



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

NIKOLAS MAKY TAKINAMI

**PROJETO DE BANCADA PARA SIMULAÇÃO DE ESTIMULAÇÃO DE POÇOS DE
PETRÓLEO POR ULTRASSOM**

Guaratinguetá - SP

2024

NIKOLAS MAKY TAKINAMI

**PROJETO DE BANCADA PARA SIMULAÇÃO DE ESTIMULAÇÃO DE POÇOS DE
PETRÓLEO POR ULTRASSOM**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Nazem Nascimento

Coorientador: Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias

Guaratinguetá - SP

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

T136p	Takinami, Nikolas Maky Projeto de bancada para simulação de estimulação de poços de petróleo por ultrassom / Nikolas Maky Takinami - Guaratinguetá, 2024. 57 f : il. Bibliografia: f. 52-57 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024. Orientador: Prof. Dr. Nazem Nascimento Coorientador: Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias 1. Poços de petróleo - Fraturamento hidráulico. 2. Equipamento ultrassônico. 3. Planejamento experimental. I. Título. CDU 622.323
-------	---

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

NIKOLAS MAKY TAKINAMI

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

NAZEM
NASCIMENTO:7407858
5868

Assinado de forma digital por
NAZEM
NASCIMENTO:74078585868
Dados: 2024.02.18 10:10:41 -03'00'

Prof. Dr. Nazem Nascimento
Orientador/UNESP-FEG

Eng. MSc. Vitória Felício Dornelas
UNESP-FEG

Eng. MSc. Christoph Daniel Baum
Membro externo

Janeiro 2024

Dedico este trabalho aos meus pais Jorge e Márcia e a minha noiva Thais pelo incentivo constante e amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço profundamente aos meus pais Jorge e Márcia Takinami e a minha noiva Thais Takeda e toda família Takinami e Miazaki. O inabalável apoio, amor e incansável esforço foram a bússola que sempre me guiaram no percurso da vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Nazem Nascimento e coorientador Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias, que me motivaram e compartilharam a experiência e sabedoria durante todo o meu caminho acadêmico.

Agradeço de forma especial o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH 34.1 FEG/UNESP ANP/FINEP.

À UNESP, por me ajudar a desenvolver profissionalmente.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biodiesel (ANP) - número do processo: 044419

“Se eu vi mais longe, foi porque estava sobre os ombros de gigantes.”

Issac Newton

RESUMO

A obstrução de um poço petrolífero são umas das principais causas raízes para custos adicionais em operações de extração de petróleo bruto. Neste cenário, recorre-se a métodos denominados “estimulação” a fim de recuperar um poço saturado, uma vez que este método inovador possui custos relativamente mais baixos em comparação com a construção de novos campos de extração de petróleo. Por outro lado, movimentos socioambientais e levantamentos bibliográficos indicam que técnicas convencionais de estimulação (fraturamento hidráulico e acidificação) prejudicam o meio ambiente e ameaçam a saúde pública local, abrindo assim mais oportunidades para pesquisas envolvendo métodos menos invasivos ao meio ambiente. Para isso, foi realizada uma fundamentação técnica por meio da revisão bibliográfica, visando métodos e resultados do ultrassom aplicadas ao campo de extração de petróleo e por fim, uma esquematização de um projeto de bancada utilizando estimulação ultrassônica.

PALAVRAS-CHAVE: estimulação ultrassônica; acidificação; fraturamento hidráulico; bancada experimental; poço petrolífero.

ABSTRACT

The obstruction of an oil well stands as one of the primary underlying causes for incurring additional costs in crude oil extraction operations. In this context, recourse is made to methods commonly referred to as "stimulation" to restore a saturated well. This innovative approach is favored due to its relatively lower associated costs when compared to the establishment of new oil extraction fields. In this scenario, socio-environmental movements and extensive bibliographic surveys have highlighted that conventional stimulation techniques, such as hydraulic fracturing and acidification, bear adverse environmental consequences and pose threats to local public health. This realization has consequently prompted the exploration of alternative methods that exert lesser invasive impacts on the environment. For this purpose, a technical foundation was carried out through a bibliographical review, looking at ultrasound methods and results applied to the oil extraction field and additionally, a schematization of a bench project using ultrasonic stimulation was developed.

KEYWORDS: ultrasonic stimulation; acidification; hydraulic fracturing; experimental benchtop; oil well.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fraturamento hidráulico ilustrativo.....	20
Figura 2 – Tipos de <i>wormholes</i> formados no processo de acidificação.....	22
Figura 3 – Perfil de estimulação do fraturamento ácido.....	23
Figura 4 – Formação de canais pós-ataque ácido.....	23
Figura 5 – Movimento ambiental “ <i>No Fracking Way</i> ”	25
Figura 6 – Bolhas de cavitação em hélice de moto aquática.....	26
Figura 7 – Zonas de compressão e rarefação.....	27
Figura 8 – Formação de bolhas de cavitação.....	27
Figura 9 – Formação, crescimento e colapso da bolha de cavitação.....	28
Figura 10 – Cavitação: implosão (1,2); micro jatos (3,4,5); micro jatos secundários (6,7)..	28
Figura 11 – Projeto de bancada para estudo da viscosidade.....	30
Figura 12 – Incrustação de parafina em duto.....	35
Figura 13 – Modelo 3D do Projeto de bancada.....	36
Figura 14 – Gerador Ultrassônico.....	37
Figura 15 – Transdutor Ultrassônico Imerso.....	38
Figura 16 – Bomba Dosadora Peristáltica.....	39
Figura 17 – Mangueira NBR.....	40
Figura 18 – Tanque de Acrílico Externo.....	40
Figura 19 – Tanque de Acrílico Interno.....	41
Figura 20 – Tanque Reservatório 28L.....	41
Figura 21 – Peneira de Aço Inox (Des-60)	42
Figura 22 – Borracha de Vedação.....	43
Figura 23 – Esboço final.....	43

Figura 24 – Querosene.....	44
Figura 25 – Parafina.....	44
Figura 26 – Tubo Soldável de PVC.....	45
Figura 27 – Suporte de Fixação para Tubo PVC.....	45
Figura 28 – Pinça de Fixação do Suporte.....	46
Figura 29 – Barra de Alumínio.....	46
Figura 30 – Cantoneira de Reforço.....	47
Figura 31 – Massa de Vedação.....	48
Figura 32 – Pinça de Fixação do Suporte.....	48
Figura 33 – Mesa de Bancada Experimental.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise elementos do petróleo cru.....	32
Tabela 2 – Ficha técnica do querosene utilizado.....	34
Tabela 3 – Ficha técnica da parafina 140/145 utilizado.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo
HCl	Ácido Clorídrico
HCOOH	Ácido Fórmico
HC ₃ COOH	Ácido Acético
MSM	Mecanismo de Seleção de Materiais
NBR	Borracha Nitrílica

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
K	Kelvin
m/s	Metros por segundo
kHz	Quilohertz
μm	Micron
W	Watt
°C	Grau Celsius
h	Hora
Pa	Pascal
g/cm ³	Grama por centímetro cúbico
V	Volt
m	Metro
L	Litro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivos específicos	17
2	DESENVOLVIMENTO.....	18
2.1	CENÁRIO ATUAL	18
2.2	TÉCNICAS DE ESTIMULAÇÃO DE POÇOS	18
2.2.1	Estimulação	18
2.2.2	Faturamento hidráulico.....	19
2.2.3	Acidificação.....	21
2.2.4	Faturamento ácido.....	22
2.2.5	Impactos ambientais.....	24
2.3	INTRODUÇÃO AO PROJETO DE BANCADA.....	26
2.3.1	Aspectos iniciais.....	26
2.3.1.1	Cavitação acústica.....	26
2.3.1.2	Temperatura do meio.....	29
2.3.2	Esquematização do projeto.....	30
2.3.3	Objetivos e motivação.....	31
2.4	PROJETO DE BANCADA DETALHES GERAIS.....	31
2.4.1	Princípios da operação.....	31
2.4.2	Materiais.....	31
2.4.2.1	Definição dos materiais.....	31
2.4.2.2	Fluido.....	32

2.4.2.3	Fluido de teste para o projeto de bancada.....	33
2.4.2.4	Material de incrustamento para o projeto de bancada.....	35
2.4.3	Estruturamento do projeto.....	36
2.4.4	Componentes principais.....	37
2.4.4.1	Gerador ultrassônico.....	37
2.4.4.2	Transdutor ultrassônico imerso.....	38
2.4.4.3	Bomba dosadora peristáltica.....	39
2.4.4.4	Tanque de acrílico externo.....	40
2.4.4.5	Tanque de acrílico interno.....	40
2.4.4.6	Tanque reservatório.....	41
2.4.4.7	Peneira de aço inox.....	42
2.4.4.8	Querosene.....	43
2.4.4.9	Parafina.....	44
2.4.4.10	Tubo para circulação de querosene.....	44
2.4.5	Elementos de fixação.....	45
2.4.5.1	Suporte de fixação para tubo pvc.....	45
2.4.5.2	Pinça de fixação do suporte.....	46
2.4.5.3	Barra de alumínio.....	46
2.4.5.4	Cantoneira de reforço.....	47
2.4.5.5	Massa de vedação.....	47
2.4.5.6	Prego de fixação de cabo.....	48
2.4.6	Mesa de bancada experimental.....	48
3	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS.....	51

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	56
-------------------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

No contexto dos recursos energéticos, o petróleo se destaca como um pilar insubstituível da civilização moderna, atendendo às demandas de inúmeras indústrias e economias em todo o mundo. No entanto, à medida que a demanda por esse recurso valioso continua a crescer, também se intensifica a complexidade de sua extração. A obstrução de poços petrolíferos surge como um desafio persistente, interrompendo o fluxo contínuo desse ouro líquido. Para enfrentar essa questão, a indústria recorreu a métodos denominados estimulação. No entanto, a dependência de técnicas invasivas, como o fraturamento hidráulico e a acidificação, levantou sérias preocupações ambientais.

Nos últimos 10 anos, no mercado petrolífero americano, observamos uma crescente taxa de produção e extração na medida em que técnicas de estimulação foram implementadas. Em 2015, temos que em 9,1 milhões de barris de petróleo extraídos por dia, mais de 50% de seu montante foi obtido por meio de fraturamento hidráulico em poços já saturados (Ersoy, E., 2019)

À medida em que técnicas de fraturamento hidráulico são aperfeiçoadas, movimentos socioambientais e organizações ambientalistas ganharam espaço de oposição contra estes métodos invasivos durante as primeiras décadas do século XXI. Os movimentos "*No Fracking Way*" são iniciativas de grupos ambientalistas e comunidades preocupadas que se opõem ao fraturamento hidráulico e buscam proibi-lo ou regulá-lo de forma mais rigorosa.

