



Priscilla Radd Ferreira Pinto

**Medição de Propriedades Térmicas pelo
Método Fluximétrico - desenvolvimento de equipamento**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental. (opção Profissional)

Orientador. Prof. Dr. Antonio Roberto Martins Barboza de Oliveira

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2015



Priscilla Radd Ferreira Pinto

**Medição de Propriedades Térmicas pelo
Método Fluximétrico - desenvolvimento de equipamento**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre (opção Profissional) pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio. Aprovado pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Antonio Roberto Martins Barboza de Oliveira
Presidente / Orientador
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof^a. Cláudia Mariz de Lyra Barroso Krause
UFRJ

Prof. Marcelo Roberto Ventura Dias de Mattos Bezerra
PUC-Rio

Prof. Celso Romanel
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial de Pós-Graduação
do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de fevereiro de 2015

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Graduou-se em Arquitetura e Urbanismo pela UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora), em 2006 e em 2010, concluiu o curso de Especialização em Arquitetura de Sistemas de Saúde pela UFBA (Universidade Federal da Bahia) e MBA em Gestão Empresarial pela FGV (Fundação Getúlio Vargas). Tem atuado em diversas áreas, com destaque para o setor de projetos em saúde e desempenho térmico.

Ficha Catalográfica

Pinto, Priscilla Radd Ferreira

Medição de propriedades térmicas pelo método fluximétrico - desenvolvimento de equipamento / Priscilla Radd Ferreira Pinto ; orientador: Antonio Roberto Martins Barboza de Oliveira. – 2015.

64 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2015.

Inclui bibliografia

CDD: 624

Ao meu pai Jorge, à minha mãe Maria Helena,
referências de vida, que me conduzem
à dimensão do amor incondicional.

Agradecimentos

A DEUS, pela inspiração e proteção nesta caminhada, orientando meus passos e me estimulando a prosseguir.

Aos Santos, pelo acolhimento espiritual.

Ao Prof. Antônio Roberto, meu orientador-amigo, a quem ousou chamar de meu pai-acadêmico, pela generosa disponibilidade e competência dos ensinamentos constantes, que culminaram não somente com este percorrer investigativo mas com minha formação geral de pesquisadora— eterna gratidão e admiração.

Ao Prof. Celso Romanel, pela capacidade de coordenar necessidades de diferentes universitários- profissionais.

Aos professores do Curso, por dividirem experiências e conhecimentos.

Aos colegas do curso, em especial ao Ricardo Saldanha pela disponibilidade compartilhada, se fez mais que um colega, um amigo-irmão.

À Paula, pela presteza em atender solicitações que não findavam.

Aos integrantes da sala de estudos e trabalhos, ao Rafael, pelo encontro que tem me proporcionado acreditar no companherismo carioca e ao Thiago, por apontar pelo seu exemplo o caminho acadêmico.

Aos profissionais do Laboratório de Estruturas e Materiais, pela contribuição técnica em todo o processo.

Ao Prof. Saulo Guths, pela colaboração nos caminhos e nas práticas do Método Fluximétrico.

Ao Prof. Antônio Pedro, pela torcida e recomendações incansáveis de um grande mestre.

Ao Carlos do Inmetro, pelo acolhimento na visita técnica.

À empresa Dancor, pelo apoio institucional no desenvolvimento do

equipamento.

À Tia Bada, minha tia preferida, pela presença carinhosa em referencial feminino e humano, que significa incentivo, conquista e amadurecimento.

À Janine, minha irmã, pela rara e constante presença na (con)vivência existencial.

Ao Victor, meu cunhado, pelo apoio e estímulo ao meu processo de buscas.

À Theresa e ao João Victor, meus sobrinhos, por me despertarem com doçura sobre a paciente beleza do crescer e desenvolver.

À minha vó Glória, pela herança genética de aguerrida na e pela vida.

Aos meus avós, Helena e Alfred, pelos valores cristãos ensinados.

À Rosimar, ao Gabriel e à Duda, por tornar plural a nossa família.

À Gabi, minha grande amiga, pela amizade sincera que representa conquista humana.

À Luzia, minha sábia amiga, por me mostrar o Rio de Janeiro com sotaque mineiro.

Ao Alexandre, meu personal coach, pela compreensão afetiva e efetiva.

À Lady, minha cãopanheira, por ao seu modo entender o significado de tempo, distância e saudade.

A todos mais, por cada um a sua maneira ter contribuído para eu chegar até aqui.

Resumo

Pinto, Priscilla Radd Ferreira; Oliveira, Antônio Roberto Martins Barboza (Orientador). **Medição de Propriedades Térmicas pelo Método Fluximétrico - desenvolvimento de equipamento**. Rio de Janeiro, 2015. 64p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O conhecimento das propriedades térmicas dos materiais da construção civil é necessário para a escolha consciente e, por conseguinte, para a promoção do desenvolvimento sustentável. A determinação dessas propriedades implica em aprimorar equipamentos e ampliar sua acessibilidade. Este estudo dedica-se a apresentar o desenvolvimento e a validação do equipamento baseado em normativas do Método Fluximétrico. Os resultados obtidos comprovam que esse atende aos fins propostos com aferição de duas propriedades: resistência térmica e condutividade térmica. Representa avanços e contribui para satisfazer demandas e lacunas na caracterização de materiais construtivos.

Palavras-chave

Método fluximétrico; propriedades térmicas; desenvolvimento sustentável, construção civil.

Extended Abstract

Pinto, Priscilla Radd Ferreira; Oliveira, Antônio Roberto Martins Barboza de (Advisor). **Measurement of thermal properties by Fluxometric Method - Equipment Development**. Rio de Janeiro, 2015. 64p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

1. Introduction

The intent of this study is to discuss the subject equipment development by Heat Flow Meter Apparatus for measurement of thermal properties of building materials, which contributes to the area of sustainability in Brazilian civil construction. The production appears necessary, well as the creation of thermal performance labs in higher education institutions in Brazil, as a response to many new materials introduced annually in the market and developing other with answers to sustainable development, including the Question of efficiency thermal - energy .

2. Theoretical Fundamentals

The Heat Flow Meter Apparatus is a secondary method to determine the thermal resistance (property which is related to the opposition of a material to thermal energy transmission) and thermal conductivity (property governing a higher or lower ease with which a body submitted to a gradient temperature, conducts heat). homogeneous materials. It is considered secondary because it demands a periodic calibration of the flow meters, devices that measure the heat flow.

The ATSM standards C518 (1985), BSI BS 874 (1986) NF T56- 124 (1991), ISO 8301 (1991) and NBR 15 220 2005 - Part 5 are reference standards for the procedure and measurement of the thermal conductivity materials on a permanent basis (Guths, 2014).

It is emphasized that that the theoretical basis of this method is the heat transfer process. The heat transmission occurs whenever a thermal gradient is established between two media or opposite sides of a body, and it always happens in the direction of higher temperature to the lower element temperature. Shows to conductive heat transfer (temperature difference and surface contact), and conditions in one-dimensional steady state. The conductive heat transfer is governed by Fourier 's Law.

3. Construction Procedures

The method chosen was the Heat Flow Meter Apparatus due to the simplicity of assembly, design and use, plus the speed of results when compared to other established method, Method Hot Plate Protected. The equipment is of symmetrical configuration with two flowmeters and a test object, that is, the horizontal stacking plates with upwards vertical heat flow is constituted by this order: a hot plate (heater element), a flow meter, a sample, test, a second meter and a cold plate.

The whole set is isolated from the environment by placing a heat insulating envelope of ceramic fibers and rock wool boards placed in a wooden box. This enhanced lateral insulation is designed to minimize the heat flux and the flowmeters sides of samples (Figure A).

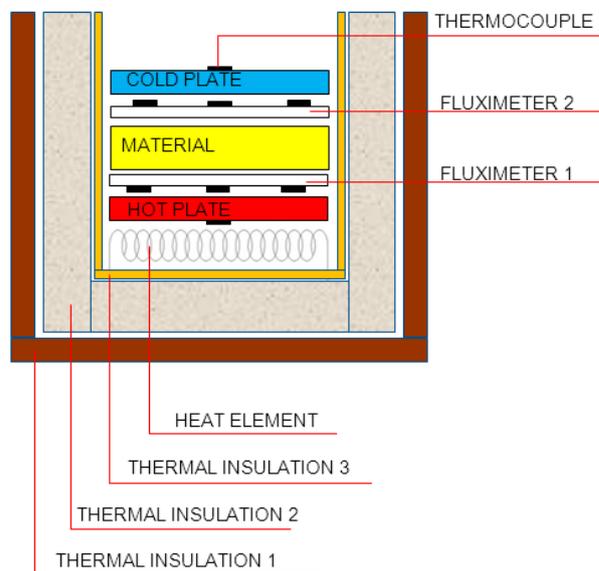


Figura A – Schematic drawing of equipment, Collection of Prof. Antonio Roberto Martins de Oliveira Barbosa .

3.1 Hot Plate

The hot plate system is the heating unit. The material selected for its construction was the aluminum, because it has a high thermal conductivity (204 W / mK), low thermal inertia, high corrosion resistance and low volumetric density. The dimensions adopted for the plate are $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$. The heating is given by a heating element powered by a source of " voltage-current " controlled.

3.2 Cold plate

The Cold Plate is the cooling unit of the system with the purpose of dissipating heat. The material selected for its preparation is the same hot plate, the aluminum with dimensions of 300 mm x 300 mm x 30 mm. The plate was cooling from ambient air conditioning.

Another possible form of cooling developed for maintaining sample temperature equal to the ambient temperature was from fluid circulation channels machined into the cold board. In this case the cold plate is adopted composition of the two plates, 60 mm thickness.

Asserts itself further that the cold plate also has the function to ensure a charge entrapment minimizing the formation of air gap in the sample - flow meter interfaces.

3.3 Measurement Sensors

For mounting the equipment and monitoring of interdependent variables under study, flow and temperature, flow meters were used to cross gradient of Hukseflux HFP01 and thermocouples type " k " factory calibrated, respectively. These were installed in the hot and cold plates, featuring the installation and complete development of the equipment.

3.4 Automation system

The additional equipment required for the structuring of the test are adjustable current source, acquisition of the brand National Instruments signal system and a personal computer with graphic interface for editing the collected info.

4. Experiment

The resistance measurement experiments and thermal conductivity of a sample, granted by the Brazilian Center for Energy Efficiency in Buildings (CB3E) of the Federal University of Santa Catarina (UFSC), were performed by Heat Flow Meter Apparatus as a means of validation equipment developed in accordance with national and international standards (Table A).

Table A – Thermal properties of LMTP Sample, CB3E (UFSC)

Experiment's number	Name-definition	thickness (mm)	Specific Mass (kg/m ³)	Thermal Conductivity (W/m°C)	Thermal Resistance (m ² C/W)	Medium Temperature (°C)
1	Amostra LMPT-1	55,0	47,1	0,0347	1,58	25

The experimental test was carried out at Pontifical Structures and Materials Laboratory Catholic University of Rio de Janeiro (LEM-DEC-PUC-Rio), based on the NBR 15220: 2005 Thermal Performance of Buildings - Part 5 and ASTM CT 518 (1991), between the 10th, and January 26, 2015 in air-conditioned environment with controlled temperature of approximately 23 ° C.

A total of nine tests performed, four of these (Test A, B, C and D) for the thermal characterization of the material with conductivity measurement of properties and heat resistance. These and the other five were for knowledge of the operation of the equipment, understanding of part and the whole. The average duration of the tests was two hours, and the data used to calculate the thermal properties were the last 15-20 minutes from the moving average, with the creation of an interdependence between the data reistered every 3 seconds.

5. Analysis of Results

The development of equipment in accordance with the rules occurred in two stages that complement and validate .

After mounting the experimental set for reliability tests were performed initial using 16 thermocouples (T1- T16) arranged on two major surfaces of the hot and cold plates. The flow meters were placed in the central part by the thermocouple T4 and T10. The position of the thermocouples on the hot plate and the cold plate were initially to verify the qualitative distribution of temperaturas. Em each surface of the hot plate and the cold plate the differences between read thermocouples were small, less than 0.5°C in compliance with NBR 15220: 2005. Therefore, validated to the choice of material and dimensions defined for the plates, and the operation of the heater element adopted.

Readings taken in flowmeters presented in literature registered characteristics fluctuations throughout the complete test. It was found the difference in heat flux transducers around 20%, characterized as steady state.

These observations on temperature equalization supercial possible to reduce the number of thermocouples used for control. There was no quantitative change for flowmeters.

