

Na indústria do petróleo, o termo *garantia de escoamento* designa o conjunto de práticas que visam assegurar a integridade de sistemas de elevação e transporte, de maneira a possibilitar o livre escoamento do(s) fluido(s) transportado(s). Estas práticas englobam a previsão, prevenção e mitigação de problemas que podem surgir no transporte, desde o poço até as unidades de processamento, como a formação de depósitos de parafinas e hidratos, o comprometimento de bombas submarinas no caso da presença de padrões multifásicos indesejáveis como o de golfadas, a corrosão em dutos causada pelo descolamento do filme líquido em escoamento anular, entre outros.

Exemplos de medidas preventivas são o emprego de isolamento térmico para evitar a deposição de material orgânico nas linhas e o uso de revestimentos internos. Já a passagem de PIGs no interior dos dutos para remover depósitos constitui uma ferramenta importante de mitigação nos casos em que não é possível se evitar o problema.

Desde 2005 esta linha de pesquisa vem se consolidando no LEF, dando suporte ao setor de óleo e gás e também gerando desafios academicamente interessantes. Os principais tópicos abordados são a transferência de calor e o isolamento térmico em linhas submarinas, a deposição de parafina, o escoamento de óleos pesados com viscosidade dependente da temperatura, e a otimização da passagem de PIGs. Já a dinâmica de escoamentos multifásicos, cuja compreensão é importante na área de garantia de escoamento, é também alvo de pesquisas no laboratório, constituindo por si só uma ampla [linha de pesquisa](#).

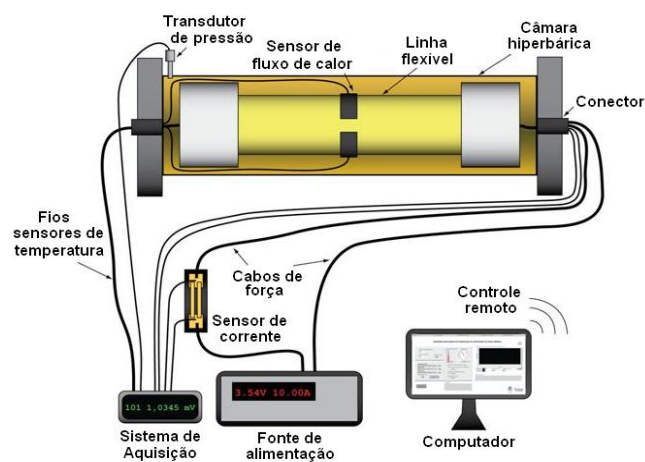


Dutos inutilizados por deposição severa de parafina (Petrobrás)

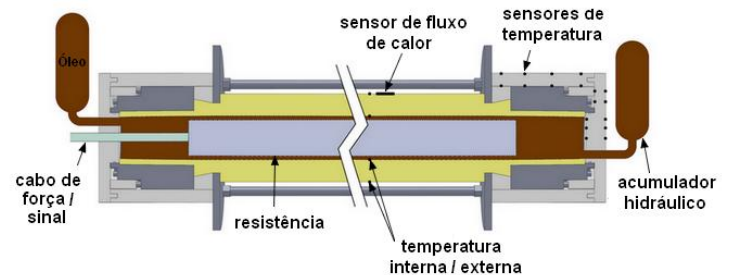
## • Transferência de Calor e Isolamento Térmico de Linhas Submarinas

Dependendo das condições de temperatura, pressão, e da composição dos fluidos em linhas submarinas, pode ocorrer a deposição de compostos minerais, parafinas e hidratos nas paredes do duto. Estes depósitos, que costumam se formar quando a diferença de temperatura entre o óleo e o exterior do tubo é grande, interferem no escoamento, aumentando drasticamente a perda de carga. Assim, este projeto visa avaliar a transferência de calor e otimizar o isolamento térmico nas linhas, de maneira a evitar tais problemas.

