

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA - PEQ

VANESSA MARUYAMA

**SIMULAÇÃO DA DEPOSIÇÃO E SEU ENVELHECIMENTO EM  
TROCADORES DE CALOR**

Maringá

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA - PEQ

VANESSA MARUYAMA

**SIMULAÇÃO DA DEPOSIÇÃO E SEU ENVELHECIMENTO EM  
TROCADORES DE CALOR**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia Química.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Caliane B.B. Costa  
Coorientador: Prof. Dr. Mauro A. S. S. Ravagnani

Maringá

2022

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

M389s

Maruyama, Vanessa

Simulação da deposição e seu envelhecimento em trocadores de calor / Vanessa Maruyama. -- Maringá, PR, 2022.

76 f.: il. color., figs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Caliane Bastos Borba Costa .

Coorientador: Prof. Dr. Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2022.

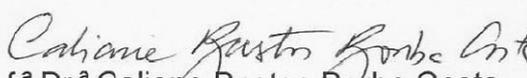
1. Incrustação (Engenharia química). 2. Trocador de calor (Engenharia química). 3. Deposição (Engenharia química). 4. Efeitos termo-hidráulico. 5. Ebert-Panchal (Modelo matemático). I. Costa , Caliane Bastos Borba, orient. II. Ravagnani, Mauro Antonio da Silva Sá, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

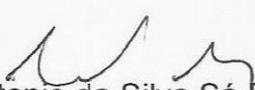
CDD 23.ed. 660.2

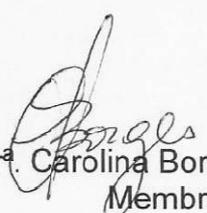
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Esta é a versão final da Dissertação de Mestrado apresentada por **Vanessa Maruyama** perante a Comissão Julgadora do Curso de Mestrado em Engenharia Química em 26 de outubro de 2022.

COMISSÃO JULGADORA

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Caliane Bastos Borba Costa  
Orientadora/Presidente

  
Prof. Dr. Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani  
Coorientador

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Carolina Borges de Carvalho  
Membro

  
Prof. Dr. Leandro Vitor Pavão  
Membro

Dedico este trabalho à pesquisa científica,  
fundamental para o avanço tecnológico.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dra. Caliane Bastos Borba Costa, pela paciência, orientações e ensinamentos, que mesmo remotamente, sempre esteve presente durante o desenvolvimento dessa dissertação. Deixo aqui minha admiração pela sua organização, eficiência e dedicação ao trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Mauro Antônio da Silva Sá Ravagnani, pelas orientações e ensinamentos. Pela tranquilidade e sabedoria que transmite, o que admiro.

Ao Prof. Dr. Esdras Penêdo de Carvalho, pelos ensinamentos e pela ajuda com o método matemático, que infelizmente não pude utilizar aqui.

À Prof.<sup>a</sup> Dra. Carolina Borges de Carvalho, por ter me auxiliado com os estudos do tema dessa dissertação.

Ao corpo docente do PEQ/UEM, que durante a pandemia, se esforçaram para se adaptar ao ensino remoto, que para mim, foi bastante proveitoso.

Aos colegas que me ajudaram durante o mestrado, em especial à minha xará Vanessa Maria, à Maria Izabela e ao Eduardo.

Ao Prof. Me. Rafael, que apesar de ter me “abandonado”, me indicou para o mestrado acreditando no meu potencial e pela recomendação certa na escolha da orientadora.

À CAPES pelo apoio financeiro, que foi essencial para a continuidade dessa pesquisa durante esse período de pandemia.

Aos meus pais, que sempre me ajudam, mesmo não morando na mesma cidade. E me apoiaram para que eu continuasse os meus estudos e que já não aguentam mais ouvir falar de incrustação ou trocador de calor.

Ao Julio, meu namorado, por compreender a minha ausência durante alguns momentos, para me dedicar ao mestrado.

À Débora, minha irmã caçula, que apesar de reclamar da minha ausência, está ali para me fazer rir dos causos e perrengues do seu dia.

À minha amiga Daiane, que sempre me apoiou durante esses anos e me incentivou a fazer o mestrado. E que veio da Holanda me visitar e apresentar a sua família, Luca, Niek e dona Izabel.

Aos meus gatos, companheiros desse mestrado, sempre participando das aulas e até mesmo das reuniões de orientação.

*“O homem, como ser histórico, inserido num permanente movimento de procura, faz e refaz constantemente o seu saber.”*

(Paulo Freire)

## RESUMO

Nas refinarias de petróleo, a incrustação em trocadores de calor é um problema bastante conhecido. Para descrever esse fenômeno o modelo mais empregado na literatura é o de Ebert-Panchal modificado. Além da deposição, as suas características físico-químicas e estruturais são alteradas, processo conhecido como envelhecimento. O modelo matemático de envelhecimento mais simples da literatura é o modelo de duas camadas. O conhecimento desses dois fenômenos, a deposição e seu envelhecimento, é importante para avaliar a performance termohidráulica dos trocadores de calor que compõem as baterias de pré-aquecimento das refinarias. Na literatura, para os estudos da incrustação nos trocadores de calor do tipo casco e tubo, são poucos os trabalhos que consideram a incrustação do lado do casco. Assim, o objetivo desse trabalho foi simular, em ambiente *Scilab*, a deposição e seu envelhecimento em trocadores de calor do tipo casco e tubo, com incrustação em ambos os lados, avaliando os seus impactos térmicos e hidráulicos nos trocadores de calor das refinarias de petróleo. Neste trabalho, foram considerados a incrustação ocorrendo em ambos os lados do trocador e o envelhecimento ocorrendo somente do lado dos tubos. Foi utilizado o modelo de Ebert-Panchal modificado para o lado dos tubos e uma taxa de deposição constante para o lado do casco. O modelo de duas camadas foi empregado para descrever o processo de envelhecimento. Os resultados mostraram que os impactos do envelhecimento são importantes na avaliação termohidráulica. Além disso, a metodologia apresentada, apesar da sua simplicidade, levou a resultados coerentes com os da literatura.

**Palavras-chave:** Incrustação. Envelhecimento. Ebert-Panchal. Simulação. Trocador de calor casco e tubo.

## ABSTRACT

In an oil refinery, fouling in heat exchangers is a well-known issue. To describe this phenomenon, the most accepted model in the literature is the modified Ebert-Panchal one. Additionally, physicochemical properties and the structure of the deposition change over time, which is known as the aging process. The two layers model is the simplest mathematical model of aging in the literature. Understanding both phenomena, the fouling and its aging, is important to evaluate the thermo-hydraulic performance of the heat exchangers of the preheating batteries in refineries. In the literature, for studies of fouling in the shell-and-tube type heat exchanger, few papers consider fouling on the shell side. Thus, the objective of this work was to simulate in Scilab the deposition and its aging in shell-and-tube heat exchangers, with fouling on both sides, evaluating its thermal and hydraulic impacts on heat exchangers in oil refineries. In this work, fouling occurs on both sides of the exchanger, and aging occurs only on the tube side. The Ebert-Panchal modified model was used for the tube side and a constant deposition rate for the shell side. The two-layer model was employed to describe the aging process. The results showed that the aging impacts are important in thermo-hydraulic analysis. In addition, the presented methodology, despite its simplicity, led to results consistent with those from the literature.

**Keywords:** Fouling. Aging. Ebert-Panchal. Simulation. Shell-and-tube heat exchanger.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Representação de alguns subprocessos da deposição.....	23
Figura 2. Desenho esquemático da sequência dos subprocessos da deposição. .....	23
Figura 3. Curvas da resistência térmica para os modelos semiempíricos. ....	26
Figura 4. Representação da fronteira da deposição do modelo de Ebert-Panchal (1995) em relação à temperatura de filme e tensão de cisalhamento .....	28
Figura 5. Esquema dos modelos de envelhecimento de duas camadas e distribuído .....	30
Figura 6. Esquema do modelo de duas camadas do envelhecimento da deposição .....	31
Figura 7. Esquema do perfil das temperaturas interfaciais do modelo distribuído. .....	33
Figura 8. Esquema da configuração de rede para os casos II-IV .....	40
Figura 9. Esquema do perfil de temperatura para o modelo de envelhecimento de duas camadas .....	47
Figura 10. Comparativo do comportamento dinâmico das cargas térmicas nos cenários com e sem envelhecimento da incrustação no estudo de caso I .....	56
Figura 11. Comparação do comportamento dinâmico das cargas térmicas do forno nos cenários com e sem envelhecimento da incrustação no estudo de caso I .....	57
Figura 12. Comparação do comportamento dinâmico das temperaturas de saída dos tubos nos cenários com e sem envelhecimento da incrustação no estudo de caso I .....	58
Figura 13. Comparação do comportamento dinâmico das resistências térmicas nos cenários com e sem envelhecimento da incrustação no estudo de caso I .....	59
Figura 14. Crescimento da espessura da deposição nos cenários com e sem envelhecimento da incrustação no estudo de caso I .....	60
Figura 15. Variação temporal da queda de pressão para os cenários com e sem envelhecimento da incrustação no estudo de caso I .....	60
Figura 16. Comportamento dinâmico da resistência térmica dos trocadores de calor do estudo de caso II.....	62

Figura 17. Comportamento dinâmico das cargas térmicas dos trocadores de calor do estudo de caso II.....	63
Figura 18. Comportamento dinâmico da carga do forno do estudo de caso II.....	63
Figura 19. Comportamento dinâmico da temperatura de entrada do forno ( <i>CIT</i> ) do estudo de caso II .....	64
Figura 20. Comportamento dinâmico da espessura total da deposição nos trocadores do cenário II .....	65
Figura 21. Comportamento dinâmico da queda de pressão nos trocadores do estudo de caso II .....	65
Figura 22. Comparação da evolução dinâmica das resistências térmicas do estudo de caso III .....	66
Figura 23. Comparação da evolução dinâmica das resistências térmicas do caso IV.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros dos trocadores de calor do estudo de caso I.....	41
Tabela 2. Parâmetros relativos ao trocador de calor dos estudos de caso II e III .....	42
Tabela 3. Geometria do trocador de calor do estudo de caso IV.....	42
Tabela 4. Parâmetros do envelhecimento modelo de duas camadas .....	48
Tabela 5. Propriedades físicas dos fluidos e parâmetros operacionais para o estudo de caso I .....	51
Tabela 6. Parâmetros do modelo de Ebert-Panchal modificado para os estudos de casos I, II e III .....	51
Tabela 7. Propriedades físicas dos fluidos e parâmetros operacionais do estudo de caso II e III .....	52
Tabela 8. Parâmetros do modelo de Ebert-Panchal modificado para o caso IV .....	55

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área de transferência térmica do tubo ( $m^2$ )
$A_a$	Fator pré-exponencial de envelhecimento ( $dia^{-1}$ )
$A_{fluxo}$	Área do fluxo nos tubos ( $m^2$ )
$B_c$	Corte das chicanas
$C$	Taxa de capacidade calorífica ou capacidade térmica ( $W/K$ )
$CIT$	Temperatura de entrada do forno ( $K$ )
$COT$	Temperatura de saída do forno ( $K$ )
$Cp_S$	Calor específico do fluido do casco ( $J/(kg \cdot K)$ )
$Cp_T$	Calor específico do fluido dos tubos ( $J/(kg \cdot K)$ )
$D$	Diâmetro do casco ( $m$ )
$D_i$	Diâmetro interno do tubo ( $m$ )
$D_o$	Diâmetro externo do tubo ( $m$ )
$E_a$	Energia de ativação do envelhecimento ( $J/mol$ )
$E_f$	Energia de ativação da deposição ( $J/mol$ )
$f$	Fator de fricção
$F_L$	Fator de correção para os vazamentos
$F_p$	Fator de correção para o <i>pitch</i>
$F_S$	Fator de correção para a geometria do casco
$G_t$	Fluxo mássico nos tubos ( $kg/(m^2 \cdot s)$ )
$h_i$	Coeficiente convectivo do fluido no lado dos tubos ( $W/(m^2 \cdot K)$ )
$h_S$	Coeficiente convectivo do fluido no lado do casco ( $W/(m^2 \cdot K)$ )
$k_{crude}$	Condutividade térmica do petróleo cru ( $W/(m \cdot K)$ )
$k_S$	Condutividade térmica do fluido do lado do casco ( $W/(m \cdot K)$ )
$k_w$	Condutividade térmica da parede dos tubos ( $W/(m \cdot K)$ )
$L$	Comprimento do tubo ( $m$ )
$m_d$	Taxa mássica de deposição ( $kg/s$ )
$m_r$	Taxa mássica de remoção ( $kg/s$ )
$m_S$	Vazão mássica do fluido do lado do casco ( $kg/s$ )
$m_T$	Vazão mássica do fluido no lado do tubo ( $kg/s$ )
$N_p$	Número de passagens no casco
$N_{p_t}$	Número de passagens nos tubos
$N_t$	Número de tubos

$NUT$	Número de unidades de transferência de calor
$Nu$	Número de Nusselt
$P$	Efetividade do trocador de calor
$Pr$	Número de Prandtl
$Q$	Carga térmica do trocador de calor (MW)
$Q_f$	Carga térmica do forno (MW)
$R$	Constante dos gases ideais (J/(mol·K))
$R_c$	Razão das capacidades
$Re$	Número de Reynolds
$R_f$	Resistência térmica da deposição (m <sup>2</sup> ·K/W)
$R_f^*$	Resistência máxima de deposição (m <sup>2</sup> ·K /W)
$R_{f,c}$	Resistência térmica da camada coque (m <sup>2</sup> ·K /W)
$R_{f,g}$	Resistência térmica da camada gel (m <sup>2</sup> ·K/W)
$R_T$	Raio do escoamento nos tubos (m)
$t$	tempo (dias ou semanas)
$T_f$	Temperatura de filme (K)
$T_{fg}$	Temperatura de interface fluido-deposição (K)
$T_{gc}$	Temperatura de interface gel-coque (K)
$T_i$	Temperatura de interface entre as subcamadas (K)
$T_S^{in}$	Temperatura de entrada no casco (K)
$T_T^{in}$	Temperatura de entrada nos tubos (K)
$T_S^{out}$	Temperatura de saída do casco (K)
$T_T^{out}$	Temperatura de saída dos tubos (K)
$\bar{T}_S$	Temperatura média do fluido no casco (K)
$\bar{T}_T$	Temperatura média do fluido nos tubos (K)
$U$	Coeficiente global de transferência de calor (W/(m <sup>2</sup> ·K))
$u_m$	velocidade do fluido nos tubos (m/s)
$y$	<i>youth variable</i>
Símbolos gregos	
$\alpha$	Coeficiente de deposição (K·m <sup>2</sup> /(W·dia))
$\beta$	Parâmetro de ajuste da deposição
$\gamma$	Coeficiente de supressão (K·m <sup>4</sup> /(N·W·dia))
$\Delta P$	Queda de pressão (bar)

$\delta_c$	Espessura da camada coque (mm)
$\delta_g$	Espessura da camada gel (mm)
$\delta_T$	Espessura total da deposição (mm)
$\epsilon$	Rugosidade do tubo ( $\mu\text{m}$ )
$\theta$	Tempo do modelo assintótico de deposição (dias)
$\theta_c$	Tempo característico da deposição assintótica (dias)
$\lambda_c$	Condutividade térmica da camada coque ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )
$\lambda_f$	Condutividade térmica da deposição ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )
$\lambda_g$	Condutividade térmica da camada gel ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )
$\mu_{\text{crude}}$	Viscosidade dinâmica do fluido do casco ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )
$\mu_S$	Viscosidade dinâmica do petróleo cru ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )
$\rho_{\text{crude}}$	Massa específica do petróleo cru ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\tau_w$	Tensão de cisalhamento (Pa)
$\phi_d$	Termo de deposição da incrustação ( $\text{m}^2\cdot\text{K}/(\text{W}\cdot\text{s})$ )
$\phi_r$	Termo de remoção da incrustação ( $\text{m}^2\cdot\text{K}/(\text{W}\cdot\text{s})$ )

### **Índices**

$i$	$i$ -ésima subcamada ou lado interno dos tubos
$j$	$j$ -ésimo trocador de calor
$k$	Contador das iterações

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

bpa	Bateria de pré-aquecimento
ESDU	<i>Engineering Science Data Unit</i>
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
RTC	Rede de trocadores de calor
TEMA	<i>Tubular Exchanger Manufactures Association</i>
VR	Resíduo de coluna de vácuo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS E REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Fenômeno de deposição</b> .....	<b>20</b>
2.1.1	Etapas da deposição por reação química.....	21
2.1.2	Sequência dos subprocessos da deposição.....	22
2.1.3	Variáveis que afetam a deposição .....	24
<b>2.2</b>	<b>Modelos matemáticos da taxa de deposição</b> .....	<b>25</b>
2.2.1	Modelo geral .....	25
2.2.2	Modelo Linear.....	27
2.2.3	Modelo Assintótico .....	27
2.2.4	Modelo de Ebert-Panchal.....	27
2.2.5	Modelo de Ebert-Panchal modificado.....	28
2.2.6	Modelo ESDU.....	29
2.2.7	Modelo de Nars e Givi .....	29
<b>2.3</b>	<b>Modelo do envelhecimento da incrustação</b> .....	<b>30</b>
2.3.1	Modelo Duas camadas .....	31
2.3.2	Modelo Distribuído .....	32
<b>2.4</b>	<b>Efeitos termohidráulicos da deposição nos trocadores de calor e seus estudos na literatura</b> .....	<b>33</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>Hipóteses adotadas</b> .....	<b>39</b>
<b>3.2</b>	<b>Modelo do trocador de calor</b> .....	<b>40</b>
<b>3.3</b>	<b>Efeitos térmicos</b> .....	<b>43</b>
<b>3.4</b>	<b>Modelo da deposição</b> .....	<b>46</b>
<b>3.5</b>	<b>Modelo do envelhecimento</b> .....	<b>47</b>
<b>3.6</b>	<b>Resistência térmica total e espessuras das camadas</b> .....	<b>48</b>
<b>3.7</b>	<b>Efeitos hidráulicos</b> .....	<b>50</b>

<b>3.8</b>	<b>Estudo de caso I: análise termohidráulica do impacto do envelhecimento</b>	<b>50</b>
3.8.1	Algoritmo da simulação do Caso I.....	51
<b>3.9</b>	<b>Estudo de caso II: aplicação do modelo para uma RTC .....</b>	<b>52</b>
3.9.1	Algoritmo da simulação do estudo de caso II.....	53
<b>3.10</b>	<b>Estudo de caso III: comparação dos modelos de envelhecimento .....</b>	<b>53</b>
<b>3.11</b>	<b>Estudo de caso IV: análise do modelo de deposição .....</b>	<b>54</b>
3.11.1	Algoritmo da simulação Caso IV.....	55
<b>4</b>	<b><i>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</i></b>	<b>56</b>
<b>4.1</b>	<b>Estudo de Caso I .....</b>	<b>56</b>
<b>4.2</b>	<b>Estudo de Caso II.....</b>	<b>61</b>
<b>4.3</b>	<b>Estudo de Caso III .....</b>	<b>66</b>
<b>4.4</b>	<b>Estudo de Caso IV.....</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b><i>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</i></b>	<b>69</b>
	<b><i>REFERÊNCIAS .....</i></b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A eficiência energética é importante para qualquer indústria, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. Por esse motivo, existe a bateria de pré-aquecimento (bpa) nas refinarias de petróleo, que reduz a energia requerida do forno, responsável por preaquecer o petróleo antes de ele adentrar a coluna de destilação atmosférica. No entanto, o desempenho dos trocadores que integram a bpa é reduzido devido às incrustações, fenômeno muito frequente e conhecido nas refinarias, que ocorre devido à presença de materiais indesejados presentes nos fluidos que escoam pelos trocadores.

Por isso é importante monitorar o desempenho dos trocadores de calor, pois, a partir dele é possível saber o grau das incrustações. E para isso, são calculados valores da resistência térmica da deposição, por meio dos dados atualizados da refinaria. A partir dos resultados desses cálculos, são realizadas alterações nas condições operacionais da refinaria e/ou limpezas periódicas nos trocadores de calor, a fim de mitigar a incrustação.