It should be noted that to secure obtaining the required flatness in rule and non convective interference in the results, milling cutters were performed on the plates to fit the thermocouples and flow meters used.

In all experiments, as it is retained, thermocouples fixed in cold surface temperatures recorded values reported in the sample side facing the source of heat throughout the test. This was followed as recommended a final temperature gradient of at least 10°C.

As for the meter, the heat flow difference at the beginning of the test is large, decreasing over time. As increases the heat dissipation in the heater element, an increase of temperature gradient in the sample faces and therefore the difference between the records of the flow meters is less.

About side leakage there is still doubt as to characterize them and understand them in the equipment, since the normative guidelines were followed. Experimentally the temperature by the thermocouple records each face were not simultaneously higher than 0.5°C variation, the extremities and thermocouples showed no delay, i.e., there was no indication of preferred paths or spot heating plate. The justification for the difference of records in lower and upper meter is the heat capacity of the test material.

Tests A, B and C was performed out under similar conditions, with a maximum average temperature variation among them 1°C. The thermal resistance values obtained possible to assess the repeatability of the assay and consequently consistency of the data (Table B).

Table B– Comparative Data

Number's Experiment	Thermal Resistance Medium (m ² °C/W)	Thermal Resistance Maximum (m ² °C/W)	Thermal Resistance Minimum (m ² °C/W)	Medium Temperature (°C)
A	1,46	1,60	1,37	33,4
B	1,52	1,66	1,42	32,4
C	1,44	1,59	1,29	32,6
Média ABC	1,47	1,61	1,36	32,8

A fourth test D was performed applied where a greater amount of heat, so as to obtain the final average temperature of 45.8°C was obtained thermal resistance equal to 1.44 m² °C / W.

Experimentally it was established with the data shown that the increase in average

temperature influence in termofísica strength of the material, reducing it. The Figure B shows the characteristic tendency line for this material.

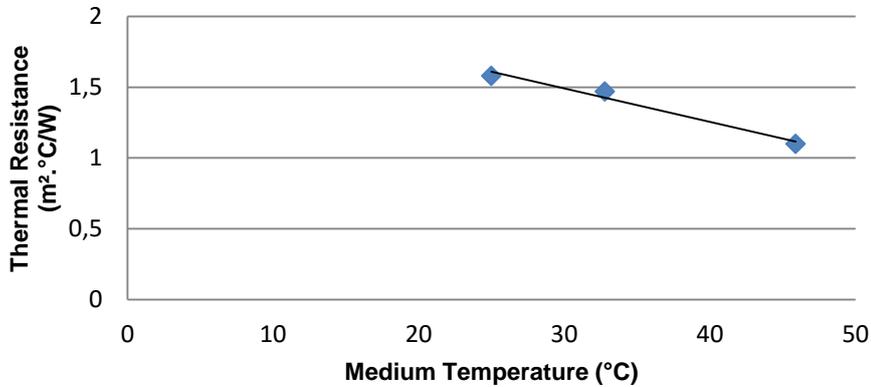


Figura B – Line trend- Thermal Resistance.

The value of $R^2 = 0.975$, there is a slight dispersion of the points considering the linear tendency for decreasing the thermal resistance when there is a significant increase in the average temperature at which a material is subjected. This evaluation allows us to state that the individual values of A, B and C are valid. This again confirms the precision of the equipment developed for this purpose.

Given the maintenance of the density of the material and its thickness in all trials, coupled with the evidence of the validity of data collected for thermal resistance, it was possible to calculate the thermal conductivity of the material. The final values are systemized in Table C.

Table C – Results of: Comparative Thermal properties of Sample LMPT -01- Test A, B, C, D

Number's Experiment	Thickness (mm)	Specific Mass (kg/m ³)	Thermal Resistance (m ² °C/W)	Thermal Conduitivity (W/m°C)	Medium Temperature(°C)
LMTP-01	55,0	47,1	1,58	0,0347	25,0
A	55,0	47,1	1,46	0,0376	33,4
B	55,0	47,1	1,52	0,0361	32,4
C	55,0	47,1	1,44	0,0382	32,6
D	55,0	47,1	1,10	0,0500	45,9

6. Conclusions

Effectively the proposed was reached, the development of equipment for measuring the thermal resistance by Heat Flow Meter Apparatus in observances standards

displays great potential for use as a secondary method.

Keywords

Heat flow meter apparatus; thermal properties; sustainable development, buildings construction.

Sumário

1. Introdução	22
2. Revisão bibliográfica	25
2.1. Notas iniciais	25
2.2. Métodos para medição da resistência térmica	27
2.2.1. Método placa quente protegida	29
2.2.2. Método fluximétrico	30
2.2.3. Experiências e considerações sobre o método placa quente protegida e método fluximétrico	33
3. Descrição do equipamento	35
3.1. Notas iniciais	35
3.2. Placa quente	36
3.3. Placa fria	37
3.4. Sensores de medição	39
3.4.1 Fluxímetros	39
3.4.2 Termopares	41
3.5. Sistema de automação	42
4. Programa experimental	44
4.1. Notas iniciais	44
4.2. Materiais-amostra	44
4.3. Condições do laboratório	45
4.4. Processo de medição	46
4.5. Resultados e discussões	47

5. Conclusões.....	56
5.1. Considerações finais sobre o trabalho	56
5.2. Recomendações e sugestões para trabalhos futuros	56
Referências bibliográficas	58
Anexos	61

Lista de tabelas

Tabela 1 – Métodos para medição da Resistência Térmica.....	32
Tabela 2 – Especificações normativas para Placas Quente e Fria	32
Tabela 3– Especificações normativas para Corpo de Prova.....	32
Tabela 4 – Especificações normativa para Fluxímetros	32
Tabela 5 – Tabela Comparativa do Método de Placa Quente e do Método Fluximétrico	34
Tabela 6 – Especificações do fluxímetro Hukseflux HFP01	41
Tabela 7 – Características de termopares	41
Tabela 8 – Limites de erro para termopar tipo “K”.....	42
Tabela 9 – Propriedades térmicas da Amostra do LMTP	45
Tabela 10 – Temperaturas das Superfícies da amostra voltadas para as placas Quente e Fria- ensaio A.	50
Tabela 11 – Temperaturas das Superfícies da amostra voltadas para as placas Quente e Fria dos Ensaios A, B e C.	51
Tabela 12– Dados comparativos: temperatura x fluxo de calor do Ensaio A.....	51
Tabela 13 – Dados comparativos: fluxo de calor em função do tempo do Ensaio A.....	51
Tabela 14 – Dados comparativos do Ensaio A.	53
Tabela 15 – Dados comparativos da Resistência térmica do material em relação à temperatura média do ensaio.	54
Tabela 16 – Propriedades térmicas da Amostra LMPT-1.....	55

Lista das figuras

Figura 1 – Campo térmico	28
Figura 2 – Configuração simétrica de ensaio do Método Placa Quente Protegida	29
Figura 3 – Configurações possíveis de disposição dos Termopares na Placa Quente com anel de guarda	30
Figura 4 – Configurações possíveis de ensaio do Método Fluximétrico	31
Figura 5 – Configuração final do Equipamento desenvolvido para Método Fluximétrico	35
Figura 6 – Caixa de madeira isolada termicamente para acondicionamento do equipamento do Método Fluximétrico	36
Figura 7 – Desenho esquemático- caixa com isolamento para equipamento.....	36
Figura 8 – Resistência Aquecedora em placa quente	37
Figura 9– Desenho esquemático de montagem do equipamento- Placa Quente.....	37
Figura 10 –Processo de usinagem da Placa Fria.....	38
Figura 11 – Placa Fria depois de usinada (aberta)- borracha de vedação e canais de circulação de água	38
Figura 12 – Placa fria (fechada)	38
Figura 13 – Desenho esquemático de montagem do equipamento- Placa Fria	38
Figura 14 – Desenho esquemático do equipamento montado- sensores.....	39
Figura 15 – Sensor de fluxo de calor HFP01 da Hukseflux, vista externa e interna	40
Figura 16 – Desenho esquemático de bancada experimental.....	42
Figura 17 – Bancada experimental	42

Figura 18 – Corpo de prova	45
Figura 19 – Identificação de corpo de prova- LMTP-01	45
Figura 20- Planta Baixa do Laboratório de Hidráulica e Térmica dos Materiais do LEM-DEC- PUC-Rio	46
Figura 21 – Disposição dos dezesseis termopares e dos dois fluxímetros.....	48
Figura 22 – Disposição dos oito termopares e dos dois fluxímetros	49
Figura 23 – Sensores de medição embutidos na placa.....	49
Figura 24 – Gráfico de desempenho do Ensaio A: temperatura nas faces quente e fria x tempo.	50
Figura 25 – Gráfico de desempenho do Ensaio A: densidade de fluxo de calor x tempo.....	52
Figura 26 – Relação entre resistência térmica da amostra LMTP-1 e temperatura média de ensaio.....	54

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

NBR	Norma Brasileira
NPL	Laboratório Nacional de Física
CAD	<i>Computer-aided design</i>
LEM	Laboratório de Estruturas e Materiais
DEC	Departamento de Engenharia Civil
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
CB3E	Centro Brasileiro de Eficiência Energética
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
R	resistência térmica ($\text{m}^2/\text{°C}\cdot\text{W}$)
k	Condutividade térmica ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{°C}$)
ρ	massa específica (kg/m^3)
L_1	dimensão lateral 1 (m)
L_2	dimensão lateral 2 (m)
e	espessura (m)
q	fluxo de calor dissipado (W/m^2)
flux	fluxímetro
T_f	temperatura média da placa fria (°C)
T_q	temperatura média da placa quente (°C)
ΔT	gradiente de temperatura entre a placa fria e a quente (°C)
$T_{\text{média}}$	Temperatura média (°C)
T1- T16	Numeração de termopares de 1 a 16.

“ Eu não tenho paredes. Só tenho horizontes.”

(Mário Quintana)

1 Introdução

A intenção deste estudo é tratar o tema desenvolvimento de equipamento pelo Método Fluximétrico para medição das propriedades térmicas de materiais construtivos, que se inscreve como contribuição para a área da sustentabilidade na construção civil brasileira. A produção se mostra necessária, bem como a criação de laboratórios de desempenho térmico nas Instituições de Ensino Superior, como resposta a tantos novos materiais lançados anualmente no mercado e desenvolvimento de outros com respostas ao desenvolvimento sustentável, incluindo-se o quesito de eficiência térmico-energética .

Essa afirmação está fundamentada em elaborações de estudos teóricos, especialmente os que se dedicam a área de conforto ambiental e eficiência energética, ao desenvolvimento de soluções inovadoras que atendam aos critérios de desempenho térmico, como os que se preocupam com a sustentabilidade garantida em determinações legais, os que buscam referendar o setor da construção civil brasileira como necessitados de migrar a um novo patamar de qualidade.

Essas elaborações também contribuem para elucidar a necessidade de se buscar a ampliação do espaço profissional do arquiteto e do engenheiro, uma vez que podem contribuir para diminuir e eliminar barreiras que têm dificultado o desenvolvimento, acesso e uso de materiais e técnicas de menor impacto ambiental em projetos de edificações. Além dessas existem possibilidades de atendimento a necessidades de eficiência térmica e energética como referências de sustentabilidade, considerando-se os que se comprometem a atendê-la.

Reconhece-se que a sustentabilidade é considerada um dos principais objetivos da construção civil do século XXI, dada a necessidade de se modificar o panorama de ser uma das atividades menos sustentáveis do planeta pelos recursos naturais consumidos, resíduos sólidos produzidos e emissão de gás carbônico.

Soma-se, ainda, que na virada do século a população mundial alcançou seis bilhões de habitantes e a população urbana superou a rural, com grande pressão sobre o solo edificado, a água e as energias disponíveis, além de acentuar o distanciamento entre o homem e a terra. Constata-se que a

população contemporânea é dependente de edificações para seu resguardo e sobrevivência, sendo grande parte da energia gerada utilizada para climatizar, iluminar e ventilar edificações.

Com esses esclarecimentos, que subsidiam esta pesquisa, é viável e possível encontrar respostas para a questão norteadora:

O equipamento desenvolvido para medição de condutividade e resistência térmica de materiais pelo Método Fluximétrico responde ao que foi desenvolvido?

A formulação dessa questão assegura a enumeração dos objetivos delineados:

geral – desenvolver equipamento para medição da condutividade e resistência térmica de materiais pelo Método Fluximétrico;

específicos – sistematizar o referencial teórico que sustenta a compreensão de métodos para cálculo de propriedades térmicas, com alusão a normas e padrões;

– validar o equipamento desenvolvido a partir de análises e estudos experimentais com amostra de referência;

– apresentar contribuições que possam ampliar as possibilidades de viabilizar técnica-economicamente o Método Fluximétrico como método para medição da resistência térmica e condutividade térmica, em especial na dimensão arquitetônica de conforto e desempenho térmico.