1.1 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo avaliar os métodos de estimulação de poços de petróleo mais comumente utilizados hoje em dia, além de realizar um projeto de bancada experimental visando simular uma desobstrução de poço petrolífero por meio de estímulos ultrassônicos.

1.1.1 Objetivos específicos

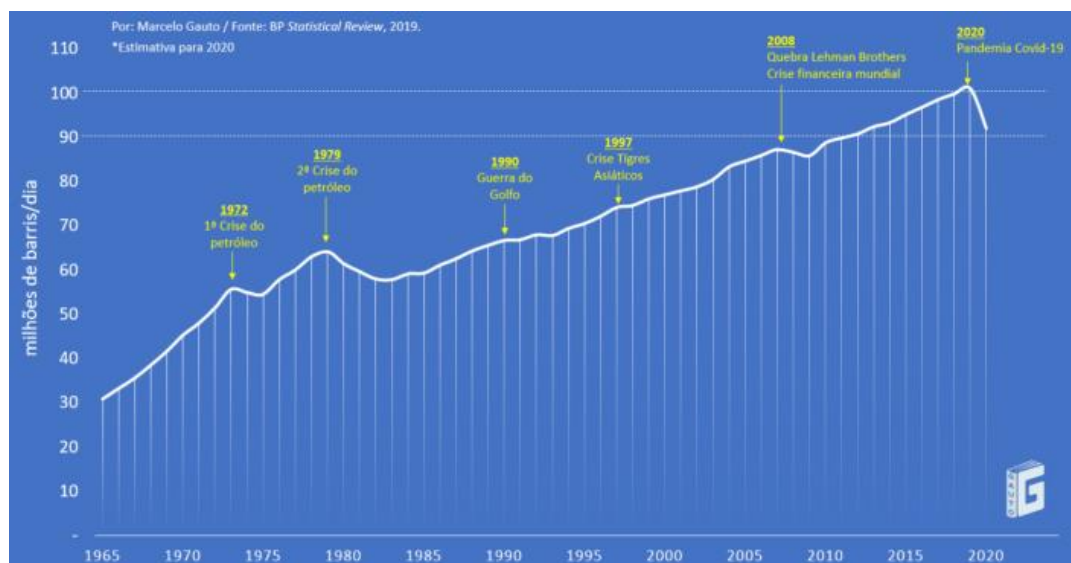
- Revisão bibliográfica de técnicas de estimulação ultrassônica
- Esquematização de um projeto de bancada

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 CENÁRIO ATUAL

Apesar de momentos de crise no setor, os combustíveis fósseis ainda são a principal fonte de energia do mundo e provavelmente permanecerão por um longo tempo, como pode ser visto no Gráfico 1 (BP Statistical Review, 2019).

Gráfico1 – Consumo mundial de petróleo (1965 – 2020).



Fonte: BP Statistical Review (2019).

Devido a sustentação do processo de prospecção desde o início da sociedade moderna, houve uma crescente demanda e exploração de petróleo, acarretando numa profunda diminuição na quantidade de petróleo extraído, necessitando de novas técnicas que possam suprir esta demanda (THOMAS, J.E.; TRIGGIA, A.A.; CORREIA, C.A. et al.,2001). Dada a sofisticação destes métodos, uma construção de um poço petrolífero apresenta um custo muito elevado desde a sua implementação à manutenção. Embora seja um recurso extremamente valorizado, o processo de obtenção de petróleo apresenta um grande desafio, a sua extração em reservatórios profundos no subsolo (AQUINO, G. S. DE & LANA, M. DA C.,1990), uma vez que sua composição bruta apresenta compostos.

2.2 TÉCNICAS DE ESTIMULAÇÃO DE POÇOS

2.2.1 Estimulação

Entende-se como estimulação, um conjunto de técnicas e procedimentos utilizados na indústria de petróleo e gás para melhorar a produtividade de um poço. Essas técnicas visam aumentar a recuperação de petróleo ou gás natural de uma formação subterrânea, que pode ter sua produção prejudicada devido a vários fatores, como baixa permeabilidade da rocha, obstruções, danos na formação ou problemas relacionados à produção. Conforme Beresnev e Johnson (1993), uma das principais inquietações das empresas na indústria petrolífera reside na diminuição da eficiência na extração do óleo. Estima-se que aproximadamente 10% do reservatório total seja explorado com a sua pressão natural, tornando desafiadora a extração de petróleo residual dada a sua limitada capacidade de se mover.

Os poços petrolíferos podem ser obstruídos por várias substâncias e materiais, incluindo:

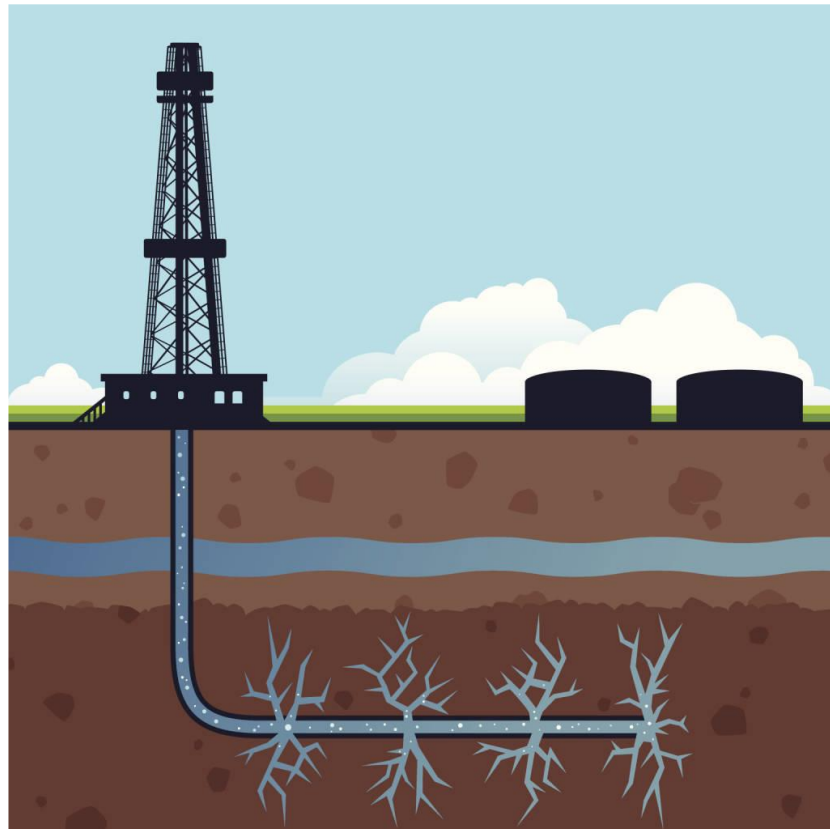
- Depósitos de Sólidos: Isso pode incluir partículas minerais, como areia, argila e sais, que se acumulam nas tubulações e equipamentos, dificultando a produção;
- Parafina (Cera): A parafina é uma substância cerosa que pode se solidificar nas tubulações e equipamentos à medida que o petróleo flui, causando obstruções;
- Incrustações de Sais: A água produzida junto com o petróleo pode conter sais que, quando concentrados, podem formar incrustações nas tubulações e nos equipamentos;
- Asfaltenos: Os asfaltenos são substâncias pesadas presentes no petróleo bruto que podem se precipitar e obstruir o fluxo;
- Resinas: Assim como os asfaltenos, as resinas são componentes do petróleo que podem causar obstruções quando precipitam;
- Bactérias e Microrganismos: Alguns microrganismos presentes na água do reservatório ou na superfície podem formar depósitos biológicos nas tubulações e equipamentos;
- Produtos Químicos e Polímeros: Em alguns casos, a injeção de produtos químicos ou polímeros durante a produção pode levar à formação de obstruções indesejadas;
- Areia e Detritos do Reservatório: Partículas de areia e outros detritos do reservatório podem ser arrastados juntamente com o petróleo, causando desgaste e obstruções nas tubulações e nos equipamentos.

2.2.2 Fraturamento Hidráulico

Tipicamente um poço produz bem no seu período inicial, mas após cerca de três anos a produtividade cai para 50%, obrigando à abertura contínua de novas perfurações. Assim, uma

das técnicas mais comuns utilizadas para recuperar um poço de extração saturado, seria o fraturamento hidráulico ou também conhecido como “*fracking*”. Este método envolve a injeção de água, areia e produtos químicos em formações rochosas subterrâneas para liberar os hidrocarbonetos retidos nas camadas de rocha (Figura 1).

Figura 1 – Fraturamento hidráulico ilustrativo.



Fonte: Não *Fracking* Brasil (2013).

Este processo envolve os seguintes processos:

- Perfuração de poços: um poço é perfurado na rocha-alvo, geralmente a milhares de metros abaixo da superfície da Terra.
- Injeção de fluidos: uma mistura de água e propante (areia e outros produtos químicos) são injetadas no poço sob alta pressão, acima da pressão de fraturamento da rocha. A pressão cria fissuras (fraturas) no substrato rochoso, normalmente menores que 1mm, permitindo que o gás natural ou petróleo flua mais facilmente para o poço.

- Recuperação de recursos: uma vez que as fissuras estão criadas, o gás ou petróleo pode fluir para a superfície, onde é coletado e transportado para uso.

Este método pode ser utilizado em poços verticais, inclinados ou horizontais na qual, este último permite uma extração maior dada a sua recuperação mais eficaz.

