

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO



FILIPE BREGA CÔ SILVA

ESTUDOS DO EFEITO DO CAMPO MAGNÉTICO
SOBRE OS CRISTAIS DE CARBONATO DE CÁLCIO
EM SITUAÇÃO DE POÇO DE PETRÓLEO

VITÓRIA-ES

DEZEMBRO/2023

Filipe Brega Có Silva

**ESTUDOS DO EFEITO DO CAMPO MAGNÉTICO
SOBRE OS CRISTAIS DE CARBONATO DE CÁLCIO
EM SITUAÇÃO DE POÇO DE PETRÓLEO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Filipe Brega Có Silva, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Vitória-ES

Dezembro/2023

Filipe Brega Có Silva

ESTUDOS DO EFEITO DO CAMPO MAGNÉTICO SOBRE OS CRISTAIS DE CARBONATO DE CÁLCIO EM SITUAÇÃO DE POÇO DE PETRÓLEO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Filipe Brega Có Silva, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Bruno Venturini Loureiro
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Prof. Dr. Edson Pereira Cardoso
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Prof. Dr. Helder Roberto Rocha
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Vitória-ES

Dezembro/2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas essas pessoas especiais que apareceram (e estão) na minha vida e que permitem que eu continue com os meus estudos. A todos vocês, minha eterna gratidão.

Aos meus pais, André e Renata, pelo apoio e dedicação.

A meu orientador Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva e Coorientador Prof. Dr. Bruno Venturini Loureiro por despertarem meu interesse por esse tema fascinante.

Agradeço aos colegas do grupo LaMEFT, Antônio Carlos Barbosa Zancanella, Cláudio Benincá Pimentel, Luila Abib Saidler, Luka Simas e Marcus Vinicius Motta, pelos ensinamentos e apoio.

À banca examinadora, Prof. Dr. Edson Pereira Cardoso e Prof. Dr. Edson Pereira Cardoso, pela aceitação do convite e pelo tempo investido para leitura e avaliação desse trabalho.

Agradeço à Universidade Federal do Espírito Santo pela minha formação.

Finalmente, agradeço à Fundação Espírito Santense de Tecnologia (FEST) e a Petrobrás pelo apoio financeiro.

RESUMO

A indústria petrolífera é parte fundamental do mecanismo que permite à sociedade seu estilo de vida, sua existência foi fomentada e fomentou avanços nos mais diversos setores. O petróleo é uma matéria-prima e está presente em diversos processos, sua utilização se destina à fabricação de combustíveis como gasolina, diesel e querosene, e produtos como plásticos e asfalto, esses são alguns dos seus principais papéis. Dito isto, é evidente a relação e necessidade da tecnologia dentro deste setor, seja para a modificação da matéria prima ou para a obtenção dela. O processo de recuperação de petróleo é um exercício árduo uma vez que, devido ao processo de recuperação dessa matéria-prima, geralmente implica o difícil acesso às suas reservas, sendo necessário o desenvolvimento de tecnologias resistentes a situações extremas de operação, algo bastante custoso. A incrustação é um dos desafios encontrados neste processo. O crescimento da camada incrustante na tubulação, sendo a incrustação carbonática uma das mais comumente encontradas, acarreta a redução da área útil da tubulação de extração que com o tempo traz a redução da produção e a necessidade de manutenção. Atualmente, para solucionar este problema, são empregados métodos que consistem na adição de inibidores químicos os quais reduzem a precipitação e a adesão dos componentes incrustantes à superfície da tubulação. Apesar de efetivos, estes métodos apresentam custo elevado e riscos ambientais, por esse motivo e no intuito de diminuir a dependência a um único método de atuação, métodos não químicos são estudados para funcionarem como alternativa ou complementação do método atual, visando a redução dos custos e dos riscos ambientais e o aumento da produção e da eficiência de atuação das empresas. Para poder dimensionar e aplicar o método, é necessário conhecer o mecanismo de atuação e para isso é necessário entender suas influências sobre o processo de formação e deposição da camada incrustante. Este trabalho apresenta alguns dos fenômenos reportados na literatura e relaciona-os com princípios da geração e distribuição do campo magnético, assim como sua relação com o escoamento através da modelagem e simulação de diferentes configurações de fontes geradoras do campo magnético e regimes de escoamento monofásico.