Os pressupostos metodológicos que asseguram a realização deste estudo inserem-se em etapas que se complementam, como a de pesquisa bibliográfica que implicou no levantamento, seleção e sistematização de referências e de informações sobre propriedades térmicas dos materiais e de métodos para sua caracterização, incluindo-se as normas e diretrizes que asseguram e viabilizam o desempenho térmico e a eficiência energética, além de visitas técnicas ao Laboratório de Propriedades Termofísicas (LMTP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Inmetro.

Nesse sentido esclarece-se que foram consultadas referências em livros, revistas, dissertações, teses, publicações sobre determinações legais, *etc.* Com essa sistematização foi elaborado o primeiro e segundo capítulos, que fundamentam o referencial teórico deste estudo.

A fase posterior trata do equipamento e dos ensaios de laboratório. O conhecimento obtido sobre os métodos de medição e cálculos das propriedades térmicas tornou-se essencial para estruturar o experimento, que congrega as

características que o especificam, integrando o terceiro e quarto capítulo.

A apresentação do conteúdo deste estudo contribui para reforçar a sua importância e significação especialmente para a área da arquitetura e engenharia. Ressalta-se que nenhuma atividade da construção civil será válida eticamente se não for sustentável, baseando-se nos três pontos da sustentabilidade: ambiental, social e econômico.

A existência e vigência de normas de desempenho para a construção civil fundamentadas na sustentabilidade constituem subsídios que fortalecem a necessidade de se contribuir para que a aplicação e o cumprimento dessas resultem na manutenção de uma construção confortável, em particular no que tange ao conforto e desempenho térmico, incluindo-se o desenvolvimento de laboratórios regionais e nacionais para atender às novas exigências.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Notas iniciais

A sustentabilidade deveria ser o principal argumento para a construção civil do século XXI, dada a necessidade de se modificar o panorama de ser uma das atividades menos sustentáveis do planeta ao consumir 50% dos recursos mundiais e emitir cerca de 30% de todo o carbono (CIB- Agenda 21). Soma-se a isso que a construção civil é um grande consumidor de energia elétrica, podendo ser responsável por até 50% do consumo de eletricidade nas cidades (AGOPYAN *et al*, 2011; LAMBERTS *et al*, 2011). Esses dados mostram o caráter contraditório de umas das atividades mais importantes para o desenvolvimento econômico e social de um país.

A discussão sobre sustentabilidade e problemas ambientais teve seu início marcado na década de 1970, com a crise do petróleo. Baseada nas questões energéticas e com forte defesa da natureza foi realizada a Conferência das Nações Unidas em Estocolmo, 1972. Na construção civil o reflexo inicial foi quanto aspecto da energia despendida na fase de utilização dos edifícios, e se desenvolveu posteriormente quanto ao nível da energia necessária à produção de elementos construtivos (AGOPYAN *et al*, 2011).

Essa crise também gerou movimentos nos países mais desenvolvidos e mais atingidos, que desencadeou o surgimento da arquitetura bioclimática. Essa nova forma de projetar considera os parâmetros tradicionais de projeto, e integra o programa ao local, tendo como norteadores os fenômenos climáticos e as necessidades energéticas e ambientais (CORBELLA e CORNER, 2011). Avançou-se posteriormente para o que hoje é denominado arquitetura sustentável.

Neste contexto nacional e de expressão mundial o conhecimento das propriedades termofísicas dos materiais somado ao entendimento do comportamento térmico de um material são importantes. Essa afirmativa pode ser justificada por CORBELLA e YANNAS (2013) ao destacar a relevância da caracterização térmica na orientação de tomada de decisão a respeito de qual material utilizar. Assim como ORDENES *et al* (2008) consideram essas

informações uma ferramenta fundamental no diagnóstico do desempenho térmico energético de uma edificação.

SIMIONI (2005) aponta que no Brasil ainda não existe uma cultura de investigação nessa área para materiais de construção, encerrando, portanto uma oportunidade necessária. O autor também menciona a existência de poucos laboratórios nacionais com equipamento para a realização de ensaios nessa área.

A NBR 15.220: 2005 é um dos amparos técnico-legais brasileiro vigentes. A primeira parte é destinada a definição conceitual dos termos e propriedades térmicas que permitem a compreensão dessa normativa, além de apresentar a simbologia e unidades utilizadas. A Parte 2 apresenta o método para cálculos das propriedades térmicas para paredes externas, além de outras Tabelas com valores das propriedades físicas, como condutividade térmica e calor específico de uma lista de materiais, coeficientes de troca de calor superficial por convecção e radiação – internos e externos. Para outros e novos materiais, a Parte 4 e Parte 5 são reservadas e sistematizam com aporte de referências normativas internacionais o Método da Placa Quente Protegida e Método Fluximétrico, respectivamente. Pelas metodologias apresentadas é possível determinar a Resistência Térmica do produto por ensaio em Laboratório e de outras propriedades térmicas por dedução matemática.

Outra referência essencial é a NBR 15.575: 2013 que parametriza diferentes qualidades da construção civil, incluindo as exigências de habitabilidade para o segmento habitacional de até cinco pavimentos, particularizando o desempenho térmico. Destacam-se três das seis partes que a constitui: Parte 1 – Requisitos Gerais, Parte 4 – Vedações verticais internas e externas e Parte 5 – Coberturas. Essa Norma apresenta critérios quantitativos e mensuráveis a partir de propriedades térmicas no que se refere ao desempenho térmico da edificação em condições naturais, considerando as zonas bioclimáticas definidas na norma citada acima (CBIC, 2013).

Destaca-se, que a grande maioria dos valores disponibilizados nas normas citadas e utilizados por profissionais e pesquisadores da área são resultados de pesquisas feitas no estrangeiro e que podem não representar dados confiáveis para os produtos e processos nacionais, reforçando a carência de um banco de dados brasileiro (SIMIONI, 2005).

EDWARDS (2008) enfatiza que o valor de uma edificação e a evolução das expectativas sobre a qualidade do projeto permeiam pela adoção de um

partido de implantação de qualidade, considerando-se os aspectos da sustentabilidade, bem como aproveitando-se ao máximo a capacidade térmica e elaborando-se o estudo e o uso de materiais termicamente eficientes.

Subsidiado pelas prévias informações, avança-se no entendimento dos métodos para medição da resistência térmica de materiais.

2.2 Métodos para medição da resistência térmica

Os seis métodos para medição da resistência térmica de materiais (propriedade que está relacionada à oposição de um material à transmissão de energia térmica) são denominados: Método da Placa Quente Protegida, Método Fluximétrico, Método da Linha Fonte ou Fio Quente, Método do Calorímetro à Água, Método do Disco Quente e Método do Tubo Quente (GUTHS, 2014), como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Métodos para medição da resistência térmica, adaptado de SIMIONI (2005).

Métodos	Materiais Campo de aplicação	Restrição e/ou observações	Normalização Internacional e/ou nacional
Método da Placa Quente Protegida	materiais sólidos ou granulares, compactados ou não	materiais com resistência térmica maior ou igual a 0,02 m ² C/W.	Sim
Método Fluximétrico	Materiais homogêneos	Necessita de calibração periódica.	Sim
Método da Linha Fonte ou Fio quente	materiais homogêneos nas fases sólida ou líquida, em especial materiais úmidos	-	Não
Método do Calorímetro à Água	materiais diversos	-	Não
Método do Disco Quente	plásticos sólidos e vidros	materiais com espessura entre 3 e 25 mm diâmetro superior a 75 mm; necessita de calibração periódica.	Não
Método do Tubo Quente	Isolante de tubulações	-	Não

Neste trabalho são detalhados somente os dois primeiros por serem métodos consagrados e normalizados no exterior e no Brasil e sobre os quais se teve mais detalhes e análises de resultados.

Destaca-se que a base teórica desses métodos é o processo de transferência de calor. A transmissão de calor ocorre sempre que se estabelece um gradiente térmico entre dois meios ou faces opostas de um corpo, e

acontece sempre no sentido do elemento de maior temperatura para o de temperatura inferior (Figura 1).

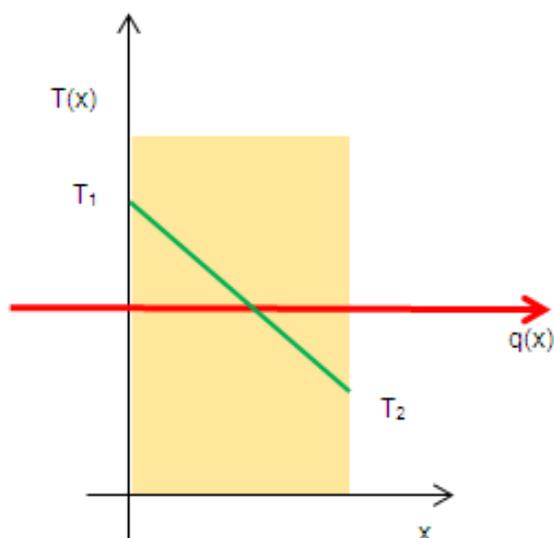


Figura 1 – Campo térmico- regime permanente.

Para os métodos de interesse evidencia-se a transferência de calor por condução (diferença de temperatura e contato superficial), em condições unidimensionais e em regime estacionário. O termo unidimensional se refere ao fato de que o fluxo e a temperatura, variáveis espaciais dependentes, são funções somente da coordenada X e ocorre somente nessa direção. Por sua vez o regime estacionário é dado quando a temperatura em cada ponto do sistema, for independente do tempo (INCROPERA *et al*, 2014).

A transferência de calor por condução é regida pela *Lei de Fourier* e sua expressão define além da resistência térmica a condutividade térmica (propriedade que rege a maior ou menor facilidade com que um corpo, submetido a um gradiente de temperatura, conduz calor).

2.2.1 Método placa quente protegida

O método da placa quente protegida é regulamentado por normas em contínuas revisões como a ISO 8302 (1991), ASTM C177 (1997), AFNOR (1972), BS 874 (1986), DIN 52612 (1984) e no Brasil pela NBR 15.220: 2005 – Parte 4 (GUTHS, 2014).

É um método primário ou absoluto para determinação da resistência térmica $|R|$ e condutividade térmica $|k|$ de materiais sólidos ou granulares, compactados ou não, para $R > 0,02 \text{ m}^2\text{K/W}$ e $k < 2 \text{ W/(m.K)}$ (NBR 15.220: 2005).

A montagem do equipamento pode ter configuração simétrica (duas amostras) ou assimétrica (uma amostra). Adota-se para descrição o primeiro, porque de acordo com MOURA (1993), o assimétrico não é muito usual pela necessidade de se utilizar um dispositivo de controle para minimizar o fluxo de calor na direção oposta à amostra.

O princípio desse método pela configuração simétrica (Figura 2) é a submissão de duas amostras idênticas planas e paralelas a um fluxo de calor conhecido unidirecional perpendicular em regime permanente, produzido por uma placa aquecedora, posicionada horizontalmente entre as amostras. A placa aquecedora é composta de seção central de medição e anel de guarda de forma a reduzir as perdas de calor laterais (NBR 15.220: 2005). No extremo de cada corpo de prova é colocado uma placa fria com fluido de refrigeração, com a finalidade de dissipar o calor atravessado. A diferença média de temperatura é determinada usando-se os termopares montados nas superfícies das amostras ou das placas (Figura 2 e Figura 3). Para minimizar as perdas de calor, o conjunto é envolvido por isolante e colocado em uma caixa.



Figura 2 – Configuração simétrica de ensaio do método placa quente protegida, NBR 15.220 (2005).

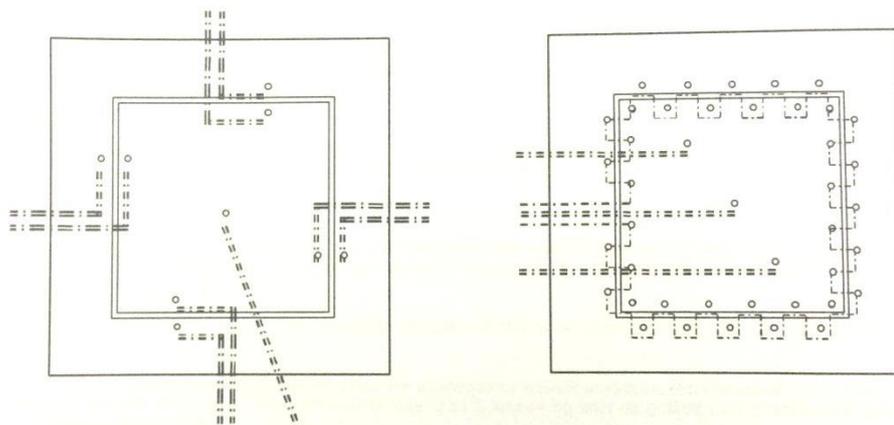


Figura 3 –Configurações possíveis de disposição dos termopares na placa quente com anel de guarda, NBR 15.220 (2005).

