

1º Seminário da Rede Gás & Energia

21 e 22 de novembro de 2006 - EDISE - Rio de Janeiro.

Coordenação: RH/Universidade Petrobras

AQUECIMENTO DE TANQUES DE CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO ATRAVÉS DA TECNOLOGIA DE TERMOSSIFÕES BIFÁSICOS

Mantelli, M.B.H.¹, Milanez, F. H.², Costa, C.³

Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Mecânica - LABTUCAL

Campus Universitário - Trindade - Florianópolis - SC - CEP: 88040-900

marcia@emc.ufsc.br¹, milanez@labtucal.ufsc.br², camilo@labtucal.ufsc.br³

RESUMO

O asfalto, fluido extremamente viscoso, necessita de aquecimento para garantir a sua manipulação. O aquecimento é normalmente feito a partir de serpentinas localizadas próximas ao fundo do tanque, por onde circula vapor de processo, gerado longe dos tanques e distribuído por tubulações. A distribuição de vapor é processo ineficiente (presença de purgadores, perdas térmicas, vazamentos, etc). Por outro lado, contratos de fornecimento do asfalto determinam níveis mínimos de temperatura quando na entrega do produto nos caminhões dos clientes. Várias refinarias da Petrobrás têm tido dificuldade em manter este nível de temperatura (142 °C). Diferentes estratégias têm sido adotadas, como o aumento da capacidade de aquecimento dos tanques, pela duplicação das serpentinas ou adoção de medidas que envolvem uma logística complicada, como fornecer o produto assim que produzido, em temperaturas mais elevadas.

Neste trabalho, propõe-se o uso da tecnologia de termossifões para o aquecimento do asfalto. O calor produzido em queimadores de gás natural, localizados próximos aos tanques, é conduzido por tubos termossifões, cujo condensador está mergulhado no asfalto. Os tubos termossifões, cujo fluido de trabalho é a água, podem ser do tipo circuito fechado (neste caso a geometria do condensador é muito semelhante ao das serpentinas utilizadas) ou de feixes em paralelo. Estes dispositivos permitem um melhor controle de temperatura, uma vez que o vapor pode circular pelos tubos em níveis mais quentes. Simulações experimentais e numéricas serão apresentadas. Soluções tecnológicas semelhantes podem ser encontradas em países orientais.

Palavras-chave: Termossifões bi-fásicos, aquecimento de asfalto com gás natural, racionalização de uso de vapor em refinarias.

ABSTRACT

Asphalt is the more viscous and dense product obtained from petroleum refining. Its main application is road paving. Because of its high viscosity, asphalt storage is made inside heated tanks. The higher the temperature, the lower is the viscosity and the easier is to transport it from one tank to the other. Petrobras, the Brazilian Petroleum Company employ several large asphalt storage tanks in their plants with a capacity of more than a thousand tons. In order to keep the asphalt heated to the required temperature level of 142°C, the tanks are equipped with steam coils placed at the bottom. The steam is provided from a 10 bar boiler that is responsible for all the steam used inside the Plant. However, the actual system has several problems, such as vapor leakage and insufficient thermal power output. The maximum temperature reached is 180°C, which means a maximum asphalt temperature of 130°C. In order to attend the 142°C demand, a new heating system is required.

This work proposes the use of two-phase thermosyphons for asphalt heating. Both conventional and loop-thermosyphon are analyzed. The condenser of the loop-thermosyphon is immersed in the asphalt tank. The evaporator will be placed beside the tank and will be heated by natural gas combustion. With the thermosyphon, the temperature can be better controlled. Also, the system would be independent from the Plant central boiler and more compact, which means less heat losses to transport steam from the boiler to the tank. Experimental and numerical studies are also presented. Similar technology can be found in countries in oriental countries.

Keywords: Two-phase thermosyphons, asphalt tank heating using gas, optimization of steam usage in refineries.

1º Seminário da Rede Gás & Energia

AQUECIMENTO DE TANQUES DE CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO ATRAVÉS DA TECNOLOGIA DE TERMOSSIFÕES BIFÁSICOS

1.0 – INTRODUÇÃO

A LUBNOR é uma das refinarias de petróleo da PETROBRÁS, localizada na cidade de Fortaleza, no estado do Ceará, cujo principal produto é o Cimento ASFáltico Processado – CAP. O CAP se constitui no sub-produto mais denso e viscoso do petróleo. A principal aplicação do CAP é a pavimentação de rodovias, onde ele é adicionado a partículas de pedra para formar o concreto asfáltico. A função do CAP é servir de aglutinante das partículas de pedras. Em altas temperaturas, acima de 120°C, o CAP apresenta uma certa fluidez que permite que ele seja manuseado através de bombas e tubulações. Em temperatura ambiente, o CAP se torna praticamente sólido, dando resistência mecânica ao concreto asfáltico. A Ref. [1] apresenta uma descrição bastante detalhada do asfalto, sua história, propriedades e aplicações.

Ao sair da torre de destilação, acima de 140°C, o CAP é bombeado através de tubulações até os tanques de armazenamento. A tubulação de CAP é isolada externamente e é mantida aquecida na temperatura aproximada de 140°C através de traços de vapor. Os tanques têm o formato cilíndrico com diâmetro e altura acima de 10 m e estão isolados externamente com uma camada de 50 mm de silicato de cálcio. Para evitar a solidificação, ou seja, para evitar que o CAP atinja temperaturas baixas, suficientes para diminuir a sua fluidez a ponto de impedir a sua manuseabilidade, os tanques são aquecidos através de serpentinas no fundo dos tanques. Por dentro da serpentina passa vapor d'água saturado na pressão de 11 bar, o que equivale a uma temperatura de aproximadamente 180°C. A Fig. 1 apresenta um desenho com o lay-out das serpentinas de aquecimento no fundo de um dos tanques de CAP da LUBNOR.

