

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA TROCA TÉRMICA EM UNIDADE PILOTO DE UM SISTEMA *COILED TUBING*

L. R. JUSTINO¹, C. E. G. PEREIRA¹, B. R. OLIVEIRA¹, E. C. H. PARAÍSO¹, L. A. CALÇADA¹ e C. M. SCHEID¹

¹ Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
E-mail para contato: lorisjustino@gmail.com

RESUMO – O abandono de poço é realizado quando não há mais exploração de petróleo naquele local, ou quando a área apresenta riscos ao meio ambiente. Para isto, diferentes tipos de fluidos são bombeados no poço, dentre eles a pasta de cimento. Este bombeamento pode ser feito por um sistema *coiled tubing*, que é um tubo de aço longo e flexível enrolado em um carretel. Sabe-se que durante o escoamento, diferentes trocas de calor afetam a temperatura do fluido, sendo importante prever e controlar esta variação a fim de que o cimento não endureça antes do tempo previsto. Este trabalho tem como objetivo avaliar a troca térmica no escoamento em *coiled tubing* através de experimentos em uma unidade piloto e a partir dos resultados propor e validar um modelo que possa prever a variação de temperatura. Uma unidade experimental foi construída de forma semelhante ao caso real. Experimentos foram realizados utilizando a água, a uma temperatura de 45°C e vazões de 0,20 e 0,65 m³/h, bombeados em *coiled tubing* de 380 m durante aproximadamente 3 horas. As temperaturas foram adquiridas, e a partir delas um modelo foi proposto considerando a troca de calor por atrito, por convecção natural e por radiação.

1. INTRODUÇÃO

Sabe-se que na indústria de petróleo, todo poço construído um dia será abandonado seja para evitar um dano ambiental ou quando sua exploração não é mais economicamente viável. Utilizado em diversas aplicações na área do petróleo, o sistema *coiled tubing* é composto por uma bobina e um tubo de aço enrolado longo e flexível, onde parte do tubo fica enrolado em um carretel, enquanto a outra parte é direcionada ao poço. Neste tubo, bombeia-se água, pasta de cimento e fluido de deslocamento, que são fluidos fundamentais para o abandono do poço. Este é feito por meio de tampões de cimento em diversas profundidades, onde pasta de cimento é bombeada através da parte enrolada do sistema, em que há troca de calor entre o fluido e o ambiente. Torna-se de suma importância o estudo da troca térmica de fluidos em um sistema *coiled tubing*, principalmente no escoamento de pastas de cimento. Dessa forma será possível evitar que a mesma cure antes do tempo previsto (Pereira, 2018). A Figura 1, apresenta um sistema *coiled tubing*.

Neste trabalho, pretende-se prever a troca térmica entre o fluido e o ambiente assim como a troca gerada pelo atrito do fluido ao escoar. Para isso experimentos foram conduzidos em uma

unidade piloto e um balanço de energia foi proposto com o intuito de avaliar a variação de temperatura na entrada e na saída do sistema.

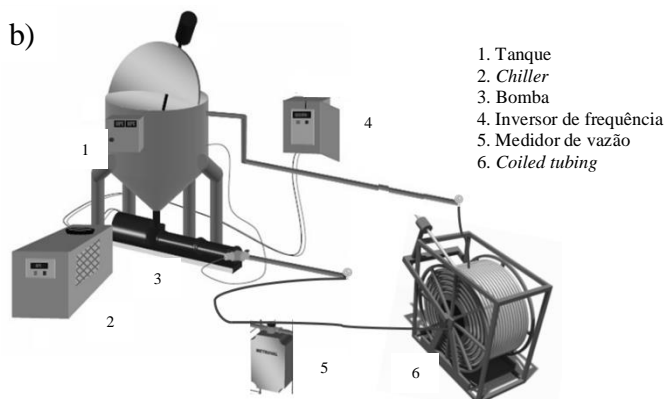
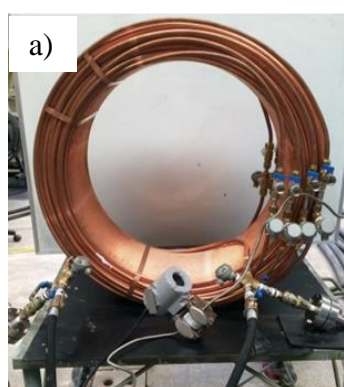
Figura 1 – Sistema *coiled tubing*.



2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, buscou-se construir uma unidade piloto que fosse correspondente ao caso real. Utilizou-se uma bobina com tubo de cobre enrolado, que por sua vez possui uma similaridade com o caso real. Essa bobina possui 375,8 m de comprimento divididos em 8 camadas onde em cada camada há medições de temperatura e pressão. Para determinar as pressões e temperaturas utiliza-se, respectivamente, transmissores de pressão e termopares, que medem a temperatura do fluido, do tubo e do ambiente. A Figura 2 mostra o sistema *coiled tubing* e um esquema da unidade experimental completa.

