

Monografia de Graduação

Análise Do Combate À Incrustação Através Do Fenômeno Da Cavitação E/Ou Arrasto

Rudson de Souza Lima

Natal, julho de 2010

**ANÁLISE DO COMBATE À INCRUSTAÇÃO ATRAVES DO FENÔMENO DA
CAVITAÇÃO E/OU ARRASTO**

Rudson de Souza Lima

Trabalho de conclusão de curso submetido à
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
Como requisito para a obtenção do grau de
ENGENHEIRO MECÂNICO

Prof. Dr. José Ubiragi de lima mendes – UFRN (orientador)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me proporcionar tudo que tenho conquistado.

A minha família e amigos, que me apoiaram e incentivaram nos momentos difíceis.

Aos professores do curso de engenharia mecânica, especialmente ao professor e orientador José Ubiragi, por disponibilizar seu tempo e conhecimento na execução do projeto.

Aos amigos, pela atenção e prestação de serviços, auxiliando sempre com ótimas ideias, passando o máximo de conhecimento e experiência possível.

RESUMO

Existem dois fenômenos bastante relevantes presentes no transporte de fluidos: a incrustação e a cavitação. No setor petrolífero, em especial, a incrustação em dutos gera, entre outros problemas, altos custos de manutenção para desobstrução das passagens do óleo. A cavitação, que causa o efeito inverso ao da incrustação, acontece a partir de pequenas bolhas oriundas da tubulação posterior à bomba de indução de vazão, devido a uma queda de pressão no escoamento. O choque das bolhas, surgidas no processo de cavitação, nas paredes dos dutos provocam microtrincas que tendem a propagar-se provocando o desgaste da superfície destes. Em face do exposto, esse trabalho objetiva utilizar o processo de cavitação através de um controle de pressão para a destruição das incrustações provocadas pelo fluido, de modo que os fragmentos desprendidos sejam levados ao longo da tubulação pela pressão dinâmica associada ao escoamento. Para isto, o processo é simulado através de um sistema de tubulação incrustada com material parafínico (principal componente responsável pela incrustação em dutos de petróleo), no qual o fluido escoava à pressão e velocidade específicas equivalentes a situação real, possibilitando conclusões em função da idéia proposta.

Palavras chave: Cavitação, Incrustação, Petróleo, Pressão dinâmica.

ABSTRACT

There are two very important phenomena present in the fluid transport: the incrustation and the cavitation. In the petroleum sector, in particular, the incrustation in ducts creates, among other problems, high maintenance costs to clear the passages of oil. The cavitation causes an opposite effect to the incrustation and happens due small bubbles arising from the tubing after the pump of induction due to a fall of pressure in the flow. The shock of the bubbles that emerged in the process of cavitation in the walls of the ducts cause microscopic cracks that tend to spread causing wear of the surface. Against this background, this paper aims to use the process of cavitation using a pressure control for the destruction of the incrustation caused by the fluid, so that the fragments released are carried along the pipe by the dynamic pressure associated with the flow. For both, the process is simulated through a piping system inlaid in paraffin material (main component responsible for fouling in petroleum products), in which pressure and speed fluid flows is similar to actual situation, allowing conclusions on the basis of the idea.

Keywords: Incrustation; Cavitation; Dynamics pressure; Petroleum; Pump.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA – 1 – Efeito da cavitação em dutos.....	02
FIGURA – 2 – Duto incrustado.....	04
FIGURA – 3 – Esquema do projeto.....	06
FIGURA – 4 – Sistema de transporte de fluido.....	07
FIGURA – 5 – Bomba centrífuga utilizada.....	08

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - REVISÃO DE LITERATURA.....	2
Cavitação fixada.....	3
Cavitação por vórtices.....	3
Cavitação por bolhas.....	3
Mecanismo hidráulico.....	4
Mecanismo de danos.....	4
Sedimentação de sólidos em suspensão.....	5
Cristalização/Solidificação.....	5
O efeito da solubilidade causando deposição/precipitação.....	5
Agregação/floculação.....	5
Efeito coloidal.....	5
Reações químicas.....	5
Crescimento biológico.....	5
O efeito interfacial.....	5
3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	6
Proposta do projeto.....	6
Principais etapas do trabalho.....	7
4 – RESULTADOS E DISCURSÕES.....	10
5 – CONCLUSÕES.....	11
6 – SUGESTÕES.....	12
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	13

1 - INTRODUÇÃO.

