

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Ana Beatriz de Oliveira Gonçalves Lima**

**Estudo Experimental da Remoção  
por Aquecimento de Depósitos de  
Parafina em Dutos**

**Projeto de  
Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Luis Fernando Alzuir Azevedo

Coorientador: Ivan Fernney Ibañez Aguilar

Rio de Janeiro

Julho de 2024

## **Agradecimentos**

Agradeço à minha família que tanto amo, por toda a confiança e investimento realizados durante todos esses anos. Sem as palavras de motivação e apoio principalmente da minha mãe, do meu irmão João Rodrigo e do meu pai nada disso teria sido possível. Obrigada por confiarem em mim e no meu potencial até quando eu mesma não confiava.

Agradeço ao meu orientador, professor Luiz Fernando Azevedo por ser um exemplo e inspiração para além das salas de aula e ao meu coorientador Dr. Ivan Ibañez por toda a solicitude e apoio durante o trabalho.

Agradeço pelas pessoas queridas e amadas que me acompanharam durante essa árdua caminhada tornando tudo mais leve, em especial ao Paulo Lucas Nunes, ao Daniel Pereira, à Louise Erthal, à Karoline Nascimento, à Eduarda Mullinari, ao Pedro Ivo Saud e ao Maurício Rodrigues, por toda a ajuda, pelas alegrias, união, compreensão e motivação durante essa etapa.

Agradeço aos colegas que tive o prazer de conhecer no Laboratório de Engenharia de Fluidos (LEF - PUC Rio), principalmente ao Omar Elias, por toda a paciência, apoio e ajuda nos testes experimentais; ao Leonardo Pinhal (Leozinho) pela ajuda na manutenção da bancada experimental e por todo o alto astral, brincadeiras e lições de vida que pudemos compartilhar e a Luziene (Tia), pela alegria, pelo cuidado, pela limpeza e capricho de sempre com o laboratório.

Agradeço pelas oportunidades bem vividas que tive e pelas que estão por vir.

Agradeço a todos os professores do departamento de Engenharia Mecânica pela dedicação e pelos ensinamentos recebidos e a professora Daniela Soluri do departamento de Química pelo apoio e confiança no início da minha graduação.

Agradeço à PUC e aos investidores do projeto do LEF em questão pelo apoio concedido no desenvolvimento deste trabalho.

## **Resumo**

### **Estudo Experimental da Remoção por Aquecimento de Depósitos de Parafina em dutos**

Este trabalho apresenta um estudo experimental detalhado sobre os processos de formação, crescimento e remoção de depósitos de parafina em uma seção de testes tipo “loop”, enfatizando a análise do tempo de resfriamento e da temperatura de aquecimento para conduzir a remoção. A pesquisa visa caracterizar a eficiência do processo de remoção por aquecimento, essencial para manter a operacionalidade das linhas de transporte de petróleo. Os resultados experimentais, obtidos a partir de quatro configurações de testes diferentes, são analisados quanto à espessura dos depósitos e tempo de remoção. As imagens capturadas durante os experimentos fornecem uma visualização clara do processo de deposição e remoção. A comparação entre os dados experimentais e as simulações numéricas valida as simulações na previsão e mitigação de problemas operacionais. Este trabalho demonstra a importância da integração entre experimentos controlados e simulações numéricas para otimizar processos industriais, especialmente na indústria de petróleo, onde a remoção eficiente de depósitos de parafina é crucial. O estudo conclui destacando a necessidade de pesquisas futuras para explorar diferentes taxas de resfriamento, velocidades de deslocamento dos depósitos e efeitos gravitacionais, visando aprimorar ainda mais as técnicas de remoção de parafina e garantir operações mais seguras e eficientes.

### **Palavras-Chave**

Deposição de parafina; envelhecimento; remoção por aquecimento de parafina.

## **Abstract**

### **Experimental Study of Wax Deposit Removal by Heating**

The present work describes a detailed experimental study on the processes of formation, growth, and removal of paraffin deposits in a loop-type test section, emphasizing the analysis of cooling time and heating temperature to promote removal. The research aims to characterize the efficiency of the removal process by heating, essential for maintaining the operability of oil transportation lines. The experimental results, obtained for four different test configurations, are analyzed in terms of deposit thickness and removal time. The images captured during the experiments provided a clear visualization of the deposition and removal processes. The comparison between experimental data and numerical simulations validates the effectiveness of simulations in predicting operational problems. This work demonstrates the importance of integrating controlled experiments and numerical simulations to optimize industrial processes, especially in the oil industry, where efficient removal of paraffin deposits is crucial. The study concludes by highlighting the need for future research to explore different cooling rates, deposit displacement speeds, and gravitational effects, aiming to further improve paraffin removal techniques and ensure safer and more efficient operations.

## **Keywords**

Paraffin deposition; aging; paraffin removal by heating.

## Sumário

1 INTRODUÇÃO .....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 Mecanismos de formação de depósito .....	13
2.1.1 Difusão Molecular (Transporte de Massa) .....	14
2.1.2 Difusão Browniana .....	14
2.1.3 Dispersão por Cisalhamento.....	15
2.1.4 Deposição por efeito gravitacional.....	15
2.2 Influência das taxas de resfriamento.....	15
2.3 Remoção de depósitos de parafina por aquecimento .....	16
3 EXPERIMENTO .....	18
3.1 Descrição da Configuração do Experimento .....	18
3.2 Instrumentação .....	21
3.2.1 Tubo de Acrílico.....	21
3.2.2 Tubo de Cobre.....	22
3.2.3 Reservatório da Mistura de Trabalho .....	22
3.2.4 Circuladores de Banho.....	25
3.2.5 Bomba Volumétrica .....	26
3.2.6 Câmera .....	27
3.2.7 Placa de aquisição .....	27
3.3. Aquisição da Temperatura.....	28
3.4 Aquisição da Espessura do depósito .....	28
3.5 Aquisição do Tempo de remoção.....	28
4 RESULTADOS .....	29
4.1 Caracterização dos depósitos formados nas etapas de resfriamento .....	31
4.1.1 Curva de Temperatura .....	31
4.1.2 Espessura do depósito.....	33
4.2 Resultado da Remoção de Depósito de Parafina por Aquecimento.....	35
4.2.1 Atributos físicos observados no percurso do processo de remoção por aquecimento.....	35
4.2.2 Tempo de Remoção.....	40
.....	42
4.3 Comparação do Resultado numérico e Experimental .....	43
4.4 Incertezas.....	44
5 CONCLUSÃO.....	46

Referência bibliográfica..... 48

## Lista de Figuras

Figura 1: Ilustração do Processo de Difusão Molecular. Extraído de Huang (2015).....	14
Figura 2: Esquema da Bancada Experimental para o estudo do processo de remoção de parafina. Extraído de Linhares et al (2020).....	18
Figura 3: Bancada Experimental para o estudo do processo de remoção de parafina realizado no LEF PUC-Rio. ....	19
Figura 4: Geometria da Seção anular. Extraído de Veiga et al (2017) ....	19
Figura 5: Curva de calibração da bomba. Extraído de Veiga et al (2017)	20
Figura 6: Tubo de acrílico. ....	22
Figura 7: Tubo de cobre na posição da aquisição de imagens. ....	22
Figura 8: Reservatório da Mistura de Trabalho.....	23
Figura 9: Misturador do reservatório da mistura de trabalho.....	23
Figura 10: Cromatografia do fluido de teste. Extraído de Veiga et al (2020) .....	24
Figura 11: Configuração da manobra de válvulas dos circuladores de banho .....	25
Figura 12: Circulador de Imersão. ....	26
Figura 13: Inversor de frequência da WEG e ao fundo a bomba volumétrica Netzsch.....	26
Figura 14: Configuração da aquisição de imagens.....	27
Figura 15: Esquema das temperaturas de Aquecimento, Resfriamento, Tempo de deposição e Taxas de Resfriamento dos Experimentos .....	29
Figura 16: Imagens capturadas no processo de deposição e remoção. (a): início da formação de depósito (b): depósito formado (c): final do processo de remoção (d): remoção completa caracterizada pelo aparecimento total do tubo de cobre.....	30
Figura 17: Ilustração da seção anular, destacada em azul pontilhado a área de aquisição de imagens e em vermelho a área de aquisição de imagens pós processamento .....	30
Figura 18: Curva de Temperatura do Teste 1 .....	31
Figura 19: Curva de Temperatura do Teste 2 .....	32
Figura 20: Curva de Temperatura do Teste 3 .....	32
Figura 21: Curva de Temperatura do Teste 4 .....	33
Figura 22: Fotografias aquisitadas em diferentes instantes do processo de remoção do teste 1.....	37
Figura 23: Fotografias aquisitadas em diferentes instantes do processo de remoção do teste 2.....	38
Figura 24: Comprimento final do depósito dos testes durante a remoção (a): Teste 1 (b): Teste 2 (c): Teste 3 (d): Testes 4.....	39
Figura 25: Tempo de remoção dos 4 Testes.....	40
Figura 26: Curva de temperatura na parede do tubo de cobre durante a remoção de depósito nos 4 testes .....	41

Figura 27: Curva de temperatura do teste 3 com destaque central na oscilação observada.....	42
Figura 28: Curva de temperatura do teste 4 com destaque central na oscilação observada.....	43
Figura 29: Curva da variação temporal da espessura do depósito durante o processo de remoção por aquecimento no teste 2 .....	44

## **Lista de tabelas**

Tabela 1: Testes realizados no Experimento .....	21
Tabela 2: Composição da Mistura utilizada no Experimento .....	24
Tabela 3: Espessura do depósito de cada experimento .....	35
Tabela 5: Incerteza da Espessura dos Testes .....	44
Tabela 6: Incerteza da Temperatura dos Testes .....	45

# 1 INTRODUÇÃO

O petróleo é uma das principais fontes de energia no mundo e desempenha importante papel na economia global, sendo essencial para funcionamento de indústrias e da geração de energia elétrica. Apesar do crescimento da exploração de fontes renováveis, o petróleo ainda tem uma significativa participação do fornecimento de energia mundial. A exploração de petróleo tem grande impacto financeiro, sendo responsável por gerar muitos empregos direta e indiretamente, além de ser fonte vital de receita na economia de muitos países.

Atualmente a indústria do petróleo representa no Brasil cerca de 10% do PIB atual do Brasil (Oddene, D., 2017).

A exploração do petróleo é um assunto de grande estudo já que envolve diversos desafios e complexidades. O contato das linhas de transporte de petróleo com as baixas temperaturas das águas profundas pode possibilitar o surgimento de depósitos de parafina. Quando a temperatura do petróleo transportado diminui abaixo da Temperatura Inicial de Aparecimento do Cristal (TIAC) apresenta-se a cristalização e solidificação dos hidrocarbonetos parafínicos que posteriormente podem depositar-se nas paredes internas do duto. Como consequência do aumento da espessura dos depósitos de parafina o entupimento dos dutos acontece.

Para que os cristais formados pela deposição de parafina não obstruam dutos, são necessários mecanismos de desobstrução. Ibanez et al (2022) cita mecanismos disponíveis na indústria para atenuar os efeitos do depósito de parafina, entre eles: a remoção mecânica através de PIG's; o uso de inibidores químicos; o uso de isolantes térmicos e a remoção por aquecimento.

O entupimento das linhas de petróleo gera prejuízos bilionários já que envolve a paralização das linhas e altos custos de manutenção e reparo. Além do prejuízo financeiro podem ocorrer danos ambientais devido ao entupimento das linhas, as empresas responsáveis são suscetíveis a enfrentar multas, penalidades e processos judiciais, além de danos à sua imagem e a saúde pública da população ao redor da área explorada.

Diante das motivações apresentadas, o Laboratório de Fluidos Engenharia Mecânica da PUC-Rio desenvolve um projeto de pesquisa há alguns anos com o

objetivo de contribuir para o entendimento dos mecanismos que governam a deposição e remoção de depósitos de parafina nas linhas de petróleo. O trabalho em questão é parte desta linha de pesquisa, e nele será analisado por meio de experimentos o processo de remoção por aquecimento de depósitos de parafina, tendo como base pesquisas anteriores do laboratório sobre a deposição e composição química da mistura parafínica. Em paralelo com o estudo experimental em questão, são realizadas simulações numéricas que são refinadas e validadas pela comparação com os experimentos.

A seção de teste utilizada foi desenvolvida e aprimorada durante os anos de pesquisa para obter cada vez mais, condições iniciais e de contorno bem definidas e controladas. A transparência dos materiais escolhidos para a montagem da bancada, permitem a visualização de todo o processo que envolve o teste.

Neste trabalho de conclusão de curso, foram conduzidos estudos experimentais sobre os processos de formação e remoção de depósitos de parafina. Neste estudo dois parâmetros do processo de remoção foram avaliados parametricamente, i.e.: tempo de resfriamento ou envelhecimento e temperatura de aquecimento ou remoção. Buscou-se, neste estudo, caracterizar a eficiência do processo de remoção por aquecimento em termos destes parâmetros.

