

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DE ESPUMAS VÍTREAS

por

Franco Fragomeni Tagliari

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2016

ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DE ESPUMAS VÍTREAS

por

Franco Fragomeni Tagliari

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e fenômenos de transporte**

Orientador: Prof. Francis H. Ramos França

Comissão de Avaliação:

Prof. Fernando Pereira

Prof. Sérgio Frey

Prof. Thamy Hayashi

Porto Alegre, 18 de novembro de 2016.

“You know more than you think you know, just as you know less than you want to know.”
Oscar Wilde

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por todo o apoio incondicional em todos os momentos e etapas da vida. Pelo auxílio na busca da solução em toda e qualquer dificuldade e comemoração conjunta em qualquer conquista. A minha irmã, Gabriela Fragomeni Tagliari, pelo auxílio, incluindo na revisão de partes do texto deste trabalho. Agradeço principalmente a meus pais Dante Tagliari e Maria Helena Fragomeni Tagliari, pela educação recebida, pela motivação constante nas dificuldades encontradas durante o curso, assim também como fora dele, pelas cobranças, que fizeram com que eu me esforçasse quando foi necessário, por todo o apoio financeiro, que me permitiu focar inteiramente nos estudos até este momento. Sem vocês eu não teria chegado até aqui.

Agradeço ao meu orientador professor Dr. Francis H. Ramos França por todo o auxílio e orientação durante todas as etapas da elaboração do trabalho.

Agradeço ao professor Dr. Carlos Pérez Bergmann e a professora Dra. Annelise Kopp Alves por disponibilizarem o Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) e todos seus equipamentos para a elaboração da parte experimental do projeto.

Agradeço aos amigos e colegas que direta ou indiretamente auxiliaram na conclusão do curso de graduação. Em especial ao Paulo Henrique Falcon Foschiera pelo auxílio na resolução de problemas que surgiam durante a elaboração dos experimentos.

Agradeço ao professor Dr. Fernando Marcelo Pereira pelo auxílio na busca de bibliografias para a elaboração do trabalho.

TAGLIARI, F. F **Estudo da Transferência de Calor Através de Espumas Vítreas**. 2016. 21. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

Materiais porosos são de grande importância e possuem diversas aplicações na engenharia moderna. Grande parte das utilizações desses materiais requer conhecimento de suas propriedades térmicas e de transferência de calor. Este trabalho tem o objetivo de aprofundar o conhecimento na transferência de calor de materiais porosos através de uma análise das diferentes teorias existentes para esse cálculo. O resultado obtido por tais teorias será então comparado com resultados experimentais obtidos através da análise de espumas vítreas. Dessa forma, visamos a verificar qual das teorias, dentre as estudadas no âmbito do projeto, mais se aproxima dos valores obtidos de forma experimental. As espumas são obtidas através da adição de um agente espumante ao vidro moído, que é então queimado em temperaturas acima de seu ponto de amolecimento. Nessa temperatura, o agente espumante libera um gás que é capturado na estrutura do vidro, formando seus poros. Posteriormente, as peças prontas são levadas ao forno de análises, onde são ensaiadas de acordo com a norma ASTM E 1225/13, para então obter-se seus resultados experimentais.

PALAVRAS-CHAVE: Transferência de calor; materiais porosos; espumas vítreas.

TAGLIARI, F. F. **Study of Heat Transfer Through Glass Foam**. 2016. 21. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

Porous materials are of great importance and have several applications in modern engineering. A major part of the use of such materials requires the knowledge of their thermal and heat transfer properties. This paper is intended to amplify the knowledge of heat transfer in porous media through an analysis of the different existing theories for this calculation. The results provided by those theories will then be compared to the experimental results obtained through the experimental analysis of glass foams. This way, the goal of the present study is to verify which theories, among the ones studied on the project, is closest to the values obtained in the experiment. The glass foams are obtained through the addition of a foaming agent to the milled glass, which is burnt at a temperature above its softening point. At this temperature, the foaming agent releases a gas that is captured in the glass structure, forming its pores. Lately, the samples are taken to the oven for analysis, where they are tested according to ASTM E1225/13 regulation, where the experimental results are obtained.

KEYWORDS: Heat transfer; porous media; glass foams

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1 Transferência de calor em materiais porosos.....	2
2.2 Espumas vítreas.....	2
3. METODOLOGIA.....	3
3.1 Elaboração das peças.....	3
3.2 Propagação de incertezas.....	6
4. ANÁLISE DA CONDUÇÃO.....	7
5. ANÁLISE DA RADIAÇÃO.....	10
6. ANÁLISE DA CONVECÇÃO.....	11
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	12
7.1 Faixas de limite máximo e mínimo para a condutividade térmica efetiva negligenciando-se radiação e convecção.....	12
7.2 Condutividade efetiva.....	13
7.3 Análise da radiação.....	13
8. CONCLUSÕES.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
APÊNDICE.....	16

1. INTRODUÇÃO

O estudo de materiais porosos foi, primeiramente, iniciado para utilizações em atividades geofísicas e da indústria química. Porém atualmente esses materiais têm sido utilizados de forma crescente nas mais diversas aplicações dentro da engenharia moderna. Abaixo são citadas algumas dessas aplicações, observadas também por Amhalhel e Furmanski, 1997:

- Utilização na agricultura – No isolamento e acondicionamento de locais para grãos, no processo de fermentação para a indústria alimentícia, etc;
- Utilização na indústria – Em bocais de queimadores, sistemas de filtragem de água, óleo, etc;
- Utilização ambiental – Utilizados para a retenção de partículas em sistemas de tratamento de água, em sistemas de tratamento de resíduos orgânicos, etc;
- Sistemas térmicos em geral – Utilizados como isolantes em variados sistemas como fornos, canos, tubulações, etc;

Essas são apenas algumas das diversas utilizações que materiais porosos apresentam no atual desenvolvimento de processos e projetos de engenharia. A maior parte das formas de utilização desses materiais requer um conhecimento aprofundado de suas propriedades térmicas e de transferência de calor.

Sabe-se também que a questão ambiental é muito presente em todas as áreas da sociedade. Nos últimos anos surgiu uma crescente preocupação com a grande quantidade de resíduos gerados pela sociedade e atividade industrial. Desta forma, é necessário que se busquem alternativas para lidar com esses resíduos, fazendo que sejam reaproveitados para outras aplicações.

No ano passado, no Brasil, apenas 3% do lixo gerado foi reciclado, enquanto 30% do total gerado era passível de reciclagem [Paiva, 2015]. Entre estes 30% de lixo reciclável gerado, boa parte é constituída de resíduos de vidro, que é um dos principais resíduos domésticos. Apesar de o vidro não apresentar problema ao ser disposto de forma adequada em aterros sanitários, esses aterros possuem um grande custo de criação e manutenção para a sociedade. Desta forma, é desejável que se busquem outras alternativas para a reutilização desses materiais, de forma que se obtenha novos produtos a partir dos resíduos gerados, eliminando o custo de disposição e gerando renda a partir de resíduos.

