

CORRELAÇÃO PARA O PERFIL DE ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA EM RESERVATÓRIOS CILINDRICOS HORIZONTAIS

Darci Luiz Savicki [-darcilus@mecanica.ufrgs.br](mailto:darcilus@mecanica.ufrgs.br)
Horácio Antônio Vielmo [-vielmoh@mecanica.ufrgs.br](mailto:vielmoh@mecanica.ufrgs.br)
Arno Krenzinger arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo: Em trabalhos anteriores foram apresentados estudos numéricos e experimentais do processo de resfriamento de um fluido contido no interior de reservatórios cilíndricos e uma correlação para o grau de estratificação térmica para tais reservatórios. Os dados numéricos foram obtidos através da simulação computacional do processo de resfriamento de um reservatório térmico, utilizando um código previamente validado com dados experimentais. Neste trabalho mostra-se que utilizando a correlação para o grau de estratificação térmica em conjunto com um perfil normalizado do campo de temperatura, e aplicando a lei de resfriamento de Newton, pode-se obter uma expressão para determinar a evolução do perfil de estratificação térmica no interior de um reservatório no decorrer do processo de resfriamento. A aplicação desta correlação permite prever o perfil de estratificação térmica que irá ocorrer em reservatórios, a partir do conhecimento de variáveis como a condutividade térmica e espessura da camada de isolamento térmico, dimensões do reservatório, da temperatura ambiente e da temperatura interna inicial.

Palavras-chave: Estratificação Térmica, Convecção natural, Método dos Volumes Finitos, simulação numérica tridimensional.

1. INTRODUÇÃO

Na presença de um campo gravitacional, a variação da massa específica em um fluido em decorrência de um campo de temperatura não-uniforme determina o aparecimento de forças de empuxo. O resultante movimento do fluido, conhecido como convecção natural, torna-se importante em muitas aplicações técnicas, tais como dispositivos de aquecimento ou resfriamento, coletores solares e reservatórios térmicos de armazenamento de água quente, dentre outros. No caso dos reservatórios, o movimento do fluido em decorrência da convecção natural determina a formação de um perfil de temperatura estratificado, cujo grau de estratificação está diretamente ligado à eficiência térmica do sistema como um todo.

Nas simulações numéricas, a maioria dos trabalhos que abordam o problema da convecção natural em cavidades considera algum tipo de simetria de modo a reduzir o domínio de cálculo para duas dimensões. Um exemplo recente é o trabalho de Oliveski *et al* (2003), que apresenta um estudo experimental e uma simulação numérica bidimensional dos campos de temperatura e velocidade no interior de reservatórios térmicos cilíndricos verticais.

Quando se considera o reservatório térmico cilíndrico horizontal, uma descrição satisfatória da convecção natural requer a consideração das três dimensões físicas. Entretanto, existe apenas um pequeno número de trabalhos para estas condições. Um dos motivos é o aumento da malha e o conseqüente aumento do tempo computacional, que até bem pouco tempo tornavam tais simulações impraticáveis.

Um dos poucos exemplos de investigação numérica tridimensional é descrito em Schneider e Straub (1992) que consideraram o problema da convecção natural laminar em cilindro inclinado com diferentes temperaturas nas paredes axial e isolado lateralmente. Os autores concluíram que, para as condições de fronteira estudadas, com $Pr=0,7$ e $H/D=1$, a máxima transferência de calor ocorre para ângulos $\theta \approx 45^\circ-60^\circ$. Usando o software CFX-F3D, Xia *et al* (1998) simularam o escoamento laminar e turbulento e a transferência de calor em um cilindro horizontal com fluxo de calor prescrito nas paredes e validaram seus resultados com dados experimentais próprios. Os autores mostraram que após atingir o regime estável, ocorre a estratificação da temperatura em planos verticais e concluíram que é a camada limite hidrodinâmica junto às paredes que dirige esta estratificação. Rubinov *et al.* (2004) estudaram numericamente a ocorrência de instabilidades tridimensionais do fluxo convectivo natural em cilindro vertical com parede lateral parcialmente aquecida. Mais recentemente, Savicki et al. (2007) apresentaram um estudo numérico e experimental do comportamento do processo de transferência de calor em reservatórios térmicos cilíndricos horizontais, e propuseram correlações para o coeficiente de transferência de calor e para o grau de estratificação.

Neste trabalho faz-se uma ampliação da análise dos resultados apresentados em trabalhos anteriores, e propõe-se uma correlação para o perfil de estratificação do campo de temperatura no decorrer do processo de resfriamento. Os resultados numéricos apresentados são validados com dados experimentais obtidos pelos próprios autores. Basicamente, o aparato experimental utilizado consistiu em um sistema formado por um reservatório térmico, um aquecedor de passagem, uma bomba centrífuga e uma sonda de termopares. A utilização deste equipamento permitiu reproduzir a perda de calor em reservatórios térmicos semelhantes aos utilizados em sistemas de aquecimento de água por energia

solar. Foi possível assim determinar o perfil de temperatura ao longo do diâmetro vertical do reservatório e comparar com o perfil obtido via simulação numérica.

