



Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

DETERMINAÇÃO DA INCRUSTAÇÃO NUM DISTRIBUIDOR DE GASÓLEO DE RECICLO DE UMA TORRE DE DESTILAÇÃO A VÁCUO

Aplicação Teórica de Um Modelo Específico Proposto para o Processo da Destilação

Clovis Bombardelli¹, Admilson Teixeira Franco¹, Almabrouk Mansour Abogderah²

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET-PR
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM
Av. Sete de Setembro, 3165 – CEP 80230-901 – Curitiba / Pr
admilson@cefetpr.br

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE – Campus de Toledo / Pr
Rua da Faculdade, 2550 – CEP 85903-000 – Toledo / Pr
mabruk@unioeste.br

Resumo – Um dos maiores problemas enfrentados na indústria petrolífera é o processo de incrustação que ocorre em vários equipamentos de troca térmica, intensificado pela necessidade de se processar petróleos brutos cada vez mais pesados. A incrustação representa prejuízos pela queda de produtividade e o tempo despendido em operações de limpeza do equipamento. Um local crítico é ocorre na destilação a vácuo, principalmente a região do gasóleo residual (GOR), que possui elevada temperatura e compostos de alto peso molecular. Um modelo matemático específico para a previsão de incrustação na destilação é proposto e aplicado ao distribuidor do gasóleo residual com o objetivo de estimar o grau de incrustação e os pontos mais susceptíveis de serem afetados durante um período de uma campanha. Os resultados indicam que o distribuidor deveria ter diâmetros escalonados para permitir velocidades que levem a uma taxa de incrustação mínima ou aceitável.

Palavras-Chave: Modelagem matemática; Incrustação; Destilação, Coque

Abstract – One of major problem found in oil industry is the fouling in the heat exchanger equipment, intensified by heavier oil tendency. Fouling signifies lack of productivity and spending time in maintenance. One critical place is in distillation units, especially in residual gasoil (GOR) region, where oil has high temperatures and heavier molecular mass substances. One mathematical model, specific for fouling prediction in distillation process is suggest and applied to gasoil distributor for preview the fouling rate and the more affected places in the distributor after a campaign period. The application results point out that gasoil distributor would have a scalar pipe diameter to getting velocities that lead a minimal or accepted fouling rate.

Keywords: Mathematical modeling, Fouling, Distillation, Coque

1. Introdução

Um dos maiores problemas enfrentados na indústria petrolífera é o processo de incrustação que ocorre nos vários equipamentos de troca térmica, intensificado pela necessidade de processar petróleos brutos cada vez mais pesados. A incrustação representa um problema muito sério para a indústria porque causa prejuízos com a queda de produtividade e o tempo despendido em operações de limpeza do equipamento (Andersen e Speight, 1999).

Um local crítico susceptível de forte incrustação no processo do petróleo é a destilação a vácuo produzida pela carbonização dos subprodutos da decomposição térmica. Mesmo com a adoção de forte vácuo, observam-se problemas de entupimento e formação de caminhos preferenciais nos elementos de recheio destas unidades, principalmente na região de reciclo do gasóleo residual (GOR) incluído o circuito do distribuidor.

Um modelo matemático específico para a previsão de incrustação na destilação é proposto e aplicado ao distribuidor do gasóleo de reciclo com o objetivo de estimar o grau de incrustação e determinar os pontos que são mais afetados durante o período de uma campanha.

2. Particularidades do Processo e do Equipamento

A Figura 1 ilustra esquematicamente as instalações de destilação de uma típica refinaria de petróleo. A torre de destilação a vácuo (TDV) tem a finalidade de separar do resíduo da destilação atmosférica (RAT), as frações de gasóleos leves (GOL) e pesados (GOP), os quais constituem a carga para a unidade de craqueamento catalítico (FCC).

A TDV é segmentada em cinco regiões coletoras de produtos, a saber, de cima para baixo: o topo, a bandeja coletora de gasóleo leve, a bandeja coletora de gasóleo pesado, a bandeja coletora de gasóleo residual e o fundo. Quanto maior for a temperatura do RAT, e menor for a pressão na TDV, maior será a quantidade de GOL e GOP obtidos, decorrente de uma maior vaporização do RAT em seu interior.