Esse procedimento de cálculo é muito comum nas refinarias, mas despendem tempo devido ao volume de dados e está sujeito à precisão dos sensores de medida utilizados. Portanto, prever a taxa de incrustação nos trocadores de calor é fundamental para que os trocadores mantenham e/ou melhorem os seus desempenhos em diversas condições operacionais (OGBONNAYA; AJAYI, 2017).

Existem valores tabelados e constantes da resistência térmica, para cada tipo de fluido e condições operacionais, fornecidos pela *Tubular Exchanger Manufacturers Association* (TEMA, 2007), e que são muito utilizados em projetos de trocador de calor. Entretanto, de acordo com Carvalho *et al.* (2018), esses valores constantes podem trazer problemas quando se trata de sistemas dinâmicos, ou não corresponderem com a realidade industrial, como encontrado por Tonin (2013), onde os valores estimados da resistência de incrustação pela TEMA chegaram a ser 200 a 400% menores do que os valores medidos nas condições operacionais da refinaria analisada pelo autor.

Diante dessas implicações, surgiram na literatura modelos matemáticos para prever a taxa de incrustação em trocadores de calor, na tentativa de descrever os mecanismos que levam à deposição. Mas os mecanismos da incrustação são muito complexos e variam de acordo com o fluido estudado e as condições operacionais.

Existem na literatura vários modelos, desde o mais simples aos mais complexos, sendo o mais conhecido e utilizado o modelo de Ebert-Panchal.

Além da deposição, outro problema ocorre quando as incrustações dos trocadores expostos por longos períodos a altas temperaturas mostram uma maior condutividade térmica e se tornam mais rígidas e mais difíceis de serem removidas pelas limpezas (ISHIYAMA *et al.*, 2017). Esse fenômeno é conhecido por envelhecimento (“*ageing*” ou “*aging*”) e pouco estudado na literatura.

Para Santamaria e Macchietto (2018), modelar o fenômeno de envelhecimento da deposição em trocadores de calor é importante para aproximar o modelo teórico às deposições que ocorrem nas indústrias, pois pode-se, assim, descrever melhor os efeitos térmicos e hidráulicos da incrustação na performance dos trocadores de calor. Dessa forma, um modelo que considera os dois fenômenos, a deposição e seu envelhecimento, é capaz de se aproximar mais de sistemas reais, levando a soluções melhores para a minimização dos custos e na melhoria da eficiência térmica de uma rede de trocadores de calor (RTC). Um exemplo dessa aplicação é o estudo de Diaz-Bejarano *et al.* (2017a), que aplicou o modelo proposto por Coletti e Macchietto (2011) em dois trocadores de calor de uma bpa de uma refinaria real, e encontrou boas aproximações aos dados de temperatura de saída da refinaria estudada, considerando os dois fenômenos.

Os modelos que consideram o fenômeno da deposição e seu envelhecimento diferem entre si em nível de complexidade, o que pode dificultar a sua aplicação em análises termohidráulicas em trocadores de calor. Para contornar essa dificuldade, alguns autores desconsideram a deposição ocorrendo do lado do casco, assumindo que, pelas inspeções visuais, a deposição do lado dos tubos é muito maior do que a do lado do casco (COLETTI E MACCHIETTO, 2011). Mas, de acordo com Diaz-Bejarano *et al.* (2019) e Loyola-Fuentes *et al.* (2019), em refinarias de petróleo os fluidos de aquecimento geralmente são resíduos de coluna de vácuo (VR) ou outras frações pesadas da coluna de destilação, que tendem a gerar deposição significativa.

Para a realização das simulações dos modelos, a grande maioria dos trabalhos da literatura utiliza programas computacionais não livres e/ou não acessíveis. Além disso, obter dados das refinarias são difíceis devido à confidencialidade industrial.

Ante o exposto, pesquisas relacionadas à taxa da incrustação são importantes para as indústrias pois, além de diminuir os custos, promovem a inovação

tecnológica e diminuem a emissão de gás carbônico, beneficiando a sociedade e o meio ambiente.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo principal apresentar uma metodologia matemática simples para a previsão da incrustação e seu envelhecimento em trocadores de calor, para viabilizar o seu uso nas análises termohidráulicas das refinarias de petróleo. E para alcançar tal objetivo, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Estudar o processo de incrustação e seu envelhecimento em trocadores de calor do tipo casco e tubo;
- Selecionar o modelo matemático mais simples para a previsão da incrustação e seu envelhecimento;
- Utilizar um programa computacional livre, o *Scilab*, para realizar a simulação;
- Validar a metodologia apresentada, comparando seus resultados com aqueles da literatura.

Neste capítulo introdutório foram apresentadas as motivações, as justificativas do trabalho e seus objetivos. Outros quatros capítulos compõem a estrutura desta Dissertação.

O Capítulo 2 apresenta os principais conceitos para a compreensão do tema abordado, os principais modelos matemáticos da literatura para descrever os fenômenos de deposição e envelhecimento e os principais trabalhos sobre as análises térmicas e hidráulicas dos trocadores de calor de refinaria de petróleo.

O Capítulo 3 descreve a metodologia e os modelos teóricos utilizados para o desenvolvimento do trabalho, bem como a descrição de cada caso estudado.

O Capítulo 4 traz os resultados obtidos e os discute, comparando-os com os resultados encontrados na literatura.

E por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões, considerações e sugestões para futuros trabalhos.

## 2 FUNDAMENTOS E REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos para compreender o fenômeno da deposição e seu envelhecimento, além dos modelos matemáticos utilizados para a realização da análise termohidráulica do trocador de calor do tipo casco e tubo.

### 2.1 Fenômeno de deposição

A deposição é o processo no qual as partículas de materiais incrustantes, presentes nos fluidos que passam pelo trocador, se depositam nas paredes do trocador de calor e formam camadas com o passar do tempo de operação, dificultando a transferência de calor e diminuindo a área do fluxo do fluido.

Existem diversos mecanismos envolvidos no processo de deposição, e, devido à sua complexidade, ainda são pouco compreendidos. Por isso são bastante estudados por meio de dados térmicos das refinarias ou em escala laboratorial.

Esses estudos permitem saber quais as condições operacionais que afetam a incrustação, a caracterização do depósito e dos fluidos utilizados (YOUNG *et al.*, 2011), identificar os possíveis precursores da incrustação e também desenvolver modelos matemáticos que preveem a taxa da incrustação.

Dessa forma os mecanismos são importantes para predição da taxa de incrustação e são eles que classificam a deposição (COLETTI, 2010):

- Deposição por cristalização: precipitação e deposição dos sais dissolvidos na corrente de processo na superfície de troca térmica, que supersaturam devido às condições operacionais (COLETTI, 2010; SILVA, 2015);
- Deposição por particulados: sedimentação de partículas suspensas (argila, areia e óxidos por exemplo) quando a velocidade de escoamento é baixa (GONÇALVES, 2013);
- Deposição por reações químicas: ocorre devido a uma ou mais reações químicas (principalmente as reações de polimerização e/ou oxidação) que geram produtos insolúveis que se acumulam na superfície de troca térmica (COLETTI, 2010; GONÇALVES, 2013);
- Deposição por corrosão: ocorre devido à interação entre as impurezas

presentes no fluido e a superfície metálica do trocador, provocando a deterioração do metal e desprendimento dos produtos da corrosão, que se deposita em outro ponto da parede do trocador (GONÇALVES, 2013);

- Deposição por agentes biológicos: formação de filme de material biológico composto por micro-organismos (bactérias, algas, fungos por exemplo), que servem de alimento para macro-organismos como algas e mexilhões (COLETTI, 2010; SILVA, 2015).

Nas baterias de pré-aquecimento pode ocorrer qualquer um dos mecanismos acima citados ou uma combinação deles (COLETTI, 2010). Para as bpa posicionadas próximas do forno (região mais quente, *hot end*) a deposição por reações químicas é mais significativa, já para as posicionadas longe do forno (região mais fria, *cold end*) predominam a deposição de parafinas e sais (LOYOLA-FUENTES *et al.*, 2019).

Como as incrustações são mais severas nas regiões mais próximas do forno, serão apresentadas as possíveis etapas envolvidas no processo de deposição por reações químicas.

### 2.1.1 Etapas da deposição por reação química

A identificação dos precursores da incrustação no petróleo cru é mais difícil devido à sua complexa composição. Mesmo quando identificados, ainda é inconclusiva a relação entre o precursor e a incrustação (COLETTI, 2010).

Na literatura, a forma geral das etapas dos mecanismos da deposição química é apresentada a seguir (COLETTI, 2010):



Na primeira etapa ocorre a formação dos precursores, que são produtos de uma ou mais reações químicas desencadeadas pelos reagentes presentes no fluido (COLETTI, 2010; FIORENTIN, 2004). Essa etapa pode ocorrer antes do petróleo entrar no trocador de calor (COLETTI, 2010).

Na segunda etapa os precursores reagem formando partículas incrustantes insolúveis que irão se depositar nas paredes do trocador. Na terceira etapa, devido às altas temperaturas, ocorrem transformações físico-químicas no depósito, nomeadas de envelhecimento (COLETTI, 2010).

### 2.1.2 Sequência dos subprocessos da deposição

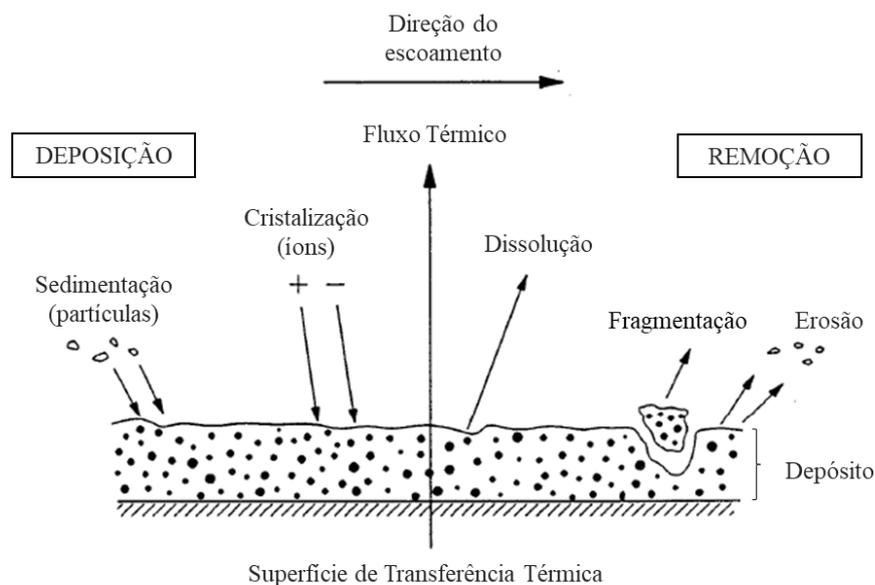
Em 1983, Norman Epstein identificou os subprocessos fundamentais da deposição sobre a superfície de transferência térmica (BARBOZA, 2020), independente do mecanismo envolvido (COLETTI *et al.*, 2010). São eles:

- a. Iniciação ou indução: nesse período a deposição da incrustação na superfície de transferência de calor é pouco significativa (BARBOZA, 2020; COLETTI, 2010) e há também a formação partículas incrustantes (COLETTI *et al.*, 2010). A duração desse período depende da temperatura (KAZI, 2016) e das propriedades da superfície (como a rugosidade) ou da sua energia livre (COLETTI, 2010). Os fatores citados na literatura que reduzem esse período são: altas temperaturas da superfície, material da superfície (tipo, revestimento e acabamento), aumento do grau da supersaturação (mecanismo de cristalização) e alta rugosidade da superfície de transferência térmica (COLETTI, 2010; KAZI, 2016). A rugosidade serve como sítios para que as incrustações se depositem e dificultam a sua saída devido às tensões de cisalhamento, então quanto maior a rugosidade da superfície menor será o período de indução (COLETTI, 2010);
- b. Transporte: transporte das partículas incrustante presentes no fluido para a superfície de transferência térmica (COLETTI *et al.*, 2010). Esse subprocessos são ditados pela transferência de massa e dependem da região na qual a incrustação foi formada, se no fluido ou na camada limite (COLETTI, 2010). Esse transporte pode ser realizado por difusão, sedimentação ou termoforese (efeito Soret) (KAZI, 2016);
- c. Adesão: deposição e adesão da incrustação na superfície de troca térmica e entre si (KAZI, 2016). As condições da superfície, as forças superficiais e a probabilidade de fixação são fatores que influenciam fortemente na adesão da incrustação (BARBOZA, 2020);
- d. Remoção: processo que compete com o processo de deposição (KAZI, 2016). Consiste na remoção parcial da incrustação podendo ocorrer logo após a adesão da incrustação ou depois de algum tempo (BARBOZA, 2020). Alguns autores consideram que a deposição não é removida e o que ocorre é a supressão da deposição, inibição do crescimento da deposição devido aos efeitos fluidodinâmicos (SILVA, 2015). Na incrustação do petróleo a tensão de

cisalhamento é a força que atua na sua remoção, acontecendo entre a superfície interfacial depósito – fluido (COLETTI, 2010; KAZI, 2016). Os mecanismos de remoção podem ocorrer por diferentes vias como: dissolução, erosão e fragmentação (COLETTI, 2010);

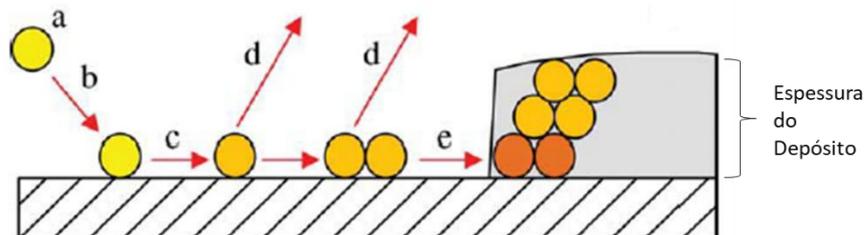
- e. Envelhecimento: transformação físico-química da deposição, na qual sua estrutura e propriedades são alteradas devido à exposição às altas temperaturas (COLETTI, 2010). O envelhecimento ocorre logo após a deposição (KAZI, 2016).

A Figura 1 esquematiza os processos competitivos da deposição e remoção e alguns subprocessos. Na Figura 2 está representada a sequência dos subprocessos da deposição descritos anteriormente, onde as letras indicam os subprocessos apresentados na lista ordenada de a até e.



**Figura 1.** Representação de alguns subprocessos da deposição.

Fonte: adaptado de Kazi (2016).



**Figura 2.** Desenho esquemático da sequência dos subprocessos da deposição.

Fonte: adaptado de Coletti *et al.* (2010).

### 2.1.3 Variáveis que afetam a deposição

Coletti (2010) apresenta as principais variáveis que afetam a deposição. São elas:

- Composição do petróleo: devido à sua composição variável, é muito difícil relacionar quais dos seus componentes podem levar a maiores incrustações. Mas há na literatura um consenso de que quanto mais pesado for o petróleo mais deposições formará. Além disso, a presença de impurezas (por exemplo, água, enxofre e materiais particulados), espécies poliméricas e asfaltenos insolúveis promovem a incrustação;
- Temperatura: o aumento da temperatura acelera as reações químicas e corrosões, aumentando a incrustação. Altas temperaturas afetam diretamente o envelhecimento da deposição. Ainda é debatido na literatura quais temperaturas influenciam mais a deposição, se a temperatura de parede, do fluido, da superfície do depósito ou a de filme. A escolha depende de onde se assume que ocorra a zona de reação da deposição;
- Velocidade do fluido (tensão de cisalhamento): o aumento da velocidade do fluido aumenta a tensão de cisalhamento e, conseqüentemente, a supressão do depósito;
- Superfície de deposição: se a superfície da deposição estiver corroída, além de afetar a transferência de calor, formam-se sítios os quais promovem a deposição.

Nakao (2017) comenta que as propriedades do fluido (densidade e viscosidade), também contribuem para que as deposições ocorram pois estão diretamente ligadas à tensão de cisalhamento, que determina a taxa de supressão da deposição.

No entanto, essas variáveis não devem ser analisadas individualmente, como mostrado por Ebert e Panchal (1995). Os autores encontraram uma ligação entre a velocidade, a temperatura de filme e a tensão de cisalhamento. De uma maneira geral, as condições operacionais que promovem a deposição são as altas temperaturas e baixas velocidades do fluido (DIAZ-BEJARANO *et al.*, 2017b).

## 2.2 Modelos matemáticos da taxa de deposição

Modelos matemáticos foram desenvolvidos para relacionar a dependência da incrustação com as condições operacionais e o tempo (COLETTI, 2010). Esses modelos possibilitam prever o comportamento e os impactos da incrustação, facilitando na escolha das estratégias a serem adotadas para mitigar esse problema.

Assim, para escolher o modelo matemático deve-se conhecer quais as condições operacionais da refinaria estudada e as propriedades físico-químicas dos fluidos que escoam pelo trocador, considerando também os mecanismos de deposição citados no item 2.1.

Existem diversos modelos que preveem a taxa de deposição. Alguns são específicos para cada tipo de aplicação. Aqui serão abordados os que são adotados nos trabalhos sobre a deposição em trocadores de calor que compõem a bateria de pré-aquecimento (bpa) nas refinarias de petróleo.

Antes de apresentar os modelos mais utilizados na literatura, será apresentado o modelo geral que foi o norteador para os modelos mais utilizados na literatura. Depois, serão apresentados os principais modelos citados por Assis (2013), que são os modelos empíricos linear e assintótico e os modelos semiempíricos Ebert-Panchal; Ebert-Panchal modificado; Polley (ou ESDU); e Nars e Givi. Todos os modelos são representados em termos da resistência térmica da incrustação ( $R_f$ ).

### 2.2.1 Modelo geral

O modelo proposto por D. Q. Kern e R. E. Seaton no final da década de 1950, serviu de fundamento para os estudos da dinâmica da incrustação, pois antes eram utilizados valores constantes fornecidos pela TEMA (MÜLLER-STEINHAGEN, 2011). Os pesquisadores propuseram que a taxa da massa do depósito incrustado ( $dm_d/dt$ ) é função da taxa de deposição (que depende da força de adesão) e da taxa de remoção (que depende da tensão de cisalhamento), que são dois processos competitivos (COLETTI, 2010; FIORENTIN, 2004):

$$\frac{dm_d}{dt} = m_d - m_r \quad (1)$$

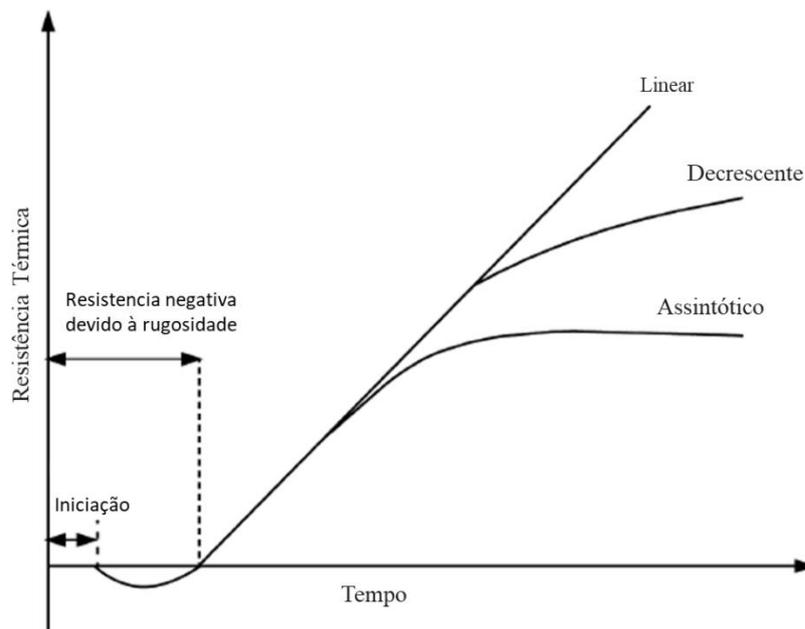
onde  $m_d$  é a taxa mássica de deposição e  $m_r$  a taxa mássica de remoção.