Entre as alternativas possíveis para a reutilização do vidro, existe a possibilidade da criação de espumas vítreas a partir de resíduos moídos. A principal utilização destas espumas ainda é na área da construção civil como isolante térmico, devido a sua alta estabilidade química e térmica, aliada à sua impermeabilidade a água e gases [Pokorny, 2011]. As propriedades dessas espumas as tornam ideais para diversas aplicações, como também foi observado por Taurino *et alli*, 2014:

- Baixa condutividade térmica – Isolamento de prédios, fornos, encanamentos, tubulações, etc;
- Boa resistência a compressão, comparado a materiais semelhantes, aliado a baixa densidade – utilização em superfícies flutuantes, telhados e isolamentos da construção civil, etc;
- Resistência a corrosão química – Uso em filtros para resíduos químicos, gases em altas temperaturas, etc;
- Não ser combustível – Proteção de edifícios, portas e barreiras corta-fogo, como isolamento em meio a gases inflamáveis.
- Permeabilidade – Filtros para líquidos, gases, materiais fundidos, etc;

Essas são apenas algumas das várias utilizações possíveis desses materiais, que os tornam mais economicamente viáveis para a reciclagem.

O presente trabalho visa a comparar os resultados da transferência de calor obtidos de diferentes modelagens de cálculo com o resultado experimental obtido da análise de espumas vítreas. Dessa forma, visa-se a ampliar os conhecimentos sobre as propriedades térmicas dos

meios porosos, e a se obter um maior entendimento das espumas vítreas e suas possíveis utilizações de forma comercial.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Transferência de calor em materiais porosos

Um material é dito poroso quando possui poros, ou seja, cavidades, em sua superfície e interior. Os poros apresentam em seu interior um meio fluido. Um material poroso saturado é o que apresenta esse fluido sendo unicamente um gás ou um líquido. O material é considerado como meio poroso insaturado quando as três fases da matéria se misturam no material. A porosidade de um meio indica a relação de quantidade de cada uma das fases presentes nas peças.

Segundo Incropera *et alli*, 2014, a condutividade térmica destes meios varia de acordo com a porosidade do meio, ou a quantidade de vazios, partes não-sólidas, da peça. A porosidade ε , é a razão entre o volume do fluido presente e o volume total da peça. Juntamente com a porosidade é necessário que se saibam os dados da condutividade de cada uma das fases separadas, para que seja possível calcular a condução de calor em meios porosos.

Além dos dados citados anteriormente, Kaviany, 1995, cita como necessários o diâmetro e a distribuição dos poros, a emissividade da fase sólida e as temperaturas em análise também com grande influência na transferência de calor, principalmente sobre os efeitos da radiação térmica da peça em análise.

Para a análise da convecção deve ser levado em consideração o diâmetro dos poros da peça em análise. Em casos onde os poros do material apresentam dimensão muito reduzida, não serão formadas correntes de ar no interior do material, de forma a reduzir muito significativamente os valores da convecção natural que ocorre no meio.

2.2 Espumas vítreas

Vidros são materiais que são utilizados desde 3000 a.C., época em que os egípcios fabricavam jóias e pequenos vasos utilizando o vidro como material principal. Não se sabe ao certo em que ano sua utilização começou, ou exatamente o ano em que foi descoberto. Os vidros são materiais de estrutura amorfa, ou seja, não possuem ordem ou repetição em seu arranjo atômico.

A produção de espumas vítreas iniciou-se em 1932 por Kitaigorodski utilizando por base, tecnologias desenvolvidas no instituto Mendeleev em Moscou. Kitaigorodski misturou vidro finamente moído ao CaCO_3 , que foi o agente espumante escolhido por ele. Ele aqueceu a mistura em moldes de aço até 850°C , efetuando a desmoldagem em temperaturas de 600 a 700°C . Posteriormente foi feito o mesmo experimento com outros agentes espumantes [Scheffler e Colombo, 2005].

Ainda segundo Scheffler e Colombo, 2005, as espumas vítreas são de interesse da engenharia por apresentarem uma combinação única de propriedades. São leves, rígidas, resistentes a compressão, bons isolantes térmicos, resistentes ao congelamento, não inflamáveis, quimicamente inertes, não tóxicas, resistentes a roedores e insetos, resistente a microrganismos e resistentes a água e vapor. Apesar de as espumas vítreas geralmente apresentarem as propriedades citadas, suas propriedades finais dependem em muito do tipo e quantidade do agente espumante, dos tamanhos das partículas de vidro adicionadas e da temperatura de queima.

As espumas vítreas geralmente são obtidas pela ação de um agente gerador de gás, misturado ao vidro moído. A mistura é aquecida até a temperatura de transformação do agente, que é queimado. No processo de queima o espumante libera gás. Esse gás, gerado no interior da amostra aquecida até temperaturas de amolecimento do vidro, é captado pela estrutura da peça e forma os poros presentes nas espumas vítreas.

3. METODOLOGIA

As amostras são elaboradas através da mistura do vidro selecionado, com um agente espumante. Após isso são levadas para o forno de análises, onde se formam os poros e as características finais das peças.

3.1 Elaboração das peças

Para a elaboração dos corpos de prova que serão analisados durante a etapa experimental do trabalho, primeiramente deve ser feita a seleção do vidro que irá ser utilizado. Para o presente trabalho foi selecionado o vidro borossilicato âmbar, encontrado em garrafas de cerveja Serramalte 300 ml (Fig. 3.1.A). Essas garrafas têm seu rótulo retirado, são lavadas para a eliminação de quaisquer resíduos internos ou externos colados ao vidro (Fig. 3.1.B) e então moídas em um moinho de bolas por 48 horas. Após a moagem do vidro o mesmo é peneirado em uma peneira de 150 mesh (abertura de 0,106 mm) para garantir sua granulometria, e com isso facilitar a homogeneização da mistura posterior (Fig. 3.1.C). O vidro é então misturado ao agente espumante escolhido. O agente espumante utilizado no âmbito desta pesquisa foi o carbonato de cálcio (CaCO_3) devido a seu baixo custo e fácil obtenção. Foi adicionado ao vidro moído 5% de seu peso de CaCO_3 para a elaboração da mistura final. O material foi então umidificado com 5% de seu peso em água e prensado a 40 psi em uma prensa hidráulica (Fig. 3.1.D). Após isso as peças foram levadas ao forno e queimadas a 750 °C. Nessa temperatura o vidro encontra-se acima de seu ponto de amolecimento. Ao atingir essa temperatura o agente espumante é queimado e libera gás no processo. O gás passa pelo interior do vidro amolecido pela alta temperatura e forma poros no interior de toda a peça (Fig. 3.2). Após este processo de queima as peças apresentam um grande ganho dimensional, devido aos poros formados, (Fig. 3.3) e uma pequena perda de massa pela perda do agente espumante e umidade.

Apesar de neste trabalho ser utilizado apenas um tipo de vidro e agente espumante existe uma grande variedade de vidros que poderiam ter sido selecionados e combinados com variados agentes espumantes. Na literatura encontra-se diversas combinações dos mais variados agentes espumantes e tipos de vidro desenvolvidos por diferentes autores.



Figura 3.1- A) Garrafa selecionada para elaboração das peças. B) garrafas limpas e sem rótulo, prontas para a moagem. C) Vidro moído e peneirado, separado para a elaboração da mistura final. D) Peça prensada e pronta para ser levada ao forno para a queima.

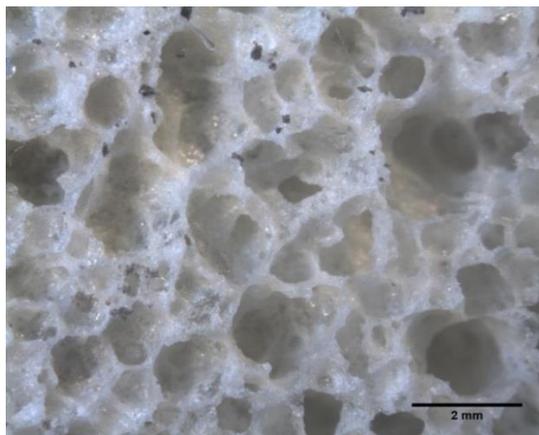


Figura 3.2 – Parte interior de uma amostra pronta, ampliada 6,7 vezes.