Os resultados alcançados foram então comparados com as simulações numéricas. As simulações auxiliam na antecipação diante de acidentes que podem vir a ocorrer nas linhas de operação, desse modo é possível prever pontos de entupimentos e analisar qual forma de remoção é mais cabível para cada caso individual antes dele ocorrer. Diante da importância da análise computacional e das limitações dos procedimentos experimentais em comparação com os casos de aplicação, os experimentos são uma possibilidade de validação de simulações e de visualização dos fenômenos presente nas operações de extração de petróleo. É importante ressaltar que o desenvolvimento dos simuladores computacionais dos processos de deposição e remoção dos depósitos de parafina não fez parte do presente trabalho. Os códigos desenvolvidos pelos pesquisadores do LEF foram utilizados no presente trabalho para gerar resultados que foram comparados com os experimentos conduzidos.

O presente trabalho é dividido em 5 capítulos.

No capítulo 1 foi apresentada a motivação da pesquisa e uma introdução do que será apresentado neste estudo.

O capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica dos tópicos que envolvem os fenômenos de deposição e da remoção dos depósitos de parafina.

O capítulo 3 tem como assunto principal a caracterização do arranjo experimental, apresentando a descrição da configuração, os procedimentos que estão envolvidos; detalhando os equipamentos que compõe a seção de teste e apresentando a influência dos componentes para a obter bons resultados com condições finamente controladas.

No capítulo 4 serão apresentados os modos de aquisição de cada resultado e serão mostrados os resultados e as suas incertezas e a comparação do resultado numérico e o experimental.

No capítulo 5 é apresentada a conclusão do estudo e reiteradas as questões mais relevantes das análises realizadas em todo o estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão a seguir abrange estudos acadêmicos publicados entre 1958 e 2024 relevantes sobre os mecanismos de deposição de parafina, influência das taxas de resfriamento e remoção dos depósitos de parafina por aquecimento.

### 2.1 Mecanismos de formação de depósito

Neste tópico serão apresentados os principais achados de estudos que buscaram explicar o fenômeno da formação de depósito de parafina.

Jessen e Howell (1958) foram pioneiros no estudo dos mecanismos de formação de depósito da parafina, como conclusão foram apresentadas duas possibilidades de deposição; i.e.: o depósito sendo formado próximo as paredes dos dutos e a incorporação de cristais precipitados no depósito.

Com o decorrer dos anos diversos estudos foram desenvolvidos para entender o fenômeno da formação de depósito de parafina. Burguer et al (1981) com seu extenso e conceituado estudo descreveu quatro hipóteses de mecanismos de formação de depósito: difusão molecular, dispersão por cisalhamento, difusão Browniana e deposição por efeito gravitacional.

O mecanismo de formação de depósito mais citado é a difusão molecular (Burguer; Perkins e Striegler, 1981), a difusão Browniana também é citada na literatura e ambas são baseadas na hipótese da difusão das partículas de parafina presentes no petróleo e de seu alojamento nas paredes das tubulações, mas a razão do alojamento é diferente para as duas explicações e serão discutidas mais afundo posteriormente.

A dispersão por cisalhamento e a deposição por efeito gravitacional são outros mecanismos citados que serão explicitados abaixo.

Outros mecanismos como a transferência de calor e o comportamento não-newtoniano da mistura parafínica foram identificados recentemente por autores como relevantes no estudo do fenômeno de deposição de parafina. (Veiga, 2020)

### 2.1.1 Difusão Molecular (Transporte de Massa)

A difusão molecular é o processo físico caracterizado pelo movimento de moléculas na fase líquida da região de maior concentração para a de menor concentração. No caso do transporte da parafina, o deslocamento é da parte mais quente para a mais fria. A região mais quente tem maior concentração de parafina na solução e a região mais fria tem menor concentração, já que a solubilidade da parafina é inversa à temperatura. Segundo Burger, Perkins e Striegler (1981) pode-se concluir que ao entrar em contato com a interface sólido/líquido, ou seja, a interface entre o depósito e o óleo, toda a parafina dissolvida em solução precipitará e será transportada por difusão molecular em direção à parede. A figura 1 apresenta a ilustração do processo de difusão molecular.

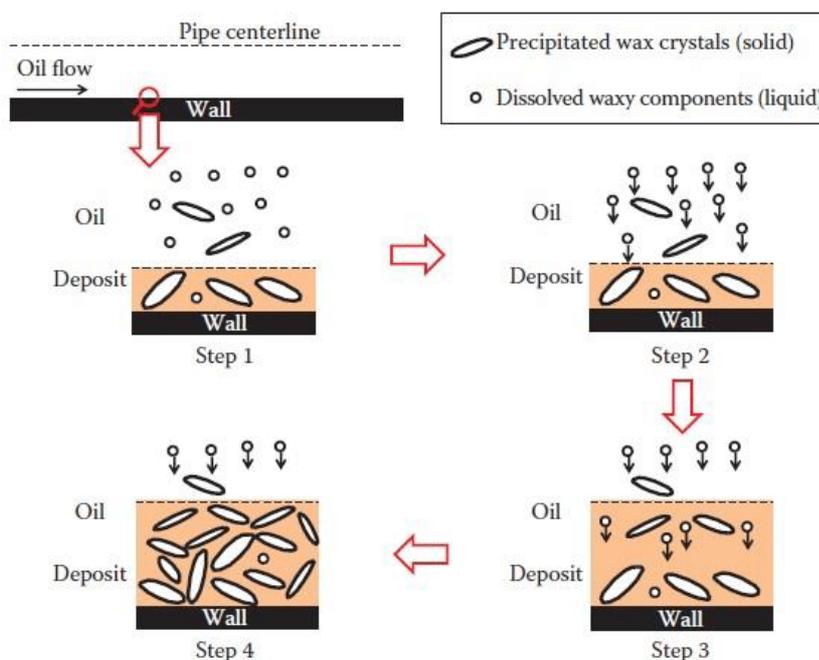


Figura 1: Ilustração do Processo de Difusão Molecular. Extraído de Huang (2015)

### 2.1.2 Difusão Browniana

A difusão browniana é o movimento aleatório de partículas suspensas em um fluido. No caso da parafina os cristais que precipitam por estar em uma temperatura abaixo da TIAC ficam suspensos na parte líquida, os cristais se chocam com outras partículas agitadas e geram movimentos aleatórios denominado Movimento Browniano.

Para autores como Burger (1981) a difusão browniana não é tão relevante devido à sua pequena contribuição quando comparada com os outros mecanismos.

Um ponto de análise da pouca contribuição é que esse mecanismo ocorre mais no centro do tubo, e não nas paredes onde partículas já estão mais solidificadas e formam depósito.

### **2.1.3 Dispersão por Cisalhamento**

Segundo Azevedo et al (2003), a dispersão por cisalhamento é caracterizada pela interação entre difusão molecular e as variações de velocidade dentro do escoamento. Ela é definida pelo deslocamento de partículas sólidas, no caso, os cristais de parafina são levados pelo escoamento deformado devido à um gradiente de velocidade. Uma força lateral proporcional ao gradiente de velocidade move as partículas para a lateral, podendo deslocá-las até as paredes.

### **2.1.4 Deposição por efeito gravitacional**

A deposição de parafina por efeito gravitacional é causada pela separação da parafina e do óleo do petróleo. Quando o petróleo atinge temperatura menor que a TIAC, a parafina solidifica e se deposita nas paredes da tubulação por ser menos densa que o petróleo, pelo efeito da gravidade esse acúmulo tende a ser maior nas partes inferiores das tubulações.

Entretanto, Leiroz (2004) descarta a influência da gravidade com base em testes em uma bancada com cálculo da espessura da parte superior e inferior de uma seção quadrática com depósito formado.

## **2.2 Influência das taxas de resfriamento**

Theyab et al (2018) concluem em seu trabalho que a temperatura de resfriamento influencia na espessura de depósito. Quanto mais abaixo da TIAC a temperatura de trabalho, maior a deposição de parafina. Inicialmente a taxa de crescimento do depósito é grande, entretanto ao decorrer do tempo a taxa de

crescimento diminui, tal fato se deve pela camada formada durante este tempo, devido à temperatura inferior a TIAC, funcionar como um isolante térmico.

Segundo Theyab et al (2018) em altas taxas de resfriamento são formados cristais menores e em maior quantidade, nas baixas taxas de resfriamento o processo de cristalização ocorre de forma mais uniforme.

### **2.3 Remoção de depósitos de parafina por aquecimento**

Não só as pesquisas que buscam compreender os mecanismos de deposição são relevantes, mas também os estudos relacionados aos mecanismos de remoção. A remoção de depósitos de parafina por aquecimento de dutos tem sido estudada por Ibanez et al (2022), Bell et al (2021), Albuquerque et al (2019), Santos et al (2024) e Wang et al (2024).

Ibanez et al (2022) avaliaram numericamente através da dinâmica de fluidos computacional, a influência de diversos períodos de resfriamento na eficiência da remoção de parafina por aquecimento. Como conclusão, foi observado que à medida que aumentavam o período de resfriamento, o tempo necessário para remover o depósito por completo aumentava. Esse aumento nos tempos de remoção pode ser entendido como um efeito do maior envelhecimento do depósito de parafina.

Bell et al (2021) observaram de forma experimental que o depósito de parafina com baixas concentrações de partículas de alto peso molecular possibilitam a remoção de mais da metade do acúmulo com pequenos aumentos de temperatura (4% da TIAC).

Albuquerque et al (2019) abordaram numericamente a deposição e remoção de parafina em oleodutos submarinos através de aquecimento elétrico. O modelo numérico desenvolvido considerou a difusão molecular como principal mecanismo de deposição. Os resultados obtidos foram qualitativamente concordantes com os estudos experimentais, as simulações apontam que a técnica é eficaz para manter o fluxo e postergar a necessidade de intervenções.

Santos et al (2024) analisaram experimentalmente a remoção do depósito de parafina em diferentes condições de temperatura e fluxo, para isso foi utilizado um loop de fluxo equipado com um microscópico. Os resultados indicaram que a

eficácia da remoção foi maior em altas temperaturas (50,6°C e 43,3°C) e em temperaturas abaixo da TIAC (30,6°C, TIAC-2,3°C segundo Santos et al) a remoção foi ineficaz. A eficiência da remoção também teve influência do regime de fluxo, sendo maior em casos de regime laminar do que nos turbulentos.

Wang et al (2024) investigaram numericamente o tempo de derretimento de parafina necessário para a remoção de parafina através de lavagem térmica, analisando a fusão da parafina durante o processo. A validação da análise numérica foi feita através de dados do tempo de lavagem térmica do poço Cha 76-11X1. Como resultado, observaram a influência da espessura do depósito e a vazão de água, e em menor escala, a influência da temperatura inicial da parafina, da água e da parede interna do tubo. Além disso foi desenvolvida uma correlação para prever o tempo de fusão da parafina.

### 3 EXPERIMENTO

Os testes experimentais foram realizados para que fossem capturadas imagens do processo de remoção para a análise visual dos fenômenos que englobam o processo, além de analisar curvas de temperatura do início da deposição até o fim da remoção total dos depósitos; foram obtidas as medidas da espessura do depósito para testes realizados com diferentes parâmetros de temperatura de deposição e de remoção e diferentes tempos de endurecimento, por fim foi obtido também o tempo de remoção para os diferentes casos. Todos os testes foram realizados com 3 repetições, com condições iniciais e de contorno bem controladas para obter resultados precisos.

#### 3.1 Descrição da Configuração do Experimento

As figuras 2 e 3 apresentam uma visão geral da configuração do experimento. A seção anular da figura 4 é formada por 2 tubos concêntricos de 1050x34x19mm (comprimento x diâmetro externo e diâmetro interno) sendo um o tubo de cobre de diâmetro externo de 19mm e o outro tubo de acrílico transparente de 34mm de diâmetro externo, com uma distância de 7,5mm entre o tubo de acrílico e o de cobre. Neste *gap* de 7,5 mm circula a mistura parafínica e no interior do tubo de cobre circula a água, na qual a temperatura varia de acordo com a fase do experimento.

