035742	17,5	0,01085	0,432571956
				$k$ (2-4), $\text{W/m}\cdot\text{°C}$
2,49	0,0035742	2,36	0,02170	0,463542392
				$k$ (3-4), $\text{W/m}\cdot\text{°C}$
2,49	0,0035742	15,1	0,01090	0,501590415
			Média $k$	0,37249 $\text{W/m}\cdot\text{°C}$
			Desvio Padrão	0,12413

Com os dados acima obtidos foi elaborada uma tabela resumo, a Tabela 8.

Tabela 8 – Resumo do experimento das areias fina e grossa

Amostra	Granulometria Mesh	Densidade g/cm <sup>3</sup>	Temperatura Estabilização °C	Condutividade Térmica (W/m. °C)
Areia Grossa	24	2,63	268	0,32162
Areia Fina	60	2,51	134	0,37065

Analisando os resultados e confrontando-os com os valores, mencionados pela literatura para condutividade térmica da areia seca  $k = 0,3288 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$  ;  $k = 0,2$  a  $1,0 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$  por Çengel (2009, p. 853) e  $k = 0,33 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$  (PERRY, 1999 p. 2.333) e (MSPC, 2012) e com vistas à Tabela 8 na qual se refere à condutividade térmica da areia seca, infere-se que os valores encontrado no experimento pertence ao intervalo de valores da condutividade térmica reconhecidos pela literatura científica.

Pode-se inferir também que o valor da condutividade térmica da areia grossa é menor do que o da areia fina, isto porque a areia grossa tem um volume maior de interstícios entre grãos sendo ocupado pelo ar, tornando a areia grossa um material mais isolante térmico que a areia fina. Este resultado vem de encontro com a teoria da transmissão de calor em que considera o ar como um bom isolante térmico.

Após considerado aceito o equipamento experimental de parede plana, foi certificado dentro dos limites de valores considerados toleráveis neste experimento para medir a condutividade térmica, portanto, passou-se para análise dos resultados encontrados com a amostra do fosfogesso.

Com as amostras do fosfogesso, foram realizados dois ensaios com a finalidade de variar a temperatura em faixas diferentes, observada também a desidratação do fosfogesso nas temperaturas acima de  $150 \text{ } ^\circ\text{C}$  .

No primeiro ensaio experimental, elevou-se a temperatura do fosfogesso da temperatura ambiente  $23 \text{ } ^\circ\text{C}$  a  $69 \text{ } ^\circ\text{C}$ , conforme Apêndice 6. Com os dados obtidos no experimento e considerando que temperatura de estabilização ocorreu à  $68,3 \text{ } ^\circ\text{C}$  obtido no termopar n<sup>o</sup>1.

Compreendendo que não há perda de energia no sistema, pode-se considerar a preservação da 1<sup>a</sup> Lei da Conservação de Energia. Portanto,

$P = Q$ , ou seja, toda potência elétrica gerada pela resistência foi transformada em fluxo de calor unidimensional. Observa-se que foi desconsiderado as perdas de energia, pois o sistema foi considerado nas laterais hermeticamente fechado.

$$Q = q + q_1 \quad (6)$$

$Q$  – calor total gerado pela resistência elétrica,

$q$  – calor transmitido de um lado da resistência onde estão localizados os termopares de 1 a 4,

$q_1$  – calor transmitido do lado oposto da resistência onde estão localizados os termopares de I e II.

Considerando que a taxa de calor seja a mesma para ambos os lados da resistência elétrica, tem-se:

$$q = q_1 \text{ então substituindo em ( 6 )}$$

$$P = Q = 2 q$$

$$q = \frac{P}{2}$$

pela equação (1) de Fourier temos:

$$\dot{q} = kA \frac{dT}{dl} \quad (1)$$

$$k = \frac{\dot{q}}{A \left( \frac{\Delta T}{\Delta l} \right)}$$

Substituindo-se na equação (1) os valores médios da Tabela 6, temos a condutividade térmica do fosfogesso obtida pelo sistema plano, como demonstrado pelo Quadro 3.

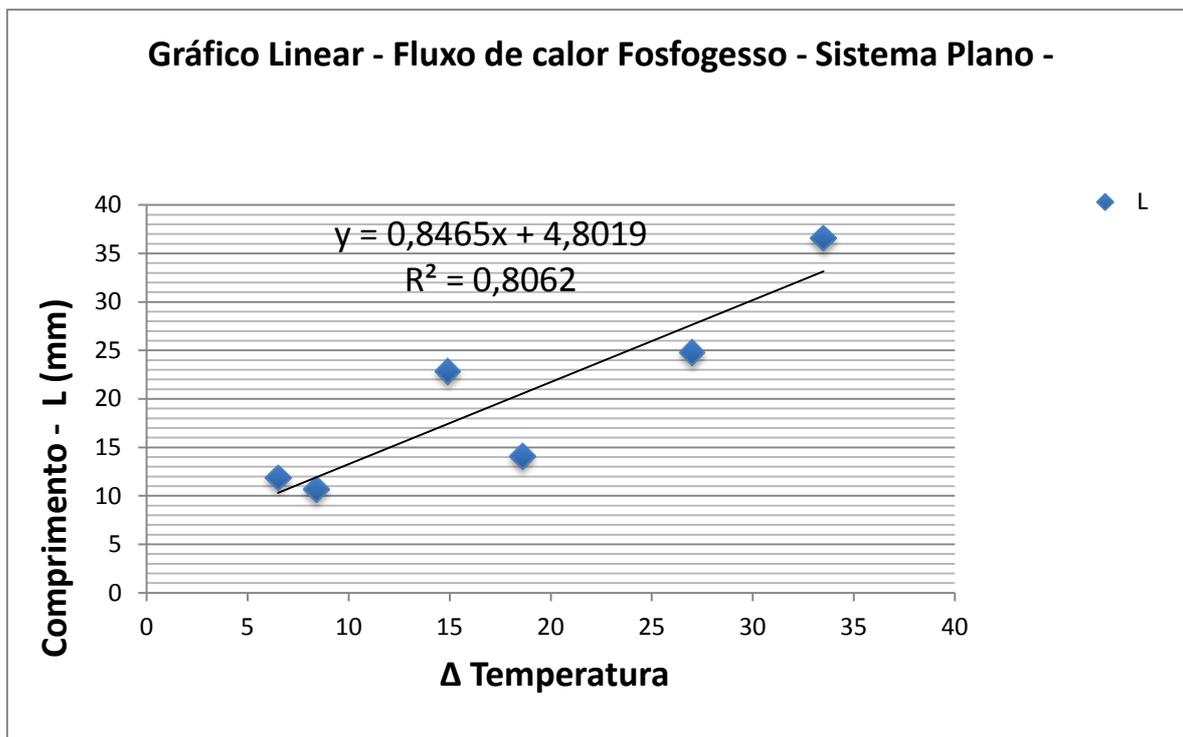
Quadro 3 – Condutividade térmica do fosfogesso pelo sistema plano

q, W	A, m <sup>2</sup>	$\Delta T$ , C	$\Delta L$ , m	k (1-4), W/m. °C
0,23	0,003574	33,5	0,0366	0,06981
				k (1-2), W/m. °C
0,23	0,003574	18,6	0,0141	0,04872
				k (1-3), W/m. °C
0,23	0,003574	27,0	0,0248	0,05906
				k (2-3), W/m. °C
0,23	0,003574	8,4	0,01070	0,08196
				k (2-4), W/m. °C
0,23	0,003574	14,9	0,02290	0,09883
				k (3-4), W/m. °C
0,23	0,003574	6,5	0,01190	0,11762
				W/m. °C
			k médio	0,07934
			Des. padrão	0,01325

O valor da condutividade térmica do fosfogesso  $k=0,07934$  W/m °C foi obtido com a temperatura de estabilização do experimento em  $68,3$  ° C no 1º termopar.

Na Figura 15, foi plotado um gráfico com diversos pontos da variação da distância relativa entre os termopares  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  e  $T_4$  em relação a temperatura dos termopares.

Observa-se no gráfico que a linearização da reta não houve convergência dos pontos obtidos, apresentando um grau de confiabilidade  $R^2 = 0,8062$ . Em consequência, pode-se admitir que houve dispersão do fluxo de calor durante o processo, contrariando a primeira equação de Fourier quanto a unidirecionalidade do fluxo de calor.



**Figura 15 - - Gráfico da linearidade dos pontos - distância entre termopar -  $\Delta L \times \Delta T$  - fosfogesso no Sistema Parede Plana com temperatura de estabilização  $T = 69,3 \text{ }^\circ\text{C}$**

No segundo ensaio experimental, elevou-se a temperatura do fosfogesso de  $50,0 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $253,0 \text{ }^\circ\text{C}$  em um intervalo de tempo de 440 minutos. Entretanto, a temperatura se estabilizou em  $251,0 \text{ }^\circ\text{C}$  no intervalo de tempo de 360 a 440 minutos, conforme mostrado na Tabela 7.

Com a substituição dos valores médios na Equação de Fourier, obteve-se o valor da condutividade térmica do fosfogesso na parede plana.

**Quadro 4 – Determinação da condutividade térmica do fosfogesso  $k$ ,  $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$**

$q$ , W	$A$ , $\text{m}^2$	$\Delta T$ , $^\circ\text{C}$	$\Delta L$ , m	$k$ (1-4), $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
2,3307	0,0036	165,7	0,0366	0,14404
2,3307	0,0036	85,8	0,0141	0,10716
2,3307	0,0036	130,4	0,0248	0,12403

(cont.)

2,3307	0,003574	44,6	0,0107	k (2-3),W/m.°C 0,15649
2,3307	0,003574	79,9	0,0229	k (2-4),W/m.°C 0,18691
2,3307	0,003574	35,31	0,0119	k (3-4),W/m.°C 0,21977
				W/m.°C
			Média k	0,15638
			Desvio Padrão	0,04141

---

Portanto o valor da condutividade térmica do fosfogesso  $k = 0,15638 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$  obtido da temperatura de estabilização de  $251,0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A Figura 16 representa um gráfico com os valores dos pontos obtidos no ensaio da variação da temperatura e distância relativa entre os termopares.

Observa-se, neste gráfico, alguns pontos dispersos quando da linearização da reta, embora apresentando um grau de confiabilidade  $R^2 = 0,86295$  um pouco melhor se comparado com o primeiro ensaio.

Portanto, essa difusão de calor também não satisfaz a primeira lei de Fourier quanto a perpendicularidade do fluxo de calor em relação a secção transversal do dispositivo (unidimensionalidade do fluxo de calor).

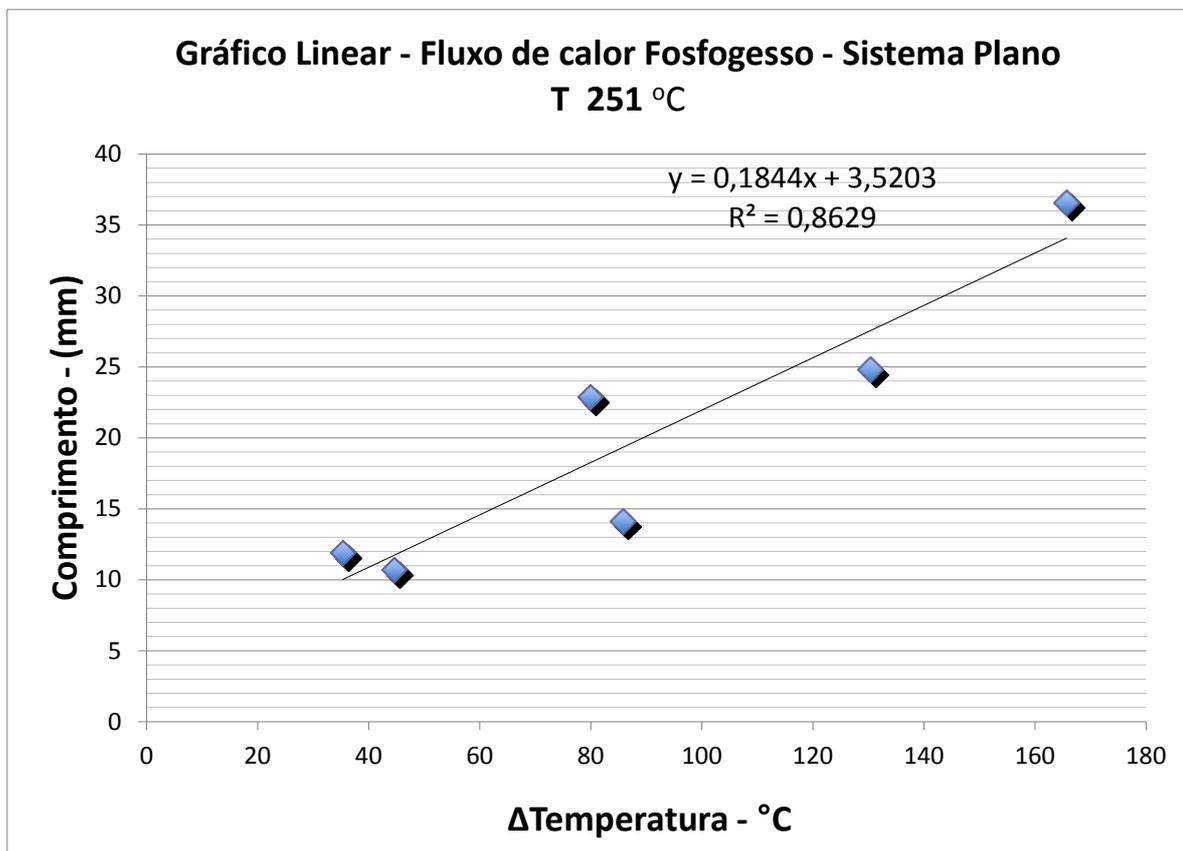


Figura 16 - Gráfico da linearidade dos pontos definidos pelos termopares -  $\Delta L \times \Delta T$  - fosfogesso no Sistema Parede Plana com temperatura de estabilização de  $T=251$  °C.

Quadro 5 – Resumo da condutividade térmica (k) do fosfogesso

Ensaio	Temperatura estabilização °C	Condutividade térmica W/m °C
1	68 °C	0,07934
2	251 °C	0,15638

## 3.2 SEGUNDO EXPERIMENTO PARA SISTEMA RADIAL

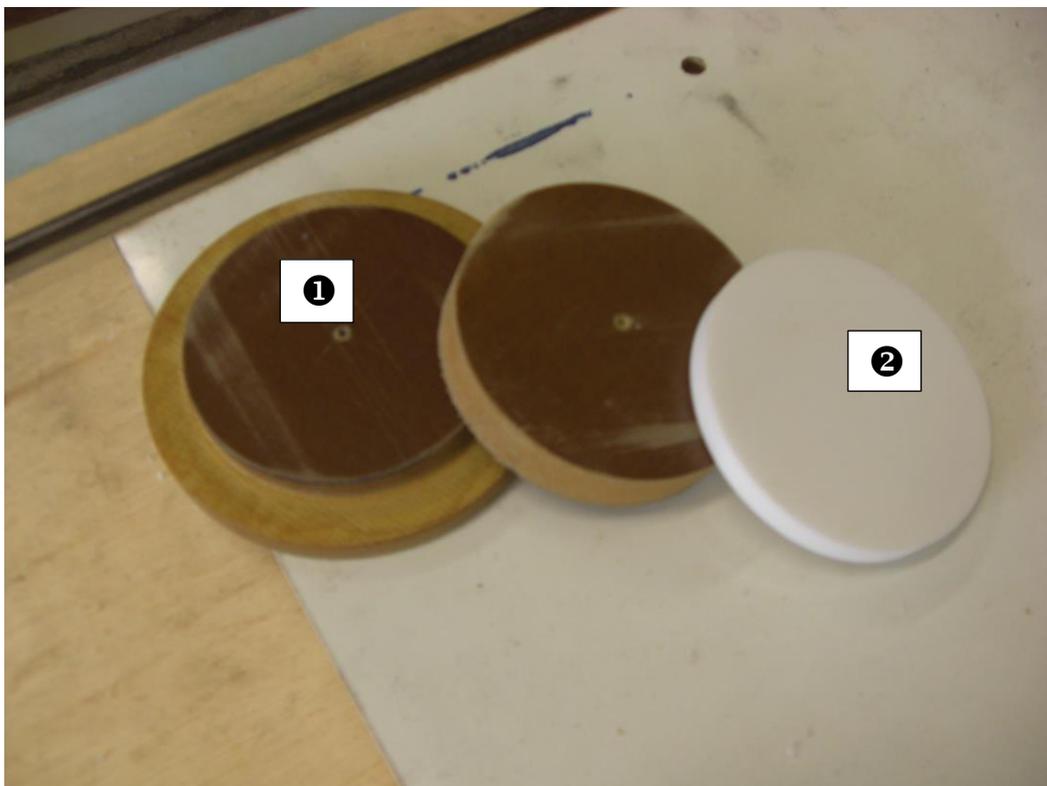
### 3.2.1 Equipamentos e instrumentos

O sistema experimental para determinação da condutividade térmica do fosfogesso pelo método do sistema radial foi projetado, desenvolvido e fabricado dentro do laboratório de Operações Unitárias, conforme Anexo C.

O experimento consistiu de 3 cilindros concêntricos, tendo o primeiro cilindro sido fabricado em aço inoxidável ASTM – A316 diâmetro DN 25 mm e 200 mm de

altura, tendo internamente uma resistência elétrica tipo cartucho de 1.000 watts de potência elétrica tendo sido fabricada em laboratório externo especializado; o segundo cilindro foi fabricado em alumínio, tendo diâmetro DN100 mm, altura 250mm com parede de 1mm de espessura; o terceiro cilindro de acrílico diâmetro DN 200mm e 250mm de altura.

Os cilindros foram montados sobre uma base quadrada de material Celeron de dimensões de 300(L) x 300(W) x 15(H) mm e fechados com tampão de Celeron e teflon ( Figura 17).



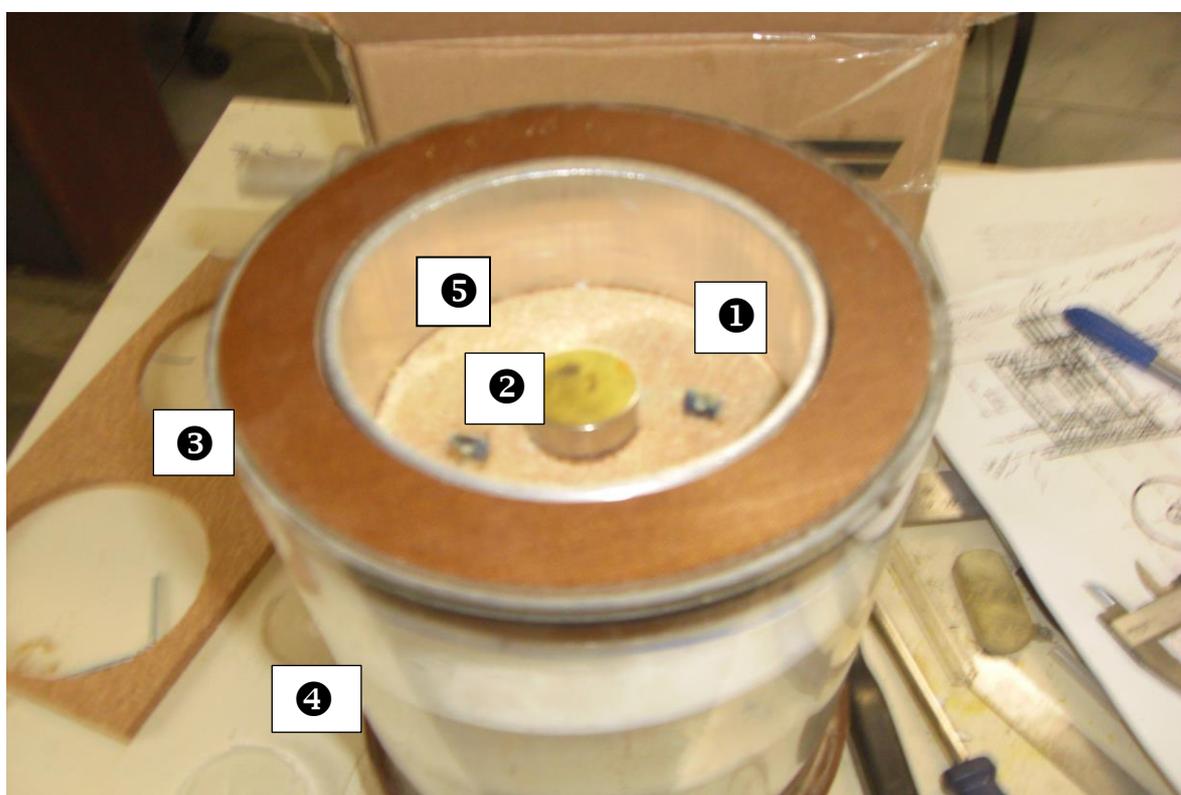
**Figura 17– Ilustra a fabricação do tampo do cilindro do dispositivo onde está contida a amostra.** O tampo foi fabricado com material de Celeron (2) e teflon (1).