A Equação (1) pode ser escrita em termos da resistência térmica da incrustação como:

$$\frac{dR_f}{dt} = \phi_d - \phi_r \quad (2)$$

onde  $\phi_d$  e  $\phi_r$  são os termos de deposição da incrustação e de remoção da incrustação respectivamente.

Dependendo do comportamento das taxas de deposição e remoção (ou supressão), a taxa da incrustação (em termos da resistência térmica) assume diferentes comportamentos, podendo ser linear, decrescente ou assintótico (AL ISMAILI, 2018), como ilustrado na Figura 3.



**Figura 3.** Curvas da resistência térmica para os modelos semiempíricos.

Fonte: adaptado de Al Ismaili (2018).

Quando a taxa de remoção é maior do que taxa de deposição e a espessura da deposição não atinge valores constantes, a taxa da incrustação assume um comportamento decrescente (IBRAHIM, 2012). Nas próximas subseções são apresentadas somente os modelos matemáticos que representam os comportamentos linear e assintótico, os mais estudados na literatura.

Também é observado na Figura 3 que, logo após o subprocesso de iniciação, a resistência térmica exibe valores negativos. Isso foi reportado em alguns trabalhos da literatura, que justificam esse comportamento devido à rugosidade da superfície de transferência térmica (AL ISMAILI, 2018).

### 2.2.2 Modelo Linear

É o modelo mais simples, em que a taxa de deposição é muito mais rápida do que a taxa de remoção ( $\phi_r \approx 0$ ) ou a taxa de deposição é constante (AL ISMAILI, 2018; KAZI, 2016).

$$\frac{dR_f}{dt} = c \quad (3)$$

onde  $c$  é um parâmetro específico para cada trocador (Smaïli *et al.*, 2001).

### 2.2.3 Modelo Assintótico

Proposto por Kern e Seaton (1959), esse modelo assume que a taxa de deposição é constante e a taxa de remoção é proporcional à massa do depósito por unidade de superfície (FIORENTIN, 2004). Assim, a resistência cresce assintoticamente (COLETTI, 2010; FIORENTIN, 2004). Esse modelo é dado pela Equação (4), em que  $R_f^*$  é o valor assintótico da resistência (resistência máxima de deposição),  $\theta$  é o tempo e  $\theta_c$  o tempo característico da incrustação (desde o início da operação até o instante atual) (ASSIS, 2013; FIORENTIN, 2004).

$$R_f = R_f^* \left[ 1 - \exp(-\theta/\theta_c) \right] \quad (4)$$

### 2.2.4 Modelo de Ebert-Panchal

Como o modelo de Kern e Seaton não levava em conta os mecanismos de deposição (Coletti, 2010), outros modelos foram propostos inserindo esses mecanismos. Entre eles, está o modelo de Ebert-Panchal, que introduziu o conceito de fronteira da deposição (*fouling treshold*), sendo um outro marco importante nos estudos da incrustação nas refinarias que operam em altas temperaturas.

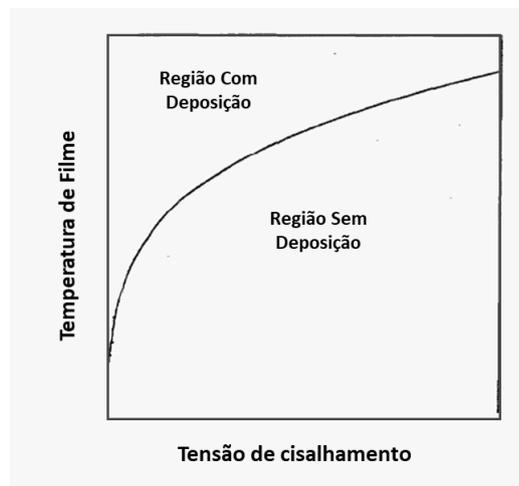
Nesse modelo as reações de formação da deposição ocorrem na fronteira entre o fluido e o depósito a uma temperatura limite, nomeada de temperatura de filme ( $T_f$ ). Ebert-Panchal (1995) utilizaram os dados de uma planta piloto para prever a taxa de incrustação por meio da Equação (5). De acordo com as condições operacionais, os autores traçaram um limite onde ocorre ou não a deposição (qualitativamente

representado na Figura 4), por isso o nome de fronteira da deposição. A equação de Ebert-Panchal, Equação (5) é representada em termos da taxa de deposição (consideração das reações químicas) e da taxa de remoção (consideração da fluidodinâmica do escoamento) (VALLE, 2012).

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta \exp\left(-\frac{E_f}{RT_f}\right) - \gamma\tau_w \quad (5)$$

Na Equação (5),  $Re$  é o número de Reynolds,  $E_f$  a energia de ativação da deposição,  $R$  a constante dos gases ideais e  $\tau_w$  a tensão de cisalhamento. Os parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  foram determinados por meio do ajuste aos dados experimentais e dependem do tipo de petróleo utilizado.

A Equação (5) mostra a relação entre a temperatura de filme, a tensão de cisalhamento e a velocidade do fluido, permitindo que se possa modificar as condições operacionais para regiões em que não ocorra a deposição ou que ela se aproxima de zero (COLETTI, 2010).



**Figura 4.** Representação da fronteira da deposição do modelo de Ebert-Panchal (1995) em relação à temperatura de filme e tensão de cisalhamento

Fonte: adaptado de Ebert e Panchal (1995).

#### 2.2.5 Modelo de Ebert-Panchal modificado

O modelo de Ebert-Panchal foi modificado dois anos mais tarde por Panchal e colaboradores (WILSON *et al.* 2005), sendo adicionado o número de Prandtl ( $Pr$ ), fixando o expoente ao número de Reynolds e ajustados os valores dos parâmetros para diferentes tipos de petróleo (COLETTI, 2010), como visto na Equação (6).

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Pr^{-0.33} Re^{-0.66} \exp\left(-\frac{E_f}{RT_f}\right) - \gamma \tau_w \quad (6)$$

Nessa nova equação, as propriedades térmicas e as vazões do fluido foram consideradas inserindo o número de Prandtl e Reynolds (WILSON *et al.* 2005). De acordo com Fiorentin (2004), no primeiro termo da equação (o termo da deposição), ela é semelhante ao número de Nusselt (correlação de Dittus-Boelter, com exceção dos expoentes) para escoamentos turbulentos em tubos circulares.

### 2.2.6 Modelo ESDU

Polley *et al.* (2007) sugeriram algumas modificações na equação do modelo de Ebert-Panchal modificado, trocando a temperatura do filme ( $T_f$ ) pela temperatura da superfície do depósito ( $T_s$ ), e relacionando o termo de supressão com o número de Reynolds. O modelo resultante foi nomeado de ESDU (POLLEY *et al.*, 2007) e é apresentado na Equação (7).

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Pr^{-0.33} Re^{-0.8} \exp\left(-\frac{E_f}{RT_s}\right) - \gamma Re^{0.8} \quad (7)$$

### 2.2.7 Modelo de Nars e Givi

Em 2006, os pesquisadores Nars e Givi propuseram uma modificação no modelo de Ebert-Panchal, substituindo, assim como Polley *et al.* (2007), o termo de tensão de cisalhamento pelo número de Reynolds elevado a um expoente ajustado de acordo com os dados operacionais de seus estudos, que utilizava petróleo leve (VALLE, 2012). O modelo de Nars e Givi é apresentado na Equação (8).

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta \exp\left(-\frac{E_a}{RT_f}\right) - \gamma Re^{0.4} \quad (8)$$

Dentre os modelos apresentados, o mais utilizado para os estudos em refinarias de petróleo é o modelo de Ebert-Panchal modificado. Polley *et al.* (2007) compararam o modelo ESDU, por eles desenvolvido, com o modelo de Ebert-Panchal modificado. Os autores verificaram que o modelo de Ebert-Panchal modificado se ajustou melhor aos dados da refinaria com incrustação associada ao mecanismo de decomposição térmica de asfaltenos.

### 2.3 Modelo do envelhecimento da incrustação

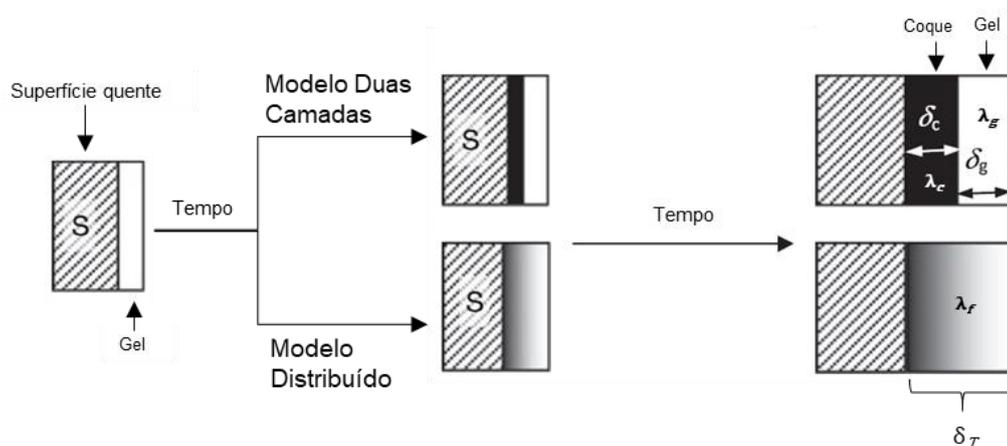
Com o avanço da deposição, forma-se inicialmente uma camada que tem característica de gel, e com o decorrer do tempo essa camada tem suas propriedades físicas e químicas alteradas conforme é exposta às altas temperaturas. Essa incrustação se torna mais rígida e apresenta uma condutividade maior, passando a ser chamada de coque (ISHIYAMA *et al.*, 2010). Essa conversão da camada gel em coque é o fenômeno denominado envelhecimento da incrustação.

O envelhecimento envolve reações químicas complexas, que mudam a composição química do depósito, tornando a sua estrutura mais poliaromática e grafítica (FAN; WATKINSON, 2009; WILSON *et al.*, 2009).

A condutividade térmica da incrustação varia com o tempo e com a posição, e existem diversos valores da condutividade térmica da deposição reportados na literatura, que variam entre 0,07 W/(m·K) até 1,8 W/(m·K) (ISHIYAMA *et al.*, 2011).

Dentre os modelos que descrevem esse processo, os mais simples encontrados na literatura são o modelo distribuído proposto por Ishiyama *et al.* (2010), e o modelo de duas camadas desenvolvido por Ishiyama *et al.* (2011).

De acordo com Ishiyama *et al.* (2011), no modelo distribuído o envelhecimento é considerado gradual e contínuo e no modelo de duas camadas a conversão é completa. A Figura 5 esquematiza os dois modelos, onde o caminho superior é o modelo de duas camadas e o caminho inferior o modelo distribuído.



**Figura 5.** Esquema dos modelos de envelhecimento de duas camadas e distribuído

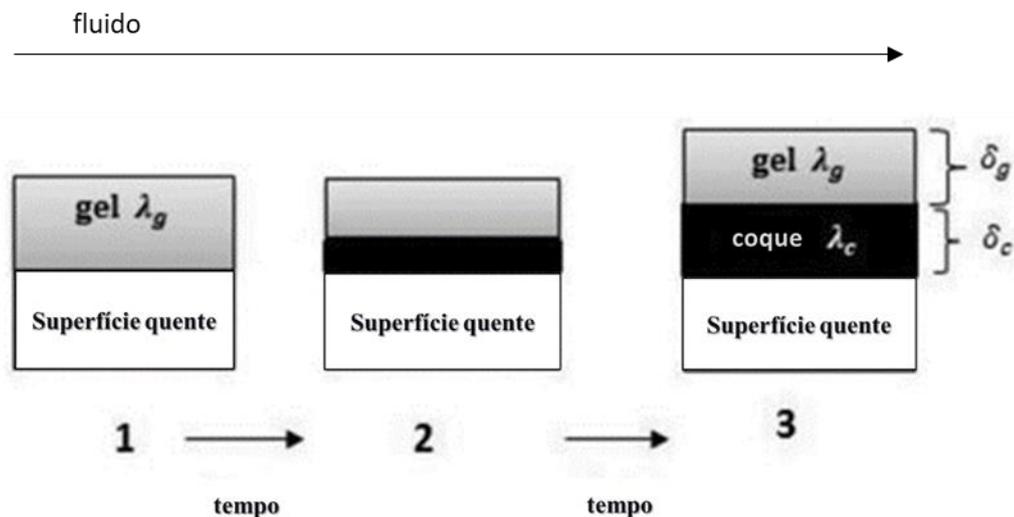
Fonte: adaptado de Pogiatis *et al.* (2012).

Nos dois modelos, há inicialmente um depósito com características de gel e a

taxa de deposição descreve o crescimento da camada desse depósito. Conforme essa camada é exposta à superfície quente da parede do trocador, ela enrijece e se torna mais condutiva, e é nesse momento que os dois modelos se diferenciam. Nas próximas seções, são apresentadas as características de cada modelo.

### 2.3.1 Modelo Duas camadas

Após o depósito, parte da camada inicial (camada gel) enrijece formando uma segunda camada na parede do tubo, passando a ser chamada de camada coque ou envelhecida (ISHIYAMA *et al.*, 2011). Assume-se que essas duas camadas não se misturam.



**Figura 6.** Esquema do modelo de duas camadas do envelhecimento da deposição

Fonte: adaptada de Diaby *et al.* (2016).

Assim, a camada gel (camada externa) fica em contato com o fluido que escoia no tubo e a camada coque (camada interna) fica em contato com a camada gel e a parede do tubo. Formam-se, então, duas camadas com espessuras que variam com o tempo, sendo  $\delta_g$  a espessura da camada gel e  $\delta_c$  a espessura da camada coque, conforme ilustrado na Figura 6.

Os valores das condutividades da camada gel ( $\lambda_g$ ) e da camada coque ( $\lambda_c$ ) são fixas. Ishiyama *et al.* (2010) sugerem os valores de  $0,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  para a camada gel e  $1,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  para a camada coque. Há na literatura outros valores de condutividade e dependem dos fluidos utilizados. Os valores mais comuns são esses propostos por Ishiyama *et al.* (2010).

A taxa de envelhecimento do modelo de duas camadas pode ser representada pelo modelo cinético de decaimento de ordem zero, de primeira ordem ou bilinear, como proposto por Ishiyama et al. (2011). Os autores compararam os três modelos com o modelo distribuído (considerado por eles o ideal) e concluíram que o modelo cinético de primeira ordem é uma forma robusta para a representação do processo de envelhecimento da camada gel, com boas aproximações ao modelo distribuído, para operações em fluxo térmico constante. Assim, a taxa de envelhecimento pelo modelo cinético de primeira ordem é descrita pela Equação (9), que está em termos da espessura da camada gel ( $\delta_g$ ) da deposição.

$$\frac{dR_{f,c}}{dt} = \frac{A_a}{\lambda_c} \exp\left(\frac{E_a}{RT_{gc}}\right) \delta_g \quad (9)$$

Os parâmetros do modelo são o fator pré-exponencial do envelhecimento ( $A_a$ ), a energia de ativação do envelhecimento ( $E_a$ ) e a constante universal dos gases ideais ( $R$ ).  $T_{gc}$  é a temperatura da interface gel-coque. Na literatura há diversas formas para calcular a espessura da camada gel ( $\delta_g$ ), seja levando em consideração os efeitos da curvatura da superfície e da deposição, seja desprezando-os, em virtude de a espessura da deposição ser muito menor do que o raio do tubo.

### 2.3.2 Modelo Distribuído

No modelo distribuído, uma vez que a incrustação se deposita, outra camada a sobrepõe formando múltiplas camadas ( $\delta_T$ ) com o decorrer do tempo. Nesse modelo, o envelhecimento é gradual e expresso por meio da mudança da condutividade térmica ( $\lambda_f$ ) da camada formada num dado instante de tempo, conforme Equação (10). Essa equação foi proposta por Ishiyama *et al.* (2010) e relaciona a composição química e as propriedades termofísicas da deposição (WILSON *et al.*, 2009).

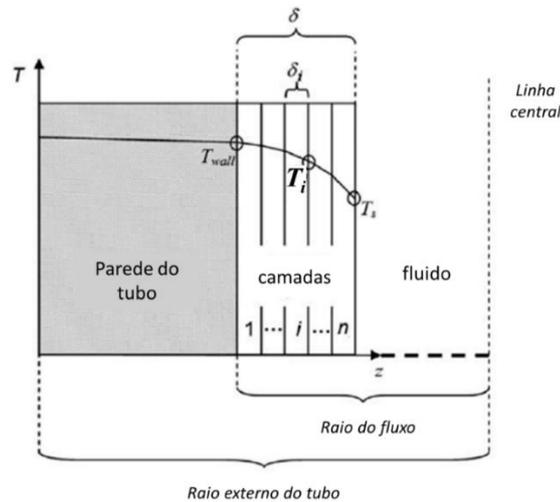
$$\lambda_f = \lambda_c + (\lambda_g - \lambda_c) y \quad (10)$$

Na Equação (10), os parâmetros são a condutividade da camada coque ( $\lambda_c$ ) e a condutividade da camada gel ( $\lambda_g$ ). A variável  $y$  (*youth variable*) está relacionada ao quão nova é a camada depositada. Essa variável decai do seu valor inicial ( $y = 1$ ) seguindo o modelo cinético de primeira ordem, como mostrado na Equação (11) e é delimitada entre 0 e 1.

$$0 \leq y \leq 1$$

$$\frac{dy}{dt} = -A_a \exp\left(\frac{E_a}{RT_i}\right) y \quad y(t=0) = 1 \quad (11)$$

Na Equação (11), os parâmetros  $A_a$ ,  $E_a$  e  $R$  são os mesmos do modelo de duas camadas.  $T_i$  é a temperatura da interface entre as subcamadas, como visto na Figura 7.



**Figura 7.** Esquema do perfil das temperaturas interfaciais do modelo distribuído.

Fonte: adaptada de Ishiyama *et al.* (2010).

Para o cálculo da temperatura de interface, como os autores realizaram os estudos em escala laboratorial para um único tubo, duas condições operacionais foram consideradas: fluxo térmico constante ou temperatura de parede constante. As considerações levavam a um sistema de equações algébricas implícitas.

Independentemente do modelo, o envelhecimento é um fenômeno que altera a condutividade do depósito e, conseqüentemente, a resistência da incrustação. De acordo com Wilson *et al.* (2009), é importante considerar o envelhecimento na avaliação térmica e hidráulica dos trocadores, pois ele muda a dinâmica da deposição, pode mascarar a identificação do material originalmente depositado e os depósitos envelhecidos são mais difíceis de serem removidos nas limpezas.

## 2.4 Efeitos termohidráulicos da deposição nos trocadores de calor e seus estudos na literatura

O aumento da resistência térmica e/ou perda de carga são indicativos do grau da incrustação nos trocadores de calor (FIORENTIN, 2004), pois o depósito aumenta

a resistência à transferência de energia e diminui o raio do fluxo dos tubos.

O procedimento mais comum para o monitoramento da incrustação nas refinarias é a realização de cálculos do coeficiente global de transferência de calor por meio dos dados de temperatura e vazão mássica atualizados. Em seguida, esse coeficiente global é comparado com o coeficiente global no seu estado limpo (JERÓNIMO *et al.*, 1997).

Os resultados desse procedimento são utilizados para a realização de ajustes nas condições operacionais para manter a eficiência dos trocadores. Além disso, evitam a realização de paradas não programadas. No entanto, esse procedimento e ajustes despendem tempo, pois são medições diárias de vários trocadores de calor (JERÓNIMO *et al.*, 1997), as condições operacionais variam muito e a carga de alimentação é alterada periodicamente (TONIN, 2003). Ademais, o procedimento depende da precisão das medições, pois medidas imprecisas podem incorrer em erros nos cálculos da resistência (TAKEMOTO *et al.*, 1999).

Essas limitações motivaram o desenvolvimento de novas metodologias e de ferramentas computacionais para o monitoramento da incrustação.