Desde muito tempo as indústrias petrolíferas vêm enfrentando uma problemática no transporte de petróleo através dos dutos de escoamento: é periódica a necessidade de realizar manutenção nas tubulações a fim de desobstruir as passagens, pois estas tendem a ficar completamente fechadas por incrustações decorrentes do processo de transporte.

O processo de incrustação ocorre quando partículas sólidas presentes no fluido em escoamento começam a agregar-se nas paredes da tubulação e, aglomerando-se, formam uma camada de substrato que obstrui a seção do tubo. Com essa redução da seção do tubo ocorre um aumento na pressão interna do sistema, bem como uma redução no volume de transporte, prejudicando, conseqüentemente, o bom funcionamento do sistema como um todo.

Outro fenômeno bastante comum em tubulações de escoamento de petróleo é a cavitação, que ocorre a partir de uma redução da pressão na tubulação devido à força de bombeamento do fluido. A redução da pressão faz com que ocorra a evaporação da água presente no fluido em escoamento e um conseqüente aparecimento de bolhas que tendem a estourar repetitivamente nas regiões próximas às paredes do tubo e provocam microtrincas. Tais trincas, com a ação do tempo, propagam-se perfurando e inutilizando a estrutura da tubulação. Não obstante, o processo de cavitação também permite a oxidação do material.

A cavitação, porém, é proposta como alternativa para redução, ou até mesmo eliminação, dos efeitos da incrustação. Através de um sistema de simulação de escoamento em oleodutos são feitas análises do processo e sua eficiência.

2 – REVISÃO DE LITERATURA

Junto com a extração de petróleo ocorre a produção de água, cuja quantidade depende da composição nas rochas reservatórios e dos mecanismos naturais ou artificiais de produção. A água presente no reservatório, chamada de água de formação, é identificada por sua salinidade e composição de seus sais, normalmente sais de magnésio e estrôncio (AMBIENTE, 2004). Nos depósitos petrolíferos, essa água salgada e uma mistura de gases são responsáveis pela pressão que provoca a ascensão do petróleo através de poços perfurados.

O sistema de extração de petróleo varia de acordo com a quantidade de gás acumulada na jazida. Se a quantidade de gás for grande o suficiente, sua pressão pode, por si só, expulsar o óleo, bastando uma tubulação que comunique o poço com o exterior. Entretanto, se a pressão natural for fraca ou nula, será necessário injetar a água para extrair o petróleo por bombeio (USP, 2003). O transporte do petróleo e de seus derivados é realizado em longos dutos chamados oleodutos; constituídos por segmentos de tubos de aço carbono soldados podem constituir um perigo se não estiverem em boas condições de operação (WIERS, 2001). Trechos contínuos de oleodutos conectam terminais ou instalações de bombeamento, estendendo-se por centenas de quilômetros. Atualmente a malha brasileira de dutos ultrapassa os 20.000 quilômetros, sendo que uma grande parcela destes dutos apresenta idade superior a 40 anos (PETROBRAS, 2000). Os oleodutos são sujeitos à corrosão, que apesar de evoluir lentamente pode chegar a perfurar a parede, causando vazamentos, fig. (1). Desta forma, a tubulação deve ser inspecionada periodicamente para localizar e reparar pontos de corrosão, antes que esse dano chegue a níveis catastróficos.