Os termopares do tipo J, com dimensões de 150 (L) x 3 (DN) mm, fabricados e testados em laboratório externo especializado. A resistência elétrica foi ligada a um transformador variador de tensão (Variac) de 2 KVA, e os termopares foram conectados aos seus respectivos sensores.

Diversas figuras vêm apresentar as fases de fabricação e montagem do dispositivo experimental, com a denominação de todos os equipamentos que contribuíram para a realização do segundo experimento.

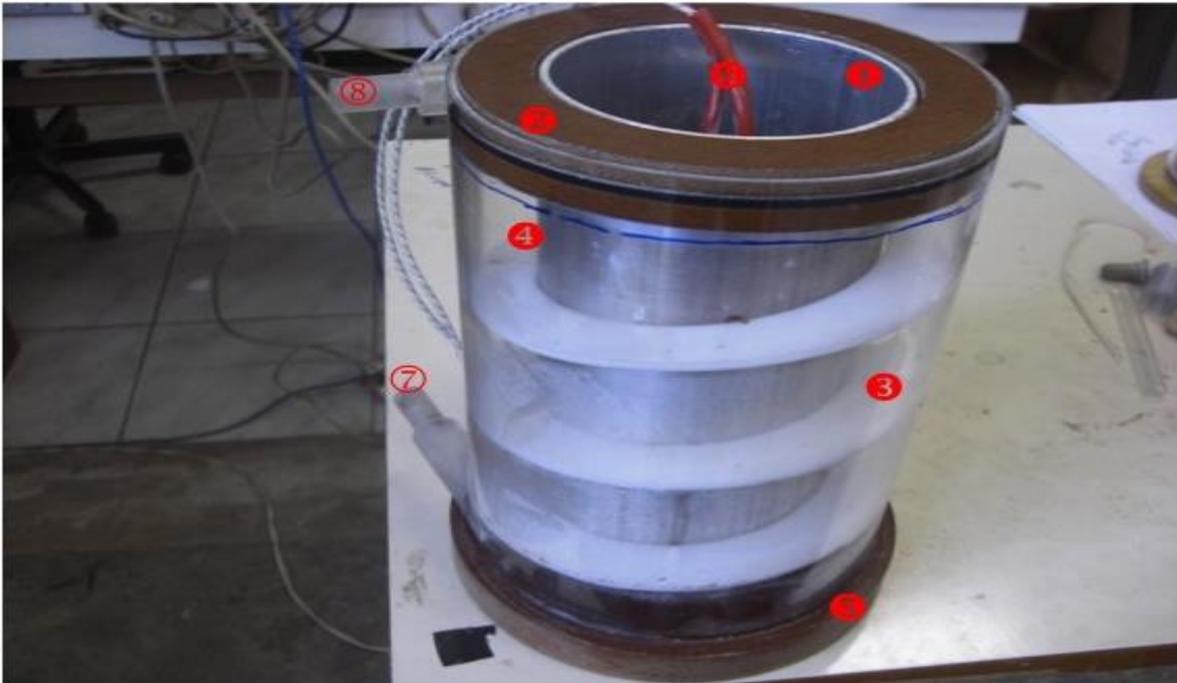
A Figura 17 ilustra o fechamento final composto por um tampão cilíndrico de Celeron (1) e teflon (2) que se encaixa na câmara do material da amostra. A Figura 18 apresenta, na câmara de amostra, uma proteção térmica feito em cortiça (5).

Para o fechamento da camisa de água de resfriamento, foi fabricado um tampão de celeron sendo esse encaixado e soldado com silicone e internamente a câmara de resfriamento foram colocadas chicanas para desvios da direção do fluxo de água e conseqüentemente melhorando a eficiência da fonte de resfriamento.



**Figura 18 – Ilustra a fabricação do dispositivo do sistema radial, sendo: (1) cilindro de alumínio (2) resistência tipo cartucho – S1, (3) tampo da camisa de resfriamento, (4) cilindro externo de acrílico, (5) rolha de cortiças isolante.**

Internamente ao cilindro S1, foi montada uma resistência elétrica tipo cartucho (2) de 1000 W na parte central, e ligada a uma fonte de alimentação de energia que comumente permite variações de tensão e da corrente até 50V e 3,0 A, podendo, desta maneira, transformar a energia elétrica em diferentes fluxos de calor.



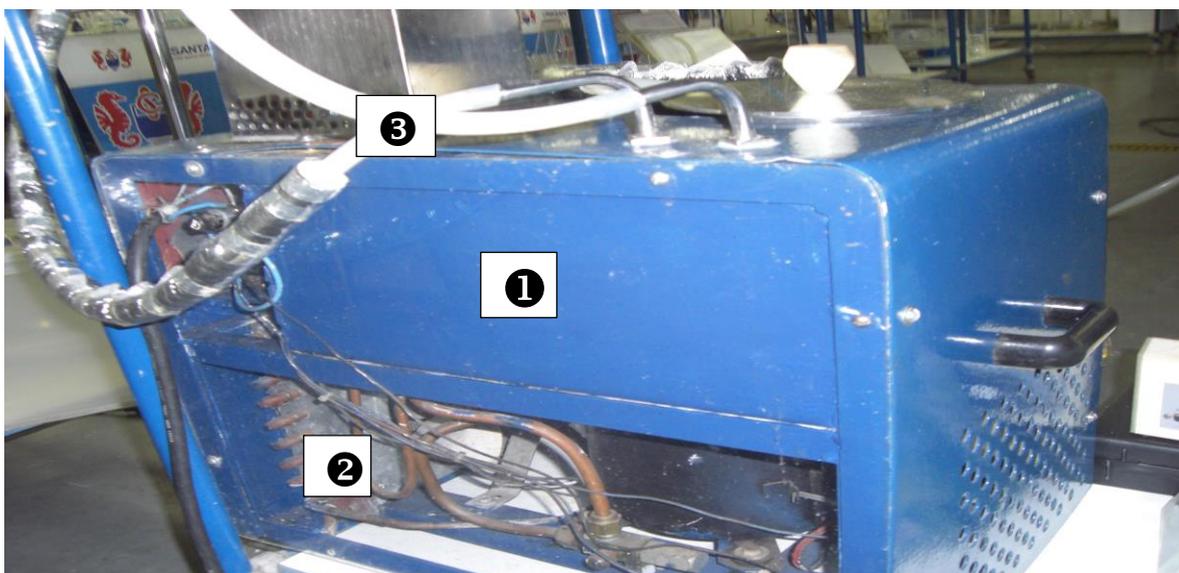
**Figura 19– Ilustra a fabricação do dispositivo do sistema radial, sendo: (1) cilindro interno em alumínio; (2) tampo superior em celeron; (3) chicanas da camisa do resfriamento de água; (4) cilindro externo de acrílico; (5) base do dispositivo de Celeron; (6) resistência elétrica e cilíndrica; (7) tubo de PVC de entrada de água de resfriamento; (8) tubo de PVC para saída de água de resfriamento.**



**Figura 20 – Ilustra o dispositivo experimental montado durante a fabricação.**

A Figura 20 mostra o dispositivo tamponado e a montagem dos termopares tipo J, como também as aletas para direcionar o fluxo de água melhorando a troca térmica do dispositivo.

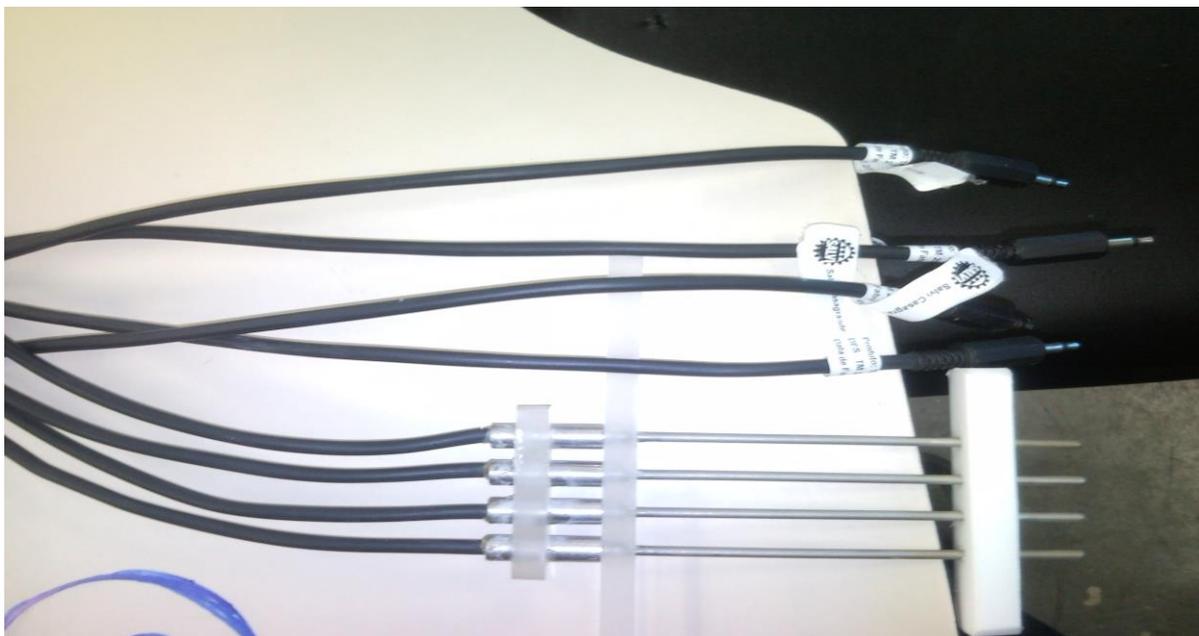
A Figura 21 apresenta o equipamento do banho termostaticado. Este equipamento tem por finalidade manter a fonte fria do experimento a uma temperatura de água pré-determinada em 22°C.



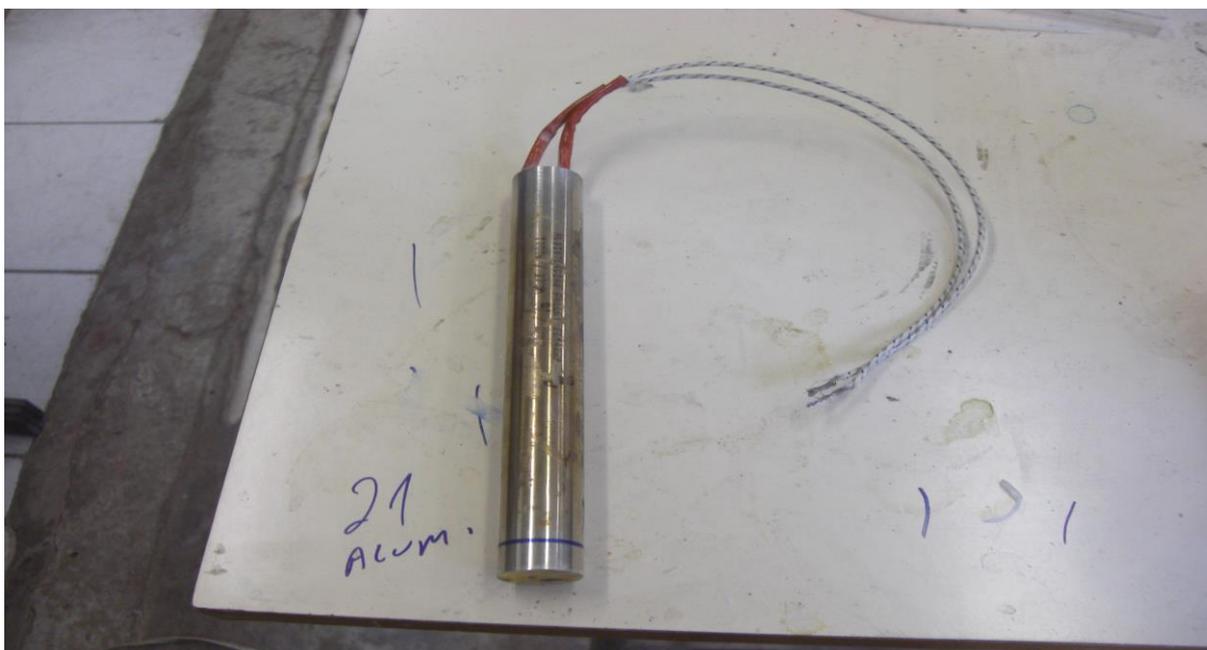
**Figura 21 – Elementos que compõem o banho termostaticado, sendo: (1) tanque de água, (2) circuito frigorífico, (3) tubulação de água de alimentação e retorno.**



**Figura 22– Sensor de temperatura digital – marca salcas, mod. Salvterm 704, escala -40 a +700 °C, sensor tipo J (Fe – Co)**

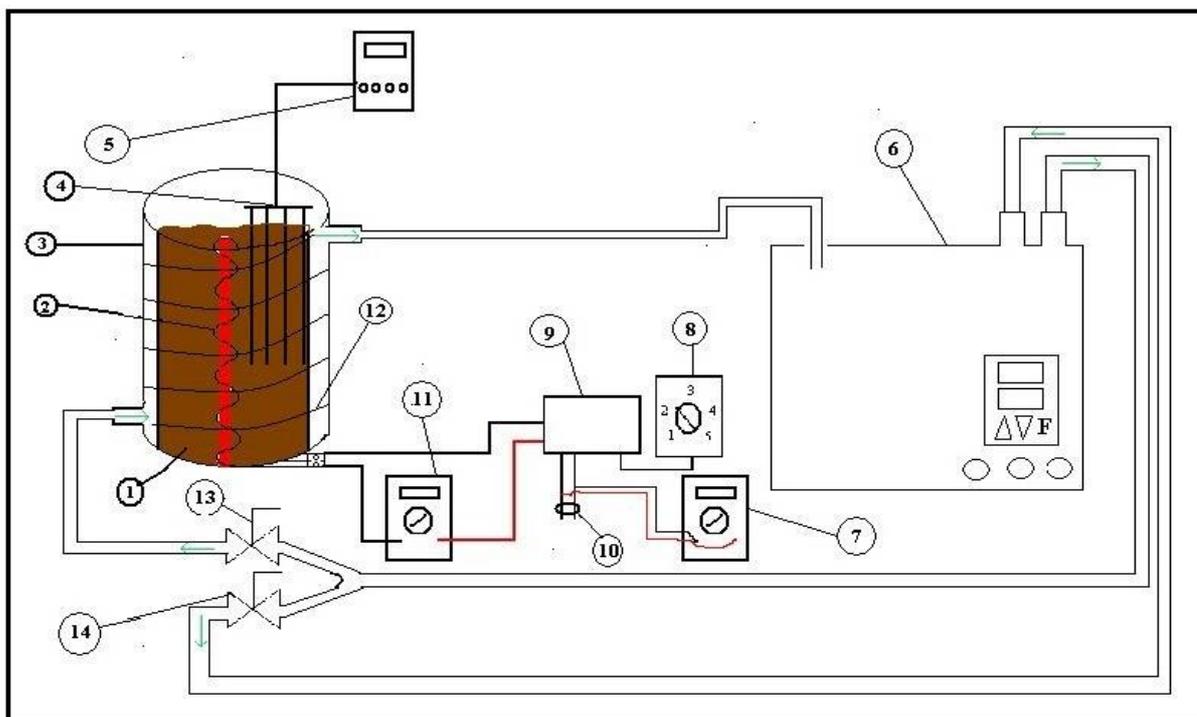


**Figura 23 – Termopares**, compostos por: haste ou elemento primário de contato tendo em uma extremidade o ponto quente e na outra o ponto frio, cabos coaxiais ligando o elemento de contato com o sensor digital de temperatura.



**Figura 24 – Resistência elétrica tipo cartucho**: potência 1.000 Watts – comprimento 200 mm e diâmetro 25 mm, com capa de aço inox 306 para temperatura de 400° C.

A Figura 25 ilustra o desenho esquemático da unidade experimental com seus equipamentos.



**Figura 25 – Sistema Radial - Unidade Experimental** 1) Câmara da amostra - areia seca ou fosfogesso; 2) Resistência elétrica; 3) Cilindros sendo interno de alumínio e externo de acrílico; 4) Termopares Tipo J; 5) sensor Indicador de temperaturas; 6) Banho termostático; 7) Voltímetro; 8) Potenciômetro; 9) Fonte elétrica – transformador variador de tensão de 2 KVA ; 10) Alimentação 220 V 11) Amperímetro; 12) Circulação de fluxo de água com chicana tipo helicoidal ; 13) Válvula de fluxo; 14) Válvula de reciclo.

Os respectivos equipamentos que compõem o sistema radial são:

-sistema de resfriamento: é um equipamento que tem a finalidade de manter, no experimento, a água da fonte fria a temperatura de 25 °C. Ele é constituído de um reservatório de água desmineralizada, um circuito frigorífico com compressor, evaporador, gás freon H22 e conjunto de válvulas para direcionar o fluxo dos fluídos.

-sistema de alimentação elétrica de rede com estabilizador de tensão para 220 volts.

-sistema de medição elétrica composto por um potenciômetro com escala de 0 a 10, controlador de energia (banho controle), potência 5.500 watts, tensão 220 volts, marca Martronic, um miliamperímetro e um milivoltímetro. Este sistema foi substituído por um transformador variador de tensão (variac) de 2 KVA obtendo um maior range de variação de tensão e com maior precisão.

-resistência elétrica tipo cartucho para 1000 watts, dimensões 200 mm de comprimento com 25 mm de diâmetro. O cartucho de aço inoxidável ASTM A 304 suporta uma temperatura de capa até 400 °C. A resistência foi calculada e fabricada em laboratório especificamente para este experimento.

-foram fabricados 4 termopares tipo J de Ferro-Constantan, tendo sua faixa de trabalho de temperatura de -40 a 750 °C, com dimensão de 150 mm de comprimento por 3 mm de diâmetro.

- sensor terminal digital com capacidade para suportar até 4 termopares, escala de temperatura de -40 a 700 , marca Salcas, tipo Salvaterm 704, nº de série 75145, ano de fabricação 02/12/2010.