Figura 2 - a) Sistema *coiled tubing* da unidade piloto e b) unidade experimental.



O fluido é preparado em um tanque que possui uma camisa e um *chiller* para controle da temperatura inicial. O *coiled tubing* é acoplado a um sistema de bombeio composto por uma bomba de deslocamento positivo. Sendo assim, o fluido é bombeado em um sistema fechado retornando para o tanque. Os dados de pressão, temperatura e vazão são adquiridos por um software sendo possível acompanhar os resultados em tempo real.

Os experimentos foram realizados utilizando como fluido a água a uma temperatura inicial constante de 45°C e temperatura ambiente de aproximadamente 25°C. A água foi

escolhida por ser um fluido Newtoniano, com propriedades físico-químicas familiares e por ter viscosidade modificada somente pela temperatura. O fluido foi bombeado em duas diferentes vazões (0,2 e 0,65 m³/h) a fim de se avaliar a influência da vazão na troca térmica, assim como o atrito gerado. Os dados foram aquisitados a cada minuto durante 3 horas.

A fim de se estudar a troca térmica ao longo do *coiled tubing*, um balanço de energia foi proposto. O calor sensível para alterar a temperatura na entrada e saída do sistema é afetado por duas formas de troca de calor: o calor recebido por atrito e o que é perdido por convecção natural e por radiação. A radiação térmica foi considerada visto que todos os corpos emitem radiações térmicas proporcionais às suas temperaturas. As Equações 1 e 2 representam o balanço de energia proposto.

$$q_{\text{sensível}} = q_{\text{atrito}} - (q_{\text{convecção natural}} + q_{\text{radiação}}) \quad (1)$$

$$\rho Q C_p (T_{f\text{ sai}} - T_{f\text{ entra}}) = \Delta P \cdot Q - [\sum \bar{h}_e A (T_{t\text{ média}} - T_{\text{amb}}) + \sigma \epsilon A (T_{t\text{ média}}^4 - T_{\text{amb}}^4)] \quad (2)$$

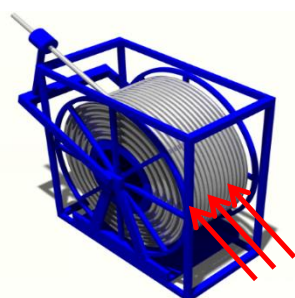
sendo $q_{\text{sensível}}$ a taxa de calor sensível (W), q_{atrito} a taxa de calor por atrito (W), $q_{\text{convecção natural}}$ a taxa de calor por convecção natural (W), $q_{\text{radiação}}$ a taxa de calor por radiação (W). Na Equação 2, tem-se ρ a densidade do fluido (kg/m³), Q a vazão volumétrica (m³/s), c_p calor específico do fluido (J/kg.K), $T_{f\text{ sai}}$ temperatura de saída do fluido (K), $T_{f\text{ entra}}$ temperatura de entrada do fluido (K), ΔP queda de pressão total (Pa), \bar{h}_e coeficiente convectivo de troca térmica médio externo (W/m²K), A área de troca térmica (m²), $T_{t\text{ média}}$ temperatura média do tubo de cobre (K), T_{amb} temperatura ambiente (K), σ constante de Stefan Boltzmann (5,67x10⁻⁸ W/m²K⁴), ϵ emissividade do cobre (0,6 adimensional).

Como o sistema possui diversas faces, foi necessário avaliar a troca térmica separadamente em cada uma delas. Para isso, fez-se uma consideração de que o *coiled tubing* é um cilindro maciço com uma região anular onde a área externa e interna do cilindro foi estendida. Correlações de Nusselt (Nu) foram utilizadas para o cálculo do coeficiente convectivo de calor (h) segundo a Equação 3. As direções de troca térmica consideradas, assim como as correlações de Nusselt, faixa de aplicação, comprimento característico e área de troca térmica correspondentes às faces estão representadas abaixo. As correlações foram propostas Churchill e Chu (1975) *apud* Bergman *et al.* (2014).