O CAP é vendido diretamente a partir de um ponto de expedição dentro da planta. As empresas compradoras têm o CAP carregado em seus caminhões-tanque através de um sistema que consiste basicamente de duas bombas de pistão e um sistema de tubos. O CAP é bombeado dos tanques de armazenamento até os caminhões. O contrato de venda prevê que a LUBNOR deve entregar o CAP numa temperatura mínima de 142°C. Quanto mais baixa a temperatura do CAP, maior será a energia que o comprador deverá gastar para reaquecê-lo à temperatura ideal de transporte e manuseio.

Um dos principais problemas na planta da LUBNOR é o aquecimento dos tanques de armazenamento CAP, mais particularmente o alto consumo de vapor, um insumo precioso na planta da LUBNOR e a baixa potência das serpentinas de aquecimento dos tanques. As serpentinas de alguns dos tanques de armazenagem não possuem potência suficiente para manter a temperatura do CAP na faixa desejada. Recentemente, alguns tanques de armazenamento de asfalto tiveram sua potência de aquecimento aumentada através da duplicação das serpentinas. Esses tanques atualmente são os que armazenam o CAP em temperaturas acima de 140°C. Difícilmente os demais tanques atingem essas temperaturas. Um procedimento adotado pela LUBNOR para economizar vapor no aquecimento dos tanques de CAP é manter os tanques em temperaturas abaixo de 130°C, aproximadamente, para diminuir as perdas de calor dos tanques. Horas antes da entrega do CAP ao comprador, o mesmo é reaquecido acima de 140°C.

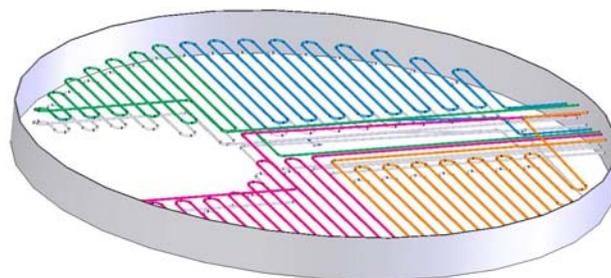


Fig. 1. Lay-out das serpentinas de aquecimento do tanque F-207A

O vapor d'água é o principal insumo no processamento do petróleo na LUBNOR. A CAFOR (Casa de Força) é o setor da LUBNOR responsável pela geração do vapor d'água consumido na usina. A CAFOR possui duas caldeiras com capacidade teórica máxima combinada de aproximadamente 27 ton/h de vapor saturado na pressão de 11 bar. Contudo, normalmente o consumo médio é de 12 a 13 ton/h de vapor, sendo 9 ton/h gerados na caldeira principal e o restante na caldeira secundária. Apenas 50% do vapor condensado é retornado à CAFOR e reaproveitado. Segundo a Ref. [2], cerca

1º Seminário da Rede Gás & Energia

AQUECIMENTO DE TANQUES DE CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO ATRAVÉS DA TECNOLOGIA DE TERMOSSIFÕES BIFÁSICOS

de 220.000 toneladas de vapor d'água foram geradas e consumidas nos anos de 2002 e 2003, o que representa um custo anual de cerca de R\$1.700.000,00 somente com combustíveis e água abrandada. O consumo de vapor necessário para manter os tanques e as tubulações aquecidos representa aproximadamente 83% da geração total de vapor da CAFOR. Apenas 17% do vapor consumido é utilizado no processamento do petróleo e derivado, nas unidades UVAC (destilação a vácuo), ULUB (Lubrificantes) e UGPN (processamento de gás natural).

A Ref. [2] relata como uma das prioridades na LUBNOR a otimização do consumo de vapor, com redução de perdas e melhoria do rendimento do sistema. Um grupo de trabalho de engenheiros da LUBNOR foi formado para fazer uma análise do estado do sistema de vapor da usina no final de 2003. O grupo de trabalho foi responsável pelo relatório da Ref. [2] e tomou como base um relatório elaborado pela SARCO [3] em setembro de 2003, que diagnosticou diversas irregularidades no sistema de vapor na LUBNOR. Os principais problemas estavam relacionados ao sistema de recolhimento de condensado, purgadores e linhas de retorno e a vazamentos de vapor na tubulação e acessórios. Foi estimada na ocasião uma perda anual de R\$ 100.000,00 devido ao funcionamento inadequado do sistema de vapor.

Este trabalho apresenta os estudos da viabilidade técnica de um novo sistema para aquecimento de tanques de asfalto. O novo sistema utiliza a tecnologia de termossifões bifásicos. O objetivo é obter um equipamento de maior potência que o sistema atual e que propicie diminuição consumo de vapor da usina. Duas concepções são analisadas: uma com um feixe de termossifões convencionais e uma com termossifões em circuito. A primeira concepção já está inclusive disponível comercialmente. A segunda concepção, com termossifões em circuito, vem sendo desenvolvida há 2 anos no Laboratório de Tubos de Calor da Universidade Federal de Santa Catarina com recursos CENPES/PETROBRAS e FINEP. Neste trabalho são apresentados os estudos de desenvolvimento deste termossifão.

2.0 – AQUECIMENTO DE CAP POR TERMOSSIFÕES

Nesta seção são apresentadas em maiores detalhes as duas concepções de equipamentos

para aquecimento de CAP por termossifões bifásico: termossifões convencionais e termossifões em circuito.