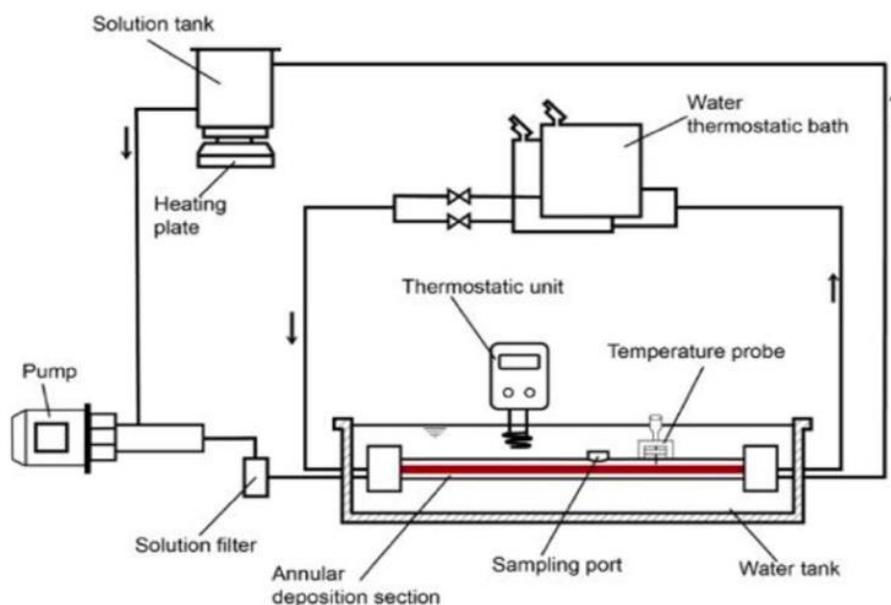


Figura 2: Esquema da Bancada Experimental para o estudo do processo de remoção de parafina.

Extraído de Linhares et al (2020)



Figura 3: Bancada Experimental para o estudo do processo de remoção de parafina realizado no LEF PUC-Rio.

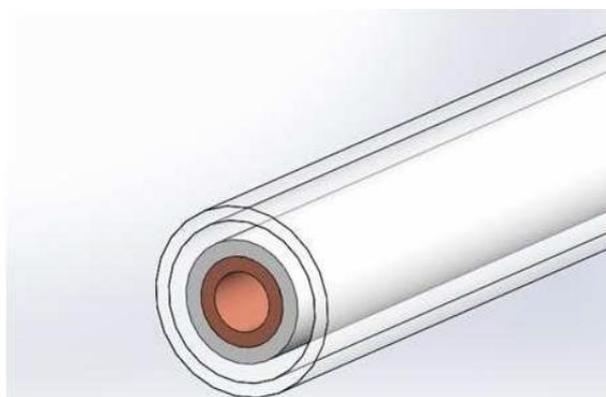


Figura 4: Geometria da Seção anular. Extraído de Veiga et al (2017)

Antes de iniciar o experimento, é necessária a preparação da mistura de trabalho para que ela esteja no estado ideal para circular na seção anular. Para que isso seja possível, a parafina armazenada em um reservatório de aço inox de 30L de capacidade máxima, é aquecida por um aquecedor elétrico disposto na base do reservatório (Ver Figura 8), e misturada por um agitador magnético no interior do reservatório.

Em paralelo, o circulador de banho aquecido é ligado e configurado para circular água na temperatura de  $38^{\circ}\text{C}$ , desse modo os resíduos de parafina solidificados no interior do *gap* da seção anular se tornam líquidos possibilitando a circulação da parafina para iniciar os testes. O circulador de banho refrigerado também é acionado e configurado para refrigerar à temperatura de  $12^{\circ}\text{C}$ , a água refrigerada permanece recirculando dentro do aparelho até que seja utilizada. Para alterar a circulação entre a água aquecida e a resfriada, é utilizada uma manobra de válvulas para que a mudança de temperatura no interior da seção anular seja rápida.

Um circulador de imersão disposto dentro do reservatório de água é acionado e configurado na temperatura de 38°C, ele garante a temperatura controlada do experimento mesmo diante de alterações de temperatura dentro do laboratório.

Fitas de aquecimento cobertas por mantas de fibra de vidro ao redor de toda a tubulação que conduzem a parafina para a seção de testes são acionados por um controlador PID quando os termopares instalados na seção apresentam valores inferiores aos desejados, tal procedimento certifica que não terão perdas de calor e consequentemente solidificação da parafina durante sua circulação na bancada experimental.

Uma bomba volumétrica é utilizada para circular a mistura parafínica por todo o experimento. A vazão da bomba é controlada por um inversor de frequência. A curva de calibração que relaciona a vazão da bomba com a frequência é apresentada na figura 5.

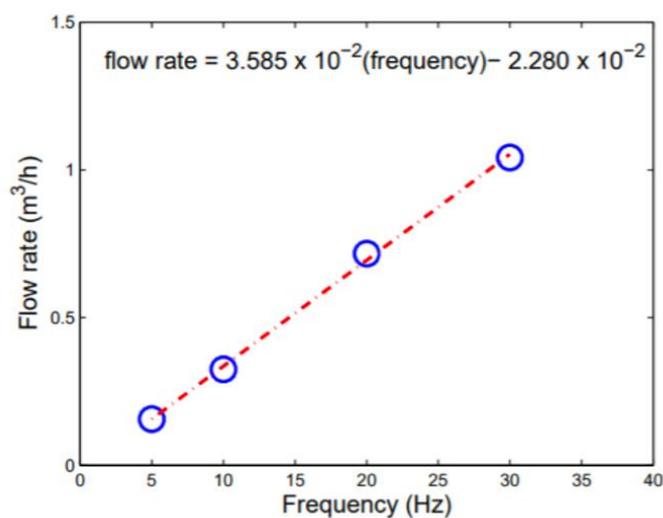


Figura 5: Curva de calibração da bomba. Extraído de Veiga et al (2017)

Os testes deste estudo foram realizados com uma frequência de 6,5Hz e o Reynolds associado a essa frequência foi de 736.

Após a preparação da mistura parafínica, é inicializado o programa da câmera, assim como a sua iluminação e o programa da placa de aquisição de dados. Depois que está tudo configurado corretamente são iniciados os testes.

A tabela 1 abaixo apresenta os testes, numerados de 1 a 4, em que a temperatura de resfriamento é a mesma para todos eles (12°C); entretanto o tempo de resfriamento (1h e 3h) e as temperaturas de aquecimento (38°C e 30°C) são

diferentes. As duas temperaturas de remoção escolhidas visam avaliar os efeitos na remoção de uma temperatura acima da TIAC e outra abaixo da TIAC.

Tabela 1: Testes realizados no Experimento

	<b>Alta Taxa de Aquecimento</b>	
<b>Período de resfriamento (Alta Taxa de resfriamento)</b>	12°C para 38°C (TIAC+ 3,4 °C)	12°C para 30°C (TIAC- 4,6°C)
~1 h	Teste 1	Teste 3
~3 h	Teste 2	Teste 4

### 3.2 Instrumentação

Nesta seção serão detalhados os elementos que compõe a bancada experimental utilizada.

#### 3.2.1 Tubo de Acrílico

O tubo de acrílico transparente compõe a parte externa da seção anular, por ser transparente permite a visualização dos fenômenos físicos da deposição e da remoção da parafina ao redor da superfície externa do tubo de cobre. Nas extremidades, foram colocadas saídas para a instalação de termopares usados para a garantir as condições de temperatura desejadas. Existem 2 saídas na extremidade superior ao final do comprimento que foram utilizadas em trabalhos anteriores para coletar amostrar e para instalar sondas, entretanto nesse estudo elas não serão utilizadas. Na figura 6 abaixo, é apresentado o tubo de acrílico com todos os seus acessórios instalados.

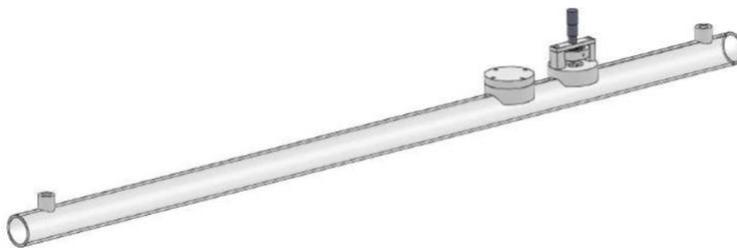


Figura 6: Tubo de acrílico.

### 3.2.2 Tubo de Cobre

A figura 7 apresenta a parte do tubo de cobre na seção anular. O interior do tubo de cobre por onde circula a água proveniente dos banhos, tem instalados termopares tipo E na parte superior interna do tubo a 0,5mm de distância da parede, através de furos de 4mm de diâmetro e fixados com resina condutiva. A posição, o tamanho dos furos e dos termopares foram pensados para que houvesse o mínimo de perturbação possível no fenômeno. Mais detalhe desta configuração dos termopares no tubo de cobre pode ser consultado em Veiga et al (2017).

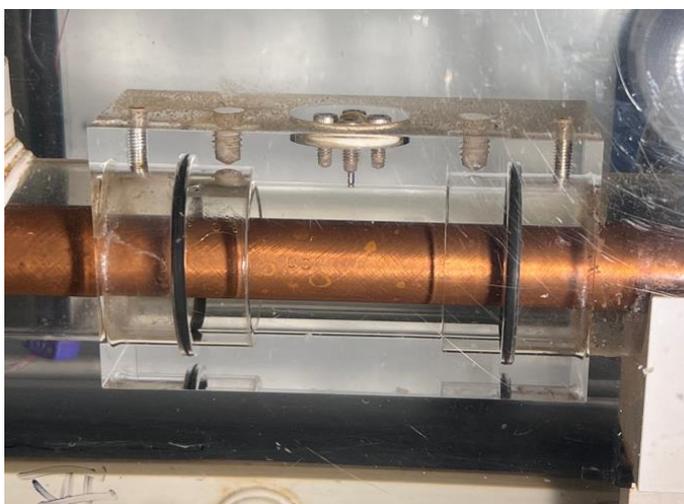


Figura 7: Tubo de cobre na posição da aquisição de imagens.

### 3.2.3 Reservatório da Mistura de Trabalho

O reservatório feito de aço inox com capacidade máxima de 36L, foi abastecido com 23,2L, quantidade determinada em estudos anteriores para suprir o experimento. Na parte inferior do reservatório fica o agitador magnético com

aquecimento da SolidSteel, responsável por aquecer o reservatório com a finalidade de derreter a solução, apresentado na figura 8. O reservatório assim como os tubos que conectam e distribuem a mistura de trabalho por toda a bancada, foi coberto por fitas de aquecimentos e manta de fibra de vidro, para garantir que o calor fornecido pelo aquecedor fosse distribuído e mantido na parte superior. O reservatório conta com um misturador instalado como mostra a figura 9, ele auxilia na distribuição uniforme da temperatura, já que foi utilizada apenas a função de aquecimento do agitador magnético.



Figura 8: Reservatório da Mistura de Trabalho.



Figura 9: Misturador do reservatório da mistura de trabalho.

A mistura de trabalho utilizada é uma solução composta de 80 % solvente ( $C_{12}H_{26}$ ) e 20 % de parafinas ( $C_{22}H_{46}$  ao  $C_{39}H_{80}$ ), com ponto de fusão de  $55,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  e

densidade de 747,8 kg/m<sup>3</sup> a 40 °C. A viscosidade da solução a 38°C foi de 1,462 mPa·s. A massa molar média da parafina foi de 403,4 kg/mol, o que corresponde a um número de carbono 28. O solvente era composto por 99% de C<sub>12</sub>H<sub>26</sub> e fornecido pela Shanghai IS Chemical Technology. A Tabela 2 apresenta a composição molar da mistura parafínica e a figura 10 apresenta o cromatograma de fração mássica da mistura.

A TIAC e a temperatura de desaparecimento de cristais (TDC) para a mistura de trabalho foram 34,5 e 36,3 °C, respectivamente, obtidos por microscopia de polarização cruzada (Veiga et al, 2020).