2. MODELO FÍSICO E MATEMÁTICO

A Fig. 1 apresenta a geometria e as dimensões do reservatório utilizado no estudo experimental.

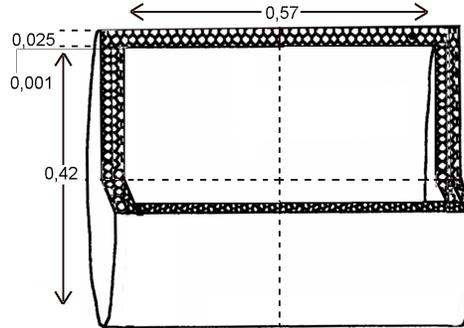


Figura 1 – Dimensões do reservatório cilíndrico horizontal, medidas em [m].

As camadas da parede metálica interna e de isolamento têm valores iguais nas direções radial e axial, sendo respectivamente 0,001 m e 0,021 m. A parede metálica interna é de aço inoxidável e o isolamento de poliuretano. No experimento, o reservatório foi totalmente preenchido com água aquecida a uma temperatura uniforme. Após deixou-se o reservatório resfriar e feito o monitoramento da temperatura ao longo do diâmetro vertical.

No estudo numérico, foi considerado um domínio de cálculo que corresponde a um quarto do tamanho real do reservatório, tendo em vista os planos de simetria.

Em coordenadas cilíndricas e usando a aproximação de Boussinesq, o problema pode ser descrito pelo seguinte sistema de equações.

Equação de continuidade:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (rV_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Equações do movimento:

Na direção radial r:

$$\rho_\infty \left(\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_\theta^2}{r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p_H}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (rV_r)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right] + \rho_\infty \beta (T - T_\infty) g \cos \theta \quad (2)$$

Na direção angular θ :

$$\rho_\infty \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} - \frac{V_r V_\theta}{r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p_H}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (rV_\theta)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2} \right] - \rho_\infty \beta (T - T_\infty) g \sin \theta \quad (3)$$

Na direção axial z:

$$\rho_\infty \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p_H}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right] \quad (4)$$

Condições iniciais:

Para todo domínio: $V_r = V_\theta = V_z = 0$

Condições de contorno:

Em toda região do isolamento e parede metálica: $V_\theta = V_r = V_z = 0$

Na linha $r=0$: $V_\theta = V_r = 0, \frac{\partial V_z}{\partial r} = 0$

No plano de simetria (r, z) , onde $\theta=0$ e $\theta=\pi$: $\frac{\partial V_r}{\partial \theta} = \frac{\partial V_z}{\partial \theta} = V_\theta = 0$

No plano de simetria (r, θ) , onde $z=0$: $\frac{\partial V_\theta}{\partial z} = \frac{\partial V_r}{\partial z} = V_z = 0$

Equação da energia:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + S^T \quad (5)$$

Condições iniciais:

Na região interior : $T=T_{int}$

E na região do isolamento térmico e parede metálica: $T=1/2(T_{int}+T_{ext})$

Condições de contorno:

Na linha $r=0$: $\frac{\partial T}{\partial \theta} = 0$

No plano de simetria (r, z) , onde $\theta=0$ e $\theta=\pi$: $\frac{\partial T}{\partial \theta} = 0$

No plano de simetria (r, θ) , onde $z=0$: $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$

Nas fronteiras $r=r_{ext}$ e $z=z_{ext}$: h_{ext} e T_{ext} prescritos.

O coeficiente de transferência de calor na fronteira exterior adotado foi de $h=8 \text{ W/m}^2\text{K}$.

3. RESULTADOS NUMÉRICOS

A Fig. 2 mostra o campo de temperatura nos planos de simetria, ambas após 1 hora de resfriamento.

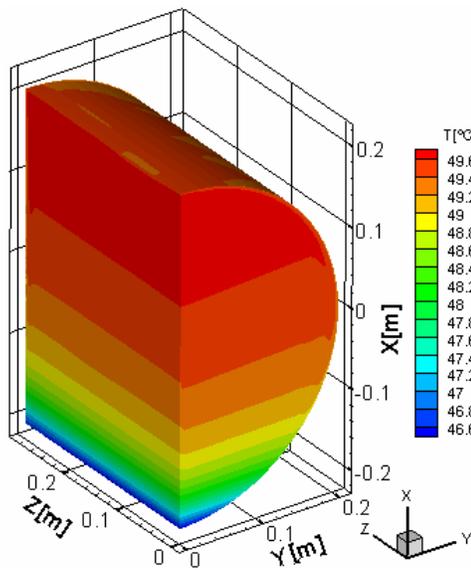


Figura 2 – Vista do campo de temperatura a partir dos planos de simetria.