Figura 3.3 – A esquerda amostra prensada, antes da queima, e a direita corpo de provas após ser retirado do forno.

Dentre os dez corpos de prova elaborados durante o projeto observou-se uma perda de massa mínima de 9% e máxima de 10,5%, referentes ao agente espumante e a água adicionada para a prensagem. A expansão volumétrica apresentada ficou entre 424 e 560,2%, sendo proporcional à massa de material prensado antes da queima. A porosidade das amostras foi calculada utilizando dados medidos do volume e peso finais de cada amostra, em conjunto com a densidade do vidro utilizado. Segundo diversos autores [Giacomi, 2008; Easypath, 2016] a massa específica do vidro borossilicato âmbar é de 2,23 g/cm³. Com esses dados calculou-se a porosidade das amostras que apresentou valores entre 12 e 15%.

A seguir as peças obtidas são cortadas e lixadas, para a formação de corpos de prova que serão analisados posteriormente. No forno de análise (Fig. 3.4) as peças são aquecidas até a temperatura de 700 °C, em patamares de 100 em 100 °C, permanecendo por 2 horas em cada patamar de temperatura, de acordo com a norma ASTM E1225/13. O forno de análises funciona com uma resistência que aquece a superfície inferior da peça, enquanto seu lado superior não é aquecido (Fig. 3.5). As temperaturas das ambas as superfícies são controladas por termopares do tipo K, assim como a temperatura em dois pontos conhecidos no interior da amostra.

Através das temperaturas obtidas em dois pontos no interior da peça, assim como a distância conhecida entre esses pontos e o fluxo de calor do forno é possível calcular a condutividade da amostra. Para obter o fluxo real do forno, utiliza-se as distâncias e propriedades conhecidas dos materiais que compõe o forno de análises e as temperaturas obtidas durante o ensaio. O material da parte superior do forno é Al 5052 e da inferior é Inox 304L. Como os valores de condutividade desses materiais são conhecidos previamente, e o ensaio fornece as

temperaturas atingidas, é possível utilizar a equação da condução de calor linear (Eq. 3.1), para obter o fluxo do forno. Com o fluxo utiliza-se a mesma Equação (3.1) para determinar a condutividade térmica da amostra:

$$k = \frac{ql}{(T_1 - T_2)} \quad (3.1)$$

onde k é a condutividade do material, q o fluxo do forno, l a distância entre os pontos analisados e T_1 e T_2 as temperaturas de cada um dos pontos.



Figura 3.4 – Amostra posicionada para análise no forno de testes.

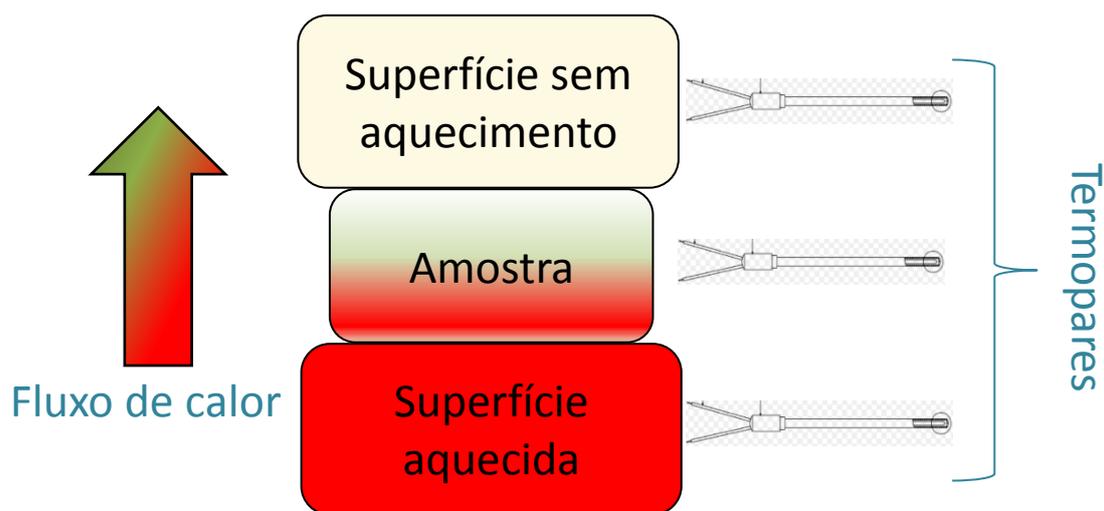


Figura 3.5 – Desenho esquemático do forno de análises.

Através destas análises obtém-se valores experimentais de condutividade das espumas vítreas analisadas entre 0,47 e 0,63 W/(m·K). Este valor apresenta uma boa redução em relação a condutividade inicial do vidro borossilicato âmbar que é de 1,15 W/mK [Giacomi, 2008; Easypath, 2016].

3.2 Propagação de incertezas

Para calcular a propagação de incertezas dos ensaios primeiramente buscou-se descobrir as incertezas dos equipamentos utilizados. O paquímetro utilizado para a medição das distâncias entre os termopares apresenta erros de $\pm 0,02$ mm. Os termopares utilizados fornecem resultados com uma incerteza de $\pm 2,2$ °C. Utilizando a Equação (3.2), e os dados conhecidos das medições realizadas e dos equipamentos utilizados foi possível obter um valor de incerteza de medição.

$$\mu_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial z_1} \right)^2 \mu_{z1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z_2} \right)^2 \mu_{z2}^2 \quad (3.2)$$

onde f é a equação onde as incertezas estão inseridas, no âmbito desse projeto a Equação (3.1), z_1 e z_2 representam os termos nos quais se tem uma incerteza de medição e μ_{z1} e μ_{z2} representam a incerteza da medição dos respectivos termos.

Utilizando a Equação (3.2), juntamente com a (3.1), e inserindo nela os valores das amostras feitas, obtém-se um valor de incerteza entre 0,08 e 0,03 W/(m·K), ou 5,43 a 14,1%, dependendo da amostra. A Figura 3.6 mostra o valor obtido de cada uma das amostras com sua respectiva incerteza.

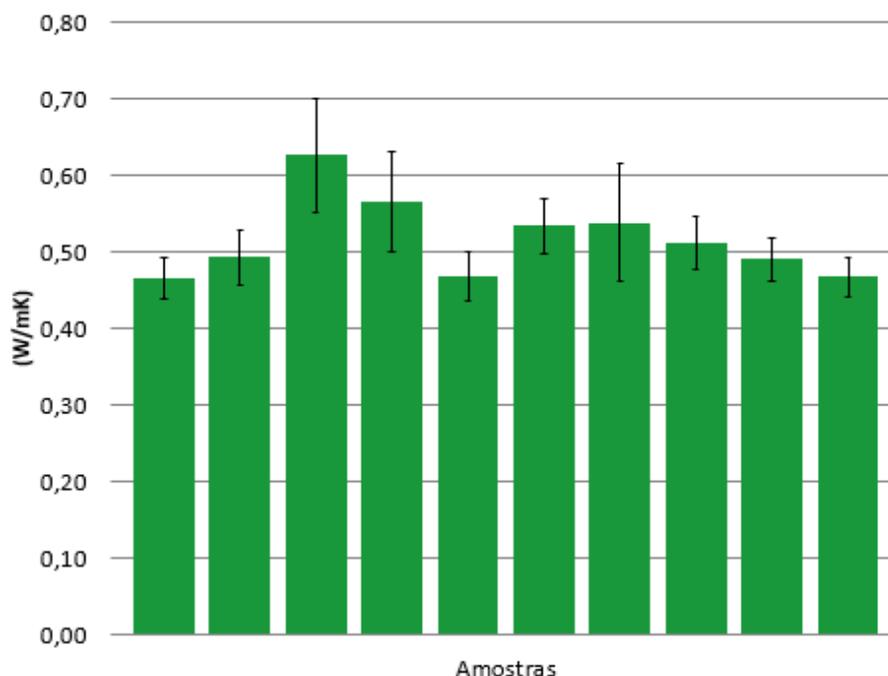


Figura 3.6 – Resultados de condutividade térmicas das peças, com as respectivas incertezas associadas.