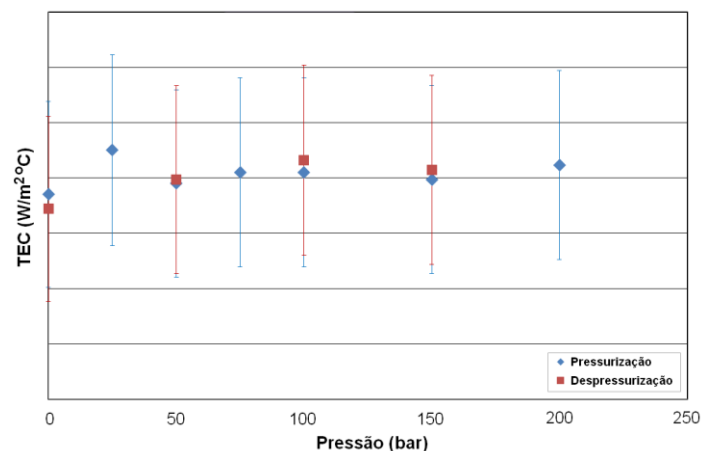
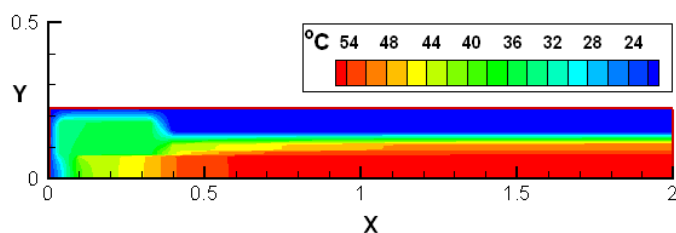
Os ensaios realizados consistem na instrumentação de uma amostra de linha real, de forma a determinar o coeficiente de troca térmica – caracterizado pelo conjunto de materiais que compõem o duto – para diferentes níveis de pressão hidrostática, atendendo um nível de incerteza experimental de até 5%. Adicionalmente, conta-se com a parceria e infra-estrutura do CTDUT para utilização de câmara hiperbárica e outras instalações.



A calibração dos sensores de temperatura e fluxo é realizada no laboratório nas mesmas condições dos ensaios. À esquerda: setup básico de experimento. Abaixo: parte interna com mais detalhes de instrumentação.



À direita: resultados para coeficiente de troca térmica (valores não podem ser revelados). Abaixo: distribuição de temperatura na amostra, obtida através de simulações numéricas conduzidas por um grupo de pesquisa colaborador.

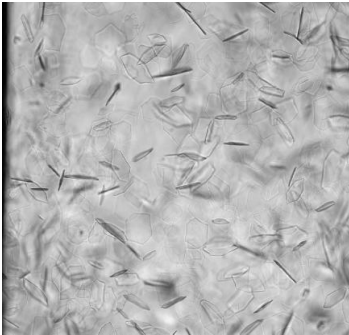


Para estes estudos o LEF conta com:

- Sensor de fluxo de calor TNO/TPD de fabricação holandesa, com sensibilidade de 20 a 25 W/m<sup>2</sup>/mV, incerteza de +-3%, temperatura máxima de 100°C, pressão máxima de 110 bar e condutividade térmica de 0.25 W/mK
- Sistema de aquisição de dados Agilent modelo 34972A
- Fonte de corrente contínua modelo HP 6031A
- Câmara hiperbárica e outras instalações no CTDUT.

## • A Deposição de Parafina

Apesar de haver formas de se evitar a formação de depósitos parafínicos nas linhas de transporte, como por exemplo o isolamento térmico mencionado acima, elas podem elevar o custo de produção, levando à inviabilidade de algumas linhas de escoamento. Torna-se importante então entender o processo de deposição uma vez que ele é iniciado, buscando assim prevenir seus efeitos negativos e buscar novas soluções.



Formação de cristais de parafina

O petróleo é uma mistura complexa, que contém de centenas a milhares de componentes. As frações do petróleo que compreendem n-alcenos, iso-alcenos e naftenos com número de carbono maior que 18 são chamadas parafinas. A maioria das parafinas de alto peso molecular é solúvel no óleo na temperatura do reservatório. Entretanto, uma vez abaixo da Temperatura Inicial de Aparecimento de Cristais (TIAC), alguns componentes da mistura sofrem transformação de fase e cristais de parafina se formam e se interligam, gerando uma estrutura gelificada. Esta estrutura pode então bloquear poços de produção, equipamentos de processamento, ou tubulações.

