

DESENVOLVIMENTO DE SEÇÃO DE TESTES COM SENSOR DE FLUXO DE CALOR PARA EXPERIMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE CONDENSAÇÃO

Palavras-Chave: Termopilha, Coeficiente de transferência de calor, Sensor de fluxo

Autores:

PEDRO DOS ANJOS DOMINGUES, FEM - UNICAMP

Prof. Dr. FABIO TOSHIO KANIZAWA (orientador), FEM - UNICAMP

1. INTRODUÇÃO:

O presente projeto tem como objetivo central desenvolver uma metodologia de medição precisa de coeficiente de transferência de calor por convecção para experimentos de condensação. Este presente projeto, em específico, focará em desenvolver um protótipo proposta em um sistema simples e controlado, para que ela seja validada e, assim, possa ser usada no projeto geral. O experimento será basicamente uma imposição de calor controlado por elétricos que envolverá uma tubulação. Nela, escoará internamente um fluido monofásico e serão utilizados sensores de fluxo e termopilha, e seus pares de juntas serão localizados na superfície externa do tubo, para assim medir fluxos de calor e temperatura e, assim, determinar o coeficiente de troca de calor nessa metodologia.

Por fim, esse mesmo protótipo será testado em fluido secundário para então ser aplicado para o caso de condensação.

Até o momento, foram feitos os cálculos teóricos de distribuição de temperatura e erro, para estimar a melhor disposição para o protótipo, e da estimativa do fluxo máximo de calor para a condição de teste escolhida, programação do Arduino para os termopares e termopilha e montagem do tubo de teste na íntegra. Faltam ainda a execução dos experimentos propriamente ditos.

2. OBJETIVO PROPOSTO:

A presente pesquisa tem como objetivo proposto o desenvolvimento de seção de testes com sensor de fluxo para ensaios de transferência de calor no interior de dutos circulares.

3. METODOLOGIA:

3.1. Cálculo teórico da distribuição de temperatura e erro

A termopilha é uma configuração de montagem de juntas de termopares visando medir a diferença de temperatura entre duas regiões. Neste sentido, o sensor de fluxo de calor pretendido neste projeto consiste na utilização da termopilha, a MAX31856 (Analog devices, 2015) para estimativa

de fluxo de calor através da diferença de temperatura ao longo de camadas de material isolante elétrico. O material isolante elétrico para a montagem da termopilha no experimento para separar os pares de junta consiste em uma fita de poliimida (Kapton®) (3M, 2007), por sua disponibilidade comercial, facilidade de utilização e resistência para ampla faixa de temperaturas. Portanto, torna-se necessário a determinação da espessura desse isolante que forneça uma boa relação entre a distribuição de temperatura e erro, levando em consideração as dimensões de alguns possíveis tubos que poderiam ser usados para o protótipo.

Os tubos disponíveis para o experimento têm diâmetro externo e espessura, de 3,5 mm e 0,25 mm, 6 mm e 0,5 mm e 10 mm e 0,5 mm, feitos de AISI 304 (Aperam South America). Desse modo, os cálculos foram todos feitos para esses três tubos, com valores de fluxo de 0,5, 1, 2, 4, 8 e 10 kW/m² e, para um desses casos, calculou-se a distribuição de temperatura e erro para valores de 1 a 19 camadas de fita, sendo que cada fita tem 0,55 mm de espessura considerando a resolução dos canais de aquisição e sensibilidade do termopar.

Resumindo o procedimento para achar as relações do gradiente de temperatura, relacionou-se a potência, que pode ser escrita tanto pelo produto da taxa de transferência nominal de calor por unidade de área (\dot{q}_n''), pi, o diâmetro interno do tubo ($d_{i,t}$) e o comprimento do tubo (L), quanto pela razão entre o gradiente de temperatura (ΔT) e a Resistência Térmica do processo (R_t). Relacionando ambas equações, aplicando a equação de resistência térmica de condução para a camada de poliimida e isolando o gradiente de temperatura, sabendo que os diâmetros interno e externo de poliimida são $d_{i,p}$ e $d_{e,p}$, respectivamente, e K_p é a condutividade térmica da poliimida, tem-se que:

$$\Delta T = [\dot{q}_n'' * d_{i,t} * \ln(\frac{d_{e,p}}{d_{i,p}})] / (2 * K_p) \quad (1)$$

Para calcular o erro desse cálculo de \dot{q}_n'' ($U_{\dot{q}_n''}$), sabe-se que ele pode ser relacionado à incerteza da variável ΔT ($U_{\Delta T}$), que, por sua vez, pode ter como sua causa resumida a sensibilidade da termopilha. Porém, $U_{\Delta T}$ deve ser dividido, então, pelo número de pares de juntas. Assim, a equação do erro $U_{\dot{q}_n''}$ relativo ao valor de \dot{q}_n'' é dado por:

$$\frac{U_{\dot{q}_n''}}{\dot{q}_n''} = (2 * K_p * U_{\Delta T}) / [\dot{q}_n'' * d_{i,t} * \ln(\frac{d_{e,p}}{d_{i,p}})] \quad (2)$$