2.2.3 Acidificação

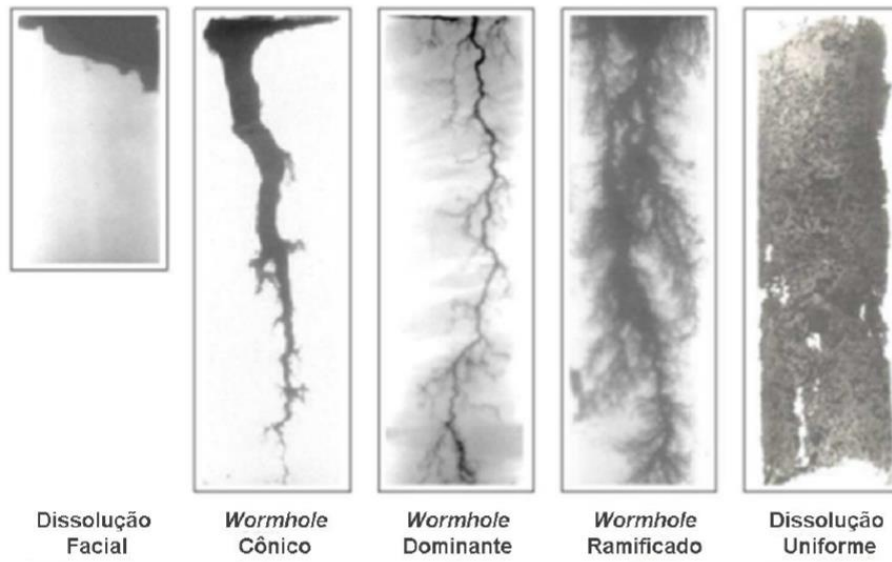
Assim como o fraturamento hidráulico, uma outra técnica alternativa para estimulação de um poço petrolífero denomina-se acidificação. Esta técnica visa em princípio um aumento na permeabilidade a partir de um tratamento brando da rocha produtora por meio de injeções de ácido abaixo da pressão de fraturamento. Sobre este processo, podemos pontuar suas etapas em:

- Escolha do Ácido: temos como o ácido mais comumente utilizado na acidificação de poços é o ácido clorídrico (HCl). No entanto, dependendo das condições específicas do reservatório, outros ácidos, como ácido fórmico (HCOOH) ou ácido acético (CH₃COOH), podem ser utilizados. A escolha do ácido depende das características geológicas e químicas do reservatório.
- Injeção de Ácido: o ácido é injetado no reservatório por meio do poço. Essa injeção pode ser realizada em uma única etapa ou em várias etapas, dependendo das necessidades do reservatório. Durante o processo de injeção, o ácido reage com os minerais da formação rochosa, criando porosidades e fraturas que melhoram a permeabilidade.
- Reações Químicas: As reações químicas que ocorrem durante a acidificação envolvem a dissolução de minerais, como carbonatos e sulfatos, presentes na formação rochosa. A dissolução desses minerais ajuda a criar canais porosos, facilitando o fluxo de petróleo em direção ao poço.

Após a dissolução da rocha, por meio do ataque ácido, podemos observar uma profunda otimização de fluxo de produção dada as formações de “*Wormholes*” nas regiões da rocha produtora. A estrutura dos *wormhole* podem ser formadas em diversas variedades, uma vez que

dependem do tipo da rocha, ácido utilizado, vazão e temperatura. (Economides et al., 1994). A Figura 2 abaixo, mostra os diferentes tipos de *wormholes* formados no processo de acidificação.

Figura 2 – Tipos de *wormholes* formados no processo de acidificação.



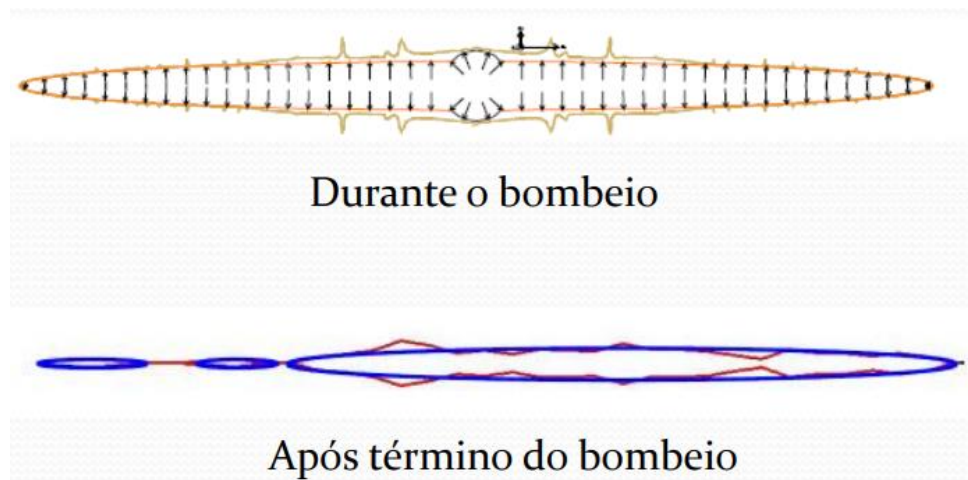
Fonte: MACHADO (2016).

2.2.4 Fraturamento Ácido

Atualmente a técnica mais utilizada para a recuperação de um poço petrolífero, se baseia na combinação de 2 técnicas, o fraturamento hidráulico e a acidificação. Assim denominado fraturamento ácido, é um método que cada vez mais ganha espaço na indústria do petróleo se tratando de processos de estimulação. Essa combinação consiste na injeção de uma mistura controlada de ácidos associada um bombeamento acima da pressão de fraturamento da rocha produtora.

A condutividade da fratura é promovida pela reação do ácido com a rocha, uma vez que irregularidades são geradas na face da fratura (Figura 3).

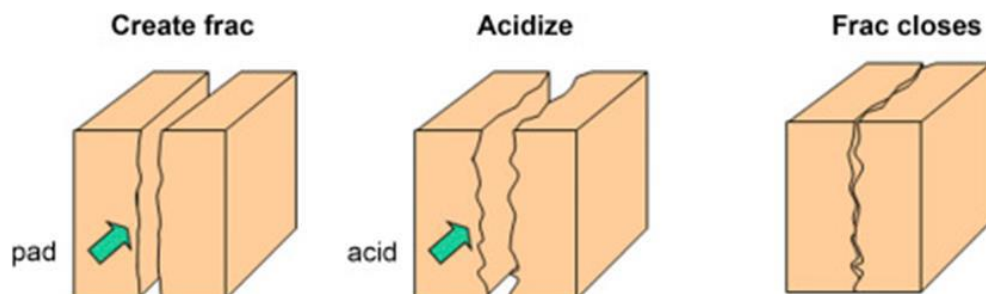
Figura 3 – Perfil de estimulação do fraturamento ácido.



Fonte: Universidade Federal Fluminense (2019).

Ao contrário do fraturamento hidráulico, propante não é usado para manter as fraturas abertas. Em vez disso, quando o bombeamento é interrompido, as fraturas se fecharão. A condutividade das fraturas ácidas depende do padrão de corrosão não uniforme das superfícies rochosas (Guo et al., 2017). Por causa da variação na distribuição de ácido na fratura e na heterogeneidade da rocha, a reação e corrosão nas superfícies rochosas podem ocorrer de maneira irregular, levando à formação de pequenos canais após o término do fechamento da fratura. Esses canais têm o potencial de oferecer uma condutividade superior quando comparados à permeabilidade original da matriz conforme pode ser observado na Figura 4 (Guo et al., 2017).

Figura 4 – Formação de canais pós ataque ácido.



Fonte: Guo (2017).

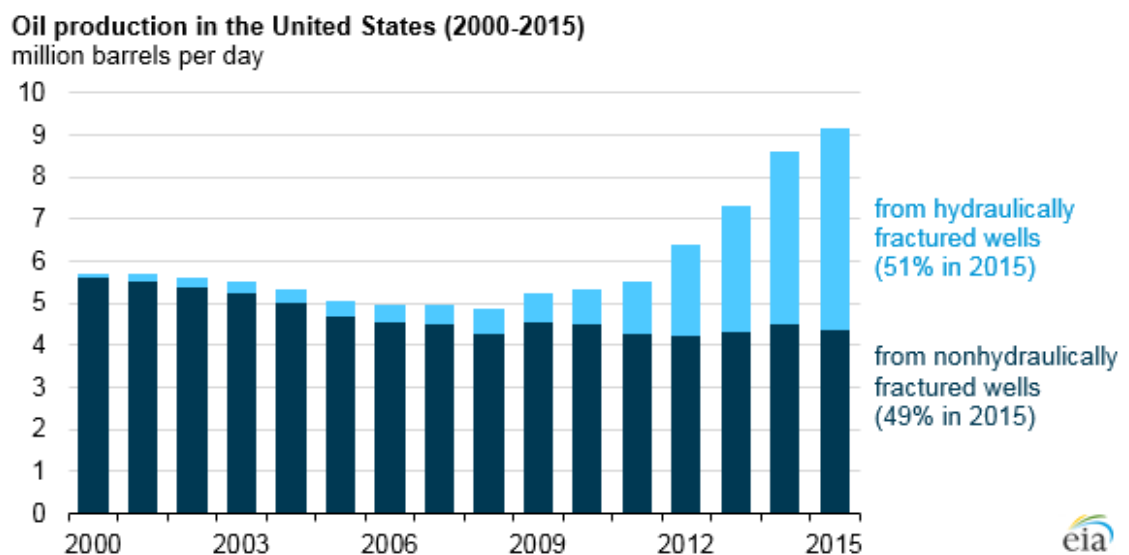
A eficiência das fraturas ácidas é determinada por esses canais abertos, sendo esse aspecto amplamente influenciado pela distribuição do ácido nas fraturas, pela profundidade

de penetração do ácido, pela redução de ácido pelas paredes das fraturas e pela taxa de reação do ácido com a rocha carbonática. Em linhas gerais, para otimizar o desempenho nos tratamentos de fraturamento ácido, o projeto deve possibilitar a penetração profunda do ácido nas fraturas, permitindo tempo suficiente para interagir com as superfícies das fraturas e controlar a redução de ácido ao longo dessas superfícies (Guo et al., 2017).

2.2.5 Impactos Ambientais

A partir do cenário atual, podemos perceber uma tendência gradual na utilização de técnicas de estimulação mais invasivas com o passar dos anos. De acordo com o gráfico 2 abaixo, podemos observar esta crescente dependência nos anos de 2000 até 2015, no que tange a utilização de fraturamento hidráulico nos países que utilizam dela, como por exemplo os Estados Unidos.

Gráfico 2 – Produção de petróleo utilizando fraturamento hidráulico.



Fonte: U.S. Energy Information Administration (2015).

Nos países que essa técnica vem sendo utilizada, apesar dos ganhos monetários que essa técnica traz com o aumento da produção de hidrocarbonetos são muitos os prejuízos causados por ela ao meio ambiente, prejuízos esses que vão desde a contaminação de lençóis freáticos e das águas superficiais até mesmo a geração de abalos sísmicos ou terremotos nas regiões próximas aos campos de exploração (Botelho, L. A. L., 2017).