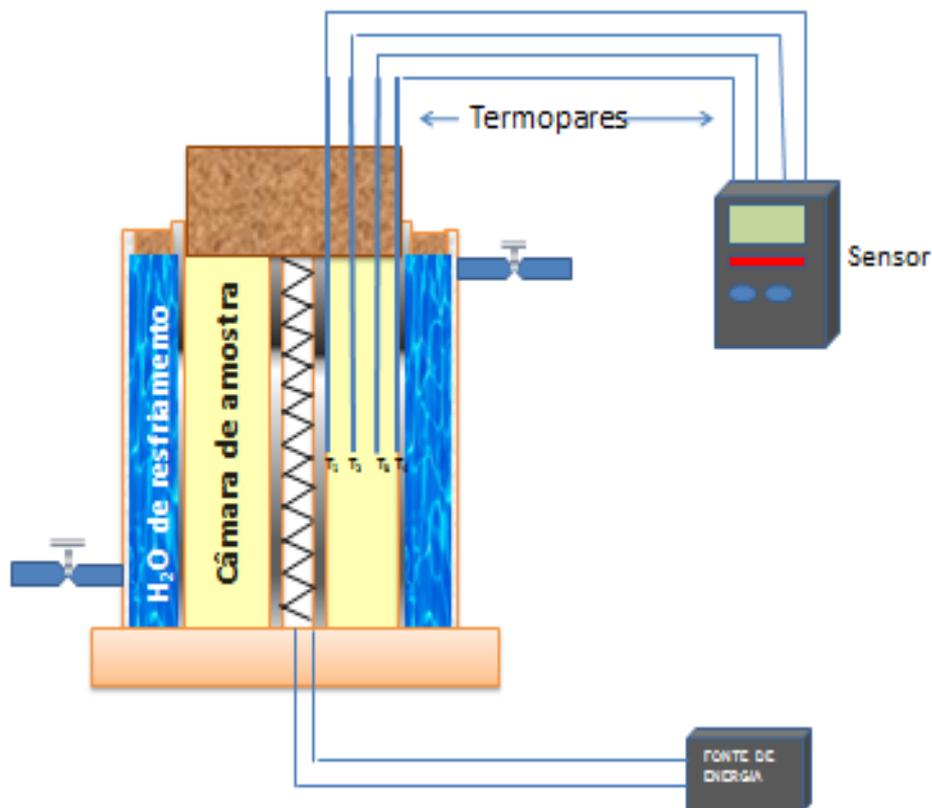
### 3.2.2 Método

O método do sistema radial para determinar experimentalmente a condutividade térmica de um material consiste de um dispositivo com três cilindros concêntricos S1, S2 e S3, conforme já mencionado e apresentado esquematicamente na Figura 25.

O sistema operacional do experimento se baseou na colocação do material da amostra no espaço obtido entre a resistência e o cilindro de alumínio (câmara da amostra); a câmara formada entre o cilindro de alumínio e o cilindro acrílico foi ocupado com água destilada, tendo sua temperatura controlada pelo equipamento banho termostatizado entre 23 °C a 26 °C.

Portanto, neste experimento, temos como fonte geradora de calor a resistência elétrica e, como fonte fria, a água com temperatura controlada, direcionando um fluxo de calor radial, unidimensional da fonte quente para a fonte fria e perpendicular as superfícies cilíndricas (S1 e S2), como ilustrado na Figura 26.

## EXPERIMENTO – CONDUTIVIDADE TÉRMICA – SISTEMA RADIAL



30

Figura 26 – Desenho esquemático do sistema radial

Tomou-se o cuidado de se isolar hermeticamente todos os pontos de fuga de calor para o meio ambiente compreendendo as extremidades dos cilindros utilizando materiais isolantes térmicos como celeron, teflon, cortiça e manta de lã de rocha. Após a colocação da amostra no interior da câmara cilíndrica, a extremidade foi hermeticamente tamponada.

As temperaturas da amostra do material ensaiado, o qual ocupou o espaço entre os cilindros S1 e S2, foram obtidos através de quatros termopares colocados radialmente há uma altura H da amostra e espaçados linearmente, conforme Figura 26 – T1, T2, T3 e T4. As extremidades dos termopares foram conectadas a um sensor que registrou as temperaturas.

### 3.2.2.1 Ensaio com areia grossa para calibração do dispositivo radial

A finalidade deste ensaio foi aferir o dispositivo do sistema radial utilizando a areia grossa; método de calibração semelhante ao utilizado no ensaio do primeiro experimento sistema plano, conforme descrito no item 3.1.2.1 e Tabela 9.

A areia grossa, adotada neste experimento, foi a mesma do primeiro experimento, tendo as seguintes características técnicas:

- densidade real da areia grossa, conforme item 3.1.2.1.2 do primeiro experimento, tem-se:  $d = 2,63 \text{ g/cm}^3$ .
- granulometria da areia grossa, sendo que o material da amostra passou pela peneira mesh 12 e ficou retido na peneira de mesh 24, portanto a granulometria da amostra foi mesh 24/12.

Para a realização deste experimento a fonte de energia – Variac – foi fixada em uma tensão de 30 V e 0,35 A. transformando potência elétrica em fluxo de calor  $Q = P$ .

### 3.2.2.2 Levantamento de dados para a determinação da condutividade térmica em regime permanente da areia grossa pelo método do sistema radial.

Após a preparação da areia, a amostra foi colocada dentro do dispositivo e tamponada conforme Figura 18. Neste ensaio obteve-se uma temperatura de estabilização no 1º termopar de  $T_1 = 80,2 \text{ °C}$  e no 4º termopar em  $T_2 = 30,2 \text{ °C}$ .

Tabela 9 – Dados coletados no ensaio da amostra areia grossa da temperatura, corrente e tensão elétrica, com temperatura estabilizada em  $80,2 \text{ °C}$  no primeiro termopar.

Tempo, min	Temperatura, °C				Temperatura banho, °C	Corrente, A	Tensão, V
	1	2	3	4			
100	79,2	59,1	41,3	30,4	25	0,40	42,0

(cont.)

<b>110</b>	<b>79,7</b>	<b>59,4</b>	<b>41,5</b>	<b>30,3</b>	<b>25</b>	<b>0,40</b>	<b>42,0</b>
<b>120</b>	<b>80,4</b>	<b>59,9</b>	<b>41,6</b>	<b>30,3</b>	<b>25</b>	<b>0,40</b>	<b>42,0</b>
<b>140</b>	<b>80,7</b>	<b>60,1</b>	<b>41,7</b>	<b>30,2</b>	<b>25</b>	<b>0,40</b>	<b>42,0</b>
<b>150</b>	<b>80,8</b>	<b>60,2</b>	<b>41,7</b>	<b>30,2</b>	<b>25</b>	<b>0,40</b>	<b>42,0</b>
<b>160</b>	<b>80,8</b>	<b>60,2</b>	<b>41,7</b>	<b>30,2</b>	<b>25</b>	<b>0,40</b>	<b>42,0</b>
<b>Média</b>	<b>80,2</b>	<b>59,8</b>	<b>41,5</b>	<b>30,2</b>	<b>25</b>	<b>0,40</b>	<b>42,0</b>

### 3.2.3 Fosfogesso

Na pesquisa para determinação da condutividade térmica do fosfogesso em sistema radial foi utilizada a mesma amostra do primeiro experimento.

#### 3.2.3.1 Coleta do material e preparação da amostra

Conforme já citado o fosfogesso foi coletado na linha de produção da indústria de fertilizante COPEBRAS.

#### 3.2.3.2 Determinação do pH, apassivação e ajuste do fosfogesso

Para este ensaio, as amostras de fosfogesso, foram apassivadas e neutralizadas com a mistura do componente  $\text{CaCO}_3$ , tendo que para cada 150 g de fosfogesso foi adicionado 7,96 g de  $\text{CaCO}_3$  obtendo um pH da ordem 7,0, conforme realizado no primeiro experimento.

A Figura 27 ilustra a textura da mistura fosfogesso com a substância  $\text{CaCO}_3$  onde pode-se observar a sua homogeneidade e o estado pastoso.



**Figura 27 – Mistura do fosfogesso com  $\text{CaCO}_3$  para ajuste do pH.**

Após a secagem da mistura em estufa de 60 à 80 °C, o material se aglutinou em estado sólido, havendo necessidade de iniciar a operação de destorroamento pela qual todos os sólidos foram prensados manualmente por uma espátula metálica, retornando, assim, ao estado físico primitivo em forma de pó com granulometria variando de 40 a 240 mesh conforme mostrado na Figura 14.

### 3.2.3.3 Granulometria – Processo por Peneiração.

Dando continuidade ao processo operacional da preparação da amostra, procedeu-se à etapa da secção de classificação granulométrica, conforme segue:

- este ensaio de granulometria por peneiramento foi o processo utilizado para determinar a percentagem específica do tamanho das partículas nas amostras do fosfogesso e da areia de sílica. Através do resultado obtido deste ensaio, é possível construir a curva granulométrica e definir qual é o volume da granulometria significativa adotada da amostra no experimento.
- foi adotada a norma DER/SP M6.61 e ABNT-NBR 12127 (1991), que inclui um conjunto de 7 peneiras padronizadas ( # 32, #42, #50, #60, #100, #140, #200);
- foi pesada, em uma balança de precisão de laboratório conforme Figura 28, a quantidade de 1.680 gramas da amostra de fosfogesso, e depositada em partes no conjunto de peneiras onde o material passa com a movimentação do agitador

vibratório mencionado no item 4.1.33 do primeiro experimento e ilustrado na Figura 29.



**Figura 28 – Balança de laboratório** – marca Marte – modelo AL 500 capacidade máx. de 500 g – carga mínima 0,02 g – divisão de verificação 0,01 g- classe II



**Figura 29 – Equipamento vibratório de peneiramento** – marca Gehaka – modelo BG 2000, E capac. Máx. 2.000 g. Composto por 7 peneiras de malhas - # 32, #42, #50, #60, #100, #140, #200

A seguir, a Tabela 10 apresenta os resultados colhidos durante o ensaio de granulometria por peneiramento do fosfogesso.

Tabela 10 – Ensaio de granulometria do fosfogesso por peneiramento

Peneira	Peneira vazia	Peneira com material	Massa Retida	Massa Retida	Massa Retida Acumulada
Tyler/Mesh	mm	(g)	(g)	g	%
# 32	0,500	351	363	12	0,71
# 42	0,355	352	355	3	0,18
# 50	0,300	305	307	2,4	0,14
# 60	0,250	358	361	2,5	0,15
# 100	0,150	293	780	487	28,99
# 140	0,106	291	1194	903	53,75
# 200	0,075	390	525	134	7,98
> # 200	0,000	407	541	134	7,98

Gráfico do ensaio realizado para determinação das granulometrias da amostra de fosfogesso

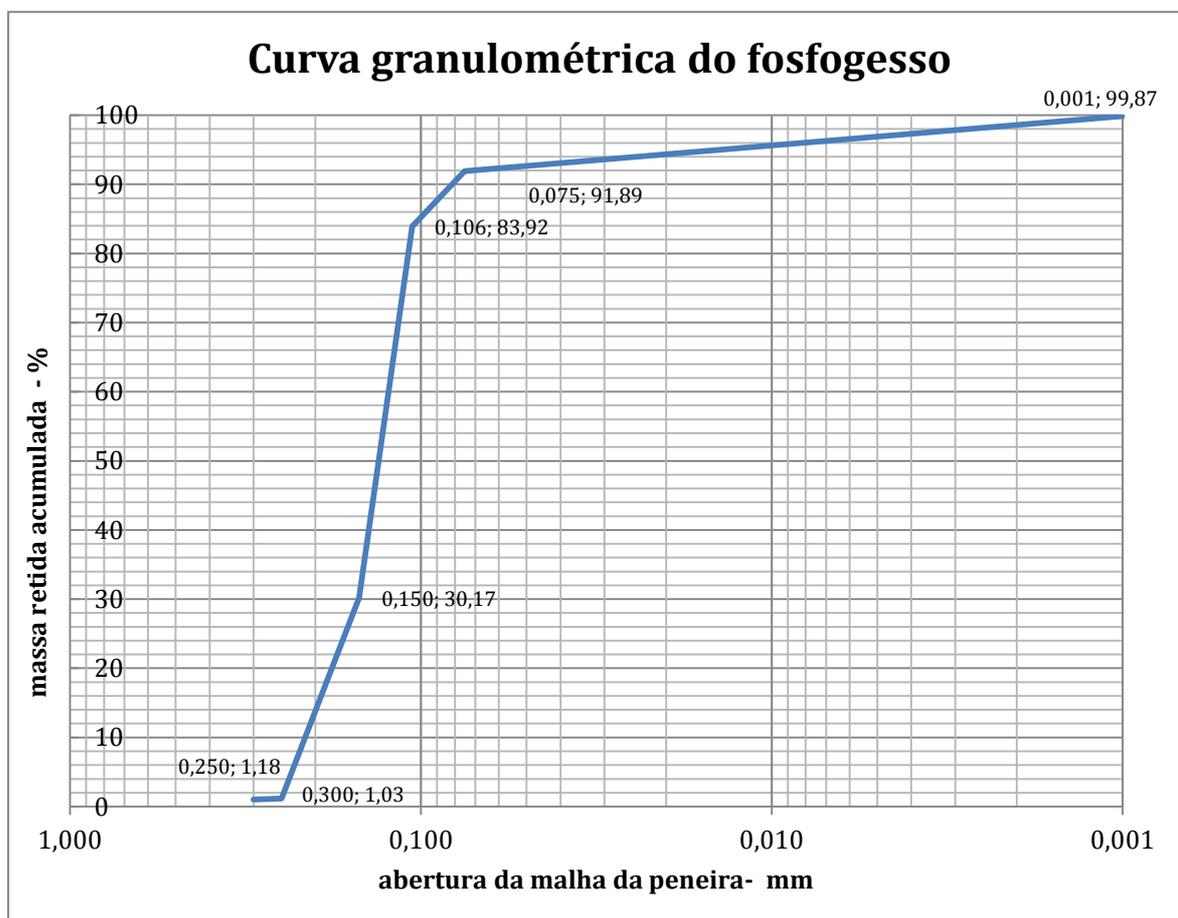


Figura 30 – Curva representativa da amostra granulométrica do fosfogesso

Através da curva de distribuição granulométrica da amostra, Figura 30, foi possível observar que 98,82% das partículas passaram pelas malhas das peneiras de aberturas 0,500mm, 0,355mm, 0,300mm e 0,250 mm, enquanto que 69,83% da amostra passou pela peneira 0,150 mm, e somente 16,08 % pela peneira 0,106 mm. Portanto, foi adotado, como amostra para o experimento, o material que passou pela peneira de 0,150mm (# 100) e ficou retido na peneira de 0,106mm (# 140).

### 3.2.3.4 Dados experimentais colhidos durante o ensaio

Dando sequência ao ensaio, a amostra de fosfogesso foi colocada na câmara de amostra e o dispositivo foi ligado à fonte de energia elétrica. Todos os dados colhidos durante o ensaio foram catalogados conforme Tabela 11 e Apêndice 8.

Tabela 11 – Dados coletados no ensaio da amostra fosfogesso da temperatura, corrente e tensão elétrica, com temperatura estabilizada em 122 °C no primeiro termopar

Tempo, min	Temperatura, °C				Temperatura banho, °C	Corrente, A	Tensão, V
	1	2	3	4			
240	121,5	81,4	51,2	32,1	22,0	0,50	50,00
250	122,9	81,7	51,3	31,9	22,0	0,50	50,00
270	123,8	81,7	51,1	31,5	22,0	0,49	49,00
280	124,5	81,7	51,0	31,4	22,0	0,49	49,00
290	125,0	81,7	50,9	31,2	22,0	0,49	49,00
300	125,0	81,7	50,9	31,1	22,0	0,49	49,00
<b>Média</b>	123,78	81,65	51,07	31,53	22,0	0,49	49,33

### 3.2.4 Apresentação dos resultados do sistema radial

#### 3.2.4.1 Ensaio com areia grossa para aferição do dispositivo do experimento cilíndrico

Para realizar a aferição deste dispositivo foi utilizado como no primeiro experimento a área grossa seca.

Para determinar a condutividade térmica em regime permanente da transferência de calor em sistema radial, teve-se como elementos dois cilindros concêntricos de comprimento (L), raios  $r_n$  e  $r_{(n-1)}$ , superfícies externas (S(n) e S(n-1)), tendo sido estas expostas a fluido com diferentes temperaturas em uma direção radial e unidimensional.

Utilizou-se a primeira equação de Fourier para Sistema Radial (INCROPERA, 2008) conforme equação (6):

$$k = - \frac{Q \ln \frac{r(n)}{r(n-1)}}{2\pi L (T_n - T_{n-1})} \quad (6)$$

Sendo:

k - condutividade térmica da amostra (W/m °C)

Q – transferência de calor (W)

$r(n)$  – raio numa superfície cilíndrica (Sn)

$r(n-1)$  – raio numa superfície cilíndrica (Sn-1)

L – comprimento da câmara cilíndrica onde está a amostra (câmara da amostra)

$T(n)$  – temperatura em  $r(n)$

$T(n-1)$  – temperatura em  $r(n-1)$ .

Substituindo os valores coletados da Tabela 9 na equação de Fourier e processando os valores no Excel, tem-se o Quadro 6.

Quadro 6 – Determinação dos valores de k da areia grossa com temperatura de estabilização de 80,2 °C em relação à posição dos termopares – W/m. °C

q, W	$\ln(r(n)/r(n-1))$	$\Delta T, C$	$2x \sqrt{\pi} x L, m$	k (1-4), W/m. °C
16,8000	1,0092	50,0	0,9106	0,37238
				k (1-2), W/m. °C
16,8000	0,4400	20,5	0,9106	0,39691
				k (1-3), W/m. °C
16,8000	0,7813	38,7	0,9106	0,37260
				k (2-3), W/m. °C
16,8000	0,3413	18,2	0,9106	0,34534
				k (2-4), W/m. °C
16,80000	0,5693	29,6	0,9106	0,35541
				k (3-4), W/m. °C
16,8000	0,2280	11,3	0,9106	0,37162
				W/m. °C
			Média k	<b>0,36905</b>
			Desvio Padrão	<b>0,01763</b>

Portanto, compreende-se que a condutividade térmica da areia grossa seca, mesh 14/12, temperatura de estabilização 80,2 °C pelo sistema radial, foi determinada no ensaio como sendo:  $k = 0,36905 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$ .

O resultado apresentado está próximo ao valor da condutividade térmica do experimento de placa plana  $k = 0,32162 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$  e dos valores apresentados pela literatura  $k = 0,33 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$  Perry (1999);  $k = 0,2$  a  $1,0 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$  por Çengel (2009, p.853) ; Vital et al. (2012).

Após o exposto acima, considerou-se aceito o dispositivo para determinação da condutividade térmica para sistema radial.

### 3.2.4.2 Ensaio com o fosfogesso

Para aplicação da 1ª. Equação de Fourier considerar-se no experimento, o fluxo de calor unidirecional, e que a temperatura se mantenha estável durante um determinado período de tempo.