2.1 – SISTEMA COM TERMOSSIFÕES CONVENCIONAIS

A Fig. 2 apresenta um desenho com o princípio de funcionamento de um termossifão bifásico fechado convencional. Ele consiste basicamente de um tubo metálico fechado em ambas as extremidades. O tubo é evacuado e preenchido com uma certa quantidade de líquido, menor que o volume interno do tubo. O líquido se deposita no fundo do termossifão, chamado evaporador. Calor é aplicado no evaporador, o que faz com que o líquido evapore. O vapor sobe para a extremidade superior do tubo, que é resfriada externamente. O vapor condensa nas paredes do tubo e o líquido desce em direção ao evaporador completando um ciclo termodinâmico. Devido ao fato de que na mudança de fase líquido-vapor não há variação de temperatura, a resistência térmica de um termossifão bifásico é bastante baixa se comparada com outros dispositivos de transporte de calor. Faghri [4] apresenta em detalhes a tecnologia de termossifões

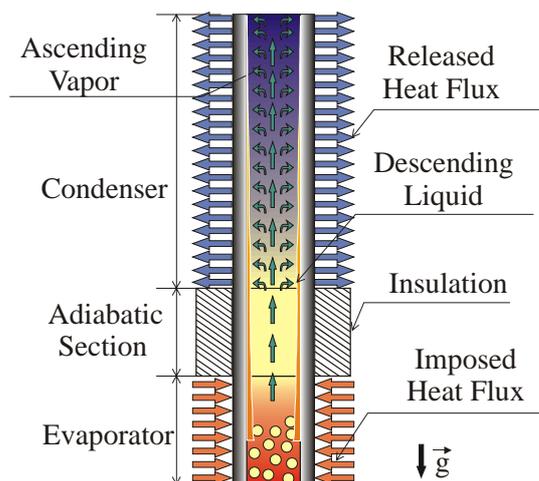


Fig. 2. Princípio de funcionamento de um termossifão bifásico convencional

Sistemas de aquecimento de tanques utilizando termossifões convencionais estão disponíveis comercialmente. Uma das empresas fabricantes é a Hudson Products Corporation [4] que fabrica a linha thermflo® de aquecedores de tanques e vasos. Esta empresa tem no Brasil uma

1º Seminário da Rede Gás & Energia

AQUECIMENTO DE TANQUES DE CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO ATRAVÉS DA TECNOLOGIA DE TERMOSSIFÕES BIFÁSICOS

empresa licenciada, a Jaraguá Equipamentos Industriais Ltda em Sorocaba, SP. A Fig. 3 mostra desenhos ilustrativos e fotografias destes equipamentos sendo empregado em plantas no Canadá. O sistema consiste basicamente de um feixe de termossifões bifásicos convencionais que são imersos na lateral do tanque a ser aquecido, quase na horizontal. Os condensadores estão imersos nos tanques enquanto os evaporadores estão na lateral do tanque. O calor é fornecido pela queima de gás natural numa câmara de combustão ao lado do tanque. Os gases quentes são forçados a cruzar um feixe de tubos aletados, que são os evaporadores dos termossifões. Após perder parte da energia interna, os gases são encaminhados para uma chaminé.

na linha de vapor, no condensador e na linha de líquido.

2.2 – SISTEMA COM TERMOSSIFÕES EM CIRCUITO

Um termossifão em circuito consiste basicamente de um tubo em circuito fechado. A Fig. 3 apresenta um desenho esquemático do funcionamento do termossifão. Calor é adicionado na região chamada evaporador, que está cheia de líquido. O calor evapora o líquido e o vapor escoa por diferença de pressão até o condensador, onde o calor é rejeitado. O vapor condensa nas paredes internas do tubo e o líquido escorre por ação da gravidade. Para evitar que haja fuga de calor pelas paredes do tubo entre o evaporador e o condensador, que provocaria condensação do líquido antes de ele chegar ao condensador, a tubulação é isolada termicamente. Como não existe variação de temperatura durante a mudança de fase, a diferença de temperatura entre evaporador e condensador é bastante baixa, o que significa uma baixa resistência térmica ao transporte de calor, que por sua vez significa alta eficiência. O termossifão em circuito é, portanto, um dispositivo de transporta o calor do evaporador para o condensador com alta eficiência. A diferença entre os níveis de líquido do condensador e do evaporador Δh (Fig. 4) é proporcional à perda de carga total (ΔP_t) do circuito, ou seja:

$$\Delta P_t = \rho g \Delta h \quad (1)$$

onde $g=9,8 \text{ m/s}^2$ é a aceleração da gravidade e ρ [kg/m³] é a densidade do líquido. A perda de carga total é a soma das perdas de carga no evaporador,



thermflo™ unit test in Pan Canadian Resources heavy oil storage tank

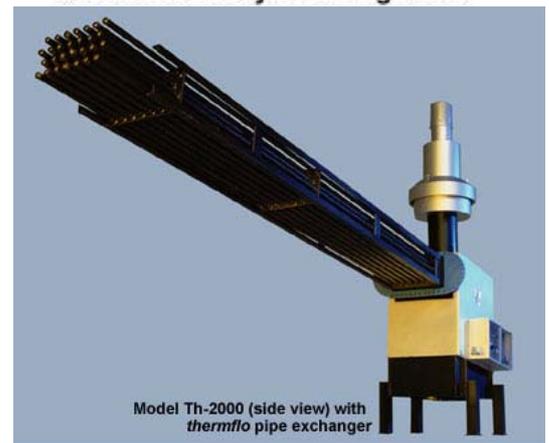


Fig. 3. Sistema thermflo® da Hudson Products Co., para aquecimento de tanques de óleo pesado

O condensador do sistema com termossifões em circuito sendo analisado para o aquecimento de CAP são as atuais serpentinas do tanque. O evaporador seria semelhante aos termossifões do tipo separado, utilizado na China,

1º Seminário da Rede Gás & Energia

AQUECIMENTO DE TANQUES DE CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO ATRAVÉS DA TECNOLOGIA DE TERMOSSIFÕES BIFÁSICOS