Além da contaminação potencial do aquífero pelo fluido de fraturamento, os gases inerentes às camadas do reservatório rochoso, impulsionados por gradientes de densidade,

podem migrar pela fratura até atingirem o lençol freático, resultando na contaminação das águas subterrâneas. O impacto ambiental é amplificado caso esse aquífero esteja hidraulicamente conectado a um poço artesiano, uma vez que, eventualmente, esses gases ascenderão à superfície, exercendo influência sobre a biodiversidade e comunidades humanas que dependem desses recursos hídricos diariamente.

Movimentos socioambientais como “*No Fracking Way*” muitas vezes defendem a proibição ou uma regulamentação mais rigorosa do *fracking*, argumentando que os riscos ambientais e de saúde associados superam os benefícios econômicos. Atuando em níveis local e global, o movimento realiza ações locais, colabora com outras organizações e utiliza mídias sociais para conscientização. Suas atividades incluem protestos, eventos e advocacia política, visando influenciar políticas públicas em relação ao *fracking* (Figura 5).

Figura 5 – Movimento ambiental “*No Fracking Way*”.



Fonte: YES! Magazine (2013).

Partindo deste cenário, a desobstrução de poços saturados utilizando estimulação ultrassônica ainda é uma técnica pouco difundida e inovadora uma vez que, não faz o uso de agentes químicos nem emprega métodos convencionais invasivos ao meio ambiente e não traz impactos socioambientais.

2.3 INTRODUÇÃO AO PROJETO DE BANCADA

2.3.1 Aspectos Iniciais

Para esquematização e montagem de um projeto de bancada deste trabalho, foi-se necessário realizar em primeira mão, uma revisão bibliográfica e pesquisas em artigos científicos cujo tema abordasse a utilização do ultrassom com a finalidade de explorar os efeitos da cavitação em um ambiente voltada às técnicas de exploração e estimulação de petróleo.

Estas informações iniciais foram cruciais para a definição dos parâmetros dimensionais como frequência, potência ultrassônica, tempo de exposição, temperatura e pressão, ideais para serem adotadas no projeto.

2.3.1.1 Cavitação Acústica

Ao se aplicar uma onda de alta frequência, temos como principal resultado o efeito da cavitação. Segundo Vanhille (2012), as bolhas de cavitação acústica são formadas em altas amplitudes e afetam significativamente o campo ultrassônico, impactando na dissipação, dispersão e não-linearidade do meio.

É comum associarmos a cavitação acústica com a cavitação hidrostática, uma vez que ambas geram como efeito final a cavitação no meio estudado. Assim, é importante destacar que estas, se originam por meio de processos de formações diferentes. A cavitação hidrostática ocorre quando a pressão de um líquido diminui abaixo da sua pressão de vapor, resultando na formação de pequenas bolhas de vapor ou cavidades. Essas bolhas colapsam quando a pressão aumenta repentinamente, gerando ondas de choque ao se implodirem. Esse fenômeno é comum em sistemas hidráulicos ou em situações em que a pressão diminui abruptamente, como em bombas ou restrições em tubulações.

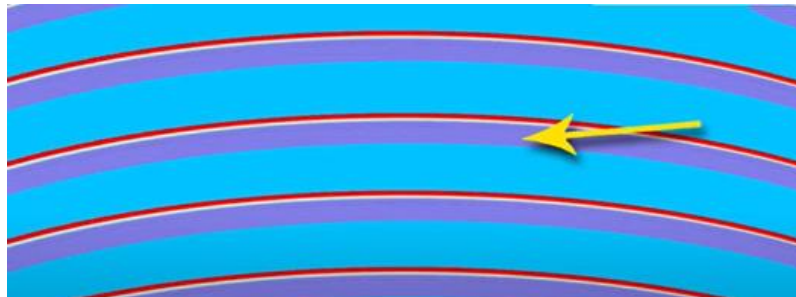
Figura 6 – Bolhas de cavitação em hélice de moto aquática.



Fonte: U.S. Navy (1940).

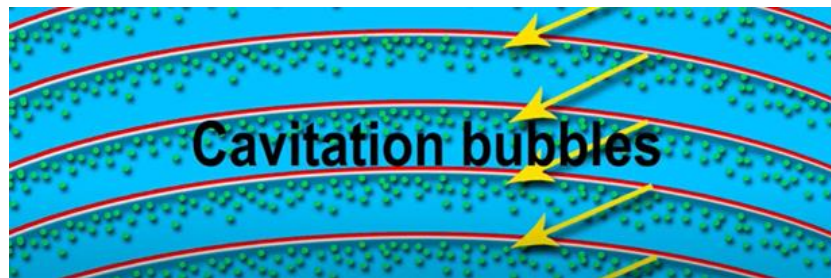
Por outro lado, é entendido como cavitação acústica o desencadeamento de ondas sonoras de alta frequência, geralmente ultrassônicas, que criam regiões de compressão e rarefação em um líquido. Em áreas de baixa pressão, indicado pela cor roxa na Figura 7, bolhas de vapor se formam devido aos ciclos rápidos de compressão e rarefação das ondas sonoras assim ilustradas na Figura 8.

Figura 7 – Zonas de compressão e rarefação.



Fonte: Adaptado do Programa de Formação Docente da Pró reitoria de graduação da Universidade Federal de Alagoas (2020).

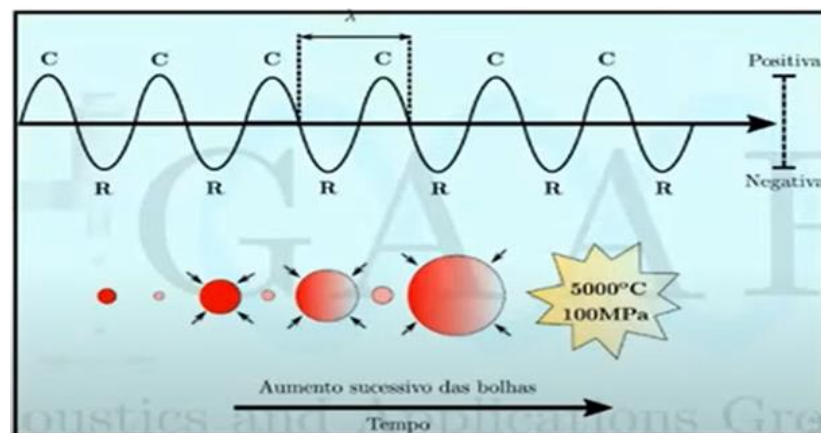
Figura 8 – Formação de bolhas de cavitação.



Fonte: Adaptado do Programa de Formação Docente da Pró reitoria de graduação da Universidade Federal de Alagoas (2020).

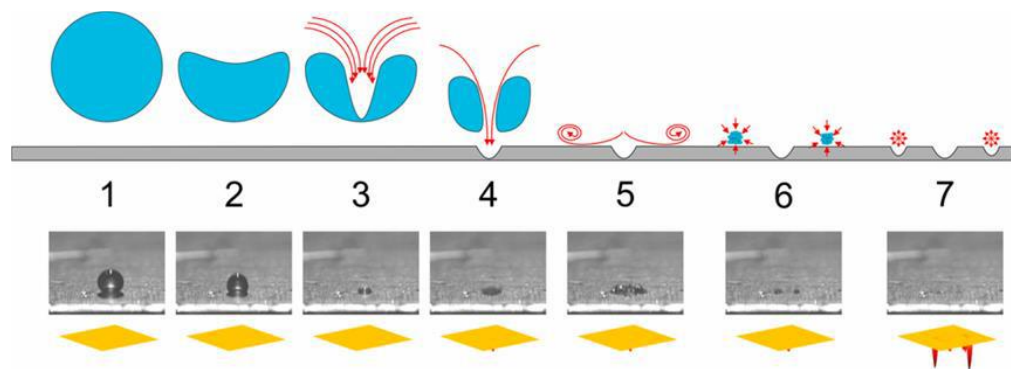
A Figura 9 está ilustrando o processo desde a formação e crescimento, dado como resultado final, quando a pressão aumenta novamente, o colapso da bolha de forma violenta e abrupta, gerando micro jatos (Figura 10) e liberando energia. Segundo Kenneth e Edward (1992), durante o colapso dessas bolhas, uma enorme onda de energia é liberada resultando em temperaturas próximas a 5000K e velocidades de 1500m/s em seu interior.

Figura 9 – Formação, crescimento e colapso da bolha de cavitação.



Fonte: Adaptado do Programa de Formação Docente da Pró reitoria de graduação da Universidade Federal de Alagoas (2020).

Figura 10 – Cavitação: implosão (1,2); micro jatos (3,4,5); micro jatos secundários (6,7).



Fonte: Dular (2019).

Por fim, ambos os tipos de cavitação envolvem a formação e colapso de bolhas de vapor, mas têm origens distintas: a cavitação hidrostática se origina de mudanças de pressão e a cavitação acústica, das variações de pressão induzidas por ondas ultrassônicas.

Conforme Awad (1996) à medida que a frequência aplicada se intensifica, bolhas de cavitação em menores diâmetros são formadas além de elevar a densidade de bolhas e implosões. Por outro lado, ao se aplicar uma baixa frequência de 20KHz a 30KHz, bolhas de cavitação de maiores diâmetros, de aproximadamente $170\mu\text{m}$, formar-se-á e ao se implozir, liberando energia de maior intensidade em comparação com a primeira.

Assim, para melhores medições e maiores taxas de eficiência, foi-se adotado como base a faixa de medida de 20KHz a 30KHz ou intensidades próximas a estes valores, visando a parametrização do projeto de bancada.

2.3.1.2 Temperatura do Meio

Assim como a cavitação, temos como efeito secundário o aumento da temperatura do meio circundante ao se aplicar uma onda ultrassônica. O calor gerado neste processo, deve-se ao atrito gerado nas fronteiras entre os meios fluido e sólido, dada as diferenças nas velocidades de vibração em cada meio (Lopuchov, 1999).