Tabela 2: Composição da Mistura utilizada no Experimento

Carbon number	Molar composition ( $z_i$ )	Carbon number	Molar composition ( $z_i$ )
C <sub>12</sub>	$9.03 \times 10^{-1}$	C <sub>31</sub>	$7.20 \times 10^{-3}$
C <sub>22</sub>	$6.61 \times 10^{-5}$	C <sub>32</sub>	$4.63 \times 10^{-3}$
C <sub>23</sub>	$4.59 \times 10^{-4}$	C <sub>33</sub>	$2.91 \times 10^{-3}$
C <sub>24</sub>	$2.49 \times 10^{-3}$	C <sub>34</sub>	$1.81 \times 10^{-3}$
C <sub>25</sub>	$7.00 \times 10^{-3}$	C <sub>35</sub>	$1.13 \times 10^{-3}$
C <sub>26</sub>	$1.21 \times 10^{-2}$	C <sub>36</sub>	$7.20 \times 10^{-4}$
C <sub>27</sub>	$1.56 \times 10^{-2}$	C <sub>37</sub>	$4.71 \times 10^{-4}$
C <sub>28</sub>	$1.60 \times 10^{-2}$	C <sub>38</sub>	$3.16 \times 10^{-4}$
C <sub>29</sub>	$1.38 \times 10^{-2}$	C <sub>39</sub>	$2.07 \times 10^{-4}$
C <sub>30</sub>	$1.05 \times 10^{-2}$		

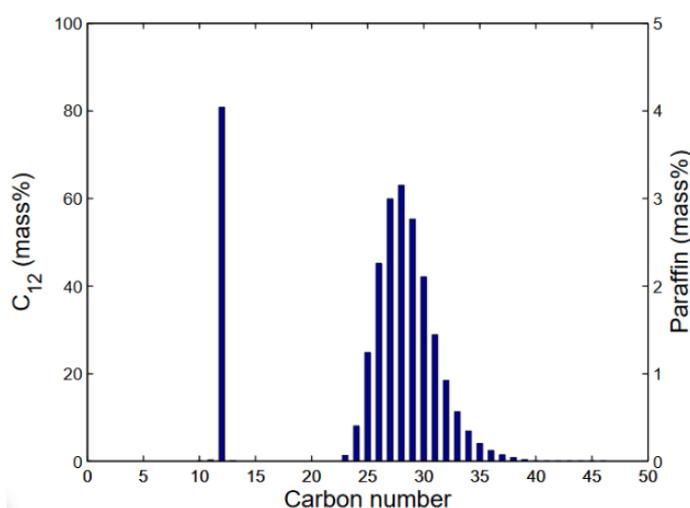


Figura 10: Cromatografia do fluido de teste. Extraído de Veiga et al (2020)

### 3.2.4 Circuladores de Banho

Os circuladores de banho são responsáveis por manter a água dos banhos quentes e frios na temperatura desejada para cada experimento. Para o banho quente, foi utilizado o Circulador de Banho Aquecido Huber C410 e para o banho frio foi utilizado o Circulador de Banho Resfriado Thermo-Haake M75.

Para obter a rápida taxa de resfriamento desejada na condução dos experimentos, foi configurada uma manobra de válvulas como demonstra a figura 11 abaixo.



Figura 11: Configuração da manobra de válvulas dos circuladores de banho

Um Circulador de Imersão Thermo-Haake DC30 ilustrado na figura 12, foi instalado acima do reservatório de água em que a seção anular está imersa, com o objetivo de não haver perturbações externas no experimento.



Figura 12: Circulador de Imersão.

### 3.2.5 Bomba Volumétrica

Como mencionado anteriormente no tópico 3.1, uma bomba volumétrica utilizada para circular a solução parafínica por toda a seção de teste. O modelo da bomba utilizada foi a bomba Helicoidal de Cavidades Progressivas Netzsch NEMO 021, para ter bombeamento contínuo e de pressão estável. Como também mencionado no tópico 3.1, foi utilizado um inversor de frequência para controlar a vazão cuja curva de calibração está disponível na figura 5. O modelo do inversor foi o WEG CFW-08 apresentado na Figura 13.



Figura 13: Inversor de frequência da WEG e ao fundo a bomba volumétrica Netzsch.

### 3.2.6 Câmera

A câmera utilizada foi a RedLake Motion Pro X3 de alta velocidade, sua instalação foi feita em um trilho com 3 graus de liberdade de movimento. Em estudos anteriores a câmera ficava inclinada, porém para a utilização atual foi melhor posicioná-la horizontalmente.

A lente utilizada foi a Nikon AF Micro Nikkor 105 f/2.8, sem anel de extensão. A iluminação foi através de uma luminária de pinça com lâmpada de LED. A figura 14 apresenta a configuração de aquisição de imagens.

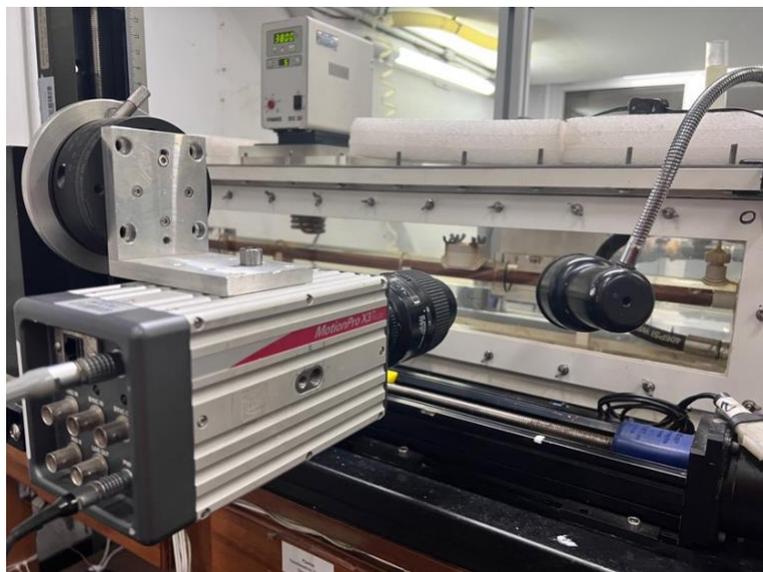


Figura 14: Configuração da aquisição de imagens.

### 3.2.7 Placa de aquisição

Para a aquisição de dados, foi utilizado o modelo Agilent 34970A com conexão via USB com o programa computacional próprio do fornecedor chamado Benchlink Data Logger Pro, onde através dele eram obtidos e visualizados as temperaturas dos termopares dispostos na seção de teste. A frequência de aquisição para todos os testes foi de 1 Hz. Ao final dos experimentos a leitura das placas de aquisição era encerrada e salva em um arquivo .csv que em seguida foi pós processada no MatLab e no Microsoft Excel para obter curvas e dados desejados.

### 3.3. Aquisição da Temperatura

Um dos atributos analisados no processo de remoção por aquecimento foi a resposta térmica sofrida na superfície externa do tubo de cobre. A evolução temporal da temperatura na superfície externa do tubo de cobre foi adquirida tanto no período de resfriamento como na etapa de remoção por aquecimento. As medições da temperatura foram realizadas com os termopares descritos em 3.2.2.

### 3.4 Aquisição da Espessura do depósito

A aquisição da espessura do depósito foi através do software ImageJ em que foi realizado o *upload* das imagens capturadas durante os testes pela câmera MotionPro3. Além de realizar a medição da espessura do depósito ao final da deposição de cada teste, também coletamos os dados da diminuição da espessura durante a remoção.

A calibração da medição foi realizada utilizando a relação pixel/mm medida através de parâmetros de medidas conhecidas em mm, sendo elas o tamanho do bloco de visualização e o diâmetro do tubo de cobre.

### 3.5 Aquisição do Tempo de remoção

O tempo de remoção foi obtido de forma manual com um cronometro. O tempo de remoção começa a ser contado a partir da manobra de válvulas, onde deixa de passar a água resfriada e passa a água aquecida; e dura até a visualização do tubo de cobre no final da seção, o que garante que todo o depósito foi removido.

## 4 RESULTADOS

Os experimentos conduzidos neste trabalho buscaram viabilizar a análise dos processos de crescimento e remoção por aquecimento de depósitos de parafina. A Figura 15 esquematiza a configuração de cada um dos experimentos realizados. Em relação ao estudo do crescimento dos depósitos de parafina, foi avaliada a influência do tempo e taxa de resfriamento. Observa-se que os testes 1 e 2 apresentam tempos de resfriamento de 1 h e 3 h, respectivamente; já a taxa de resfriamento aplicada para os testes 1 e 2 foi de  $0,81^{\circ}\text{C}/\text{min} \pm 0,03^{\circ}\text{C}/\text{min}$  até alcançar a temperatura fria de interesse ( $12^{\circ}\text{C}$ ). Na condução dos testes 3 e 4, foram avaliados os tempos de resfriamento de 1,4 h e 3,4 h, respectivamente. Nos testes 3 e 4 foram impostas duas taxas de resfriamento, i.e.:  $0,70^{\circ}\text{C}/\text{min} \pm 0,02^{\circ}\text{C}/\text{min}$  durante as primeiras 0,4 h e  $0,29^{\circ}\text{C}/\text{min} \pm 0,03^{\circ}\text{C}/\text{min}$  no tempo restante de cada teste até atingir a temperatura fria desejada ( $12^{\circ}\text{C}$ ).

No que diz respeito ao período de remoção por aquecimento, o estudo buscou analisar a eficiência da temperatura quente utilizada para remover os depósitos. Conforme observado na Figura 15, a temperatura de remoção imposta nos testes 1 e 2 foi de  $38^{\circ}\text{C}$ , isso corresponde a  $3,4^{\circ}\text{C}$  acima da TIAC. Já nos testes 3 e 4, a temperatura quente imposta foi  $30^{\circ}\text{C}$ , correspondendo a  $4,6^{\circ}\text{C}$  abaixo da TIAC.

Em cada um dos testes apresentados na Figura 15, foram realizadas no mínimo 3 repetições dos experimentos, para que fosse observada a repetibilidade dos dados obtidos.

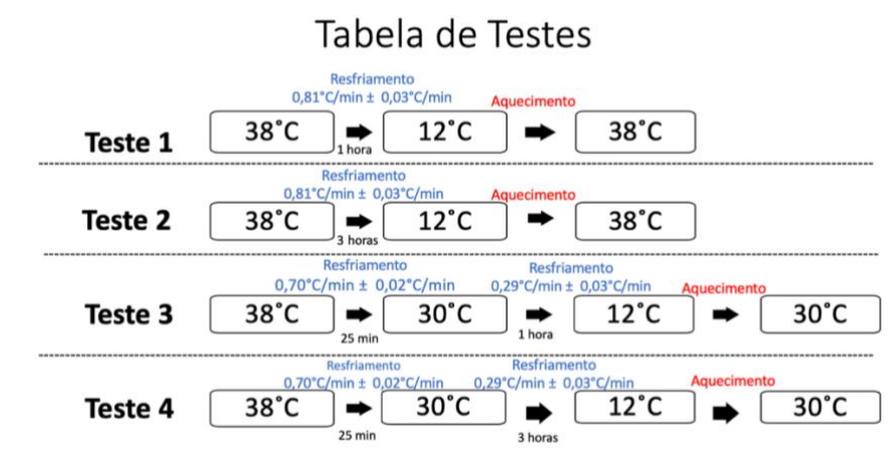


Figura 15: Esquema das temperaturas de Aquecimento, Resfriamento, Tempo de deposição e Taxas de Resfriamento dos Experimentos

Com o intuito de acompanhar o crescimento e remoção dos depósitos de parafina, foram capturadas imagens dos processos em todos os testes. A Figura 16 exemplifica o tipo de imagens obtidas durante os processos de crescimento e remoção dos depósitos. A câmera foi configurada para fazer capturas na frequência de 20Hz. A Figura 17 ilustra esquematicamente a região da seção anular onde foram capturadas as imagens.

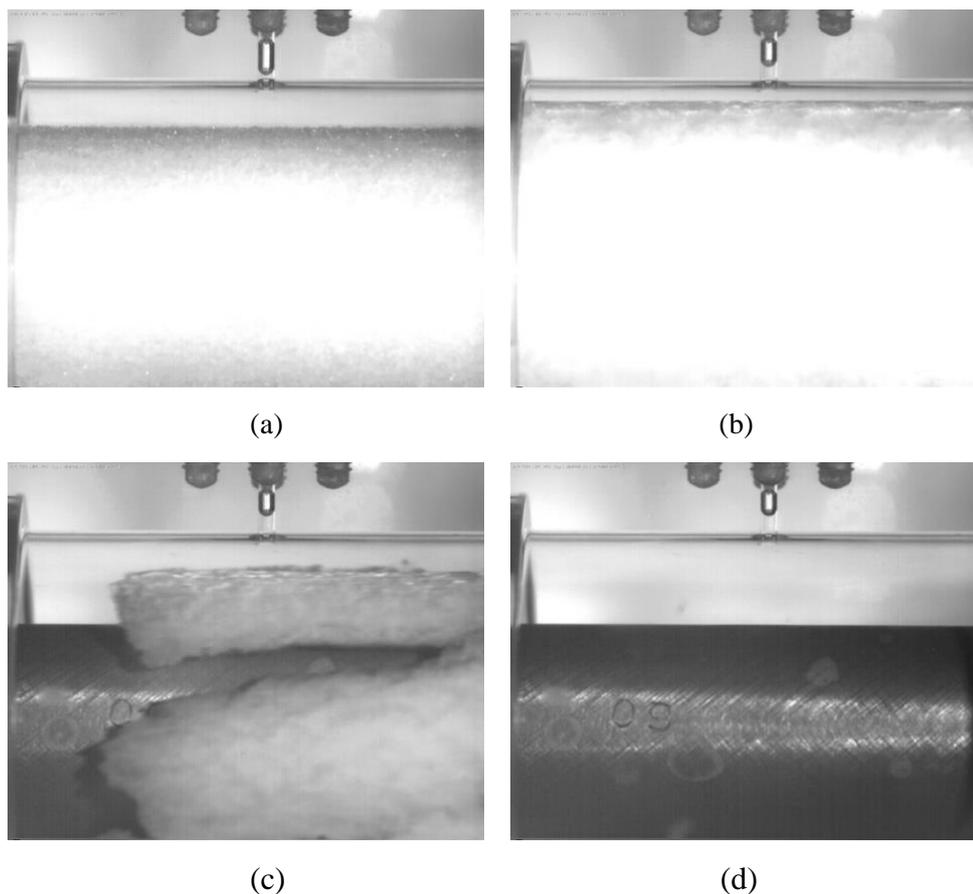


Figura 16: Imagens capturadas no processo de deposição e remoção. (a): início da formação de depósito (b): depósito formado (c): final do processo de remoção (d): remoção completa caracterizada pelo aparecimento total do tubo de cobre