Austrália, entre outros. Ele consiste de vários tubos verticais unindo dois reservatórios cilíndricos horizontais, um superior e outro inferior. A Fig. 5 apresenta um desenho esquemático do sistema. A quantidade de fluido de trabalho deve ser tal que o nível de líquido preencha praticamente todo comprimento dos tubos verticais. Desta forma, o reservatório horizontal inferior fica cheio de líquido e o superior com vapor. Para cada serpentina haverá um evaporador. O conjunto de evaporadores será instalado logo ao lado do tanque. O calor de evaporação é fornecido pela queima do gás natural já existente na usina. Os gases de combustão atravessam o banco de evaporadores, de forma que a troca de calor se dá por convecção forçada de gases quente sobre um feixe de tubos, muito semelhante sistema com termossifões convencionais descrito anteriormente.

do tanque, tornando o sistema independente do sistema geral de distribuição de calor da usina e dispensando a necessidade de purgadores, válvulas e sistemas de drenagem. Com isso elimina-se as perdas e as demais ineficiências já relatadas no sistema atual de distribuição de vapor. Uma outra importante característica deste sistema é a possibilidade de operação da serpentina em temperaturas acima dos 180°C atuais, que é a temperatura de saturação correspondente à pressão da caldeira de geração da CAFOR. Em outras palavras, o sistema atual tem a potência limitada pela temperatura máxima da serpentina, que está condicionada à temperatura do vapor da CAFOR. Um sistema de termossifão em circuito independente possibilitaria o aumento de temperatura da serpentina teoricamente acima de 250°C, se necessário.

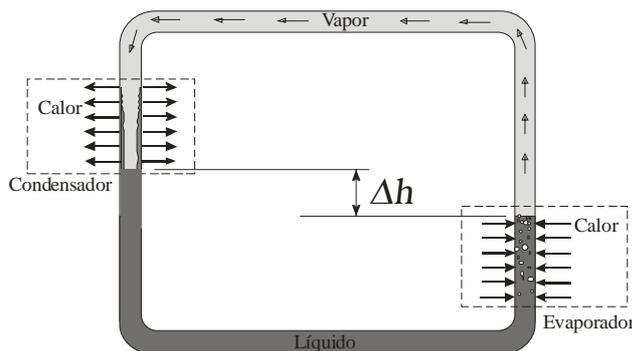


Fig. 4. Princípio de funcionamento de um termossifão em circuito

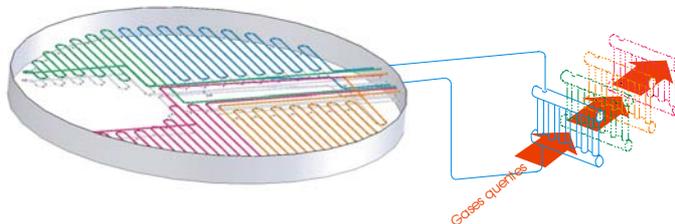


Fig. 5. Lay-out do sistema com termossifões em circuito

Essa solução é bastante semelhante ao arranjo atual em funcionamento, porém elimina algumas inconveniências. A diferença é que ao invés de gerar o vapor na CAFOR e transportá-lo até o tanque, o vapor seria gerado localmente perto

3.0 – ESTUDO EXPERIMENTAL DO TERMOSSIFÃO EM CIRCUITO

Com o objetivo de estudar o comportamento de um circuito termossifão semelhante ao que poderia ser implantado na LUBNOR, uma bancada experimental foi projetada e construída no Laboratório de Tubos de Calor da UFSC. Como um teste em laboratório com uma serpentina nas mesmas dimensões das do tanque F-207A seria impraticável, a bancada utiliza uma serpentina em escala reduzida. O tubo utilizado é de aço inoxidável AISI 304 com diâmetro interno de 6 mm e com espessura de parede de 1 mm. O diâmetro interno da serpentina original é de 38,1 mm, o que significa um fator de escala de 6,35:1 entre a serpentina original e o modelo em escala reduzida.

A Fig. 5 mostra um desenho da bancada experimental construída para testar o modelo em escala do termossifão em circuito. Ela consiste basicamente de uma serpentina em circuito fechado. A parte correspondente ao condensador fica dentro de uma caixa metálica. A caixa metálica funciona como um trocador de calor. Por dentro da caixa metálica passa um fluido de refrigeração ligado a um termocirculador, que mantém a temperatura do fluido constante no nível desejado. A serpentina com vapor está imersa no fluido de refrigeração, fazendo com que sua temperatura de teste possa ser ajustada no termocirculador. O vapor que flui por dentro da serpentina é gerado fora da caixa, na região do evaporador, que consiste de um tubo horizontal em aço inox AISI

1º Seminário da Rede Gás & Energia

AQUECIMENTO DE TANQUES DE CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO ATRAVÉS DA TECNOLOGIA DE TERMOSSIFÕES BIFÁSICOS

304 com 100 mm de diâmetro interno e está localizada na parte inferior da bancada. O calor do evaporador será gerado por um conjunto de resistências elétricas tipo cartucho inseridas dentro da piscina de líquido do evaporador. A caixa do trocador de calor pode ser girada de forma que várias inclinações da serpentina possam ser testadas.

