

7

Confiabilidade do Simulador Térmico

7.1

Testes de Confiabilidade da Bancada Experimental

Embora a execução da montagem da bancada tenha ocorrido com o máximo de cuidados, respeitando-se diversos critérios de projeto para que houvesse a garantia de que a mesma produzisse resultados confiáveis, foi necessário realizar testes utilizando fluidos para os quais os respectivos resultados são conhecidos na literatura. Neste intuito foram realizados testes onde a água foi o fluido de trabalho. Tais testes estão descritos a seguir.

Para o escoamento em tubo, puderam ser medidos os números de Nusselt, os quais foram comparados com as correlações encontradas na literatura para fluidos newtonianos sob escoamentos em condição de completo desenvolvimento. Para o espaço anular, diversos ajustes foram feitos na seção. Assim, a mesma foi acentuadamente modificada com relação à sua configuração inicial. Apesar destas alterações, descritas neste capítulo, não foi possível fazer a verificação da bancada utilizando água no espaço anular, por não se observar o escoamento completamente desenvolvido.

7.1.1

Verificação da Bancada para Testes em Tubo

Para este caso utilizou-se água da rede pública entrando a temperatura ambiente na seção de testes. A condição de contorno na parede do tubo foi de fluxo de calor uniforme, com escoamento nos regimes laminar e turbulento.

A corrente elétrica escolhida para cada teste realizado foi a que proporcionava mais claramente a constatação da distribuição linear da temperatura ao longo da parede do tubo. Isto é o que se esperava ocorrer na região completamente desenvolvida do escoamento através do tubo, o estabelecimento do regime permanente. Foram necessárias inúmeras tentativas de combinações entre vazões e correntes, até que fossem consideradas sa-

tisfatórias as temperaturas lidas, no sentido de caracterizar um escoamento completamente desenvolvido no interior do tubo. A maneira mais prática para encontrar a combinação ideal entre vazão e corrente aplicada no tubo foi fixar uma vazão e aumentar aos poucos a corrente. Entre um valor de corrente e outro, aguardavam-se alguns minutos, tempo este que era suficiente para caracterizar a tendência da distribuição de temperaturas na parede do tubo.

Observou-se que, somente com vazões muito baixas foi possível verificar o escoamento completamente desenvolvido no tubo. Com a fonte de potência disponível, aplicando-se a mesma corrente (muito próxima da máxima corrente possível de ser inserida no tubo (limitada pela resistência elétrica do mesmo), numa vazão igual ao dobro da que está sendo aqui apresentada, na figura 7.1, já era suficiente para não se obter uma distribuição linear das temperaturas. Para o caso de vazões abaixo da que foi escolhida para o teste, as temperaturas médias de cada seção de medição apresentavam-se muito próximas entre si. A fim de comparar o valor do coeficiente convectivo determinado a partir dos dados experimentais com o coeficiente convectivo avaliado segundo uma correlação disponível na literatura, escolheu-se a correlação proposta por Gnielinski [11] para o cálculo do número de Nusselt. Deve-se ressaltar que o caso em estudo encontra-se dentro dos requisitos delineados para utilização de tal correlação. Esta correlação foi desenvolvida a partir da correlação de Petukov, Kirilov e Popov [11], a qual é aplicada em escoamentos completamente turbulentos ($Re > 10^4$). Gnielinski propôs uma modificação na mesma para que fosse possível o seu uso em escoamentos com números de Reynolds ainda na faixa da região de transição. Esta correlação proporciona melhor exatidão dos resultados, evitando assim que os coeficientes convectivos sejam superestimados, e se apresenta como:

$$Nu_D = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re_D - 1000) Pr}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} = Nu_{**} \quad (7-1)$$

onde

$$f = (0,79 \ln Re_D - 1,64)^{-2} \quad (7-2)$$

A equação 7-1 é adequada para

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{tubo circular liso} \\ 0,5 < Pr < 2000 \\ 2300 < Re_D < 5 \times 10^6 \end{array} \right.$$

A tabela 7.1 a seguir apresenta os resultados obtidos a partir dos testes. No cálculo das incertezas, para o caso da água, estimou-se uma incerteza de $\pm 5 \frac{J}{kgK}$ para o calor específico. Adotou-se este valor porque, apesar de ter sido obtido de tabela na literatura [11], o mesmo varia de acordo com a temperatura. As temperaturas e vazão apresentadas nesta tabela foram selecionadas após o estabelecimento do regime permanente. O gráfico mostrado logo a seguir refere-se ao teste em consideração, onde as temperaturas indicadas são dos termopares distribuídos circunferencialmente e longitudinalmente. Neste gráfico, as curvas TT-3a, TT-3b e TT3-c correspondem às temperaturas dos termopares pertencentes à seção transversal da posição $z_3 = 1,79m$ do eixo. As curvas TT-2a, TT-2b e TT2-c correspondem às temperaturas dos termopares pertencentes à seção transversal localizada na posição $z_2 = 2,12m$ e, as curvas TT-1a, TT-1b e TT1-c correspondem às temperaturas dos termopares situados na seção transversal da posição $z_1 = 2,45m$ do eixo. O escoamento se deu no sentido de z_3 para z_1 .