Palavras-chave: carbonato de cálcio, incrustação, inibição de incrustação, campo magnético, escoamento.

ABSTRACT

The oil industry is a fundamental part of the mechanism that enables society's lifestyle; its existence has fostered and driven advancements in various sectors. Petroleum is a raw material present in numerous processes, with its main roles being the production of fuels like gasoline, diesel, and kerosene, as well as products like plastics and asphalt. Given this, the relationship and necessity of technology within this sector are evident, whether for modifying the raw material or obtaining it. The process of oil recovery are a challenging endeavor due to the difficult access to its reserves, primarily because of the formation process of the material. This necessitates the development of technologies that can withstand extreme operational conditions, which can be quite costly. Scaling is one of the challenges encountered in this process, referring to the growth of scaling deposits on the pipeline, with carbonate scaling being one of the most commonly found types. Its formation leads to a reduction in the useful area of the extraction pipeline, resulting in reduced production and the need for maintenance over time. Currently, to address this problem, methods involving the addition of chemical inhibitors that reduce the precipitation and adhesion of scaling components to the pipeline surface are employed. Although effective, this method comes with high costs and environmental risks. For this reason, and with the aim of reducing dependence on a single approach, non-chemical methods are being studied as an alternative or complement to the current method. The goal is to reduce costs and enhance the production and operational efficiency of companies. To be able to dimension and apply the method, it is necessary to understand the mechanism of action and its influences on the process of scaling layer formation and deposition. This work presents some of the phenomena reported in the literature and relates them to principles of magnetic field generation and distribution, as well as their relationship with flow through the modeling and simulation of different configurations of field-generating sources and single-phase flow regimes.

Keywords: *calcium carbonate; scale; fouling; scale inhibitor; magnetic field; flow.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Incrustação de carbonato de cálcio em tubulação (CRABTREE et al., 1999)	12
Figura 2 – Gráfico referente aos documentos publicados que citam " <i>calcium carbonate</i> " e " <i>scale OR fooling</i> "	17
Figura 3 – Gráfico referente aos documentos publicados que citam " <i>calcium carbonate</i> ", " <i>scale OR fooling</i> " e " <i>scale mitigation OR scale control OR scale inhibitor OR anti fooling</i> "	18
Figura 4 – Gráfico referente aos documentos publicados que citam " <i>calcium carbonate</i> ", " <i>scale OR fooling</i> ", " <i>scale mitigation OR scale control OR scale inhibitor OR anti fooling</i> " e " <i>oil OR gas OR petroleum</i> "	19
Figura 5 – Gráfico referente aos documentos publicados que citam " <i>calcium carbonate</i> ", " <i>scale OR fooling</i> ", " <i>scale mitigation OR scale control OR scale inhibitor OR anti fooling</i> ", " <i>oil OR gas OR petroleum</i> " e " <i>magnetic field OR electromagnetic field</i> "	19
Figura 6 – Gráfico referente aos documentos publicados que citam " <i>calcium carbonate</i> ", " <i>scale OR fooling</i> ", " <i>scale mitigation OR scale control OR scale inhibitor OR anti fooling</i> " e " <i>magnetic field OR electromagnetic field</i> "	20
Figura 7 – Etapas envolvidas na formação de incrustações de CaCO_3 em um fluxo multifásico em um gasoduto.	22
Figura 8 – Diagrama de distribuição do ácido carbônico para água pura a 25 °C e 1 bar.	24
Figura 9 – Diagrama de distribuição do ácido carbônico para variações de pressão.	24
Figura 10 – Diagrama de distribuição do ácido carbônico para variações de temperatura.	25
Figura 11 – Diagrama de distribuição do ácido carbônico para variações de salinidade.	25
Figura 12 – Construção de um diagrama de precipitação, no qual o eixo vertical é o logaritmo natural do produto de atividade dos íons de cálcio e carbonato, $\ln AP$, e o eixo horizontal é a temperatura. Curvas de equilíbrio para a reação de formação dos polimorfos do carbonato de cálcio (calcita, aragonita, vaterita e ikaite) e carbonato de cálcio amorfo, calculadas a partir de suas constantes de equilíbrio.	26
Figura 13 – Linhas de campo gerados pela corrente que passa por um fio de dimensão infinita percorrendo o eixo z no sentido positivo	28
Figura 14 – relação de velocidade $\frac{u}{U}$ em função da relação de distância ao centro da tubulação $\frac{r}{R}$	30