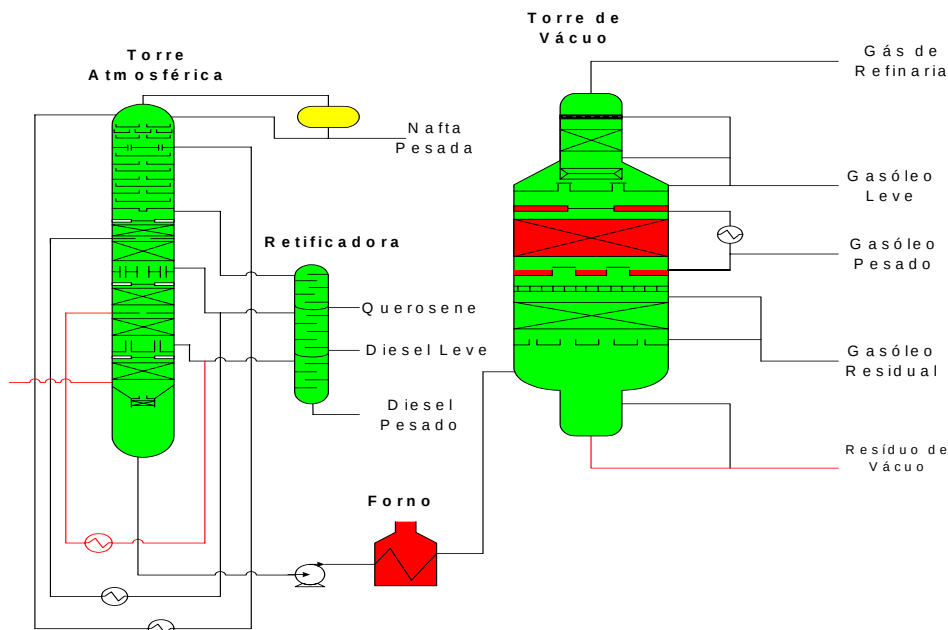


Figura 1 – Esquema da unidade de destilação atmosférica e a vácuo

A alimentação da TDV é realizada um pouco abaixo da bandeja de gasóleo residual, onde o óleo alimentado é admitido com uma temperatura da ordem de 395°C. Neste ponto, a alimentação sofre uma vaporização por *flash*. Os gases formados ascendem a TDV, e a fração líquida vai para o fundo, compondo o resíduo de vácuo, RV. Os gases são coletados por condensação seletiva em uma das três bandejas existentes, sendo que os mais leves irão para a panela mais elevada enquanto os mais pesados irão constituir o gasóleo residual, GOR. Os gases não condensáveis são retirados pelo topo e agregados ao condensado dos ejetores responsáveis pela formação do vácuo.

Numa coluna de destilação os componentes mais voláteis (substâncias mais leves), de baixo ponto de ebulição, ascendem continuamente pela coluna de fracionamento em direção ao topo, que é a parte mais fria. Os componentes condensam-se em diferentes alturas da coluna, nas superfícies dos elementos de recheio e escorrem para baixo, entrando em contato com os gases ascendentes, estabelecendo-se um equilíbrio termodinâmico entre evaporação e condensação. Os componentes condensados são interrompidos na descida e coletados pela bandeja, e, através de um controle de nível, são retirados de maneira a manter constante o nível de óleo na bandeja.

Devido às altas temperaturas, este processo é passível de incrustação por coque formado devido às reações de decomposição térmica, mesmo com o emprego de pressões reduzidas. Parte do coque formado permanece nas paredes do equipamento (interior da TDV e tubulações) provocando problemas de entupimentos, elevação da pressão nas descargas das bombas e formação de caminhos preferenciais nos elementos de recheio devido ao acúmulo de coque nas partes mais quentes. O ponto mais susceptível de incrustação neste tipo de equipamento é a região conhecida como bandeja de gasóleo de reciclo (GOR), por ser a região de maior temperatura interna de todo o equipamento e a de maior tempo de permanência do óleo nas temperaturas altas do processo. Esta região fica logo acima dos bocais de alimentação da carga na TDV, e é onde irá condensar as frações mais pesadas originadas pelo *flash* da alimentação, podendo inclusive receber partículas líquidas (aerossóis) arrastadas pela turbulência do *flash*.

O reciclo de GOR é feito através da retirada de líquido da bandeja, por bomba, passando por um conjunto de filtros e retornando ao sistema de distribuição, onde é aspergido sobre o leito de recheio com o objetivo de molhá-lo de maneira uniforme. A função do reciclo é manter o leito completamente molhado para se ter melhor eficiência no contato líquido-vapor e evitar a formação de pontos ou locais mais quentes que poderiam originar coque com maior intensidade.