Como é possível observar através da Figura (3.6), as amostras apresentaram valores próximos de condutividade umas das outras, sendo que as que mais divergem da média também são as que possuem uma maior incerteza associada ao cálculo. As peças também apresentavam uma porosidade diferente entre si, influenciando no resultado obtido.

Podemos ver também esses valores na Tabela (3.1), que apresenta os resultados obtidos na fase de elaboração e de testes de cada uma das amostras analisadas.

Tabela 3.1– Valores obtidos das amostras

Amostra	Expansão (%)	Perda de massa (g)	Porosidade	Resistência térmica (K/W)	Condutividade térmica (W/mK)	Incerteza (W/mK)	Incerteza (%)
Amostra 1	423,97	10,73	0,14	0,03	0,47	0,03	5,87
Amostra 2	504,49	10,75	0,14	0,03	0,49	0,04	7,36
Amostra 3	463,38	11,89	0,13	0,03	0,63	0,07	11,81
Amostra 4	560,15	11,18	0,13	0,03	0,57	0,07	11,52
Amostra 5	440,22	12,20	0,13	0,03	0,47	0,03	7,08
Amostra 6	437,62	9,81	0,15	0,03	0,53	0,03	6,52
Amostra 7	442,02	7,44	0,14	0,03	0,54	0,08	14,51
Amostra 8	432,90	12,18	0,14	0,03	0,51	0,04	6,89
Amostra 9	523,57	11,09	0,12	0,03	0,49	0,03	5,71
Amostra 10	560,15	11,18	0,12	0,04	0,47	0,03	5,43

4. ANÁLISE DA CONDUÇÃO

Para valores não muito elevados de temperatura, e poros pequenos, que não permitem a formação de correntes de ar, a condução é o principal modo de transferência de calor.

Existem várias formas diferentes de cálculo da condução em meio porosos, elaboradas por diversos pesquisadores. Parte disso se deve à variedade de materiais existente. Alguns destes métodos escolhem por definir uma faixa de valores, dentro da qual a condução real está, provavelmente, inserida enquanto outros formulam uma única equação, que diz respeito a condução efetiva.

Uma das formas de avaliar a condução, citada por diversos autores [Incropera *et alii*, 2014; Kaviany, 1995; Nield e Bejan, 2013], consiste em analisar o material em duas situações extremas. Para o limite inferior o material é considerado como tendo toda a sua condução de calor interna realizada por dois meios em série um com o outro, gerando uma faixa de valores mínima para a condução do material. A condutividade efetiva em série é calculada através da Equação (4.1), vista a seguir.

$$\frac{k_e}{k_f} = \frac{\frac{k_s}{k_f}}{\frac{\varepsilon k_s}{k_f} + 1 - \varepsilon} \quad (4.1)$$

onde k_e representa condutividade efetiva, k_f a condutividade do fluido, k_s a condutividade do meio sólido e ε é a porosidade do corpo de provas.

Para o cálculo do limite superior é feita a suposição de as fases estarem dispostas totalmente em paralelo com o fluxo de calor uma com a outra, de forma a gerar uma faixa de valores que limitam o máximo de condução que o material pode ter, uma vez que a condução linear unidimensional em uma fase teria uma influencia mínima sobre a condução da outra. Para o cálculo da condução em paralelo utiliza-se a Equação (4.2).

$$\frac{k_e}{k_f} = \varepsilon + (1 - \varepsilon) \frac{k_s}{k_f} \quad (4.2)$$

Para a validação destes modelos é necessário que $k_s > k_f$. Utilizando os valores de k_s do vidro borossilicato âmbar (1,15 W/mK), k_f do ar e a porosidade de cada uma das peças, obtém-se um valor mínimo de condutividade, através da Equação (4.1), de 0,076 a 0,093 W/(mK), variado de acordo com a porosidade de cada corpo de prova. Para o cálculo do limite superior utiliza-se a Equação (4.2) e obtém-se valores entre 0,979 e 1,013 W/(mK).

Uma outra forma de cálculo de uma faixa de valores de condução em meios porosos foi proposta por Hashin e Shtrikman [Kaviany, 1995]. Publicadas em 1962, as equações de Hashin e Shtrikman fornecem uma forma alternativa de calcular os limites da condutividade. Para a utilização destas equações é necessário que a relação $k_s/k_f \geq 1$ seja verdadeira, assim como no caso das Equações (4.1) e (4.2). A Equação (4.3) fornece os valores do limite inferior da condução proposto por Hashin e Shtrikman.

$$\frac{k_e}{k_f} = \left[1 + \frac{3(1-\varepsilon)\left(\frac{k_s}{k_f} - 1\right)}{3 + \varepsilon\left(\frac{k_s}{k_f} - 1\right)} \right] \quad (4.3)$$

Para as peças produzidas durante a parte experimental, a Equação (4.3) fornece valores de limite inferior, para cada uma das amostras, de 0,181 a 0,221 W/(mK). Esta fornece um resultado similar a Equação (4.4) proposta por Maxwell em 1865 [Kaviany, 1995]. A equação proposta por Maxwell considera esferas sólidas, suspensas em um meio gasoso saturado, suficientemente afastadas uma da outra para que não haja interação entre elas. A Equação (4.4) também é válida para o cálculo da constante dielétrica, condutividade elétrica e susceptibilidade magnética de materiais compostos [Kandula, 2011].

$$\frac{k_e}{k_f} = \frac{2\varepsilon + (3 - 2\varepsilon)\frac{k_s}{k_f}}{3 - \varepsilon\frac{k_s}{k_f}} \quad (4.4)$$

Da mesma forma que a Equação (4.3), os resultados gerados através da Equação (4.4) variam entre 0,181 a 0,221 W/(mK).

Para o cálculo do limite superior da condução Hashin e Shtrikman propuseram a Equação (4.5) [Kaviany, 1995].

$$\frac{k_e}{k_f} = \frac{k_s}{k_f} \left[1 + \frac{3\varepsilon\left(1 - \frac{k_s}{k_f}\right)}{(1-\varepsilon) + \frac{k_s}{k_f}(2+\varepsilon)} \right] \quad (4.5)$$

Para as diferentes amostras analisadas os valores do limite superior de Hashin e Shtrikman variaram entre 0,913 e 0,958 W/(mK). Da mesma forma que as Equações (4.3) e (4.4), esta equação apresenta os mesmos resultados de uma outra proposta por Maxwell [Kaviany, 1995]. A Equação (4.6), fornece um limite superior, proposto por Maxwell, para a condução em meios porosos. Para esta equação é feita a suposição de um corpo sólido, que possui incrustações de um fluido diluído em sua estrutura.

$$\frac{k_e}{k_f} = \frac{2\left(\frac{k_s}{k_f}\right)^2 (1-\varepsilon) + (1+2\varepsilon)\frac{k_s}{k_f}}{(2+\varepsilon)\frac{k_s}{k_f} + 1 - \varepsilon} \quad (4.6)$$

Assim como na Equação (4.5), os valores obtidos para a condução dos corpos de prova de acordo com a equação do limite superior de Maxwell, ficam entre 0,913 e 0,958 W/(mK).