Figura 15 – Variações do efeito magnetizado da água com o aumento do tempo de exposição no campo magnético de 3000 G.	31
Figura 16 – Alterações do efeito magnetizado da água com a variação da intensidade do campo magnético aplicado externamente.	31
Figura 17 – Fluxograma do código de campo magnético (Apêndice .1).	34
Figura 18 – Fluxograma do cálculo da Lei de Biot-Savart 2.8 realizada no código do Apêndice .1.	35
Figura 19 – Fluxograma que relaciona os parâmetros ed Pressão, pH, temperatura, concentração, campo magnético e vazão ao fenômeno de incrustação carbonática.	36
Figura 20 – Campo magnético vectorial, topologia I - bobinas alternando polos . . .	38
Figura 21 – Campo magnético vectorial, topologia II - divisão do sentido da corrente por hemisfério	39
Figura 22 – Campo magnético vectorial, topologia III - divisão do sentido da corrente por hemisfério com transição suave	40
Figura 23 – Perfil de velocidade normalizado para número de Reynolds $2,3 \times 10^4$, escoamento turbulento	41
Figura 24 – Perfil de velocidade normalizado para número de Reynolds $2,3 \times 10^4$, escoamento turbulento	41
Figura 25 – Perfil de velocidade normalizado para número de Reynolds $< 2,3 \times 10^3$, escoamento laminar	42
Figura 26 – Perfil de velocidade normalizado para número de Reynolds $< 2,3 \times 10^3$, escoamento laminar	42
Figura 27 – Relação BxV, com parâmetros normalizados para topologia I em regime de escoamento laminar	43
Figura 28 – Relação BxV, com parâmetros normalizados para topologia I em regime de escoamento turbulento	43
Figura 29 – Relação BxV, com parâmetros normalizados para topologia II em regime de escoamento laminar	44
Figura 30 – Relação BxV, com parâmetros normalizados para topologia II em regime de escoamento turbulento	44
Figura 31 – Relação BxV, com parâmetros normalizados para topologia III em regime de escoamento laminar	44
Figura 32 – Relação BxV, com parâmetros normalizados para topologia III em regime de escoamento turbulento	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pressão e temperatura para diversos trechos em plataforma de petróleo com produção de $3.300m^3/dia$	23
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Apresentação	11
1.2	Contribuições	13
1.3	Proposta	13
1.4	Objetivos	14
1.4.1	Objetivo Geral	14
1.4.2	Objetivos Específicos	14
1.5	Estrutura do Texto	14
2	REVISÃO	16
2.1	Bibliometria	16
2.2	Textos mais relevantes	20
2.3	Processo de Formação do Cristal de Carbonato de Cálcio	22
2.3.1	Íons dissolvidos em solução	22
2.3.2	Nucleação, Crescimento e Aglomeração	25
2.4	Conceitos fundamentais	27
2.4.1	Campo magnético	27
2.4.2	Perfil de escoamento	28
2.5	Magnetização da água	30
3	METODOLOGIA	32
3.1	Recursos Computacionais	32
3.2	Simulações	32
3.2.1	Simulação analítica do campo magnético	32
3.2.2	perfil de velocidade	35
3.2.3	Configuração magnética	35
3.3	Relação $B \times V$	36
4	RESULTADOS	37
4.1	Simulações	37
4.1.1	Resultado das simulações numéricas do campo magnético	37
4.1.1.1	Sequência I - polaridades alternadas	37
4.1.1.2	sequência II	38
4.1.1.3	sequência III	39
4.1.2	Simulação analítica do perfil de velocidade	40
4.1.2.1	escoamento turbulento	41