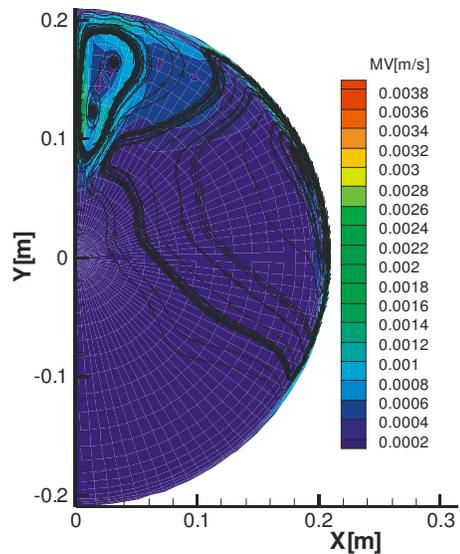


Figura 3 – Perfil das componentes de velocidades radial e angular no plano de simetria (r, θ) .

Observa-se que o campo de temperatura está fortemente estratificado no fundo do reservatório, enquanto que na parte superior a temperatura é praticamente constante. Nesta mesma figura observa-se ainda que, para um dado plano horizontal, forma-se próximo das paredes uma fina camada de fluido à uma temperatura mais baixa que a temperatura da região mais central deste plano, ou seja, observa-se a formação da camada limite térmica.

Analisando o processo transiente de formação das camadas limites térmica e hidrodinâmica, observa-se que nos primeiros instantes a camada limite hidrodinâmica estende-se até a base do reservatório. Entretanto, no decorrer do processo de resfriamento e a conseqüente formação do perfil estratificado de temperatura, observa-se que esta camada limite se atenua significativamente ao atingir a altura do degrau térmico. Na Fig. 3 é apresentado um corte no plano de simetria (r, θ), mostrando algumas linhas de trajetórias ('streamtrace') e a distribuição da velocidade média, através do esquema de cores. Observa-se que o fluido resfriado escoava verticalmente ao longo do contorno das paredes do reservatório e que ocorre a formação de recirculações na parte mais alta do reservatório.

A Fig. 4 mostra os perfis de temperatura obtidos experimentalmente num ensaio onde se utilizou um campo de temperatura inicial de 70°C. Na mesma figura faz-se a comparação destes perfis experimentais com perfis de temperatura obtidos via simulação numérica para condições iniciais e de contorno que reproduzem o ensaio.

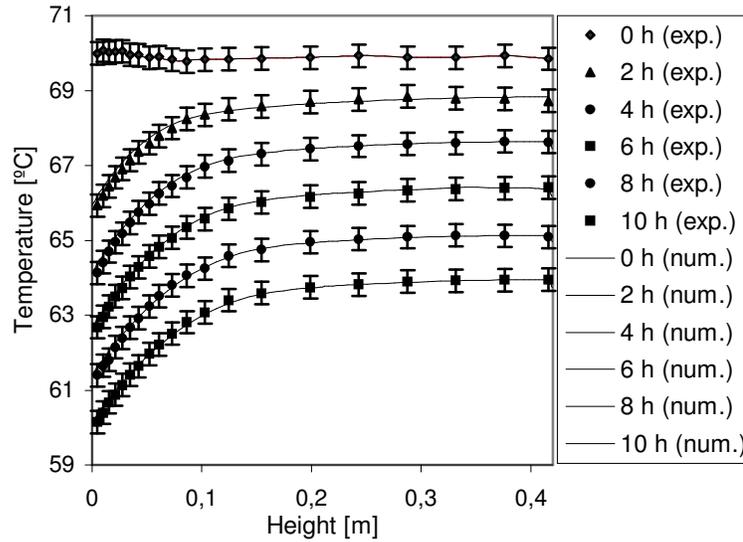


Figura 4 – Comparação dos perfis de temperatura numérico versus experimental.

Observa-se que através da simulação numérica obtém-se uma reprodução fiel destes perfis, o que demonstra a validade do algoritmo utilizado. Com o passar do tempo e com o conseqüente resfriamento da água do reservatório, observa-se a formação do perfil estratificado de temperatura. A análise deste processo mostra que a magnitude do degrau térmico (grau de estratificação) aumenta no decorrer das primeiras horas de resfriamento até atingir um nível máximo a partir do qual se mantém praticamente constante no decorrer do tempo.

4. AJUSTE DE CORRELAÇÕES

Uma das questões de interesse em reservatórios térmicos é o conhecimento do perfil de estratificação da temperatura do fluido armazenado em seu interior. Na descrição deste processo, a taxa de transferência de calor para o ambiente externo é expressa na forma

$$q = \frac{T_{int} - T_{w0}}{\frac{1}{A_{int} h_{int}}} = \frac{T_{w0} - T_{w1}}{R_{iso}} = \frac{T_{w1} - T_{ext}}{\frac{1}{A_{ext} h_{ext}}} \quad (6)$$

onde T_{int} é o valor da temperatura média do fluido no interior do reservatório, T_{w0} é a temperatura média na parede interna, T_{w1} é a temperatura média na parede externa, T_{ext} é o valor da temperatura ambiente, A_{int} é a área da parede interna, A_{ext} é a área da parede externa, h_{int} é o coeficiente de transferência de calor por convecção para o interior do reservatório, h_{ext} é o coeficiente de transferência de calor por convecção para o exterior do reservatório e R_{iso} é a

resistência térmica da camada de isolamento térmico.