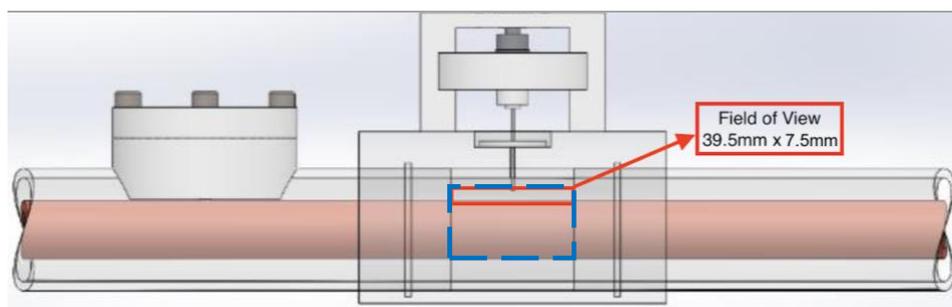


Figura 17: Ilustração da seção anular, destacada em azul pontilhado a área de aquisição de imagens e em vermelho a área nas imagens pós processamento

A seguir são apresentadas as análises conduzidas tanto na etapa de formação quanto de remoção dos depósitos de parafina.

#### 4.1 Caracterização dos depósitos formados nas etapas de resfriamento

Nesta seção de resultados, serão mostradas as curvas de temperatura e a espessura dos depósitos formados nos testes.

##### 4.1.1 Curva de Temperatura

As Figuras 18 e 19 apresentam para cada repetição dos testes 1 e 2, respectivamente, as curvas da temperatura medida na periferia externa do tubo de cobre. A temperatura final da etapa de resfriamento foi de 12°C e a temperatura de aquecimento de 38 °C. O tempo de resfriamento é o que difere o teste 1 (1 h) em relação ao teste 2 (3 h). As 3 repetições de cada teste apresentam comportamento similar, o que representa a boa repetibilidade tanto do teste 1 como do teste 2.

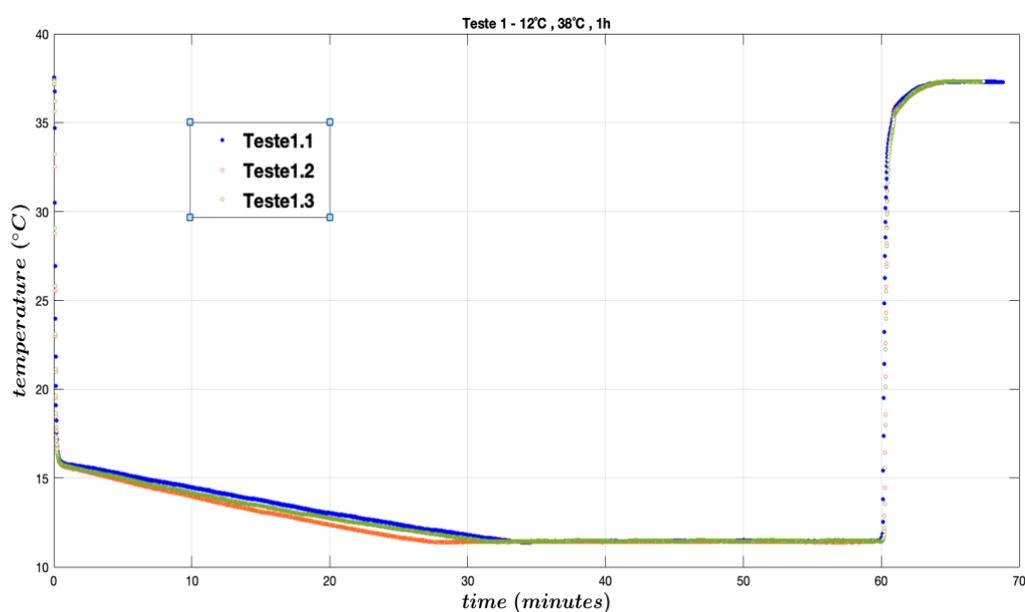


Figura 18: Curva de Temperatura do Teste 1

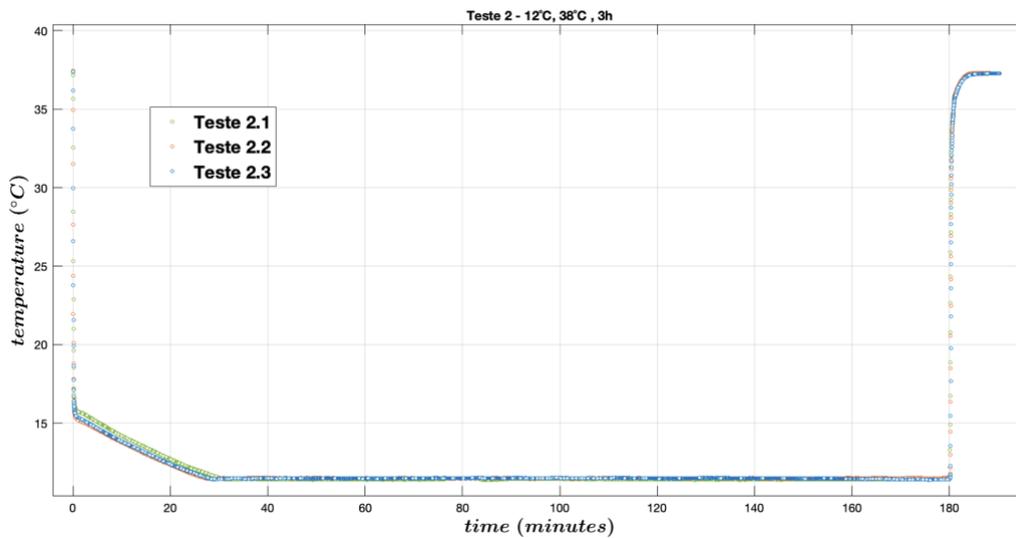


Figura 19: Curva de Temperatura do Teste 2

As figuras 20 e 21 exibem a curva de temperatura do Teste 3 e 4, respectivamente, neles foram usadas 2 taxas de resfriamento e o teste foi iniciado em 38°C para que toda a mistura parafínica estivesse no estado líquido. A primeira taxa de resfriamento foi configurada com a temperatura de resfriamento de 30°C com duração de 25 minutos, a segunda taxa de resfriamento foi de 12°C com duração de 1 hora no teste 3 e 3 horas no teste 4. Após o período de resfriamento, foi iniciado o processo de remoção com temperatura de aquecimento de 30°C (TIAC-4,6°C). As 3 curvas de cada uma das figuras 20 e 21 apresentam comportamento similar, o que representa a boa repetibilidade também para os testes.

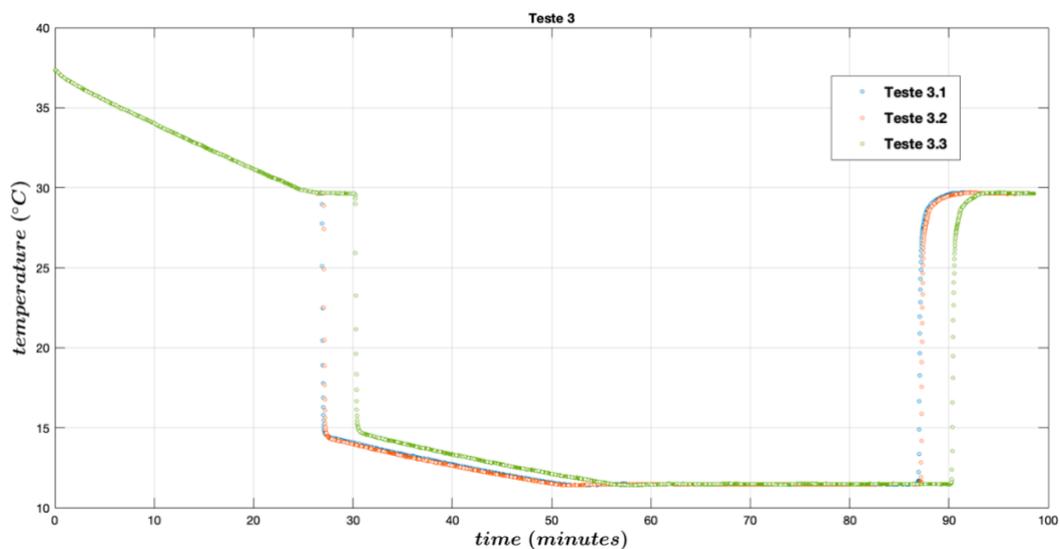


Figura 20: Curva de Temperatura do Teste 3

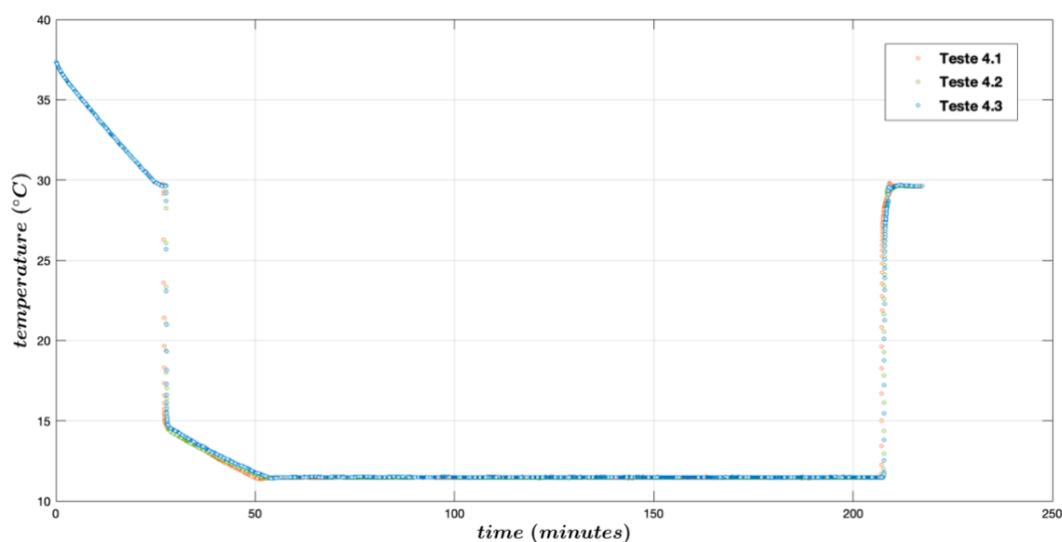


Figura 21: Curva de Temperatura do Teste 4

#### 4.1.2 Espessura do depósito

A tabela 3 apresenta a média das medições da espessura do depósito ao final do tempo de resfriamento de cada uma das repetições dos testes. Avaliando a espessura dos depósitos expostas na tabela pode ser notado que,

- quando comparado os testes nos quais foi imposto uma única taxa de resfriamento (i.e.: testes 1 v.s. 2), a espessura obtida no teste 2 foi levemente maior (6,4 mm vs 6,1 mm), isso pode ser explicado como uma consequência do fato que em 1 h a transferência de calor está próxima de atingir o regime permanente térmico (Veiga, 2017) o leve aumento de espessura observado no tempo de 3 horas pode ser também uma consequência dos efeitos da transferência de massa (difusão molecular) mais acentuados em longos períodos de resfriamento;
- ao comparar os testes nos quais o depósito de parafina foi formado a partir da imposição de duas taxas de resfriamento (i.e.: testes 3 v.s. 4), observa-se que o caso que esteve mais tempo exposto à temperatura fria de 12°C (teste 4) apresentou maior espessura (6,4 mm vs 5,7 mm), indicando o fato que

quando utilizado taxas de resfriamento mais lentas, o regime permanente térmico ainda não foi atingido no tempo de resfriamento do teste 3.