Figura 1. Efeitos da cavitação em dutos

O conhecimento e o controle do fenômeno da cavitação em tubulações são de suma importância para a manutenção dos equipamentos em condições satisfatórias de funcionamento, para a prevenção desse indesejável fenômeno, e para a garantia de sua eventual ocorrência em níveis compatíveis com a vida útil das instalações envolvidas. A cavitação é um processo hidromecânico de remoção de partículas da superfície, devido às elevadas pressões puntiformes provocadas pelo colapso de bolhas de vapor de água produzidas em regiões de baixa pressão no escoamento. Os tipos de cavitação mais comuns são:

- Cavitação fixada (Michel and Belahadji, 1997), que consiste basicamente da formação, crescimento e enchimento de uma cavidade de vapor, que posteriormente é interrompida por um fluxo reentrante e deslocada para a jusante, para regiões de pressões mais elevadas, onde é implodida violentamente, provocando ondas de choques e concentrações de altas pressões. Este tipo de cavitação é detentora de um poder destruidor considerável;

- Cavitação por vórtice, que se desenvolve normalmente em regiões de altas tensões cisalhantes, onde ocorre a formação de vórtices. Nos vórtices a pressão absoluta decresce no centro para valores próximos aos da pressão de vapor. Estes vórtices são normalmente desenvolvidos nas extremidades de pás rotoras nas camadas cisalhantes de jatos submersos, na extensão do cone dos rotores e nas passagens do fluxo entre as pás. Este tipo de cavitação é responsável por grandes erosões, vibrações e ruídos intensos;

- Cavitação por bolhas (Franc et al, 1995), que ocorre como consequência do ciclo da bolha, originado devido a gradientes de pressão e a existência de germes ou núcleos contidos nos fluidos.

Este último tipo de cavitação normalmente aparece ao longo de contornos sólidos ou no interior dos fluidos, devido à queda de pressão para valores inferiores ao da pressão de vapor do líquido. Esta cavitação é erosiva devido às altas pressões geradas pelos colapsos das bolhas, que normalmente são intermitentes; devido ao impacto do jato reentrante, que se forma durante a implosão, com a superfície sólida; ou ainda devido à repercussão das ondas de choques geradas.

A erosão por cavitação, verificado intensamente em tubulações, ocorre devido à concentração de energia em uma pequena área sólida próxima ou no próprio local onde ocorre o colapso. Essa concentração de energia é responsável pelas altas tensões localizadas que excedem os limites de resistência dos materiais. O estudo do fenômeno erosivo é bastante

complexo pelo fato de envolver o comportamento hidrodinâmico dos fluxos cavitantes, especialmente as fases de implosão das estruturas de vapor e o comportamento do material com relação aos impactos repetitivos oriundos da cavitação.

O sistema de erosão por cavitação pode ser dividido basicamente em dois mecanismos:

- Mecanismo hidráulico, onde as depressões locais geram as estruturas de vapor, que crescem e colapsam, induzindo impactos sobre as paredes sólidas;
- Mecanismo de danos, onde o material da parede sólida é danificado com posterior remoção de massa, devido aos impactos oriundos da cavitação.

A interface entre estes dois mecanismos é denominada de agressividade da cavitação, que é o carregamento de impactos sobre a parede em virtude de impactos sucessivos. Embora os mecanismos dos colapsos ainda não se encontrem totalmente elucidados, é admitido que o impacto é caracterizado por uma pressão da ordem de GigaPascal, com um tempo de duração da ordem de microsegundos, e superfície de impacto da ordem de décimo de milímetro (Dorey et al, 1996). A perda de massa do material sólido durante a erosão passa por uma fase de incubação, onde aparecem os pequenos pits e o desgaste é pequeno, em seguida ocorre uma aceleração do processo onde a remoção de massa é incrementada até um valor máximo após o qual a perda de material se torna estável e aproximadamente constante.