Para simplificar a notação, convém numerar as resistências térmicas. Assim, $R_1 = \frac{1}{A_{int} h_{int}}$, $R_2 = R_{iso}$ e $R_3 = \frac{1}{A_{ext} h_{ext}}$. Para calcular a resistência térmica total é suficiente conhecer o valor das R_2 e R_3 , pois o valor da resistência R_1 nestes casos é muito baixa e pode ser desprezado, conforme discutido em Savicki et al. (2007). A resistência R_3 é calculada a partir do conhecimento do coeficiente de convecção exterior (neste trabalho $8W/m^2K$) e da área das faces externas do reservatório. Já a resistência R_2 pode ser aproximada pela equação

$$R_2 = \frac{R_r R_a}{R_r + R_a} \quad (7)$$

onde as resistências radial (R_r) e axial (R_a) são calculadas respectivamente pelas seguintes expressões

$$R_r = \left[\frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2k\pi(z_{int} + 0,5 \cdot e_a)} \right] \quad (8)$$

$$R_a = \left[\frac{e}{2k\pi(r_{int} + 0,25 \cdot e_r)^2} \right] \quad (9)$$

O ajuste dos coeficientes 0,5 e 0,25 que aparecem nas equações (8) e (9) é apresentado em Savicki et al. (2007). Os índices “r” e “a” referem-se, respectivamente, às direções radial e axial. Assim, a resistência térmica total para reservatórios térmicos com camada de isolamento térmico é calculada pela soma das resistências R_2 e R_3 .

Através de uma série de simulações numéricas semelhantes às apresentadas anteriormente, determinou-se o perfil de estratificação da temperatura no decorrer do processo de resfriamento, para diversas espessuras de isolamento térmico e para diversas temperaturas iniciais da água contida no reservatório. De posse destes perfis, determinou-se o grau de estratificação térmica, também chamado de degrau térmico, aqui definido como a diferença entre a máxima e a mínima temperatura que ocorre no interior do reservatório em determinado instante.

Na Fig. 5 mostra-se o comportamento do grau de estratificação para cinco espessuras de isolamento, no decorrer das dez primeiras horas de resfriamento. Nestas simulação foram usados os seguintes parâmetros: $r_{int} = 0,25m$, $z_{int} = 0,5m$, $k_{iso} = 0,0305W/mK$, $T_{ini} = 60^\circ C$ e $T_{ext} = 20^\circ C$.

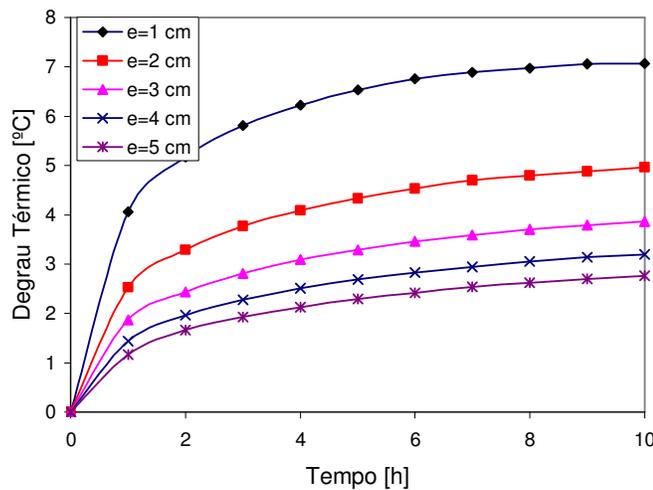


Figura 5 – Variação do degrau térmico no decorrer do tempo, para diversas espessuras de isolamento.

Usando o coeficiente global de transferência de calor (U), definido de forma que $UA = (R_{tot})^{-1}$, onde A é a área de troca de calor, e traçando-se o gráfico da variação do degrau térmico (ΔT_d) com relação a este coeficiente, obtêm-se que a relação entre essas duas variáveis é linear, conforme pode-se ver na Fig. 6. Fazendo o ajuste de modo a agrupar estas curvas sobre um único perfil, verifica-se que quando divide-se os valores do grau de estratificação mostrados na Fig. 5 pela expressão

$$\Delta T_d = 2U + 1 \tag{10}$$

atinge-se este objetivo, ou seja, o agrupamento das curvas sobre um único perfil.