- quando comparado os testes nos quais foram impostos tempos de resfriamento próximos, i.e.: 1 h (teste 1) e 1,4 h (teste 3), observa-se que a espessura do depósito do caso 3 (5,7 mm) foi menor do que o caso 1 (6,1 mm), isso aconteceu embora o teste 3 esteve exposto a um período de resfriamento levemente maior. O comportamento anterior pode ser explicado pelo fato que no caso 3 a temperatura final da primeira taxa de resfriamento é 30°C e o tempo necessário para atingir a temperatura final (12°C) do período de resfriamento foi maior (48 min para o caso 3 e 30 min para o caso 1). Neste caso 3, o depósito inicialmente formado (antes da parede de cobre atingir 12°C) começa a comportar-se como um isolante térmico que diminui a taxa de crescimento do depósito de parafina.
- Finalmente, ao comparar os testes 2 e 4 que foram conduzidos com a imposição de tempos de resfriamento de 3 h e 3,4 h, respectivamente, nota-se que a espessura atingida nestes dois testes é a mesma, i.e.: 6,4 mm. Isso pode ser entendido como uma consequência do atingimento do regime permanente da transferência de energia. O efeito retardatório da espessura do depósito observado como resultado da aplicação de uma taxa mais lenta de resfriamento (caso 4) já não é mais observado no tempo de 3,4 h.

A influência da taxa de resfriamento é também discutida no trabalho conduzido por Theyab et al (2018). Segundo os autores desse estudo, a taxa de resfriamento influencia na espessura do depósito já que determina a velocidade em que a temperatura da solução atinge a TIAC, afetando na quantidade e distribuição das partículas de parafina precipitadas que se depositam nas paredes do duto. Os achados do presente trabalho, como expostos anteriormente, estão em concordância com o estudo de Theyab et al (2018).

Tabela 3: Espessura do depósito de cada experimento

	<b>Teste 1</b>	<b>Teste 2</b>	<b>Teste 3</b>	<b>Teste 4</b>
<b>Temperatura de Aquecimento</b>	38 °C	38 °C	38 °C	38 °C
<b>Temperatura no final da primeira taxa de Resfriamento</b>	12°C	12°C	30 °C	30 °C
<b>Temperatura no final da segunda taxa de Resfriamento</b>	N/A	N/A	12°C	12°C
<b>Tempo de Deposição</b>	1h	3h	1,4 h	3,4 h
<b>Espessura</b>	6,1 mm	6,4 mm	5,7 mm	6,4 mm

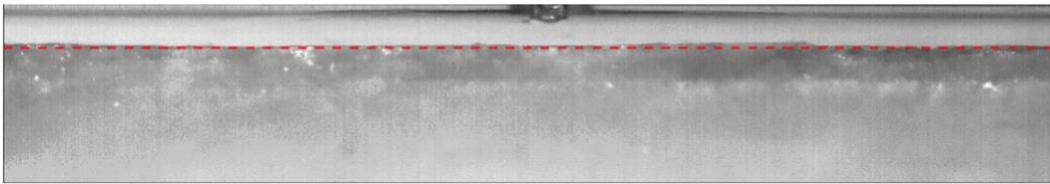
## 4.2 Resultado da Remoção de Depósito de Parafina por Aquecimento

A seguir serão expostos os atributos físicos observados durante a remoção e o tempo necessário para que o processo ocorresse.

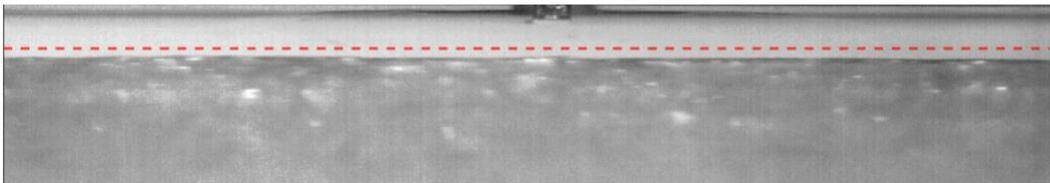
### 4.2.1 Atributos físicos observados no percurso do processo de remoção por aquecimento

Após o período de resfriamento finalizar em cada um dos testes, deu-se início à etapa de remoção por aquecimento dos depósitos de parafina. Visando caracterizar as fases da remoção, as Figuras 22 e 23 ilustram fotografias aquisitas para diversos instantes da remoção dos testes 1 e 2. As imagens foram obtidas com a câmera de alta resolução na região em vermelho esquematizada na Figura 17. A linha vermelha apresentada nas Figuras 22 e 23 refere-se à espessura do depósito no final do período de resfriamento. Quando analisado em conjunto as Figura 22 e 23, nota-se que o início da remoção para ambos os testes é similar, i.e.: a espessura do depósito começa a diminuir gradualmente nos dois testes. Contudo, na medida que o processo de remoção avança, observa-se no teste 2, um aumento repentino da

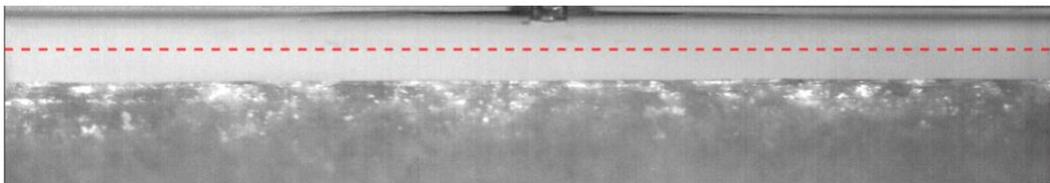
espessura do depósito (ver protuberância do depósito no início da Fig. 23.d), esse comportamento não é identificado no teste 1. Após o aumento súbito da espessura do depósito no teste 2, é observado a rápida remoção do depósito remanescente na região fotografada. Esse aumento repentino da espessura do depósito no teste 2 pode ser entendido como consequência do depósito de parafina acumulado inicialmente no primeiro terço da seção anular e que posteriormente escoou pela parte superior da seção. Ainda em relação as Figuras 22 e 23 é interessante notar a diferença de tonalidade da cor dos depósitos obtidos em cada teste, no teste 1 o depósito apresenta cores maioritariamente cinza, e o teste 2 apresenta tons mais embranquecidos, isso é uma consequência da mudança das propriedades que os depósitos sofrem durante o envelhecimento. A partir do anterior pode então ser notado o maior envelhecimento do depósito no teste 2 (3 h de resfriamento) quando comparado ao teste 1 (1 h de resfriamento).



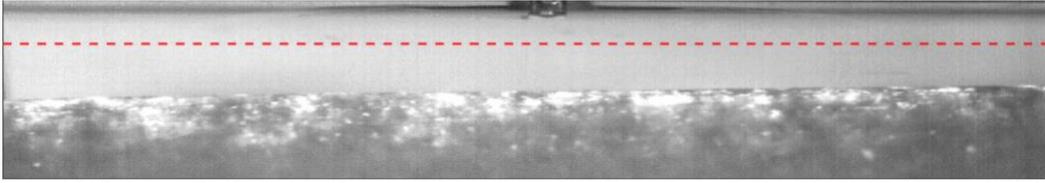
a)



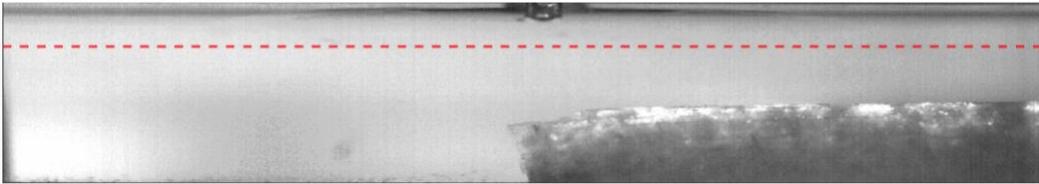
b)



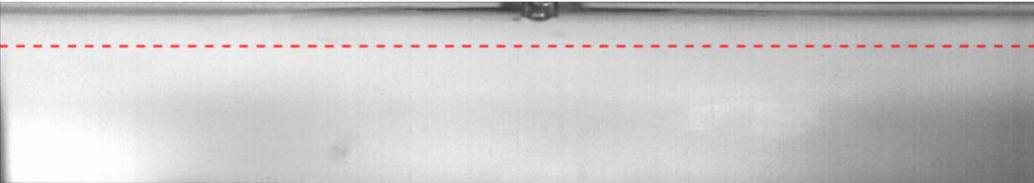
c)



d)

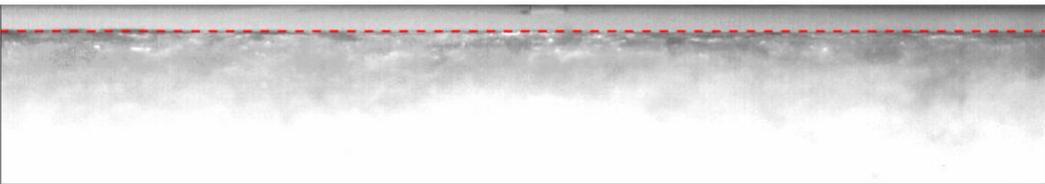


e)

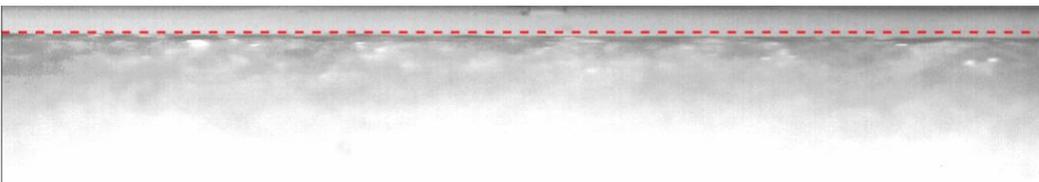


f)

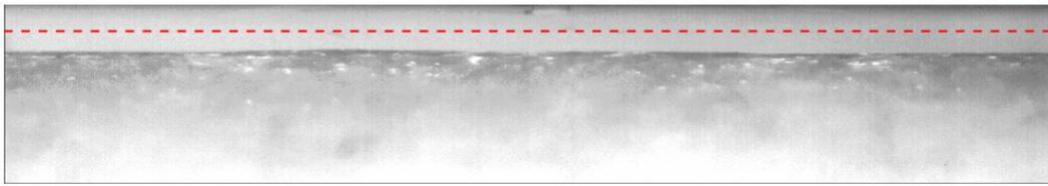
Figura 22: Fotografias aqisitadas em diferentes instantes do processo de remoção do teste 1



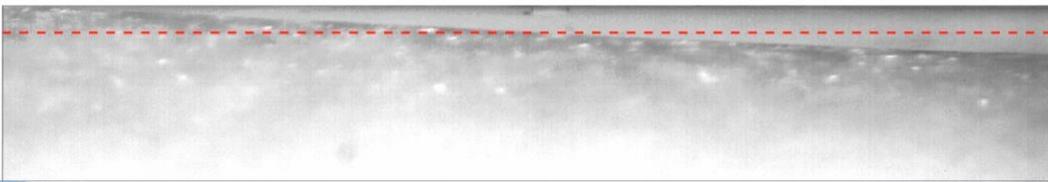
a)



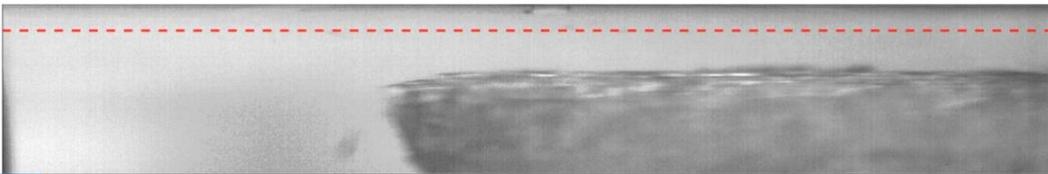
b)



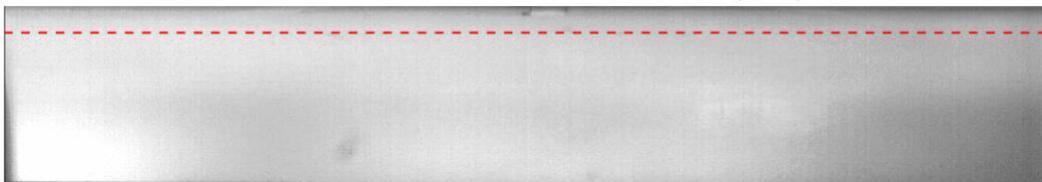
c)



d)



e)



f)

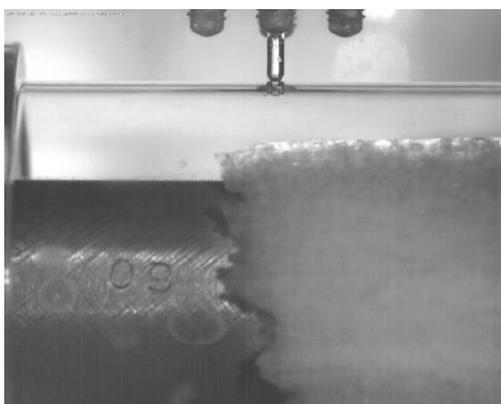
Figura 23: Fotografias aquiritadas em diferentes instantes do processo de remoção do teste 2

Durante o processo de remoção foi observado que em todos os testes, que o depósito se desloca inicialmente todo em conjunto como um plugue. Foi possível notar visualmente também que existe uma mudança de velocidade de deslocamento do depósito em todos os testes durante a remoção. Em alguns momentos o depósito acelera e em outros ele desacelera, além do movimento de rotação que existe durante o deslocamento.