Jerónimo *et al.* (1997) desenvolveram uma metodologia simples com base nos conceitos da eficiência térmica e números de transferência de calor (NUT), para calcular a porcentagem da incrustação de cada trocador de calor da rede. Em resumo, a metodologia consiste no cálculo da efetividade corrigida pela vazão e sua comparação com a efetividade medida da refinaria, necessitando apenas de quatro medidas de temperatura e uma de vazão de cada trocador. Utilizando esse método, os autores concluíram que a mudança das propriedades termofísicas são desprezíveis para o cálculo da eficiência do trocador de calor quando essas mudanças não são significativas. O monitoramento foi realizado em três trocadores de calor em uma refinaria e os resultados da efetividade calculada se aproximaram da efetividade medida da refinaria.

O trabalho de Jerónimo *et al.* (1997) foi estendido para uma rede de trocadores de calor por Tonin (2003), que propôs um índice de peso para avaliar a contribuição de cada trocador na rede. O autor calculou também a despesa adicional com combustível no forno devido à queda de desempenho da rede. Apesar do autor conseguir resultados satisfatórios, ao verificar o trabalho de Tonin (2003), Madi (2005) salienta que a melhor maneira para verificar os custos relacionados à queda da

performance é analisando a variação da temperatura de saída do último trocador da rede. Além disso, a condição suja utilizada nos trabalhos de Jerónimo *et al.* (1997) e Tonin (2003) considera a resistência térmica de projeto do trocador, que pode estar com valores menores do que aqueles medidos.

Outra metodologia para o monitoramento da deposição consiste em incluir os modelos matemáticos que descrevem a taxa de deposição e seu envelhecimento, descritos anteriormente nos itens 2.2 e 2.3 respectivamente. Dentre os trabalhos encontrados na literatura, os mais citados serão descritos a seguir.

Coletti *et al.* (2010) aplicaram o modelo distribuído para um tubo, de um trocador do tipo casco e tubo, considerando as variações espaciais (radial e axial) da deposição e envelhecimento. Utilizaram o modelo de Ebert-Panchal modificado e o modelo de envelhecimento distribuído com decaimento cinético de primeira ordem. Os autores consideraram duas condições operacionais: fluxo térmico constante e temperatura de parede constante. Os resultados das duas condições operacionais mostraram que a resistência térmica era menor quando se considerava o processo de envelhecimento do que quando não se considerava o envelhecimento do depósito. No entanto, a espessura do depósito envelhecido crescia mais rapidamente do que o depósito não envelhecido, prejudicando o escoamento do fluido nos tubos. Assim, o envelhecimento reduzia o impacto térmico da deposição enquanto aumentava o impacto hidráulico nos tubos dos trocadores. Os autores concluíram que o processo de envelhecimento é importante para as análises termohidráulicas das refinarias. Tal processo possui escala de tempo de semanas a vários meses, tornando o lento processo de envelhecimento da deposição significativo nos trocadores de calor. As equações diferenciais parciais do modelo foram resolvidas utilizando o método das diferenças finitas centrais, e para a modelagem e a resolução das equações foram realizadas no ambiente gPROMS<sup>TM</sup>.

Ishiyama *et al.* (2011) desenvolveram um modelo de parâmetros concentrados para avaliar os impactos do envelhecimento da deposição em um único tubo, de um trocador de calor do tipo casco e tubo, em escala laboratorial. Os autores utilizaram o modelo de deposição ESDU (sem o termo de supressão) e o modelo distribuído de envelhecimento, considerando as mesmas condições operacionais de Coletti *et al.* (2010). Eles concluíram que a temperatura de interface entre a camada depósito-fluido é influenciada pelo envelhecimento, sendo uma variável chave para a taxa de

deposição. Também chegaram às mesmas conclusões de Coletti *et al.* (2010) sobre o envelhecimento, um fenômeno que muda a relação entre os impactos térmicos e hidráulicos da deposição em trocadores de calor. Os autores utilizaram o MATLAB para a simulação e aplicaram o método de Euler para resolver as equações diferenciais. Segundo os autores, o termo de supressão pode ser desconsiderado para simplificar os cálculos, pois esse termo é pouco afetado pelo envelhecimento. No entanto, Diaby *et al.* (2016), ao estudarem os impactos causados por essa simplificação, concluíram que, ao excluir o termo de supressão, o modelo pode superestimar os efeitos térmicos e hidráulicos da deposição.

Coletti e Macchietto (2011) desconsideraram as deposições do lado do casco, destacando dois motivos: as incrustações do lado dos tubos são predominantes (comprovado por meio das inspeções visuais quando o trocador de calor está desmontado para a sua limpeza) e o segundo motivo seria por que a resistência térmica do lado do casco é menor do que a do lado do tubo (onde está passando o petróleo cru sob altas velocidades e tensão de cisalhamento). Nesse trabalho, os autores utilizaram o gPROMS<sup>TM</sup> e um dos objetivos foi ajustar os parâmetros da equação de Ebert-Panchal modificada com os dados operacionais da refinaria ExxonMobil e comparar o modelo desenvolvido por Coletti *et al.* (2010) com os dados da resistência térmica dessa refinaria. Apesar de não considerarem a deposição do lado do casco, a previsão do modelo foi considerada coerente com os valores da resistência térmica calculados pela refinaria.

Valle (2012) estimou os coeficientes das variáveis de três modelos de resistência térmica da literatura (Ebert-Panchal, Polley e Nars e Givi), ajustando-os aos valores da resistência térmica de incrustação obtidos do monitoramento do *software* FOULING<sup>TR</sup> da refinaria Henrique Lage da PETROBRAS. O autor aplicou o método do Enxame de Partículas para ajustar os coeficientes. A resistência térmica foi considerada para os dois lados do trocador de calor, e foram comparadas as previsões das três equações, mas sem o fenômeno do envelhecimento. Em seu trabalho, Valle (2012) verificou que, para velocidades de escoamento acima de 1,5 m/s do lado dos tubos e 0,5 m/s para o lado do casco, a influência do escoamento é muito grande na taxa de incrustação. Ele concluiu que a metodologia por ele empregada pode ser utilizada para prever a taxa de incrustação em ambos os lados do trocador.

Assis *et al.* (2015) realizaram a otimização dinâmica da distribuição de vazões mássicas em uma pequena rede de trocadores de calor do tipo casco e tubo. Essa rede hipotética operava em paralelo, que é a configuração mais encontrada em refinarias de petróleo, de acordo com os autores. Foram considerados os efeitos da deposição somente do lado dos tubos e foi utilizado o modelo de Ebert-Panchal modificado. O problema de otimização foi implementado no *software* GAMS. Os resultados da otimização foram comparados com uma solução tradicional, na qual as vazões de entrada nos trocadores eram igualmente divididas (caso base). Assis *et al.* (2015), ao comparar os resultados do caso base com os do caso otimizado, mostraram que a deposição da incrustação e, conseqüentemente, os custos energéticos da rede estudada, foi menor para o caso otimizado. Os autores concluíram que a otimização da distribuição das vazões mássicas é uma alternativa viável para a mitigação da incrustação e que o modelo proposto por eles pode ser aplicado para uma rede de trocadores de uma refinaria real com controladores de vazão.

O modelo proposto por Santamaria e Macchietto (2018) é um sistema implícito de equações algébricas e duas equações diferenciais ordinárias que descrevem a taxa de resistência total da incrustação (modelo de Ebert-Panchal modificado) e a taxa de envelhecimento da deposição em termos de fração da camada gel. Esses autores integram o grupo interdisciplinar do projeto denominado CROF (*Crude oil fouling*). Fazem parte desse projeto as universidades de Cambridge, Imperial College e Bath, as refinarias de petróleo Exxon Mobil, BP, Chevron, Conocco Philips, Shell e Total. O objetivo do trabalho era a otimização da programação das limpezas e os autores destacam a importância de se considerar o envelhecimento para a escolha do tipo de limpeza (mecânica ou química), dependendo do grau de envelhecimento. Os autores utilizaram o GAMS e também não consideram a deposição ocorrendo do lado do casco.

Já Loyola-Fuentes *et al.* (2019) consideraram para o lado do casco uma taxa de incrustação linear e constante. Os autores relatam que em refinarias de petróleo é sempre esperado que haja incrustação do lado do casco e, portanto, deve ser incluso no modelo de estimação de incrustação. O objetivo dos autores era o ajuste dos parâmetros da equação de Ebert-Panchal modificado por meio dos dados de uma refinaria, utilizando a reconciliação dos dados. Foi utilizado o MATLAB.

Diaz-Bejarano *et al.* (2019) comentam que, dependendo do fluido que percorre

o lado do casco, nem sempre é possível desconsiderar a deposição desse lado, pois em refinarias esses fluidos podem ser frações pesadas vindas da coluna de destilação a vácuo. Destacam que, ao desconsiderar a deposição do lado casco, as simulações podem não descrever corretamente a performance térmica atual e futura da rede de trocadores. Os autores desenvolveram um modelo dinâmico e distribuído para a deposição nos dois lados do trocador de calor e ainda incluíram a taxa de envelhecimento da deposição em ambos os lados, utilizando o modelo de Ebert-Panchal modificado e o modelo distribuído de envelhecimento. O modelo proposto foi implementado no *software* Hexxcell Studio<sup>TM</sup>. Os resultados da simulação se aproximaram aos dados da refinaria estudada, mostrando que a incrustação do lado do casco pode ser sim significativa, dependendo do fluido utilizado.

Como visto acima, a maioria dos trabalhos utilizam programas e/ou simuladores de uso restrito ou com valores não acessíveis. Alguns simuladores possuem modelos internos e que não permitem modificá-los.

Algumas metodologias são mais complexas e difíceis de serem empregadas nas refinarias, inviabilizando o seu uso. Por esse motivo, ainda é muito utilizado o procedimento padrão para o cálculo da resistência térmica para o monitoramento da rede. Nem todos os trabalhos podem ser reproduzidos, pois determinados dados sobre as propriedades físicas do petróleo são confidenciais ou faltam algumas informações importantes para o desenvolvimento dos cálculos.

Dessa forma, trabalhos desenvolvidos em ambiente computacional livre são interessantes e possibilitam o aprimoramento dos estudos relacionados à previsão da incrustação em trocadores de calor. O emprego de modelos matemáticos mais simples viabiliza a sua aplicação em refinarias, aperfeiçoando o método de análise do desempenho dos trocadores.

### 3 METODOLOGIA

A simulação da deposição e envelhecimento da incrustação foi realizada em ambiente *Scilab* 6.0.2. Foi utilizado a função *ode* do *Scilab* para resolver as equações diferenciais ordinárias (EDO) que descrevem a taxa da incrustação e a taxa de envelhecimento com modelo de duas camadas e modelo cinético de primeira ordem. A função *ode* ajusta automaticamente o passo do tempo para a integração.

As análises termohidráulicas foram realizadas em quatro diferentes estudos. O primeiro estudo foi realizado para um trocador de calor do tipo casco e tubo comparando os cenários com e sem o processo de envelhecimento da incrustação, para um período de 365 dias.

No segundo estudo, o modelo com envelhecimento foi aplicado para uma rede com dois trocadores de calor em paralelo. As propriedades dos fluidos, os parâmetros e condições operacionais foram retiradas do trabalho de Coletti e Macchietto (2011).

No estudo de caso III, foi realizada a comparação das resistências térmicas obtidas do modelo do caso II, com dados da refinaria fornecidos no trabalho de Coletti e Macchietto (2011) e com o modelo desenvolvidos por aqueles autores.

Para a validação do modelo utilizado neste trabalho (sem o processo de envelhecimento), no quarto estudo de caso, foi realizada uma comparação como o modelo da literatura desenvolvido por Assis *et al.* (2015) para uma rede de trocadores de calor (RTC) hipotética, composta por dois trocadores do tipo casco e tubo em paralelo.

Em todos os cenários os trocadores operam em contracorrente e os fluidos utilizados no Caso I, II e III são o petróleo cru (lado dos tubos) e resíduo de coluna de vácuo – VR (lado do casco). Já para o caso IV, o petróleo cru também passa pelo lado dos tubos, mas o fluido que passa do lado casco só é denominado de corrente fria no trabalho de Assis *et al.* (2015), mas são informadas suas propriedades físicas e temperatura de entrada.

Os estudos de cada caso estão descritos nas próximas subseções, bem como os dados e equações utilizados para cada um.

#### 3.1 Hipóteses adotadas

Para a formulação do problema foram utilizadas as seguintes hipóteses

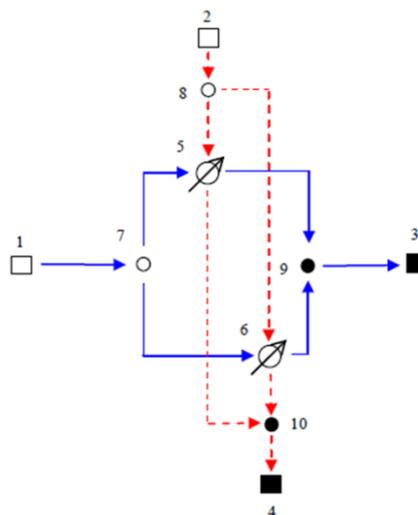
simplificadoras:

- i. Operação adiabática em relação ao meio;
- ii. Estado pseudo-estacionário (a transferência de calor é muito mais rápida que a taxa de deposição em refinarias de petróleo);
- iii. Unidirecional (somente na direção radial ocorre a transferência de calor e a deposição);
- iv. Propriedades físicas constantes;
- v. A taxa de deposição e envelhecimento da incrustação é uniforme ao longo dos tubos;
- vi. As camadas incrustadas, camada gel e coque, não se misturam;
- vii. Temperaturas de entrada e vazão mássica dos fluidos constantes.

Para a taxa de deposição e seu envelhecimento do lado do casco, como ainda não há um consenso na literatura sobre qual o modelo mais adequado para descrever tais fenômenos, neste trabalho foi considerada a taxa de deposição do lado do casco ( $R_f^S$ ) constante e igual a  $5,50 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ , o mesmo valor utilizado por Loyola-Fuentes *et al.* (2019) e sem o fenômeno de envelhecimento.

### 3.2 Modelo do trocador de calor

Os trocadores de calor considerados neste trabalho foram do tipo casco e tubo, com múltiplos passes, operando em contracorrente e com arranjo quadrado dos tubos. A Figura 8 ilustra a configuração da RTC utilizada nos estudos de caso II-IV.



**Figura 8.** Esquema da configuração de rede para os casos II-IV

Fonte: Assis *et al.* (2015).

Na Figura 8, a linha contínua representa a corrente fria e a corrente tracejada a corrente quente. Os números 1 - 4 representam o suprimento da corrente fria, suprimento da corrente quente, demanda da corrente fria e demanda da corrente quente, respectivamente. Os trocadores de calor são representados pelos números 5 e 6, os divisores são os números 7 e 8 e, por fim, 9 e 10 os misturadores. As correntes foram igualmente divididas entre os dois trocadores.

Os parâmetros do trocador de calor do estudo de caso I estão informados na Tabela 1. Para o estudo de caso II e III, os dois trocadores de calor são idênticos e os seus parâmetros estão organizados na Tabela 2. Para o estudo de caso IV, os dados foram retirados do trabalho de Assis *et al.* (2015) e estão dispostos na Tabela 3.

**Tabela 1.** Parâmetros do trocador de calor do estudo de caso I.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
<b>Tubos</b>		<b>Casco</b>	
Diâmetro interno ( $D_i$ )	19,05 mm	Diâmetro ( $D$ )	1,4 m
Diâmetro externo ( $D_o$ ) <sup>1</sup>	25,40 mm	Número de passagens no casco ( $N_p$ )	2
Comprimento ( $L$ )	5,7 m	Fator de correção para o <i>pitch</i> ( $F_p$ ) <sup>2</sup>	0,85
Número de tubos ( $N_T$ )	880	Fator correção para os vazamentos ( $F_L$ ) <sup>2</sup>	0,9
Número de passagens nos tubos ( $N_{pT}$ )	4	Corte das Chicanas ( $B_c$ ) <sup>2</sup>	25%
Condutividade térmica do tubo ( $k_w$ )	38 W/(m·K)	<sup>1</sup> Retirado de Coletti e Macchietto (2011) <sup>2</sup> Retirado de Wang <i>et al.</i> (2012).	

Fonte: Santamaria e Macchietto (2018).

**Tabela 2.** Parâmetros relativos aos trocadores de calor dos estudos de caso II e III

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
<b>Tubos</b>		<b>Casco</b>	
Diâmetro interno ( $D_i$ )	19,05 mm	Diâmetro ( $D$ )	1,4 m
Diâmetro externo ( $D_o$ )	25,40 mm	Número de passagens no casco ( $N_p$ )	2
Comprimento ( $L$ )	6,1 m	Fator de correção para o pitch ( $F_p$ )*	0,85
Número de tubos ( $N_T$ )	880	Fator correção para os vazamentos ( $F_L$ )*	0,9
Número de passagens nos tubos ( $N_{pT}$ )	4	Corte das Chicanas ( $B_c$ )*	25%
Condutividade térmica do tubo ( $k_w$ )	38 W/(m·K)	* Retirado de Wang <i>et al.</i> (2012).	

Fonte: Coletti e Macchietto (2011)

**Tabela 3.** Geometria do trocador de calor do estudo de caso IV

<b>Tubos</b>			
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Diâmetro interno ( $D_i$ )	14,85 mm	Número de tubos ( $N_T$ )	1520
Diâmetro externo ( $D_o$ )	19,05 mm	Número de passagens nos tubos ( $N_{pT}$ )	2
Comprimento ( $L$ )	7,7 m	Condutividade térmica ( $k_w$ )	55 W/(m·K)
<b>Casco</b>			
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Coeficiente de película ( $h_s$ )	1540 W/(m <sup>2</sup> ·K)	Número de passagens no casco ( $N_p$ )	1

Fonte: Assis *et al.* (2015).

### 3.3 Efeitos térmicos

Para o monitoramento do desempenho térmico dos trocadores foi utilizado o método do P-*NUT*. As entradas utilizadas para o modelo são as temperaturas iniciais e as vazões mássicas dos fluidos, que neste trabalho foram mantidas constantes.

No método  $\epsilon$ -*NUT* os valores da efetividade diferem para os mesmos valores de *NUT* e  $R_c$ , dependendo do valor da capacidade térmica ( $C$ ), definida como o produto entre o calor específico do fluido ( $C_p$ ) e de sua vazão mássica ( $\dot{m}$ ) (BERGMAN *et al.*, 2014; SAARI, 2010). O fluido que possuir a menor capacidade térmica, será o fluido mínimo, do contrário, será o fluido máximo (BERGMAN *et al.*, 2014). Diferentemente do método  $\epsilon$ -*NUT*, no método P-*NUT* não é necessário definir os fluidos mínimos e máximos (LE MOS, 2014), pois as relações permanecem as mesmas mesmo com a mudança das vazões mássicas ou se as correntes são trocadas (SAARI, 2010).

Caso as equações das propriedades físicas dependentes da temperatura estiverem disponíveis elas podem ser aplicadas. Raramente os dados desses parâmetros da refinaria analisada estão disponíveis devido à confidencialidade industrial, no entanto, se disponíveis, podem ser utilizadas. Durante a realização deste trabalho não foram encontrados dados desses parâmetros ou equações compatíveis com o caso estudado na literatura, por esse motivo foram consideradas constantes as propriedades dos fluidos.

O método P-*NUT* é composto pelos seguintes grupos adimensionais:  $R_c$  (razão entre as taxas das capacidades caloríficas dos fluidos), *NUT* (número de unidades de transferência de calor) e  $P$  (efetividade). Os dois primeiros grupos são descritos, respectivamente, pelas Equações (12) e (13).

$$R_c = \frac{C_{p_T} \dot{m}_T}{C_{p_S} \dot{m}_S} \quad (12)$$

$$NUT = \frac{U A}{C_{p_T} \dot{m}_T} \quad (13)$$

As variáveis das Equações (12) e (13) são o coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ) e a área de troca térmica ( $A$ ). Os parâmetros são o calor específico do fluido dos tubos ( $C_{p_T}$ ), o calor específico do fluido do casco ( $C_{p_S}$ ), a vazão mássica nos tubos ( $\dot{m}_T$ ) e a vazão mássica no casco ( $\dot{m}_S$ ).