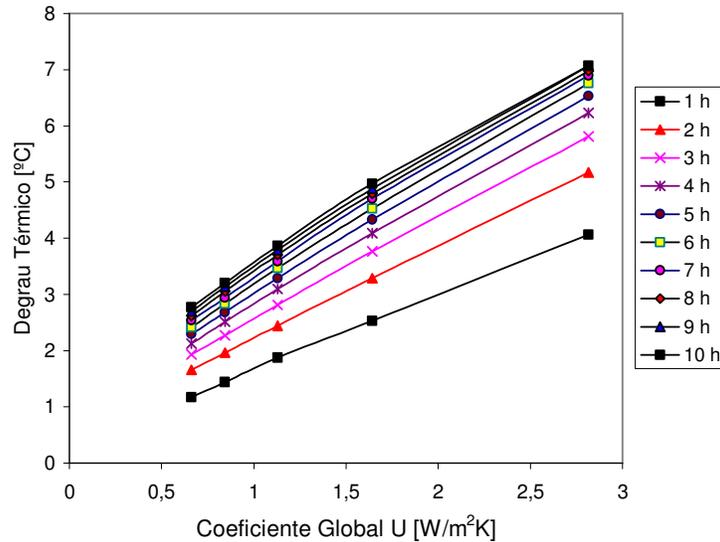


Figura 6 – Variação do degrau térmico com relação ao coeficiente global U , para diversas espessuras de isolamento.

Seguindo o mesmo procedimento, porém analisando o comportamento do grau de estratificação com relação à diferença entre a temperatura média interna e a temperatura ambiente, definida como $\Delta T_{ini} = T_{int} - T_{ext}$, obtiveram-se os perfis para o grau de estratificação para as dez primeiras horas de resfriamento, que são mostrados na Fig. 7.

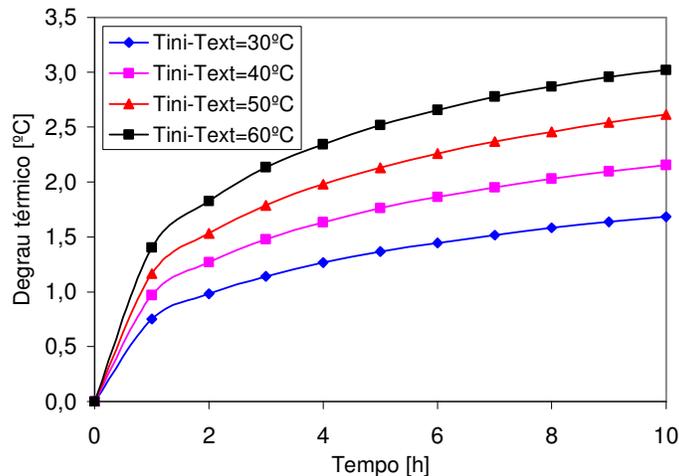


Figura 7 – Variação do degrau térmico com relação ao tempo, para diversas diferenças entre as temperaturas interna e externa.

Nas simulações referentes a Fig. 7 foram usados os seguintes parâmetros: $r_{int} = 0,25m$, $z_{int} = 0,5m$, $k_{iso} = 0,0305W/m°C$, $e = 0,075m$ e $T_{ext} = 20°C$. Assim, a variável entre uma e outra simulação foi a temperatura inicial da água no interior do reservatório. Montando um gráfico com estes mesmos dados, porém colocando no eixo das

abscissas o valor da diferença entre a temperatura média interna e a temperatura externa, obtém-se o conjunto de curvas mostrado na Fig. 7.

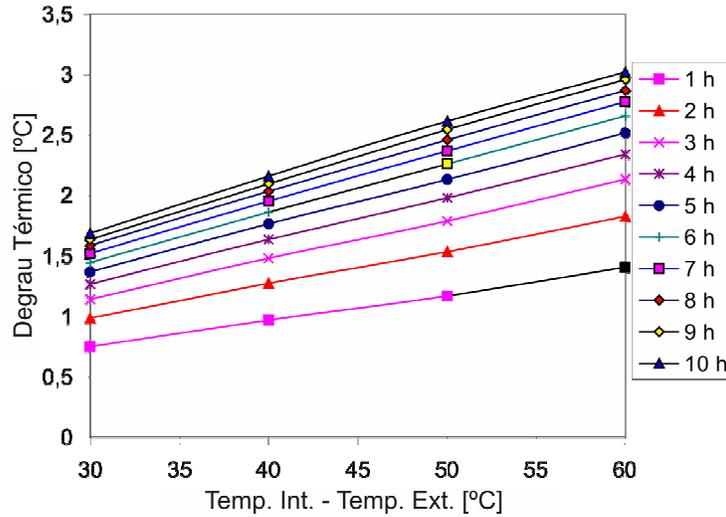


Figura 8 – Variação do degrau térmico com relação à diferença entre as temperaturas interna e externa.

A partir das curvas mostradas na Fig. 8, ajustou-se a expressão $\Delta T_d = f(\Delta T_{ini})$ na forma

$$\Delta T_d = 0,04 \cdot \Delta T_{ini} + 0,25 \quad (11)$$

Um ajuste adicional obtido por novas simulações, não apresentadas neste trabalho por brevidade, mostrou que a variação do grau de estratificação térmica com relação ao raio interno do reservatório pode ser aproximada pela relação

$$\Delta T_d = \frac{\ln(r_{int})}{5} + 1,3 \quad (12)$$

A partir destes ajustes, obtém-se a seguinte correlação para estimar o grau de estratificação térmica da água no interior do reservatório, no decorrer do processo de resfriamento.

$$\Delta T_d = (2 \cdot U + 1) \cdot (0,04 \cdot \Delta T_{ini} + 0,25) \cdot \left(\frac{\ln(r_{int})}{5} + 1,3 \right) \cdot 0,5885 (1 - e^{-0,5478 \cdot t}) \quad (13)$$

onde r_{int} como o raio interno e t é o tempo de resfriamento. O último termo da equação (13) foi obtido a partir do ajuste dos perfis mostrados nas figuras 5 e 7, após aplicado o processo de agrupamento das curvas, pela aplicação das equações (10), (11) e (12).