#### 3.2.4.2.1 Estabilidade unidimensional do fluxo de calor no sistema cilíndrico

O dispositivo cilíndrico para determinação da condutividade térmica é composto por três cilindros concêntricos de áreas  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ , sendo que o cilindro  $S_1$  é a fonte quente e os cilindros  $S_2/S_3$  formam a fonte fria, e no espaço criado pelos cilindros  $S_1$  e  $S_2$  são fixados os termopares  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  e  $T_4$ , mantendo-se entre eles uma distância linear  $\Delta L$  (Figura 26). Pela Equação de Fourier, tem-se:

$$k = - \frac{Q \ln \frac{r(n)}{r(n-1)}}{2\pi L (T_n - T_{n-1})} \quad (6)$$

Por essa equação, pode-se considerar como constantes  $Q$  e  $2\pi L$ ; como variáveis o logaritmo neperiano dos raios das áreas de projeção dos cilindros em função da variação da temperatura. Assim, tem-se:

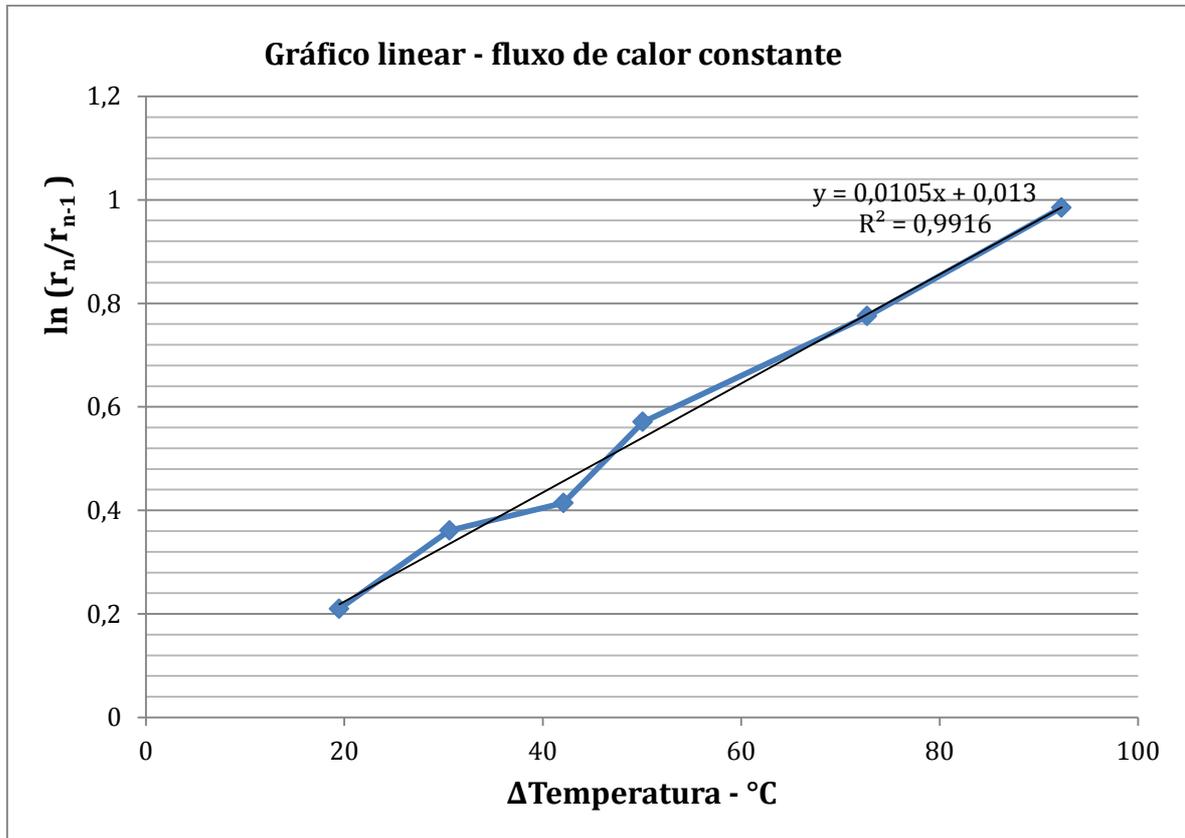
$$\varepsilon = \frac{Q}{2\pi L} \quad (7)$$

$$k = - \varepsilon \frac{\ln \frac{r(n)}{r(n-1)}}{(T_n - T_{n-1})} \quad (8)$$

$$\ln \frac{r(n)}{r(n-1)} = - \frac{k}{\varepsilon} (T_n - T_{n-1})$$

Considerando a expressão como equação de uma reta, tem-se:

$$\text{tang. } \alpha = \frac{k}{\varepsilon} = \text{constante e coeficiente angular da reta.}$$



**Figura 31 – Gráfico da Equação de Fourier construídos com os pontos levantados no ensaio do fosfogesso a partir do regime permanente**

Analisando o gráfico da Figura 31, denota-se que os pontos obtidos no ensaio foi linearizado com grau de aceitação  $R^2 = 0,9916$  e de coeficiente angular igual a  $\text{tang. } \alpha = k \frac{2\pi L}{q} = \text{constante}$ .

Nestas condições, pode-se afirmar que durante todo o processo operacional do experimento no regime permanente não houve variação do fluxo de calor ( $Q$ ) e nem do coeficiente de condutividade térmica ( $k$ ). Diante do fato de que o fluxo de calor se manteve constante, sem dispersão ou difusão, pode-se concluir que o fluxo se manteve em uma única direção: unidimensional.

#### 3.2.4.2.2 Estabilidade da temperatura do sistema

No decorrer do ensaio, foram validados os dados coletados a partir do instante em que a temperatura do sistema se manteve estável. Assim, foram coletados 25 pontos, dos quais apenas 6 pontos foram em regime permanente,

sendo o demais pontos correspondentes ao tempo em que a bancada dispendeu para entrar no regime permanente. O gráfico da Figura 32 foi plotado com base em todos os dados coletados durante o experimento que se encontra no Apêndice 6.

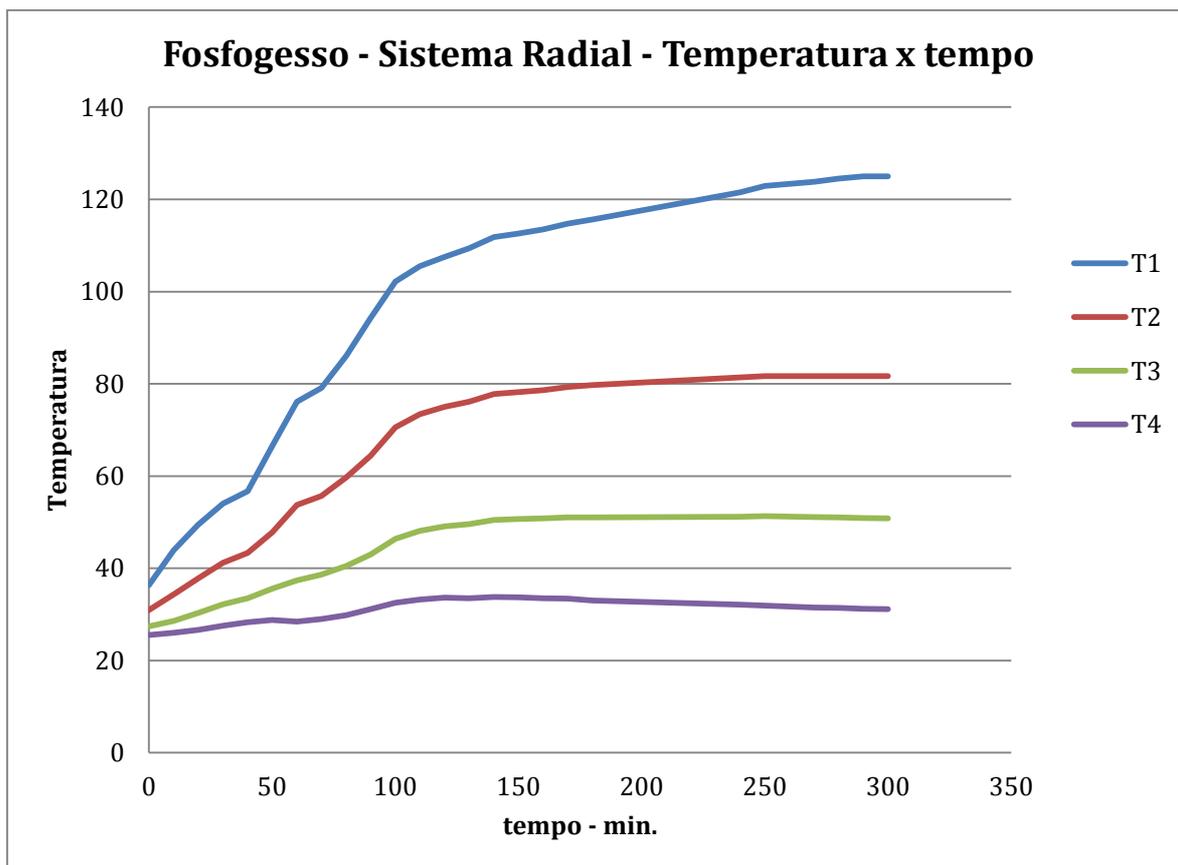


Figura 32– Gráfico do Sistema cilíndrico do fosfogesso tendo a variação da Temperatura com o tempo do experimento na bancada – legenda para os sensores da figura 26

Na Figura 32, compreende-se pelo gráfico que as temperaturas nos termopares  $T_2$ ,  $T_3$  e  $T_4$  se estabilizaram depois de transcorrido um tempo de 150 minutos a partir do início do ensaio, o mesmo não ocorrendo com o termopar  $T_1$  que durante todo período do ensaio teve sua temperatura oscilando conforme o mesmo gráfico.

Tal variação de temperatura no termopar  $T_1$  foi ocasionada devido à proximidade do  $T_1$  junto à fonte de energia elétrica, sendo que pequenas oscilações de tensão na rede provocaram variações instantâneas no fluxo de calor e consequentemente na temperatura do termopar  $T_1$ .

Porém, para reduzir a influência deste fenômeno, reduziu-se o intervalo de tempo entre 240 a 300 minutos ocorrendo uma aproximada estabilidade de temperatura no termopar  $T_1 = 122\text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3.2.4.2.3 Determinação da condutividade térmica do fosfogesso pelo sistema cilíndrico

Para determinação da condutividade térmica do fosfogesso pelo sistema cilíndrico, foram utilizados os dados colhidos nos ensaios de laboratório conforme Tabela 11 e substituído na equação de Fourier (1), tendo como resultado o Quadro 7.

Quadro 7 – Determinação dos valores de k do fosfogesso com temperatura de estabilização no 1º termopar de  $122\text{ }^\circ\text{C}$  em relação à posição dos termopares –  $\text{W/m. }^\circ\text{C}$

q, W	$\ln(r(n)/r(n-1))$	$\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$	$2x\pi xL, \text{ m}$	k (1-4), $\text{W/m. }^\circ\text{C}$
24,3378	0,9849	92,3	0,9106	0,2853
				k (1-2), $\text{W/m. }^\circ\text{C}$
24,3378	0,4142	42,1	0,9106	0,2627
				k (1-3), $\text{W/m. }^\circ\text{C}$
24,3378	0,7752	72,7	0,9106	0,2849
				k (2-3), $\text{W/m. }^\circ\text{C}$
24,3378	0,3610	30,6	0,9106	0,3154
				k (2-4), $\text{W/m. }^\circ\text{C}$
24,33778	0,5707	50,1	0,9106	0,3043

(cont.)

---

				k (3-4), W/m. °C
24,3378	0,2097	19,5	0,9106	0,2869
				W/m. °C
				Média K
				<b>0,2899</b>
				Desvio Padrão
				<b>0,0182</b>

---

Portanto, para condutividade térmica do fosfogeno obtido através do sistema cilíndrico a uma temperatura de equilíbrio de 122 °C no termopar T<sub>1</sub>, obteve-se:

$$k = 0,2899 \text{ W/m. } ^\circ\text{C.}$$

## 4 DISCUSSÃO DOS EXPERIMENTOS

### 4.1 PRIMEIRO EXPERIMENTO – CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO FOSFOGESSO PELO SISTEMA DE PAREDE PLANA

Para as amostra das areias fina e grossa, obteve-se um valor aproximado do  $k$ , ou seja, para a areia fina  $k= 0,3706 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$  e para a areia grossa  $k=0,3216 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ , o que justifica cientificamente esta variação de valores de  $k$  uma vez que a areia grossa possui mais interstícios vazios entre os grãos, sendo estes ocupados pelo ar, e sabe-se cientificamente que o ar é um bom isolante térmico  $k=0,02 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ .

Quanto às amostras de fosfogesso, obteve-se um valor diferenciado do  $k$  em cada ensaio, ou seja, para o primeiro ensaio obteve-se como resposta um valor de  $k= 0,07934 \text{ W/m. }^\circ\text{C}$  e para o segundo ensaio  $k=0,15638 \text{ W/m. }^\circ\text{C}$ . Tal divergência se deve aos seguintes fatores:

- o primeiro ensaio foi processado a uma temperatura muito baixa, portanto baixa potência elétrica transformando em baixo fluxo de calor e, conseqüentemente, houve dispersão do fluxo de calor, contrariando a unidirecionalidade exigida pela Equação de Fourier.
- o segundo ensaio foi processado a uma temperatura mais elevada,  $T=252 \text{ }^\circ\text{C}$ , gerando um fluxo de calor mais consistente e garantindo assim a unidirecionalidade da Equação de Fourier, porém, foi constatado no final do ensaio que o fosfogesso mudou de coloração na região próximo à resistência elétrica passando para cor rosada, pois ocorreu um processo de desidratação devido à mudança de fase transformando o fosfogesso para hemi-hidratado.
- no primeiro ensaio, o experimento foi desenvolvido com uma corrente elétrica muito baixa  $I=0,03 \text{ A}$ , sendo medida com um instrumento amperímetro tipo alicate de baixa precisão no início de escala. No segundo ensaio, a corrente elétrica foi três vezes maior  $I=0,10 \text{ A}$ , também medido com o mesmo amperímetro, porém, em uma região de fundo de escala estável.

Portanto, considera-se o valor de  $k=0,15638 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$  para condutividade térmica do fosfogesso medida no sistema de transmissão de calor em parede plana.

#### 4.2 SEGUNDO EXPERIMENTO – CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO FOSFOGESSO PELO SISTEMA RADIAL CILÍNDRICO.

O resultado apresentado para condutividade térmica do fosfogesso  $k=0,2899 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$  foi satisfatório uma vez que obedeceu todas condições da primeira equação de Fourier em relação:

- regime permanente, os dados utilizados no ensaio foram a partir da estabilização da temperatura  $T= 122 \text{ }^\circ\text{C}$ .

- unidimensional, o fluxo de calor foi considerado radial e perpendicular às superfícies cilíndricas uma vez que o gráfico plotado em função dos dados obtidos no ensaio deu origem a uma reta –  $y = 0,0105x + 0,013$  – com grau de confiabilidade de  $R^2 = 0,9916$ .

- neste ensaio foram utilizados equipamentos com maior recurso técnico, como Variac – variador de tensão e instrumento de medição miliamperímetro com escala reduzida corrente de 0 a 0,5 amperes.

- o ensaio foi realizado dentro de uma faixa de temperatura que preservou a integridade das características físicas do fosfogesso, ou seja, a temperatura do processo não ultrapassou  $122 \text{ }^\circ\text{C}$ , uma vez que o fosfogesso di-hidratado inicia-se o processo de desidratação a partir dos  $160 \text{ }^\circ\text{C}$ .

- a resistência elétrica tipo cartucho foi fabricada por laboratório especializado conforme especialização técnica.

#### 4.3 COMPARAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO FOSFOGESSO NO PRIMEIRO E SEGUNDO EXPERIMENTO

O Quadro 8 apresenta um resumo da condutividade térmica obtida nos ensaios com o dispositivo da parede plana e sistema radial.

Quadro 8 – Resumo da condutividade térmica do fosfogesso na parede plana e no sistema radial cilíndrico

Descrição	Temperatura de estabilização °C	Condutividade térmica W/m°C
Sistema parede plana	264	0,1563
Sistema cilíndrico	122	0,2899

Na Figura 33, o gráfico mostra a comparação dos valores da condutividade térmica  $k$  no sistema parede plana e cilíndrico.

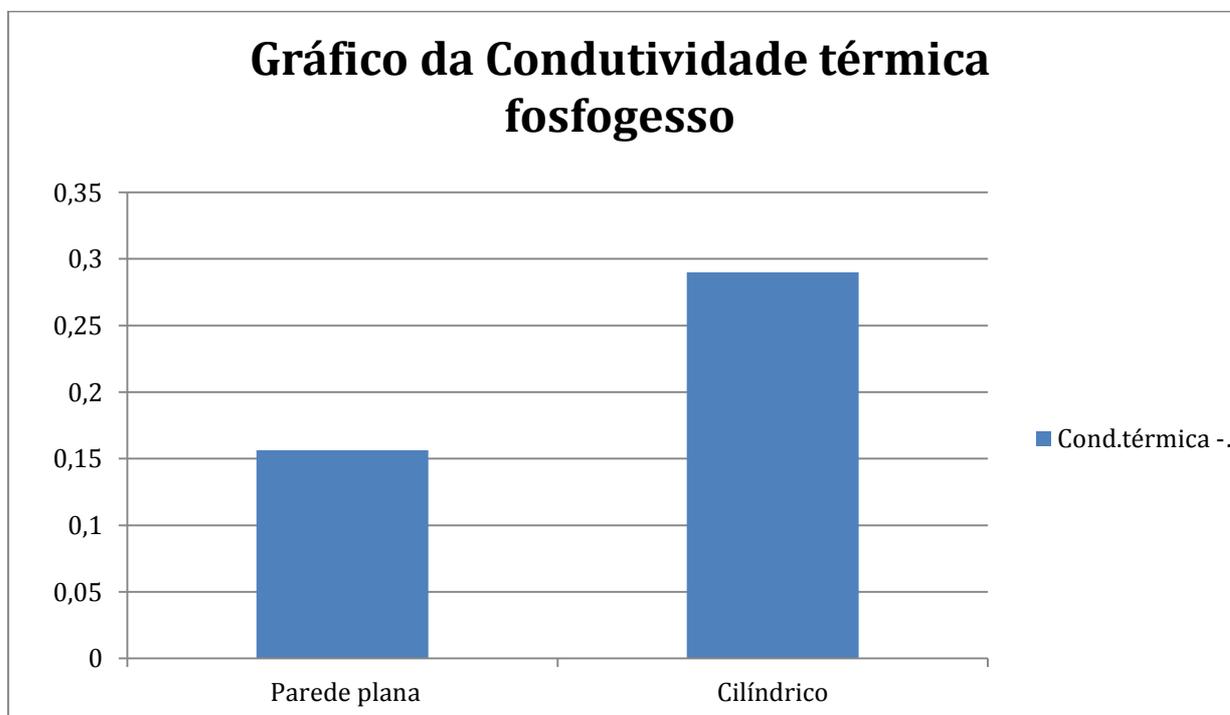


Figura 33 – Condutividade do fosfogesso para sistema parede plana e cilíndrico

Pelo quadro 8 pode-se notar que a condutividade térmica no sistema parede plana estabilizou a uma temperatura  $T = 264$  °C, acima dos 160 °C permitido; tendo com isto uma mudança na estrutura molecular do fosfogesso passando de di-hidratado para hemi-hidratado. Esta transformação não ocorreu no ensaio com o dispositivo do sistema cilíndrico uma vez que a temperatura de estabilização ficou em  $T = 122$  °C mantendo-se assim a estrutura molecular do fosfogesso di-hidratado.

Na linearização da retas pode observar pelas equações que o grau de confiabilidade no sistema parede plana foi  $R^2 = 86295$  é menor comparado com o sistema cilíndrico  $R^2 = 9916$  .

A condutividade térmica do fosfogesso obtida no sistema radial cilíndrico foi mais confiável se comparada com o sistema parede plana.

Portanto, para esse experimento, considera-se a condutividade térmica do fosfogesso di-hidratado:  $k = 0,2899 \text{ w/m. } ^\circ\text{C}$ .

#### 4.4 COMPARAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO FOSFOGESSO $k = 0,2899 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$ , COM OUTROS MATERIAIS ISOLANTES TÉRMICOS

A tabela 12 apresenta valores de condutividade térmica de alguns materiais isolantes obtidos das seguintes fontes: Incropera (2008 p.594 a 599), Çengel (2009 p.875 a 880;), Perry (1999), norma DIN 4108, Protela (2012), LABEEE (2012), Construiriam (2012).

Tabela 12 – Condutividade Térmica de Materiais: construção civil, refratário, isolante térmico e outros materiais

Material	Temperatura de serviço ( K)	Massa específica $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Condutividade térmica – W/m.°C
<b>Material de Construção</b>			
Areia	300	1.515	0,27
Argamassa de cimento	300	2.200	1,39
Asfalto	300	2.000	0,06
Alvenaria bloco concreto furado	300	1.000	0,50
Alvenaria com tijolo maciço	300	1.800	0,79
Borracha vulcanizada dura	300	1.190	0,15
Concreto ( com brita 2)	300	2.300	1,51
Cal virgem	300	1.600	0,7
Cimento a granel	300	1.500	1,5
Gesso hidratado	300	2.300	0,46
Madeira seca	300	500	0,14 - 0,21

(cont.)

Papel	300	1.400 - 1.600	0,18
Tijolo refratário sílica-aluminoso	1 478	2.500	1,9
<b>Material Isolante térmico</b>			
Argila expandida	300	100-200	0,05
Cortiça em formato de placa	300	120- 300	0,04
Espuma de poliuretano (PUR)	300	30-150	0,03
Espuma de poliestireno expandido	300	10-40	0,03
Fibra de madeira	300	200-300	0,04
Lã de vidro ou lã mineral	300	30-200	0,04
Lãs	300	400	0,07
PVC espuma	300	20 - 50	0,03
Silicato de cálcio ou magnésio	300	100 - 200	0,05
<b>Outros materiais</b>			
Aço – ASTM - 1025	300	7.800	51,9
Aço Inoxidável ASTM 306	300	7.850	15,9
Ar	300	1,2	0,02
Água	300	1.000	0,58
Carvão antracite	300	1 350	0,26
Couro solado	300	998	0,16
Ferro	300	7.800	80
Gelo	273	900	2,20
Parafina	300	900	0,24
Solo seco	300	1.600	0,30
Teflon (politetrafluoroetileno)	300	2 200	0,35
Vidro comum	300	2.400 a 2.600	0,75

A Figura 34 apresenta a comparação da condutividade térmica do fosfogesso com materiais da família de isolamento térmico, podendo-se observar que ele não pertence a esta família devido à grande diferença existente entre as condutividades térmicas.