Para o trocador de calor do tipo casco e tubo com a configuração de múltiplos

passes, a efetividade  $P$  pode ser descrita por meio das relações dos grupos adimensionais conforme Equação (14) (BERGMAN *et al.*, 2014).

$$P = 2 \left\{ 1 + R_c + (1 + R_c^2)^{0.5} \left( \frac{1 + \exp(-NUT(1 + R_c^2)^{0.5})}{1 - \exp(-NUT(1 + R_c^2)^{0.5})} \right) \right\}^{-1} \quad (14)$$

Para o cálculo do coeficiente global de transferência térmica ( $U$ ) foi utilizada a Equação (15).

$$U = \left[ \frac{1}{h_i} \left( \frac{R_o}{R_i} \right) + \frac{R_o \ln(R_o/R_i)}{2 k_w} + \frac{1}{h_s} + R_f \left( \frac{R_o}{R_i} \right) + R_f^S \right]^{-1} \quad (15)$$

Na Equação (15),  $h_i$  é o coeficiente convectivo do lado do tubo, o parâmetro  $k_w$  representa a condutividade térmica da parede dos tubos,  $h_s$  é parâmetro do coeficiente convectivo do lado do casco,  $R_f$  é a variável que representa a resistência térmica total do lado dos tubos e seu cálculo depende do modelo de envelhecimento empregado, e  $R_f^S$  é a resistência térmica da deposição do lado do casco.

A área de troca térmica é calculada pela Equação (16), onde  $N_T$  é o número de tubos,  $L$  é o comprimento dos tubos e  $R_T$  o raio do escoamento nos tubos, calculado pela Equação (17), que é a diferença entre o raio interno ( $R_i$ ) e a espessura da deposição ( $\delta_T$ ).

$$A = N_T 2\pi R_T L \quad (16)$$

$$R_T = R_i - \delta_T \quad (17)$$

Os coeficientes convectivos  $h_i$  (Equação 18) e  $h_s$  (Equação 19) foram calculados conforme Loyola-Fuentes (2019), que adaptou o método proposto por Wang *et al.* (2012). Todos os outros cálculos necessários para determinar o coeficiente convectivo do lado do casco também foram retirados do trabalho de Loyola-Fuentes *et al.* (2019).

$$h_i = k_{crude} Nu / 2 R_T \quad (18)$$

$$h_s = \frac{0.06207 F_S F_p F_L k_S (Cp_S \mu_S)^{1/3}}{D} \quad (19)$$

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (20)$$

Na Equação (18),  $k_{crude}$  é a condutividade térmica do petróleo cru e  $Nu$  o número de Nusselt, calculado pela Equação (20), que é a correlação de Dittus-Boelter. Como as propriedades físicas foram consideradas constantes, o número de Prandtl ( $Pr$ ) se torna um parâmetro e seu valor foi obtido pela expressão  $Pr = C_p T \mu_{crude} / k_{crude}$ .

A Equação (19) apresenta fatores de correção.  $F_S$  é o fator de correção para a geometria do casco,  $F_p$  é o fator para o *pitch* e  $F_L$  é o fator para os vazamentos. As propriedades do fluido que passa no casco são o calor específico  $Cp_S$ , a condutividade térmica  $k_S$  e a viscosidade dinâmica  $\mu_S$ . O cálculo do fator  $F_S$  também foi retirado do trabalho de Loyola-Fuentes *et al.* (2019).

Como descrito, a Equação (14) calcula a efetividade do trocador para uma configuração específica. A forma original para cálculo da efetividade é dada pela Equação (21), em que  $T_T^{in}$ ,  $T_T^{out}$  e  $T_S^{in}$  são as temperaturas de entrada nos tubos, temperatura de saída dos tubos e temperatura de entrada do lado do casco respectivamente

$$P = \frac{T_T^{in} - T_T^{out}}{T_T^{in} - T_S^{in}} \quad (21)$$

Isolando, na equação anterior, a temperatura de saída do lado do tubo, chega-se a:

$$T_{T,out} = T_{T,in} + P(T_{S,in} - T_{T,in}) \quad (22)$$

Do balanço de energia, em regime permanente:

$$Q = (Cp_T m_T)(T_{T,out} - T_{T,in}) = (Cp_S m_S)(T_{S,in} - T_{S,out}) \quad (23)$$

Resolvendo a Equação (23) para a temperatura de saída do lado do casco e considerando as relações  $R_c$  e a Equação (21), obtém-se:

$$T_{S,out} = T_{S,in} - PR_c(T_{S,in} - T_{T,in}) \quad (24)$$

A taxa de transferência de calor relacionada com a efetividade é dada por:

$$Q = P(Cp_T m_T)(T_{S,in} - T_{T,in}) \quad (25)$$

As Equações 26 calculam o consumo extra do forno ( $Q_f$ ), que depende da temperatura de entrada do petróleo cru no forno. Para o estudo de um trocador, foi utilizada a Equação 26.a, e a temperatura de entrada será igual a temperatura de saída do lado dos tubos ( $T_T^{out}$ ). Já para o estudo de uma rede com dois trocadores, foi utilizado a Equação 26.b, e a temperatura de entrada é a média simples das temperaturas de saída dos tubos, denominado de *CIT* (*Coil inlet temperature*), o mesmo termo empregado por Santamaria e Macchietto (2018).

$$Q_f = Cp_T m_T (COT - T_T^{out}) \quad (26.a)$$

$$Q_f = Cp_T m_T (COT - CIT) \quad (26.b)$$

Nas Equações 26, o parâmetro *COT* é a temperatura de saída do forno (*Coil outlet temperature*).

### 3.4 Modelo da deposição

O modelo mais utilizado na literatura, em aplicações para refinarias de petróleo, é o modelo de Ebert-Panchal modificado (Equação 6). Segundo os estudos de Polley *et al.* (2007), foi o modelo que melhor se ajustou aos dados da refinaria por eles estudado. Por esses motivos, foi utilizado esse modelo matemático para descrever a taxa de deposição do lado dos tubos em todos os estudos de caso. Essa equação, quando se aplica o processo de envelhecimento, descreverá a deposição da camada gel. Assim, a equação é reescrita em termos de  $R_{f,g}$  em vez de  $R_f$ :

$$\frac{dR_{f,g}}{dt} = \alpha Pr^{-0.33} Re^{-0.66} \exp\left(\frac{E_f}{RT_f}\right) - \gamma \tau_w \quad (6)$$

Os parâmetros da equação são o fator pré-exponencial de Arrhenius ( $\alpha$ ), a energia de ativação da reação de incrustação ( $E_f$ ), a constante dos gases ideais  $R$  e o parâmetro de supressão da deposição ( $\gamma$ ). Os valores desses parâmetros dependem das condições operacionais e, portanto, são diferentes para cada estudo de caso. Assim seus valores foram dispostos em cada uma das subseções dos Estudos de Caso, mais à frente nesta Dissertação.

O número de Reynolds ( $Re$ ) foi calculado pela Equação (28), onde  $D_i$  é o diâmetro interno do tubo,  $\rho_{crude}$  e  $\mu_{crude}$  são a massa específica e a viscosidade dinâmica do petróleo cru respectivamente. A velocidade do fluido dos tubos ( $v$ ) é dada pela Equação (27).

$$Re = \frac{\rho_{crude} v D_i}{\mu_{crude}} \quad (28)$$

$$v = \frac{m_T}{\rho_{crude} A_{fluxo} \left(\frac{Np_T}{N_T}\right)} \quad (27)$$

A tensão de cisalhamento ( $\tau_w$ ) é calculada pela Equação (30), em que  $f$  é o fator de fricção de White-Colebrook, descrito pela Equação (31)

$$\tau_w = f \rho_{crude} \frac{v^2}{2} \quad (30)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{\epsilon}{3,7 D_i} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}}\right) \quad (31)$$

Para resolver a Equação (31) foi utilizada a função *fsolve* do *Scilab*. O valor da

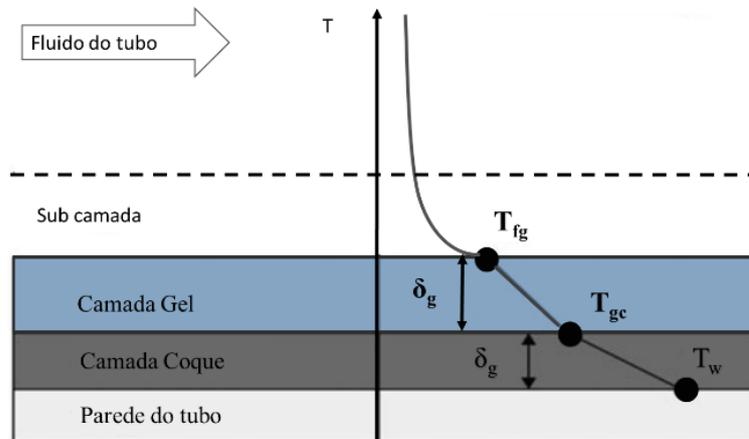
rugosidade do tubo ( $\epsilon$ ) é igual a 43  $\mu\text{m}$ , o mesmo utilizado por Ishiyama *et al.* (2010).

### 3.5 Modelo do envelhecimento

Neste trabalho, para os estudos de caso I-III, a taxa de envelhecimento escolhida foi o modelo de duas camadas com a taxa de conversão em termos do modelo cinético de primeira ordem, Equação (9), reescrita abaixo. Para o Estudo de caso IV não foi considerado o fenômeno do envelhecimento da deposição.

$$\frac{dR_{f,c}}{dt} = \frac{A_a}{\lambda_c} \exp\left(\frac{E_a}{RT_{gc}}\right) \delta_g \quad (28)$$

Nas Equações 6 e 9, a temperatura de filme ( $T_f$ ) e a temperatura interfacial gel-coque ( $T_{gc}$ ) são calculadas considerando que o fenômeno da deposição e envelhecimento ocorrem entre as interfaces fluido, depósito e parede do tubo, conforme ilustrado na Figura 9. Assim,  $T_f$  e  $T_{gc}$  foram calculadas nas suas respectivas fronteiras interfaciais. O perfil dessas temperaturas para o modelo de deposição de duas camadas está esquematizado na Figura 9.



**Figura 9.** Esquema do perfil de temperatura para o modelo de envelhecimento de duas camadas

Fonte: Adaptada de Diaby *et al.* (2016).

As Equações (32)-(34) calculam, respectivamente, a temperatura de interface fluido-deposição, a temperatura de filme e a temperatura de interface gel-coque.

$$T_{fg} = \bar{T}_T + \frac{U}{h_i} \left( \frac{R_o}{R_T} \right) (\bar{T}_S - \bar{T}_T) \quad (32)$$

$$T_f = \bar{T}_T + 0,55 (T_{fg} - \bar{T}_T) \quad (33)$$

$$T_{gc} = T_{fg} + \frac{U}{\lambda_g / R_o} \ln \left( \frac{R_i - \delta_c}{R_T} \right) (\bar{T}_S - \bar{T}_T) \quad (34)$$

O valor da condutividade térmica da camada coque ( $\lambda_c$ ) foi igual a 1 W/(m·K) e o da condutividade da camada gel ( $\lambda_g$ ) igual a 0,2 W/(m·K), valores retirados do trabalho de Ishiyama *et al.* (2010). Os parâmetros para a taxa de envelhecimento do modelo de duas camadas estão organizados na Tabela 4. Esses parâmetros foram apresentados por Santamaria e Macchietto (2018), que os ajustaram às condições operacionais.

**Tabela 4.** Valores dos parâmetros do envelhecimento no modelo de duas camadas

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
$A_a$	8,64 dia <sup>-1</sup>
$E_a$	50000 J/mol

Fonte: Santamaria e Macchietto (2018).

### 3.6 Resistência térmica total e espessuras das camadas

Para o modelo de envelhecimento de duas camadas, a resistência térmica total é dada pela Equação (35), que se baseia na aproximação da camada muito fina (*thin slab layer*). Essa aproximação considera que a razão entre a espessura da deposição ( $\delta$ ) e o diâmetro interno do tubo ( $d_i$ ) é muito pequena ( $\delta/d_i < 0,15$ ). Assim a resistência térmica é dada por  $R_f = \delta/\lambda$  (DIABY *et al.*, 2016). Considerando que cada camada possui uma resistência, a resistência térmica total ( $R_f$ ) é dada pela soma das resistências de cada camada em série:

$$R_f = R_{f,g} + R_{f,c} = \frac{\delta_g}{\lambda_g} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} \quad (35)$$

Na Equação (35), as resistências térmicas da camada gel ( $R_{f,g}$ ) e da camada coque ( $R_{f,c}$ ) são dadas em m<sup>2</sup>·K/W.

Já a espessura total da deposição é calculada pela Equação (36).

$$\delta_T = \delta_g + \delta_c \quad (36)$$

De acordo com Ishiyama *et al.* (2011), a taxa da mudança da espessura das duas camadas é dada por:

$$\frac{d\delta_c}{dt} = r_c = \lambda_c \frac{dR_{f,c}}{dt} \quad (37)$$

$$\frac{d\delta_g}{dt} = r_d - r_c = \lambda_g \frac{dR_{f,g}}{dt} - \lambda_c \frac{dR_{f,c}}{dt} \quad (38)$$

Nas Equações (37) e (38),  $r_d$  e  $r_c$  são as taxas da deposição e de conversão do gel para coque respectivamente, as quais são escritas em termos de velocidade (DIABY *et al.*, 2016).

Reescrevendo a Equação (35) em termos de taxa, a derivada da resistência térmica total será:

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{1}{\lambda_g}(r_d - r_c) + \frac{1}{\lambda_c}r_c \quad (39)$$

Apesar de Ishiyama *et al.* (2011) utilizarem a aproximação da camada muito fina, segundo os autores, quando a espessura da deposição é significativa (se  $\delta/d_i > 0,15$ ), os efeitos das curvaturas devem ser considerados. Para contornar essa simplificação, Santamaria e Macchietto (2017), propuseram o seguinte cálculo de cada espessura:

$$\delta_g = (R_i - \delta_c) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\lambda_g R_{f,g}}{R_o}\right) \right] \quad (40)$$

$$\delta_c = R_i \left[ 1 - \exp\left(\frac{R_{f,c} \lambda_c}{R_o}\right) \right] \quad (41)$$

onde  $R_o$  é o raio externo do tubo e  $R_i$  o raio interno do tubo.

Como a Equação (40) já desconsidera a espessura da camada coque, a espessura total foi calculada pela Equação (36).

Para o cálculo da resistência térmica total, a resistência da camada gel ( $R_{i,g}$ ) é dada pela Equação de Ebert-Panchal modificada (Equação 27) e da camada coque ( $R_{i,c}$ ) pela Equação (9). No entanto, a Equação (27) calcula a variação temporal da resistência térmica da deposição como um todo, sem desconsiderar a sua conversão em coque. Assim, para contabilizar somente a resistência da camada gel que ainda não se converteu em coque, a resistência térmica total é calculada pela Equação (42), onde a espessura da camada gel (Equação 40) já subtrai a espessura da camada coque.

$$R_f = \frac{1}{\lambda_g} \delta_g + \frac{1}{\lambda_c} \delta_c \quad (42)$$

Quando não se considera o processo de envelhecimento, em vez de se utilizar a Equação (41), a espessura da camada coque é nula ( $\delta_c = 0$ ) e a resistência térmica total será a resistência da camada gel (Equação de Ebert-Panchal modificada).

Nesse trabalho, a resistência térmica do lado do casco só foi considerada para os cálculos do coeficiente global de transferência térmica, não sendo incluída no cálculo da resistência total do trocador de calor.

### 3.7 Efeitos hidráulicos

O efeito da deposição no comportamento hidráulico é capturado pela queda de pressão ( $\Delta P$ ), somente do lado dos tubos, calculada pela Equação (43), retirada do trabalho de Santamaria e Macchietto (2018).

$$\Delta P = \frac{G_t^2}{2 \rho_{crude}} \left[ \frac{1,5}{Np_t} + \frac{f L}{2 R_T} + 4 \right] Np_t \quad (43)$$

onde  $G_t$  é fluxo mássico dos tubos ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ), dado pela Equação (44).

$$G_t = \frac{m_T}{\pi R_T^2} \frac{Np_T}{N_T} \quad (44)$$

### 3.8 Estudo de caso I: análise termohidráulica do impacto do envelhecimento

Nesse estudo de caso, foi utilizado o modelo de Ebert-Panchal modificado (Equação 27), para descrever a deposição e o modelo de duas camadas com o modelo cinético de primeira ordem (Equação 9) para calcular o envelhecimento da deposição.

O objetivo desse estudo foi analisar os efeitos do envelhecimento da deposição em um único trocador de calor do tipo casco e tubo. Para isso, foram simulados dois cenários:

- Cenário I: deposição sem o processo de envelhecimento, somente a formação da camada gel. Portanto, não houve formação da camada coque ( $\delta_c = 0$ ) e a resistência da camada gel (Equação 27) representa a resistência total da camada depositada.
- Cenário II: ocorrem simultaneamente o processo de deposição e do envelhecimento, assim a resistência térmica total foi calculada utilizando a Equação 42.

As propriedades físicas dos fluidos são apresentadas na Tabela 5, juntamente com outros parâmetros operacionais.

Como os parâmetros da taxa de deposição dependem das condições operacionais e propriedades dos fluidos, na Tabela 6 são apresentados os valores dos parâmetros da Equação de Ebert-Panchal modificada utilizados para este caso.

**Tabela 5.** Propriedades físicas dos fluidos e parâmetros operacionais para o estudo de caso I

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$C_{pT}$	2.846,42 J/(kg·K)	$\rho_{crude}$	621,08 kg/m <sup>3</sup>
$C_{pS}$	2.555 J/(kg·K)	$\rho_{VR}$	854 kg/m <sup>3</sup>
$m_T$	88 kg/s	$\mu_{crude}$	2,72 x 10 <sup>-3</sup> Pa·s
$m_S$	26 kg/s	$k_{crude}$	0,09 W/(m·K)
$T_T^{in}$	483,15 K	$\mu_S$	7,215 x 10 <sup>-3</sup> Pa·s
$T_S^{in}$	603,15 K	$k_S$	0,15 W/(m·K)
$COT$	640 K		

Fonte: Santamaria e Macchietto, 2019.

Foi considerado que o trocador estava limpo inicialmente, ou seja, resistência térmica inicial nula ( $R_f(t=0) = 0$ ). Para o cálculo da carga do forno ( $Q_f$ ) foi utilizada a Equação 26.a, onde a temperatura de entrada do forno é a temperatura de saída do trocador de calor ( $T_T^{out}$ ).

**Tabela 6.** Parâmetros do modelo de Ebert-Panchal modificado para os estudos de casos I, II e III

Estudos de Caso I - III	
Parâmetro	Valor
$\alpha$	142,56 K·m <sup>2</sup> /(W·dia)
$\gamma$	8,04 x 10 <sup>-8</sup> K·m <sup>4</sup> / (N·W·dia)
$E_f$	28.500 J/mol

Fonte: Santamaria e Macchietto (2018).

### 3.8.1 Algoritmo da simulação do Caso I

Com as equações anteriormente descritas, a simulação do Cenário II foi realizada durante um ano de operação (365 dias) com os seguintes passos:

- I. Inicialização. No tempo inicial,  $t_0 = 0$  e  $k=0$  ( $k$  é o contador das iterações),

o trocador de calor não possui incrustação, ou seja,  $R_{f,g} = R_{f,c} = R_f = 0$ ,  $R_f^S = 0$ ,  $\delta_g = \delta_c = \delta_T = 0$  e  $R_T = R_i$ .