4.1.2.2	escoamento laminar	42
4.1.3	Comparação da intensidade de campo e velocidade	43
4.2	Discussão	43
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	46
5.1	Conclusão	46
5.2	Trabalhos Futuros	46
	REFERÊNCIAS	47
	 APÊNDICES	 49
.1	código para simulação de campo magnético	50
.2	código para simulação de perfil de velocidade em escoamento laminar	54
.3	código para simulação de perfil de velocidade em escoamento turbulento	56
.4	código para expor os vetores da relação $B \times V$, com parâmetros normalizados	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A indústria petrolífera tem papel fundamental na manutenção do sistema de vida moderna, sua produção esta diretamente relacionada a diversos processos dos quais a sociedade é dependente para funcionar. O petróleo é matéria prima para diversos processos, produzindo desde combustíveis, como gasolina, diesel e querosene, até a fabricação de plásticos, borrachas e outros produtos químicos. O gás natural por sua vez é uma importante fonte de aquecimento em diversos países europeus.

A falta de fornecimento do mesmo em 2022 ocasionou uma crise energética que obrigou muitos países a racionarem energia, estes países vivenciaram as consequências da crise de gás. O aumento considerável nos preços não só da energia, mas de diversos produtos resultou na diminuição da qualidade de vida local.

Esse acontecimento demonstrou que embora muito se fale sobre fontes alternativas de energia, ainda existe grande dependência dos recursos como petróleo e gás natural, sendo a indústria responsável por fornecer esses bens, também responsável por manter a estabilidade energética em momentos de crise.

Devido a esta dependência global, países que possuem reservas desse recurso em seu território apresentam grande vantagem no cenário geopolítico mundial, entretanto, a posse das áreas de exploração é apenas o primeiro passo.

Para que a formação de petróleo ocorra é necessário que um sedimento rico em matéria orgânica seja exposto à condições de altas pressões e elevadas temperaturas por milhares de anos, o que normalmente implica difícil acesso e recuperação. Para que se possa explorar este recurso é então necessário que o agente invista em tecnologia não apenas para a detecção das reservas, mas também para a sua exploração.

O Brasil é um exemplo disso, o país possui extensas reservas localizadas na região costeira. A esta localização se denomina *offshore*, este tipo de reserva apresenta grandes desafios, atrelada às operações de recuperação *offshore* está o alto custo (ALDEIA et al., 2022) e a necessidade do uso de tecnologias que suportem as condições extremas de operação.

Apesar de custosa, o ganho econômico advindo dessa atividade é suficiente para compensar os gastos e tempo investido em tecnologia e em formas mais eficientes de trabalho. Baseando-se nesses incentivos a Petrobras foi capaz de justificar seus investimentos e se tornar a

referência mundial na exploração de petróleo em águas profundas.

E com a descoberta de novos poços é esperado que a produção cresça no futuro próximo. De acordo com o Ministério de Minas e Energias (24 mai. 2023), a produção do primeiro trimestre de 2023 já superou a do mesmo período do ano anterior em 2,5 milhões de barris, representando um valor 3,5 vezes maior, enquanto a produção de gás foi 56% maior. Com o aumento da receita e o aumento da produção há um interesse ainda maior em estudos que fomentem novas tecnologias e busquem aumentar a eficiência dos processos e solucionar problemas.

Um problema comum e frequentemente encontrado na recuperação de petróleo e gás natural é a incrustação carbonática. Este fenômeno, na indústria petrolífera, ocorre devido à queda de pressão nos dutos de extração. À medida que o fluido se locomove do poço até a superfície a pressão exercida sobre ele decai, quando esta pressão assume valores que possibilitam a alteração do estado do CO_2 de líquido para gasoso, ocorre o denominado *flash* de CO_2 , com este componente se escapando da mistura ocorre uma queda abrupta da solubilidade dos carbonatos, ocasionando a precipitação dos mesmos (VAZQUEZ; FURSOV; MACKAY, 2016), que ao se aderirem à tubulação criam uma camada cujo crescimento diminui a seção útil e a vazão no duto (Figura 1).



Figura 1 – Incrustação de carbonato de cálcio em tubulação (CRABTREE et al., 1999)

O tratamento e a manutenção do sistema a fim de mitigar este problema é de alto custo para as empresas, sendo muitas vezes necessário o interrompimento da linha de produção para que se possa fazer a manutenção (ALDEIA et al., 2022), por este motivo é de

fundamental importância estudar métodos que impeçam ou reduzam a formação desta camada.