3.2. Definição da faixa de operação

Com os cálculos anteriores, foi possível uma análise para estimar a geometria do protótipo mais adequado ao experimento. Com esses valores, agora é necessário averiguar qual o valor máximo de fluxo de calor possível para essa disposição e, assim, analisar se a proposta de protótipo realmente é aplicável para a abrangência de testes esperada. Para fins de dimensionamento, considera-se a faixa de fluxo de calor que seria obtida caso o fluxo de calor fosse imposto através da passagem de corrente elétrica através da seção com fonte de corrente contínua disponível no grupo de pesquisa, com geração de calor por efeito Joule. Assim, determina-se o fluxo de calor máximo a partir da seguinte relação, onde Pot é a potência máxima estimada a partir das características da fonte de corrente contínua, geometria do tubo e resistividade elétrica do material:

$$\dot{q}_n''_{max} = Pot / (\pi * d_{i,t} * L) \quad (3)$$

3.3. Montagem do protótipo

Por meio dos cálculos anteriores, como será mostrado nos resultados, julgou-se satisfatório o uso de um tubo de 10 mm de diâmetro, com 2 pares de junta e 2 camadas de fita Kapton separando cada junta de cada par. Portanto, o protótipo no qual o experimento será realizado foi montado da

seguinte maneira: dois pares de juntas, uma do lado da outra, sendo que cada par é dado por uma junta abaixo das 2 camadas de fita, e a outra imediatamente acima da primeira, porém separadas pelas camadas. Por meio desses pares, será possível determinar a diferença de temperatura entre as duas seções e, assim, uma aproximação do fluxo de calor nesse intervalo de escoamento. Finalmente, uma junta isolada também foi colocada abaixo das camadas de Kapton, ao lado e ao centro dos dois pares de junta, a fim de conseguir uma aproximação da temperatura da superfície durante o experimento.

Porém, também foi necessário isolar eletricamente as juntas abaixo da camada do tubo, já que seu material é condutor e nele passará um fio que atuará como um resistor elétrico. Assim, com a passagem de corrente elétrica, que será a responsável pela imposição de fluxo de calor controlado, os resultados obtidos seriam comprometidos, pois essa corrente seria conduzida pelos fios de termopar. Portanto, para efetuar tal isolamento, uma camada de fita Kapton na superfície do tubo, antes de colocar as primeiras juntas. Ademais, as juntas de cima das duas camadas de fita precisavam ser fixadas de alguma maneira, então também foi colocada uma camada acima das juntas de cima. Para uma visualização mais facilitada, um esboço de toda a montagem pode ser visualizado na Figura 1:

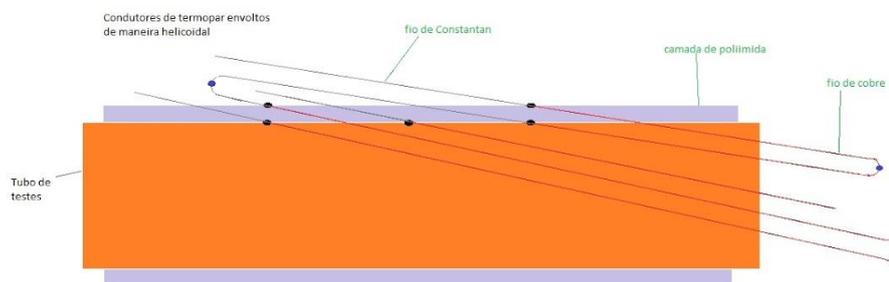


Figura 1- Esquema da montagem do protótipo

Essa parcela ilustrada foi feita considerando a metade final do comprimento do tubo, para garantir que o escoamento na seção de teste esteja desenvolvido. A junta isolada, centralizada com relação aos dois pares de juntas, foi colocada na metade dessa parcela para atuar como sensor de temperatura da parede.

Vale ressaltar que todas as camadas de fita Kapton colocadas, principalmente as que separam as juntas de cada par, foram feitas de maneira contínua, portanto em um ângulo de aproximadamente 45° com a seção transversal, e de maneira a evitar ao máximo a sobreposição de partes da mesma camada ou vãos entre as mesmas, que comprometem a uniformidade do experimento e, assim, a confiabilidade e exatidão dos seus resultados.