Segundo Poesio e Ooms (2005), a diferença existente entre a velocidade de vibração dos meios acarreta numa transferência de energia das ondas ultrassônicas para o calor, uma vez que a dissipação das ondas acústicas representa um decaimento de energia. Ocorre-se assim, uma conversão para energia térmica, aumentando gradativamente a temperatura no meio circundante. Consequentemente, partindo desde cenário, temos uma alteração na viscosidade

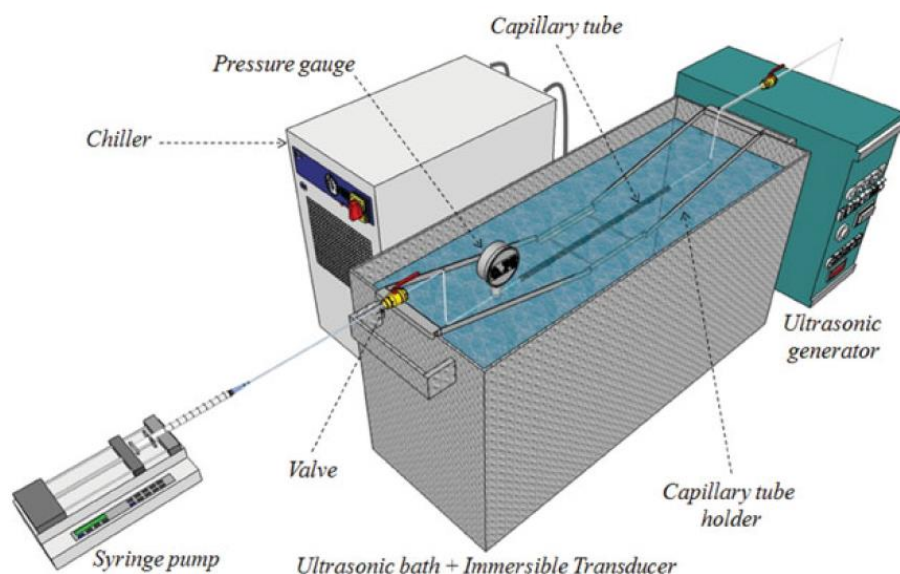
do fluido conforme Poesio et al. (2002), que demonstrou a relação da redução da viscosidade ao aumento da temperatura do meio.

Para este projeto de bancada, os efeitos do aumento da temperatura e redução da viscosidade foram considerados como parâmetros cruciais para simular uma situação de desobstrução de um poço petrolífero encrustado com elementos em asfaltenos.

2.3.2 Esquematização do Projeto

O projeto de bancada deste trabalho tem como referência o projeto de bancada sobre o tema “*The Effect of Ultrasonic Waves on Oil Viscosity*” das instituições “Universiti Teknologi MARA”, “Universiti Teknologi Malaysia” e “Petronas”, desenvolvidas por Hamidi et al. (2014), ilustradas na Figura 11. Este estudo apresenta o desenvolvimento de uma técnica para investigar diretamente o efeito de ondas ultrassônicas a 25 e 68 kHz e 100, 250 e 500 W na viscosidade de parafina, óleo sintético e querosene. Experimentos foram realizados sob condições de temperatura controlada e não controlada em um tubo capilar liso. Os resultados indicam que a viscosidade dos líquidos diminui ao serem expostos ao ultrassom e isso pode ser atribuído à geração de calor induzida e cavitação dentro do fluido. Os detalhes sobre a frequência do ultrassom, potência e temperatura na redução da viscosidade são postos em discussão e analisados pela equipe de Hamidi et al. (2014).

Figura 11 – Projeto de bancada para estudo da viscosidade.



Fonte: Hamidi (2014).

2.3.3 Objetivos e Motivação

O objetivo deste projeto de bancada ser desenvolvido e instalado na UNESP Campus Guaratinguetá, seria a possibilidade de simular e observar minuciosamente uma situação de desobstrução de um poço petrolífero, contribuindo assim para uma melhor didática aos alunos e pesquisadores sobre este assunto. Durante as reuniões com o Orientador, foram necessários realizar pontos de melhorias no projeto com a finalidade de garantir melhores resultados como o remodelamento e redimensionamento estrutural dos componentes, além da troca de composição dos materiais utilizados na bancada.

2.4 PROJETO DE BANCADA DETALHES GERAIS

2.4.1 Princípios da Operação

O projeto de bancada prevê um equipamento que simula a desobstrução de um poço de petróleo com incrustações em parafina utilizando os efeitos gerado pelo ultrassom. Esse equipamento forma um sistema capaz de injetar um fluido com vazão controlada, observar as bolhas de cavitação, analisar o processo de desobstrução e simular a sua taxa de produtividade.

2.4.2 Materiais

Nesta seção, será realizada uma discussão sobre o material recomendado a ser utilizado no projeto de bancada considerando os requisitos de propriedades dos itens a serem utilizados. Alguns materiais dos componentes precisaram ser trocados e adaptados a fim de garantir a especificação do projeto e garantir melhor eficiência.

2.4.2.1 Definição dos Materiais

A definição dos materiais do projeto é um importante passo para um determinado produto, desempenhar uma determinada função com eficácia. O mecanismo de seleção de materiais (MSM) melhora a seleção de materiais considerando a adequação técnica, os custos do ciclo de vida e os impactos ambientais, permitindo decisões mais informadas nas fases iniciais de desenvolvimento do produto (P. Peças et al.,2013).

Para a escolha do material foi preciso contemplar não apenas os parâmetros requisitos de projeto, mas também considerar o fator de risco e segurança para o operador e a equipe.

2.4.2.2 Fluido

De maneira simplificada Triggia et al. (2004), caracterizou o petróleo como um hidrocarboneto, de consistência oleosa, com menor densidade em relação a água, inflamável e com variações de cor entre o castanho-claro e negro.

O petróleo cru, obtido em diferentes poços de extração pode apresentar diferentes características de acordo com a sua viscosidade, acidez, teor de enxofre, cor etc de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Análise elementar do petróleo cru.

Elemento	Porcentagem
Hidrogênio	11 - 14 %
Carbono	83 - 87 %
Enxofre	0,06 - 8 %
Nitrogênio	0,11 - 1,7 %
Oxigênio	0,1- 2 %
Metais	Até 0,3 %

Fonte: Adaptado de Triggia (2004).

Assim, os constituintes principais do óleo são hidrocarbonetos, nas quais são os compostos orgânicos formados por hidrogênio e carbono.

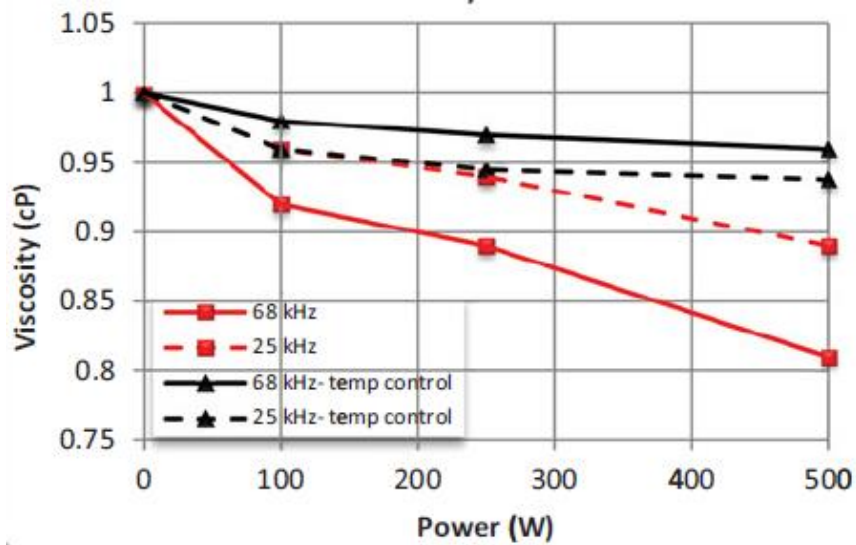
Triggia et al. (2004) cita que, os principais elementos constituintes dos óleos incluem hidrocarbonetos saturados, tais como parafinas, isoparafinas e naftenos, além de hidrocarbonetos aromáticos, resinas e asfaltenos. As parafinas normais, em geral, compreendem cerca de 15 a 20% do conteúdo total de petróleo.

2.4.2.3 Fluido de Teste para o Projeto de Bancada

A utilização do petróleo como fluido de estudo, seria uma situação mais fidedigna à realidade nos poços de extração dada as suas propriedades físico-químicas. Mas devido ao difícil acesso ao composto, além da sua instabilidade e toxicidade, este precisou ser substituído para um de seus derivados. Para a aplicação do projeto de bancada, foi-se então adotado como fluído teste o querosene.

Hamidi et al. (2014) em seu teste de bancada demonstrou resultados promissores ao se utilizar o querosene como fluído teste. Em seu estudo, ao se aplicar uma onda ultrassônica, houve um breve aumento na temperatura associada a uma redução da viscosidade do querosene se tratando de um ambiente de teste sem a utilização de um resfriador (Gráfico 3).

Gráfico 3 – Viscosidade do Querosene x Potência Ultrassônica.



Fonte: Hamidi (2014).

Como os efeitos da aplicação do ultrassom são esperados como parâmetros de teste, a escolha pelo querosene se tornou a melhor opção adequada ao projeto de bancada.

A Tabela 2 mostra as propriedades físico-químicas do querosene utilizado.

Tabela 2 – Ficha técnica do querosene utilizado.

Características	Análises Típicas
Densidade	0,77
Percentagem Recuperada a 200 °C	80
Ponto Final (°C)	300
Benzeno % v/v	0,005
Acidez do resíduo	negativa
Cor Saybolt	+21
Corrosividade ao Cobre (3h, 50°C) (máx.)	1
Enxofre total, % peso (máx.)	0,30
Ponto de Fulgor (°C)	40

Fonte: Adaptado de Allchem Química (2015).

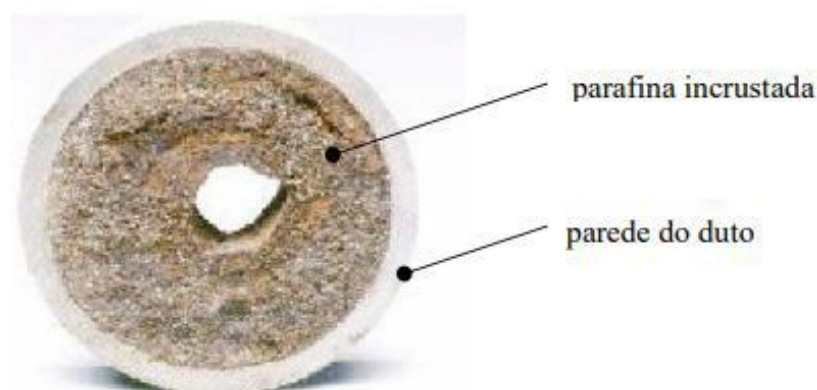
2.4.2.4 Material de incrustamento para o projeto de bancada

Segundo Li Quing et al. (2011), a incrustação nos campos de petróleo pode impactar negativamente a produção, e os métodos *antifouling* devem ser selecionados como base nas condições do campo a fim de evitar o entupimento e reduzir o impacto na produção.