A Figura 2 mostra um esquema da região problemática no processo, a qual é todo o interior da bandeja de GOR. Neste setor estão presentes:

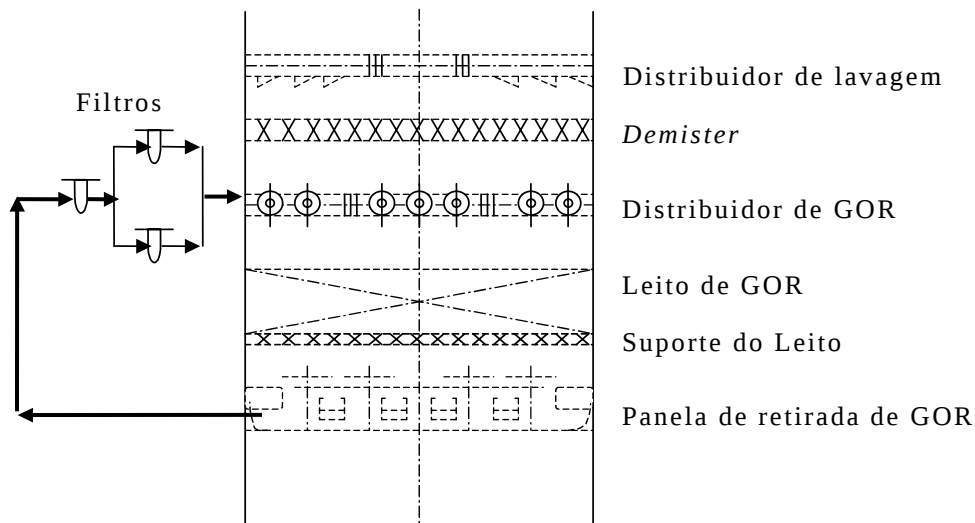


Figura 2 - Esquema da região em estudo na torre de destilação a vácuo (TDV)

- *Demister*. Tem a finalidade de reter resíduos sólidos que podem ser arrastados pelos vapores de hidrocarbonetos ascendentes. O *demister* é continuamente lavado com gasóleo pesado (GOP);
- *Distribuidor de GOR*. Tem por finalidade quebrar a fração líquida do gasóleo residual em gotículas tão pequenas quanto possível para facilitar a saída de bolhas de substâncias voláteis imersas neste gasóleo. Tem função também de molhar continuamente os elementos de recheio para aumentar a eficiência do contato líquido / vapor entre a fração líquida do gasóleo e os gases ascendentes;
- *Elementos de recheio randômico*, do tipo IMTP#50, AISI 316, com finalidade de promover a área de contato entre os gases ascendentes e a fração líquida de hidrocarbonetos condensados e os provenientes da recirculação de GOR;
- *A bandeja de coleta*. Destina-se ao recebimento e retirada do GOR da TDV;
- *Filtros*. Possuem a finalidade de reter e retirar da corrente as partículas sólidas que possam existir no GOR e que possam provocar entupimentos nos bicos aspersores do distribuidor.

O caso estudado tem a região de GOR uma área transversal de 95 m^2 e uma vazão mássica de alimentação de aproximadamente $600 \text{ m}^3/\text{h}$, dos quais $230 \text{ m}^3/\text{h}$ são retirados na forma de GOP, $54 \text{ m}^3/\text{h}$ na forma de GOL e $316 \text{ m}^3/\text{h}$ saem na forma de RV. A retirada de GOR é da ordem de $20 \text{ m}^3/\text{h}$ que, por falta de uma aplicação específica, é adicionada ao RV. A taxa de reciclo de GOR através do distribuidor é da ordem de $185 \text{ m}^3/\text{h}$. A Figura 3 mostra um esquema do distribuidor. O distribuidor de GOR contém 52 aspersores, sendo que quatro deles estão dispostos no ramal principal e os demais, nos ramais secundários. O diâmetro do ramal principal é $0,254 \text{ m}$ e os diâmetros dos ramais secundários dos extremos do ramal principal são de $0,0508 \text{ m}$ e nos ramais secundários centrais são de $0,0635 \text{ m}$. A vazão de fluido no distribuidor é alimentada em uma das extremidades do ramal principal.