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h} L_c}{k_f} \quad (3)$$

Escoamento externo em cilindro horizontal (Figura 3 e Equações de 4 a 6):

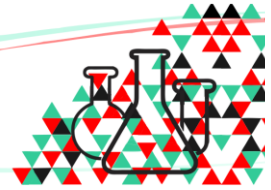
Figura 3 – Esquema do escoamento externo em cilindro horizontal.



$$\overline{Nu}_D = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\} 2 \quad (4)$$

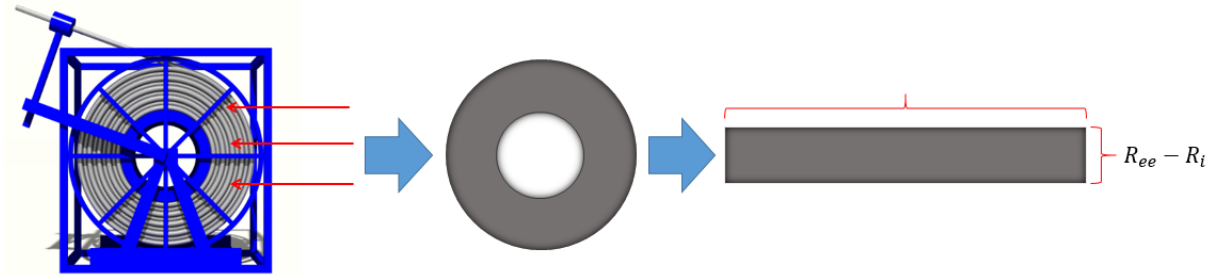
$$L_c = D_{ee} \quad (5)$$

$$A_c = 2\pi R_{ee} L_e \quad (6)$$



Escoamento em placa vertical nas duas faces (Figura 4 e Equações de 7 a 9):

Figura 4 – Esquema do escoamento em placa vertical.



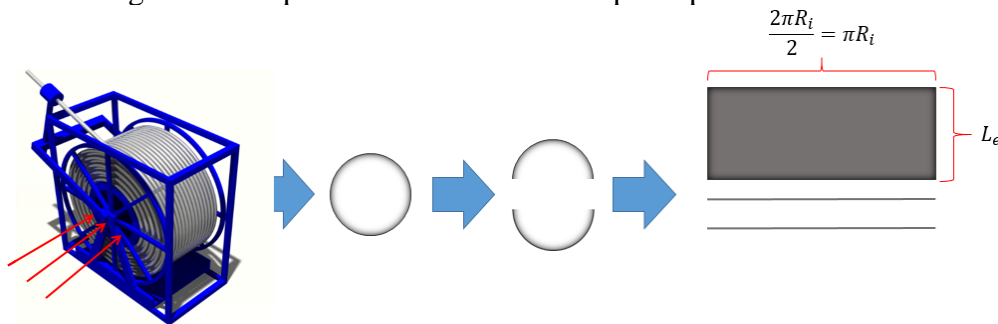
$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/P_r)9/16]^{1/4}} \right\} 2 \quad (7)$$

$$L_c = R_{ee} - R_i \quad (8)$$

$$A_L = \pi(R_{ee}^2 - R_i^2) \quad (9)$$

Escoamento em placa plana horizontal (Figura 5 e Equações de 10 a 13):

Figura 5 – Esquema do escoamento em placa plana horizontal.



$$\text{Superfície inferior: } \overline{Nu}_L = 0,15 Ra_L^{1/3} \quad (10)$$

$$\text{Superfície superior: } \overline{Nu}_L = 0,52 Ra_L^{1/5} \quad (11)$$

$$L_c = \frac{\text{área}}{\text{perímetro}} = \frac{\pi R_i L_e}{2(\pi R_i + L_e)} \quad (12)$$

$$A_L = \pi R_i L_e \quad (13)$$

sendo \bar{h} o coeficiente convectivo médio (W/m²K), \overline{Nu}_L e \overline{Nu}_D o número de Nusselt médio, (adimensional), l o comprimento característico (m), Ra_L e Ra_D o número de Rayleigh

(adimensional), P_r o número de Prandtl (adimensional), L_c o comprimento característico (m), A_c e A_L a área de troca térmica (m^2), R_i o raio interno do carretel (m), R_{ee} o raio externo do carretel com comprimento estendido (m) e L_e a largura do carretel com comprimento estendido (m).

A taxa de calor por convecção natural é apresentada na forma de somatório na Equação 2 devido às considerações feitas quanto à geometria da unidade. A Tabela 1 apresenta alguns dados utilizados nos cálculos deste trabalho.