Embora muito esforço tenha sido feito, o processo de deposição de parafina ainda não é bem compreendido. Sua modelagem é complicada, englobando desde o desequilíbrio termodinâmico que gera os cristais sólidos até a tensão cisalhante capaz de remover o gel depositado da superfície. Os mecanismos sugeridos na literatura como responsáveis pela deposição vão da difusão de nível molecular a mecanismos de transporte de partículas. Assim, trata-se de um campo de conhecimento multidisciplinar, que envolve ciências como transferência de calor, mecânica dos fluidos, transformação de fase e termodinâmica, entre outras.

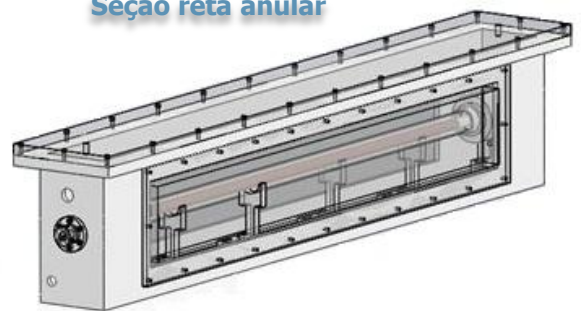
A estratégia experimental adotada é a de conduzir experimentos que reproduzam situações encontradas na produção e transporte de petróleo, mas em geometrias simples, com fluidos-modelo e condições de contorno conhecidas. Ensaios são realizados com temperaturas interna e ambiente bem controladas, em dois tipos de seção de testes.

Os resultados experimentais vêm contribuindo, há mais de uma década, para um constante progresso no entendimento dos mecanismos físicos envolvidos na formação de depósitos de parafina sólida em dutos. Gera-se também um banco de dados relevante para comparação com modelos teóricos e numéricos (resultados numéricos são gerados por um grupo de pesquisa colaborador).

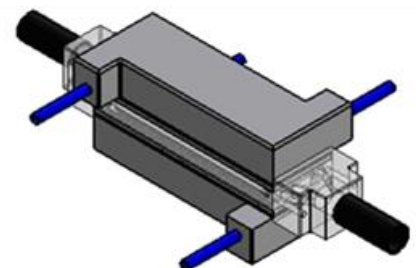
Alguns dos resultados gerados nos experimentos de deposição parafínica são:

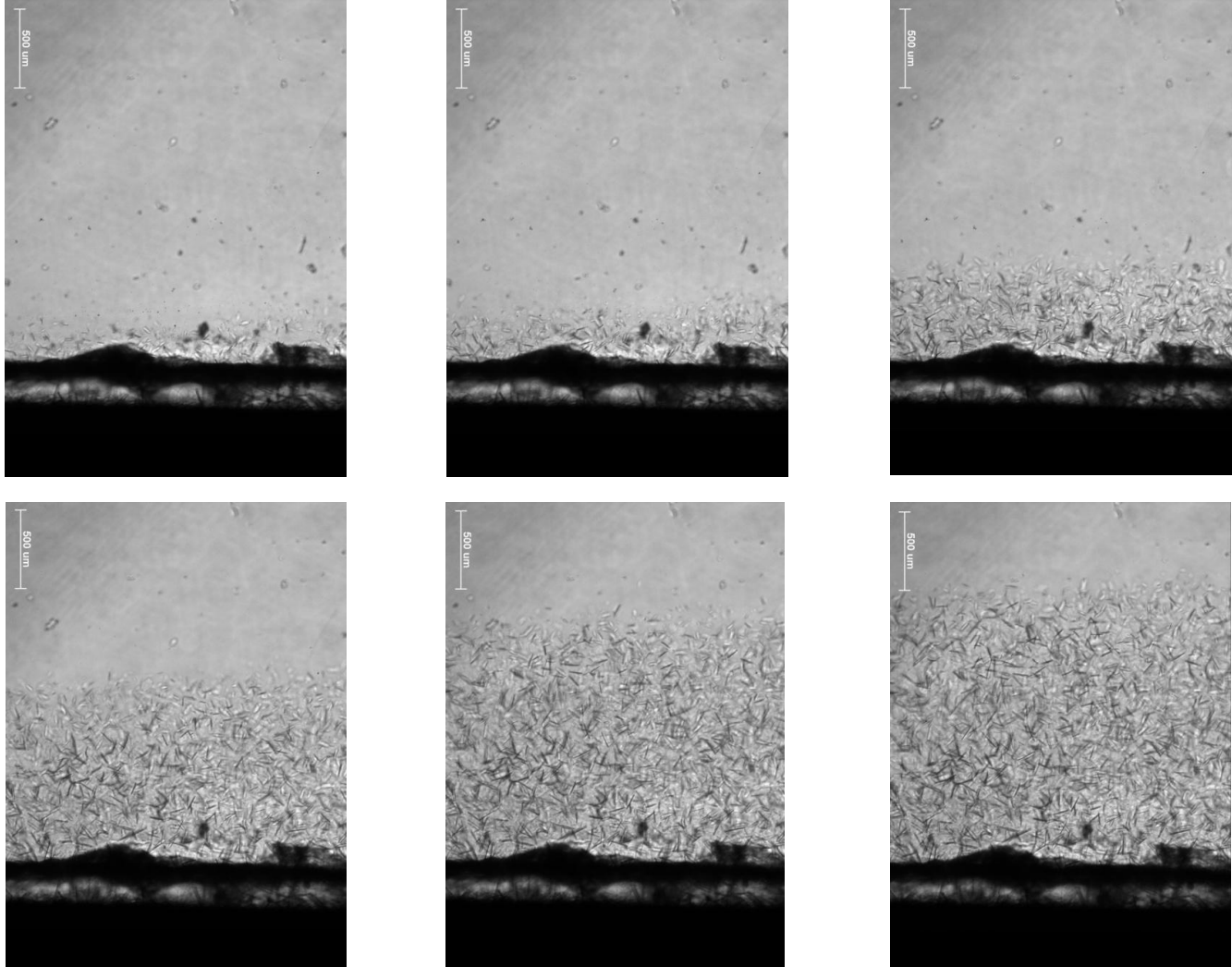
- Espessura e taxa de crescimento dos depósitos (perfis espaciais e temporais), avaliados a partir da análise de imagens digitais para condições de temperatura e velocidade variadas
- Distribuição de temperatura no escoamento
- Perfis de velocidade
- Propriedades térmicas dos depósitos ( $k$ ,  $c_p$ ), medidas após sua remoção ao fim do processo
- Composição dos depósitos
- Perda de carga nas linhas com depósito

Seção reta anular

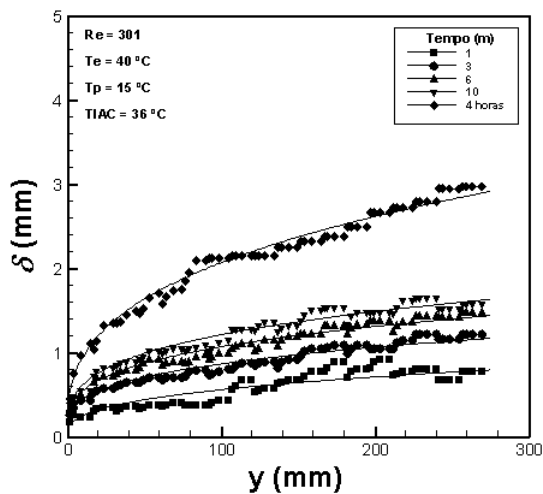


Seção reta retangular





Acima: série de imagens instantâneas do processo de deposição a partir do resfriamento da parede em escoamento com cristais suspensos em seção retangular.