- II. Cálculos das variáveis  $v$ ,  $Re$ ,  $Nu$ ,  $f$ ,  $\tau_w$ ,  $h_i$ ,  $U$ ,  $A$ ,  $NUT$ ,  $P$ ,  $T_T^{out}$ ,  $T_S^{out}$ ,  $\overline{T_T}$ ,  $\overline{T_S}$ ,  $Q$ ,  $T_{fg}$ ,  $T_f$ ,  $T_{gc}$  e  $Q_f$ .
- III. Formação de uma nova camada. Avançar uma iteração, fazendo  $k = k + 1$  e  $t_{k+1} = t_k + \Delta t$ , e faz-se o cálculo das variáveis  $R_{f,g}$ ,  $R_{f,c}$ ,  $R_f$ ,  $R_f^S$ ,  $\delta_g$ ,  $\delta_c$ ,  $\delta_T$  e  $R_T$ .
- IV. Caso o tempo seja maior do que 365 dias, finalizar. Do contrário, voltar ao passo II.

O algoritmo da simulação do Cenário I seguiu as mesmas etapas do Cenário II. Porém, foi considerado a resistência térmica da camada coque nula ( $R_{f,c}$ ) e consequentemente a espessura dessa camada ( $\delta_c$ ) também foi sempre nula. Dessa forma, a resistência da camada gel representa a resistência total e a espessura da camada gel a espessura total.

### 3.9 Estudo de caso II: aplicação do modelo para uma RTC

O modelo com envelhecimento do caso I (Cenário II), foi aplicado para uma RTC com dois trocadores, para analisar o desempenho termohidráulico da rede. As geometrias e parâmetros operacionais foram retirados do trabalho de Coletti e Macchietto (2011) e estão dispostos na Tabela 7.

**Tabela 7.** Propriedades físicas dos fluidos e parâmetros operacionais do estudo de caso II e III

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$Cp_T^*$	2.846,42 J/(kg·K)	$\rho_{crude}$	834,77 kg/m <sup>3</sup>
$Cp_S^*$	2.555 J/(kg·K)	$\rho_{VR}$	947,50 kg/m <sup>3</sup>
$m_T$	88 kg/s	$\mu_{crude}$	1,12 x 10 <sup>-2</sup> Pa·s
$m_S$	26 kg/s	$k_{crude}$	0,09 W/(m·K)
$T_T^{in}$	403,15 K	$\mu_S$	2,73 x 10 <sup>-2</sup> Pa·s
$T_S^{in}$	623,15 K	$k_S$	0,15 W/(m·K)
$COT$	640 K	*Retirado de Santamaria e Macchietto (2019).	

Fonte: Coletti e Macchietto, 2011.

Para o cálculo da carga do forno, foi utilizada a temperatura de entrada do forno (CIT) conforme Equação 26.b, que representa a média simples das temperaturas de saída de cada trocador.

### 3.9.1 Algoritmo da simulação do estudo de caso II

O algoritmo desse caso é semelhante ao caso I, mas para dois trocadores de calor em paralelo. Nos passos a seguir,  $j$  é o subscrito que representa o número do trocador de calor.

- I. Inicialização. No tempo inicial,  $t_0 = 0$  e  $k = 0$  ( $k$  é o contador das iterações),  $R_{f,j}^S = 0$ , o trocador de calor 1 não possui incrustação, ou seja,  $R_{f,g1} = R_{f,cj} = \delta_{c,j} = \delta_{g,1} = \delta_{T,1} = 0$  e  $R_{T,1} = R_i$ . O trocador 2 possui uma resistência inicial do lado dos tubos ( $R_{f,g2} = 5,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{KW}$ ).
- II. Cálculos das variáveis  $\delta_{T,2}$  e  $R_{T,2}$ .
- III. Cálculos das variáveis  $v_j$ ,  $Re_j$ ,  $NU_j$ ,  $f_j$ ,  $\tau_{wj}$ ,  $h_{i,j}$ ,  $U_j$ ,  $A_j$ ,  $NUT_j$ ,  $P_j$ ,  $T_{T,j}^{out}$ ,  $T_{S,j}^{out}$ ,  $\overline{T}_{T,j}$ ,  $\overline{T}_{S,j}$ ,  $Q_j$ ,  $T_{fg,j}$ ,  $T_{f,j}$ ,  $T_{gc,j}$  para cada um dos trocadores de calor. Cálculo do CIT e  $Q_f$ .
- IV. Formação de uma nova camada. Avança-se uma iteração, fazendo  $k = k + 1$  e  $t_{k+1} = t_k + \Delta t$ , e faz-se o cálculo das variáveis  $R_{f,cj}$ ,  $R_{f,gj}$ ,  $R_{f,j}$ ,  $R_{f,j}^S$ ,  $\delta_{c,j}$ ,  $\delta_{g,j}$ ,  $\delta_{T,j}$  e  $R_{T,j}$ .
- V. Caso o tempo seja maior do que 365 dias, finalizar. Do contrário, voltar ao passo III.

### 3.10 Estudo de caso III: comparação dos modelos de envelhecimento

Nesse estudo de caso, foi realizada a comparação dos resultados do modelo utilizado no presente trabalho para uma RTC (Estudo de caso II) com os dados da resistência térmica da refinaria ExxonMobil fornecidos por Coletti e Macchietto (2011) e com os resultados da simulação do modelo distribuído proposto por eles. A resistência térmica da refinaria foi obtida pelo procedimento tradicional comentado no Capítulo 2, ver item 2.4.

Além disso, foram avaliados os efeitos de se incluir ou não a taxa de deposição do lado do casco nos valores da resistência térmica total da deposição. Para isso,

foram simulados dois cenários: um com a deposição ocorrendo do lado do casco e o outro sem deposição do lado do casco, ou seja, a taxa de deposição igual a zero ( $R_f^S = 0$ ).

Os autores consideram que o fenômeno da deposição e de envelhecimento variam tanto na direção radial como na direção axial (comprimento dos tubos), mas não consideram a deposição ocorrendo do lado do casco. Utilizaram o modelo de Ebert-Panchal modificado e o modelo distribuído para o envelhecimento. A análise foi para uma rede com dois trocadores de calor em paralelo, a mesma do caso II, durante um ano de operação e discretizado em dias. Um dos trocadores estava inicialmente sujo e com resistência térmica inicial de  $5,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  e o outro limpo.

As propriedades físicas dos fluidos e os parâmetros operacionais para esse caso estão na Tabela 7, que foram retirados do trabalho de Coletti e Macchietto (2011). Os valores dos parâmetros das equações de envelhecimento e da deposição são os mesmos dos estudos de caso I e II, organizados na Tabela 4 e 6, respectivamente (ver itens 3.5 e 3.8).

O algoritmo da simulação do Caso III foi o mesmo apresentado para o estudo de caso II. No entanto, para o cenário que desconsidera a deposição ocorrendo do lado do casco,  $R_{f,j}^S$  é igual a zero.

### **3.11 Estudo de caso IV: análise do modelo de deposição**

Esse estudo foi realizado para comparar a metodologia aqui apresentada com uma metodologia da literatura apresentada por Assis *et al.* (2015), e verificar se o modelo pode ser aplicado para diferentes condições operacionais. Para realizar essa comparação, as mesmas simplificações de Assis *et al.* (2015) foram adotadas: somente para o lado dos tubos ocorre a deposição e sem o processo de envelhecimento. Os autores utilizaram o modelo de Ebert-Panchal modificado. O objetivo dos autores era otimizar a distribuição das vazões de uma RTC hipotética, com dois trocadores de calor do tipo casco e tubo, com configuração em paralelo.

Inicialmente um dos trocadores estava sujo, com uma resistência térmica de  $9,89 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  do lado dos tubos e o outro limpo (resistência térmica nula). Os trocadores operaram durante um ano, com o tempo discretizados em semanas.

**Tabela 8.** Parâmetros do modelo de Ebert-Panchal modificado para o caso IV

Estudo de Caso IV	
Parâmetro	Valor
$\alpha$	127,7 m <sup>2</sup> ·K /J
$\gamma$	3,44 x 10 <sup>-15</sup> K·m <sup>2</sup> /(J·Pa)
$E_f$	76.000 J/mol

Fonte: Assis *et al.* (2015).

As geometrias do trocador e outros parâmetros foram disponibilizados na Tabela 3 (ver item 3.2). Os parâmetros da equação de Ebert-Panchal modificada para as condições operacionais e fluidos utilizados pelos autores estão dispostos na Tabela 8.

### 3.11.1 Algoritmo da simulação Caso IV

O algoritmo é semelhante aos casos II e III, sem os cálculos para o envelhecimento. O subscrito  $j$  se refere ao número do trocador de calor na rede.

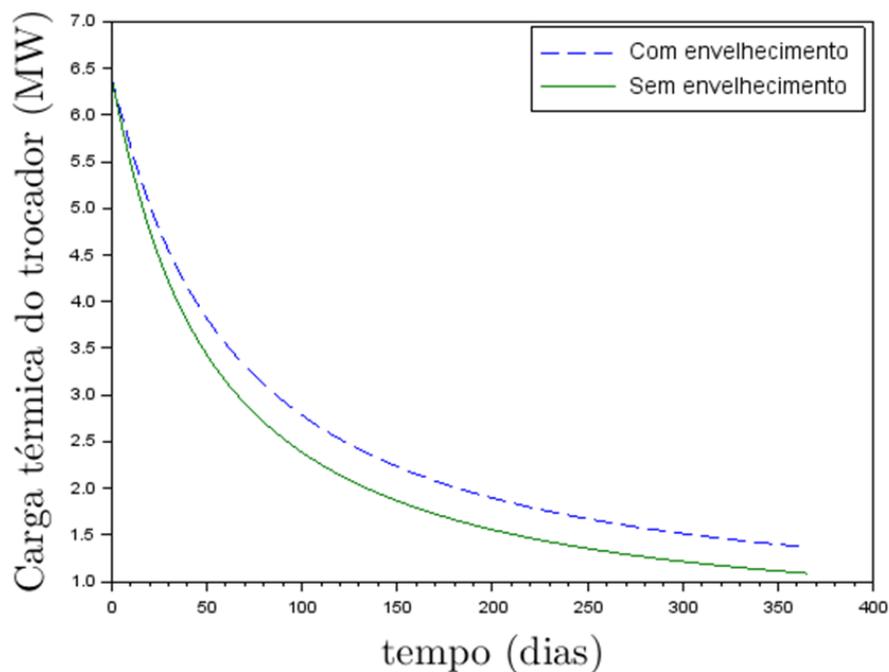
- I. Inicialização. No tempo inicial,  $t_0 = 0$  e  $k = 0$  ( $k$  é o contador das iterações),  $R_{f,j}^S = 0$ , o trocador de calor 1 não possui incrustação ( $R_{f,1} = 0$ ),  $\delta_{T,1} = 0$  e  $R_{T,1} = R_i$ . O trocador 2 possui uma resistência inicial do lado dos tubos ( $R_{f,2} = 9,89 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ).
- II. Cálculos das variáveis  $\delta_{T,2}$  e  $R_{T,2}$ .
- III. Cálculos das variáveis  $v_j$ ,  $Re_j$ ,  $Nu_j$ ,  $f_j$ ,  $\tau_{wj}$ ,  $h_{i,j}$ ,  $U_j$ ,  $A_j$ ,  $NUT_j$ ,  $P_j$ ,  $T_{T,j}^{out}$ ,  $T_{S,j}^{out}$ ,  $\overline{T}_{T,j}$ ,  $\overline{T}_{S,j}$ ,  $Q_j$ ,  $T_{fg,j}$ ,  $T_{f,j}$ ,  $T_{gc,j}$  para cada um dos trocadores de calor. Cálculo das variáveis  $CIT$  e  $Q_f$ .
- IV. Formação de uma nova camada. Avança-se uma iteração, fazendo  $k = k + 1$  e  $t_{k+1} = t_k + \Delta t$ , e faz-se o cálculo das variáveis  $R_{f,j}$ ,  $R_{f,j}^S$ ,  $\delta_{T,j}$  e  $R_{T,j}$ .
- V. Caso o tempo seja maior do que 52 semanas, finalizar. Do contrário, voltar ao passo III.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados das simulações de cada caso descrito no Capítulo 3.

### 4.1 Estudo de Caso I

Para avaliar a influência do modelo de envelhecimento selecionado, foi realizada a análise do comportamento do desempenho térmico e hidráulico do trocador de calor. O desempenho térmico foi analisado por meio da carga térmica do trocador ( $Q$ ), da carga térmica do forno ( $Q_f$ ), da temperatura de saída dos tubos ( $T_T^{out}$ ) e da resistência térmica total da deposição ( $R_f$ ). Os resultados encontrados para os dois cenários são mostrados nas Figuras 10-13.



**Figura 10.** Comparativo do comportamento dinâmico das cargas térmicas nos cenários com e sem envelhecimento da incrustação no estudo de caso I

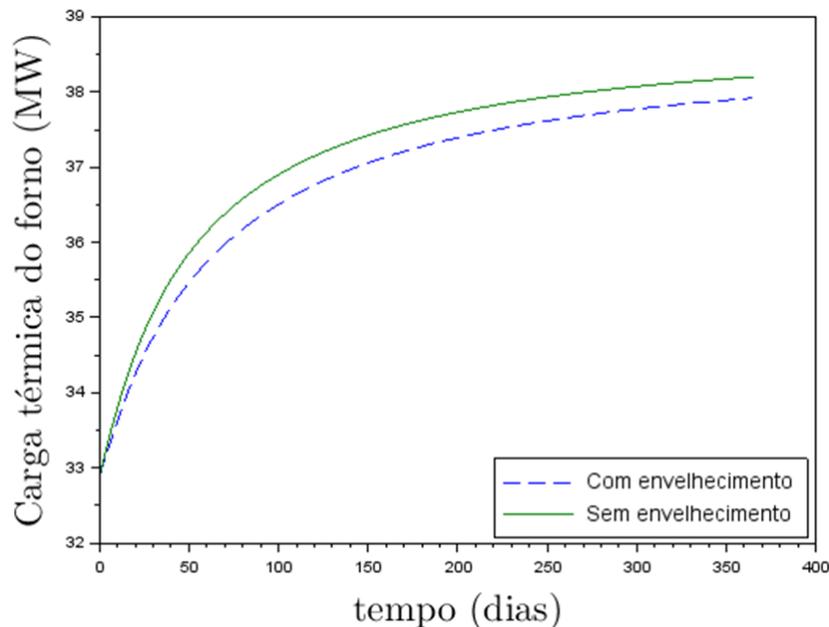
Fonte: elaborado pela autora.

Na Figura 10, foi observada a queda na carga térmica do trocador. Essa redução também foi encontrada por Silva (2015). Isso já era esperado, pois conforme a deposição ocorre, a transferência de calor é dificultada por ela. Foi observado também que a queda da carga do trocador sem os efeitos do envelhecimento é maior

do que quando se considera o envelhecimento, pois a camada gel possui uma condutividade menor do que a camada coque, diminuindo a eficiência térmica do trocador de calor.

Para compensar a queda de performance do trocador, o forno consome mais combustível para elevar a sua carga (como observado na Figura 11) e aquecer o petróleo até a temperatura requerida. Além dos custos com o combustível excedente, há uma maior emissão de CO<sub>2</sub> pela refinaria.

Houve uma elevação da carga do forno de aproximadamente 4,5 MW para o cenário com envelhecimento e de quase 5 MW para o cenário sem envelhecimento, como visto na Figura 11. Essa elevação da carga do forno também foi encontrado por Santamaria e Macchietto (2018), aproximadamente 5 MW. Apesar dos autores considerarem o processo de envelhecimento, a equação de Ebert-Panchal modificado representava, no trabalho deles, a taxa da resistência total e, por esse motivo, a elevação da carga é igual ao cenário sem o envelhecimento.



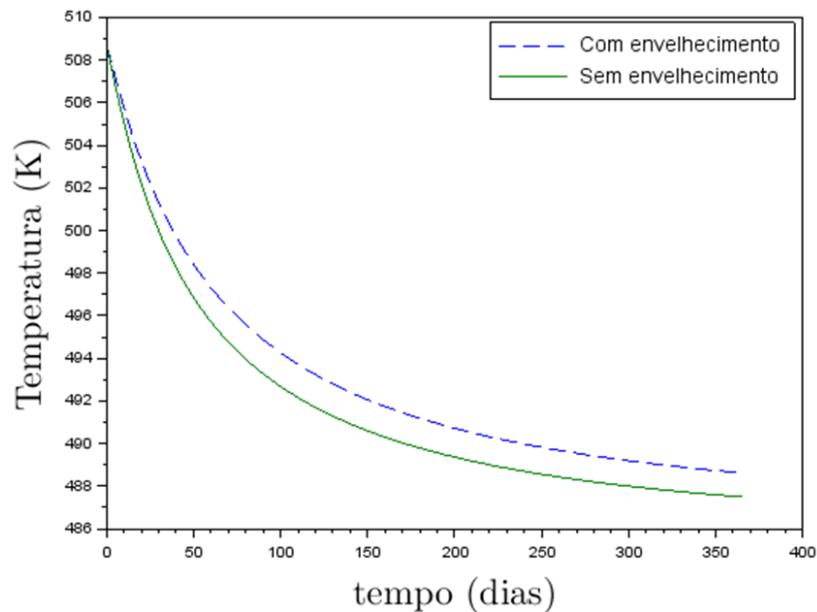
**Figura 11.** Comparação do comportamento dinâmico das cargas térmicas do forno nos cenários com e sem envelhecimento da incrustação no estudo de caso I

Fonte: elaborado pela autora.

A Figura 12 ilustra o perfil de temperatura de saída dos tubos ( $T_{T^{out}}$ ), ou seja, a temperatura de entrada do forno ( $CIT$ ). Esse perfil decrescente está de acordo com a queda da performance do trocador e o aumento da carga do forno. Mas quando se considera o processo de envelhecimento, essa queda é menor quando comparado

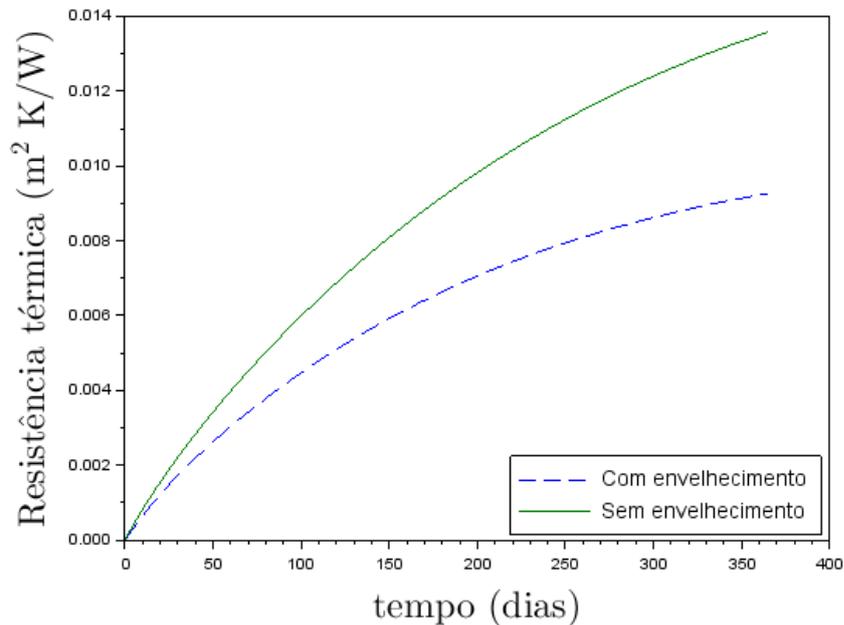
com o processo sem o envelhecimento.

Ao comparar as resistências térmicas dos dois cenários na Figura 13, é observado que a resistência do cenário sem envelhecimento apresenta uma resistência maior, pois, a camada coque possui uma condutividade maior do que a camada gel. Assim quando se considera o processo de envelhecimento a resistência será menor.



**Figura 12.** Comparação do comportamento dinâmico das temperaturas de saída dos tubos nos cenários com e sem envelhecimento da incrustação no estudo de caso I

Fonte: elaborado pela autora.