Por outro lado, normalizando-se os perfis de temperatura mostrados na Fig. 5 com base na temperatura mínima e máxima de cada perfil, na forma $T_{nor} = (T - T_{min}) / (T_{max} - T_{min})$ e utilizando a altura normalizada do reservatório $h_{nor} = h / D$, onde D é o diâmetro interno do reservatório, obtém-se o seguinte conjunto de pontos, mostrados na Fig. 9.

O resultado mostra que este processo permite agrupar todos os perfis próximos de uma única curva. Para o conjunto de pontos mostrados na Fig. 9 foi obtido o ajuste

$$T_{nor} = 0,995 \cdot (1 - e^{-6,4 \cdot h_{nor}}) \quad (14)$$

Usando a definição de T_{nor} , pode-se obter o perfil de estratificação, porém antes é necessário conhecer o valor das temperaturas máxima e mínima no interior do reservatório. Para responder a esta questão, inicialmente expressa-se a variação da temperatura média no interior do reservatório na forma

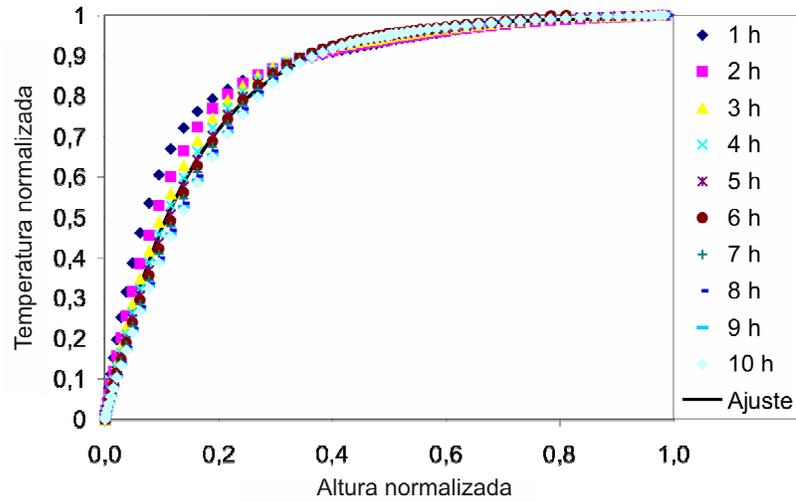


Figura 9 – Ajuste do perfil de temperatura normalizado.

$$-m c_p dT_{\text{int}} = \frac{(T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})}{R_t} dt \quad (15)$$

cujas solução é

$$T_{\text{int}} = (T_{\text{ini}} - T_{\text{ext}}) e^{-\frac{t}{m c_p R_t}} + T_{\text{ext}} \quad (16)$$

onde c_p é o calor específico da água a pressão constante e R_t é a resistência térmica total, que conforme mostrado anteriormente, pode ser calculada como a soma das resistências R_2 e R_3 .

A Fig. 10 mostra que a região onde ocorre a estratificação da temperatura fica restrita em aproximadamente 1/3 da altura interna. Usando a normalização da temperatura e da altura, calcula-se a integral entre os limites 0 e 1 para obter a temperatura normalizada média, na forma

$$\bar{T}_{\text{nor}} = \int_0^1 T_{\text{nor}} dh_{\text{nor}} = \int_0^1 0,995 (1 - e^{-6,4 h_{\text{nor}}}) dh_{\text{nor}} \quad (17)$$

e obtém-se que $\bar{T}_{\text{nor}} \cong 0,84$. Usando a definição de T_{nor} em conjunto com a correlação para o grau de estratificação térmica, expressamos o perfil de temperatura em função da altura na forma

$$T = T_{\text{nor}} \cdot (\Delta T_d) + T_{\text{mín}} \quad (18)$$

Integrando para achar o valor médio

$$\bar{T} = \int_0^1 (T_{\text{nor}} \cdot (\Delta T_d) + T_{\text{mín}}) dh_{\text{nor}} \quad (19)$$

Considerando que $\bar{T} = T_{\text{int}}$ de acordo com a notação utilizada e que $\bar{T}_{\text{nor}} = 0,84$, conforme obtido anteriormente, chega-se a seguinte expressão para a temperatura mínima do perfil de estratificação da temperatura

$$T_{\text{mín}} = T_{\text{int}} - 0,84 \cdot \Delta T_d \quad (20)$$

Assim, substituindo este resultado na equação (18) e usando as correlações apresentadas anteriormente para calcular ΔT_d e T_{nor} (equações (13) e (14)), pode-se agora determinar o perfil de temperatura no interior do reservatório, pela seguinte equação

$$T = T_{int} + [T_{nor} - 0,84] \cdot \Delta T_d \quad (21)$$

A equação (21) constitui-se na verdade em uma nova correlação, que descreve o perfil de estratificação térmica a partir das variáveis $\Delta T_d (U, \Delta T_{ini}, r_{int})$ e $T_{nor} (h_{nor})$.