2.2.2 Método fluximétrico

O Método Fluximétrico é um método secundário desenvolvido a partir da necessidade industrial de medição da condutividade térmica dos vários novos tipos de isolamentos térmicos produzidos a partir de 1960, de forma mais simples e rápida, se comparado ao método da placa quente protegida (GUTHS, 1990 *apud* SIMIONI, 2005).

Este método é considerado secundário porque demanda uma calibração periódica dos fluxímetros, dispositivos que medem o fluxo de calor. A calibração se dá pela submissão dos fluxímetros a um fluxo de calor conhecido.

As normas ATSM C518 (1985), a BSI BS 874 (1986) a NF T56- 124 (1991), ISO 8301 (1991) e a NBR 15.220: 2005 – Parte 5 são referências normativas do procedimento para medição e cálculo da condutividade térmica de materiais em regime permanente (GUTHS, 2014).

O equipamento a ser utilizado no Método Fluximétrico, para medição da resistência térmica, pode ser desenvolvido de três formas, sempre com a utilização de uma placa quente e uma placa fria dispostas nas extremidades, somado ao uso de um ou dois fluxímetros ou uma ou duas amostras (Figura 4).

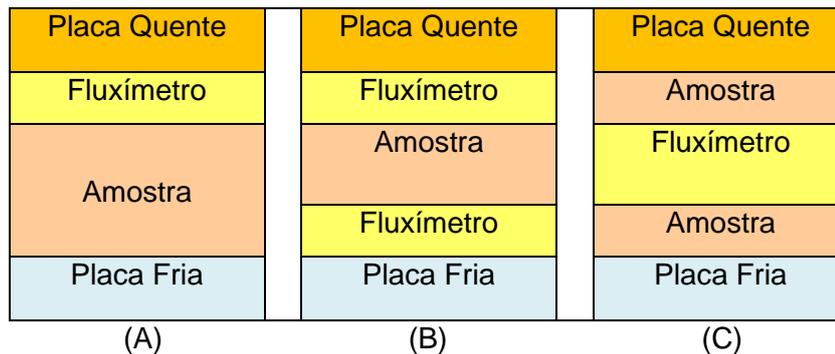


Figura 4 – Configurações possíveis de ensaio do método fluximétrico, NBR 15.220 (2005).

O princípio de medição da resistência térmica em regime permanente pelo Método Fluximétrico é realizado a partir da aplicação e determinação da densidade de fluxo de calor constante que atravessa uma amostra. O conhecimento dos dados registrados pelos fluxímetros e da diferença de temperatura entre as faces permite o cálculo das duas propriedades térmicas pretendidas: resistência e condutividade térmica NBR 15.220: 2005– Parte 5.

NICOLAU *et al* (2002) destacam que o método em discussão apresenta algumas dificuldades, como a influência das resistências de contato entre o fluxímetro e a amostra, somado a dificuldade de se aferir as temperaturas superficiais da amostra, bem como a necessidade de calibração dos fluxímetros. E acrescenta que a maior dificuldade provém das fugas laterais de calor que se verifica na amostra e que se torna responsável pela diferença entre os fluxos medidos pelos fluxímetros superior e inferior.

GUTHS (1990) *apud* SIMIONI (2005), baseado na hipótese que nas áreas periféricas ocorrem fugas de calor, e que as linhas de fluxo na região central são unidimensionais, ou seja, o fluxo que atravessa a parte central do transdutor superior atravessa também o transdutor inferior, sugere, portanto, a área de medição seja adotada como a área central dos fluxímetros. Essa nova forma de medição pressupõe a construção de novos fluxímetros com distintas áreas sensíveis: a área central e a área periférica, a exemplo do adotado no método da placa quente (NICOLAU *et al*, 2002).

A maior vantagem desse método é a simplicidade de montagem, de concepção e de uso, se comparado à Placa Quente Protegida, também apresenta mais um outro fator positivo, que é a determinação de duas propriedades no lugar de uma apenas (NICOLAU *et al*, 2002).

A NBR 15.220: 2005 – Parte 5 estabelece critérios a serem seguidos para confecção das placas quente e fria, sistematizados na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações normativas para placas quente e fria

	Material	Soluções tecnológicas	Dimensões laterais	Obs. Dimensões	Desvio de planeza	Emissividade
Placa Quente e Placa Fria	Alta condutividade térmica (alumínio/ cobre)	1. Circuito elétrico com densidade de potência uniforme 2. Circuito de líquido com temperatura controlada	$\geq 2x$ a área da medição do fluxímetro	Superfície isotérmica da Placa Fria \geq superfície da Placa Quente	$< 0,025\%$ ou $0,1\text{mm}$ (prevalecendo o maior dos valores)	$\geq 0,9$

Quanto ao corpo de prova, a norma brasileira regulamentadora do ensaio de condutividade térmica pelo Método Fluximétrico aponta as especificações do corpo de prova a serem respeitadas a fim de garantir sua exequibilidade (Tabela 3).

Tabela 3 – Especificações normativas para corpo de prova

	Dimensões Laterais	Espessura mínima	Espessura Máxima	Desvio de planeza	Desvio de paralelismo	Resistência Térmica
Corpo de prova	= a menor dimensão das superfícies quente e fria do equipamento	Corresponde nte a resistência térmica mínima de $0,1\text{m}^2.\text{K/W}$	$0,15L$ L = menor dimensão lateral do corpo de prova	$< 0,5\text{mm}$ ou 1% da largura, prevalecendo o maior desses dois valores.	$< 0,5\text{mm}$ ou 1% da largura, prevalecendo o maior desses dois valores.	$\geq 0,1\text{m}^2.\text{K/W}$

Para o elemento que caracteriza o método, a NBR 15.220:2005 – Parte 5 também apresenta os limites a serem atendidos na definição do fluxímetro como organizado na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações normativas para Fluxímetros

	Dimensões laterais	Desvio de planeza	Precisão de medição do sinal elétrico	Calibração
Fluxímetro	$\geq 2x$ a área da medição (zona ativa) e = dim lateral menor das placas	$< 0,025\%$ da menor de suas dim. Laterais ou $0,1\text{mm}$ (prevalecendo o maior dos valores)	$< 1\%$ em toda a faixa de utilização	Precisão Temperatura $\geq 1\%$

Importante destacar que o fluxo de calor que atravessa a amostra é obtido sem a necessidade de se conhecer a potência injetada como no caso da Placa Quente Protegida.

2.2.3

Experiências e considerações sobre o método placa quente protegida e método fluximétrico

A grande maioria das experiências publicadas antecede a assinatura da norma no Brasil. Contudo, são diversas as contribuições dadas pela caracterização e teste dos métodos, assim como pela elucidação do montar e executar o equipamento para medição da resistência térmica de um dado material homogêneo empregado na construção civil. Vale ressaltar que as contribuições também são somadas pelas considerações finais, entendidas às vezes por como se tratar um dado, análise de erros e resultados, além de conclusões assertivas e de novas propostas e indicativos de futuros experimentos.

SIMIONI (2005) apresenta subsídios para a escolha e aplicação do método a ser utilizado no cálculo da condutividade térmica. Sua contribuição perpassa por um levantamento de trabalhos já realizados sobre os dois referidos métodos e avança com análises quanto aos erros possíveis do Método Fluximétrico. Segundo SIMIONI (2005) o principal problema dos ensaios experimentais está na diferença percentual do fluxo de calor lido pelo fluxímetro superior e inferior, que deveriam ser ao menos iguais em uma área central. A fuga de calor lateral é dita como uma questão ainda não compreendida do método. Suas avaliações para diminuição de erros e fugas laterais abrange desde a observância em especial do isolamento lateral com adoção de espessura superior a 5 cm, como a maximização do anel de proteção dos fluxímetros, a utilização de fluxímetros com baixa resistência térmica, a diminuição da interferência convectiva e a realização de ensaios com a placa fria com temperatura inferior a 22°C (ou igual a temperatura ambiente).

Em entrevista realizada com o Professor Dr. Saulo Guths do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termo-físicas – Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, no dia 27/08/2014, o qual afirma que a próxima etapa está na redução do custo de montagem desses equipamentos, em especial do Método Fluximétrico. Aponta valores aproximados de R\$ 60.000,00 para nacionais e de valores iguais ao dobro para importados. A necessidade está

pautada nas últimas discussões da ABNT, da qual vem participando com demais interessados, incluindo-se as indústrias de material de construção, para conceber uma certificação para todos os produtos comercializados no Brasil, tendo pois um selo indicativo da Resistência Térmica atestado em conformidade com a NBR 15.220: 2005.

GUTHS (2014) aponta também a demanda para se avançar em pesquisas que viabilizem a determinação da propriedade térmica calor específico pelo Método Fluximétrico. Acredita que a solução estaria na adoção da placa de resistência aquecedora com anel de guarda como no Método da Placa Quente Protegida, para controle das perdas térmicas laterais. Acrescenta que o proposto exigiria um número maior de ensaios para comprovação de sua validade e eficiência.

Após explanação e entendimento dos dois métodos, é possível a partir das literaturas normativas anteriormente listadas, tendo como principal referência a NBR 15.220: 2005 – Parte 4 e Parte 5, elaborar uma síntese comparativa desses métodos empregados para medição da resistência térmica de materiais como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Tabela comparativa do método de placa quente e do método fluximétrico.

	Método da Placa Quente	Método Fluximétrico
Tipo	Primário- Absoluto	Secundário- Relativo
Necessita de Calibração	Não	Sim
Corpo de prova	Sólidos e granulares-compactados ou não	Homogêneo
Propriedades Térmicas medidas	Resistência Térmica Condutividade Térmica	Resistência Térmica Condutividade Térmica Calor específico (em estudo)
Regime de fluxo de calor	Permanente	Permanente
Tempo para obtenção de regime permanente	≈ 25 a 30 horas	≈ 2 horas
Fluxímetro	Não	Sim
Temperaturas de ensaio	Sem restrição	-30°C <T<+80°C
Configurações	2	3
Incerteza de medição	< 3%	Não inclusa nas Normas
Grau de repetibilidade	> 1%	Não incluso nas Normas
Custo	Alto	Baixo

3 Descrição do equipamento

3.1 Notas iniciais

Os principais conceitos e metodologias apresentados na Revisão Bibliográfica foram imprescindíveis para a continuidade desse estudo que tem como principal objetivo o desenvolvimento e montagem de um equipamento para medição da Resistência e Condutividade Térmica de um material.

O método escolhido foi o Fluximétrico devido à simplicidade de montagem, de concepção e de uso, somada à rapidez de resultados quando comparados a placa quente protegida. O equipamento é de configuração simétrica, com dois fluxímetros e um corpo de prova, ou seja, o empilhamento horizontal de placas com fluxo de calor vertical ascendente é constituído nessa ordem por: uma placa quente (resistência aquecedora), um fluxímetro, a amostra a ensaiar, um segundo fluxímetro e uma placa fria (Figura 5).

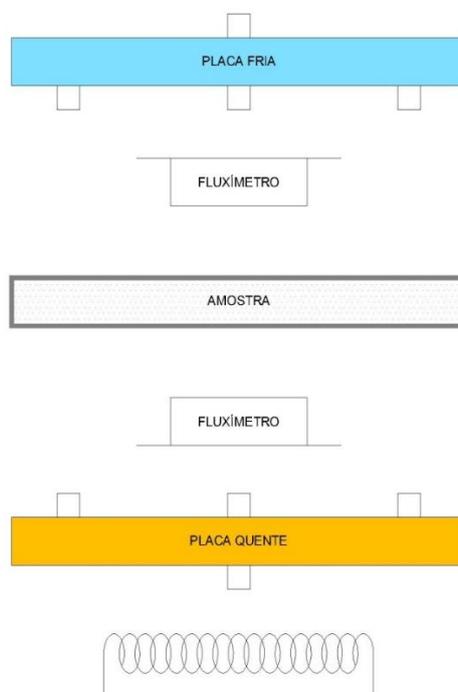


Figura 5 – Configuração final do Equipamento desenvolvido para Método Fluximétrico.