Ao final da remoção, os testes apresentaram características físicas diferentes. O depósito dos testes 1 (remoção com temperatura de aquecimento de  $38^{\circ}\text{C}$ ) e 3 (remoção com temperatura de aquecimento de  $30^{\circ}\text{C}$ ), que tiveram tempos de resfriamento próximos a 1 hora, saíram como um bloco inteiro, já o depósito

dos testes 2 (remoção com temperatura de aquecimento de 38°C) e 4 (remoção com temperatura de aquecimento de 30°C) que tiveram tempos de resfriamento próximos a 3 horas, saíram fragmentados, com um formato semelhante à de raízes na extremidade como apresenta a figura 24.

Uma das hipóteses levantadas é que devido ao maior envelhecimento sofrido pelo depósito nos testes 2 e 4, a dureza do depósito nas proximidades do tubo de cobre aumenta de forma heterogênea gerando assim que o descolamento de regiões do depósito aconteça em instantes de tempo levemente diferentes.



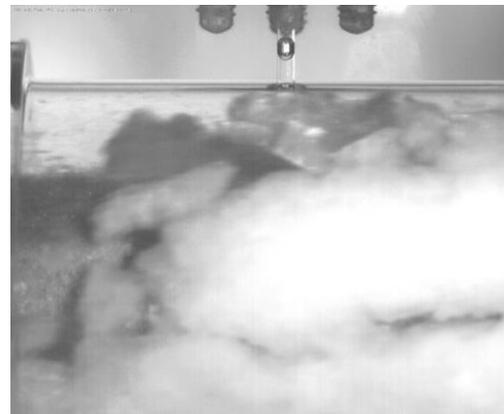
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 24: Comprimento final do depósito dos testes durante a remoção  
(a): Teste 1 (b): Teste 2 (c): Teste 3 (d): Testes 4

## 4.2.2 Tempo de Remoção

O tempo de remoção do depósito foi cronometrado a partir da manobra de válvulas citada na seção 3.2.4 em que foi fechadas as válvulas do fluido de resfriamento e abertas as válvulas dos fluidos de aquecimento.

Na Figura 25 é apresentado o gráfico de barras com a média e desvio padrão dos tempos de remoção para as quatro configurações de testes.

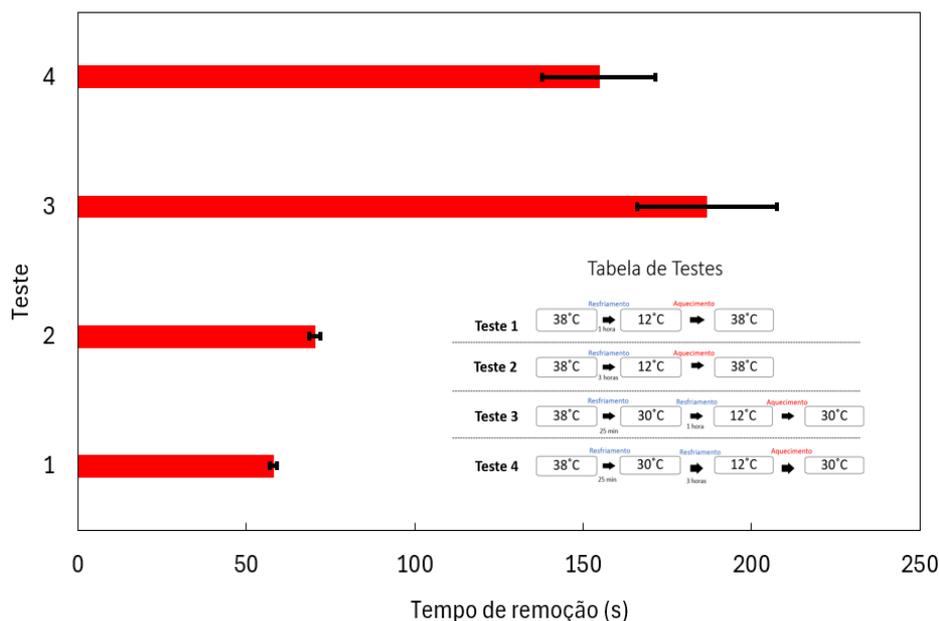


Figura 25: Tempo de remoção dos 4 Testes

Machado et al (2022) faz uma análise cromatográfica que confirma que o envelhecimento dos depósitos de parafina é um processo que depende do tempo de resfriamento. Os testes 1 e 2 apresentam as mesmas temperaturas de resfriamento (12°C) e aquecimento (38°C), entretanto os tempos de resfriamento são diferentes, 1 e 3 horas respectivamente. O comparativo dos 2 testes, apresenta uma diferença média de 13 segundos a mais para remover completamente o depósito no teste 2 (71 segundos  $\pm$  1,5 segundos) do que no teste 1 (58 segundos  $\pm$  1,0 s segundos), resultado alinhado com o estudo de Machado et al (2022) já que com o aumento do tempo de resfriamento, e conseqüentemente do envelhecimento da parafina foi necessário mais tempo para remover o depósito.

Nos testes 3 e 4 foram utilizadas as mesmas configurações de temperaturas e taxas de resfriamento, e de temperatura de aquecimento (30°C), mudando

novamente apenas os tempos de resfriamento sendo de 1,4 hora e 3,4 horas respectivamente. Esperava-se que o comparativo entre os testes 3 e 4 apresentassem a mesma tendencia do teste 1 e 2, porém o tempo médio de remoção do teste 3 (187 segundos  $\pm$  21 segundos) foi maior que do teste 4 (155 segundos  $\pm$  17 segundos). Contudo a diferença entre os tempos de remoção está inserida dentro do desvio padrão dos testes 3 e 4 como apresentado na Figura 25. Em consequência não é possível afirmar que o teste 3 apresenta maior tempo de remoção do que o teste 4. Uma das possibilidades do alto desvio padrão para os testes 3 e 4 refere-se ao fato da configuração geométrica da saída da região anular na seção de testes. Na saída da região anular, a mistura e depósito de parafina escoam em direção ao reservatório principal por uma série de conexões, essa configuração de mangueira e acessórios pode ser um fator que contribui ao aumento de incerteza quando medido o tempo de remoção nos casos que a remoção acontece com temperaturas abaixo da TIAC (i.e.: depósito mais endurecido durante o processo de remoção). O sistema de conexões pode estar ocasionando entupimentos localizados que podem distorcer em certa medida os tempos de remoção dos casos 3 e 4.

Na figura 23 tem-se as curvas de temperatura medida na parede do tubo de cobre dos 4 testes. Através da figura, pode-se observar que o processo de remoção em termos da temperatura mensurada no tubo de cobre, tem um comportamento similar para os quatro testes. Contudo, pequenas diferenças podem ser notadas que serão discutidas a seguir.

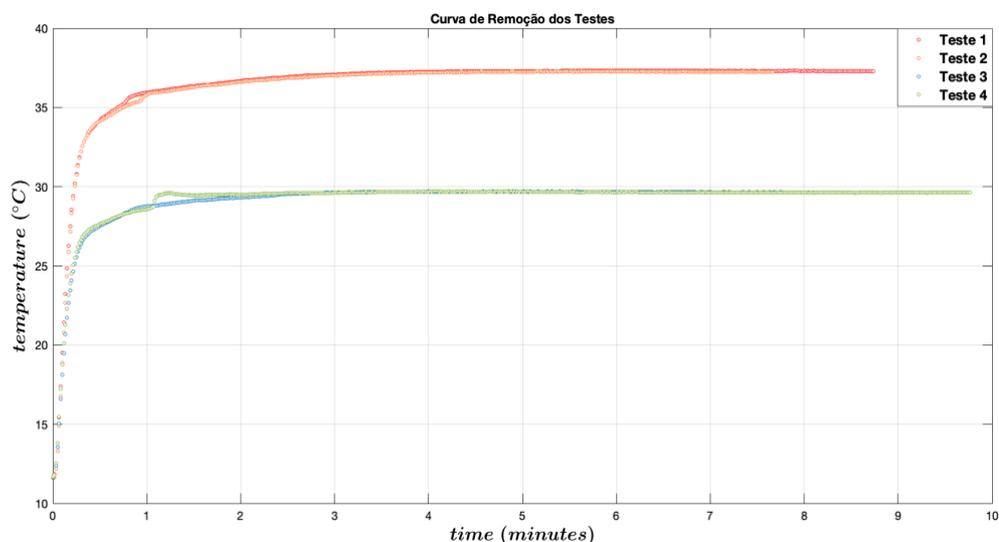


Figura 26: Curva de temperatura na parede do tubo de cobre durante a remoção de depósito nos 4 testes

As figuras 27 e 28 apresentam a temperatura medida na parede do tubo de cobre durante os processos de resfriamento e a aquecimento das repetições dos testes 3 e 4, respectivamente. No centro das figuras pode ser notado um zoom que enfatiza na região da curva que antecede a estabilização na temperatura de aquecimento imposta (i.e.: 30°C ou 38°C). Nota-se que o teste 4 sofre maiores oscilações de temperatura nessa região, isso é condicente com a figura 24d que indica a maior heterogeneidade no escoamento do depósito de parafina na parte final da remoção. Desta forma, as oscilações de temperatura na parede do tubo de cobre são consequência de pequenas porções de depósito que escoam em conjunto com a fase líquida da mistura parafínica na periferia do tubo de cobre.

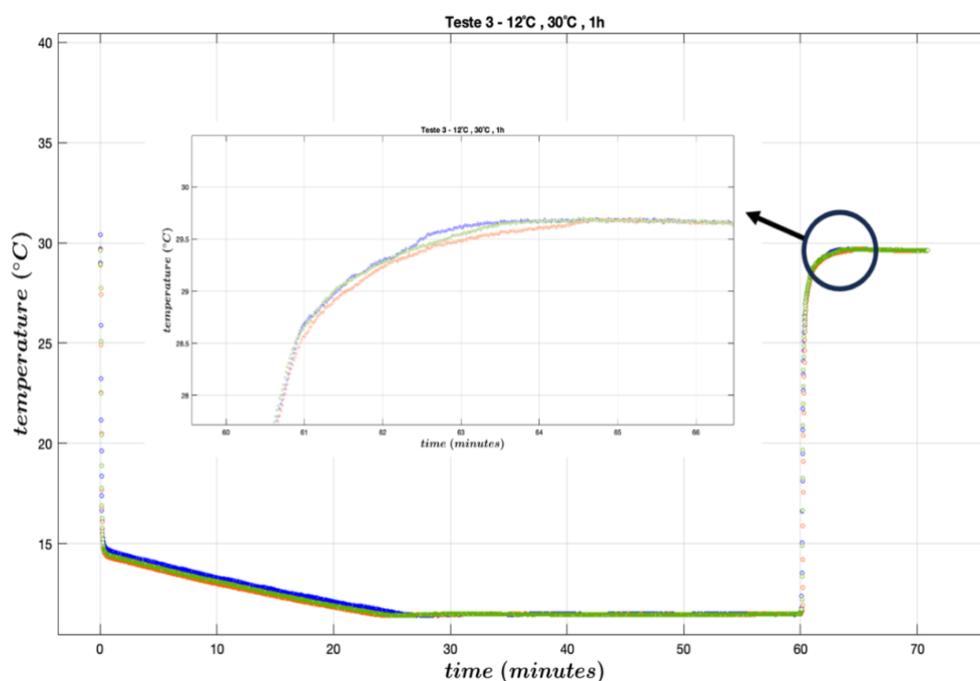


Figura 27: Curva de temperatura do teste 3 com destaque central na oscilação observada

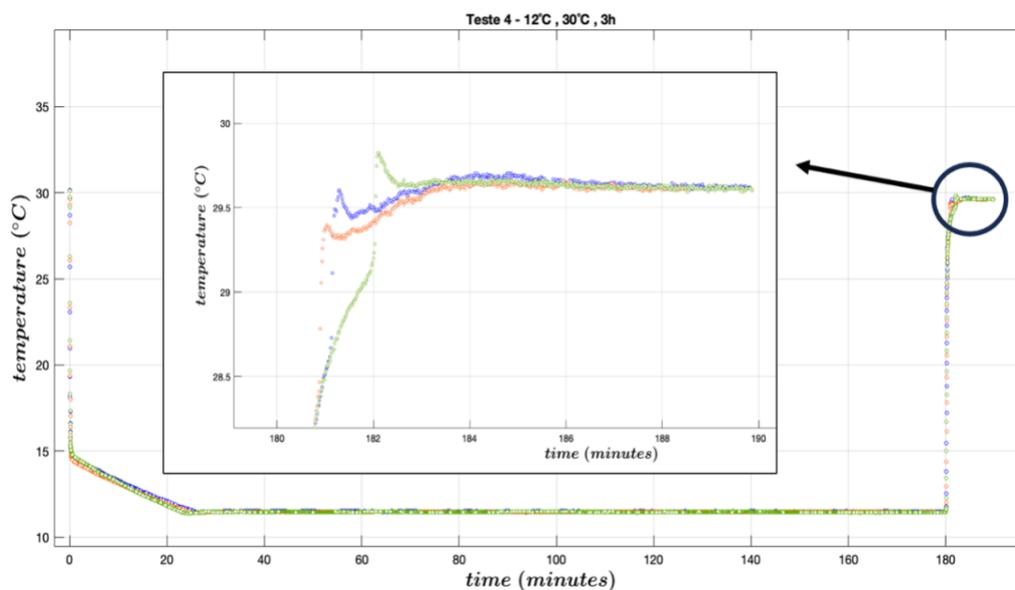


Figura 28: Curva de temperatura do teste 4 com destaque central na oscilação observada

### 4.3 Comparação do Resultado numérico e Experimental

Na Figura 29 é apresentada a curva de variação temporal da espessura do depósito na localização de  $Z=0,75L$ , durante a remoção do teste 2 na simulação numérica e no experimento. É possível observar que a mudança de espessura experimental apresenta maiores oscilações que o resultado numérico e menor espessura do depósito durante toda a remoção. Contudo, o comportamento qualitativo da remoção do depósito obtida na simulação numérica é similar a aquele alcançado nos experimentos (e.g.: queda abrupta da espessura do depósito de parafina no final da remoção).