Para testar a validade desta correlação mostra-se na Fig. 10 uma comparação entre os perfis de temperatura experimentais mostrados na Fig. 4 e os perfis obtidos pela aplicação da equação (21). Os valores dos parâmetros usados tanto nas simulações quanto na correlação são mostrados na Tabela 1.

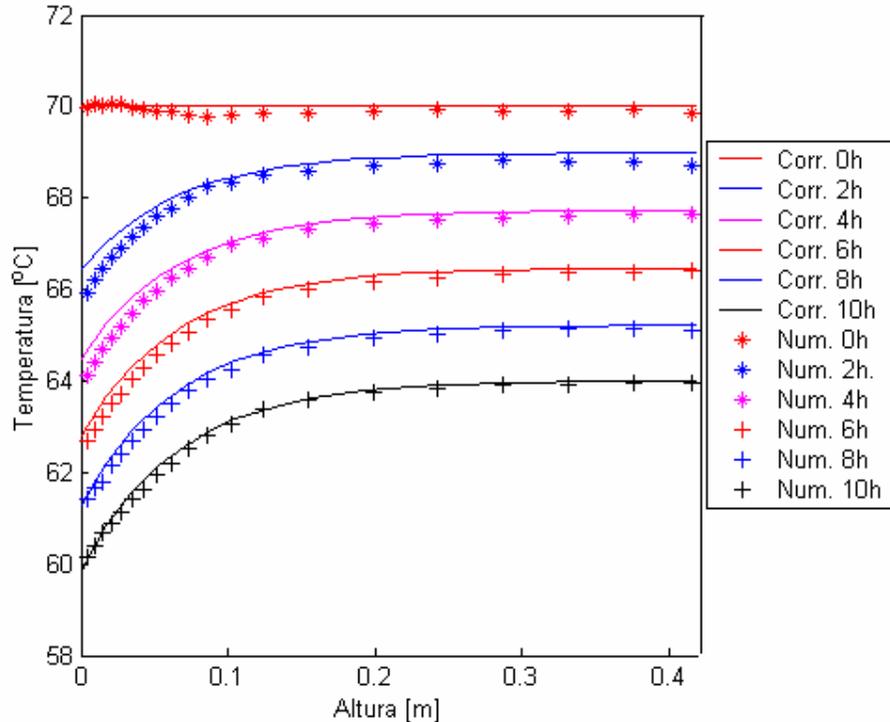


Figura 10 – Comparação entre os perfis de temperatura obtidos por simulação numérica e pela aplicação da correlação proposta neste trabalho.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para obter as curvas da Figura 12 .

Temperatura inicial (uniforme)	70°C
Temperatura ambiente	20°C
Coefficiente de transferência de calor	8 W / m ² K
Condutividade térmica do isolamento (poliuretano expandido)	k=0,0305 W / mK
Diâmetro interno	0,42 m
Comprimento interno	0,57 m
Espessura da camada de isolamento	2 cm
Tempo de resfriamento	0, 2, 4, 6, 8 e 10 h

Observa-se que a aplicação da correlação permite reproduzir com grande fidelidade os perfis de temperatura obtidos via simulação numérica, que por sua vez foram confirmados por comparação com dados experimentais. Uma das vantagens de se ter uma correlação como a apresentada na equação (21) é a previsão do perfil de estratificação para casos em que o reservatório é deixado por várias horas sujeito a perda de calor para o ambiente.

Entretanto, a correlação proposta neste trabalho tem outras possibilidades de aplicação. Uma delas é analisar rapidamente como se comporta o perfil de temperatura para diversas espessuras, mantendo-se fixo o tempo de

resfriamento. Por exemplo, para os dados listados na Tabela 2, traçou-se os perfis de temperatura para casos com espessuras do isolamento (poliuretano expandido) variando na faixa de 1 a 7 cm, conforme mostrado na Fig. 11.

Tabela 2 – Parâmetros envolvidos na simulação mostrada na Figura 13.