Ainda definindo uma faixa de valores possíveis tem-se também as equações propostas por Miller em 1969 [Kaviany, 1995]. A Equação (4.7), fornece o limite inferior proposto por Miller, enquanto as Equações (4.8.1) e (4.8.2) definem o limite superior.

$$\frac{k_e}{k_f} = \frac{k_s}{k_f} \left[\frac{k_s}{k_f} - (1-\varepsilon)\left(\frac{k_s}{k_f} - 1\right) - \frac{\frac{4}{3}\left(\frac{k_s}{k_f} - 1\right)^2 (1-\varepsilon)\varepsilon}{1 + \frac{k_s}{k_f} + 3(1-2\varepsilon)\left(\frac{k_s}{k_f} - 1\right)G} \right]^{-1} \quad (4.7)$$

$$\frac{k_e}{k_f} = \left[1 + (1-\varepsilon)\left(\frac{k_s}{k_f} - 1\right) \right] F_u \quad (4.8.1)$$

$$\text{onde, } F_u = 1 - \frac{(1-\varepsilon)\left(\frac{k_s}{k_f} - 1\right)^2 \varepsilon}{3 \left[1 + (1-\varepsilon)\left(\frac{k_s}{k_f} - 1\right) \right] \left\{ 1 + [(1-\varepsilon) + 3(2\varepsilon - 1)G] \left(\frac{k_s}{k_f} - 1\right) \right\}} \quad (4.8.2)$$

os valores de G ficam entre $1/9 \leq G \leq 1/3$, sendo $G=1/9$ para poros formato esférico e $G=1/3$ para cavidades em forma de placas. Utilizando as equações de Miller obtém-se valores de 0,197 e 0,236 W/(m·K) para o limite inferior e 0,678 e 0,707 W/(m·K), para o limite superior.

Com um foco um pouco diferente, alguns pesquisadores fornecem modelos para a obtenção de um valor aproximado da condução real das peças, ao invés de trabalharem com uma faixa de valores. Entre essas temos a Equação (4.9.1), que é uma média ponderada da equação do limite superior de Maxwell, combinada com uma expressão obtida pela introdução de uma função ajustável f_0 [Kaviany, 1995]. Assim como a Equação (4.6), essa média ponderada entre as equações foi publicada em 1986.

$$\frac{k_e}{k_f} = (1-\alpha_0) \frac{\mathcal{E}f_0 + \frac{k_s}{k_f}(1-\mathcal{E}f_0)}{1-\varepsilon(1-f_0) + \frac{k_s}{k_f}\varepsilon(1-f_0)} + \alpha_0 \cdot \frac{2\left(\frac{k_s}{k_f}\right)^2 (1-\varepsilon) + (1-2\varepsilon)\frac{k_s}{k_f}}{(2+\varepsilon)\frac{k_s}{k_f} + 1 - \varepsilon} \quad (4.9.1)$$

$$\text{onde } f_0 = 0,8 + 0,1\varepsilon \quad (4.9.2)$$

$$e \quad \text{Log}(\alpha_0) = -4,898\varepsilon \quad \text{para} \quad 0 \leq \varepsilon \leq 0,0827 \quad (4.9.3)$$

$$\text{Log}(\alpha_0) = -0,405 - 3,154(\varepsilon - 0,0827) \quad \text{para} \quad 0,0827 \leq \varepsilon \leq 0,0298 \quad (4.9.4)$$

$$\text{Log}(\alpha_0) = -1,084 - 6,778(\varepsilon - 0,298) \quad \text{para} \quad 0,298 \leq \varepsilon \leq 0,580 \quad (4.9.5)$$

Utilizando o conjunto de equações acima (4.9.1 a 4.9.5) é possível obter valores estimados da condução efetiva. Para as peças elaboradas na parte experimental do projeto, esses valores variam de 0,514 a 0,582 W/(m·K).

Uma outra forma de obter um valor único para a condução do material, citada por diversos autores [Kaviany, 1995; Nield e Bejan, 2013], é através da utilização da fórmula de médias geométricas, Equação (4.10). Essa equação utiliza uma média geométrica ponderada entre os valores de k_f e k_s , relacionando-os com a porosidade da peça, que indica o quanto de cada fase encontra-se presente no material.

$$k_e = k_s^{1-\varepsilon} \cdot k_f^\varepsilon \quad (4.10)$$

Esta equação apresenta bons resultados para materiais em que k_f não apresenta um valor muito diferente de k_s . Nos casos em que $k_f \gg k_s$ os resultados obtidos se distanciavam dos valores reais, fornecendo valores de condução muito acima do previsto [Nield e Bejan, 2013]. Utilizando a Equação (4.10) e os valores obtidos com os corpos de prova experimentais formulados, obtêm-se valores de condução entre 0,580 e 0,665 W/(m·K).

5. ANÁLISE DA RADIAÇÃO

Em temperaturas mais elevadas, a radiação passa a contribuir na transferência de calor dos materiais. Como o material apresenta poros preenchidos apenas com ar, a radiação influencia a transferência de calor que ocorre no interior da peça.

Segundo Kaviany, 1995, para casos em que a diferença de temperatura entre os pontos analisados não ultrapassa 200 K, podemos definir uma condutividade radiativa utilizando a Equação (5.1.1). A fórmula para cálculo dessa condutividade foi proposta por Tien e Drolen em 1987, no artigo "Independent and dependent scattering in packed-sphere systems".

$$k_r = 4Fd\sigma T_m^3 \quad (5.1.1)$$

$$F = \frac{2}{3(1-\varepsilon)(\eta_{\lambda a} + 2 \cdot B\eta_{\lambda s})} \quad (5.1.2)$$

$$T_m^3 = \frac{E_{B1} - E_{B2}}{4 \cdot \sigma(T_1 - T_2)} \quad (5.1.3)$$

$$E_B = \zeta\sigma T_s^4 \quad (5.1.4)$$

$$\eta_{\lambda s} = \int \frac{I_{\lambda s} r^2 d\Omega}{4\pi \pi R^2 I_{\lambda i}} \quad (5.1.5)$$

$$\eta_{\lambda a} = \int_{4\pi} \frac{I_{\lambda a} r^2 d\Omega}{\pi R^2 I_{\lambda i}} \quad (5.1.6)$$

$$\eta_{\lambda a} = 1 - \eta_{\lambda s} \quad (5.1.7)$$

onde d representa o diâmetro médio das partículas, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, ε a porosidade do material, T_s a temperatura em Kelvin do ponto que está sendo analisado, ξ é a emissividade do material utilizado, $I_{\lambda s}$ é a intensidade espectral dispersada, $I_{\lambda a}$ a intensidade espectral absorvida, r o raio dos poros da peça e R o raio da amostra. Para os valores das intensidades absorvida e dispersada, fez-se diferentes análises variando os valores da relação $I_{\lambda a}/I_{\lambda i}$, de onde chegou-se a conclusão da baixa influência da variação de seus valores. Com isso a relação dos valores foi considerada como sendo 1, e deu-se seguimento à análise.