Todo o conjunto é isolado do ambiente por meio da colocação de uma envoltória de isolante térmico de placas de fibras cerâmicas e lã de rocha acondicionados em uma caixa de madeira. Esse isolamento lateral reforçado foi projetado para minimizar os fluxos de calor pelas laterais dos fluxímetros e amostras, com resistência térmica aproximada de $1,70 \text{ m}^2\text{C/W}$ (Figura 6 e Figura 7).



Figura 6 – Caixa de madeira isolada termicamente para acondicionamento do equipamento do Método Fluximétrico.

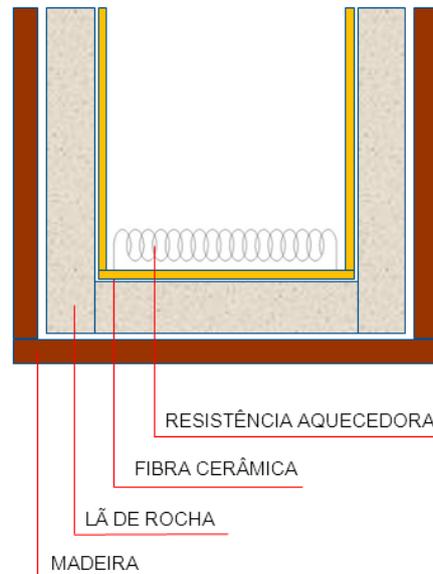


Figura 7 – Desenho esquemático- caixa com isolamento para equipamento.

3.2 Placa Quente

A placa quente é a unidade de aquecimento do sistema. O material selecionado para sua construção foi o alumínio, por apresentar alta condutividade térmica (204 W/m.K), baixa inércia térmica, alta resistência à corrosão e baixa densidade volumétrica. As dimensões adotadas para a placa são de $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$. O aquecimento é dado por uma resistência aquecedora alimentada por uma fonte de “tensão-corrente” regulável (Figura 8 e Figura 9).

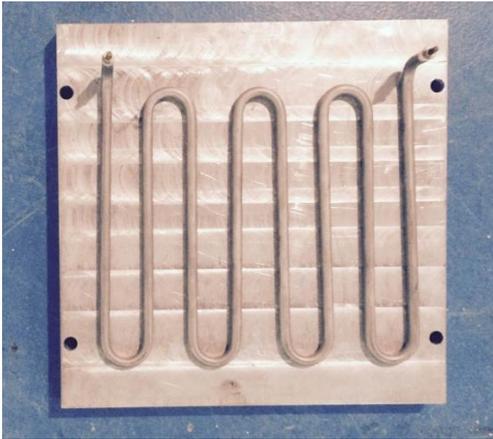


Figura 8 – Resistência Aquecedora em placa quente.

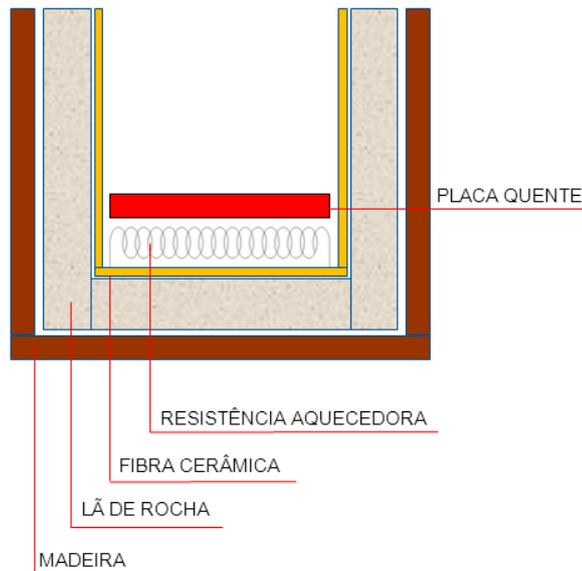


Figura 9– Desenho esquemático de montagem do equipamento- Placa Quente.

3.3 Placa Fria

A Placa Fria é a unidade de resfriamento do sistema com finalidade de dissipar o calor. O material selecionado para sua confecção é o mesmo da placa quente, ou seja, em alumínio e com dimensões de 300 mm x 300 mm x 30 mm. O resfriamento da placa foi a partir do condicionamento do ar ambiente.

Outra forma possível de resfriamento desenvolvido para a manutenção da temperatura da amostra igual à temperatura do ambiente foi a partir da circulação de fluido em canais usinados na placa fria. Nesse caso a placa fria adotada é a composição de duas, tendo 60 mm de espessura.

Os desenhos dos canais para a circulação de líquido foram elaborados em *Computer-aided design* (CAD) e usinados pela Empresa Dancor, com uma fresa de aço na própria placa para criação de uma superfície isotérmica e redução da inércia térmica (Figura 10). Para a vedação dos canais utilizou-se anel de borracha. O fechamento da placa é dada por quatro parafusos; e roscas foram instaladas na entrada e na saída da placa para conexão das mangueiras (Figura 11, Figura 12, Figura 13).



Figura 10 – Processo de usinagem da Placa Fria, Empresa Dancor (2014).

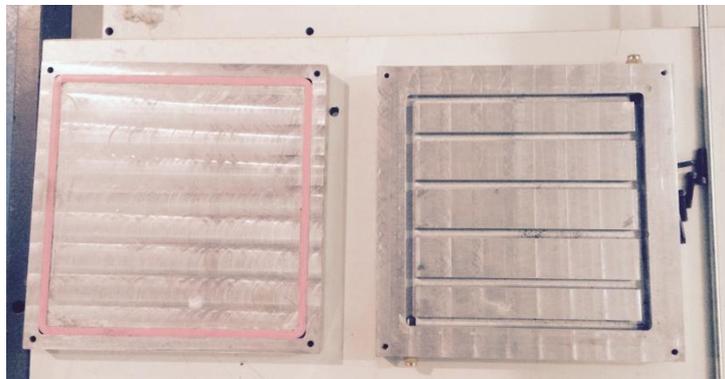


Figura 11 – Placa Fria depois de usinada (aberta)- borracha de vedação e canais de circulação de água.



Figura 12 – Placa fria (fechada).

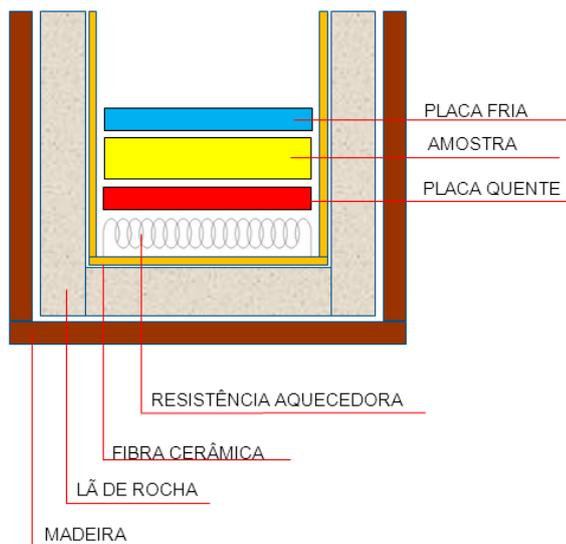


Figura 13 – Desenho esquemático de montagem do equipamento- Placa Fria.

Ressalta-se que o controle da temperatura e/ou da vazão do líquido é essencial para se ter um fluxo unirecional e evitar as trocas de calor por convecção.

Afirma-se, ainda, que a placa fria tem também a função de garantir uma carga de aprisionamento minimizando a formação de espaço de ar nas interfaces amostra-fluxímetros.

3.4 Sensores de medição

Para a montagem do equipamento e monitoramento das variáveis interdependentes em estudo, fluxo e temperatura, foram utilizados fluxímetros e termopares, respectivamente. Esses foram instalados nas placas quente e fria conforme Figura 14, caracterizando a montagem e desenvolvimento completo do equipamento.

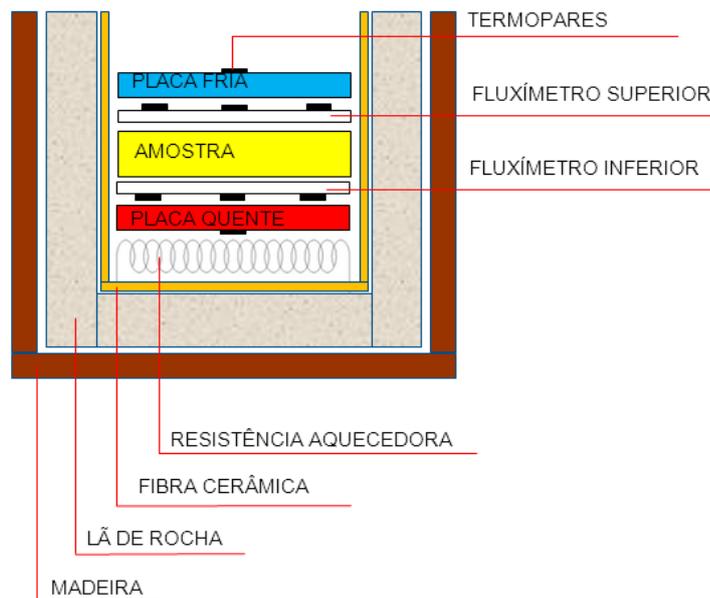


Figura 14 – Desenho esquemático do equipamento montado- sensores.

3.4.1 Fluxímetros

Os dois fluxímetros utilizados para montagem do equipamento foram o HFP01 (Figura 15) – transdutor de fluxo de calor a gradiente transversal da Hukseflux, composto por núcleo e anel de guarda conforme orientações

normativas, com 80 mm de diâmetro e 5 mm de espessura, eles foram posicionados no centro entre as placas e o corpo de prova.

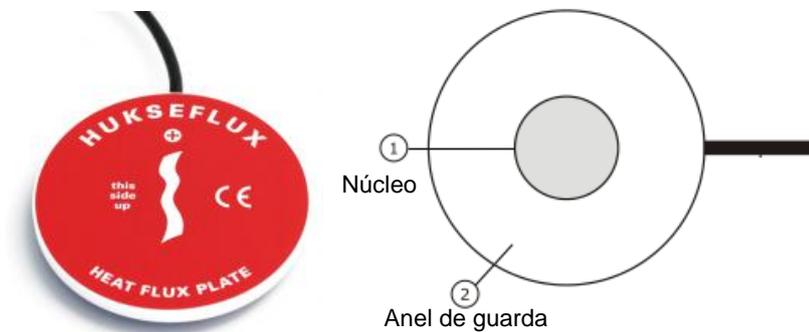


Figura 15 – Sensor de fluxo de calor HFP01 da Hukseflux, vista externa e interna, HUKSEFLUX (2014).

O sensor existente no fluxímetro HFP01 é uma pilha termoelétrica. O funcionamento é de forma passiva, visto que o HFP01 gera um *output* com uma voltagem proporcional ao fluxo de calor no local onde está instalado. O cálculo do fluxo de calor é dado pela divisão do fluxo de calor medido pela sensibilidade do sensor (HUKSEFLUX, 2014), (Anexo 2 e Anexo 3).

A medição do fluxo pelo equipamento é limitada a região central do sensor por se acreditar que suas linhas possuem uma orientação uniforme e que nas áreas periféricas existe a possibilidade de ocorrerem fugas de calor.

Nos ensaios não foi considerada a resistência térmica do sensor por ser constituído de material cerâmico e plástico (HUKSEFLUX, 2014), ou seja, resistência térmica pequena que não apresenta interferência nos dados coletados.

Na Tabela 6 apresentam-se as especificações do fluxímetro.

Tabela 6 – Especificações do fluxímetro Hukseflux HFP01

Sensibilidade (nominal):	50 $\mu\text{V}/\text{W.m}^{-2}$	Flux 01: 59,28 $\mu\text{V}/\text{W.m}^{-2}$	Flux 02: 60,27 $\mu\text{V}/\text{W.m}^{-2}$
Faixa de temperatura	- 30 a +70°C		
Sensor de Resistência térmica	< 6.25 10 ⁻³ Km ² /W		
Gama de medição (alcance)	+2000 a -2000 W.m ⁻²		
Precisão típica esperada (12 h)	Dentro +5%/-15% em solo mais comum,		
Rastreabilidade de calibração	dentro de 5%/-5% em paredes.		
Dimensões:	NPL, ISSO 8302/ASTM C177 80 mm x 5 mm		

Os fluxímetros adquiridos foram calibrados pelo Método Placa Quente Protegida, pelo Laboratório Nacional de Física (NPL) do Reino Unido de acordo com a ISO 8302 e ASTM C177, conforme informação do fabricante Hukseflux (Anexo 01).