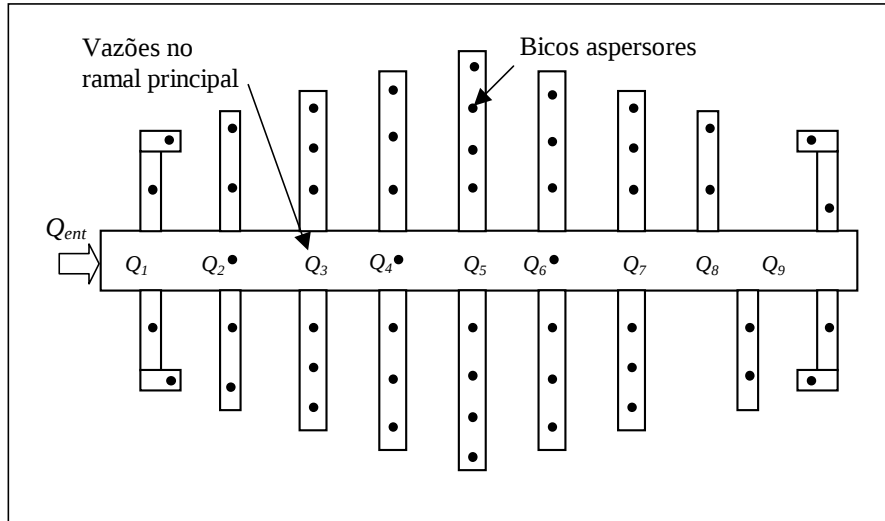


Figura 3 – Diagrama esquemático do ramal distribuidor

3. O Modelo Matemático para Previsão da Incrustação

O modelo é proposto com base na hipótese de que apenas uma fina película junto à superfície permanece o tempo suficiente para reagir completamente, resultando no final apenas coque e produtos voláteis, que deve à existência de velocidades de escoamento muito baixas próximo às paredes das superfícies internas de um escoamento e que permitem ao fluido o tempo de permanência necessário. Os produtos voláteis formados pelas reações envolvidas são removidos e absorvidos pelo fluido e o coque resultante pode ficar aderido ou não, dependendo das condições dinâmicas do fluido.

O modelo, apresentado pela Equação 1, emprega resultados de cinética química da conversão do gasóleo em coque determinados em laboratório, e que ao mesmo tempo, determinam o ponto em que o gasóleo se transforma totalmente em coque e produtos voláteis. A quantidade de coque assim obtida define a constante α relativa ao volume do reator, que indica a quantidade máxima de material que poderia permanecer aderida nas superfícies de um reator infinitesimal existentes nas superfícies dos elementos de recheio e do interior das tubulações internas ao equipamento de destilação. A razão entre as massas específicas corrige a relação entre massa e volume entre o reagente (fluido) e o produto sólido obtido (coque) (Bombardelli et al., 2005a,b). A influência do escoamento é ditado pelo termo $(1-\beta)^{t^*(u_f, T)}$, que representa estatisticamente a probabilidade de adesão das partículas de material incrustante produzidas, e que depende das condições do escoamento, que por sua vez depende da camada incrustada.

$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha \cdot (1-\beta)^{t^*(u_f, T)} \cdot e(u_f, T) \cdot \frac{\rho_f}{\rho_i} \cdot K \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T_{op}}\right) \quad (1)$$

onde $e(u_f, T)$ é a espessura da subcamada laminar [m] e K é a constante de tempo de reação [s^{-1}], definida pela Equação 2. ρ_f e ρ_i são respectivamente as massas específicas para o fluido (GOR) e para a incrustação (coque) [kg/m^3]. E é a energia de ativação [kJ/mol], R é a constante universal dos gases perfeitos [$kJ/(mol \cdot K)$] e T_{op} é a temperatura existente na bandeja do gasóleo [K], assumida como sendo a temperatura de operação e considerada constante em todo o setor. Todos os demais termos são adimensionais. α é a quantidade de coque, em termos percentuais, obtida na conversão integral, obtida experimentalmente em laboratório, β é um valor relacionado à eficiência de limpeza do efeito *bursting*, e $t^*(u_f, T)$ é o tempo adimensional, sendo equivalente à quantidade de eventos *bursting* que ocorrem durante o período necessário à reação de formação do coque. A influência do escoamento é explicitada pela espessura da película e pela teoria de adesão de Vatistas (1989), representada pelo termo $(1-\beta)^{t^*}$.

$$K = \frac{k_{op}}{k_{lim} \cdot t_{lim}} = \frac{1}{t_{lim}} \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T_{lim}}\right) \quad (2)$$

onde k_{op} é a constante de cinética pertinente às condições operacionais [s^{-1}], k_{lim} é a constante de cinética para a condição limite, situação essa em que o gásóleo se converte totalmente em coque e produtos voláteis, e t_{lim} é o tempo necessário para que a conversão em coque e produtos voláteis se complete. α , k_{op} , k_{lim} e t_{lim} são determinados através de métodos químico analíticos laboratoriais.