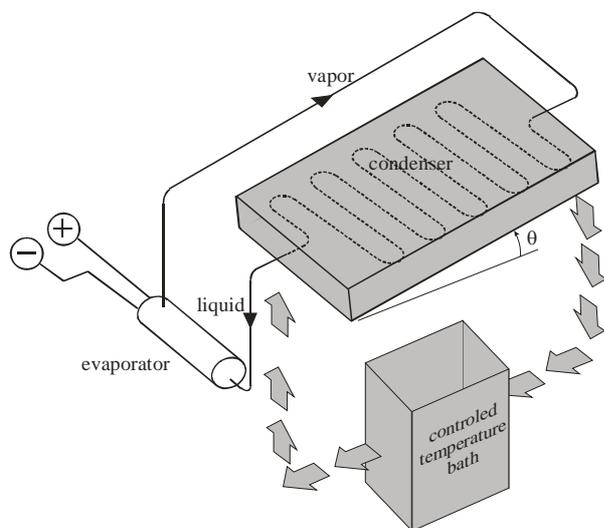


Fig. 5. Bancada experimental para teste do modelo em escala do termossifão em circuito

Comparando as serpentinhas da Fig. 1 (tanque F-207A) com a da Fig. 5 observa-se que o formato geométrico não é exatamente igual. Enquanto a serpentina em escala reduzida apresenta os trechos retos entre as curvas do mesmo tamanho, as serpentinhas originais apresentam os trechos retos de comprimento variável. Isso foi feito por conveniência de espaço físico, mas é esperado que este aspecto não venha afetar os resultados de maneira significativa. Isso ocorre porque o que se busca é analisar o escoamento de vapor dentro da serpentina, em especial a perda de carga do mesmo. Como a perda de carga só depende do comprimento total de tubulação reta e da quantidade de curvas, mantendo-se estes dois parâmetros constantes a perda de carga deve permanecer constante indiferentemente ao aspecto geométrico aparentemente distinto. O evaporador do modelo experimental também não é idêntico ao do sistema real. Enquanto o equipamento real utiliza combustão de gás natural, o modelo de laboratório utiliza aquecedores elétricos. A vantagem de se

utilizar aquecimento elétrico é a facilidade de se medir a potência térmica transferida pelo termossifão. Neste estágio do desenvolvimento o foco do estudo está direcionado para o condensador do sistema, mais especificamente a viabilidade de se utilizar as serpentinhas existentes atualmente nos tanques de CAP.

Os testes consistem em medir-se a resistência térmica do termossifão para várias inclinações da serpentina condensadora e para vários níveis de potência térmica transferida. A resistência térmica do termossifão R [°C] é definida como sendo:

$$R = (T_e - T_c) / q \quad (2)$$

onde T_e [°C] é a temperatura do evaporador, que é medida por um termopar colocado no vapor acima da piscina de líquido do evaporador e T_c [°C] é a temperatura média da serpentina, medida por sete termopares espalhados na serpentina condensadora e q [W] é a potência térmica transferida pelo termossifão. A resistência térmica representa a facilidade com que o calor é transportado pelo termossifão. Quanto menor a resistência térmica, mais calor o termossifão transmite para uma mesma diferença de temperatura entre o evaporador e o condensador.

A resistência térmica do termossifão em função da potência térmica transferida são apresentados na Fig. 6. Vale a pena lembrar que deseja-se valores mais baixos possíveis de resistência térmica, ou seja, deseja-se transportar o calor do evaporador para o condensador com a menor diferença possível de temperatura. Para baixas potências transferidas, o valor da inclinação da serpentina (ângulo θ da Fig. 5) afeta a resistência térmica. A inclinação entre 0 e 13° com relação à horizontal dá os menores valores de resistência térmica. O fato de o sistema operar adequadamente com uma inclinação de 0° se explica pela força de arraste do vapor que flui a altas velocidades e empurra o condensado de volta ao condensador. Porém, num sistema real se usaria uma inclinação mínima, por exemplo igual à da serpentina existente. Ainda na Fig. 3, observa-se que à medida que a potência transferida aumenta, os pontos experimentais tendem ao valor de 0,003 °C/W. Para potências maiores que 1,5 kW a inclinação pouco afeta o funcionamento do sistema.

O sistema real deverá operar com uma potência de aproximadamente 80 kW por

1º Seminário da Rede Gás & Energia

AQUECIMENTO DE TANQUES DE CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO ATRAVÉS DA TECNOLOGIA DE TERMOSSIFÕES BIFÁSICOS

serpentina. Como o modelo de laboratório está em escala de 1:6,35, a área de transferência de calor do modelo é aproximadamente 40 vezes menor que o real. Isso significa que a potência equivalente do modelo é de aproximadamente 2 kW. Neste nível de potência, os testes indicam que a serpentina funciona de maneira idêntica em qualquer inclinação.

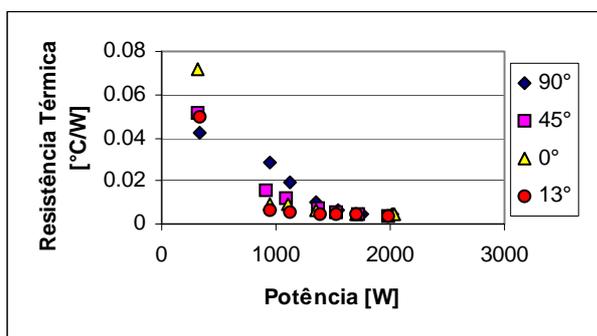


Fig. 6. Resistência térmica do termostifão em circuito em função da potência transferida

4.0 – ESTUDO NUMÉRICO DAS DISTRIBUIÇÕES DE TEMPERATURA E VELOCIDADE NOS TANQUES DE CAP

Além do estudo experimental acima descrito, foi feito um estudo numérico com o objetivo de analisar e avaliar o comportamento térmico e fluido-dinâmico do asfalto dentro do tanque. O objetivo específico do estudo é verificar a existência de gradientes de temperatura dentro do tanque, ou seja, regiões mais aquecidas no tanque. Uma das saídas para o problema de baixa temperatura de entrega do CAP seria efetuar a retirada de CAP dos tanques a partir de pontos mais quentes do tanque.