Temperatura inicial (uniforme)	70°C
Temperatura ambiente	20°C
Coefficiente de transferência de calor	8 W / m ² K
Condutividade térmica do isolamento (poliuretano expandido)	k=0,0305 W / mK
Diâmetro interno	0,42 m
Comprimento interno	0,57 m
Espessura da camada de isolamento (poliuretano expandido)	2, 3, 4, 5 e 6 cm
Tempo de resfriamento	10 h

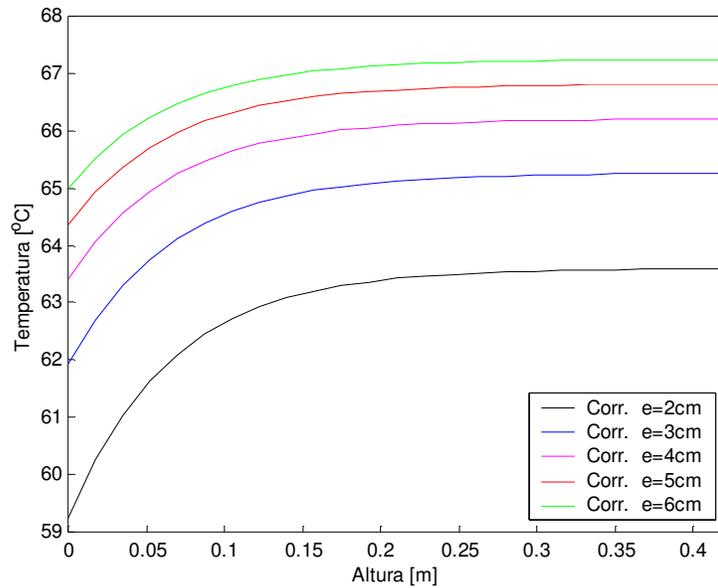


Figura 11 –Perfis de temperatura obtidos pela aplicação da correlação proposta neste trabalho, variando-se a espessura de isolamento de poliuretano expandido, para um tempo de resfriamento 10 horas.

Pode-se observar que os perfis de temperatura gerados pela correlação reproduzem adequadamente o fenômeno físico da estratificação da temperatura para reservatórios com diferentes espessuras da camada de isolamento. Conforme mostra as simulações numéricas, quanto menor é a espessura de isolamento, maior é o fluxo de calor, e conseqüentemente, maior é o degrau térmico. A correlação proposta neste trabalho tem a mérito de mostrar que é possível propor uma correlação para prever o perfil de estratificação em reservatórios. Na seqüência dos trabalho serão realizadas novas simulações para ampliar o conjunto de dados numéricos e estabelecer com maior precisão a faixa de aplicação da correlação proposta.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi utilizado um código computacional para simulação do processo de transferência de calor em reservatório térmico cilíndrico horizontal. De modo semelhante ao que ocorre em reservatórios cilíndricos verticais, também em reservatório cilíndrico horizontal ocorre a estratificação da temperatura no decorrer do processo de resfriamento. Os resultados numéricos foram validados através da comparação com dados experimentais próprios. Através de simulação numérica, obteve-se uma correlação para o grau de estratificação térmica, que utilizada em conjunto com resultados adicionais, permitiu propor uma correlação para a previsão do perfil de temperatura em um reservatório cilíndrico horizontal, a partir do conhecimento dos parâmetros como dimensões físicas, espessura e tipo de isolamento térmico, temperatura inicial interna, temperatura externa e tempo de resfriamento.

6. REFERÊNCIAS

- Oliveski R.C., Vielmo H.A., Krenzinger, A., 2003. "Cooling of Cylindrical Vertical Tanks Submitted to Natural Internal Convection", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, pp 2015-2026.
- Rubinov A. et al, 2004. "Three-Dimensional Instabilities of Natural Convection Flow in a Vertical Cylinder With Partially Heated Sidewall", Journal of Heat Transfer, Vol. 126, pp 586-599.
- Savicki D. L., Vielmo H.A., Krenzinger, A., 2007. "Análise Numérica Tridimensional e Experimental dos Campos de Temperatura e Velocidade em Tanques Térmicos Cilíndricos", Tese de doutorado, PROMEC-UFRGS.
- Savicki D. L., Vielmo H.A., Krenzinger, A., 2007. "Análise Numérico-Experimental do Comportamento Térmico e Hidrodinâmico de Reservatórios Cilíndricos Horizontais com Entrada e Saída de Fluido", COBEM 2007 - 19th International Congress of Mechanical Engineering, Brasília, DF.
- Schneider S., Straub, J., 1992. "Laminar Natural convection in a Cylindrical Enclosure with Different End Temperatures", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol 35, pp 545-557.
- Xia J. L. et al, 1998. "Numerical and Experimental Study of Transient Turbulent Natural Convection in a Horizontal Cylindrical Container", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol 41, pp 3635-3645.

CORRELATION FOR TEMPERATURE PROFILE IN THERMAL CYLINDRICAL HORIZONTAL TANKS

Abstract : *In previous works was showed numerical and experimental studies of fluid cooling process in cylindrical tanks and was proposed one correlation to degree thermal stratification. The numerical data was obtained by simulation of the cooling process, using a computer code previously validated with experimental data. This work shows that using this correlation to the degree thermal stratification together with additional results is obtained a new correlation to temperature profile stratification during the cooling process. By application of this correlation it is possible predict the temperature profile as a function of variables such as thickness insulation, dimensions of the tank, initial and environment temperatures and time of cooling.*

Key words: *Thermal Stratification, Natural Convection, Finite Volume Method, Three-dimensional Numerical Simulation.*