Em termos práticos, cada junta entre os fios de cobre (vermelhos) e cobre-níquel (cinzas) foi feita por solda. Assim, a montagem foi feita com as disposições de juntas e camadas de fitas como descrito anteriormente, porém suas extremidades, indicadas pelos pontos azuis no esboço, ainda separados. Nota-se que os fios não poderiam ter contato entre si e, portanto, eles foram enrolados ao longo da camada em que se localizavam de modo helicoidal, de maneira que os fios não tiveram contato algum e ficaram organizados, sendo possível a identificação de qual fio corresponde a qual junta, fundamental para as seguintes etapas da montagem. Por fim, com tudo isso montado, as extremidades dos fios de mesmo material que deveriam ser juntadas, junções essas indicadas pelos pontos azuis do esboço, foram feitas também por meio de solda.

Finalmente, durante o experimento, as duas extremidades livres correspondentes à junta isolada são fixadas em um módulo de leitura de termopar (MAX 31856), e as outras duas correspondentes, cada uma a um par de juntas, são fixadas em outro módulo. Cada módulo está em

uma porta de um único BaseBoard, que por sua vez está em um Arduino. Por meio de um programa desenvolvido, esse Arduino receberá como entradas as tensões em cada sensor.

3.4. Experimentos

Devido à complicações e imprevistos em algumas das etapas apresentadas, bem como principalmente o atraso da chegada de alguns elementos cruciais para o experimento, ainda não foi possível a realização dos experimentos até o momento da escrita deste resumo. Porém, será apresentado a seguir o plano que se fez e que será executado nas próximas semanas.

Para a execução dos testes, primeiramente a água de um tanque será bombeada por uma bomba, cuja rotação é controlada por um inversor de frequência.

Depois disso, o sistema conta com 5 rotâmetros, que garantem a medição da vazão da água para a seção de teste com distintas faixas de medição.

A cada experimento, são medidas a temperatura da superfície e a diferença de temperatura através da termopilha, e a temperatura da água, medido por uma junta localizada internamente ao tubo de silicone na entrada do protótipo. Para estimar, então, o coeficiente de transferência de calor, será utilizada a seguinte fórmula, dada pela lei de resfriamento de Newton:

$$h = \dot{q}'' / (T_s - T_{\text{água}}). \quad (4)$$

Esse fluxo de calor envolvido no experimento pode ser obtido tanto pela potência elétrica responsável pela transferência de calor a partir da resistência elétrica do fio condutor de corrente, quanto a partir da resistência térmica dada pelo gradiente de temperatura medido entre os pares de junta. Assim, comparando os diferentes valores de fluxo e, portanto, de coeficientes de transferência de calor, poderá ser analisada a precisão do método de medição proposto. Para tanto, pretende-se fazer testes com fluxos de 600 a 6000 W/m², com progressão aritmética de 600 W/m², para cada vazão, que serão 3, tais que resultem em um número de Reynolds de 10000, 20000 e 30000.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Nos cálculos de previsão distribuição teórica de erro e temperatura, buscou-se valores de erro relativo ao fluxo satisfatoriamente baixos, sendo estabelecido um máximo de 5%. Para 2 pares de juntas, conclui-se que esse critério já foi bem atendido, já que o caso limite, que é 1 camada para os menores valores de diâmetro externo e fluxo de calor (3,5 mm e 500 W/m², respectivamente), o erro foi de aproximadamente 2,02%.

Com isso, no primeiro momento foram analisados os valores dos gradientes de Temperatura para 10 mm de diâmetro externo, pois um tubo maior levaria a uma maior facilidade na montagem. Julgou-se que duas camadas de poliimida era suficiente para esse caso, pois o maior ΔT encontrado (para fluxo de 10 kW/m²) foi de 8,16 aproximadamente, que não foi considerado grande suficiente para interferir de maneira crítica na exatidão do experimento.

Além disso, aplicando os cálculos de fluxo de calor máximo para o tubo de 10 mm, seu valor foi de aproximadamente 6,143 kW/m², valor suficiente para fazer um número satisfatório de experimentos.

Por isso, o protótipo escolhido e montado foi do tubo com 10 mm de diâmetro externo, com duas camadas de fita de poliimida Kapton entre as juntas dos dois pares.

5. BIBLIOGRAFIA

3M. *Ficha técnica do produto Fita de Poliimida 5413*. Empresa 3M. Disponível em: <https://multimedia.3m.com/mws/media/10268440/fita-de-poliimida-5413-19mmx33m.pdf>. Agosto, 2007.

ANALOG DEVICES. **Ficha técnica do produto MAX31856**. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max31856.pdf>. Abril, 2015.

APERAM SOUTH AMERICA. **Especificações técnicas do Aço Inox**. Disponível em: <https://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/2015/11/A%C3%A7o-inox-especifica%C3%A7%C3%B5es-t%C3%A9cnicas.pdf>. Acesso em: novembro, 2023.