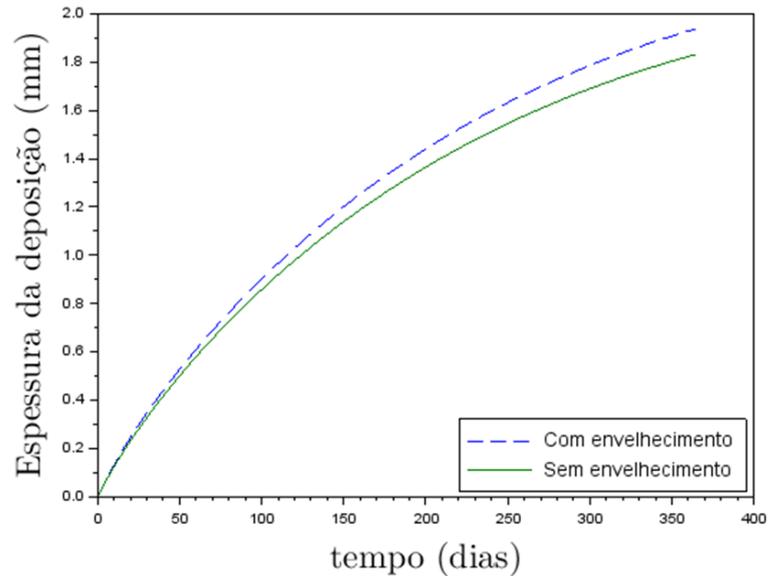


**Figura 13.** Comparação do comportamento dinâmico das resistências térmicas nos cenários com e sem envelhecimento da incrustação no estudo de caso I

Fonte: elaborado pela autora.

Também foi analisado o desempenho hidráulico do trocador, por meio do crescimento da espessura da deposição ( $\delta_T$ ) e a queda de pressão ( $\Delta P$ ), ilustrados nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

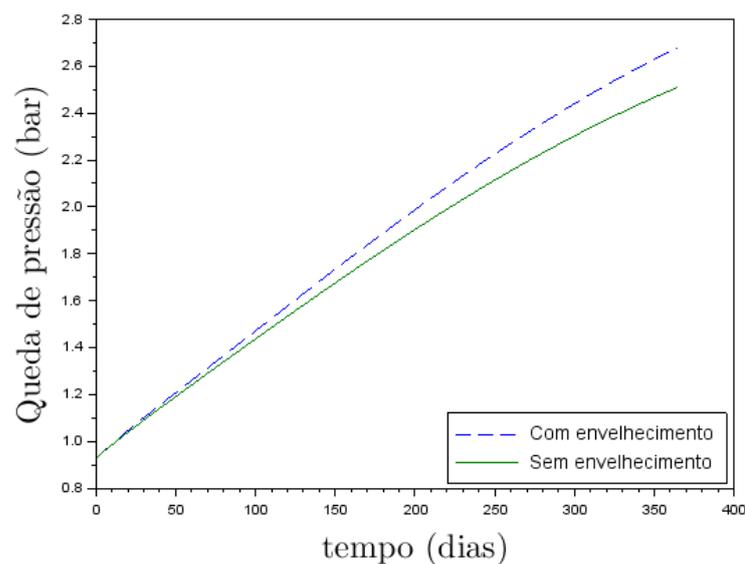
A aproximação *thin slab* ( $R_f = \delta/\lambda$ ), mostra a relação entre a resistência térmica e a espessura da deposição. Conforme a espessura da deposição aumenta (Figura 14) a resistência também aumenta (Figura 13). À medida que essa espessura aumenta, o raio do escoamento diminui, aumentando o fluxo mássico. Consequentemente a queda de pressão aumenta (Figura 15), pois essa depende do fluxo mássico, como visto na Equação 44.



**Figura 14.** Crescimento da espessura da deposição nos cenários com e sem envelhecimento da incrustação no estudo de caso I

Fonte: elaborado pela autora.

Na Figura 14, a espessura da deposição no cenário sem envelhecimento é menor devido ao fato de que a equação de Ebert-Panchal modificada possui o termo de supressão, que não existe na equação do envelhecimento. Também, como já comentado, a camada coque é mais difícil de ser removida nas limpezas, portanto, menos sensível aos efeitos fluidodinâmicos.



**Figura 15.** Variação temporal da queda de pressão para os cenários com e sem envelhecimento da incrustação no estudo de caso I

Na Figura 15, os valores da queda de pressão, em ambos os cenários, chegam a ser maiores do que 2,4 bar, o que tornaria o trocador inoperável, mostrando que a realização das limpezas nos trocadores é necessária. Nessa mesma figura, como a espessura do cenário I (Figura 14) é menor do que o cenário II, a queda de pressão sem envelhecimento também será menor.

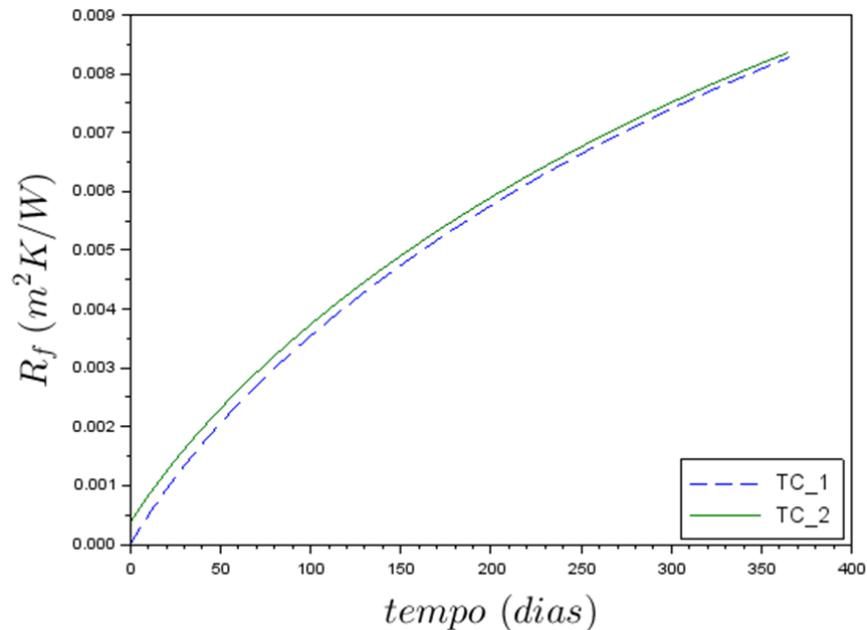
Dentro de uma rede de trocadores é esperado que o efeito do envelhecimento seja proporcional ao tamanho e à configuração da rede (se em série ou paralelo). Analisando os cenários, ao mesmo tempo que os efeitos da mudança da condutividade podem trazer um ganho na performance térmica do trocador, há uma perda de desempenho hidráulico desse equipamento, conforme a espessura da deposição aumenta. Conclui-se que ao desconsiderar o processo de envelhecimento, os indicadores de desempenho do trocador podem não condizer com o seu real estado de incrustação.

De acordo com Ishiyama *et al.* (2011), o processo de envelhecimento afeta também a temperatura de interface depósito-fluido, considerado um parâmetro chave para a taxa de deposição. Além disso, afetará nas decisões das programações das limpezas, pois a camada coque é mais difícil de ser removida, portanto saber quão envelhecida está a deposição auxilia na escolha do método de limpeza mais adequado.

## 4.2 Estudo de Caso II

Aqui são apresentados os resultados da simulação para a realização das análises termohidráulicas do modelo proposto para uma rede com dois trocadores em paralelo.

Para as análises térmicas, foram observados os comportamentos da resistência térmica total da deposição ( $R_f$ ) de cada trocador, da carga térmica dos trocadores ( $Q$ ), da carga térmica do forno ( $Q_f$ ) e do perfil de temperatura do petróleo cru na entrada do forno ( $CIT$ ).

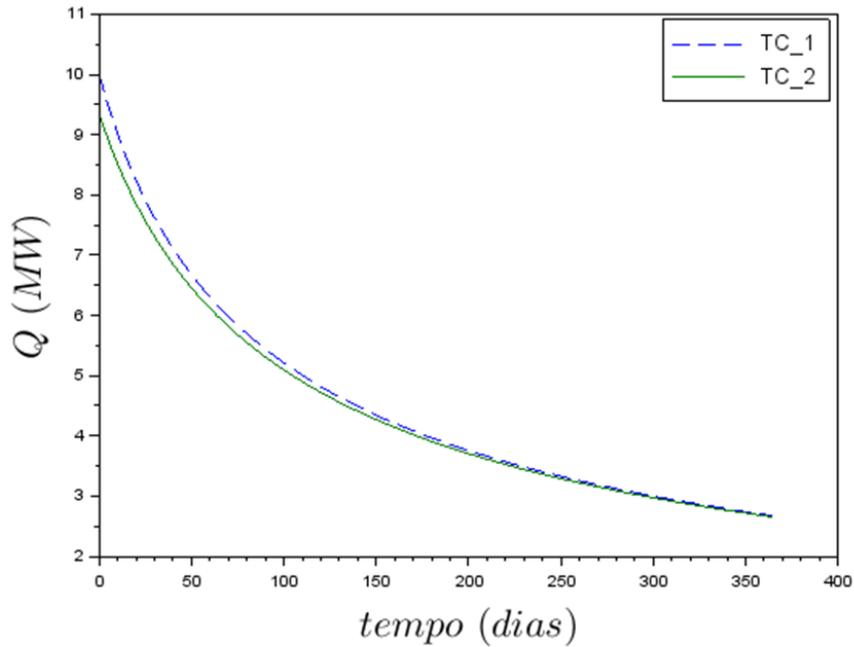


**Figura 16.** Comportamento dinâmico da resistência térmica dos trocadores de calor do estudo de caso II

Fonte: elaborado pela autora.

Na Figura 16, a resistência inicial do trocador 2 é diferente de zero, pois este se encontrava sujo inicialmente. Conseqüentemente, este trocador apresentou uma resistência maior do que a do trocador inicialmente limpo. As resistências térmicas de ambos os trocadores aumentam com o tempo, e, decorridos aproximadamente 300 dias, os trocadores começam a apresentar valores de resistência bem próximos. Isso por que a deposição interfere na taxa de transferência de calor, e, conseqüentemente, diminui a temperatura de filme, do qual a equação de Ebert-Panchal modificada depende (Equação 27).

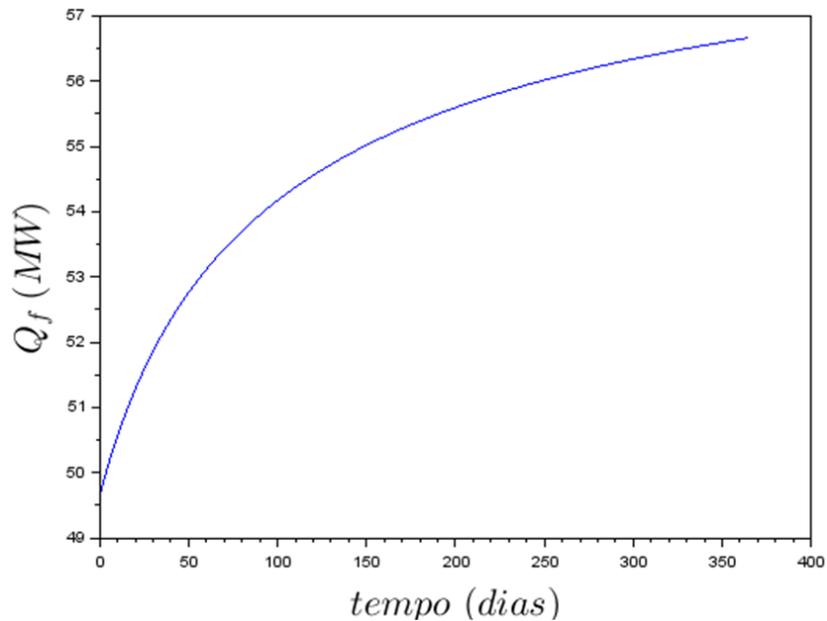
A Figura 17 ilustra o perfil da carga dos trocadores. Como esperado, a queda de desempenho do trocador inicialmente sujo (trocador 2) é maior quando comparado com o trocador 1 (trocador inicialmente limpo). Para compensar a queda de desempenho dos trocadores da rede, o forno aumenta a sua carga, como visto na Figura 18. O perfil da temperatura de entrada do forno ( $CIT$ ) é ilustrado na Figura 19. A temperatura declina conforme a resistência térmica da deposição aumenta, o que é coerente com a queda de desempenho dos trocadores da rede.



**Figura 17.** Comportamento dinâmico das cargas térmicas dos trocadores de calor do estudo de caso II

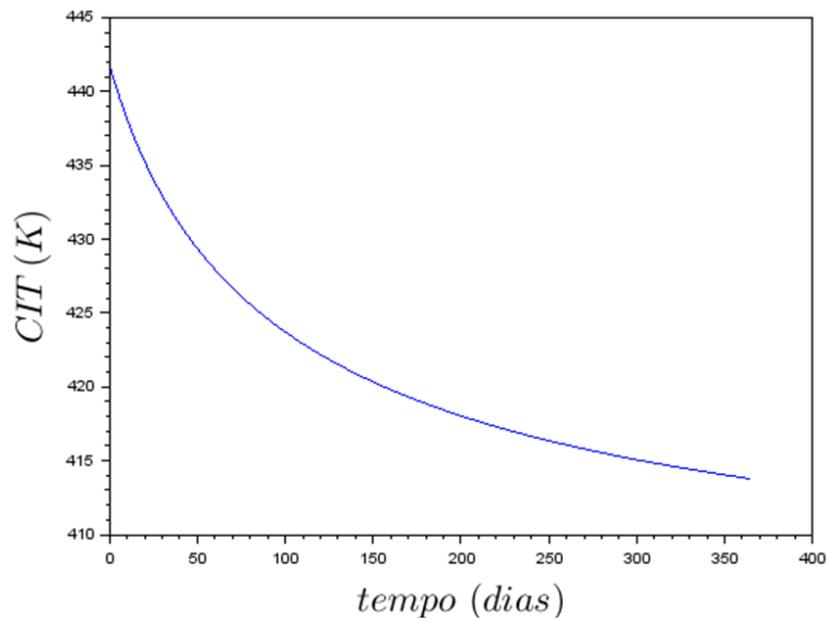
Fonte: elaborado pela autora.

Como se vê na Figura 17, após 200 dias de operação, os trocadores têm desempenho semelhante devido às deposições, que cada vez mais aumentam a suas espessuras (Figura 20), dificultando a troca térmica entre as correntes dos trocadores.



**Figura 18.** Comportamento dinâmico da carga do forno do estudo de caso II

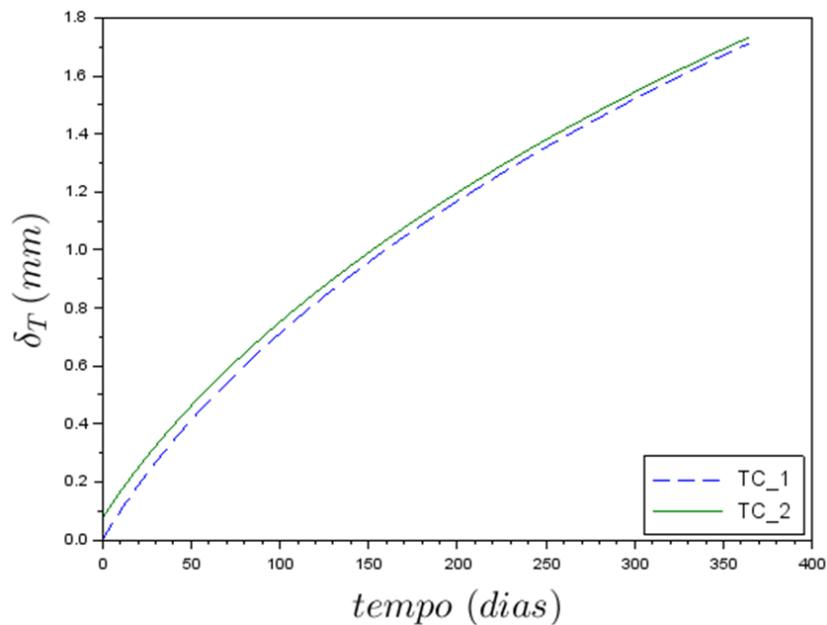
Fonte: elaborado pela autora.



**Figura 19.** Comportamento dinâmico da temperatura de entrada do forno (*CIT*) do estudo de caso II

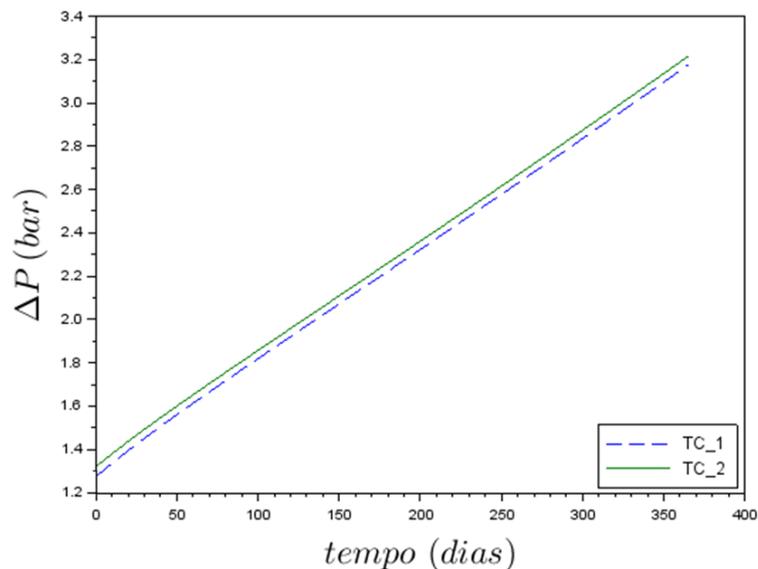
Fonte: elaborado pela autora.

Com o crescimento da espessura das deposições (Figura 20) o raio do escoamento nos tubos diminui, e, conseqüentemente houve um aumento na queda de pressão ( $\Delta P$ ), como visto na Figura 21. Da mesma forma que ocorreu no caso I, o aumento da queda da de pressão, faz com que os trocadores se tornem inoperáveis se nenhuma realização de limpeza e/ou alteração nas condições operacionais for realizada.



**Figura 20.** Comportamento dinâmico da espessura total da deposição nos trocadores do cenário II

Fonte: elaborado pela autora.



**Figura 21.** Comportamento dinâmico da queda de pressão nos trocadores do estudo de caso II

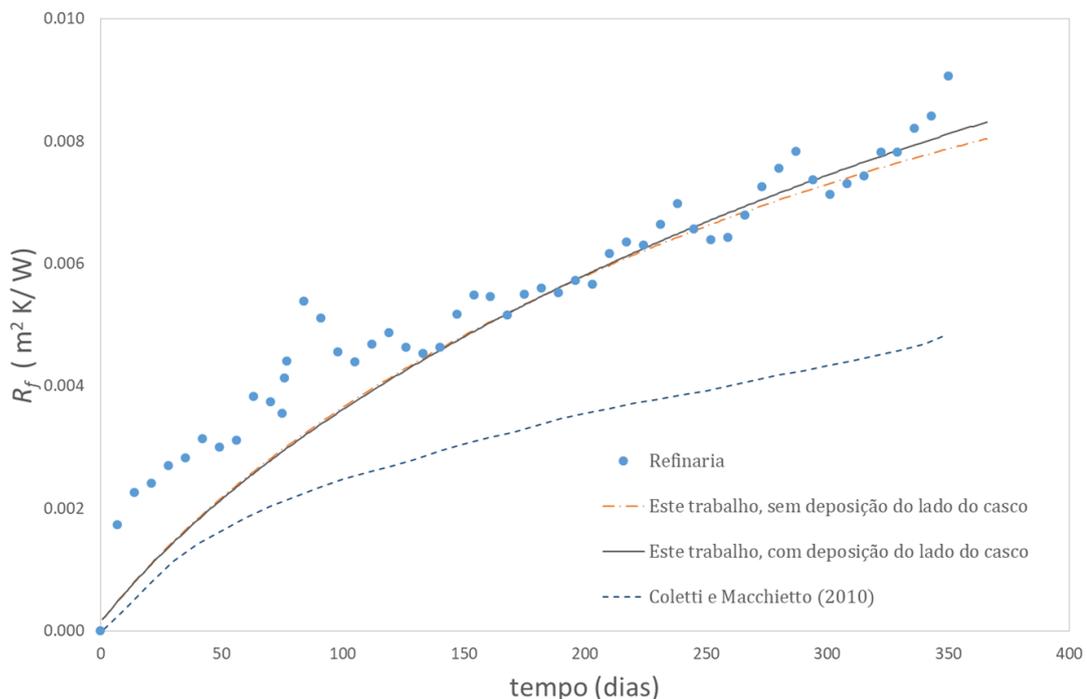
Fonte: elaborado pela autora.