Assumindo a hipótese de que o tempo necessário à completa adesão corresponde ao tempo de completa conversão química, o valor t^* é calculado pela Equação 3, onde $\mathcal{G}$ é a velocidade de atrito pertinente às condições do escoamento e ν é a viscosidade cinemática relativa ao fluido.

$$t^* = \frac{1}{K} \cdot \frac{\mathcal{G}^2}{100 \cdot \nu} \exp\left(\frac{E}{R.T}\right) = \frac{\tau_w}{100 \cdot K \cdot \mu} \exp\left(\frac{E}{R.T}\right) \quad (3)$$

Assumindo também a hipótese de que não existe influência do escoamento na remoção dos sólidos formados quando o fluido encontrar-se em repouso, a constante β recebe um valor que produza na expressão $(1 - \beta)^{t^*}$ um resultado tendendo a 1 quando a velocidade do fluido tender para zero. A espessura e deve ser calculada considerando o ponto do perfil de velocidades que permita um tempo de residência maior que o período necessário ao término das reações de formação de coque. Para simplificar, assume-se e como sendo igual à espessura da subcamada viscosa que existe nos escoamentos turbulentos.

A metodologia de solução envolve, a partir de uma velocidade média de escoamento, determinar-se a tensão de cisalhamento e com ela, a velocidade de atrito. Para uma determinada temperatura de operação, o termo $1/K$ permanece constante, pois depende unicamente da temperatura e representa o tempo de completa reação. A viscosidade também é dependente da temperatura. Com o tempo de reação e o tempo de um evento *bursting* se determina a variável t^* que representa fisicamente a quantidade de eventos *bursting* que ocorrem numa área unitária durante o tempo de reação. O cálculo de e também envolve a tensão de cisalhamento, portanto, também depende das condições do escoamento. Após um passo de integração, o valor da camada incrustada é atualizado pelo incremento obtido, recalculando-se novamente os valores para a tensão de cisalhamento e para a espessura e . (Bombardelli et al., 2005).

4. Resultados

A solução do modelo acima exige uma integração facilmente obtida por meios numéricos. Realizou-se a integração com o uso de uma planilha de cálculo, adotando-se como Δt padrão, o período de um dia e considerou-se uma campanha de 6 anos.

Um estudo realizado por Fiorentin et al. (2004) no distribuidor de GOR, mostrou que a vazão em todos os aspersores é praticamente uniforme, de forma que a vazão adotada para o cálculo será a vazão média. Aplicando as condições de escoamento encontradas no ramal central do distribuidor ao modelo matemático proposto, assumindo uma vazão de entrada de $0,0754 \text{ m}^3/\text{s}$, e a cada trecho sendo reduzida pela vazão derivada aos ramais secundários na razão de $0,00145 \text{ m}^3/\text{s}$ para cada aspersor existente ao longo de cada um dos ramais secundários, chega-se ao gráfico mostrado na Figura 3. O trecho 0 corresponde à entrada do fluido no distribuidor e o trecho 9 é o extremo oposto, ou o final, de onde flui apenas a vazão relativa aos 4 últimos aspersores. A incrustação da ordem de 4 cm , obtida no trecho 9 está bastante próximo das espessuras de incrustação observadas durante a parada de manutenção, tanto na dimensão como na posição, pois observou-se partes bloqueadas pelo coque apenas nos últimos ramais secundários do distribuidor, num total de 7 pontos de aspersores totalmente fechados.