3.4.2 Termopares

Para determinação das temperaturas superficiais de um corpo de prova foram utilizados termopares do tipo “K”. Essa escolha foi considerando as normas exigidas pelo processo e a possibilidade de obtenção. A Tabela 7 relaciona as características do termopar tipo “K”.

Tabela 7 – Características de termopares, GUTHS e NICOLAU (s.d.)

Tipo	Elemento positivo	Elemento negativo	Poder Termomel a 25°C ($\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$)	Faixa de temperatura a usual	Vantagens	Restrições
K	Cromel	Alumel	40.5	0 a 1260°C	-Indicado para atmosfera oxidante -Para faixa de temperatura elevada fornece rigidez mecânica melhor que os tipos S ou R e vida mais longa do que o tipo J	-Vulnerável em atmosferas redutoras, sulfurosas e gases como SO ₂ e H ₂ S.

Destaca-se a vantagem do termopar tipo “K” ser indicado para atmosfera oxidante, fator importante a ser considerado em cidades litorâneas como o Rio de Janeiro.

Os limites de erro para esse tipo de termopar com junta de referência a 0°C, de acordo com a norma ASTM-E 230/77 são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Limites de erro para termopar tipo “K”, GUTHS e NICOLAU (s.d.)

Tipo	Limites de Erro		
		Padrão (escolher o maior)	Especial (escolher o maior)
K	-200 a 0°C	$\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0.75\%$	-
	0 a 1250°C	$\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0.75\%$	$\pm 1.1^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0.4\%$

Os 16 termopares adquiridos são calibrados de fábrica, contudo, realizou-se uma calibração prévia pelo Método Quente e Frio¹ porque segundo GUTHS e NICOLAU (s.d.), reduzem os erros.

3.5 Sistema de automação

Os equipamentos suplementares necessários para a estruturação do ensaio são apresentados na Figura 16 e Figura 17.

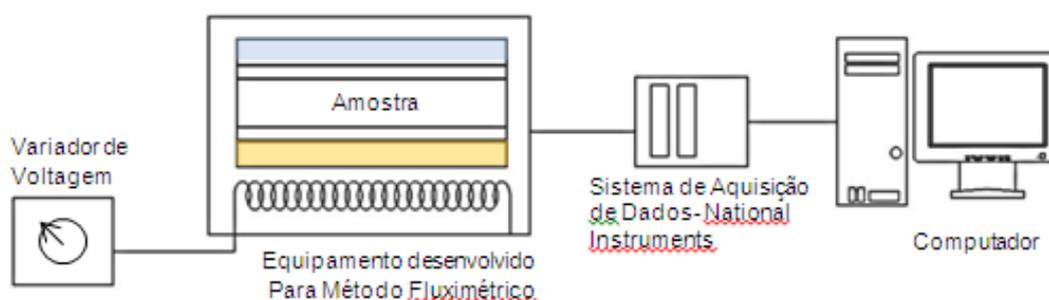


Figura 16 – Desenho esquemático de bancada experimental.

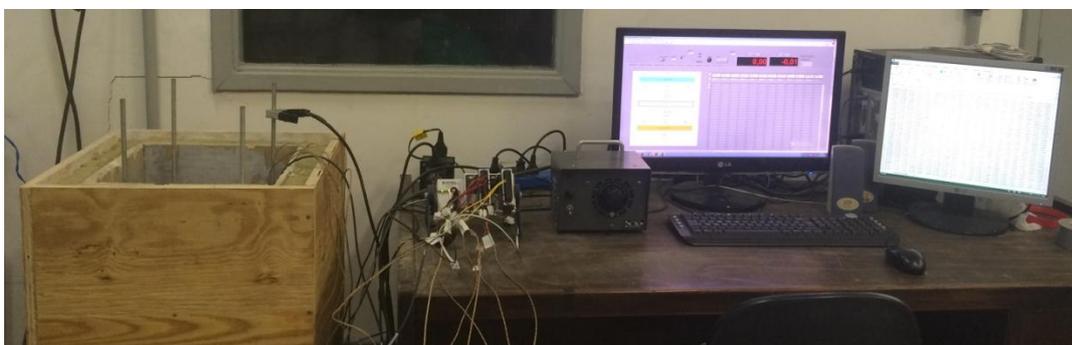


Figura 17 – Bancada experimental.

¹ Água em ebulição (100°C) e gelo (0°C).

A alimentação da resistência aquecedora é dada por uma fonte de corrente regulável. As temperaturas e fluxos de calor durante o experimento foram lidas por um sistema de aquisição de sinais da marca National. Esse foi conectado a um microcomputador. Em um intervalo de tempo os dados são armazenados e por uma interface gráfica desenvolvida esses são transformados em planilhas editáveis.

4

Programa experimental

4.1

Notas iniciais

Os experimentos de medição da resistência e condutividade térmica de uma amostra, concedida pelo Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), foram realizados pelo Método Fluximétrico como forma de validação do equipamento desenvolvido, em conformidade com as normas nacionais e internacionais vigentes.

O ensaio experimental foi realizado no Laboratório de Estruturas e Materiais da Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro (LEM-DEC-PUC-Rio), baseado na NBR 15.220: 2005 Desempenho Térmico de Edificações – Parte 5 e na norma ASTM CT 518 (1991), entre os dia 10 e 26 de janeiro de 2015.

No total foram realizados nove ensaios, quatro desses (Ensaio A, B, C e D) para caracterização térmica do material com aferição das propriedades de condutividade e resistência térmica. Esses e os outros cinco foram para conhecimento do funcionamento do equipamento, compreensão da parte e do todo.

4.2

Materiais- amostra

Para a validação do equipamento confeccionado, utilizou-se uma amostra de 300 mm x 300 mm fornecidas pelo CB3E- (UFSC), cuja as propriedades térmicas foram ensaiadas e obtidas pelo método primário, em uma temperatura média de 25°C, com incerteza estimada de 3% (Tabela 9).

Tabela 9 – Propriedades térmicas da Amostra do LMTP, CB3E (UFSC)

Numero de Ensaio	Denominação	Espessura (mm)	Massa específica (kg/m ³)	Condutividade Térmica (W/m°C)	Resistência Térmica (m ² °C/W)
1	Amostra LMPT-1	55,0	47,1	0,0347	1,58

Antecede ao ensaio a identificação e medição do corpo de prova que é numerado de modo a identificá-lo (Figura 18 e Figura 19). Para a caracterização física da amostra foram utilizados uma balança digital para massa com precisão de 0,01g ou 0,2%, e um paquímetro com resolução de 0,05 mm para determinação das dimensões laterais L_1 e L_2 e da espessura média e (três pontos em cada um dos quatro lados da amostra). Destaca-se que o procedimento de conferência de massa e dimensões foi realizado também após o experimento.



Figura 18 – Corpo de prova.



Figura 19 – Identificação de corpo de prova- LMTP-01.

Os dados coletados e calculados antes e após o ensaio conferem com os fornecidos pelo CB3E (UFSC). Salienta-se que foram utilizados espaçadores para limitar a espessura no momento do teste, e reduzir a possibilidade de alteração da massa específica, uma vez que o material testado é compressível.

4.3 Condições do Laboratório

O ambiente do LEM-DEC-PUC-Rio, Laboratório de Hidráulica e Térmica dos Materiais, para a realização dos ensaios é climatizada com controle de temperatura de 23°C (Figura 20).

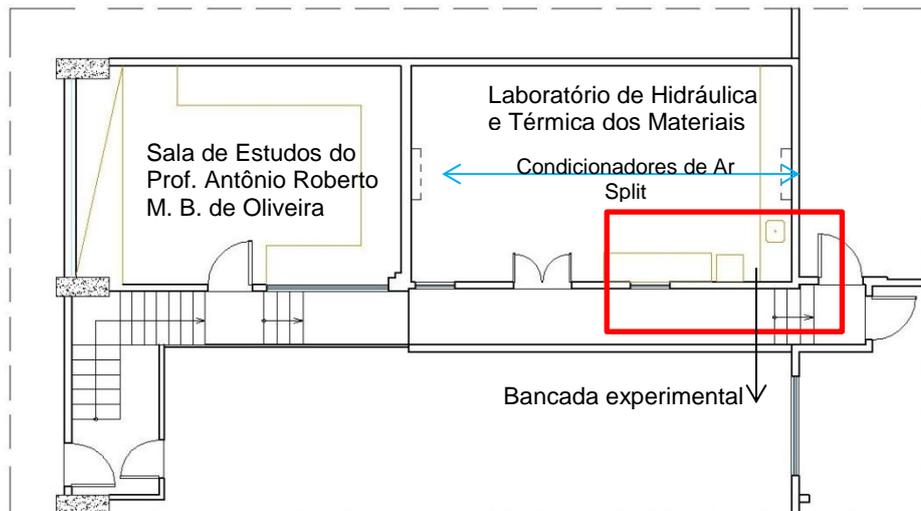


Figura 20- Planta Baixa do Laboratório de Hidráulica e Térmica dos Materiais-Mezanino do LEM-DEC- PUC-Rio.

4.4

Processo de medição

O processo de medição dos Ensaios A, B, C e D foi realizado em três etapas.

A primeira foi com a aplicação de uma densidade de fluxo de calor constante, e através da área central de medição dos dois fluxímetros e da área central do corpo de prova em forma de placa.

A seguir fez-se a determinação da densidade de fluxo de calor atravessando o corpo de prova a partir do sinal fornecido pelos fluxímetros (f.e.m), e da(s) constantes de calibração dos fluxímetros, após a validação das condições de regime permanente. O regime foi considerado permanente ao se ter obtido no mínimo cinco medições sucessivas de temperaturas das faces quente e fria dos corpos de prova e do fluxo de calor, sem ser notada nenhuma variação contínua (NBR 15.220: 2005).

Os ensaios tiveram duração média de 120 minutos (duas horas) e o regime estacionário foi atingido em todos os casos após uma hora e meia. Os valores médios utilizados são dos últimos 15 a 20 minutos finais, quando os valores lidos por termopares e fluxímetros correspondiam resultados lineares pretendidos. O programa foi configurado para fazer leituras a cada 3 segundos.

Os processos de transferência de calor nos ensaios realizados pelo

Método Fluximétrico podem ser quantificados por meio de equações apropriadas. Para a resistência térmica usa-se a *Lei de Fourier*, dada pelo quociente da diferença de temperatura entre as faces do corpo de prova e da densidade de fluxo de calor:

$$R = \frac{T_q - T_f}{(Q)} \quad (1)$$

onde

R: resistência térmica ($m^2 \cdot ^\circ C/W$);

Q: densidade de fluxo de calor dissipado (W/m^2);

T_q , T_f : temperaturas médias nas superfícies da amostra, quente e fria respectivamente (em graus centígrados- $^\circ C$)

Considerando-se que a amostra é homogênea, é possível determinar por dedução matemática a condutividade térmica do material:

$$k = e / R \quad (2)$$

onde

k: condutividade térmica ($W/m \cdot ^\circ C$);

R: resistência térmica ($m^2 \cdot ^\circ C/W$);

e: espessura da amostra (m).

4.5 Resultados e discussões

O desenvolvimento do equipamento em conformidade com as normas ocorreu em duas etapas que se complementam e o validam.

Os ensaios realizados ao longo de aproximadamente duas semanas tiveram como objetivo não somente aproximar ou obter resultados das propriedades térmicas do material próximos do fornecido pelo CB3E (UFSC), mas também conhecer as pontecialidades e comportamento do equipamento desenvolvido após estudos e testes. No total foram realizados nove ensaios, quatro desses (Ensaio A, B, C e D) para caracterização térmica do material com aferição das propriedades de condutividade e resistência térmica.

Após a montagem da bancada experimental para uma maior confiabilidade

foram realizados ensaios iniciais usando 16 termopares (T1 a T16), dispostos nas duas maiores superfícies das placas quente e fria. Os fluxímetros foram posicionados na parte central junto ao termopar T4 e T10 (Figura 21).

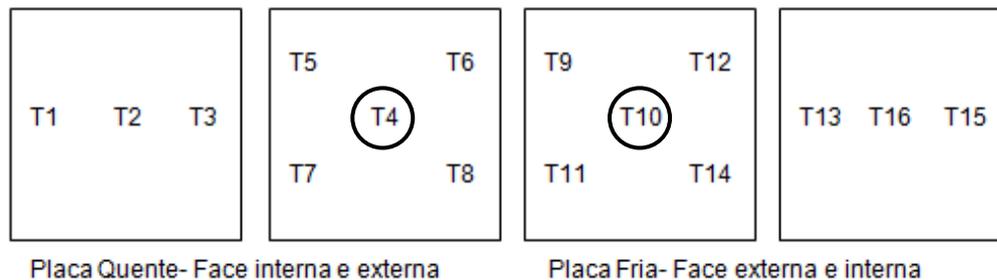


Figura 21 – Disposição dos dezesseis termopares e dos dois fluxímetros.