Outro processo bastante comum e que pode ocasionar falhas na tubulação é o de incrustação. Este ocorre devido ao acúmulo de partículas sólidas (produtos de corrosão, microorganismos, partículas inorgânicas e macromoléculas) do fluido em escoamento nas paredes do tubo, provocando a redução da seção do duto e causando uma grande perda de carga, além de proporcionar um aumento da pressão na tubulação e em todo o sistema, fig.(2).



Figura 2. Duto incrustado

Existem vários mecanismos responsáveis pelo problema da incrustação, dentre os quais podem se destacar:

- Sedimentação de sólidos em suspensão: causado pela ação da força da gravidade sobre as partículas suspensas no meio fluido.;
- Cristalização/Solidificação: hidrocarbonetos de origem parafínica quando resfriados tendem a depositar cristais na superfície fria. Para que a cristalização inicie, um grau de supersaturação para a solução é requerido antes que a precipitação ocorra;
- O efeito da solubilidade causando deposição/precipitação: o petróleo apresenta em sua constituição uma mistura de vários componentes dispersos. O que o torna estável é o equilíbrio de solubilidade entre todos estes componentes. Uma mudança neste equilíbrio pode causar a precipitação de um ou mais componentes levando à formação da incrustação;
- Agregação/Floculação: na composição do petróleo, moléculas de asfaltenos estão presentes. A diminuição da polaridade em meio ao óleo causa a agregação e a floculação destes componentes;
- Efeito coloidal: este efeito é resultado da combinação de asfaltenos floculados e das resinas presentes no óleo;
- Reações Químicas: este mecanismo geralmente nos leva a incrustação por corrosão e por polimerização;
- Crescimento Biológico: este mecanismo pode ser descrito como o crescimento de micro e macroorganismos (bactérias, fungos ou algas) aeróbios e anaeróbios na superfície. A preferência pela bactéria em se fixar na superfície do tubo deve-se ao fato de que o material da superfície passa a ser uma fonte de nutrientes;
- O efeito interfacial: o processo de incrustação pode ser dividido nas fases do período de indução e do período de incrustação. Pesquisas atuais têm sido feitas no sentido de avaliar a influência da força de adesão do cristal com a superfície. A análise e o entendimento desta força têm ajudado a aumentar o período de indução, o qual pode ser caracterizado como o período em que a variação da resistência da incrustação é desprezível.

A presença periódica da incrustação representa na indústria de refino de petróleo bilhões de dólares em perda de energia e em custos de manutenção, sendo então alvo de pesquisas para sua atenuação.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS.

Proposta do projeto

Para o estudo desse processo de incrustação assim com o processo de corrosão nos referidos dutos de petróleo, foi montado um experimento que simulou o escoamento do fluido em um sistema de tubulação fechada.

Para a montagem desse experimento foi usada uma bomba centrífuga com potencia de 1/4 CV que proporcionou um fluxo contínuo de aproximadamente 8 mil litros de fluido por hora através de uma tubulação com diâmetro de 3/4”.