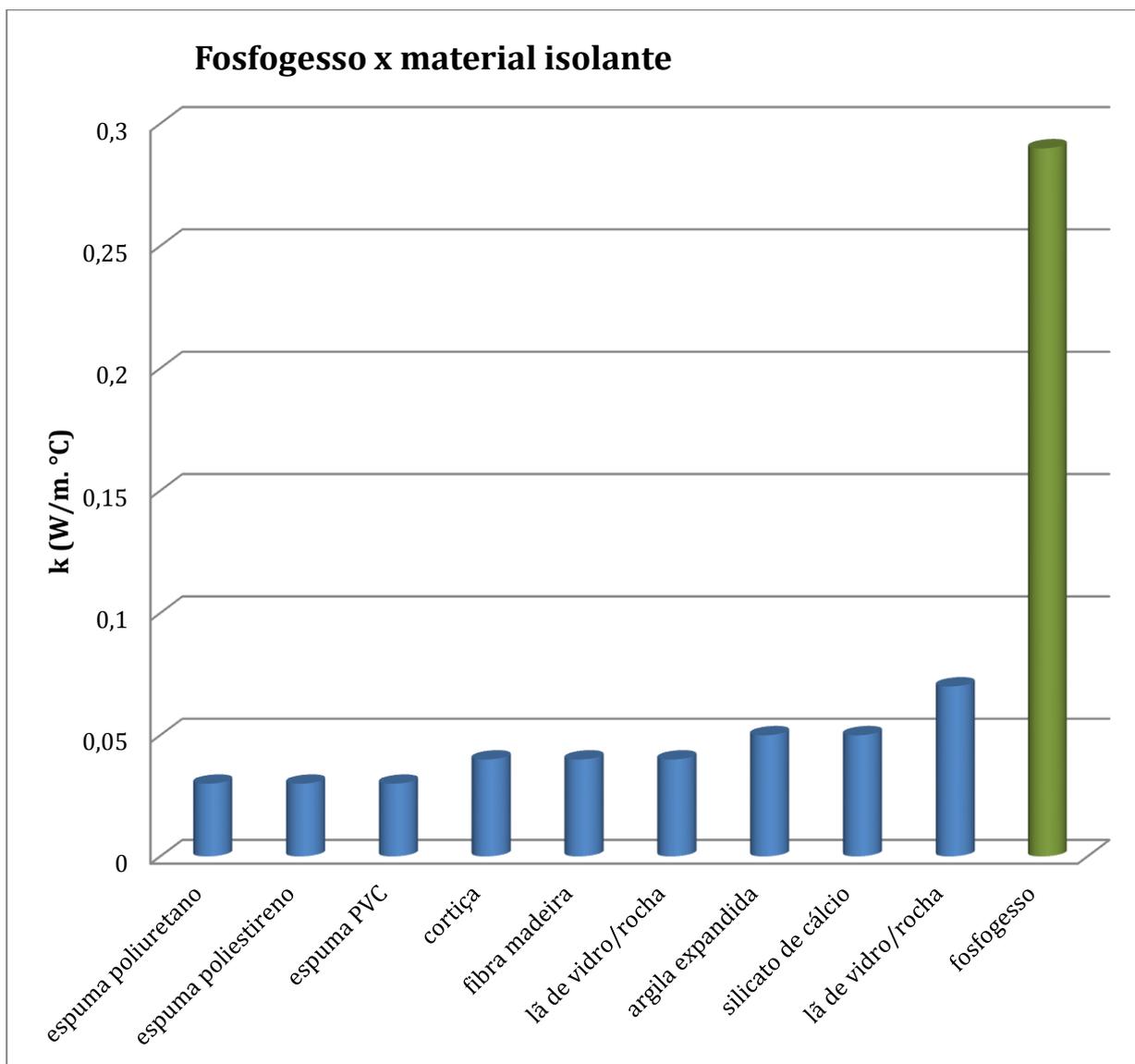
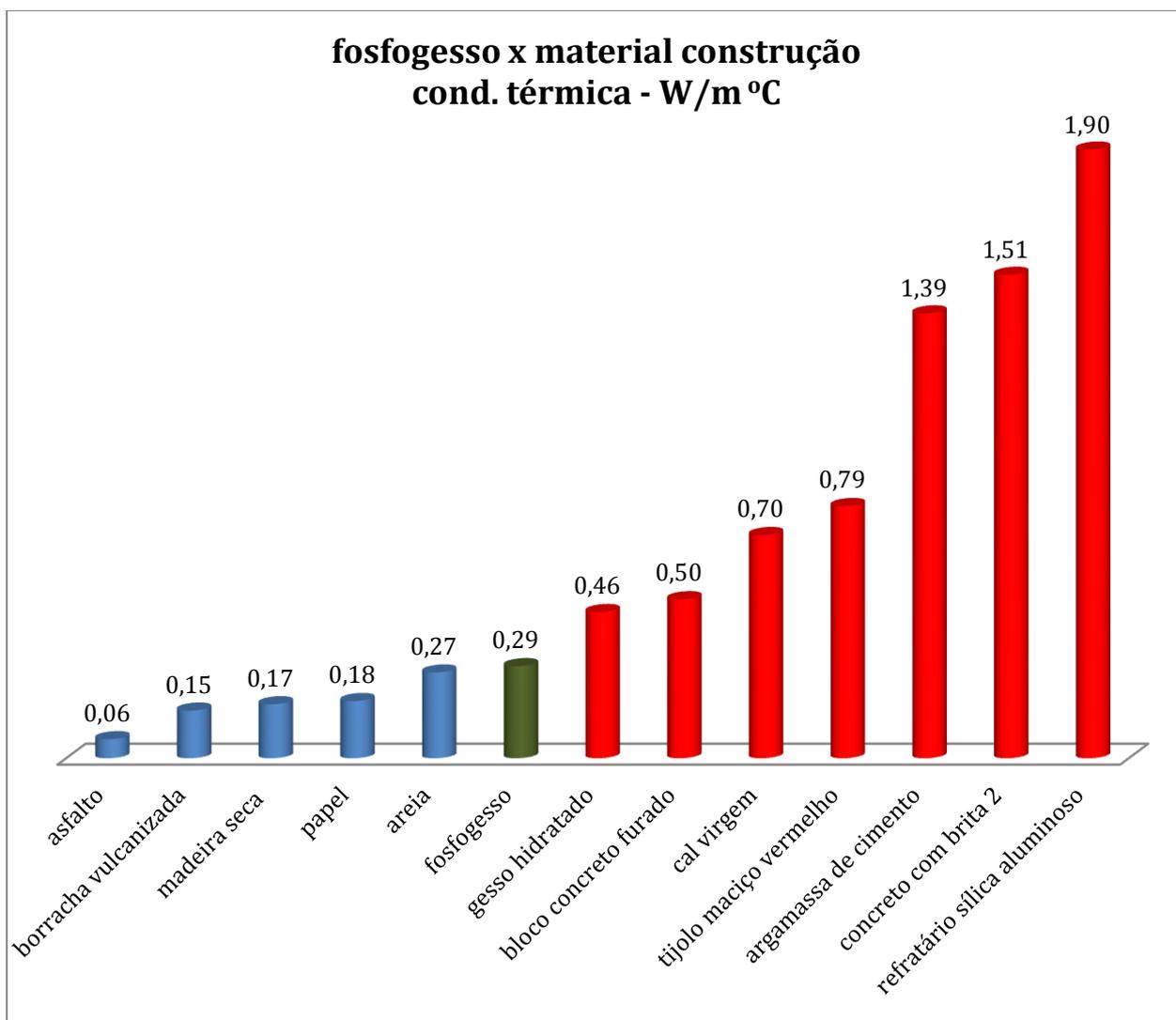


Figura 34 – Gráfico comparativo entre a condutividade térmica do fosfogesso x material isolante

A Figura 35 mostra a comparação da condutividade térmica do fosfogesso em relação a materiais de construção civil. Nesta família, pode-se observar que a condutividade térmica do fosfogesso se aproxima dos seguintes materiais: borracha vulcanizada, madeira seca, papel, areia, gesso, bloco de concreto furado, cal virgem e tijolo maciço.

O fosfogesso apresenta uma condutividade térmica inferior ao gesso, portanto, é um material de melhor característica técnica como isolante térmico.



**Figura 35 – Gráfico comparativo da condutividade térmica do fosfogesso com materiais de construção civil**

A Figura 36 mostra o gráfico comparativo da condutividade térmica do fosfogesso com outros materiais utilizados na indústria. Neste gráfico pode-se observar que o fosfogesso se aproxima à condutividade térmica dos seguintes materiais:- couro, parafina, carvão antracite, solo seco, teflon.

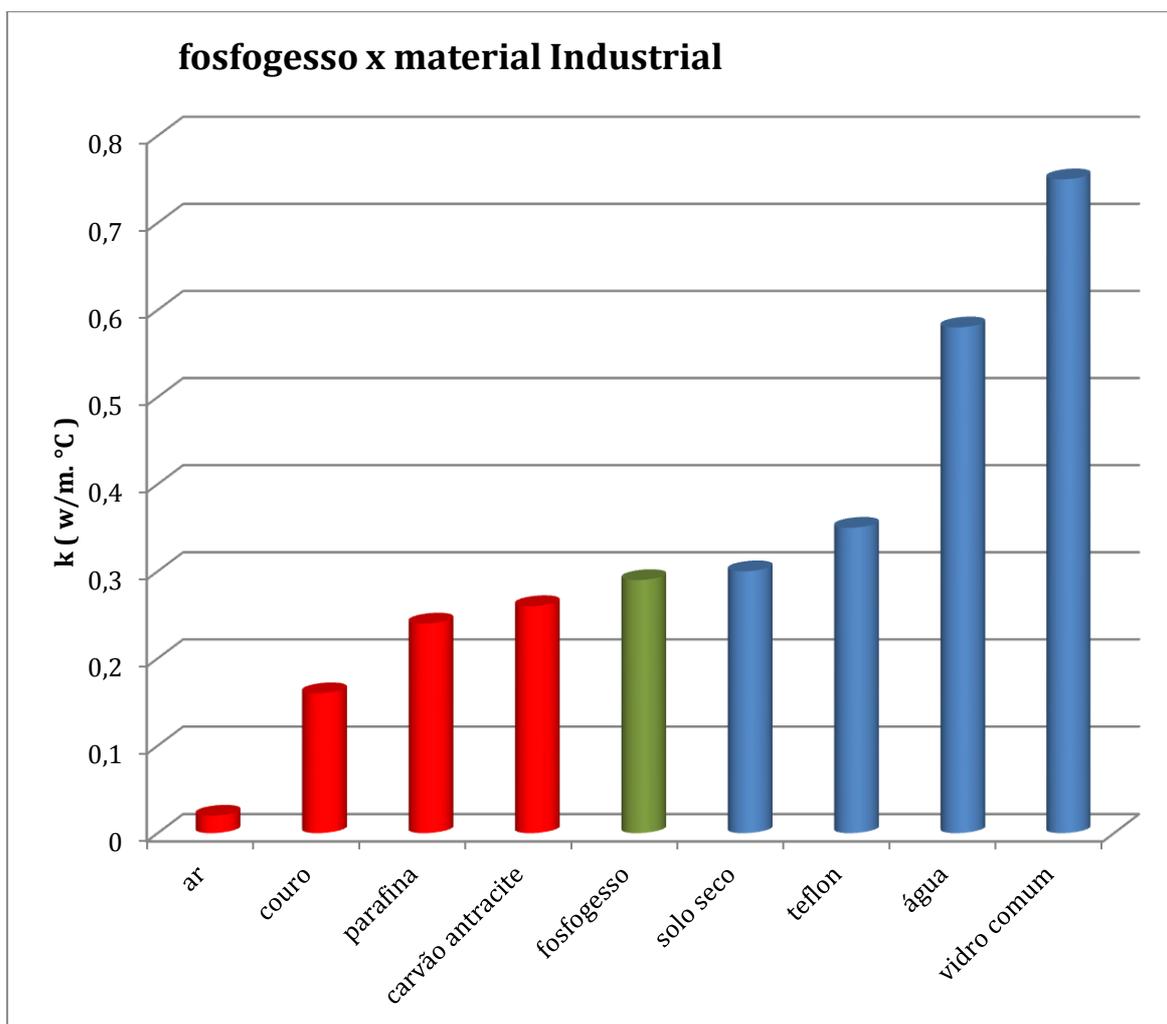


Figura 36 – Gráfico comparativo da condutividade térmica do fosfogesso com material industrial

## 5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Em conformidade com o objetivo de analisar a viabilidade técnica da utilização do fosfogesso di-hidratado como material isolante térmico para utilização residencial e industrial, e de acordo com o desenvolvimento do experimento, ficou determinado que, para o material amostrado, o coeficiente de condutividade térmica encontrado pelo sistema radial cilíndrico foi  $k = 0,2899 \text{ w/m. } ^\circ\text{C}$ .

Conforme ilustrado na Tabela 12, na qual se apresentam diversos materiais isolantes térmicos, pode-se concluir que a condutividade térmica do fosfogesso equivale ao grupo de materiais com  $k$  variando  $0,15 < k < 0,30 \text{ w/m.}^\circ\text{C}$ , portanto, não pertence ao grupo de materiais isolantes térmicos considerados com coeficiente de condutividade térmica abaixo de  $k \leq 0,05 \text{ w/m. } ^\circ\text{C}$ .

Para determinação da condutividade, dois métodos experimentais foram testados: o da parede plana e o do radial cilíndrico. No sistema parede plana, os dados obtidos nos ensaios foram limitados às condições técnicas dos equipamentos onde a resistência elétrica foi adquirida no comércio local, e o potenciômetro não estava dimensionado para fornecer corrente elétrica confiável  $< 0,3\text{A}$ , impossibilitando a limitação na geração de calor.

Também, o fosfogesso é um material de granulometria muito fina (pó) pertencente à família de materiais Silte (CURADO, 2011) onde o dispositivo de parede plana, confeccionado para este experimento, compromete a unidimensionalidade do fluxo de calor conforme mostrado no gráfico da Figura 16, resultando assim em um valor divergente da condutividade térmica obtida pelo sistema cilíndrico.

Quanto ao dispositivo do sistema cilíndrico, este foi fabricado no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília por equipe técnica especializada. Os equipamentos auxiliares foram adquiridos externamente de laboratórios especializados e aferidos conforme recomendação normativa. Foram substituídos por equipamentos de precisão para medição da tensão e corrente, e adquirido um transformador variador de tensão de precisão (Variac).

Embora constatado neste experimento que o fosfogesso não pertence à família de materiais de isolantes térmicos conhecidos comercialmente, é necessário que se proceda à continuidade de outras pesquisas, onde o fosfogesso possa ser misturado com outros tipos de materiais isolantes, ou testado experimentalmente

em substituição às placas de gesso, usualmente utilizadas na construção civil como material isolante térmico de laje armada, ou em parede de alvenaria substituindo a massa corrida, ou ainda como parede *dry wall*.

Portanto, sugere-se que, para os próximos trabalhos, sejam adquiridos equipamentos fabricados em laboratórios especializados para que os dados obtidos durante os ensaios possam ser mais confiáveis.

Sugere-se, também, que sejam feitas pesquisas com o dispositivo parede plana, utilizando como amostra materiais de maior granulometria como grãos de soja, milho, feijão e outros similares, observando-se a difusividade do fluxo de calor.

Enfim, este trabalho serviu para aguçar uma linha de pesquisa da utilização do fosfogesso na construção civil e na indústria, considerando sua capacidade térmica.

## REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004. **Resíduos Sólidos. Classificação**, p. 01-71. 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 10005. **Lixiviação de Resíduos. Procedimento**, p. 01-16. 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 10007. **Amostragem de Resíduos. Procedimento**, p. 01-21. 2004

\_\_\_\_\_. NBR 12127, **Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas do pó - Método de ensaio**.

ALVEIRINHO DIAS, J.M. **A história da evolução do litoral português nos últimos vinte milénios**. In: Evolução Geohistórica do Litoral Português e Fenómenos Correlativos: Geologia, História, Arqueologia e Climatologia. Lisboa, Portugal, 2004.

AQUINO, P.E. A produção de ácido fosfórico e a geração de fosfogesso. In: **Desafios Tecnológicos para o reaproveitamento do fosfogesso**. Anais eletrônicos... Belo Horizonte, UFMG, 2005. Disponível em:< <http://www.fosfogesso.eng.ufmg.br>>. Acessado em 6 de março de 2012.

BEZERRA, C.R. **Modelagem geoquímica do <sup>226</sup>Ra nas pilhas de fosfogesso**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro (RJ), 2001.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010-2030) de geologia, mineração e Transformação mineral**. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM. Relatório técnico 53, perfil do Fosfato. Yara Kulaif. Agosto de 2009. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano\\_duo\\_decenal/a\\_mineracao\\_brasileira/P29\\_RT53\\_Perfil\\_do\\_Fosfato.pdf](http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/a_mineracao_brasileira/P29_RT53_Perfil_do_Fosfato.pdf)>. Acessado em 8 de março de 2012.

CANUT, M. M. C. **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção**. Dissertação de Mestrado em Construção Civil – Programa de pós-graduação em Construção Civil. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais / UFMG. Belo Horizonte, 2010.

CAJAZEIRAS, A. P.; CASTILHOS JR, A.B. **Reutilização do fosfogesso na construção civil: aspectos ambientais**. XXVI CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL. Fortaleza (CE), 2010.

ÇENGEL, Y.A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. Revisão técnica de K. R. Ismail. São Paulo: McGraw-Hill, 2009.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. **Resoluções e demais orientações ambientais**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/Conama>>. Acessado em 7 de março de 2012.

CONSTRUCLIMA - **Projeto em Engenharia e Construção** – Disponível em: <<http://www.construclima.com.br/pdf/02.pdf>>. Acessado em agosto de 2012.

CURADO, T. S.; RESENDE, L.R. Ensaio Laboratoriais com fosfogesso para fins de pavimentação. Artigo Científico da Universidade Federal de Goiás – Escola de Engenharia Civil, Goiânia (GO), 2011.

DAMASCENO, E.C.; LIMA, J.R.B. **Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração**: o fosfogesso gerado pela solubilização de concentrados fosfático. III Congresso Ítalo Brasileiro di ingegneria mineraria Eolizioni Pei Srl – viale Verona, 26-27 settembre 1994.

DIN. Deutsches Institut für Norming DIN-4108. **Thermal Insulation and energy economy in buildings**

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. Calcário Agrícola. In: **Economia Mineral do Brasil**. Brasília: DNPM/Cidade Gráfica e Editora Ltda. 2009a. 536-545 p.

\_\_\_\_\_. Fosfato. In: **Economia Mineral do Brasil**. Brasília: DNPM/Cidade Gráfica e Editora Ltda. 2009b. 546-568 p.

FERNANDES, F.R.C.; LUZ, A. B.; CASTILHOS, Z.C. **AGROMINERAIS PARA O BRASIL**. Livro Ed.1. Centro de Tecnologia Mineral, 2010.

GARANGANI, C. **Utilização de Fosfogesso em base e sub-base e em aterros em geral**. Seminário Interno Sobre Fosfogesso, Fosfertil, Uberaba, 2005.

INCROPERA, F.P. ; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Livro. Ed 5. Rio de Janeiro: Técnicos e Científicos Editora S.A. 2008.

KERN, D.Q. **Processo de Transmissão de Calor**. Livro . Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1987.

KREITH, F., BOHN M.S. **Principles of Heat Transfer**. Livro. USA: Ed 6. Brooks/cole, 2001.