Os valores das emissividades do material são de grande complexidade de obtenção experimental. Desta forma para obter os valores de radiação, variaram-se os valores da emissividade entre 0,01 e 1, de forma a obter uma relação da alteração que tais valores geram no resultado do problema. Ao resolver as equações com valores variados de emissividade percebe-se uma variação muito pequena no problema, em torno de 3,5% do resultado final. Dessa forma como os valores não apresentam uma influência grande na resolução do problema. Definiu-se um valor emissividade de 1, e deu-se continuidade com os cálculos do problema.

6. ANÁLISE DA CONVECÇÃO

Para fazer a análise da convecção, optou-se por utilizar uma teoria simplificada do modelo da transferência de calor. Optou-se pela utilização dessa forma mais simplificada de cálculo devido a peça estar sujeita apenas a convecção livre durante a análise realizada, de forma a fazer com que a convecção apresente valores relativamente pequenos na transferência de calor. Para realizar essa análise foi considerado convecção de calor forçada, situação mais crítica que a analisada, e o modelo da condução de calor em paralelo.

Segundo Nield e Bejan, 2013, para casos particulares em que a condução ocorre em paralelo com o fluxo de calor (Eq. 4.2) e a porosidade se distribui de forma uniforme é possível incluir a convecção no valor de k_e , através da equação 6.1.

$$k_e = k_f \varepsilon P_e \frac{2B}{\pi} + (1 - \varepsilon) k_s \quad (6.1)$$

$$P_e = \frac{vd}{\alpha_p (1 - \varepsilon)} \quad (6.1.1)$$

$$\alpha_p = \frac{k_f}{\rho c_p} \quad (6.1.2)$$

onde, P_e é o número de Peclet, α_p a difusividade térmica do ar e B é constante de Ergun ($B=1,75$). Utilizando essas formas simplificadas para o cálculo da convecção, percebeu-se que a convecção apresenta um valor de, em média, 0,05% do valor da condutividade total, podendo, neste caso, ser desconsiderada sem gerar erros significativos na análise das amostras.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Faixas de limite máximo e mínimo para a condutividade térmica efetiva negligenciando-se radiação e convecção

A Figura (7.1) apresenta a comparação entre os valores obtidos através dos modelos teóricos, e os valores obtidos durante a etapa experimental do projeto. Para minimizar os efeitos da radiação nesta comparação, a condutividade experimental foi medida a 100 °C. A convecção foi desconsiderada devido ao seu pequeno valor. Assim foi possível analisar exclusivamente a condução experimental, para compará-la com as equações e valores obtidos através das equações vistas. Na Figura (7.1) são mostradas todos os modelos que geram faixas de valores como resultado, de forma a facilitar a comparação entre essas formas e ver a diferença entre seus valores.

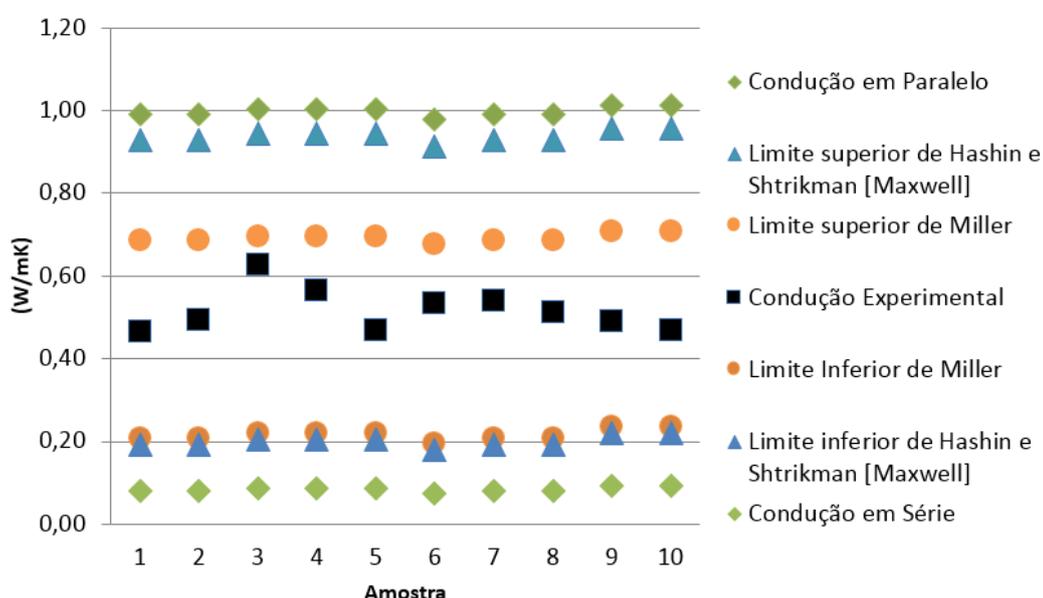


Figura 7.1 – Comparativo entre os diferentes tipos de equações de faixa de valores ao valor obtido experimentalmente de cada amostra.

Como pode ser visto na Figura 7.1, o conjunto de equações que define uma menor faixa de valores são as equações de Miller. Considerando um valor intermediário entre os dois limites de Miller, e comparando esse valor intermediário obtido com a condutividade experimental, obtemos uma diferença média de 0,062 ou 11,2%. A maior diferença está presente na terceira amostra, que apresenta uma divergência a média dos limites de Miller de 26%, e uma incerteza em seu valor experimental de 11%.

As equações de Hashin e Shtrikman, apresentam uma faixa de valores intermediária entre as equações propostas por Miller e as equações de limites em série e paralelo. Comparando os resultados experimentais com uma média entre os valores superiores e inferiores de Hashin e Shtrikman, obtemos uma diferença máxima de 26% e mínima de 1,4%. Estes resultados, obtidos através das equações de Hashin e Shtrikman, são os mesmos dos obtidos para as equações dos limites de Maxwell, devido às equações fornecerem o mesmo valor como resultado.

Conforme o esperado, os modelos da condução em série e em paralelo definiram os limites mais extremos entre os estudados das faixas previstas para a condução real. Ao fazer uma média entre os dois limites opostos e compará-la ao resultado experimental obtêm-se uma diferença de valor entre 0,69 e 18,3%. Como estas equações representam limites mais externos,

entre as faixas calculadas, opostos de caracterização da condução em meios porosos, era esperado que fossem as equações que definem as faixas mais externas do gráfico. Esses valores apresentados na figura acima, podem ser vistos em maior detalhamento nas Tabelas (A.1), (A.2) e (A.3) disponíveis no apêndice.

7.2 Condutividade efetiva

Através da Figura (7.2), pode-se comparar os valores calculados e os resultados da condutividade experimental obtida. Assim como no caso anterior, a condutividade experimental considerada foi a realizada a 100 °C, para evitar maiores influências de outras formas de transferência de calor.