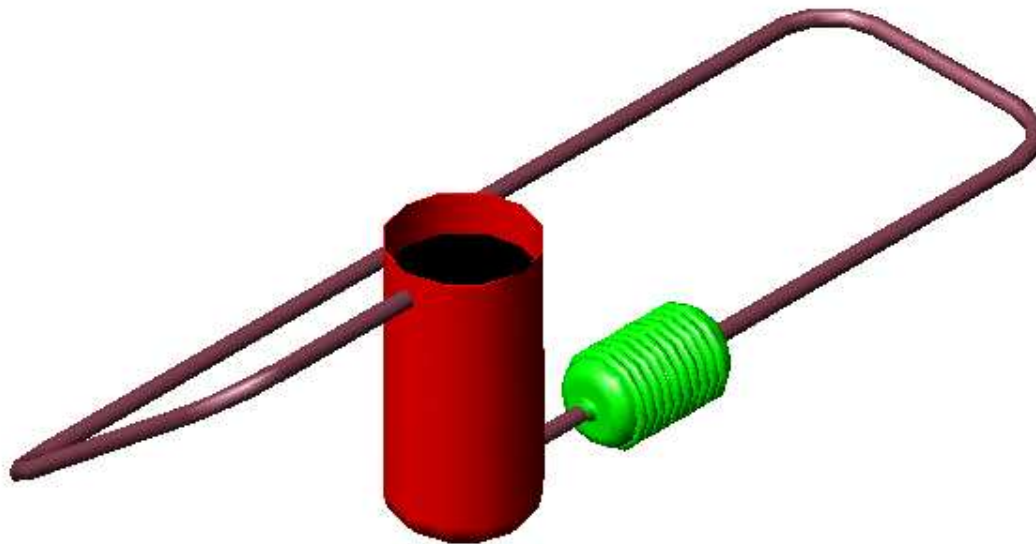


Figura 3. Esquema do projeto

O ciclo ocorreu em uma tubulação de aproximadamente 1,5 metros de comprimento que saiu e retornou a um mesmo reservatório onde servirá de referência para que ocorra a realimentação da tubulação através da potencia do motor que garantirá o fluxo contínuo do fluido.

O acompanhamento de todo o processo foi feito através de equipamentos de medição de pressão (manômetro), vazão (rotâmetro), redução da seção do tubo (paquímetro), assim como também foram observados diariamente quaisquer tipos de respostas que possam vir a ser mostradas pelo sistema de simulação.

Principais etapas do trabalho:

1. Obtenção de dutos incrustados;
2. Concepção e montagem de sistema de transporte fluido;
3. Indução e análise do processo de cavitação no sistema;
4. Avaliação dos resultados.

A obtenção de dutos incrustados, que constaria da primeira fase do projeto, não se fez possível em virtude de dificuldades de ordem técnica para aquisição dos mesmos. Porém, havendo material e suporte teórico, optou-se por também simular a incrustação na tubulação a partir de compostos derivados do próprio petróleo; haja visto que material parafínico em si é responsável por um dos mecanismos de incrustação, como exposto no subitem acima. Com isto, as tubulações de teste foram submetidas a banhos parafínicos, os quais lhes concederam uma espécie de “revestimento” interno com aspecto similar ao das incrustações comumente encontradas. Inicialmente foi idealizado o uso de três tubulações de materiais e diâmetros distintos para os ensaios, com vista a relacionar diferentes parâmetros de análise. Contudo, para esta etapa experimental foi utilizada uma tubulação de aço galvanizado nas seguintes dimensões: diâmetro externo, $\varnothing_e=16\text{mm}$; diâmetro interno, $\varnothing_i=12\text{mm}$; comprimento, $L=300\text{mm}$. Como nas incrustações comuns, a camada parafínica interna ao tubo não possui uma espessura constante, com formação de picos e vales variada ao longo de toda sua extensão.

A concepção do sistema de transporte visou ser o mais verossímil, de modo que o sistema montado constou de um circuito fechado de duto acoplado ao grupo de bombeamento (motor Dancor de $\frac{1}{4}$ de CV, 3450rpm; bomba centrífuga CAM-W4 a uma vazão máxima de $8\text{m}^3/\text{h}$) e reservatório para a manutenção do ciclo, conforme mostrado na Fig.(3).