Após extensa pesquisa bibliográfica, nenhum trabalho que contemplassem troca de calor através de cilindros horizontais em tanques de armazenamento de fluidos viscosos foi encontrado. A revisão bibliográfica foi então dividida em duas partes: Aquecimento de Produtos Armazenados em Tanques e Aquecimento do Meio a Partir de Cilindros Horizontais. O foco foi dirigido a fluidos que possuíssem a viscosidade variando com a temperatura. Oliveski et al. [5] analisaram o efeito da estratificação térmica em tanque de aquecimento de óleo e concluíram que para se obter uma boa concordância dos resultados numéricos com os experimentais é necessário captar com boa precisão o efeito da camada limite

bem como a formação da pluma de calor nas paredes quentes e frias. Isso implica que o refino da malha junto a essas paredes é de grande importância. Emery e Lee [6] estudaram o efeito das variações das propriedades termofísicas na convecção natural em cavidades com geometria quadrada sujeitas a diferentes temperaturas e fluxos de calor prescritos nas paredes laterais. Uma comparação dos resultados para uma propriedade do fluido variável mostrou que, embora o escoamento do fluido e os campos de temperatura se apresentem diferentes, a transferência de calor total não é significativamente afetada pela variação das propriedades do fluido.

As técnicas e equações necessárias para a aplicação da modelagem numérica são descritas por Maliska [7]. O CFX Manual [8] apresenta todas as descrições necessárias para a modelagem, implementação e solução do problema estudado no software, bem como a solução dos problemas decorrentes da simulação, tais como convergência entre outros.

4.1 – METODOLOGIA

Algumas simplificações para o tanque foram adotadas a fim de se reduzir o custo computacional da simulação, ou seja, o tamanho da malha, visto que a geometria da serpentina próxima à base do tanque é bastante complexa e também devido ao tamanho do tanque, que é muito grande quando comparado com a serpentina. Devido à simetria do tanque de asfalto, adota-se como domínio de solução uma “fatia” vertical do tanque represente bem todo o comportamento térmico deste, permitindo desta forma diminuir de três para duas dimensões o movimento do CAP, ou seja, apenas o efeito de recirculação do asfalto no sentido vertical será analisado, desprezando-se a recirculação de asfalto que ocorre ao redor do eixo do tanque.

Na parte superior do tanque existe um suspiro para que o CAP fique a pressão atmosférica para que não haja problema de deformação do tanque quando o asfalto se expande e contrai devido a dilatação térmica. Como o tanque nunca está completamente abastecido de CAP, existe sempre uma camada de ar próximo ao teto do tanque. O estudo da modelagem analítica e numérica entre essa interface ar-asfalto é de escopo de escoamento multi-fásicos, sendo de difícil modelagem numérica e analítica. Assim optou-se em utilizar um

1º Seminário da Rede Gás & Energia

AQUECIMENTO DE TANQUES DE CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO ATRAVÉS DA TECNOLOGIA DE TERMOSSIFÕES BIFÁSICOS

coeficiente de troca de calor global que representasse todo o fenômeno de troca de calor entre o asfalto e a câmara de ar e entre esta e o ambiente externo do tanque. Condição de deslizamento livre foi adotada na interface CAP-câmara de ar do tanque, pois o arraste que o ar promove sobre o asfalto é desprezível.

Nas paredes superior e lateral do tanque, a troca de calor com o meio ambiente se dá através de um coeficiente de transferência de calor prescrito, que leva em consideração o isolante térmico, camada de ar na parte superior, espessura da chapa metálica, etc. Nas superfícies frontal e posterior da fatia serão colocadas condição de simetria necessárias para o modelamento de escoamento bidimensional. Esse tipo de consideração é muito utilizado em simulação numérica. Na parede da serpentina será adotada a condição de temperatura prescrita e igual a 180°C, que a temperatura de saturação do vapor. A Fig. 7 ilustra os modelos físicos adotados.

Já a modelagem física da serpentina exigiu as maiores simplificações. Como observado na Fig. 1, as serpentinhas apresentam um formato bastante complexo, principalmente devidos as curvas. A serpentina percorre toda a base do tanque de forma a ocupar a maior área horizontal possível e assim maximizar a troca de calor. Porém, neste estudo é admitido que as serpentinhas são circulares e concêntricas. Acredita-se que essa hipótese não leve a erros significativos. Foi realizado um estudo específico do refino de malha porque, conforme já mencionado, a literatura indica que o refino adequado da malha próximo às paredes quentes e frias irá determinar se as plumas quentes são capturadas com precisão. Os resultados são apresentados no próximo tópico.

4.2 – RESULTADOS NUMÉRICOS

Conforme já mencionado, o CAP apresenta viscosidade altamente dependente da temperatura. Além disso, o nível de viscosidade depende do campo de onde foi extraído o petróleo usado no refino. No caso específico da LUBNOR, o CAO mais viscoso tem uma viscosidade em média 70% maior que o menos viscoso. Além disso, raramente o tanque contém somente um tipo de CAP. Às vezes o tanque contém misturas de CAP oriundos de campos diferentes. Por isso, durante as simulações, foi utilizada inicialmente uma viscosidade média entre os dois extremos. Numa segunda etapa foi simulado o asfalto mais viscoso

da LUBNOR para verificar se o tipo de CAP afeta a troca de calor nos tanques. Para o asfalto com viscosidade média observou-se que a partir de 240000 volumes e 0.8mm de espessura da malha próximo a parede quente e fria o fenômeno e transferência de calor não se alteraram mais, isto é, malhas maiores e com menor refino captavam a mesma transferência de calor.