As curvas T_{ibulk} e T_{obulk} referem-se às temperaturas de mistura na entrada e na saída do tubo, respectivamente. A temperatura de *bulk* indicada pelo termopar que estava localizado no centro da seção de posição z_1 (saída) apesar de ter sido medida, não entrou nos cálculos de Nusselt. O valor utilizado nos cálculos foi o valor determinado experimentalmente. Mas, mesmo assim, determinou-se o valor teórico através da equação 6-15. Constatou-se desprezível diferença entre os valores das temperaturas de *bulk* medida e teórica nos testes com água. Esta concordância não foi alcançada durante os testes com solução aquosa de carbopol, mas isto será discutido posteriormente, no capítulo 8.

O valor do número de Nusselt calculado segundo a equação 7-1, Nu_{**} , é 24, enquanto o valor médio obtido experimentalmente é 19,30. Observa-se na tabela que o valor da média nos Nu 's locais obtida a partir dos dados experimentais, ficou aproximadamente 20% abaixo do valor encontrado através da correlação de Gnielinski. Observa-se, pela figura 7.1, a qual ilustra a variação das temperaturas ao longo do tempo, que as temperaturas oscilam

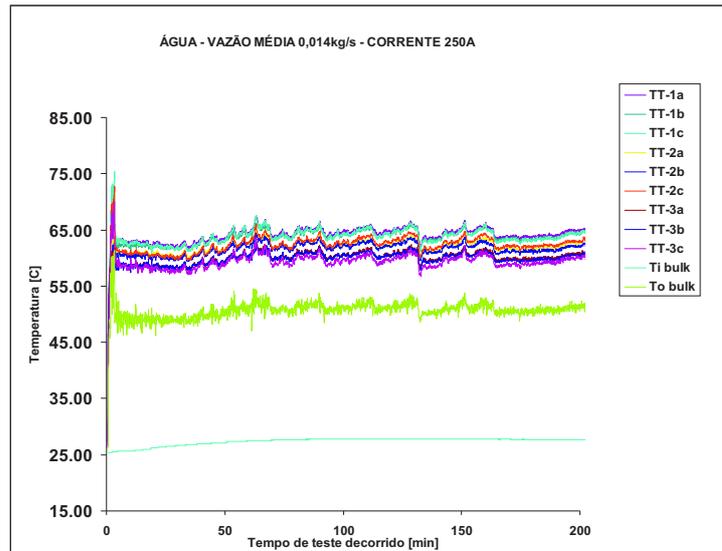


Figura 7.1: Evolução da temperatura com o tempo

Tabela 7.1: Resultados do teste do escoamento de água em tubo

$z_3 = 1,79 \text{ m}$		$D_i = 0,00926 \text{ m}$		$c_p = 4180 \frac{J}{kgK}$				
$z_2 = 2,12 \text{ m}$		$L_{aquecido_{total}} = 2,75 \text{ m}$		$\mu = 0,0005 \text{ Pa.s}$				
$z_1 = 2,45 \text{ m}$		$Pr = 3,21$		$k = 0,65 \frac{W}{mK}$				
\dot{m} [$\frac{kg}{s}$]	Re	\bar{I} [A]	\overline{ddp} [V]	$\overline{q''}$ [$\frac{kW}{m^2}$]	$\overline{\delta q''}$ [$\frac{W}{m^2}$]	Nu	δNu	Nu_{**}
0,014	3850	250	6,25	19,53	110,67	19,30	$\pm 3,38$	24,00

livremente ao longo do tempo. Analisando-se os termos que contribuem para a incerteza do número de Nusselt (equação 6-29), verifica-se que o termo da equação que mais contribui é o que está relacionado à incerteza da temperatura de bulk. Para o instante de tempo correspondente aos dados apresentados na tabela, a incerteza da temperatura de mistura ficou em 1,23°C. Como este teste teve o objetivo de averiguar se a seção da bancada experimental para testes em tubo estava satisfatória e, levando-se em conta as diversas fontes de incertezas do experimento, considerou-se a mesma apta e bem adequada para as medições, pois o resultado mostrou-se coerente com o que se espera, de acordo com o que há disponível e confiável na literatura.