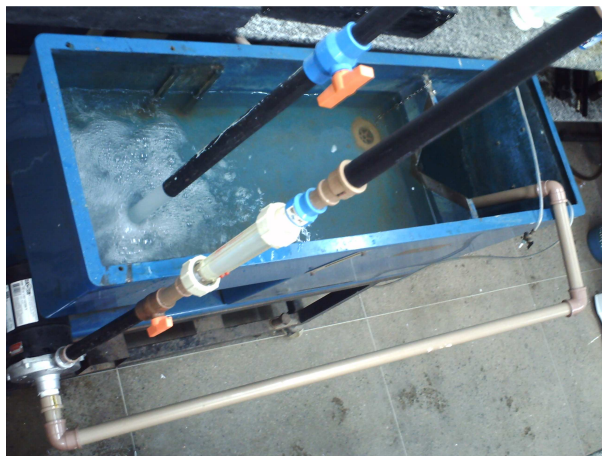


Figura 4. Sistema de transporte de fluido

Para garantir uma máxima pressão no sistema com a bomba utilizada, foi montado um sistema em um nível constante, o que garantiu também um fluxo contínuo de $8\text{m}^3/\text{h}$ durante 144h. O escoamento foi monitorado e controlado através das válvulas distribuídas na tubulação para geração dos gradientes de pressão necessários. Como metodologia experimental para induzir o aparecimento das bolhas de ar responsáveis por provocar a cavitação no sistema, foi introduzida uma pequena mangueira na entrada da tubulação com a outra extremidade direcionada para o ambiente externo. Essas bolhas aliadas à pressão induzida na tubulação ocasionaram o processo de cavitação na saída da bomba, por isso podemos dizer que ocorreu um tipo de cavitação forçada para induzir ao processo. O nível de desobstrução da tubulação foi verificado periodicamente, fazendo-se a desmontagem do sistema e observando-se os resultados já conseguidos. Com isto, pode-se observar as respostas mostradas pelo sistema de simulação e efetuar a coleta de dados necessária.



Figura 5. Bomba centrífuga utilizada

É relevante frisar que, em função do material de incrustação utilizado, substituiu-se o fluido de trabalho inicialmente idealizado; este seria o próprio petróleo, para que se pudesse trabalhar com situações mais reais, como exposto na concepção do projeto. Na prática, a água mostrou-se um bom par para o trabalho com a parafina, tendo em vista que, uma vez sendo um fluido menos viscoso que o óleo, apresenta maior facilidade para formação e desprendimento das bolhas, além de permitir uma maior mobilidade de modo que estas se desloquem de maneira aleatória dentro da tubulação chocando-se com as paredes e destruindo

a camada de incrustação. Por estas características relevantes justifica-se o uso da água como fluido de trabalho no experimento.

Uma parte do processo de limpeza ocorreu pelo arrasto de atrito entre o fluido e o material incrustado, porém essa parcela foi considerada muito pequena, tendo em vista que o material parafínico apesar de não estar uniforme em toda a tubulação possuía um acabamento superficial com uma rugosidade baixa, não permitindo que o arrasto desprendesse uma grande quantidade de material. Se não houvesse a cavitação, provavelmente levaria muito mais tempo para se conseguir os resultados desejados na desobstrução da tubulação.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o processo tendo sido monitorado, verificou-se o desprendimento tanto de partículas superficiais do revestimento, quanto de reticulados com dimensões mais relevantes. A idéia central é de que esta diferença no arrancamento do material de erosão se dá efetivamente em função da velocidade do fluido associada a pressão naquele instante. Contudo, devido a aderência irregular da camada parafínica de revestimento, houve considerável entrave em especificar a quantidade real de massa removida; sendo estimado um valor em função dos vazios de incrustação observados na tubulação. Com isto, de acordo com o tempo de fluxo e vazão de trabalho, pode-se dizer que a taxa de remoção foi de aproximadamente 30mm de desobstrução da tubulação.

De fato, como já exposto na literatura, há maior expectativa de erosão conforme maior a intensidade do processo de cavitação. Para o caso em estudo, pode-se notar que embora tenha havido remoção do material, não houve completa limpeza interna da tubulação. Isto pode ser explicado em função dos fatores já descritos: velocidade do fluido, que influi nas forças cisalhantes atuantes na camada limite em contato com as impurezas; pressão inerente ao processo de cavitação; e até mesmo o tempo de escoamento, podendo este ter sido insuficiente para abalar as forças de ligação das moléculas. Este último item permite ressaltar a influência da natureza molecular do material incrustado, de modo a tornar mais ou menos dispendioso o seu processo de remoção.