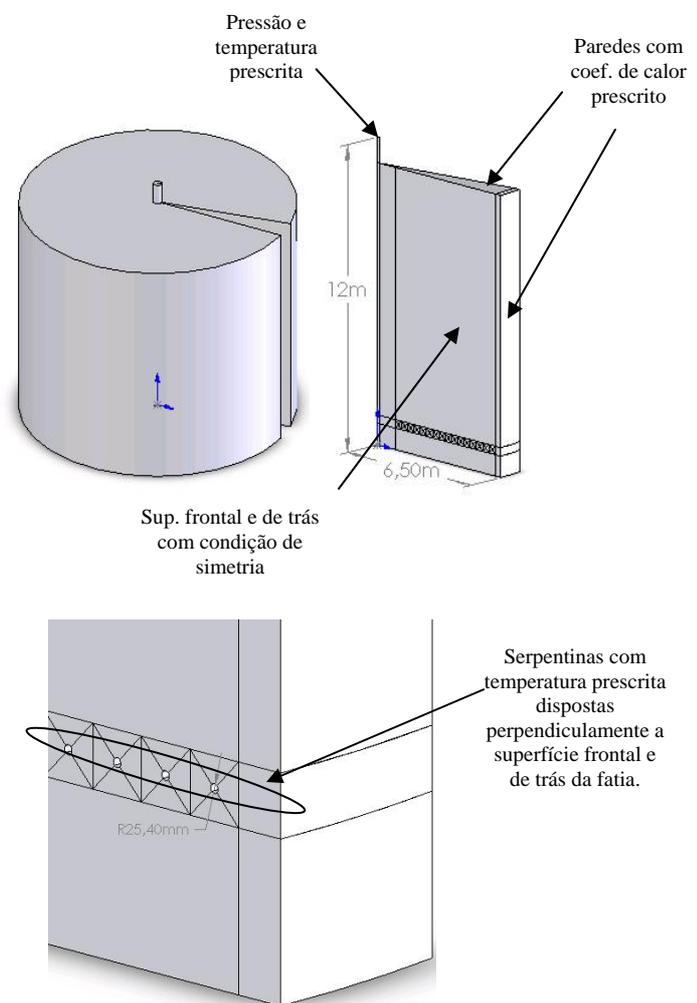


Fig. 7. Tanque total, “fatia” modelada para a simplificação bidimensional e vista ampliada da região dos sistemas de aquecimento

As Fig. 8 mostra o campo de velocidade através das linhas de corrente para o CAP com viscosidade média. Pode-se observar que há praticamente uma célula de recirculação acima das serpentinhas com velocidades de até 10 cm/s. Já abaixo da serpentina o CAP fica praticamente

1º Seminário da Rede Gás & Energia

AQUECIMENTO DE TANQUES DE CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO ATRAVÉS DA TECNOLOGIA DE TERMOSSIFÕES BIFÁSICOS

parado. A Fig. 9 mostra a distribuição de temperatura. Pode-se observar que acima da serpentina a temperatura é praticamente uniforme e igual a 135°C. Já abaixo da serpentina existe uma estratificação, chegando a atingir valores pouco acima de 100°C, indicando que o CAP nestas condições não apresenta fluidez adequada para manipulação. Apesar de ter baixa condutividade, o CAP acima da serpentina fica praticamente isotérmico por causa da relativamente intensa movimentação do mesmo,.

Para o asfalto com viscosidade alta observou-se que a partir de 320000 volumes e 0.6mm de espessura da malha próximo a parede quente e fria o fenômeno e transferência de calor não se alteraram mais, isto é, malhas maiores e com melhor refino captavam a mesma transferência de calor.

serpentina a temperatura é praticamente uniforme e igual a 141°C. Já abaixo da serpentina também existe uma estratificação, chegando a atingir valores pouco acima de 130°C. Assim como aconteceu com o CAP de viscosidade média, acima da serpentina ele fica praticamente isotérmico por causa da relativamente intensa movimentação do mesmo, embora essa movimentação seja menor que no CAP com viscosidade normal. Isso é facilmente explicável pelo maior atrito do CAP nesta segunda simulação. Este fato também explica porque o CAP mais viscoso tem uma temperatura média que é maior que a do CAP menos viscoso. Como a velocidade é menor, a troca de calor por convecção entre o CAP e as paredes laterais do tanque é menos intensa.

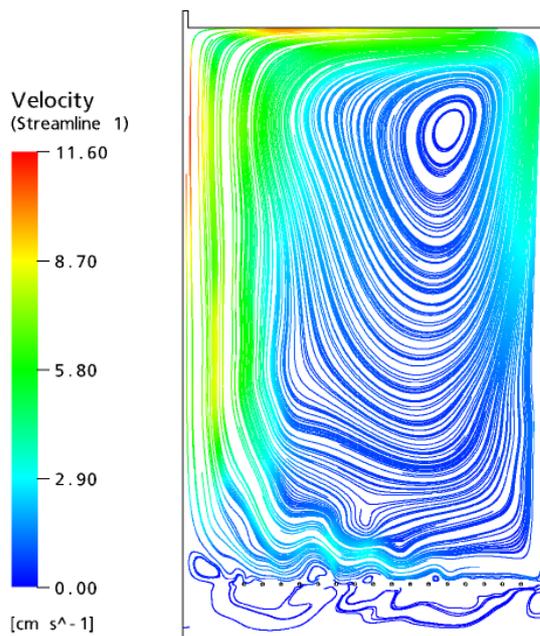


Fig. 8. Campo de Velocidades do CAP com viscosidade média

As Figs. 10 mostra o campo de velocidade através das linhas de corrente para o CAP com viscosidade alta. Pode-se observar que agora há várias células de recirculação acima das serpentinas, com velocidades máximas menores que 8 cm/s. Já abaixo da serpentina o CAP fica praticamente parado, semelhantemente ao CAP menos viscoso. A Fig. 11 mostra a distribuição de temperatura. Pode-se observar que acima da