7.1.2

Verificação da Bancada para Testes em Espaço Anular

Na averiguação da seção de testes do espaço anular utilizou-se o mesmo procedimento para a obtenção das condições ideais para a análise dos resultados, que foram descritos na seção anterior, onde tais condições deveriam possibilitar que as temperaturas medidas representassem bem o comportamento típico de escoamento numa região completamente desenvolvida. Como o tubo interno do espaço anular foi o mesmo para todas as razões de raios trabalhadas, e no mesmo estava a condição de contorno submetida a fluxo de calor uniforme, bastou a realização de testes apenas com uma razão de raios, para efeito de verificação da bancada. A razão de raios escolhida para o primeiro teste da seção anular foi de 0,15 (diâmetro interno 31,75mm e o diâmetro externo 211,7mm). Após vários testes sem sucesso, esta razão de raios foi substituída, passando a se trabalhar com a razão de raios 0,33, sendo o diâmetro interno 31,75mm e o diâmetro externo 95,5mm. Com esta razão de raios, foram efetuados os testes que influenciaram as modificações ocorridas durante o ajuste da bancada.

No primeiro momento, como a seção anular foi montada de forma que o fluido entrasse pela parte superior de uma extremidade e saísse pela parte inferior da outra extremidade (como mostrado na figura 7.2), houve grande dificuldade para obter escoamento completamente desenvolvido nos testes com água. Isto foi devido ao fato de o fluido tender a escoar com mais facilidade na metade inferior do espaço anular (para onde estava sendo direcionado por ocasião do seu modo de inserção na seção de teste), somado à facilidade de sair desta seção também pela parte inferior. Estes dois fatores permitiam que a velocidade média de um anel de fluido, na metade inferior, ficasse mais elevada do que na sua parte superior. Como consequência disso, o perfil de temperatura em cada seção transversal do tubo interno do anular também não ficou uniforme.

Estas dificuldades levaram à decisão de se trocar o fluido, indo-se diretamente para o uso da solução aquosa de carbopol pois, pelo fato de ser mais viscosa do que a água pura, tendia a oferecer melhor distribuição do fluido dentro do anular. Para enfraquecer o efeito da distribuição irregular do fluido na tubulação, colocou-se, dentro do espaço anular, na entrada desta seção, esferas de vidro na intenção de distribuir melhor o fluido na entrada da seção. Não tendo sido o suficiente para solucionar este problema, as esferas foram retiradas e, em substituição a estas, foram colocados retificadores de fluxo, um na entrada (axialmente) localizado a jusante da boca de entrada



Figura 7.2: Circuito hidráulico e seções de testes. Primeira concepção da bancada

do fluido na seção e outro na saída , a montante da boca de saída do fluido.

Depois de serem experimentados diferentes comprimentos de retificadores de fluxo, e não sendo observadas melhorias significativas no padrão do escoamento, concluiu-se que deveriam ser modificadas a forma de inserção e de saída do fluido do espaço anular. Foram então canceladas as bocas flangeadas transversais ao eixo que admitiam e liberavam o fluido da seção. Na entrada e na saída foram colocadas câmeras plenas. Na câmera da entrada o fluido entrava pelas laterais, na altura do eixo, de forma que ficasse razoavelmente distribuído ao alcançar a entrada da seção de testes. Na câmera da saída, foi colocada uma tampa, em forma de anel, contendo seis furos, pelos quais o fluido deixava a seção axialmente. Deste ponto o fluido seguia, por meio de mangueiras transparentes para o restante do circuito. As mangueiras transparentes permitiam visualizar o aspecto do fluido (detectar presença de bolhas etc.).

A figura 7.3 mostra as câmeras plenas.

Como o comprimento total médio dos tubos de testes foi de 3,5 metros, para anexar as câmeras plenas foi necessário aumentar o comprimento do tubo interno do anular. Deste modo, foi executada uma extensão no tubo de cobre, nas duas extremidades do tubo de aço inox. Esta parte foi revestida com borracha retrátil, evitando assim o contato do cobre com o fluido, para não haver oxidação.

A condição de contorno na parede externa do espaço anular foi de superfície adiabática, enquanto a parede interna recebia o fluxo de calor uniforme.

No capítulo seguinte apresentam-se os resultados .



Figura 7.3: Seção anular com câmera plena