Acima: evolução temporal de perfis de deposição.

A infra-estrutura do laboratório voltada para esta área de pesquisa inclui:

- Seção de testes anular, com 40mm de diâmetro externo, espaço anular de 10mm e comprimento de 1m, para visualização / medição da dinâmica de deposição e geração de banco de dados
- Seção de testes retangular, com seção reta de 40mm x 10mm e comprimento de 150mm, para caracterização das propriedades do depósito
  - Microscópio ótico
  - Bombas volumétricas
  - Tanques
- Banhos termostáticos e chillers
- Câmeras
- Controladores de potência e fontes
- Fitas de aquecimento
- Termopares e sensores de fluxo de calor
- Sistemas de aquisição de dados



## • Escoamento de Óleos Pesados

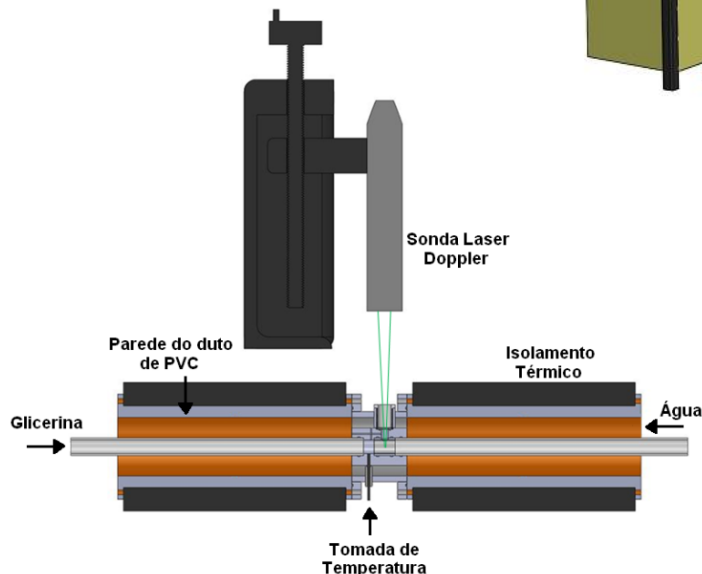
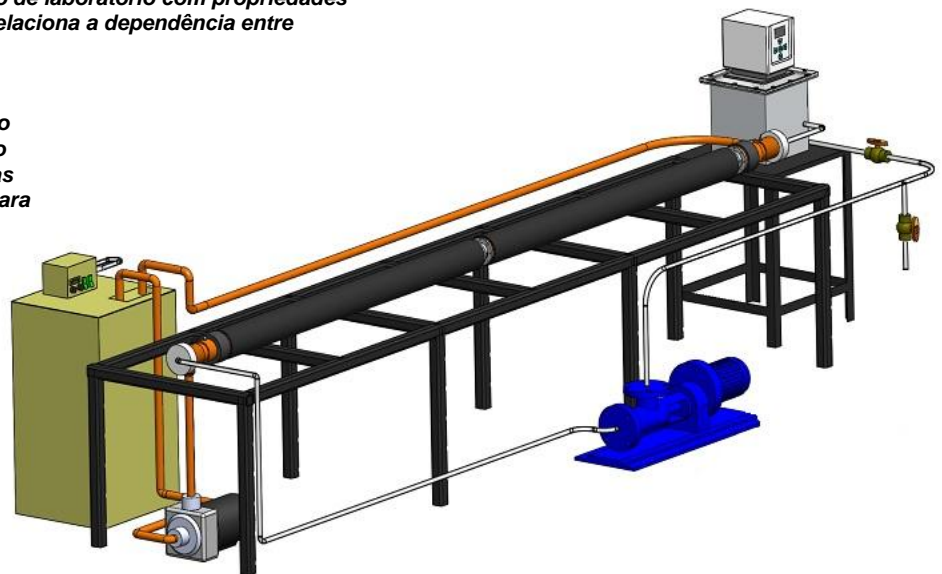
Devido aos baixos níveis de temperatura nos campos de águas profundas, a transferência de calor do petróleo escoando no interior dos dutos para o ambiente marinho pode levar ao seu resfriamento e conseqüente aumento da viscosidade, o que por sua vez implica em maior potência consumida para bombeamento do fluido. Assim, é comum o isolamento térmico dos dutos, com o intuito de diminuir as perdas de calor.