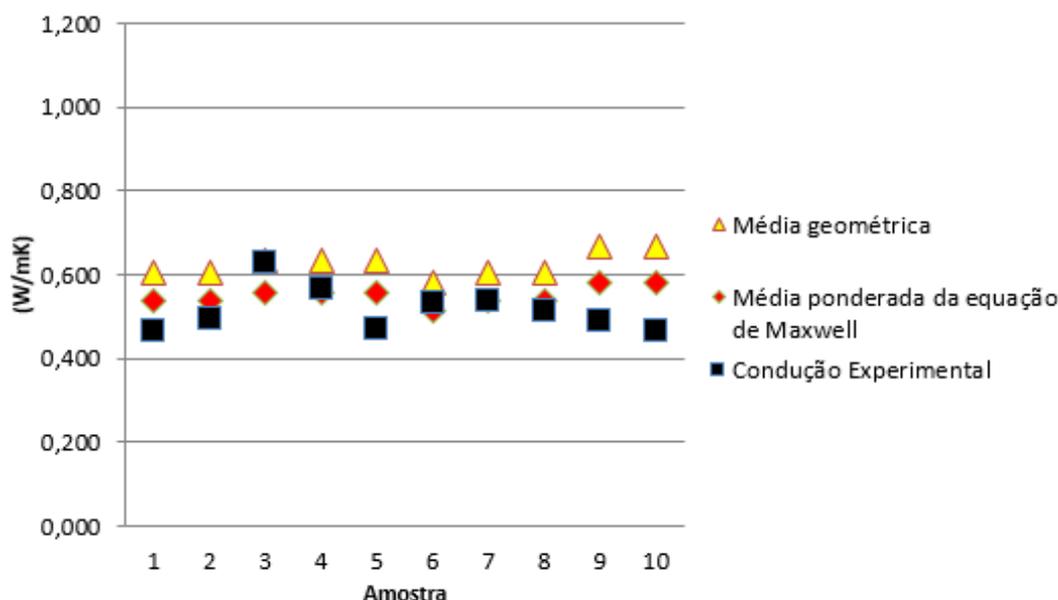


Figura 7.2 – Comparativo das equações da condução efetiva com os valores obtidos nos ensaios de cada amostra.

Percebe-se através da Figura (7.2) que o modelo que considera a média ponderada do limite superior de Maxwell com uma função ajustável f_0 é a que fornece valores mais próximos aos valores obtidos de forma experimental. A diferença entre os valores obtidos ficou entre 0,69 e 24%. A diferença média entre os valores calculados e os obtidos através do experimento foi de 10%. Essa diferença média é próxima à incerteza média da etapa experimental que foi de 8,3%.

Como pode ser observado através da Figura (7.2), o modelo que faz uso de médias geométricas para o cálculo da condução apresenta um valor acima do obtido experimentalmente. Essa discrepância entre os valores pode ser causada pela grande diferença de valores de condução de cada uma das fases, que é uma limitação dessa equação observada por Nield e Bejan, 2013. Considerando a equação das médias geométricas, a maior diferença entre o valor calculado e o medido foi de 42%, e a menor foi de 1,4%. Os valores apresentados na figura acima podem ser vistos com maior detalhamento nas Tabelas (A.4) e (A.5) disponíveis no apêndice.

7.3 Análise da radiação

Para obter um melhor entendimento da radiação interna nos materiais porosos, fez-se uma comparação da influência da radiação nas diferentes temperaturas avaliadas durante a elaboração do projeto. A comparação leva em conta a influência da radiação sobre a

condutividade calculada através de uma média dos limites de Miller, e os valores obtidos durante os ensaios. Como no processo experimental foram estudados sete patamares de temperatura, de 100 °C (373 K) a 700 °C (973 K), foi possível ver o incremento da influência da radiação com a elevação da temperatura de ensaio.

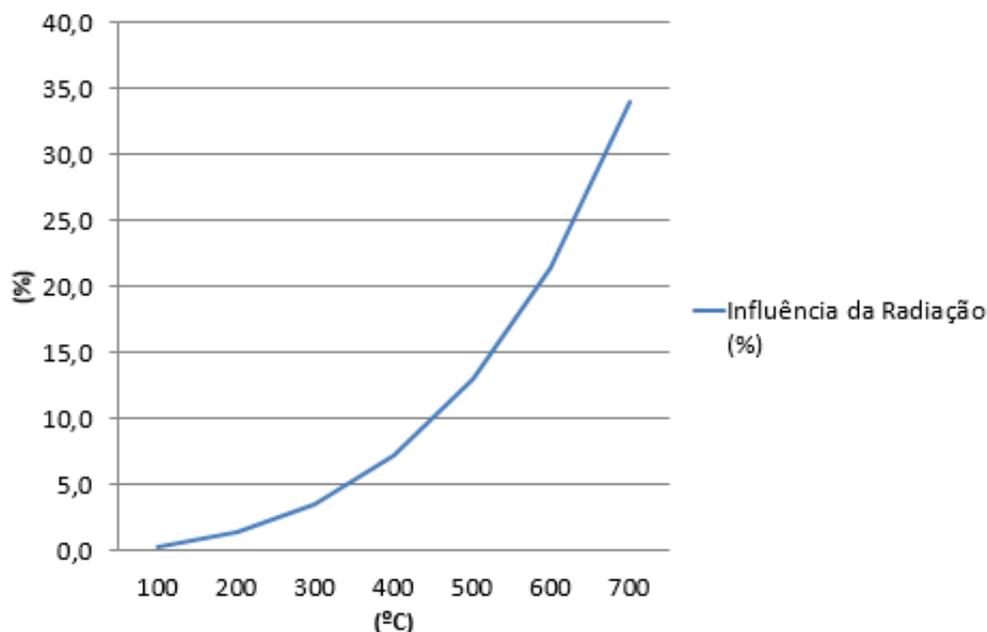


Figura 7.3 – Influência da radiação em porcentagem, na condutividade total.

Como foi possível observar na Figura (7.3), em baixas temperaturas a transferência de calor por radiação é desprezível. Quando o ensaio é realizado a uma temperatura de 400 °C (673 K) ou superior, a transferência de calor por radiação já deve ser considerada. A essa temperatura a radiação será responsável por mais de 5% da troca de calor total da amostra. Em uma temperatura de 700 °C (973 K), a radiação passa a ser responsável por 34% da transferência de calor.

8. CONCLUSÕES

As espumas vítreas elaboradas apresentaram uma baixa condutividade térmica. Com isso comprovou-se a possibilidade de seu uso como materiais isolantes. Além disso tem-se seu baixo custo de produção, uma vez que se utiliza apenas vidro, CaCO_3 e um forno de queima para sua confecção.

A comparação dos modelos analisados com os valores experimentais obtidos, apresentou bons resultados para quase todas as equações analisadas. Apenas um dos modelos estudados apresentou um erro considerável, presente na equação das médias geométricas. Esse pode ter sido causado pela grande diferença entre a condutividade do sólido e do fluido. Nield e Bejan já haviam observado uma discrepância de valor nesses casos, que pode ser causada por uma variação da porosidade próxima as paredes. O erro obtido através da média, das faixas calculadas, e o valor experimental ficou em torno de 11% para as equações de Miller, 13% para as de Hashin e Shtrikman, e 9% para a de condução em série e paralelo. Para os modelos de k efetivo o erro ficou em 11% para a equação da média ponderada de Maxwell e 22% para a equação das médias geométricas. Essas variações entre os valores foram consideradas como aceitáveis uma vez que a incerteza média das amostras foi de 8%.

Através do estudo da radiação nos meios porosos percebeu-se que nas baixas temperaturas a radiação apresentou uma influência pequena e pode ser desconsiderada. A partir de valores de temperatura mais elevados, de 300 a 400 °C, a radiação passou a ser a

responsável por mais de 5% da transferência de calor do meio. Assim, para utilizações em temperaturas próximas a essas, ou superiores, a radiação deve ser calculada e adicionada à condução, para evitar erros elevados.