Bjorndalen et al. (2004) complementa que, a aplicação de irradiação por ultrassom pode remover com eficácia os precipitados de asfaltenos e cera de parafina dos poções horizontais, reduzindo assim paradas de produção e exigindo operações e retrabalhos mínimas de condicionamento do poço.

De acordo com Azevedo e Teixeira (2003), a parafina é uma cera orgânica de elevado peso molecular, solúvel, encontrada no óleo cru nas condições termodinâmicas do reservatório. Ela se deposita suavemente nas paredes dos dutos à medida que o óleo flui e a temperatura diminui para valores abaixo da Temperatura de Inicialização do Aparecimento de Cristais (TIAC), momento crítico em que o petróleo começa a solidificar os primeiros cristais de parafina. Esta deposição dos sólidos pode resultar no entupimento total ou parcial da seção do duto conforme a ilustração da Figura 12.

Figura 12 – Incrustação de parafina em duto.



Fonte: AZEVEDO e TEIXEIRA (2003).

Tal fenômeno também ocorre nos poros da rocha produtora, dificultando ou obstruindo o seu carreamento até o poço de extração durante a produção. Por conseguinte, a fim de simular um cenário mais fiel ao processo, optou-se por utilizar a parafina como elemento de incrustamento para o projeto de bancada.

As propriedades físico-químicas da parafina 140/145 escolhida, pode ser observada na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 – Ficha técnica da parafina 140/145 utilizado.

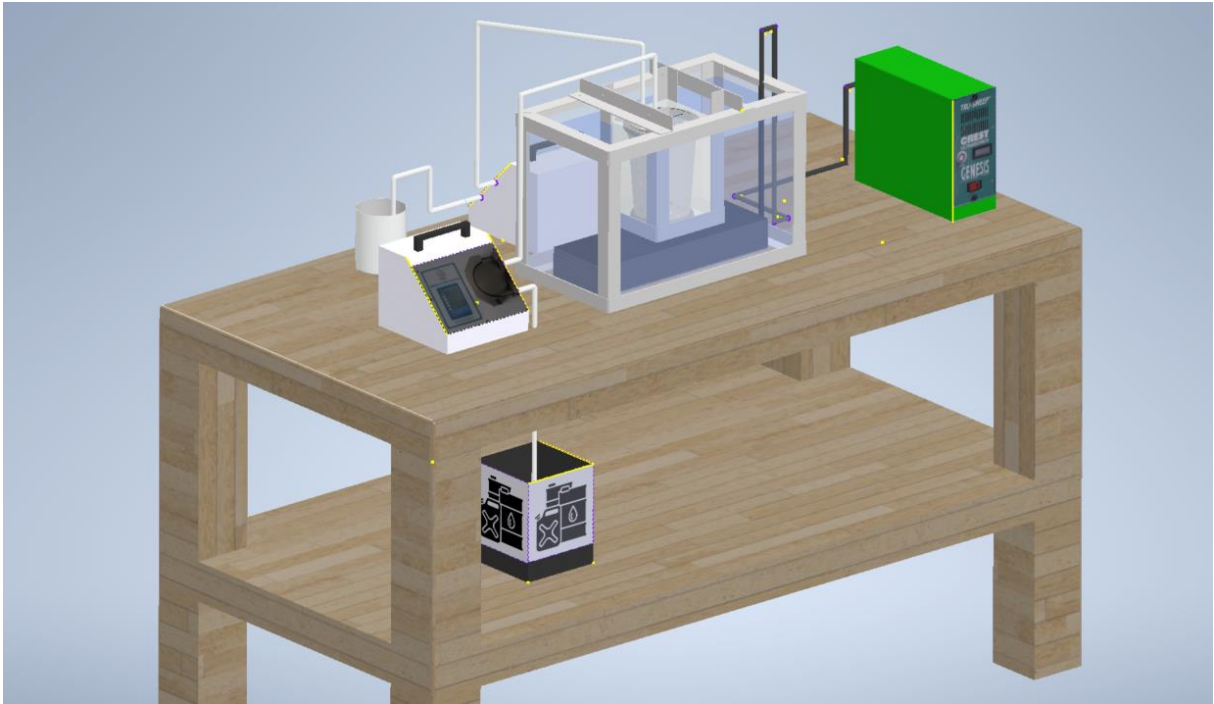
Características	Análises Típicas
Ponto de Fusão (°C)	50
Ponto de Ebulição (°C)	320
Ponto de Fulgor (°C)	180
Pressão de Vapor a 20 °C (Pa)	40,00
Densidade (g/cm ³)	0,868
Temperatura de Auto-ignição (°C)	270
Temperatura de Decomposição (°C)	280

Fonte: Adaptado de Basile Química (2016).

2.4.3 Estruturamento do Projeto

Uma modelagem em 3D do projeto de bancada foi construída com o auxílio do software Inventor Professional PRO, na qual pode ser observada na Figura 13.

Figura 13 – Modelo 3D do Projeto de bancada.



Fonte: Produção do próprio autor (2023).

2.4.4 Componentes Principais

Os componentes principais do projeto de bancada serão descritos nesta seção.

2.4.4.1 Gerador Ultrassônico

O gerador ultrassônico é responsável por garantir os 500W de potência para o transdutor, em uma frequência de 40 kHz, ligada à uma tensão de 120V de 60Hz, monofásico. O modelo possui ajuste para controle de intensidade de potência de amplitude acoplado no painel frontal.

Figura 14 – Gerador Ultrassônico.

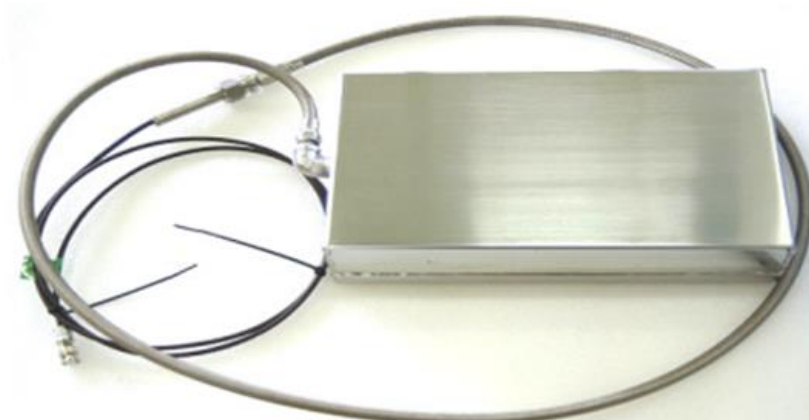


Fonte: CREST ULTRASONICS (2023).

2.4.4.2 Transdutor Ultrassônico Imerso

O Transdutor Ultrassônico Imerso é responsável por aplicar os 500W de potência por meio de 6 módulos de transdutores piezoelétricos internos revestidos em cerâmica, em uma frequência de 40 kHz. A peça conta com um cabo coaxial blindado de aproximadamente 1,82m para conexão com o gerador ultrassônico.

Figura 15 – Transdutor Ultrassônico Imerso.



Fonte: CREST ULTRASONICS (2023).

2.4.4.3 Bomba Dosadora Peristáltica

O princípio de operação de uma bomba peristáltica é baseado em roletes que estrangulam a mangueira, empurrando o fluido ao longo do tubo de forma controlada permitindo assim ajustar com precisão a vazão do fluido.

Figura 16 – Bomba Dosadora Peristáltica.



Fonte: ATHON (2023).

A mangueira padrão disponibilizada pelo fornecedor da bomba, utilizava o silicone como composição base. Esta, em contato com o querosene, ao longo prazo, acarretaria numa

degradação do silicone, resultando em amolecimento; inchamento ou perda de propriedades físico-químicas. Assim, para melhor eficiência do componente em relação ao projeto foi-se adotado a mangueira de combustível ou borracha nitrílica (NBR) (Figura 17) como adaptação ao projeto, dada a sua maior resistividade química ao entrar em contato com o querosene.

Figura 17 – Mangueira NBR.



Fonte: Produção do próprio autor (2023).

2.4.4.4 Tanque de Acrílico Externo

O Tanque de Acrílico Externo é utilizado para armazenar a água, meio responsável para a propagação das ondas ultrassônicas.

Figura 18 – Tanque de Acrílico Externo.

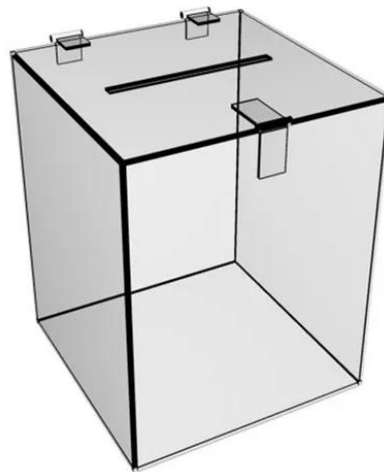


Fonte: AcriLoja (2023)

2.4.4.5 Tanque de Acrílico Interno

O Tanque de Acrílico Interno é utilizado para armazenar o querosene carregado e escoado através da peneira de aço inox. O recipiente possui um rasgo superior, permitindo a entrada da mangueira NBR no sistema.

Figura 19 – Tanque de Acrílico Interno.



Fonte: Olist (2023).

2.4.4.6 Tanque Reservatório

O Tanque Reservatório é utilizado para armazenar o querosene tendo a capacidade para 28 litros. O item é acompanhado com um pescador e adaptador de 3/8 polegadas a ser acoplada na mangueira NBR.

Figura 20 – Tanque Reservatório 28L.



Fonte: WebPlástico (2023).

2.4.4.7 Peneira de Aço Inox

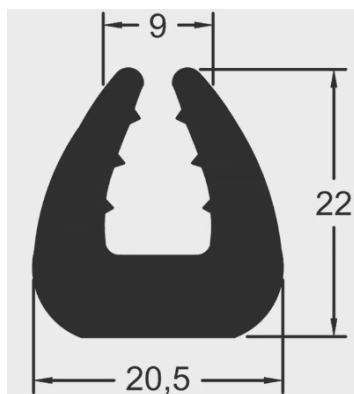
A Peneira de Aço Inox de formato em tronco de cone (Figura 21), é utilizado no projeto de bancada no interior do Tanque de Acrílico Interno, para simular os poros de escoamento de uma rocha produtora. Esta, necessitará de uma adaptação ao retirar as 2 barras roscadas e será adicionada uma borracha de vedação NBR (Figura 22) nas bases circulares menor e maior, a fim de vedar o volume de controle interno em relação ao externo. Assim, a Figura 23 ilustra um esboço final desta adaptação.