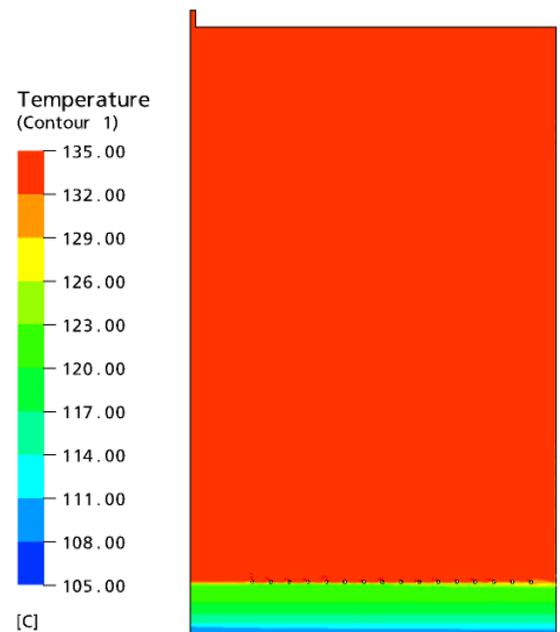


Fig. 9. Distribuição de temperatura do CAP com viscosidade média

Embora não existam dados de distribuição de temperatura e velocidade dentro dos tanques de CAP e a medição destas grandezas seja atualmente inviáveis na LUBNOR, a validade das simulações pode ser verificada indiretamente através dos dados de consumo de vapor para manter aquecidos os tanques. Segundo dados da Ref. [2] o tanque F207A, que serviu de modelo para esta simulação, consome 0,37 ton/h de vapor saturado a 180°C. Isso corresponde a uma potência aproximada de 200 kW para manter a

1º Seminário da Rede Gás & Energia

AQUECIMENTO DE TANQUES DE CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO ATRAVÉS DA TECNOLOGIA DE TERMOSSIFÕES BIFÁSICOS

temperatura do CAP em 140°C. As simulações indicaram potências de 183 e 210 kW para o asfalto de viscosidade normal e o de viscosidade alta, respectivamente, o que corresponde a uma diferença de menos de 10% entre medições e simulações. Além disso as temperaturas simuladas para o CAP acima da serpentina foram 135 e 141°C, para o CAP médio e viscoso, respectivamente. Mais uma vez a concordância com o medido de 140°C é excelente.

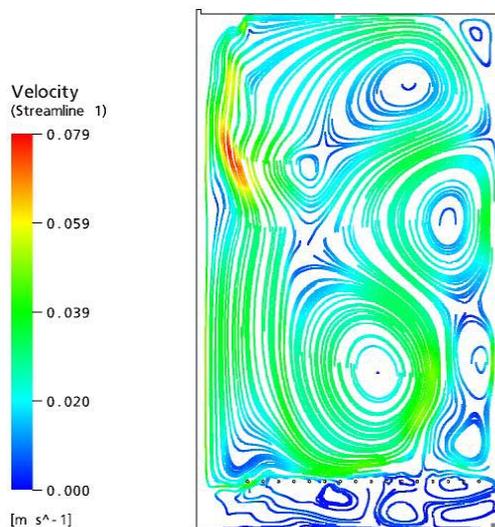


Fig. 10. Campo de velocidades do CAP mais viscoso

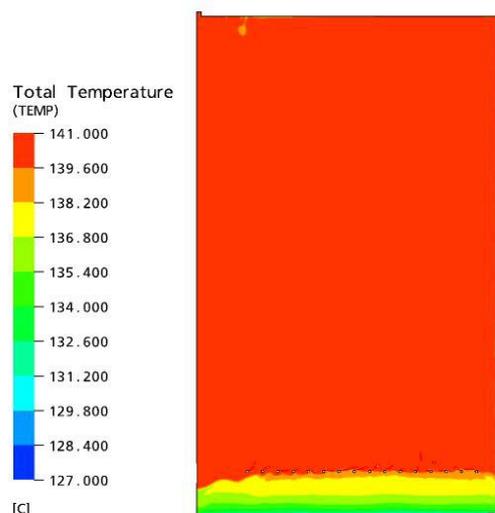


Fig. 11. Distribuição de Temperatura do CAP mais viscoso

6.0 – CONCLUSÕES

A tecnologia de termossifões bifásicos tem potencialidades para substituir com vantagens o atual sistema de aquecimento de tanques de asfalto. Além de otimizar a utilização de vapor da usina tanto pela eliminação de vazamentos e outras perdas, o sistema possibilita um aumento da potência de aquecimento.

Além de equipamentos já disponíveis, este trabalho apresenta estudos experimentais de viabilidade técnica de um sistema com termossifões em circuito. O sistema utiliza as próprias serpentinas de vapor existentes o sistema atual como parte do sistema, diminuindo o custo de adaptação. Testes com um modelo em escala mostram a funcionalidade do sistema.

Paralelamente foi feito um estudo numérico dos campos de temperatura e velocidade dentro dos tanques. Foram simulados um CAP de viscosidade média e um de alta viscosidade. Em ambos dos casos a temperatura do CAP se mostrou bastante uniforme, principalmente acima da serpentina, onde as velocidades das correntes de convecção são da ordem de 10 cm/s a ajudam a homogeneizar a temperatura. Abaixo da mesma observa-se que ocorre uma estratificação com variações de temperaturas da ordem de 10°C a 20°C.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Manual de Asfalto, Editado pelo Instituto de Asfalto, 1989.
- [2] Relatório GT Sistema de Vapor - LUBNOR, Janeiro de 2004.
- [3] Relatório Técnico Spirax Sarco, Situação do sistema de distribuição de vapor da LUBNOR, Setembro de 2003.
- [4] Faghri, A., "Heat Pipe Science and Technology," Taylor & Francis, 1995.
- [5] Oliveski R. C., Macagnan M.H., Copetti J. B., Petroll A. d. L. M., *Experimental Thermal and Fluid Science* v. 29, p. 671–680, 2005.
- [6] Emery A.F., Lee J.W., The effects of property variations on natural convection in a square enclosure, *ASME Journal of Heat Transfer*, v.121, p. 57–61, 1999.
- [7] MALISKA C.R., *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. [S.I.]: LTC. Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1995.
- [8] CFX, A. *Manual Ansys CFX 10.0, User Contents and Help Files included*. USA, 2006.