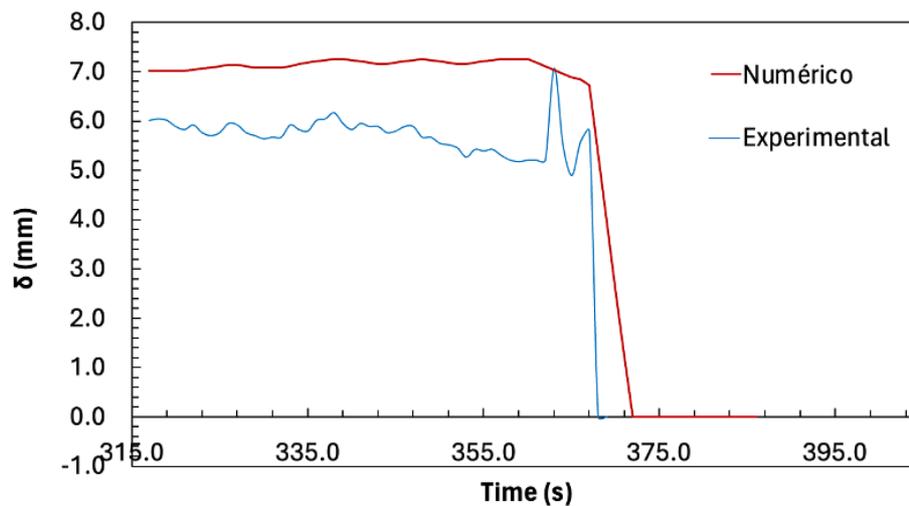


Figura 29: Curva da variação temporal da espessura do depósito durante o processo de remoção por aquecimento no teste 2

#### 4.4 Incertezas

Neste tópico serão apresentadas as incertezas dos cálculos da espessura e da temperatura.

A tabela 5 apresenta a incerteza da espessura dos testes.

Para obter o resultado, foi calculado o desvio padrão dos testes com 3 repetições através da fórmula

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (x_i - \bar{x})^2}{3}}$$

Em seguida foi calculada a incerteza tipo A pela expressão

$$u_A = \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$$

E obtidos os resultados apresentados na tabela 5 a seguir.

Tabela 4: Incerteza da Espessura dos Testes

	<b>Teste</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Incerteza</b>
<b>Incerteza da Espessura dos Testes</b>	<b>1</b>	0,10 mm	0,06 mm
	<b>2</b>	0,79 mm	0,45 mm
	<b>3</b>	0,58 mm	0,33 mm
	<b>4</b>	0,65 mm	0,37 mm

Para o cálculo da incerteza da temperatura (tabela 6) foram usadas as mesmas fórmulas expressas acima para o tipo A (repetibilidade).

A incerteza do tipo B (resolução) foi calculada por:

$$u_B = \frac{\text{resolução}}{\sqrt{3}}$$

A incerteza combinada foi dada por

$$u_{comb} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

Tabela 5: Incerteza da Temperatura dos Testes

<b>Incerteza da Temperatura</b>					
	<b>Teste 1</b>	<b>Teste 2</b>	<b>Teste 3</b>	<b>Teste 4</b>	<b>Média</b>
<b>Desvio Padrão</b>	$8,50 \times 10^{-2} \text{ °C}$	$3,24 \times 10^{-2} \text{ °C}$	$6,10 \times 10^{-3} \text{ °C}$	$1,15 \times 10^{-2} \text{ °C}$	$3,40 \times 10^{-2} \text{ °C}$
<b>Incerteza Tipo A</b>	$6,01 \times 10^{-2} \text{ °C}$	$2,29 \times 10^{-2} \text{ °C}$	$4,3 \times 10^{-3} \text{ °C}$	$8,20 \times 10^{-2} \text{ °C}$	$4,20 \times 10^{-2} \text{ °C}$
<b>Incerteza Tipo B</b>	$5,8 \times 10^{-3} \text{ °C}$				
<b>Incerteza Combinada</b>	$6,59 \times 10^{-2} \text{ °C}$	$2,87 \times 10^{-2} \text{ °C}$	$1,01 \times 10^{-2} \text{ °C}$	$8,78 \times 10^{-2} \text{ °C}$	$4,80 \times 10^{-2} \text{ °C}$

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma investigação detalhada sobre os processos de formação, crescimento e remoção de depósitos de parafina em uma seção de testes experimental do tipo “loop”, com foco em dois parâmetros fundamentais: o tempo de resfriamento ou envelhecimento e a temperatura de aquecimento ou remoção. Por meio de uma série de experimentos cuidadosamente controlados, foi possível caracterizar a eficiência do processo de remoção por aquecimento, proporcionando uma visão abrangente sobre a dinâmica envolvida.

Com relação à formação e crescimento dos depósitos de parafina, os experimentos mostraram que quando aplicada uma taxa de resfriamento lenta, a taxa de crescimento da espessura do depósito é menor quando comparado ao crescimento do depósito resultante da aplicação de taxas de resfriamento rápidas.

Nos processos de remoção por aquecimento, foi observada a influência do envelhecimento do depósito na remoção por aquecimento. Para depósitos mais envelhecidos, o tempo necessário para remover a totalidade dos depósitos da seção de testes foi maior, e.g.: quando aplicado uma temperatura de remoção 3,4 °C acima da TIAC, o tempo de remoção para depósitos envelhecidos durante 3 horas foi 22,41% maior do que o tempo necessário para remover depósitos formados com somente 1 h de envelhecimento.

Os resultados experimentais mostraram-se consistentes com as previsões das simulações numéricas, destacando a importância das simulações na antecipação de possíveis problemas operacionais, como o entupimento de linhas. A correlação entre os dados experimentais e as simulações numéricas valida a metodologia empregada e sublinha a relevância das ferramentas computacionais na otimização de processos industriais.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a análise de diferentes taxas de resfriamento, a velocidade de deslocamento dos depósitos durante a remoção e os efeitos da gravidade. Essas investigações adicionais poderão fornecer uma compreensão ainda mais detalhada dos fenômenos envolvidos e contribuir para o desenvolvimento de soluções mais eficazes e inovadoras na gestão de depósitos de parafina.

Este estudo contribuiu para o entendimento dos processos de remoção de parafina, oferecendo diretrizes para a aplicação prática na indústria e estabelecendo bases sólidas para pesquisas futuras na área.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. **JESSEN, F. W.; HOWELL, J. N.** Effect of Flow Rate on Paraffin Accumulation in Plastic, Steel, and Coated Pipe. *Transactions of the AIME*, v. 213, n. 01, 1958.
2. **BURGER, E. D.; PERKINS, T. K.; STRIEGLER, J. H.** Studies of Wax Deposition in the Trans Alaska Pipeline. *JPT, Journal of Petroleum Technology*, v. 33, n. 6, 1981.
3. **AZEVEDO, L.F.A.; TEIXEIRA, A.M.** A Critical Review of the Modeling of Wax Deposition Mechanisms. *Petroleum Science & Technology*, Vol.21, 2003.
4. **IBANEZ, A.; IVAN; NIECKELE, A. O.; AZEVEDO, L. F. A.** Numerical Approach to Assess Wax Removal by Heating. *SPE Brazil Flow Assurance Technology Congress, 2022*.
5. **BELL, E.; LU, Y.; DARABOINA, N.; SARICA, C.** Experimental Investigation of active heating in removal of wax deposits. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 200, 2021.
6. **ALBUQUE, DANIEL OLIVEIRA.** Modeling of wax deposition and removal by electrical heating in sub sea oil pipelines, 2019.
7. **BELL, E.; SANTOS, G.; DARABOINA, N.; SARICA, C.** Visualization of thermal removal mechanism of paraffin deposits: Providing guidelines for minimum temperature requirements. *Fuel*, 356, 2024.
8. **INGH, P. VENKATESAN, R.; FOGLER, H. S.; & NAGARAJAN, N.** Formation and aging of incipient thin film wax-oil gels. *AIChE journal*, v. 46, n. 5, 2000.
9. **BROWN, T.; NIESEN, V.; ERICKSON, D.** Measurement, and prediction of the kinetics of paraffin deposition. *Journal of Petroleum Technology*, v.47, No.4,1995.
10. **MEHROTRA, A.K.; EHSANI, S.; HAJ-SHAFIEI, S.; KASUMU, A. S.** A review of heat-transfer mechanism for solid deposition from waxy or paraffinic mixtures. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 98, No. 12,2020.
11. **ZHENG, S.; SAIDOUN, M.; PALERMO, T.; MATEEN, K.; FOGLER, H.S.** Wax deposition modeling with considerations of non-newtonian

- characteristics: application on field-scale pipeline. *Energy & Fuels*, Vol. 31, No. 5, 2017.
12. **LINHARES, R. C.; AZEVEDO, L. F. A.; VEIGA, H. M. B.; FLEMING, F. P.** Wax deposits formation in petroleum pipelines: investigation of the deposit-liquid interface characteristics. 2020.
  13. **VEIGA, H. M. B.; SOUZA, L.B.; FLEAMING, F. P.; IBANEZ, IVAN; LINHARES, R. C.; NIECKELE, A. O.; AZEVEDO, L. F. A.** Experimental and Numerical Study of Wax Deposition in a Laboratory-Scale Pipe Section under Well-Controlled Conditions. 2020.
  14. **WANG, Z.; ZHANG, K.; SUN, H.; DUAN, X.** Melting and Removing Wax Deposition by Thermal Washing in Oil Well, 2024.
  15. **THEYAD, M. A.** Wax Deposition Process: Mechanisms, Affecting Factors and Mitigation Methods. Ministry of Higher Education and Scientific Research of Iraq, 2018.
  16. **HUANG.** Schematic of Molecular Diffusion as the Wax Deposition Mechanism. Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-molecular-diffusion-as-the-wax-deposition-mechanism-Huang-et-al-2015\\_fig13\\_330289179](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-molecular-diffusion-as-the-wax-deposition-mechanism-Huang-et-al-2015_fig13_330289179).
  17. **ODDONE, D.** O setor de petróleo e gás no Brasil. Rio de Janeiro, ANP, 2017. Disponível em: [http://www.anp.gov.br/images/Palestras/Camera\\_Brasil\\_Espanha\\_Decio\\_Oddone\\_04\\_12\\_2017.pdf](http://www.anp.gov.br/images/Palestras/Camera_Brasil_Espanha_Decio_Oddone_04_12_2017.pdf).
  18. **MACHADO, A. B.; LINHARES, R. C.; IBANEZ, IVAN; NIECKELE, A. O.; AZEVEDO, L. F. A.** Experimental Investigation of the Temporal and Radial Variation of the Composition of Wax Deposits Formed in an Annular Test Section. 2022.
  19. **MEHROTRA, A. K.; ESHANI, S; HAJ-SHAFIEI, SAMIRA; KASUMU, S., ADEBOLA.** A Review of Heat-Transfer Mechanism for Solid Deposition from “Waxy” or Paraffinic Mixtures. Department of Chemical & Petroleum Engineering, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, 2020