Figura 21 – Peneira de Aço Inox (Des-60).



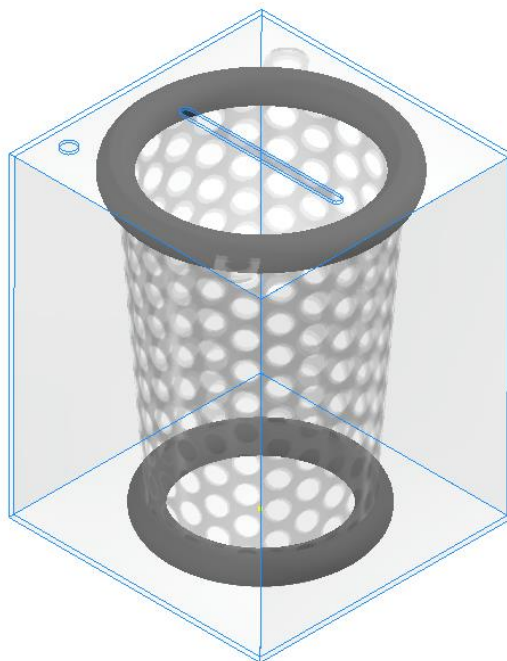
Fonte: Zanline Bazar (2023).

Figura 22 – Borracha de Vedação.



Fonte: Mercadão da Borracha (2023).

Figura 23 – Esboço final.



Fonte: Produção do autor (2023).

2.4.4.8 Querosene

Fluido utilizado para o estudo do projeto de bancada.

Figura 24 – Querosene.



Fonte: Allchem Química (2016).

2.4.4.9 Parafina

A Parafina é utilizada como elemento de incrustação na peneira inox, após fusão da parafina seguida da aplicação nos poros da peneira utilizando um pincel.

Figura 25 – Parafina.



Fonte: MENDESSILVA.IND.BR (2023).

2.4.4.10 Tubo para Circulação de Querosene

O tubo é necessário para o transporte do querosene bombeado pela do Tanque Reservatório até a Bomba Peristáltica, da Bomba Peristáltica até o Tanque de Acrílico Interno e do Tanque de Acrílico Interno até Bomba Peristáltica secundária. Para este diagrama de fluxo, o tubo de Policloreto de Vinila (PVC), uma vez que este material possui alta resistência à querosene, baixo custo, praticidade e leveza.

Figura 26 – Tubo Soldável de PVC.



Fonte: LojaMerc (2023).

2.4.5 Elementos de fixação

2.4.5.1 Suporte de Fixação para Tubo PVC

Com o propósito de assegurar uma fixação estável do Tubo PVC, minimizando qualquer vibração ou oscilação indesejada, foram implementados os suportes de fixação para garantir sua melhor estabilidade.

Figura 27 – Suporte de Fixação para Tubo PVC.



Fonte: Prolab (2023).

2.4.5.2 Pinça de Fixação do Suporte

A Pinça de Fixação do Suporte é utilizado como elemento de fixação firme do suporte, evitando movimentos indesejados durante a realização das atividades de bancada. Sua estrutura permite uma aderência precisa ao suporte, adaptando-se a diferentes formatos e tamanhos, assegurando, assim, a imobilidade necessária para prevenir oscilações ou vibrações durante o procedimento. A presença de mecanismos de ajuste possibilita o aperto controlado, garantindo a estabilidade do suporte sem danificar ou comprometer sua integridade.

Figura 28 – Pinça de Fixação do Suporte.

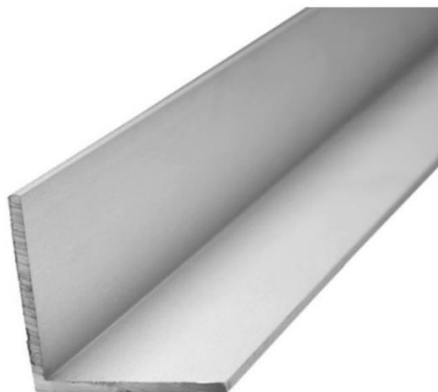


Fonte: Prolab (2023).

2.4.5.3 Barra de Alumínio

A Barra de Alumínio é utilizada na bancada como reforço estrutural ao tanque de acrílico interno quanto o externo, aumentando sua resistência a impactos ou pressões externas. Este material oferece uma alta durabilidade dada a sua resistência à corrosão e leveza, tornando-o prático no manuseio e instalação no tanque.

Figura 29 – Barra de Alumínio.



Fonte: Ferreira Costa (2023).

2.4.5.4 Cantoneira de Reforço

Essa cantoneira é usada para proporcionar suporte adicional e estabilidade a diferentes estruturas, especialmente em cantos ou locais que necessitam de reforço extra contra pressões ou impactos. É aplicada em conjunto com a Barra de Alumínio para oferecer maior resistência e rigidez, contribuindo para a integridade e estabilidade do projeto.

Figura 30 - Cantoneira de Reforço.



Fonte: TAGG (2023).

2.4.5.5 Massa de Vedação

A Massa de Vedação do projeto tem como composição o silicone, sendo esta utilizada em conjunto com a barra de alumínio entre a superfície da Barra de Alumínio com as arestas do Tanque de Acrílico Externo. Dada a boa aderência ao alumínio e acrílico, esta, proporciona uma vedação eficiente contribuindo para a integridade e durabilidade da estrutura de bancada.

Figura 31 – Massa de Vedação.



Fonte: Tekbond (2023).

2.4.5.6 Prego de Fixação de Cabo

O Prego de Fixação de Cabo é utilizado para segurar e fixar o cabo coaxial do transdutor na mesa de bancada. Seu design apresenta um formato que garante o impedimento de danos ao cabo coaxial durante o processo de fixação, proporcionando uma fixação firme e segura.

Figura 32 – Pinça de Fixação do Suporte.



Fonte: Prolab (2023).

2.4.6 Mesa de Bancada Experimental

Mesa de bancada Experimental feita em madeira MDF (*Medium Density Fiberboard*) com estrutura de sustentação em 2 andares, em dimensões de 2m x 1m x 1,1m.

Figura 33 – Mesa de Bancada Experimental.



Fonte: Produção do próprio autor (2023).

3 CONCLUSÃO

A partir da revisão bibliográfica realizada para elaborar este trabalho, foi possível compreender o cenário atual voltada a crescente demanda pelo petróleo. Técnicas e metodologias voltadas cada vez mais pronunciadas ao aumento na produtividade e margem bruta são colocadas em pauta ao serem questionadas quanto a sua prática predatória, abstraindo-se dos riscos e impactos socioambientais, abrindo espaço para pesquisas voltadas a soluções menos invasivas.

Estudos direcionados à aplicação de ultrassom em técnicas de estimulação de poços de petróleo, mostraram-se promissores ao vincular os fenômenos da cavitação acústica às práticas ecologicamente sustentáveis. Alterações nas propriedades do fluido como temperatura e viscosidade foram constatadas propiciando assim, oportunidades para investigações mais aprofundadas sobre o tema.

Após compreender os conceitos teóricos, um estudo de benchmark dos componentes pode ser realizado visando a modelagem e dimensionamento de um simulador. O projeto de bancada para a simulação de estimulação de poços de petróleo utilizando o ultrassom, tema desta pesquisa, aborda um campo de pesquisa ainda pouco explorado no cenário brasileiro, fornecendo uma perspectiva inovadora com soluções eficazes, efetivas e eficientes. Assim, como sugestão para futuros trabalhos, seria a implementação alinhada com melhorias contínuas deste projeto no Campus de Guaratinguetá – UNESP com a finalidade de contribuir na didática experimental além de difundir um pouco mais sobre a engenharia de petróleo.

REFERÊNCIAS

- ADESIVOS BASILE QUÍMICA INDÚSTRIA E COMÉRCIO. **Ficha de informações de segurança de produto químico:** Parafina macro 140/145. São Paulo: Basile Química, 2016. Disponível em: <https://www.basilequimica.com.br/wp-content/uploads/2016/04/069-FICHAQU%C3%8DMICA-PARAFINA-MACRO-140.145-Rev.02.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2023.
- ALLCHEM QUÍMICA. **Ficha técnica do produto:** querosene. Rio Grande, Allchen Química, 2015. Disponível em: <https://cdn.doocacommerce.com.br/allchem/product/attachments/ficha-tecnica-querosene1518616986626.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2023.
- AQUINO, G.S. *et al.* Exploração na bacia de Sergipe-Alagoas: o "estado da arte". **Boletim de geociências da Petrobras**. Rio de Janeiro, v. 4, n. 1, p. 3-11, 1990. Disponível em: <https://bgp.petrobras.com.br/bgp/article/view/508/>. Acesso em: 20 ago. 2023.
- AUTODESK. Autodesk Inventor Professional. Versão PRO [San Rafael]: Autodesk, 2023. Disponível em: <https://bgp.petrobras.com.br/bgp/article/view/508/>. Acesso em: 20 ago. 2023.
- AZEVEDO, L.F.A. *et al.* A critical review of the modeling of wax deposition mechanisms. **Petroleum science and technology**, United Kingdom, v.21, p. 393-408, 2003. DOI: 10.1081/LFT-120018528. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1081/LFT-120018528>. Acesso em: 15 nov. 2023.
- AWAD, S. Ultrasonic cavitations and precision cleaning. **Precision cleaning**, Sheffield, 1996. Disponível em: <https://crest-ultrasonics.com/wp-content/uploads/2021/03/lit-ultrasonic-cavitations.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2023.
- BERESNEV, I. A. *et al.* Elastic-wave stimulation of oil production: a review of methods and results. **Geophysics**. Virginia, v. 59, n. 6, p. 1000-1017, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1443645>. Disponível em: https://faculty.sites.iastate.edu/beresnev/files/inline-files/beresnev_johnson.pdf. Acesso em: 15 nov. 2023.
- BJORNDALLEN, N. *et al.* The effect of microwave and ultrasonic irradiation on crude oil during production with a horizontal well. **Journal of petroleum science and engineering**, Amsterdam, v. 43, n. 3 – 4, p. 139-150, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2004.01.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092041050400018X>. Acesso em: 15 nov. 2023.
- BOTELHO, L. A. L. **Exposição dos riscos ambientais envolvidos em operações de fraturamento hidráulico**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Petróleo) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/37028>. Acesso em: 10 dez. 2023.
- DULAR, M. *et al.* High speed observation of damage created by a collapse of a single

cavitation bubble. **Wear**, Amsterdam, v. 418–419, p. 13-23, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164818308044>. Acesso em: 02 nov. 2023.