Diante dos resultados, pode-se analisar este projeto sob a ótica de duas vertentes de pesquisa: a intensidade do processo de cavitação, considerando a influência de suas variáveis; e a natureza das moléculas agregadas, segundo a influência da força de adesão do cristal com a superfície.

5 – CONCLUSÕES

A cavitação é um fenômeno que ocorre normalmente em tubos de escoamento de fluidos sob pressão;

A incrustação é um fato freqüente em tubos de escoamento de petróleo que deve ser combatido;

O fenômeno da cavitação tem ação oposta à incrustação;

Através do fenômeno da cavitação é possível que seja feito o combate ou até mesmo a eliminação da incrustação;

O combate á incrustação pode ser feito por um processo natural e barato;

Em vista do discutido, é fato que o sucesso do projeto associa-se a relação entre as vertentes de pesquisa acima definidas, obviamente, tendo sido elas plenamente elucidadas segundo a formação e a intensidade de seus mecanismos.

Pode-se considerar satisfatório o desempenho do sistema, pois embora o grau de remoção não tenha sido elevado, foi o suficiente para verificar que o processo de cavitação é capaz sim de ser utilizado para a remoção de incrustações.

Pode-se imprimir situações mais extremas de vazão, pressão, etc., para aumentar a taxa de remoção.

O experimento possibilitou maior percepção da intensidade das relações entre os parâmetros dos fenômenos associados; de modo a fomentar uma linha de investigação para a otimização das etapas seguintes do projeto.

Não se pode definir exatamente o motivo da remoção, se foi pela cavitação ou pelo arrasto de superfície.

6 – SUGESTÕES

Proporcionar sistemas de maior porte para verificar a reação com maiores pressões e velocidades.

Fazer um sistema que proporcione incrustação e cavitação com o mesmo sistema de fluxo, para verificar a possibilidade de controlar a incrustação no momento de sua formação.

Desenvolver sistemas que possam isolar a cavitação e o arrasto para verificar qual desses fenômenos demonstram mais eficiência quando se referem a remoção de incrustação.

Verificar o sistema com outros tipos de incrustação.

Buscar fontes de incrustação natural para uma melhor análise dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ambiente Brasil. **Petróleo**. Composer, 2004.

Leiroz, A., Azevedo, L. Paraffin deposition in stagnant fluid layer inside a cavity subjected to temperature gradient. 10th Braz. Congr of Thermal Sciences and Eng. – ENCIT 2004. RJ, Brasil, Nov, 2003.

Obregón, M. Hidrodinâmica do escoamento bifásico óleo pesado-água em um tubo horizontal. Unicamp, Campinas, 2001.

Oliveira, R. Estudo experimental do escoamento água-óleo com precipitação de parafinas em dutos submarinos. Unicamp, Campinas, 2005.

Petrobras. Boletim técnico. Rio de Janeiro, abril/junho 2000.

Smith, K; Blund, D. Potential radiological doses associated with the disposal of petroleum industry NORM lamdspreading. Argonne National Laboratory Report, 1998.

Usp – Universidade De São Paulo. Instituto de Física, Geologia do Petróleo. 1999.

Strapasson. A. Bacias sedimentares. Geologia do petróleo, 2002.

Testa, C; Desideri, D. Radiation protection and radioactive scale in oil and gas production. Health Physics. 1994.

Vanegas J. Estudo experimental do escoamento anular óleo-água (Core Flow) na elevação de óleos ultraviscosos. Unicamp, Campinas, 1999.

Velasquez, M. Avaliação do mecanismo de difusão molecular para a modelagem da deposição de parafina em dutos de petróleo. PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2005.

Wiers, W. C.; Sullins, J. R.; Warren, D. A. Pipeline Inspection Pig. United State Patents. 2001

Lima, Rudson de Souza. Análise do combate a incrustação através do fenômeno da cavitação e da pressão dinâmica.