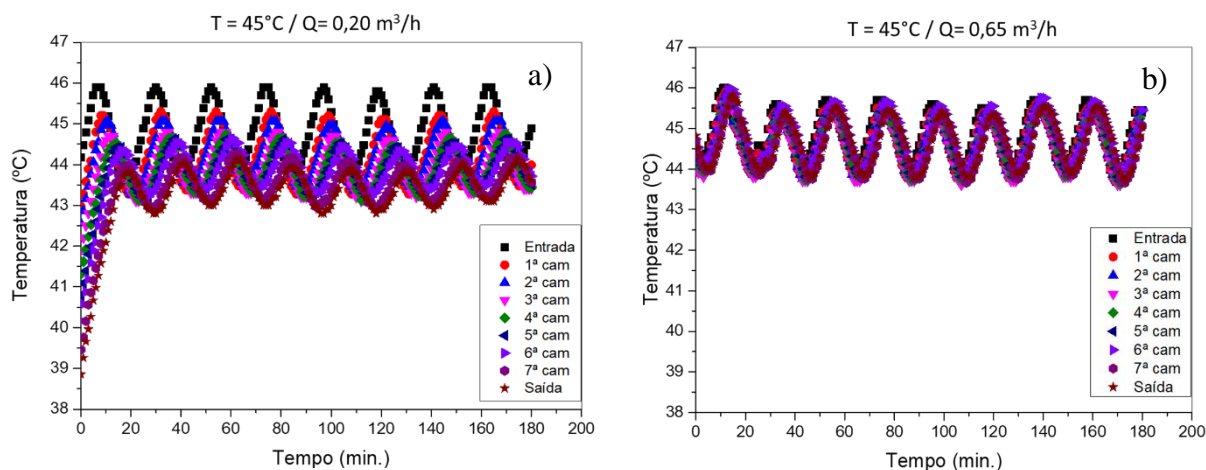
Tabela 1 – Dados para cálculo da troca térmica

Densidade da água (kg/m^3)	Calor específico da água ($J/kg.K$)	Viscosidade da água a $45^\circ C$ (Pa.s)	Condutividade térmica da água ($W/m.K$)	Área externa (m^2)	Área interna (m^2)	Área Lateral (m^2)
990	4180	0,0006	0,63	1,17	0,77	0,39

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos gráficos da Figuras 6 tem-se a variação da temperatura pelo tempo nas vazões de 0,2 e 0,65 m^3/h .

Figura 6 - Temperatura do fluido em todas as camadas com temperatura do fluido de entrada desejada de $45^\circ C$ a) 0,20 m^3/h e b) 0,65 m^3/h .



O gráfico tem um comportamento senoidal devido à dificuldade no controle de temperatura do fluido no tanque. Nota-se que quando a vazão é baixa a temperatura de saída é menor que a de entrada, enquanto que em vazão mais alta percebe-se que a temperatura na entrada e na saída são praticamente as mesmas. Isto revela que em uma alta vazão, a perda de calor é compensada pelo ganho de calor por atrito, o que não ocorre em uma baixa vazão.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos pela modelagem proposta assim como o erro absoluto calculado pela diferença entre o calor sensível e a soma dos calores de atrito,

convecção e radiação calculados. O calor sensível foi calculado utilizando a diferença de temperatura experimental obtida. Vale ressaltar que devido às oscilações experimentais, foi feita uma média da temperatura em cada camada. Os resultados são: a taxa de calor sensível, atrito, convecção natural e radiação, e o erro absoluto para cada vazão.

Tabela 2 - Resultado do balanço de energia proposto para o experimento de 45°C nas duas vazões.

Q (m ³ /h)	$q_{sensível}$ (W)	q_{atrito} (W)	$q_{conv\ ext}$ (W)	q_{rad} (W)	$q_{atrito} - q_{conv\ ext} - q_{rad}$ (W)	Erro Absoluto (%)
0,20	-292	10,74	109,63	124,44	-225	23,1
0,65	-23	275,76	131,46	141,87	-2	89,5

Pode-se observar que o modelo não se ajusta aos dados experimentais, ainda que em uma menor vazão o erro obtido seja relativamente aceitável. Desta forma, deve-se reavaliar os termos considerados para o cálculo da variação da temperatura do fluido ao escoar.

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados, conclui-se a importância do estudo da troca térmica do fluido com o ambiente, bem como o ganho de calor por atrito e a perda de calor por convecção natural e radiação. O modelo proposto ainda não foi capaz de prever satisfatoriamente a variação de temperatura. Logo, pretende-se propor um novo balanço de energia reavaliando os termos considerados no cálculo da variação de temperatura do fluido ao escoar.

6. REFERÊNCIAS

- BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 7 ed., Rio de Janeiro: LTC, Cap. 9, p. 386, 389, 390, 2014
- CHURCHILL, S. W.; CHU, H. H. S. Int. J. Heat Mass Transfer, 18, p. 1049 e 1323, 1975
- FERNANDES, F. A. N.; PIZZO, S. M.; MORAES Jr., D. Termodinâmica química, 1ª ed., 2006
- PEREIRA, C. E. G. Estudo da Perda de Carga no Escoamento de Fluidos Newtonianos em *Coiled Tubing*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.