LABEEE – **Laboratório de Eficiência Energética em Edificações** - UFSC. Disponível em: <<http://www.labcon.ufsc.br/anexos/243.pdf>>. Acessado em 8 de novembro de 2012.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E., MONTE, M. B. M., NASCIMENTO, M. **Agrominerais – fosfato. In: Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações.** 2.ed. 2008. Disponível em <<http://www.cetem.gov.br/agrominerais/livros/07agrominerais-fosfato.pdf>>. Acesso em junho 2012.

MSCP. **Informações técnicas em engenharia.** Disponível em:<<http://www.mspsc.eng.br/>>. Acessado em 20 de setembro 2012.

MATOS, T.H.C. **Caracterização hidro-mecânica do fosfogesso e das misturas solo-fosfogesso.** Dissertação de Mestrado em Geotecnia. 2011. Universidade de Brasília / UNB. Brasília-DF.

NOGUEIRA, F.N.; SANTOS, F.M.; URBANO, J.P. et al. **Experimento condutividade térmica.** Dissertação. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2010. Disponível em:< <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA3p8AE/experimento-condutividade-termica>>. Acessado em 10 de agosto de 2012.

OLIVEIRA, S. M. F. **Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para utilização na construção rodoviária.** Dissertação de Mestrado em Engenharia. Área de concentração: Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos / USP. São Carlos (SP), 2005.

OZAWA, K. **Functional fitting Runge-Kutta method with variable coefficients.** Japan J. Indust. Appl. Math., 18, pp. 105-128. 2001.

PARENTE, E, P. **Avaliação do comportamento mecânico das misturas do solo-cimento e fosfogesso e cimento para uso na construção rodoviária.** Dissertação (Mestrado) – São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos , Universidade de São Paulo. 138p. 2002.

PET CIVIL. **Um novo material de construção.** . UFJF, 28 maio 2011. Disponível em:<<http://blogdopetcivil.com/tag/fosfogesso>>. Acessado em 7 de março de 2012.

PERRY, R.H. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, 7ª ed. E.U.A., McGraw-Hill, 1999, 2638p.

PINTO, M.M. **Avaliação da implantação de cobertura vegetal em uma pilha de fosfogesso.** Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de pós-graduação em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos. Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/1843/FRPC-78HHER/1/272m.pdf>>. Acessado em 5 de abril de 2012a.

PINTO, T.C. de S. **Modelagem da velocidade crítica de transporte de polpas minerais contendo partículas.** Tese de Doutorado. Escola Politécnica. Engenharia Mineral, 2012b.

PROTOLAB. Laboratório de Propriedades Termofísicas. Disponível em: <http://www.protolab.com.br/Tabela-Conductividade-Material-Construcao.htm/>. Acessado em 10 novembro de 2012.

SANTOS, A.R. **Análise termoeconômica do processo de transformação química do fosfogesso em torta carbonatada ou torta hidróxido**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. 2001. Escola Federal de Engenharia de Itajubá / EFEI. Itajubá-MG.

SARTORI, A.P. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos sanduíche para isolamento térmico**. Dissertação. Universidade de Caxias do Sul. Programa de pós-graduação em materiais. Caxias do Sul, 2009. Disponível em: < [http://www.ucs.br/ucs/tpl POS Materiais/ posgraduacao/ strictosensu/materiais/ dissertacoes/ dissertacao?identificador=350](http://www.ucs.br/ucs/tpl_POS_Materiais/posgraduacao/strictosensu/materiais/dissertacoes/dissertacao?identificador=350)>. Acessado em 7 de abril de 2012.

SILVA, R.M.; GIULIETTI, M. Fosfogesso: geração, destino e desafios. Agrominerais para o Brasil. **CETEM/MCT**. Rio de Janeiro, p. 125-144, 2010.

TAKEDA, M.C. **Avaliação das propriedades mecânicas de misturas de fosfogesso e cimento para uso na construção rodoviária**. Dissertação de Mestrado – São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1988.

VITAL, A.; MARCIEL C.; BRITTO, D; et al. **Determinação da condutividade térmica do fosfogesso** – Trabalho de conclusão de curso . 2012 - Universidade Santa Cecília. Santos (SP).

TEXSA – **Tabela comparativa da condutividade térmica de diversos materiais** – Disponível em:<<http://www.texsa.com.br/Livro%2009.htm>>. Acessado em 20 de agosto de 2012.

TOMAZ, C. M. **The production of Phosphoric Acid and Phosphogypsum by Brazilian Industries**. Seminário Internacional Sobre Usos De Fosfogesso, Belo Horizonte, 2006.

## APÊNDICES

### Apêndice 1: Cálculo da densidade real da areia grossa

DATA – 21 de setembro de 2012

MATERIAL – Areia grossa

Granulometria – mesh 24/12

#### 1º Ensaio - Picnômetro de 50 ml

Item	Etapa	Quant.	Unid.
a	Peso picnômetro vazio	43,270	g
b	Peso picnômetro + água	94,440	g
c	Peso picnômetro + 50 % amostra	82,721	g
d	Peso picnômetro + água + 50% amostra	118,917	g

#### 2º Ensaio - Picnômetro de 25 ml

Item	Etapa	Quant.	Unid.
a	Peso picnômetro vazio	17,220	g
b	Peso picnômetro + água	42,972	g
c	Peso picnômetro + 50 % amostra	33,246	g
d	Peso picnômetro + água + 50% amostra	52,950	g

#### 3º Ensaio : Picnômetro de 50 ml

Item	Etapa	Quant.	Unid.
a	Peso picnômetro vazio	27,992	g
b	Peso picnômetro + água	79,862	g
c	Peso picnômetro + 50% amostra	78,105	g
d	Peso picnômetro + água + 50% amostra	110,780	g

## Memorial de cálculo

e - massa da amostra (g) –  $m_{amostra} = c - a$

f - volume do picnômetro (ml) –  $V_{pic} = b - a$

g - volume de H<sub>2</sub>O usado no ensaio (ml) –  $V_{H_2O} = d - a - e = d - c$

h – volume da areia (ml) –  $V_{areia} = f - g$

$$d = \frac{\text{massa areia}(e)}{\text{volume areia}(h)}$$

1. Utilizando-se os dados do 1º ensaio, temos:

item e – massa amostra = 39,451 g

item f – volume picnômetro = 51,170 ml

item g – volume de água = 36,196 ml

item h – volume areia = 14,974 g

$$d = \frac{39,451}{14,976} = 2,63 \text{ g/ml}$$

2. Utilizando-se os dados do 2º ensaio, temos:

item e – massa amostra = 16,026 g

item f – volume picnômetro = 25,752 ml

item g – volume de água = 19,704 ml

item h – volume areia = 6,048 g

$$d = \frac{16,026}{6,046} = 2,65 \text{ g/ml}$$

3. Utilizando-se os dados do 3º ensaio, temos:

item e – massa amostra = 50,113 g

item f – volume picnômetro = 51,870 ml

item g – volume de água = 32,675 ml

item h – volume areia = 19,195 ml

$$d = \frac{50,113}{19,195} = 2,61 \text{ g/ml}$$

4. Cálculo da média aritmética da densidade real, temos:

$$d = 2,63 \text{ g/ml} = 2,63 \text{ g/cm}^3$$

Apêndice 2: Cálculo da densidade real da areia fina

DATA – 25 de outubro de 2012

MATERIAL – Areia fina

Granulometria – mesh 42/60

---

1° Ensaio - Picnômetro de 50 ml

Item	Etapa	Quant.	Unid.
a	Peso picnômetro vazio	26,38	g
b	Peso picnômetro + água	66,84	g
c	Peso picnômetro + 50 % amostra	52,77	g
d	Peso picnômetro + água + 50% amostra	80,04	g

---

2° Ensaio - Picnômetro de 100 ml

Item	Etapa	Quant.	Unid.
a	Peso picnômetro vazio	46,88	g
b	Peso picnômetro + água	126,00	g
c	Peso picnômetro + 50 % amostra	99,79	g
d	Peso picnômetro + água + 50% amostra	157,24	g

---

3° Ensaio : Picnômetro de 50 ml

Item	Etapa	Quant.	Unid.
a	Peso picnômetro vazio	74,94	g
b	Peso picnômetro + água	186,66	g
c	Peso picnômetro + 50% amostra	152,34	g
d	Peso picnômetro + água + 50% amostra	234,67	g

## Memorial de cálculo

e - massa da amostra (g) –  $m_{\text{amostra}} = c - a$

f - volume do picnômetro (ml) –  $V_{\text{pic}} = b - a$

g - volume de H<sub>2</sub> O usado no ensaio (ml) –  $V_{\text{H}_2\text{O}} = d - a - e = d - c$

h – volume da areia (ml) –  $V_{\text{areia}} = f - g$

$$d = \frac{\text{massa areia}(e)}{\text{volume areia}(h)}$$

1. Utilizando-se os dados do 1º ensaio, temos:

item e – massa amostra = 26,39 g

item f – volume picnômetro = 40,46 ml

item g – volume de água = 27,27 ml

item h – volume areia = 13,19 ml

$$d = \frac{26,39}{13,19} = 2,00 \text{ g/ml}$$

2. Utilizando-se os dados do 2º ensaio, temos:

item e – massa amostra = 52,91 g

item f – volume picnômetro = 79,12 ml

item g – volume de água = 57,45 ml

item h – volume areia = 21,67 ml

$$d = \frac{52,91}{22,27} = 2,442 \text{ g/ml}$$

3. Utilizando-se os dados do 3º ensaio, temos:

item e – massa amostra = 77,4 g

item f – volume picnômetro = 111,72 ml

item g – volume de água = 82,33 ml

item h – volume areia = 29,39 ml

$$d = \frac{77,4}{29,39} = 2,633 \text{ g/ml}$$

4. Para o cálculo da média aritmética da densidade real foi desprezado o resultado do 1° ensaio, temos:

$$\mathbf{d = 2,54 \text{ g/ml} = 2,54 \text{ g/cm}^3}$$

## Apêndice 3: Determinação da condutividade térmica da areia grossa – dispositivo placa plana

DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA AREIA GROSSA								
DATA DA COLETA DOS DADOS - 25/07/2012 Sistema Placa Plana								
Tempo, min.	Temperatura, °C				Temperatura °C		Corrente, A	Tensão, V
Termopares	1	2	3	4	I	II		
17	81,1	35,0	26,4	22,9	69,7	72,8	0,17	59
19	88,5	38,4	28,2	23,6	77,2	80,0	0,17	59
21	95,3	41,4	30,1	24,5	83,0	86,0	0,17	59
23	101,1	44,3	32,8	25,4	88,8	92,0	0,16	59
25	107,6	47,9	34,1	26,6	95,0	98,2	0,17	59
27	113,2	51,1	36,1	27,7	100,5	103,7	0,16	59
29	118,9	54,5	38,3	29,0	106,3	109,6	0,16	57
31	124,7	58,4	40,6	30,5	112,4	115,7	0,16	57
33	128,8	61,2	42,3	31,6	116,3	119,7	0,16	57
38	139,4	69,1	47,5	35,2	127,3	130,7	0,16	56
43	148,5	76,6	52,9	39,0	137,0	140,0	0,16	56
53	163,1	88,8	62,1	44,6	151,1	155,5	0,16	57

(cont.)

Tempo, min.	Temperatura, °C				Temperatura °C		Corrente, A	Tensão, V
	1	2	3	4	I	II		
63	178,1	101,7	72,6	51,9	171,3	167,6	0,16	57
73	192,0	114,5	83,3	60,1	181,8	185,0	0,16	56
83	200,0	121,5	89,2	64,1	190,2	194,8	0,16	58
93	210,0	130,1	96,4	69,8	200,0	205,0	0,16	58
103	220,0	138,1	103,2	74,9	210,0	214,0	0,16	56
113	226,0	145,2	109,5	79,9	220,0	221,0	0,16	57
123	232,0	151,1	115,1	84,5	228,0	223,0	0,16	57
133	238,0	156,8	120,1	88,6	239,0	235,0	0,16	56
143	243,0	161,6	124,5	92,1	240,0	235,0	0,16	57
153	248,0	166,0	128,5	95,3	240,0	245,0	0,16	58
163	253,0	170,7	132,6	98,7	252,0	248,0	0,16	57
173	257,0	174,3	135,7	101,1	250,0	255,0	0,16	56
183	260,0	177,9	138,8	103,9	259,0	253,0	0,16	57
193=0	264,0	181,7	142,8	107,3	257,0	263,0	0,16	57
194	265,0	182,3	143,4	107,9	258,0	264,0	0,16	57
195	266,0	182,7	143,7	108,1	258,0	264,0	0,16	57
196	266,0	183,0	144,0	108,4	259,0	264,0	0,16	57
197	266,0	183,3	144,3	108,8	259,0	265,0	0,16	57

(cont.)

Tempo, min.	Temperatura, °C				Temperatura °C		Corrente, A	Tensão, V
	1	2	3	4	I	II		
199	267,0	183,9	144,9	109,3	260,0	266,0	0,16	57
200	267,0	184,3	145,2	109,5	260,0	266,0	0,16	57
201	268,0	184,5	145,5	109,7	261,0	266,0	0,16	57
202	268,0	184,9	145,7	109,8	261,0	267,0	0,16	57
203	268,0	185,2	146,0	110,0	261,0	267,0	0,16	57
204	269,0	185,6	146,4	110,4	262,0	267,0	0,16	57
206	269,0	186,0	146,7	110,7	262,0	268,0	0,16	57
208	270,0	186,5	147,3	111,2	263,0	269,0	0,16	57
209	270,0	186,7	147,5	111,3	263,0	269,0	0,16	57
210	270,0	186,9	147,7	111,5	263,0	269,0	0,16	57
211	271,0	187,2	147,9	111,8	264,0	270,0	0,16	57
212	271,0	187,5	148,2	111,9	264,0	270,0	0,16	57
213	271,0	187,8	148,4	112,2	264,0	270,0	0,16	57
214	272,0	188,0	148,6	112,3	265,0	270,0	0,16	57
215	272,0	188,0	148,9	112,5	265,0	270,0	0,16	57

DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA AREIA GROSSA – Temperatura estabilizada								
DATA DA COLETA DOS DADOS - 25/07/2012 Sistema Placa Plana								
Tempo, seg.	Temperatura, °C				Temperatura °C		Corrente, A	Tensão, V
Termopares	1	2	3	4	I	II		
0	264,0	181,7	142,8	107,3	257	263	0,16	57
60	265,0	182,3	143,4	107,9	258	264	0,16	57
120	266,0	182,7	143,7	108,1	258	264	0,16	57
180	266,0	183,0	144,0	108,4	259	264	0,16	57
240	266,0	183,3	144,3	108,8	259	265	0,16	57
300	267,0	183,7	144,7	109,0	260	265	0,16	57
360	267,0	183,9	144,9	109,3	260	266	0,16	57
420	267,0	184,3	145,2	109,5	260	266	0,16	57
480	268,0	184,5	145,5	109,7	261	266	0,16	57
540	268,0	184,9	145,7	109,8	261	267	0,16	57
600	268,0	185,2	146,0	110,0	261	267	0,16	57

(cont.)

Tempo, seg.	Temperatura, °C				Temperatura °C		Corrente, A	Tensão, V	
	1	2	3	4	I	II			
660	269,0	185,6	146,4	110,4	262	267	0,16	57	
780	269,0	186,0	146,7	110,7	262	268	0,16	57	
900	270,0	186,5	147,3	111,2	263	269	0,16	57	
960	270,0	186,7	147,5	111,3	263	269	0,16	57	
1020	270,0	186,9	147,7	111,5	263	269	0,16	57	
1080	271,0	187,2	147,9	111,8	264	270	0,16	57	
1140	271,0	187,5	148,2	111,9	264	270	0,16	57	
1200	271,0	187,8	148,4	112,2	264	270	0,16	57	
1260	272,0	188,0	148,6	112,3	265	270	0,16	57	
$\Delta$ °C									
T1 - T2		T2 - T3		T3 - T4		T1 - T4		T2 - T4	T1 - T3
82,3		38,9		35,5		156,7		74,4	121,2
82,7		38,9		35,5		157,1		74,4	121,6
83,3		39,0		35,6		157,9		74,6	122,3
83,0		39,0		35,6		157,6		74,6	122,0
82,7		39,0		35,5		157,2		74,5	121,7

(cont.)

T1 - T2	T2 - T3	T3 - T4	T1 - T4	T2 - T4	T1 - T3
83,3	39,0	35,7	158,0	74,7	122,3
83,1	39,0	35,6	157,7	74,6	122,1
82,7	39,1	35,7	157,5	74,8	121,8
83,5	39,0	35,8	158,3	74,8	122,5
83,1	39,2	35,9	158,2	75,1	122,3
82,8	39,2	36,0	158,0	75,2	122,0
83,4	39,2	36,0	158,6	75,2	122,6
83,0	39,3	36,0	158,3	75,3	122,3
83,5	39,2	36,1	158,8	75,3	122,7
83,3	39,2	36,2	158,7	75,4	122,5
83,1	39,2	36,2	158,5	75,4	122,3
83,8	39,3	36,1	159,2	75,4	123,1
83,5	39,3	36,3	159,1	75,6	122,8
83,2	39,4	36,2	158,8	75,6	122,6
84,0	39,4	36,3	159,7	75,7	123,4

Para os cálculo das médias foi considerado o intervalo de temperatura de 264 °C a 272 °C

Cálculo das médias														
	T1	T2	T3	T4	T I	T II	A	V	T1-T2	T2-T3	T3 -T4	T1-T4	T2-T4	T1 – T3
Média	268,0	184,9	145,9	109,9	261	266,5	0,16	57	83,2	39,0	36,0	158,1	75,0	122,2
des. pad.	2,34	2,00	1,58	1,58	2,40	2,36			0,44	0,15	0,30	0,80	0,43	0,53

Valores dimensionais do experimento						
A, m <sup>2</sup>	$\Delta L$ , m (1-4)	$\Delta L$ , m (1-2)	$\Delta L$ , m (1-3)	$\Delta L$ , m (2-3)	$\Delta L$ , m (3-4)	$\Delta L$ , m (2-4)
0,0035742	0,03755	0,01715	0,02750	0,01040	0,01100	0,02140

Determinação do K, W/m °C					
q, W	A,m <sup>2</sup>	$\Delta T$ , °C	$\Delta L$ , m	k (1-4), W/m. °C	
4,56	0,003574	158,1	0,03755	0,303014955	
				k (1-2), W/m. °C	
4,56	0,003574	83,2	0,01715	0,263140601	

(cont.)

q, W	A, m <sup>2</sup>	$\Delta T$ , °C	$\Delta L$ , m	k (1-3), W/m. °C	
4,56	0,003574	122,2	0,0275	0,287226969	
				k (2-3), W/m. °C	
4,56	0,003574	39,0	0,0104	0,340215992	
				k (2-4), W/m. °C	
4,56	0,003574	75,0	0,02140	0,364273961	
				Média K	0,32162 W/m. °C
				Desvio Padrão	0,04855

## Apêndice 4: Determinação da condutividade térmica da areia fina – mesh 60/42 – placa plana

DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA AREIA FINA								
DATA DA COLETA DOS DADOS - 29/08/2012 Sistema Placa Plana								
Tempo, min	Temperatura, °C				Temperatura °C		Corrente, A	Tensão, V
Termopares	1	2	3	4	I	II		
170	107.8	67.6	53.7	43.4	115.2	51.2	0.165	30.5
180	110.8	69.8	55.5	44.8	118.2	52.3	0.165	30.7
190	113.8	72.2	57.4	6.3	21.3	54.5	0.170	30.9
200	116.8	74.9	59.3	47.8	124.6	56.3	0.17	31.7
210	119.1	76.6	61.1	49.8	127	57.9	0.165	30.0
220	121.0	78.6	62.8	50.5	128.8	59.6	0.165	30.4
230	124.0	80.9	64.9	52.4	132.8	61.1	0.165	29.7
240	124.3	81.1	65.1	52.4	134.0	62.3	0.165	31.0
250	123.6	80.7	64.6	51.2	135.5	63.0	0.165	31.0
260	123.1	80.0	63.7	50.0	137.6	63.3	0.165	30.3
270	121.1	78.6	62.0	48.2	137.8	65.1	0.165	29.9
280	117.0	75.8	59.5	46.2	137.0	67.8	0.165	29.7
290	115.6	74.8	58.8	45.7	136.5	68.7	0.165	29.9

(cont.)