Por causa destas perdas ao longo do duto, a temperatura do óleo varia continuamente em seu comprimento, e aparecem também gradientes radiais de temperatura. A relação entre vazão bombeada e queda de pressão na linha se afasta do comportamento linear esperado para fluidos com propriedades independentes da temperatura. A presença de correntes de convecção natural também pode alterar as características do escoamento, afastando significativamente os perfis de velocidade dos perfis parabólicos característicos de escoamentos laminares hidrodinamicamente desenvolvidos de fluidos Newtonianos, e impondo efeitos adicionais na queda de pressão do escoamento.

A capacidade de previsão do comportamento de escoamentos de óleos pesados através de dutos instalados em águas frias é fundamental para o projeto de instalações de bombeamento e para a análise do desempenho hidrodinâmico dos dutos. Assim, é necessário que se entenda os mecanismos que controlam este escoamento, avaliando a importância relativa de cada um deles, de modo que modelos de simulação simples e confiáveis possam ser desenvolvidos e utilizados com segurança em situações de projeto.

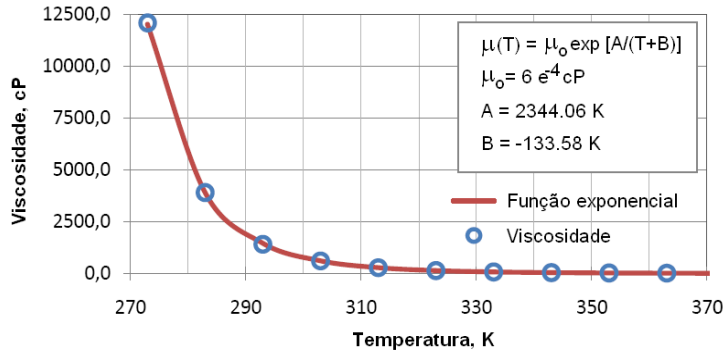
De maneira a contribuir para a análise destas questões, o LEF realiza experimentos em um duto de escala reduzida, mas em uma faixa de parâmetros adimensionais correspondente à operação de dutos reais. Utiliza-se um fluido-modelo de laboratório com propriedades similares às do petróleo, notadamente a função que relaciona a dependência entre viscosidade e temperatura.

Para reproduzir condições de campo, dois tubos concêntricos são utilizados, um para o escoamento do fluido de trabalho e outro para o escoamento do fluido refrigerante. Banhos termostáticos mantêm ambos nas temperaturas desejadas. Termopares são utilizados para registrar a temperatura nas regiões de interesse.