ECONOMIDES, M. J. *et al.* Petroleum production systems. **Environmental science engineering**, New Jersey: Prentice Hall, 1994. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Petroleum-production-systems-Economides-Hill/029a92eda8adc2313eabfee893e9f7108960133c>. Acesso em: 02 nov. 2023.

ERSOY, E. *et al.* BP Statistical review of world energy 2019. 68 ed. **BP**, United Kingdom, n. 2019. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/businesssites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-fullreport.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2023.

ESTIMULAÇÃO de poços: fraturamento ácido. Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2019. Disponível em: https://www.professores.uff.br/mitre/wpcontent/uploads/sites/146/2019/06/TEQ00171_Estimulacao_FraturamentoAcido.pdf. Acesso em: 20 ago. 2023.

GUO, T. *et al.* Evaluation of acid fracturing treatments in shale formation. **Energy and fuels**, Washington, v. 31, n. 10, p. 10479–10489, 2017. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b01398. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.7b01398>. Acesso em: 20 dez. 2023.

HAMIDI, H. *et al.* The effect of ultrasonic waves on oil viscosity. **Petroleum science and technology**, United Kingdom, v. 32, n. 19, p. 2387-2395, 2014. DOI: 10.1080/10916466.2013.831873. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/264323070_The_Effect_of_Ultrasonic_Waves_on_Oil_Viscosity. Acesso em: 15 nov. 2023.

JEFFRIES, J. B. *et al.* Thermal equilibration during cavitation. **Science**, EUA, v. 256, n. 5054, p. 248-248, 1992. DOI: 10.1126/science.256.5054.248. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.256.5054.248>. Acesso em: 20 ago. 2023.

LOPUCHOV, G. P. *et al.* Vibroseismic stimulation for rehabilitation of waterflooded reservoirs. **Petroleum geoscience**, Londres, v. 5, n 3, p. 259–263, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1144/petgeo.5.3.259>. Disponível em: <https://www.earthdoc.org/content/journals/10.1144/petgeo.5.3.259>. Acesso em: 05 ago. 2023.

MACHADO, A.C. *et al.* Porous media investigation before and after hydrochloric acid injection on a pre-salt carbonate coquinas sample. **Applied radiation and isotopes**, Amsterdam, v. 110, p.160-163, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.01.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969804316300057>. Acesso em: 02 nov. 2023.

O QUE é francking? **Não fracking Brasil**, [S.l.], 2023 Disponível em:

<https://naofrackingbrasil.com.br/o-que-efracking/>. Acesso em: 10 nov. 2023.

O USO do ultrassom na indústria de petróleo [por] ProgradUFAL, Alagoas: UFAL:2020. 1 vídeo [2:00:14] publicado pelo ProgradUFAL. Alagoas, Jul. 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=gmiMvBv8vDw>. Acesso em: 05 abr. 2023

PEÇAS, P. *et al.* Comprehensive approach for informed life cycle-based materials selection. **Materials and design**, Amsterdam, v. 43, p 220-232, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.064>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306912004517>. Acesso em: 02 nov. 2023.

POESIO, P. *et al.* Influence of high frequency acoustic waves on the flow of a liquid through porous material: Experimental and theoretical investigation. In: IUTAM SYMPOSIUM ON PHYSICOCHEMICAL AND ELECTROMECHANICAL INTERACTIONS IN POROUS MEDIA, **Solid mechanics and its applications**, Netherlands: Springer, v. 125, p. 61–66, 2005. DOI:10.1007/1-4020-3865-8_5. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/1-4020-3865-8_5. Acesso em: 05 ago. 2023.

POESIO, P. *et al.* An investigation of the influence of acoustic waves on the liquid flow through a porous material. **Journal of the acoustical society of America**, Melville, v. 111, p. 2019–2025, 2002. DOI: 10.1121/1.1466872. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12051421/>. Acesso em: 05 ago. 2023.

QING, Q. L. *et al.* Ecological risk characterization and assessment of PHAS in the Shengli oil field. **Procedia environmental sciences**, Romênia, v. 10, Part B, p. 1685-1691, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.265>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029611004609>. Acesso em: 15 nov. 2023.

RABELER, K. Gas industry report calls anti-fracking movement a “Highly effective campaign”. **Yes magazine**. 2013. Disponível em: <https://www.yesmagazine.org/environment/2013/03/27/gas-industry-report-calls-anti-fracking-movement-highly-effective>. Acesso em: 10 nov. 2023.

SHENGLI, S. *et al.* Prevention of fouling in oil fields. **Corrosion and protection in petrochemical industry**, China, 2011. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Prevention-of-Fouling-in-Oil-Fields-Shengli/54cb2662bd9a54dfb6a98a6e34e1f74b943bc4de>. Acesso em: 19 ago. 2023.

TELES, A.P. *et al.* Analysis of subterranean pre-salt carbonate reservoir by x-ray computed microtomography. **Journal of petroleum science and engineering**, Amsterdam v. 144, p. 113-120, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.03.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092041051630081X>. Acesso em: 02 nov. 2023.

THOMAS, J. E. *et al.* **Fundamentos de engenharia de petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001. Disponível em: <https://idoc.pub/documents/fundamentos-da-engenharia-do-petroleo-thomaspdf-546g3ypygn8>. Acesso em: 02 ago. 2023.

TRIGGIA, A. A. *et al.* **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro; Interciência, 2004. Disponível em:
https://www.academia.edu/89351416/Fundamentos_de_Engenharia_de_Petr%C3%B3leo. Acesso em: 02 ago. 2023.

VANHILLE, C. *et al.* Acoustic cavitation mechanism: A nonlinear model. **Ultrasonics sonochemistry**, England, v. 19, n. 2, p. 217-220, 2012.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2011.06.019>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417711001416>. Acesso em: 15 nov. 2023.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ACRILLOJA. Aquário de peixe em acrílico 81 litros 60x40x33cm. **Acriloja**, Jaraguá do Sul, 2023. Disponível em: <https://www.acriloja.com/para-sua-casa/aquarios-de-peixes/de-35-a-200-litros/aquario-de-peixe-em-acrilico-81-litros-60x40x33cm>. Acesso em 25 set. 2023.

ATHON. Bomba digital touchscreen tft dosadora / peristáltica modelo bpat1c com um canal. **Athon**, Cascavel, 2023. Disponível em: <https://www.athon.eng.br/produto/bomba-digital-touch-screen-tft-dosadora-peristaltica-modelo-bpat1c-com-um-canal/12/>. Acesso em 25 set. 2023.

CREST ULTRASONICS. Delivering what's next in precision cleaning. **Crest ultrasonics**, [s.l.], 2023. Disponível em: <https://crest-ultrasonics.com/>. Acesso em 25 set. 2023.

FERREIRA COSTA. **Ferreira Costa**, Imbiribeira, 2023. Disponível em: https://www.ferreiracosta.com/produto/358893/cantoneira-tipo-l-em-aluminio-1,12x116-3-m-marmetal?region_id=222222. Acesso em 25 set. 2023.

LOJA MERC. Tubo soldável 1m Tigre. **Merc**, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.lojamerccom.com.br/tubo-soldavel-1m-tigre----10120209-1m/p?skuId=2080603302>. Acesso em 25 set. 2023.

MENDESESILVA. IND. Parafinas do Sul. **Mendes e Silva**, Barreirinhas, 2023. Disponível em: <https://mendessilva.ind.br>. Acesso em 25 set. 2023.

MERCADÃO DA BORRACHA. Borracha perfil u 22x20,5x9mm 1 metro. **Mercadão da borracha**, Manhuaçu 2023. Disponível em: https://www.mercadaodaborracha.com/MLB-1174748237-borracha-perfil-u-22x205x9mm-1-metro_JM#position=6&search_layout=stack&type=item&tracking_id=791e35cf-dff8-4407-a4e8-a362704e547a. Acesso em 25 set. 2023.

OLIST. Urna caixa acrílico 25x20x20cm. **Mercado livre**, Curitiba, 2023. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2915656746-urna-caixa-acrilico-25x20x20cm_JM?matt_tool=57602410&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14302215558&matt_ad_group_id=134553708228&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=539425529266&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=114079028&matt_product_id=MLB2915656746&matt_product_partition_id=1799527043246&matt_target_id=pla-1799527043246&gclid=EAIaIQobChMIgpbEzebh_QIVBT6RCh2VKgDyEAQYAABEGLfUfD_BwE. Acesso em: 25 set. 2023.

PROLAB. **Loja Prolab**, [s.l.], 2023. Disponível em: <https://www.lojaprolab.com.br/>. Acesso em: 25 set. 2023.

TAGG. Kit cantoneira reta com rebite tagg TGC007CPK1. **Tagg**, Curitiba, 2023. Disponível em: https://tagg.com.br/kit-cantoneira-reta-com-rebite-tagg-tgc007cpk1?gclid=Cj0KCQIAz9ieBhCIARIsACB0oGKGCap7Myh7ODQ4GH25b8EjrFbbTf26_A-ptiR7zBn_d4caF3-eOKAaAlNyEALw_wcB. Acesso em 25 set. 2023.

TEKBOND. **Tekbond**, [s.l.], 2023. Disponível em:
https://www.loja.tekbond.com.br/?gclid=Cj0KCQiAwP6sBhDAARIsAPfK_wbJ5mFfJebpo3 2PDJX80Kq6mp5xwcQf5YhB54bWSDkmHpXku3zao74aApzBEALw_wcB. Acesso em 25 set. 2023.

US ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. Hydraulic fracturing accounts for about half of current U.S. crude oil production. **EIA**, Washington, 2016. Disponível em:
<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=25372>. Acesso em: 10 nov. 2023.

WEBPLASTICO. Tanque 28 litros para gerador com pescador e retorno. **Webplástico**, Guarulhos, 2023. Disponível em:
https://www.webplastico.com.br/gerador/tanques/tanque- de-28-litros-para-gerador-com-pescador-e-retorno?variant_id=4045. Acesso em 25 set. 2023.

ZANLINE BAZAR. **Zanline**, Farroupilha, 2023. Disponível em:
<https://www.zanline.com.br/b5421-peneira-filtro-original-despolpadeira-des-60-15mm- soldada>. Acesso em 25 set. 2023.