Para o modelo de peças analisado, a convecção não apresentou influência relevante. Mesmo com um modelo considerando convecção forçada com corrente de ar de 1 m/s, os valores obtidos foram inferiores a 1% da transferência de calor total. Isto ocorreu devido ao baixo diâmetro dos poros internos da amostra que, devido a sua dimensão, não formam correntes de ar em seu interior. Com isto, sabe-se que os valores da convecção livre, a que a peça estava exposta, são ainda menores e podem ser desconsiderados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amhalhel, G. A., Furmanski, P. **“Problems of Modeling Flow and Heat Transfer in Porous Media”**, Institute of Heat Engineering, 1997.

ASTM, **“ASTM E 1225-13 - Standard test method for thermal conductivity of solids using the guarded-comparative-longitudinal heat flow technique”** American Society for Testing and Materials, 2013.

Easypath **“Relatório de Vidraria (Borosilicato)”** www.erviegas.com.br, Acessado em 12/03/2016.

Giacomi, E. **“Material: O Vidro”**, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.

Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. **“Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”**, LTC, 7ª Edição, pp 44 – 118, 2014.

Kandula, M. **“On the Effective Thermal Conductivity of Porous Packed Beds with Uniform Spherical Particles”**, SRC Aerospace, John F. Kennedy Space Center, 2011.

Kaviany, M. **“Principles of Heat Transfer in Porous Media”**, Springer, 2nd Edition, pp 15 - 359, 1995.

Nield, D., Bejan, A. **“Convection in Porous Media”**, Springer, 4th Edition, pp 31 – 46, 2013.

Paiva, R. **“Apenas 3% de todo lixo produzido no Brasil é reciclado”**, <http://g1.globo.com/jornal-hoje/noticia/2015/04/apenas-3-de-todo-o-lixo-produzido-no-brasil-e-reciclado.html>. Acessado em 05/05/2016.

Pokorny, A. **“Aditivação por Óxidos de Agente Espumante à Base de Calcário Dolomítico Sintético e seu Efeito na Formação da Microestrutura de Espumas Vítreas a Partir de Resíduo de Vidro Sodocálcico”**, 2011.

Scheffler, M., Colombo, P. **“Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications”**, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, pp 158 – 175, 2005.

Taurino, R., Lancellotti, I., Barbieri, L., Leonelli, C. **“Glass-Ceramic Foams from Borosilicate Glass Waste”**, International Journal of Applied Glass Science, 2014.

APÊNDICE

Tabela A.1 – Comparativo dos valores obtidos através da faixa de valores em série e paralelo com os resultados experimentais

Peça	Condução experimental (W/mK)	Condução em série (W/mK)	Condução em paralelo (W/mK)	Média entre as faixas calculadas (W/mK)	Divergência (W/mK)	Erro (%)
Amostra 1	0,47	0,081	0,99	0,54	0,07	15,09
Amostra 2	0,49	0,081	0,99	0,54	0,04	8,50
Amostra 3	0,63	0,086	1,00	0,54	-0,08	13,17
Amostra 4	0,57	0,086	1,00	0,54	-0,02	3,90
Amostra 5	0,47	0,086	1,00	0,54	0,08	16,15
Amostra 6	0,53	0,076	0,98	0,53	-0,01	1,29
Amostra 7	0,54	0,081	0,99	0,54	0,00	0,69
Amostra 8	0,51	0,081	0,99	0,54	0,02	4,57
Amostra 9	0,49	0,093	1,01	0,55	0,06	12,64
Amostra 10	0,47	0,093	1,01	0,55	0,09	18,27
Média	0,52	0,084	1,00	0,54	0,02	9,43

Tabela A.2 – Comparativo dos valores obtidos através da faixa de valores de Hashin e Shtrikman, assim como as de Maxwell, com os resultados experimentais

Peça	Condução experimental (W/mK)	Limite Inferior - Hashin e Shtrikman / Maxwell (W/mK)	Limite Superior - Hashin e Shtrikman / Maxwell (W/mK)	Média entre as faixas calculadas (W/mK)	Divergência (W/mK)	Erro (%)
Amostra 1	0,47	0,193	0,928	0,560	0,095	20,339
Amostra 2	0,49	0,193	0,928	0,560	0,066	13,447
Amostra 3	0,63	0,206	0,943	0,574	-0,052	8,375
Amostra 4	0,57	0,206	0,943	0,574	0,008	1,401
Amostra 5	0,47	0,206	0,943	0,574	0,106	22,566
Amostra 6	0,53	0,181	0,913	0,547	0,012	2,315
Amostra 7	0,54	0,193	0,928	0,560	0,021	3,845
Amostra 8	0,51	0,193	0,928	0,560	0,048	9,339
Amostra 9	0,49	0,221	0,958	0,589	0,098	20,007
Amostra 10	0,47	0,221	0,958	0,589	0,122	26,001
Média	0,52	0,201	0,937	0,569	0,052	12,764

Tabela A.3 – Comparativo dos valores obtidos através da faixa de valores de Miller com os resultados experimentais

Peça	Condução experimental (W/mK)	Limite Superior de Miller (W/mK)	Limite Inferior de Miller (W/mK)	Média entre as faixas calculadas (W/mK)	Divergência (W/mK)	Erro (%)
Amostra 1	0,47	0,687	0,208	0,448	0,018	3,814
Amostra 2	0,49	0,687	0,208	0,448	0,046	9,323
Amostra 3	0,63	0,697	0,221	0,459	0,168	26,777
Amostra 4	0,57	0,697	0,221	0,459	0,107	18,964
Amostra 5	0,47	0,697	0,221	0,459	0,010	2,050
Amostra 6	0,53	0,678	0,197	0,437	0,097	18,158
Amostra 7	0,54	0,687	0,208	0,448	0,092	16,997
Amostra 8	0,51	0,687	0,208	0,448	0,065	12,606
Amostra 9	0,49	0,707	0,236	0,471	0,020	4,061
Amostra 10	0,47	0,707	0,236	0,471	-0,003	0,732
Média	0,52	0,693	0,216	0,455	0,062	11,348

Tabela A.4 – Comparativo dos valores obtidos através da equação da média geométrica com os resultados experimentais

Peça	Condução experimental (W/mK)	Média Geométrica (W/mK)	Divergência (W/mK)	Erro (%)
Amostra 1	0,47	0,607	0,142	30,470
Amostra 2	0,49	0,607	0,114	22,998
Amostra 3	0,63	0,636	0,009	1,410
Amostra 4	0,57	0,636	0,069	12,230
Amostra 5	0,47	0,636	0,167	35,655
Amostra 6	0,53	0,580	0,046	8,573
Amostra 7	0,54	0,607	0,068	12,588
Amostra 8	0,51	0,607	0,095	18,544
Amostra 9	0,49	0,665	0,174	35,455
Amostra 10	0,47	0,665	0,198	42,221
Média	0,52	0,625	0,108	22,014

Tabela A.5 - Comparativo dos valores obtidos através da equação da média ponderada das equações de Maxwell com os resultados experimentais

Peça	Condução experimental (W/mK)	Média ponderada das equações de Maxwell (W/mK)	Divergência (W/mK)	Erro (%)
Amostra 1	0,47	0,536	0,070	15,079
Amostra 2	0,49	0,536	0,042	8,488
Amostra 3	0,63	0,558	-0,069	10,933
Amostra 4	0,57	0,558	-0,008	1,429
Amostra 5	0,47	0,558	0,090	19,144
Amostra 6	0,53	0,514	-0,020	3,824
Amostra 7	0,54	0,536	-0,004	0,694
Amostra 8	0,51	0,536	0,023	4,559
Amostra 9	0,49	0,582	0,091	18,467
Amostra 10	0,47	0,582	0,114	24,385
Média	0,52	0,549	0,033	10,700