A posição dos termopares na placa quente e na placa fria foram inicialmente para verificar a distribuição qualitativa das temperaturas. Observou-se que os Termopares T1 e T3 registravam temperaturas maiores que o Termopar T2, justificado pela alimentação e aquecimento da resistência serem feitos nas extremidades e depois ser distribuído o calor ao longo da mesma. Dado as características térmicas da placa de alumínio confeccionada essa diferença de registro nas temperaturas não se repetiu na face oposta à resistência, apresentando isoterмия em T4 a T8. A variação nesses cinco termopares foi de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Na placa fria as diferenças lidas entre os termopares de uma mesma face também foram pequenas, menores que $0,5^{\circ}\text{C}$ em atendimento à norma NBR 15.220: 2005. Portanto, obteve-se em cada face a homogeneidade térmica desejada durante todo o ensaio, validando a escolha do material e dimensões definidas para as placas, bem como o funcionamento da resistência aquecedora adotada.

As leituras efetuadas nos fluxímetros apresentaram flutuações características registradas em literatura durante todo o ensaio. Constatou-se a diferença nos transdutores de fluxo de calor em torno de 20%, quando caracterizado regime permanente.

Essas observações referentes a equalização superficial de temperaturas possibilitou a redução do número de termopares usados para controle. Não houve alteração quantitativa para fluxímetros. O novo *layout* está representado na Figura 22.

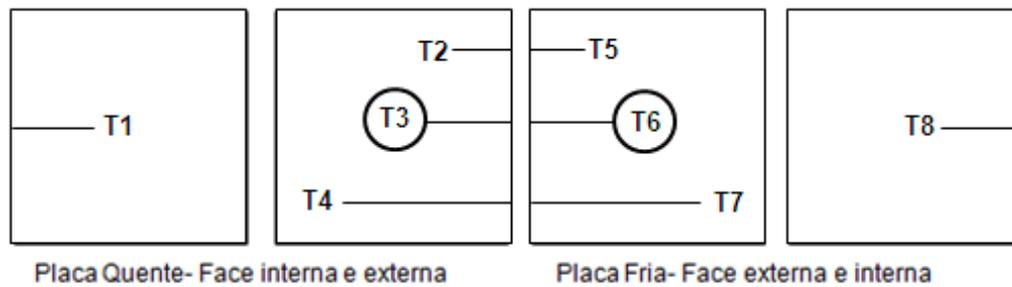


Figura 22 – Disposição dos oito termopares e dos dois fluxímetros.

Ressalta-se que para garantir uma não interferência convectiva nos resultados, foram executadas fresas nas placas para encaixe dos oito termopares utilizados. Os fluxímetros também foram embutidos nas superfícies das placas quente e fria, nas faces voltadas para a amostra (Figura 23). Esse tipo de instalação dos sensores faceando as placas permitiu a obtenção da planicidade exigida em norma bem como a não influência nas características físicas dos materiais compressíveis. Numericamente essa alteração representou maior precisão dos dados.



Figura 23 – Sensores de medição embutidos na placa.

Em todos os experimentos, como deduzia-se, os termopares fixados na superfície fria registraram valores de temperaturas inferiores aos informados no lado da amostra voltado para a fonte de calor durante todo o ensaio. Na Tabela 10 estão presentes os valores do Ensaio A que ratificam esta afirmação.

Tabela 10 - Temperaturas das superfícies da amostra voltadas para as placas Quente e Fria do ensaio A.

$T_{\text{média}}$ - Placa Quente (°C)	$T_{\text{média}}$ - Placa Fria (°C)	Tempo (min)
23,00	23,00	0
26,47	23,50	20
33,49	24,23	40
37,72	24,76	60
38,97	24,94	80
39,37	25,18	100
39,38	25,42	120

Na Figura 24 observam-se as curvas para as temperaturas médias dos planos em função do tempo, medidas na face aquecida e na face resfriada respectivamente do ensaio A.

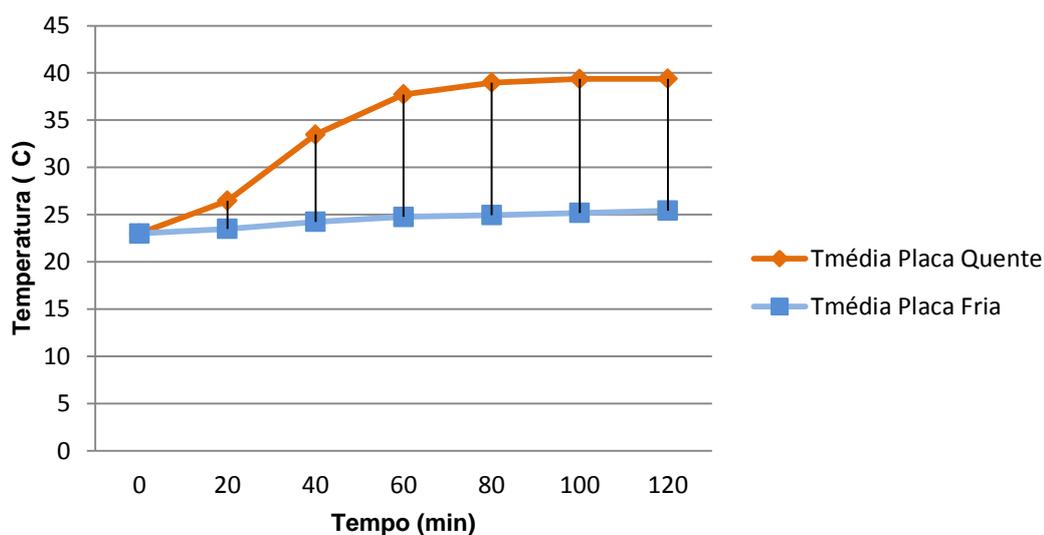


Figura 24 – Gráfico de desempenho do Ensaio A: temperatura nas faces quente e fria x tempo.

Destaca-se também no gráfico acima um gradiente térmico final de aproximadamente 14°C. Nesse ensaio, no B e no C seguiu-se o recomendado pela ASTM C518 que orienta trabalhar com diferença entre as faces de no mínimo 10°C. A Tabela 11 apresenta os valores que correspondem às médias das temperaturas lidas após a indicação de regime permanente nos ensaios A a C.

Tabela 11 – Temperaturas das superfícies da amostra voltadas para as placas Quente e Fria dos Ensaio A, B e C.

Ensaio	T _{média} (°C) Placa Quente	T _{média} (°C) Placa Fria	ΔT (°C)
A	39,40	25,49	13,86
B	40,12	26,72	13,40
C	36,53	26,16	10,37

Quanto aos fluxímetros, a diferença de fluxo de calor no início do ensaio é grande, diminuindo com o passar do tempo. A medida que cresce a dissipação de calor na resistência aquecedora, há aumento de gradiente de temperatura nas faces da amostra e por conseguinte a diferença entre os registros dos fluxímetros é menor (Tabela 12).

Tabela 12: Dados comparativos: temperatura x fluxo de calor do Ensaio A.

T _{média} Placa Quente (°C)	T _{média} Placa Fria (°C)	Flux. Inferior (W/m ²)	Flux. Superior (W/m ²)	Tempo (min)
25,44	23,43	7,75	0,40	5
39,40	25,54	11,72	9,24	120

A Tabela 13 e a Figura 25 apresentam a relação de densidade de fluxo de calor ao longo de tempo no Ensaio A.

Tabela 13 – Dados comparativos: fluxo de calor em função do tempo, Ensaio A.

Fluxímetro médio- inferior (W/m ²)	Fluxímetro médio- superior (W/m ²)	Tempo (min)
0	0	0
24,65	1,27	20
44,64	3,00	40
23,16	5,54	60
15,27	7,12	80
11,45	7,70	100
10,43	7,90	120

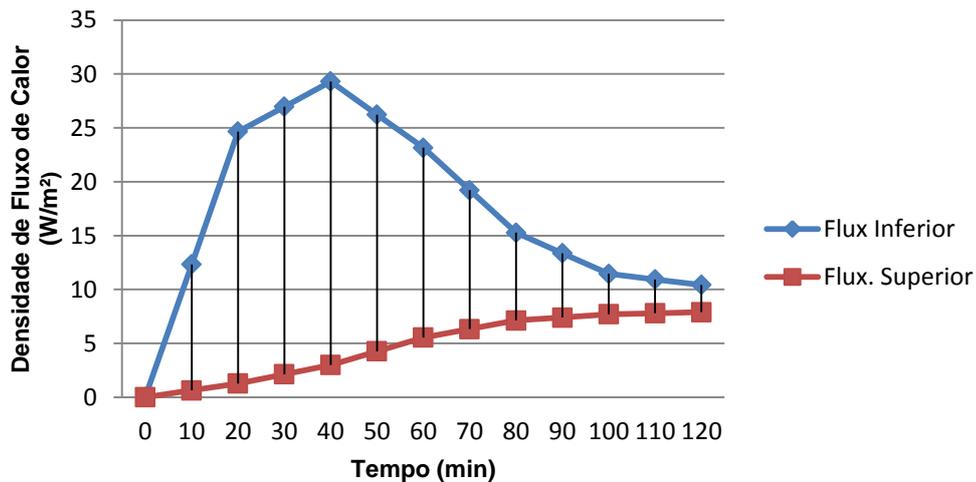


Figura 25 – Gráfico de desempenho do Ensaio A: densidade de fluxo de calor X tempo.

Dentre os ensaios realizados observou-se que o aquecimento com uma aplicação de tensão-corrente baixa gera uma melhor transfêrencia de calor do que é recebido da resistência aquecedora nas duas faces da placa quente ao longo do tempo, registrando um gradiente térmico máximo de 2°C. Para tensão-corrente alta essa diferença pode chegar a 8°C.

A aplicação da tensão corrente deve ser também constante, visto que alterações ao longo do ensaio geraram flutuações muito grandes, o que desestabilizou o sistema, com geração de dados espúrios e maior imprecisão dos resultados quando se optou por uma análise média.

Nos ensaios realizados trabalhou-se sempre com a temperatura do ar igual a temperatura da placa fria, não se utilizou placa refrigerada por fluido.

Quanto as fugas laterais há ainda dúvidas de como caracterizá-las e entendê-las nesse equipamento, visto que as orientações normativas foram seguidas. Experimentalmente os registros de temperatura pelos termopares de cada face não tiveram variações simultaneamente maiores que 0,5°C, e os termopares das extremidades não apresentaram atrasos, isto é, não houve indicativo de caminhos preferenciais ou aquecimento pontual da placa. A justificativa para a diferença de registros no fluxímetro inferior e superior está na capacidade térmica do material em teste.

Os ensaios tiveram duração média de duas horas, e a realização de ensaios prolongados não significou uma maior confiabilidade dos resultados. Os dados utilizados foram sempre os dos últimos quinze a vinte minutos, quando se observou uma estabilização da temperatura, sem acréscimo decimais no

registrado pelos seis termopares de interesse (T2 a T7), e as oscilações percebidas nos fluxímetros foram pequenas com registros repetitivos, bem como valores mais próximos entre os fluxímetros inferior e superior.

Limitou-se neste trabalho aos cálculos de condutividade e resistência térmica, por terem sido analisados somente o comportamento do material homogêneo em regime estacionário, com fluxo de calor uniforme e unidirecional. Para cálculo das propriedades térmicas trabalhou-se com média móvel, criando uma interdependência entre os dados registrados a cada 3 segundos.

Os três ensaios A, B e C foram realizados em condições semelhantes, tendo uma variação de temperatura média máxima entre eles de 1°C. Os valores de Resistência Térmica obtidos possibilitou aferir a repetibilidade do ensaio e por conseguinte consistência dos dados (Tabela 14).

Tabela 14 – Dados comparativos: Ensaio A.

Ensaio	R Média (m ² °C/W)	R Máxima (m ² . °C/W)	R Mínima (m ² . °C/W)	Tmédia (°C)
A	1,46	1,60	1,37	33,4
B	1,52	1,66	1,42	32,4
C	1,44	1,59	1,29	32,6
Média ABC	1,47	1,61	1,36	32,8

A proximidade dos valores entre os três ensaios apontou a possibilidade de uma coerência dos dados coletados. Contudo, os valores médios não estavam dentro da margem de erro estimada pelo laboratório de referência CB3E (UFSC), que indicou entre 1,53 a 1,63 m²°C/W.