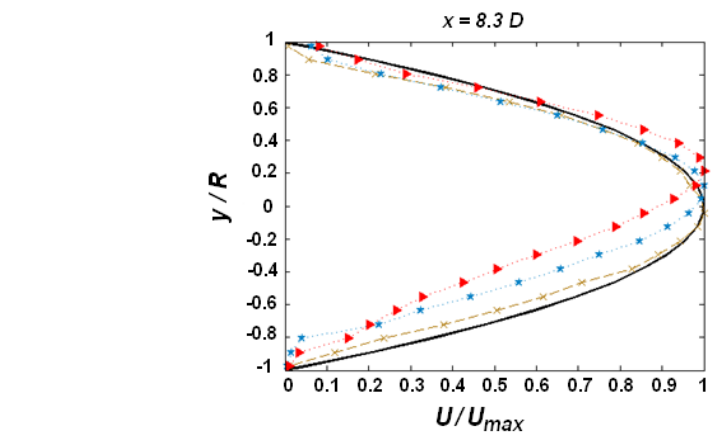
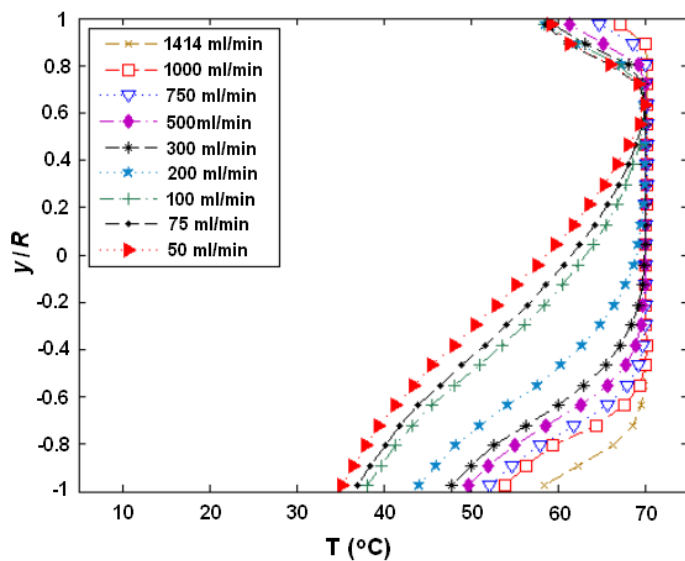
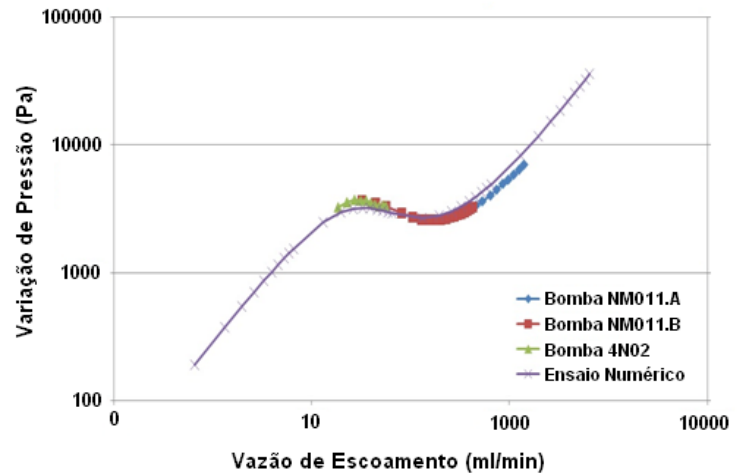
Além da queda de pressão e das temperaturas na linha de centro do tubo, são realizadas medições de perfis radiais de temperatura e velocidade em diferentes posições axiais ao longo do escoamento. Os perfis de velocidade são adquiridos com a técnica de Velocimetria Laser Doppler (em inglês, LDV, Laser Doppler Velocimetry).

Uma janela de visualização foi elaborada para permitir o acesso óptico dos feixes de laser até o interior do tubo central para medição de velocidade, minimizando os efeitos de sua passagem por meios óticos de diferentes índices de refração (ar, água-etileno glicol e solução de glicerina), o que provocaria distorções indesejadas.



Acima: variação da viscosidade com a temperatura, medida experimentalmente e modelada por função exponencial.

À direita: diferencial de pressão medido experimentalmente para várias faixas de vazão através da utilização de diferentes bombas, e comparação com ensaio numérico.



Acima: perfis radiais de velocidade axial. Devido à convecção natural, as curvas se afastam do perfil analítico parabólico (linha cheia preta).

À esquerda: perfis radiais de temperatura para diferentes vazões.

Alguns dos equipamentos disponíveis para estes experimentos são:

- Banho termostático Thermoscientific SC100, para altas temperaturas
- Banho termostático Thermoscientific Merlin NESLAB M75, para baixas temperaturas
- Bomba de cavidade progressiva NETZSCH NM011
- Bomba de cavidade progressiva NEMO 4N02
- Bomba centrífuga Dancor CP
- Manômetro diferencial Zurich
- Sistema de aquisição de dados Agilent 34970A
- Laser Doppler TSI Innova 70

## Parcerias



<http://lef.mec.puc-rio.br>

Lfaa@puc-rio.br

tel.: +55 21 3527-1181