Tabela 1 – Dados de entrada para as simulações numéricas

Variável	Valor	Unidade
Energia de ativação, E	137	kJ/mol
Diâmetro da tubulação, D	0,254	m
Rugosidade da parede, σ	1×10^{-4}	m
Viscosidade dinâmica, μ	$1,14 \times 10^{-3}$	Pa.s
Massa específica do óleo, ρ_f	790	kg/m^3
Constante α	0,25	-
Constante β	$1,5 \times 10^{-7}$	-
t_{lim}	2	horas
k_{lim}	0,9836	h^{-1}
Constante universal dos gases, R	$8,314 \times 10^{-3}$	kJ/mol

Os valores empregados na aplicação estão mostrados na Tabela 1. Os valores para a energia de ativação, E , e para as constantes α , k_{lim} e t_{lim} foram obtidos de alguns experimentos feitos em laboratório com uma amostra de gasóleo residual, pela determinação das curvas de cinética, e são aqui considerados apenas como valores demonstrativos. Após algumas simulações com velocidades decrescentes, determinou-se o valor mais adequado para a constante β .

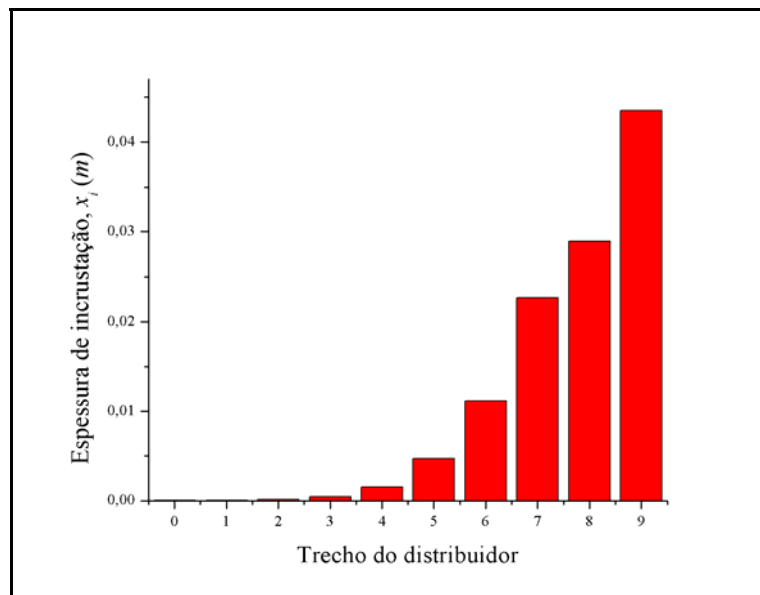


Figura 3 – Incrustação no ramal principal do distribuidor após uma campanha de 6 anos

5. Conclusões

Os resultados do modelo proposto mostram-se coerentes com a incrustação observada em equipamentos por ocasião de uma parada de manutenção e indica que o distribuidor deveria ser projetado de forma a manter uma velocidade média acima de $1,0 \text{ m/s}$ além de manter uma distribuição uniforme em todos os seus aspersores. A incrustação é mais acentuada no final porque de forma simplificada o distribuidor foi construído tendo um diâmetro único em todo o percurso, quando deveria ser escalonado para manter uma velocidade média da ordem de pelo menos $1,0 \text{ m/s}$. Da mesma forma como foi aplicado ao ramal principal, o modelo poderia ser aplicado aos ramais secundários.

6. Agradecimentos

Apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo - ANP - e da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP - por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás - PRH-ANP/MCT (PRH10-CEFET-PR).

7. Referências

- ANDERSEN, S.I., SPEIGHT, J.G., *Thermodynamic models for asphaltene solubility and precipitation*, Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 22, p. 53-66, 1999;
- BOMBARDELLI, C., FIORENTIN, L.D., NEGRÃO, C.O.R., ALMABROUK, M.A., FRANCO, A.T., *Processo de incrustação por coque na indústria de petróleo: uma revisão*, Paper CIT04-0557, São Paulo, 2004;
- BOMBARDELLI, C., FRANCO, A.T., ABOGDERAH, A.M., *Desenvolvimento de um modelo matemático para a incrustação nos processos de destilação*, 3º Congresso Brasileiro em P&D em Petróleo e Gás, 2005;
- FIORENTIN, L.D., *Estudo de modelos matemáticos para previsão da incrustação por coque em tubulações: aplicação no distribuidor de gasóleo residual de uma torre de destilação a vácuo*, Dissertação (Mestrado), CEFET-PR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2004b;
- VATISTAS, N., *The effect of adhesion time on particle deposition*, Chemical Engineering Science, v. 44, p. 1603-1608, 1989;