Coletti e Macchietto (2011) também notaram um aumento na queda de pressão com o crescimento da espessura da deposição. Mas os valores encontrados por eles, foram próximos de 1 bar para cada trocador da rede, ao final do ano, valor menor do que o encontrado neste estudo de caso. Isso pode estar relacionado ao diferente

modo do cálculo da queda de pressão e do fator de fricção utilizado por aqueles autores e, às considerações mais rigorosas adotadas por eles, como a variação temporal das vazões dos fluidos e da variação radial e axial (ao longo dos tubos) da espessura da deposição. Aqueles autores não puderam validar os valores da queda de pressão por eles calculados com os dados da refinaria estudada, pois esses dados industriais não estavam disponíveis.

### 4.3 Estudo de Caso III

Na Figura 22, estão ilustrados os resultados do modelo do presente trabalho nos cenários em que se considera deposição do lado do casco (linha contínua) e em que não se considera deposição do lado do casco (linha traço e ponto), do modelo de Coletti e Macchietto (2011) (linha tracejada) e os dados da refinaria ExxonMobil (círculos).



**Figura 22.** Comparação da evolução dinâmica das resistências térmicas do estudo de caso III

Fonte: elaborado pela autora.

Coletti e Macchietto (2011), ao compararem os seus resultados com os dados da refinaria, concluíram que o modelo possuía uma boa previsão pois, o comportamento das curvas foi semelhante. E, de acordo com os autores, a diferença

não foi considerada grande para os especialistas das refinarias, pois os valores da resistência térmica calculados pela refinaria são aproximações e não levam em consideração os valores absolutos, somente o comportamento das curvas. Além disso, as medições de temperatura e vazão, utilizadas para os cálculos, não são precisas, como comentado por Takemoto *et al.* (1999) e apresentado no item 2.4.

Analisando os resultados da simulação do modelo aqui utilizado (modelo de duas camadas) com os dados da refinaria, nota-se que o comportamento também foi semelhante, mas com aproximações melhores do que do modelo de Coletti e Macchietto (2011). É importante destacar que o modelo desses autores considera as distribuições axial e radial, sendo, portanto, um modelo mais complexo do que o modelo aqui apresentado. Além disso, os autores não consideraram que as vazões e as propriedades dos fluidos eram fixas.

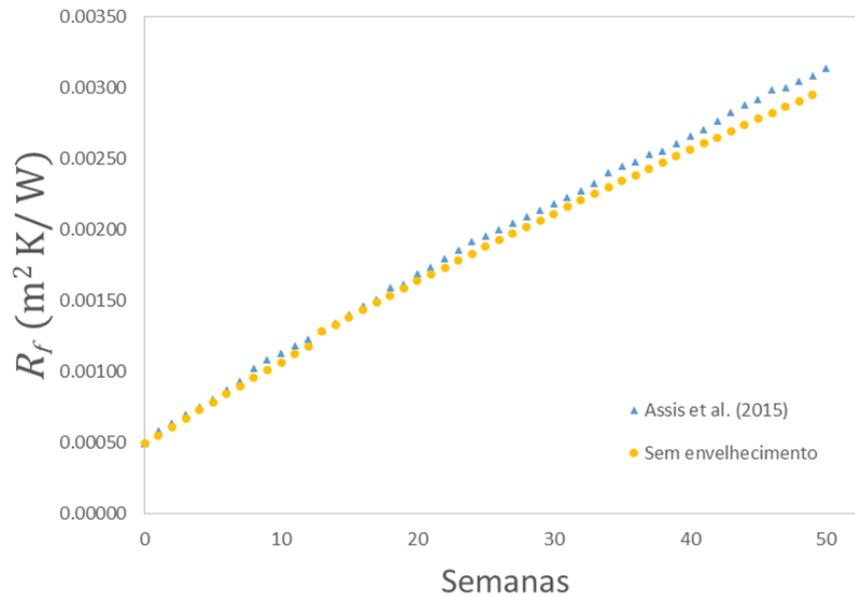
Comparando os resultados dos dois cenários do modelo aqui utilizado com os dados da refinaria, nota-se que os comportamentos de ambos os cenários também foram semelhantes aos da refinaria, mas com aproximações melhores do que do modelo de Coletti e Macchietto (2011). Quando a deposição do lado do casco é nula, a resistência é menor do que o cenário com deposição diferente de zero. Porém a diferença entre os dois cenários foi bem pequena, ocorrendo somente após 250 dias de operação, já que a taxa de deposição do lado do casco foi considerada constante e não contabilizada para a resistência térmica total do trocador. Dessa forma, para este estudo de caso, considerar ou não a deposição do lado do casco não levou a diferenças significativas, o que mostra que essa deposição pode até ser desconsiderada, como feito por Coletti e Macchietto (2011). Outras simulações dos autores foram apresentadas em forma de porcentagem de erro e outras análises não se aplicavam ao presente trabalho.

#### **4.4 Estudo de Caso IV**

A Figura 23 ilustra os resultados do estudo de caso IV, onde os círculos representam o modelo desta dissertação sem o processo de envelhecimento, e os triângulos o modelo de Assis *et al.* (2015).

Foi observado que o comportamento dinâmico previsto pelo modelo aqui proposto foi semelhante àquele reportado por Assis *et al.* (2015), se diferenciando um

pouco ao final do ano. Assim o modelo aqui apresentado pode ser empregado em diferentes condições operacionais, quando não se consideram os efeitos de envelhecimento e sem deposição do lado do casco.



**Figura 23.** Comparação da evolução dinâmica das resistências térmicas do caso IV

Fonte: elaborado pela autora.

Outras análises realizadas pelos autores foram relacionadas à otimização das distribuições das vazões, não sendo possível utilizá-las para comparações no presente trabalho.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nas refinarias de petróleo, onde o processo de transferência de calor é crucial, prever a taxa de incrustação nos trocadores de calor é essencial para manter o desempenho dos trocadores da bpa em diversas condições operacionais. Os gastos energéticos devido à incrustação são grandes e há uma preocupação ambiental devido às emissões de CO<sub>2</sub> pelas refinarias. Portanto, qualquer melhoria apresentada para a recuperação energética e meios de mitigação da incrustação é bem-vinda.

Do estudo de caso I e II, viu-se a importância da realização de limpeza nos trocadores para evitar danos aos equipamentos da refinaria. A diferença entre os cenários do caso I foi significativa e mostraram a importância do processo de envelhecimento nos indicadores de desempenho do trocador, pois sem considerar esse processo esses indicadores podem não condizer com o real estado de incrustação do equipamento.

Da comparação realizada no estudo de caso III, o modelo proposto, apesar da sua simplicidade, apresentou coerência quando a evolução dinâmica da resistência térmica por ele calculada era comparada com os dados da evolução dinâmica da resistência térmica da refinaria estudada por Coletti e Macchietto (2011). Além disso, considerar ou não a taxa de deposição do lado do casco (tomada como constante, quando considerada), não trouxe diferença significativa nos resultados das simulações do modelo desta dissertação, de modo que, para a simplificação dos cálculos, essa deposição pode até ser desconsiderada. A simplicidade do modelo deste trabalho e a configuração em paralelo da rede estudada nesse caso, facilita a sua aplicação para redes maiores e possibilita futuramente a sua aplicação em refinarias de petróleo.

O modelo utilizado nesta dissertação, quando utilizado com diferentes condições operacionais, como aquelas do trabalho de Assis *et al.* (2015), no estudo de caso IV, mostrou-se consistente. Dessa forma, o modelo pode ser empregado para diferentes condições operacionais.

Conclui-se que o modelo proposto de deposição e seu envelhecimento apresentou bons resultados. Por ser um modelo simples, que considera a deposição em ambos os lados do trocador, possibilita a sua aplicação em uma RTC maior e com outras condições operacionais. Para trabalhos futuros são sugeridas:

- Aplicação do modelo apresentado para uma rede de trocadores maior;
- Aplicação do modelo distribuído de envelhecimento e comparação com o modelo de duas camadas,
- Realização da otimização da programação das limpezas em uma RTC.

## REFERÊNCIAS

- AL ISMAILI, R. **Optimisation of heat exchanger network maintenance scheduling problems**. 2018. 205 f. Tese de Doutorado - Tese de Doutorado, Cambridge 2018. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ddu&AN=6D79F4E9B2C20316&site=ehost-live>. Acesso em: 05 out. 2021.
- ASSIS, B. C. G. de. **Aplicação de técnicas de otimização no gerenciamento da deposição em redes de trocadores de calor**. 2013. 167 f. Dissertação (Mestrado em Processos Químicos, Petróleo e Meio Ambiente) - Instituto de Química, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- ASSIS, B. C. G.; LEMOS, J. C.; LIPORACE, F. S.; OLIVEIRA, S. G.; QUEIROZ, E. M.; PESSOA, F. L. P.; COSTA, A. L. H. Dynamic Optimization of the Flow Rate Distribution in Heat Exchanger Networks for Fouling Mitigation. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 54, n. 25, p. 6497–6507, 2015.
- BARBOZA, E. G. **Avaliação de metodologias de limpeza química com proposta de projeto de manutenção dos trocadores de calor do LADEQ**. 2020. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.
- BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWIT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2014. 2014.v. 1.
- CARVALHO, C. B. de; CARVALHO, E. P.; RAVAGNANI, M. A. S. S. Dynamic Analysis of Fouling Buildup in Heat Exchangers Designed According to TEMA Standards. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 57, n. 10, p. 3753–3764, 2018.
- COLETTI, F. **Multi – scale Modelling of Refinery Pre – heat Trains Undergoing Fouling for Improved Energy Efficiency**. 2010. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Imperial College London, Londres 2010.
- COLETTI, F.; ISHIYAMA, E. M.; PATERSON, W. R.; WILSON, D. I.; MACHIETTO, S. Impact of Deposit Aging and Surface Roughness on Thermal Fouling : Distributed Model. **AIChE Journal**, [s. l.], v. 56, n. 12, p. 3257–3273, 2010.
- COLETTI, F.; MACCHIETTO, S. A dynamic, distributed model of shell-and-tube heat exchangers undergoing crude oil fouling. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 50, n. 8, p. 4515–4533, 2011.
- DIABY, A. L.; MIKLAVCIC, S. J.; BARI, S.; ADDAI-MENSAH, J. Evaluation of crude oil heat exchanger network fouling behavior under aging conditions for scheduled cleaning. **Heat Transfer Engineering**, [s. l.], v. 37, n. 15, p. 1211–1230, 2016.

DIAZ-BEJARANO, E.; COLETTI, F.; MACCHIETTO, S. Crude oil Deposition, Suppression, Removal, and Consolidation - and How to Tell the Difference. **Heat Transfer Engineering**, [s. l.], v. 38, n. 7–8, p. 681–693, 2017a.

DIAZ-BEJARANO, Emilio; COLETTI, F.; MACCHIETTO, S. Thermo-Hydraulic Analysis of Refinery Heat Exchangers Undergoing Fouling. **AIChE Journal**, [s. l.], v. 63, n. 3, p. 984–1001, 2017b.

DIAZ-BEJARANO, E.; COLETTI, F.; MACCHIETTO, S. Modeling and Prediction of Shell-Side Fouling in Shell-and-Tube Heat Exchangers. **Heat Transfer Engineering**, [s. l.], v. 40, n. 11, p. 845–861, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1446814>. Acesso em: 08 set. 2021.

EBERT, W. E PANCHAL, C. B. **Analysis of Exxon Crude-Oil-Slip stream Coking Data**. Nova York: Begell House Inc., 1995.

FAN, Z.; WATKINSON, A. P. Kinetics and structural evolution during aging of coker vapor deposits. **Heat Transfer Engineering**, Schladmingp. 237–247, 2009. Disponível em: <https://heatexchanger-fouling.com/refereed-proceedings/heat-exchanger-fouling-and-cleaning-viii-2009/>. Acesso em: 23 set. 2021.

FIORENTIN, L. D. **Estudo de modelos matemáticos para previsão da incrustação por coque em tubulações: Aplicação no distribuidor de gásóleo residual de uma torre de destilação**. 2004. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Térmica) - PPGEM, Centro Federal de Educação Tecnológica, Curitiba 2004.

GONÇALVES, C. de O. **Desenvolvimento de técnicas de otimização da programação das limpezas de redes de trocadores de calor**. 2013. 156 f. Dissertação (Mestrado em Processos Químicos, Petróleo e Meio Ambiente) - Instituto de Química, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

IBRAHIM, H. A.-H. Fouling in Heat Exchangers. In: KATSIKIS, Vasilios N. (org.). **MATLAB – A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications**. [S. l.]: InTech, 2012. v. 3, p. 57–96. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/3037>. Acesso em: 18 set. 2022.

ISHIYAMA, E. M.; COLETTI, F.; MACCHIETTO, S.; WILSON, D. I.; PATERSON, W. R. Impact of Deposit Ageing on Thermal Fouling : Lumped Parameter Model. **AIChE Journal**, [s. l.], v. 56, n. 2, p. 531–545, 2010.

ISHIYAMA, E. M.; PATERSON, W. R.; WILSON, D. I. Exploration of alternative models for the aging of fouling deposits. **AIChE Journal**, [s. l.], v. 57, n. 11, p. 3199–3209, 2011.

ISHIYAMA, E. M.; FALKEMAN, E.; IAN WILSON, D.; JOHN PUGH, S. Quantifying Implications of Deposit Aging from Crude Refinery Preheat Train Data. **Heat Transfer Engineering**, Aranjuezp. 5–13, 2017. Disponível em: <https://heatexchanger-fouling.com/refereed-proceedings/heat-exchanger-fouling-and-cleaning-xii-2017/>. Acesso em: 26 jul. 2021.

JERÓNIMO, M. A. S.; MELO, L. F.; BRAGA, A. S.; FERREIRA, P. J. B. F.; MARTINS, C. Monitoring the Thermal Efficiency of Fouled Heat Exchangers : A Simplified Method. [s. l.], v. 1777, n. 96, p. 455–463, 1997.

KAZI, S. N. Fouling and Fouling Mitigation on Heat Exchanger Surfaces. *In*: MITROVIC, Jovan (org.). **Heat Exchangers - Basics Design Applications**. Londres: Intech Open, 2016. p. 507–532.

LEMOS, J. C. **Otimização da programação das limpezas em redes de trocadores de calor utilizando técnicas de programação matemática**. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado em Processos Químicos, Petróleo e Meio Ambiente) - Instituto de Química, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

LOYOLA-FUENTES, J.; JOBSON, M.; SMITH, R. Estimation of Fouling Model Parameters for Shell Side and Tube Side of Crude Oil Heat Exchangers Using Data Reconciliation and Parameter Estimation. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 58, p. 10418–10436, 2019.

MADI, M. Otimização do período de limpeza de trocadores de calor utilizados no refino de petróleo. 2005. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Térmica) - PPGEM, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MÜLLER-STEINHAGEN, H. Heat transfer fouling: 50 years after the Kern and Seaton model. **Heat Transfer Engineering**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 1–13, 2011.

NAKAO, A. **Deposição em Trocadores de Calor - Modelos e Impactos no Projeto de Trocadores Casco e Tubo**. 2017. 207 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

OGBONNAYA, S. K.; AJAYI, O. O. Fouling phenomenon and its effect on heat exchanger: A review. **Frontiers in Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 9, n. 31, p. 1–12, 2017. Disponível em: [http://www.thermalfuidscentral.org/journals/index.php/Heat\\_Mass\\_Transfer/search/authors/view?firstName=Stephen&middleName=K.&lastName=Ogbonnaya&affiliation=Covenant University&country=NG](http://www.thermalfuidscentral.org/journals/index.php/Heat_Mass_Transfer/search/authors/view?firstName=Stephen&middleName=K.&lastName=Ogbonnaya&affiliation=Covenant%20University&country=NG). Acesso em: 17 set. 2022.

POGIATZIS, T.; ISHIYAMA, E. M.; PATERSON, W. R.; VASSILIADIS, V. S.; WILSON, D. I. Identifying optimal cleaning cycles for heat exchangers subject to fouling and ageing. **Applied Energy**, [s. l.], v. 89, p. 60–66, 2012.

POLLEY, G. T.; WILSON, D. I.; PUGH, S. J.; PETITJEAN, E. Extraction of Crude Oil Fouling Model Parameters from Plant Exchanger Monitoring Extraction of Crude Oil Fouling Model Parameters from Plant. **Heat Transfer Engineering**, [s. l.], v. 28, n. 3, p. 185–192, 2007.

SAARI, J. Heat exchanger Dimensioning. *In*: HEAT EXCHANGER THERMAL DESIGN GUIDE. [S. l.]: Lappeenranta University of Technology, 2010. p. 1–101.

SANTAMARIA, F. L.; MACCHIETTO, S. Integration of Optimal Cleaning Scheduling and Control of Heat Exchanger Networks Undergoing Fouling: Model and

Formulation. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 57, n. 38, p. 12842–12860, 2018.

SANTAMARIA, F. L.; MACCHIETTO, S. Integration of optimal cleaning scheduling and control of heat exchanger networks under fouling: MPC solution. **Computers and Chemical Engineering**, [s. l.], v. 126, p. 128–146, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.04.012>.

SILVA, R. L. da. **Otimização termohidráulica da operação de redes de trocadores de calor**. 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado em Processos Químicos, Petróleo e Meio Ambiente) - Instituto de Química, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SMAÏLI, F.; VASSILIADIS, V. S.; WILSON, D. I. Mitigation of fouling in refinery heat exchanger networks by optimal management of cleaning. **Energy and Fuels**, [s. l.], v. 15, n. 5, p. 1038–1056, 2001.

TAKEMOTO, T.; CRITTENDEN, B. D.; KOLACZKOWSKI, S. T. Interpretation of fouling data in industrial shell and tube heat exchangers. **Chemical Engineering Research and Design**, [s. l.], v. 77, n. 8, p. 769–778, 1999.

TEMA. **Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association Ninth**. 9. ed. Nova York: [s. n.], 2007. 2007.

TONIN, P. C. **Metodologia para Monitoramento do Desempenho Térmico de Redes de Trocadores de Calor**. 2003. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - PPGEM, Centro Federal de Educação Tecnológica, Curitiba, 2003.

VALLE, R. O. do. **DETERMINAÇÃO DA TAXA DE INCRUSTAÇÃO EM TROCADORES DE CALOR COM O AUXÍLIO DE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO**. 2012. 116 f. Dissertação de Mestrado - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro 2012.

WILSON, D. I.; POLLEY, G. T.; PUGH, S. J. Ten Years of Ebert, Panchal and the “Threshold Fouling” Concept. 6th International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning - Challenges and Opportunities, [s. l.], n. July 2016, p. 25–36, 2005.

WILSON, D.; ISHIYAMA, E.; PATERSON, W.; WATKINSON, A. Ageing: Looking back and looking forward: H. Müller-Steinhagen, M.R. Malayeri and A.P. Watkinson (Eds). **Heat Exchanger Fouling and Cleaning VIII**, Schladingp. 221–230, 2009. Disponível em: <https://heatexchanger-fouling.com/refereed-proceedings/heat-exchanger-fouling-and-cleaning-viii-2009/>. Acesso em: 10 jul. 2021.

YOUNG, A.; VENDITTI, S.; BERRUECO, C.; YANG, M.; WATERS, A.; DAVIES, H.; HILL, S.; MILLAN, M.; CRITTENDEN, B. Characterization of crude oils and their fouling deposits using a batch stirred cell system. **Heat Transfer Engineering**, [s. l.], v. 32, n. 3–4, p. 216–227, 2011.