300	117.5	75.7	54.7	46.8	136.6	68.7	0.160	29.2
310	119.0	76.6	60.7	47.6	137.0	68.0	0.175	32.5
320	121.2	78.0	62.9	48.7	138.6	68.0	0.165	29.8
330	122.5	79.2	62.9	49.5	138.6	68.3	0.165	30.3
340	123.4	79.7	63.2	49.5	140.5	68.4	0.165	29.7
350	124.0	80.2	63.5	49.7	141.1	68.8	0.165	30.4
360	125.4	81.4	64.6	50.6	142.0	69.3	0.165	30.4
370	126.1	82.6	65.7	51.5	142.5	69.2	0.165	30.4
380	127.0	83.5	66.5	52.2	142.8	69.3	0.170	30.4
390	128.4	84.7	67.7	53.7	143.3	69.4	0.165	30.1
400	128.8	85.3	68.3	53.7	143.2	68.9	0.155	28.4
410	129.4	86.0	68.9	54.3	143.4	62.9	0.165	30.0
420	130.2	86.8	69.6	54.9	144.2	69.2	0.170	31.0
430	131.3	87.7	70.5	55.7	144.9	69.2	0.165	30.8
440	132.3	88.7	71.5	56.4	145.6	69.2	0.165	31.7
450	133.1	89.4	72.1	56.9	146.1	69.4	0.165	30.4
460	133.4	90.0	72.6	57.3	146.1	69.4	0.165	30.5
470	133.5	90.3	72.8	57.5	146.4	69.4	0.165	29.6
480	133.6	90.5	73.0	57.7	146.4	69.6	0.165	30.5

(cont.)

Tempo, min	Temperatura, °C				Temperatura °C		Corrente, A	Tensão, V
	1	2	3	4	I	II		

490	133.9	90.8	73.4	58.0	147.0	70.0	0.165	30.2
500	134.5	91.3	71.8	58.3	147.4	70.02	0.165	30.4
510	134.5	91.5	73.9	58.4	147.3	70.3	0.165	30.0
520	134.2	91.6	74.1	58.6	147.0	70.8	0.165	29.8
530	134.1	91.7	74.2	58.6	147.0	70.6	0.160	29.3
540	133.7	91.7	74.4	58.7	147.0	70.7	0.165	31.4
550	134.0	91.7	74.3	58.6	147.2	70.6	0.165	30.2
560	134.0	91.7	74.2	58.6	147.1	70.5	0.165	30.8

$\Delta$ °C					
T1 - T2	T2 - T3	T3 - T4	T1 - T4	T2 - T4	T1 - T3
40,2	13,9	10,7	64,8	24,6	54,1
41,0	14,3	10,7	66,0	25,0	55,3
41,6	14,8	11,1	67,5	25,9	56,4
41,9	15,6	11,5	69,0	27,1	57,5
42,5	15,5	11,3	69,3	26,8	58,0
42,4	15,8	12,3	70,5	28,1	58,2

(cont.)

T1 - T2	T2 - T3	T3 - T4	T1 - T4	T2 - T4	T1 - T3
43,1	16,0	12,5	71,6	28,5	59,1
43,2	16,0	12,7	71,9	28,7	59,2
42,9	16,1	13,4	72,4	29,5	59,0
43,1	16,3	13,7	73,1	30,0	59,4
42,5	16,6	13,8	72,9	30,4	59,1
41,2	16,3	13,3	70,8	29,6	57,5
40,8	16,0	13,1	69,9	29,1	56,8
41,8	16,2	12,7	70,7	28,9	58,0
42,4	15,9	13,1	71,4	29,0	58,3
43,2	15,1	14,2	72,5	29,3	58,3
43,3	16,3	13,4	73,0	29,7	59,6
43,7	16,5	13,7	73,9	30,2	60,2
43,8	16,7	13,8	74,3	30,5	60,5
44,0	16,8	14,0	74,8	30,8	60,8
43,5	16,9	14,2	74,6	31,1	60,4
43,5	17,0	14,3	74,8	31,3	60,5
43,7	17,0	14,0	74,7	31,0	60,7
43,5	17,0	14,6	75,1	31,6	60,5
43,4	17,1	14,6	75,1	31,7	60,5

(cont.)

T1 - T2	T2 - T3	T3 - T4	T1 - T4	T2 - T4	T1 - T3
43,4	17,2	14,7	75,3	31,9	60,6
43,6	17,2	14,8	75,6	32,0	60,8
43,6	17,2	15,1	75,9	32,3	60,8
43,7	17,3	15,2	76,2	32,5	61,0
43,4	17,4	15,3	76,1	32,7	60,8
43,2	17,5	15,3	76,0	32,8	60,7
43,1	17,5	15,3	75,9	32,8	60,6
43,1	17,4	15,4	75,9	32,8	60,5
43,2	19,5	13,5	76,2	33,0	62,7
43,0	17,6	15,5	76,1	33,1	60,6
42,6	17,5	15,5	75,6	33,0	60,1
42,4	17,5	15,6	75,5	33,1	59,9
42,0	17,3	15,7	75,0	33,0	59,3
42,3	17,4	15,7	75,4	33,1	59,7
42,3	17,5	15,6	75,4	33,1	59,8

Valores dimensionais do experimento						
A, m <sup>2</sup>	$\Delta L$ , m (1-4)	$\Delta L$ , m (1-2)	$\Delta L$ , m (1-3)	$\Delta L$ , m (2-3)	$\Delta L$ , m (3-4)	$\Delta L$ , m (2-4)
0,003574	0,0382	0,01885	0,02845	0,01085	0,01090	0,02170

Para os cálculo das médias foi considerado o intervalo de temperatura de 400 a 560 min.

Cálculo das médias														
	T1	T2	T3	T4	T I	T II	A	V	T1-T2	T2-T3	T3 -T4	T1-T4	T2-T4	T1-T3
Média	132,9	89,8	72,3	57,2	146,07	69,47	0,16	30,29	43,0	17,5	15,1	75,7	32,6	60,5
des. Padrão	1,81	2,15	1,63	4,63	1,36	1,81	0,01	1,70	0,85	0,35	0,71	0,21	1,06	0,73

Determinação do k, W/m. °C					
q, W	A, m <sup>2</sup>	$\Delta T$ , C	$\Delta L$ , m	k (1-4), W/m. °C	
2,49	0,003574	75,7	0,0382	0,351784475	
				k (1-2), W/m. °C	
2,49	0,0035742	83,2	0,01885	0,1579543	
				k (1-3), W/m. °C	
2,49	0,0035742	60,5	0,02845	0,327521925	
				k (2-3), W/m. °C	
2,49	0,0035742	17,5	0,01085	0,432571956	
				k (2-4), W/m. °C	
2,49	0,0035742	32,6	0,02170	0,463542392	
				k (3-4), W/m. °C	
2,49	0,0035742	15,1	0,01090	0,501590415	
				Média K	0,37249 W/m. °C
				Desvio Padrão	0,12413

## Apêndice 5: Determinação da condutividade térmica do fosfogesso – placa plana

DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO FOSFOGESSO								
DATA DA COLETA DOS DADOS - 23/08/2012 Sistema Placa Plana								
Tempo, min	Temperatura, °C				Temperatura °C		Corrente, A	Tensão, V
Termopares	1	2	3	4	I	II		
0	50,0	31,4	27,8	25,9	54,4	25	0,12	45,0
10	71,1	43,7	40,0	28,2	78,0	26,8	0,12	45,3
20	90,1	52,5	42,1	33,0	97,1	31,1	0,12	44,8
30	104,0	59,1	48,1	38,0	112,8	38,5	0,12	45,5
40	114,1	65,2	52,2	42,0	124,7	43,5	0,12	45,5
50	122,4	71,7	55,4	45,2	135,3	46,9	0,12	45,5
60	130,6	77,5	58,3	47,6	145,4	49,5	0,12	44,8
70	140	82,3	61,6	49,2	154,5	51,1	0,12	44,0
80	140,7	86,7	64,9	50,6	163,2	51,8	0,12	45,0
90	156,9	91,0	68,2	52,1	171,6	54,6	0,12	44,6
100	163,9	94,6	71,2	53,9	179,4	56,3	0,12	45,3
110	171,4	98,4	74,3	55,1	187,1	58,3	0,12	45,2
120	178,5	101,9	77,2	57,6	194,5	60,1	0,12	46,0
130	185,5	105,5	80,2	59,8	202,0	62,2	0,12	44,6

(cont.)

Tempo, min	Temperatura, °C				Temperatura °C		Corrente, A	Tensão, V
	1	2	3	4	I	II		
140	190,2	108,3	82,7	61,6	209,0	63,8	0,12	44,8
150	195,7	111,6	85,6	63,8	215,0	63,3	0,11	45,0
160	200,0	114,4	88,0	65,5	220,0	68,3	0,11	45,4
170	205,0	117,2	90,0	66,8	226,0	70,1	0,11	45,0
180	210,0	119,5	91,9	68,0	232,0	71,6	0,11	45,3
190	214,0	123,0	93,8	69,2	237,0	73,3	0,11	45,6
200	216,0	125,7	95,1	70,7	241,0	74,4	0,11	45,9
360	251,0	163,5	118,6	85,1	283,0	89,7	0,11	45,0
370	252,0	164,6	119,8	85,8	284,0	90,7	0,10	45,0
380	252,0	165,3	120,5	86,1	284,0	91,1	0,10	45,0
390	252,0	165,8	121,2	86,3	284,0	91,5	0,10	45,4
400	252,0	166,4	121,9	86,5	284,0	92,0	0,10	44,8
410	252,0	166,7	122,3	86,5	285,0	92,2	0,10	45,0
420	252,0	167,2	122,9	86,7	285,0	92,7	0,10	45,0
430	252,0	167,5	123,3	86,7	285,0	92,7	0,11	45,5
440	253,0	168,7	123,9	86,9	286,0	93,1	0,11	45,3

$\Delta^{\circ}\text{C}$					
T1 - T2	T2 - T3	T3 - T4	T1 - T4	T2 - T4	T1 - T3
18,6	3,6	1,9	24,1	5,5	22,2
27,4	3,7	11,8	42,9	15,5	31,1
37,6	10,4	9,1	57,1	19,5	48,0
44,9	11,0	10,1	66,0	21,1	55,9
48,9	13,0	10,2	72,1	23,2	61,9
50,7	16,3	10,2	77,2	26,5	67,0
53,1	19,2	10,7	83,0	29,9	72,3
57,7	20,7	12,4	90,8	33,1	78,4
54,0	21,8	14,3	90,1	36,1	75,8
65,9	22,8	16,1	104,8	38,9	88,7
69,3	23,4	17,3	110,0	40,7	92,7
73,0	24,1	19,2	116,3	43,3	97,1
76,6	24,7	19,6	120,9	44,3	101,3
80,0	25,3	20,4	125,7	45,7	105,3
81,9	25,6	21,1	128,6	46,7	107,5
84,1	26,0	21,8	131,9	47,8	110,1

(cont.)

85,6	26,4	22,5	134,5	48,9	112,0
87,8	27,2	23,2	138,2	50,4	115,0
90,5	27,6	23,9	142,0	51,5	118,1
91,0	29,2	24,6	144,8	53,8	120,2
90,3	30,6	24,4	145,3	55,0	120,9
87,5	44,9	33,5	165,9	78,4	132,4
87,4	44,8	34,0	166,2	78,8	132,2
86,7	44,8	34,4	165,9	79,2	131,5
86,2	44,6	34,9	165,7	79,5	130,8
85,6	44,5	35,4	165,5	79,9	130,1
85,3	44,4	35,8	165,5	80,2	129,7
84,8	44,3	36,2	165,3	80,5	129,1
84,5	44,2	36,6	165,3	80,8	128,7
84,3	44,8	37,0	166,1	81,8	129,1

## Valores dimensionais do experimento

A, m <sup>2</sup>	$\Delta L$ , m (1-4)	$\Delta L$ , m (1-2)	$\Delta L$ , m (1-3)	$\Delta L$ , m (2-3)	$\Delta L$ , m (3-4)	$\Delta L$ , m (2-4)
0,003574	0,0366	0,0141	0,02480	0,01070	0,01190	0,02290

Para cálculo das médias foi considerado o intervalo de tempo de 360 a 440 min.

Cálculo das médias

	T1	T2	T3	T4	T I	T II	A	V	T1-T2	T2-T3	T3 -T4	T1-T4	T2-T4	T1 – T3
Média	252,0	166,2	121,6	86,3	284,4	91,7	0,103	45,1	85,8	44,6	35,3	165,7	79,9	130,4
dês. Pad.	0,5	1,6	1,7	0,6	0,9	1,1	0	0,2	1,2	0,3	1,2	0,3	1,1	1,4

Determinação do k, W/m. °C

q, W	A,m <sup>2</sup>	$\Delta T$ , C	$\Delta L$ , m		
				k (1-4), W/m. °C	
2,3307	0,0036	165,7	0,0366	0,14404	
				k (1-2), W/m. °C	
2,3307	0,0036	85,8	0,0141	0,10716	
				k (1-3),W/m. °C	
2,3307	0,0036	130,4	0,0248	0,12403	
				k (2-3),W/m. °C	
2,3307	0,003574	44,6	0,0107	0,15649	
				k (2-4),W/m. °C	
2,3307	0,003574	79,9	0,0229	0,18691	
				k (3-4),W/m. °C	
2,3307	0,003574	35,31	0,0119	0,21977	
				Média K	0,1563 W/m. °C
				Desvio Padrão	0,04141

## Apêndice 6: Determinação da condutividade térmica do fosfogesso- mesh 140/100

DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO FOSFOGESSO- MESH 100/140								
DATA DA COLETA DOS DADOS - 23/08/2012 Sistema Placa Plana								
Tempo, min	Temperatura, °C				Temperatura °C		Corrente, A	Tensão, V
	1	2	3	4	I	II		
0	23,4	23,1	23,0	22,8	23,1	22,4	0,03	15,5
5	24,3	23,2	23,1	23,0	24,9	22,5	0,03	15,5
10	27,0	23,7	23,2	23,1	28,6	22,5	0,04	15,7
15	28,9	24,2	23,4	23,0	31,8	22,5	0,03	16,0
20	31,1	25,1	23,7	23,2	34,8	22,6	0,03	15,4
25	33,7	26,6	24,5	23,6	38,4	22,9	0,03	15,2
30	35,5	27,6	25,0	23,8	40,7	23,3	0,03	15,5
37	37,7	28,8	26,0	24,3	43,7	24	0,03	15,8
40	39,1	29,6	26,6	24,6	45,6	24,3	0,03	15,7
50	41,9	31,2	27,7	25,4	49,3	25,4	0,03	15,6
60	45,1	33,0	29,1	26,3	53,8	26,8	0,03	16,6
70	48,1	34,4	30,2	27,3	57,4	28	0,03	15,0
80	50,6	35,9	31,3	28,1	60,3	29,1	0,03	16,3
90	52,9	37,1	32,2	28,9	63,4	30,2	0,03	16,3
100	54,9	38,3	33,1	29,1	66,0	31	0,03	15,0
120	57,8	40,4	34,1	30,2	69,7	32,1	0,03	15,3
130	59,5	41,8	35,3	31,1	71,8	33,4	0,03	15,0
140	60,3	42,7	36,0	31,6	72,7	34	0,03	15,4
150	61,2	43,6	36,7	32,1	73,8	34,7	0,03	15,0

(cont.)

160	61,9	44,4	37,3	32,5	74,6	35,4	0,03	15,0
170	62,6	45,0	37,8	32,9	75,5	36	0,03	15,3
180	63,4	45,7	38,4	33,3	76,5	36,6	0,03	15,7
190	63,9	46,3	38,8	33,5	77	37,2	0,03	14,8
200	63,2	46,2	38,8	33,5	76,1	37,3	0,03	14,8
210	63,3	46,4	37,0	33,7	76,5	37,6	0,03	14,5
220	63,8	46,8	39,3	33,9	77,2	38	0,03	15,7
230	64,7	47,2	39,7	34,2	78,3	38,3	0,03	15,9
240	65,5	47,6	40,1	34,4	79,4	38,7	0,03	15,7
250	66,2	48,2	40,4	34,6	80,2	39	0,03	16,5
260	66,7	48,6	40,7	34,8	80,8	39,3	0,03	15,4
270	67,0	48,9	40,9	34,9	81,2	39,6	0,03	15,3
280	67,3	49,2	41,1	35,1	81,5	39,8	0,03	16,0
290	67,5	49,3	41,2	35,1	82,0	39,9	0,03	16,0
300	68,3	49,7	41,4	35,1	83	40,1	0,03	15,9
310	68,4	49,6	41,3	35,0	83,2	40	0,03	15,4
320	69,0	50,2	41,9	35,5	83,7	40,6	0,03	15,1
330	69,3	50,6	42,3	35,8	83,8	41,1	0,03	15,0
340	69,3	50,8	42,5	36,1	84,1	41,3	0,03	15,1
350	69,5	51,0	42,6	36,1	84,3	41,5	0,03	15,6
360	69,5	51,0	42,6	36,0	84,5	41,6	0,03	15,0
370	69,5	50,9	42,4	35,7	84,4	41,5	0,03	15,2
380	69,4	50,8	42,2	35,5	84,4	41,2	0,03	15,1
390	69,4	50,8	42,2	35,5	84,4	41,2	0,03	15,0

$\Delta ^\circ\text{C}$						$\Delta \text{C}$
T1 - T2	T2 - T3	T3 - T4	T1 - T4	T2 - T4	T1 - T3	T1-TII
0,3	0,1	0,2	0,6	0,3	0,4	0,7
1,1	0,1	0,1	1,3	0,2	1,2	2,4
3,3	0,5	0,1	3,9	0,6	3,8	6,1
4,7	0,8	0,4	5,9	1,2	5,5	9,3
6,0	1,4	0,5	7,9	1,9	7,4	12,2
7,1	2,1	0,9	10,1	3,0	9,2	15,5
7,9	2,6	1,2	11,7	3,8	10,5	17,4
8,9	2,8	1,7	13,4	4,5	11,7	19,7
9,5	3,0	2,0	14,5	5,0	12,5	21,3
10,7	3,5	2,3	16,5	5,8	14,2	23,9
12,1	3,9	2,8	18,8	6,7	16,0	27,0
13,7	4,2	2,9	20,8	7,1	17,9	29,4
14,7	4,6	3,2	22,5	7,8	19,3	31,2
15,8	4,9	3,3	24,0	8,2	20,7	33,2
16,6	5,2	4,0	25,8	9,2	21,8	35,0
17,4	6,3	3,9	27,6	10,2	23,7	37,6
17,7	6,5	4,2	28,4	10,7	24,2	38,4
17,6	6,7	4,4	28,7	11,1	24,3	38,7
17,6	6,9	4,6	29,1	11,5	24,5	39,1
17,5	7,1	4,8	29,4	11,9	24,6	39,2
17,6	7,2	4,9	29,7	12,1	24,8	39,5
17,7	7,3	5,1	30,1	12,4	25,0	39,9
17,6	7,5	5,3	30,4	12,8	25,1	39,8
17,0	7,4	5,3	29,7	12,7	24,4	38,8

(cont.)