Um quarto ensaio foi realizado para verificação do comportamento térmico desse material com o intuito de compreender e responder o questionado anteriormente. Aplicou-se uma quantidade maior de calor, de forma a se obter uma temperatura média final de 45,8°C. Os dados comparativos são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Dados comparativos da Resistência Térmica do material em relação à temperatura média do ensaio.

Ensaio	T _{média} (°C)	R (m ² ·°C/W)
LMTP-01	25,0	1,58
Média ABC	32,8	1,47
D	45,9	1,10

Experimentalmente foi possível constatar pela Tabela 14 que o aumento da temperatura média influencia na resistência termofísica do material, reduzindo-na, assim como ocorre para outros materiais isolantes registrados em literatura. Na Figura 26 observa-se a linha de tendência característica para esse material.

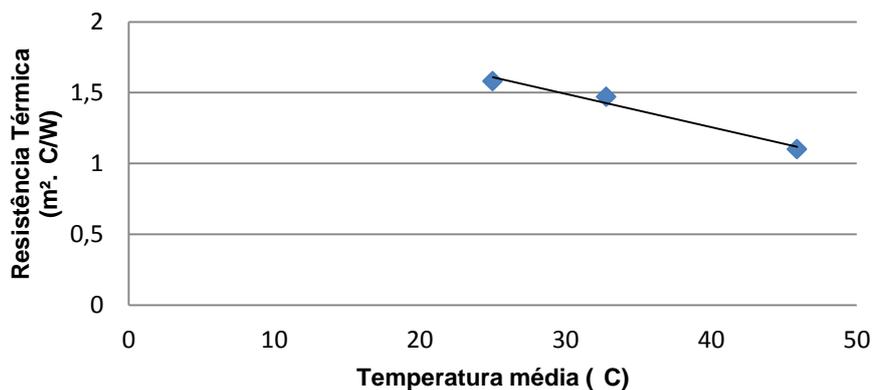


Figura 26 – Relação entre resistência térmica da amostra LMTP-1 e temperatura média de ensaio.

O valor de $R^2 = 0,975$, ou seja, ocorre uma pequena dispersão dos pontos considerando a tendência linear decrescente para a Resistência Térmica quando há aumento expressivo da temperatura média à qual um material está submetido. Essa avaliação permite afirmar que os valores individuais de A,B e C são válidos. Isso confirma mais uma vez a precisão do equipamento desenvolvido para esse fim.

Dada a manutenção da massa específica do material e sua espessura em todos os ensaios, somado à comprovação da validade dos dados coletados para resistência térmica, foi possível calcular a condutividade térmica do material. Os valores finais são sistematizados na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados dos ensaios: Propriedades térmicas da Amostra LMPT-01

Numero de Ensaio	Espessura (mm)	Massa específica (kg/m ³)	Resistência Térmica (m ² .°C/W)	Condutividade Térmica (W/m°C)	T _{média} (°C)
LMTP-01	55,0	47,1	1,58	0,0347	25,0
A	55,0	47,1	1,46	0,0376	33,4
B	55,0	47,1	1,52	0,0361	32,4
C	55,0	47,1	1,44	0,0382	32,6
D	55,0	47,1	1,10	0,0500	45,9

5 Conclusões

5.1 Considerações finais sobre o trabalho

Efetivamente o proposto foi alcançado, o desenvolvimento do equipamento para medição da Resistência Térmica pelo Método Fluximétrico em observâncias as normas mostra grande potencial de uso como método secundário. Na sequência da pesquisa outros materiais serão ensaiados e possíveis novos procedimentos de correção serão testados.

Evidencia-se, portanto, que o presente trabalho não tem a pretensão de esgotar essa temática, mas de fomentar discussão e desenvolvimento de equipamentos para medição de propriedades térmicas, fazendo-se alusão aos aparatos legais existentes, explicitando a necessidade de existência de centros de referência brasileiro sobre Térmica de Materiais Construtivos e a elaboração de um banco de dados nacional.

Reitera-se que o uso de energia é um processo que a sociedade precisa rever. Ao assumir essa necessidade fica evidenciado a precisão de se caracterizar termicamente um dado material. O desenvolvimento de um equipamento estruturado pelo Método do Fluxímetro significa não somente essa possibilidade, mas o entendimento do desempenho térmico- energético e da empregabilidade do material e além de encerrar a possibilidade de abertura para criação de novos.

5.2. Recomendações e sugestões para trabalhos futuros

Dentre as recomendações e sugestões para trabalhos futuros estão relacionadas sempre ao aprimoramento do equipamento para maior confiabilidade dos resultados, incluindo-se o entendimento e controle das fugas laterais, bem como ensaios com a refrigeração da placa fria por fluido.

Acredita-se também que seja necessário avançar em estudos para caracterização térmica de materiais, avaliando-se não somente a fase estacionária de um material em ensaio pelo Método Fluximétrico, mas também

sua fase dinâmica, onde propriedades como calor específico, difusividade térmica e outras possam ser melhor aferidas, possibilitando o entendimento do comportamento térmico de um dado material, e por conseguinte, seu emprego no que tange ao seu desempenho térmico- energético.

Sugere-se ensaios com encapsulamento de gases e fluidos, como de paredes e e vidros duplos.

6

Referências bibliográficas

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil: volume 5**. Blucher: São Paulo, 2011.

ASTM. **C177: Standard test method for steady- state thermal transmission properties by means of the guarded hot plate**. Philadelphia: American Society of testing Materials, 1985.

ASTM. **C518: Standard test method for steady- state Heat Flux measurements and thermal transmission properties by means the heat flow meter apparatus**. American Society of testing Materials, Philadelphia, 1985.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 15.220: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 15.220: Desempenho térmico de edificações – Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 15.220: Desempenho térmico de edificações – Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo Método Fluximétrico**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 15.575: Desempenho de edificações habitacionais – Parte 1: Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 15.575: Desempenho de edificações habitacionais – Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 15.575: Desempenho de edificações habitacionais – Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas**. Rio de Janeiro, 2013.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO – CBIC. **Desempenho de Edificações Habitacionais: Guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013.** Brasília, 2013.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Amostra de Referência e Relatório Técnico.** Florianópolis: CB3E- UFSC, 2014.

CIB. **Agenda 21 para a construção.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2000. Disponível em: <www.cibworld.nl> Acesso em: 21.10.2014.

CORBELLA, O.; CORNER, V. **Manual de Arquitetura Bioclimática Tropical para a redução de consumo energético.** 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora Revan, 2011.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos- conforto ambiental.** 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora Revan, 2013.

EDWARDS, B. **O guia básico para a sustentabilidade.** 2ª edição. Barcelona: GG, 2005.

GUTHS, S. Entrevista concedida a Priscilla Radd Ferreira Pinto. Florianópolis, 27 ago. 2014.

GÜTHS, S.; NICOLAU, V. P. **Instrumentação em Ciências Térmicas.** Apostila EMC. Florianópolis: UFSC, 1998.

HUKSEFLUX. Disponível em: www.hukseflux.com.br. Acesso em: 10.09.2014.

INCROPERA, F.P.; WITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 7ª edição. Rio de Janeiro, 2014.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; ABREU, A. L. P.; CARLO, C. J.; BATISTA, J. O.; MARINOSKI, D. L.; NARANJO, A. **Desempenho térmico de edificações.** Apostila da Disciplina de Desempenho Térmico de Edificações –ECV 5161. Florianópolis: UFSC, 2011.

MOURA, L. M. **Desenvolvimento de um protótipo de placa quente protegida.** Dissertação de Mestrado. Florianópolis: UFSC, 2005.

NICOLAU, V. P.; GUTHS, S.; SILVA, M.G. Medição da condutividade térmica e do calor específico de materiais isolantes. **IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas. ENCIT – ABCM.** Paper CIT 02-0529, 2002.

ORDENES, M.; LAMBERTS, R.; GUTHS, S. **Transferência de calor na envolvente da edificação**. Apostila do Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis: UFSC, 2008.

SIMIONI, W. I. **Análise de erros na medição de condutividade térmica de materiais através do Método Fluximétrico**. Florianópolis: UFSC, 2005.

6 Anexos

Anexo 01



CB3E
centro brasileiro de eficiência
energética em edificações

Núcleo de Medição:
Depto de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina
88040-900 Florianópolis / SC Brasil
Fone: (48) 3721-7709 Fax: (48) 3721-7615
www.cb3e.ufsc.br



Florianópolis, 11 de dezembro de 2014

De: Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E)

Para: PUC-Rio – Departamento de Engenharia Civil
a/c Prof. Antonio Roberto Martins Barboza de Oliveira
contato: Priscilla Radd (priscillaradd@yahoo.com.br)

Assunto: Relatório ensaios condutividade térmica

Os ensaios de condutividade foram realizados no Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E), Universidade Federal de Santa Catarina, baseado na Norma Técnica ASTM C-518: “Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus”.

A Figura 1 mostra um esquema do dispositivo:

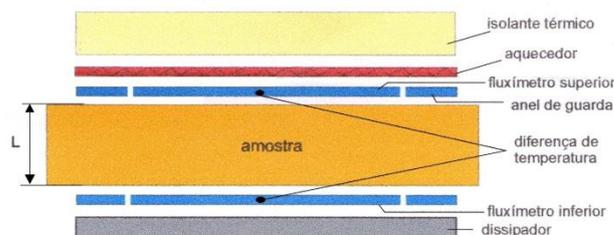


Figura 1 - Princípio do método de medição da resistência térmica

A resistência térmica é determinada a partir da lei de Fourier:

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

onde R é a resistência térmica ($m^2 K/W$), q é o fluxo de calor médio medido pelos fluxímetros 1 e 2 (W) e T_1 e T_2 as temperaturas médias nas superfícies das amostras.

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

$$\lambda = \frac{L}{R}$$

onde λ é a condutividade térmica ($W/m K$) e L é a espessura da amostra (m).



CB3E
centro brasileiro de eficiência
energética em edificações

Núcleo de Medição:
Depto de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina
88040-900 Florianópolis / SC Brasil
Fone: (48) 3721-7709 Fax: (48) 3721-7615
www.cb3e.ufsc.br



Ensaio de Condutividade e Resistência Térmica

Data Ensaio: 10/12/2014

Num. Ensaio: 354/2014

Cliente: PUC-Rio

Num. Ensaio	Denominação	Espessura amostra (mm)	Densidade (kg/m ³)	Condutividade Térmica (W/mK)	Resistência Térmica (m ² K/W)
1	Amostra LMPT-1	55.0	47.1	0.0347	1.58
2	Amostra LMPT-2	19.0	61.5	0.0337	0.563

Temperatura média do Ensaio: 25 °C
Dimensão amostra = 300 x 300 mm
incerteza estimada: 3 %

Prof. Saulo Güths

Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações - CB3E
Universidade Federal de Santa Catarina
88040-900 Florianópolis / SC Brasil
Fone: (48) 3721-7709 R17 e (48) 9907 5575
Email : saulo@lmpt.ufsc.br www.cb3e.ufsc.br

Anexo 02



Hukseflux Thermal Sensors B.V
 URL: www.hukseflux.com
 E-mail: info@hukseflux.com
 The Netherlands

Certificate of calibration

Type: HFP01-10
 Serial number: 9839

Calibration date: 20-02-2014
 Cable length: 10 m
 Sensitivity: 60.27 $\mu\text{V}/(\text{Wm}^{-2})$
 Remarks:
 Performed by: L. Asaa

Connections:

Cable	Wire	
1	White	Signal [+]
1	Green	Signal [-]
1	Black	Shield

Traceability of calibration is to the "guarded hot plate" of National Physical Laboratory (NPL) of the UK. Applicable standards are ISO 8302 (EN 12664:2001) and ASTM C177.

Anexo 03



Hukseflux Thermal Sensors B
 URL: www.hukseflux.com
 E-mail: info@hukseflux.com
 The Netherlands

Certificate of calibration

Type: HFP01-10
 Serial number: 9838

Calibration date: 19-02-2014
 Cable length: 10 m
 Sensitivity: 59.28 $\mu\text{V}/(\text{Wm}^{-2})$
 Remarks:
 Performed by: L. Asaa

Connections:

Cable	Wire	
1	White	Signal [+]
1	Green	Signal [-]
1	Black	Shield

Traceability of calibration is to the "guarded hot plate" of National Physical Laboratory (NPL) of the UK. Applicable standards are ISO 8302 (EN 12664:2001) ; ASTM C177.