T1 - T2	T2 - T3	T3 - T4	T1 - T4	T2 - T4	T1 - T3	T1-TII
16,9	9,4	3,3	29,6	12,7	26,3	38,9
17,0	7,5	5,4	29,9	12,9	24,5	39,2
17,5	7,5	5,5	30,5	13,0	25,0	40,0
17,9	7,5	5,7	31,1	13,2	25,4	40,7
18,0	7,8	5,8	31,6	13,6	25,8	41,2
18,1	7,9	5,9	31,9	13,8	26,0	41,5
18,1	8,0	6,0	32,1	14,0	26,1	41,6
18,1	8,1	6,0	32,2	14,1	26,2	41,7
18,2	8,1	6,1	32,4	14,2	26,3	42,1
18,6	8,3	6,3	33,2	14,6	26,9	42,9
18,8	8,3	6,3	33,4	14,6	27,1	43,2
18,8	8,3	6,4	33,5	14,7	27,1	43,1
18,7	8,3	6,5	33,5	14,8	27,0	42,7
18,5	8,3	6,4	33,2	14,7	26,8	42,8
18,5	8,4	6,5	33,4	14,9	26,9	42,8
18,5	8,4	6,6	33,5	15,0	26,9	42,9
18,6	8,5	6,7	33,8	15,2	27,1	42,9
18,6	8,6	6,7	33,9	15,3	27,2	43,2
18,6	8,6	6,7	33,9	15,3	27,2	43,2

Para os cálculo das médias foi considerado o intervalo de temperatura de 68,3 °C a 69,4 °C

Cálculo das médias

	T1	T2	T3	T4	T I	T II	A	V	T1-T2	T2-T3	T3-T4	T1-T4	T2-T4	T1-T3	T I - T II
Média	69,2	50,5	42,1	35,6	83,98	41,1	0,03	15,24	18,6	8,4	6,5	33,5	14,9	27,0	43,0
Desp. Pad	0,45	0,52	0,47	0,39	0,54	0,58	0,00	0,30	0,11	0,12	0,16	0,26	0,28	0,14	0,19

Determinação do k, W/m. °C					
q, W	A, m <sup>2</sup>	$\Delta T$ , C	$\Delta L$ , m	$\Delta T_1$ , C	k (1-4), W/m. °C
0,23	0,003574	33,5	0,0366	43,0	0,069818
					k (1-2), W/m. °C
0,23	0,003574	18,6	0,0141	43,0	0,048729
					k (1-3), W/m. °C
0,23	0,003574	27,0	0,0248	43,0	0,059062
					k (2-3), W/m. °C
0,23	0,003574	8,4	0,01070	43,0	0,081969
					k (2-4), W/m. °C
0,23	0,003574	14,9	0,02290	43,0	0,098834
					k (3-4), W/m. °C
0,23	0,003574	6,5	0,01190	43,0	0,117629
					Média k
					0,07934 W/m. °C
					Desvio Padrão
					0,02566

## Apêndice 7: Determinação da condutividade térmica da areia grossa mesh 24/12 - sistema radial

DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA AREIA GROSSA MESH 24/12 - SISTEMA RADIAL							
DATA DA COLETA DOS DADOS – 07/11/2012 Sistema Radial							
Tempo, min	Temperatura, °C				Corrente, A	Tensão, V	Temp. H <sub>2</sub> O
Termopares	1	2	3	4	I	II	
0	22,6	23,2	24,0	24,6	-	-	25,0
10	38,8	30,7	26,7	25,4	0,4	40,2	25,0
20	50,3	37,7	29,8	26,3	0,4	41,6	25,0
30	59,5	43,9	33,0	27,6	0,4	42,2	25,0
40	66,2	48,9	35,6	28,4	0,4	42,4	25,0
50	70,7	52,4	37,6	29,1	0,4	42,4	25,0
60	73,3	54,8	38,9	29,7	0,4	41,9	25,0
70	75,4	56,1	39,8	29,9	0,4	41,9	25,0
80	77,1	57,4	40,4	30,1	0,4	42,0	25,0
90	78,5	58,5	41,0	30,2	0,4	41,9	25,0
100	79,2	59,1	41,3	30,4	0,4	42,0	25,0
110	79,7	59,4	41,5	30,3	0,4	42,2	26,0

(cont.)

120	80,4	59,9	41,6	30,3	0,4	42,1	26,0
140	80,7	60,1	41,7	30,2	0,4	42,1	26,0
150	80,8	60,2	41,7	30,2	0,4	42,0	26,0
160	80,8	60,2	41,7	30,2	0,4	42,0	26,0

<b>DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA AREIA GROSSA MESH 24/12 COM A TEMPERATURA ESTABILIZADA</b>							
DATA DA COLETA DOS DADOS – 07/11/2012 Sistema Radial							
Tempo, min	Temperatura, °C				Tempo do banho	Corrente, A	Tensão, V
Termopares	1	2	3	4	I		
100	79,2	59,1	41,3	30,4	0,4	42,0	25,0
110	79,7	59,4	41,5	30,3	0,4	42,2	26,0
120	80,4	59,9	41,6	30,3	0,4	42,1	26,0
140	80,7	60,1	41,7	30,2	0,4	42,1	26,0
150	80,8	60,2	41,7	30,2	0,4	42,0	26,0
160	80,8	60,2	41,7	30,2	0,4	42,0	26,0

$\Delta^{\circ} \text{C}$										
T1 - T2	T2 - T3	T3 - T4	T1 - T4	T2 - T4	T1 - T3	L, m	r (1), mm	r (2), mm	r (3), mm	r (4), mm
20,1	17,8	10,9	48,8	28,7	37,9	0,145	15,2	23,6	33,2	41,7
20,3	17,9	11,2	49,4	29,1	38,2					
20,5	18,3	11,3	50,1	29,6	38,8					
20,6	18,4	11,5	50,5	29,9	39					
20,6	18,5	11,5	50,6	30	39,1					
20,6	18,5	11,5	50,6	30	39,1					

Para os cálculo das médias foi considerado o intervalo de tempo de 100 a 160 min.

#### Cálculo das médias

	T1	T2	T3	T4	Temp. H <sub>2</sub> O	A	V	T1-T2	T2-T3	T3-T4	T1-T4	T2-T4	T1-T3
Média	80,27	59,82	41,58	30,27	25,00	0,40	42,00	20,25	18,23	11,32	50,00	29,55	38,68
dês. pad.	0,67	0,46	0,16	0,08	0,00	0,00	0,00	0,14	0,07	0,21	0,42	0,28	0,21

Determinação do K, W/m. °C				
q, W	$\ln (r(n)/r(n-1))$	$\Delta T, C$	$2x\lceil\lceil xL, m$	k (1-4), W/m. °C
16,8000	1,0092	50,0	0,9106	0,3723843
				k (1-2), W/m. °C
16,8000	0,4400	20,5	0,9106	0,396910797
				k (1-3),W/m. °C
16,8000	0,7813	38,7	0,9106	0,372606347
				k (2-3),W/m. °C
16,8000	0,3413	18,2	0,9106	0,345347152
				k (2-4),W/m. °C
16,80000	0,5693	29,6	0,91060	0,35541075
				k (3-4),W/m. °C
16,8000	0,2280	11,3	0,9106	0,371625148
			Média K	0,36905 W/m. °C
			Desvio Padrão	0,01763

## Apêndice 8: Determinação da condutividade térmica do fosfogesso - sistema radial

DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO FOSFOGESSO - SISTEMA RADIAL								
DATA DA COLETA DOS DADOS - 14/11/2012 Sistema Radial								
Tempo, min.	Temperatura, °C				Corrente Map.	Tensão V.	Fonte Variac	Temp. H <sub>2</sub> O
	1	2	3	4				
0	36,3	30,9	27,4	25,5	0,31	30,1	30	22
10	43,9	34,3	28,6	26,0	0,31	30,1	30	22
20	49,4	37,8	30,3	26,6	0,31	30,3	30	22
30	54,0	41,2	32,2	27,5	0,31	30,3	30	22
40	56,7	43,3	33,5	28,3	0,31	30,3	30	22
50	66,5	47,8	35,6	28,8	0,41	40,4	40	22
60	76,1	53,7	37,4	28,4	0,41	40,6	40	22
70	79,1	55,7	38,6	29,0	0,41	40,6	40	22
80	86,0	59,7	40,5	29,8	0,45	45,0	45	22
90	94,3	64,4	43,0	31,1	0,50	50,0	50	22
100	102,2	70,6	46,4	32,5	0,50	50,1	50	22
110	105,5	73,4	48,1	33,2	0,50	50,0	50	22
120	107,5	75,0	49,1	33,6	0,50	50,0	50	22
130	109,4	76,1	49,6	33,5	0,50	50,0	50	22
140	111,8	77,8	50,5	33,8	0,50	50,2	50	22
150	112,6	78,2	50,7	33,7	0,50	50,2	50	22
160	113,5	78,6	50,8	33,5	0,50	50,2	50	22
170	114,7	79,3	51,0	33,4	0,50	50,3	50	22
180	115,6	79,7	51,0	33,0	0,50	50,3	50	22
240	121,5	81,4	51,2	32,1	0,50	50,1	50	22
250	122,9	81,7	51,3	31,9	0,50	50,0	50	22
270	123,8	81,7	51,1	31,5	0,49	49,6	50	22
280	124,5	81,7	51,0	31,4	0,49	49,6	50	22
290	125,0	81,7	50,9	31,2	0,49	49,5	50	22
300	125,0	81,7	50,8	31,1	0,49	49,6	50	22

DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO FOSFOGESSO COM A TEMPERATURA ESTABILIZADA							
DATA DA COLETA DOS DADOS - 14/11/2012 Sistema Radial							
Tempo, min	Temperatura, °C				Temperatura do banho	Corrente, A	Tensão, V
	1	2	3	4			
240	121,5	81,4	51,2	32,1	22,0	0,50	50,00
250	122,9	81,7	51,3	31,9	22,0	0,50	50,00
270	123,8	81,7	51,1	31,5	22,0	0,49	49,00
280	124,5	81,7	51,0	31,4	22,0	0,49	49,00
290	125,0	81,7	50,9	31,2	22,0	0,49	49,00
300	125,0	81,7	50,9	31,1	22,0	0,49	49,00

$\Delta^{\circ} \text{C}$						L, m	r (1), mm	r (2), mm	r (3), mm	r (4), mm
T1 - T2	T2 - T3	T3 - T4	T1 - T4	T2 - T4	T1 - T3					
40,1	30,2	19,1	89,4	49,3	70,3	0,145	15,2	23	33	40,7
41,2	30,4	19,4	91,0	49,8	71,6					
42,1	30,6	19,6	92,3	50,2	72,7					
42,8	30,7	19,6	93,1	50,3	73,5					
43,3	30,8	19,7	93,8	50,5	74,1					
43,3	30,8	19,8	93,9	50,6	74,1					

Para os cálculo das médias foi considerado o intervalo de tempo de 115 a 220 min

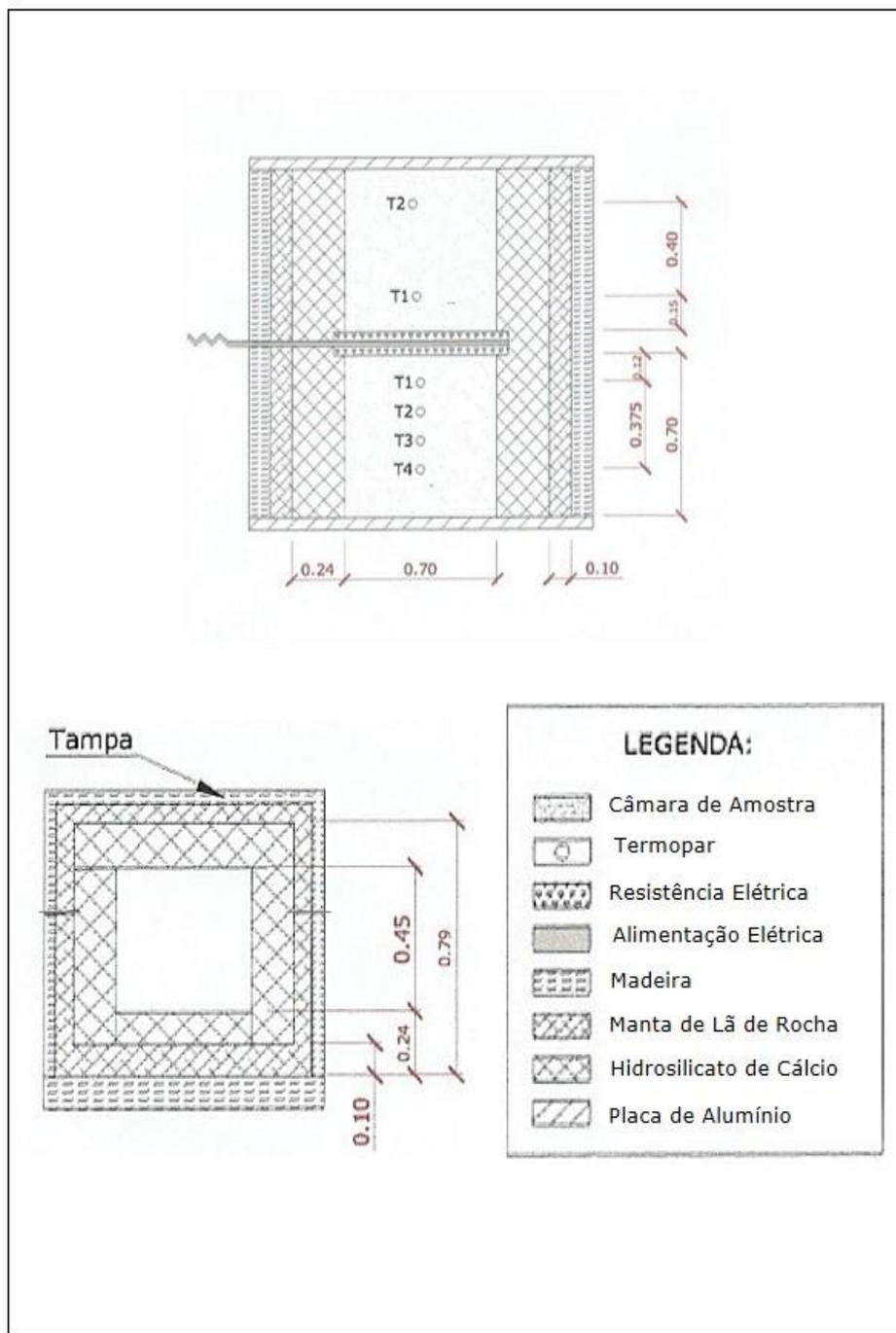
Cálculo das médias													
	T1	T2	T3	T4	T- b	C-A	T-V	T1-T2	T2-T3	T3-T4	T1-T4	T2-T4	T1-T3
Média	123,78	81,65	51,07	31,53	22,00	0,49	49,33	42,13	30,58	19,53	92,25	50,12	72,72
dês. pad.	1,38	0,12	0,16	0,39	0,00	0,01	0,52	0,78	0,14	0,21	1,13	0,35	0,92

Determinação do K, W/m. °C				
q, W	$\ln (r(n)/r(n-1))$	$\Delta T, C$	$2x\sqrt{x}L, m$	k (1-4), W/m. °C
24,3378	0,9849	92,3	0,9106	0,2853602
				k (1-2), W/m. °C
24,3378	0,4142	42,1	0,9106	0,262746101
				k (1-3),W/m. °C
24,3378	0,7752	72,7	0,9106	0,284931113

(cont.)

q, W	$\ln (r(n)/r(n-1))$	$\Delta T, C$	$2x\overline{T}xL, m$	
				k (2-3),W/m. °C
24,3378	0,3610	30,6	0,9106	0,315494443
				k (2-4),W/m. °C
24,33778	0,5707	50,1	0,91060	0,304372036
				k (3-4),W/m. °C
24,3378	0,2097	19,5	0,9106	0,286957687
			Média K	0,28998 W/m. °C
			Desvio Padrão	0,01820

## Anexo A: Primeiro Experimento – dispositivo parede plana



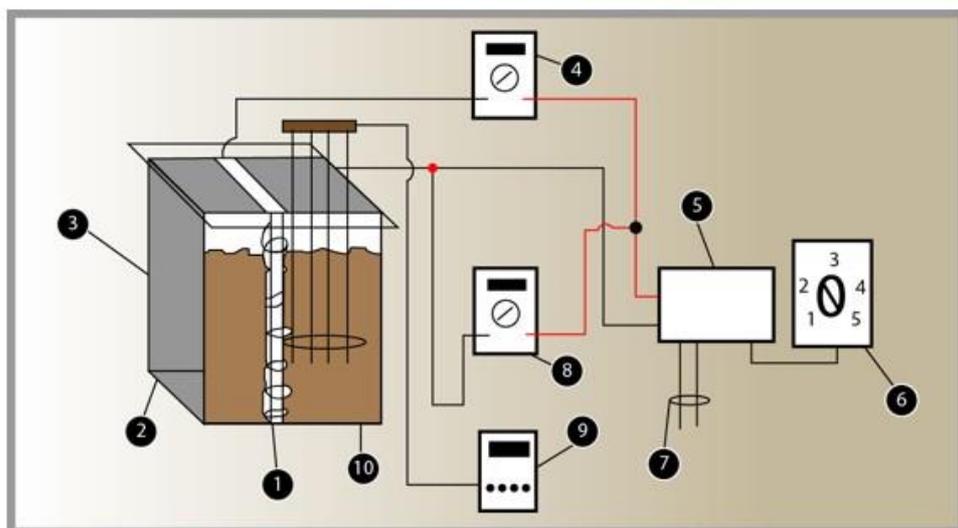
**Universidade Santa Cecília**

**Dispositivo – Placa Plana**

Mestrando: Hugo Vicente da Silva

Data: 07/06/2013

## Anexo B: Primeiro Experimento – desenho esquemático

**SISTEMA PAREDE PLANA**

- 1) Resistência Elétrica; 2) Parede de fosfogesso;  
3) Caixa de madeira fechada; 4) Amperímetro ligado em série;  
5) Fonte elétrica; 6) Controlador de temperatura;  
7) Alimentação da resistência; 8) Voltímetro ligado em paralelo;  
9) Indicador de temperatura; 10) Termopares Tipo J

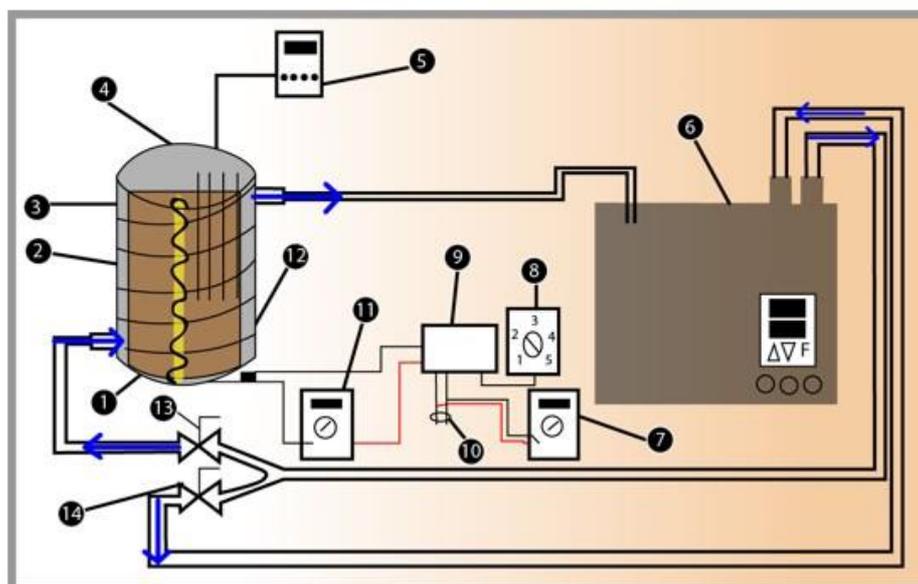
**Universidade Santa Cecília**

**Dispositivo – Placa Plana**

Mestrando: Hugo Vicente da Silva

Data: 07/06/2013

## Anexo C/ D: Segundo Experimento – desenho esquemático

**SISTEMA RADIAL CILÍNDRICO**

- 1) Areia seca ou fosfogesso; 2) Resistência elétrica; 3) Módulo cilíndrico de acrílico com tampa;
- 4) Termopares Tipo J; 5) Indicador de temperaturas; 6) Banho termostático; 7) Voltímetro;
- 8) Potenciômetro; 9) Fonte elétrica; 10) Alimentação 220 V da fonte; 11) Amperímetro;
- 12) Circulação de fluxo de água Helicoidal ; 13) Válvula de fluxo; 14) Válvula de reciclo.

**Universidade Santa Cecília**

**Sistema Radial Cilíndrico**

Mestrando: Hugo Vicente da Silva

Data: 07/06/2013