Os principais métodos para o controle de incrustação atualmente empregados são os métodos químicos, onde são injetados ao longo do sistema reagentes com características inibidoras, porém além dos riscos ambientais e à saúde dos operadores, este método é de alto custo. Por esses motivos são fundamentais estudos de métodos não-químicos que representem uma alternativa e possam reduzir os custos e riscos relacionados à operação de manutenção.

Entre estes métodos está a utilização de campo magnético. Estudos demonstraram experimentalmente que a utilização do campo magnético no tratamento de água pode levar à redução da adesão dos carbonatos (ESMAEILNEZHAD et al., 2017), em especial o carbonato de cálcio, um dos principais tipos encontrado na indústria petrolífera (ALDEIA et al., 2022). Além disso, entre as teses levantadas em relação à atuação do campo magnético sobre o fenômeno, está a modificação da morfologia dos cristais que constituem a camada incrustante.

1.2 Contribuições

Durante o desenvolvimento do estudo teórico foi produzido um trabalho de bibliometria (*Science Mapping*) intitulado "Utilização de Campo Magnético para Mitigação do Efeito de Incrustação Carbonática: Uma Revisão Bibliométrica". Consistente de uma análise técnica da pesquisa bibliográfica, seu objetivo é a seleção de trabalhos relacionados de forma sistemática e embasada para exposição de seus conteúdos. O trabalho foi aprovado e apresentado no IX Encontro Nacional de Construção de Poços de Petróleo e Gás (ENAHPE).

1.3 Proposta

Para que equipamentos magnéticos possam ser implementados como um método de controle de incrustação carbonática é necessário primeiramente uma compreensão da sua atuação.

A Formação, precipitação e incrustação desse sal no ambiente de recuperação é um processo complexo, envolvendo diversas variáveis de interesse e escoamento multifásico.

Desta forma vale-se de uma análise inicial isolada de cada parâmetro, promovendo uma compreensão mais aprofundada dos fenômenos envolvidos. Para isso é prática comum entre os estudos analisar a mistura de soluções salinas sem a presença dos demais componentes presentes em campo (LOUREIRO et al., 2023; ALDEIA et al., 2022; PIMENTEL, 2022).

Este trabalho atém-se ao escopo da relação de efeito de memória relatado no fenômeno de magnetização (PANG; ZHONG, 2016) presente nos testes de solução salinas monofásicas, aproximações da situação de poço. Maior compreensão deste fenômeno permitirá melhor implementação do equipamento no referente à posição e à configuração (organização dos eletroímãs ou ímãs permanentes), gerando maior eficiência ao processo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Identificar os impactos de diferentes topologias de abraçadeiras magnéticas sobre a relação campo magnético e vazão, atrelando esta informação ao processo de formação de carbonato de cálcio no interior de tubos circulares.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a importância do campo magnético como uma forma alternativa de mitigação de incrustação carbonática;
- Avaliar a importância do parâmetro campo magnético x vazão (BxV);
- Simular a disposição do campo magnético em diferentes configurações;
- Simular perfil de velocidade em fluxos completamente desenvolvidos;
- Refletir sobre o impacto do perfil BxV em escoamento interno e como isso afeta o efeito de memória das propriedades adquiridas pelo fluido.

1.5 Estrutura do Texto

O presente trabalho está estruturado da seguinte maneira:

- **Introdução:** este capítulo inicial tem como objetivo introduzir o leitor ao problema de pesquisa, apresentando como ele afeta a indústria petrolífera;
- **Revisão:** neste capítulo são apresentados os trabalhos relacionados ao tema, o princípio de formação do carbonato de cálcio no setor de petróleo e gás, além de expor os princípios fundamentais e as equações que regem as modelagens propostas na Metodologia;
- **Metodologia:** na Metodologia apresentam-se os recursos necessários para realizar as simulações assim como os parâmetros de interesse utilizados na modelagem das mesmas
- **Resultados:** o capítulo de Resultados apresenta os resultados das simulações e discute-se os impactos dos mesmos sobre a propriedade de mitigação de incrustação carbonática;
- **Conclusão:** por fim, apresenta-se um desfecho para as questões levantadas ao longo do texto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

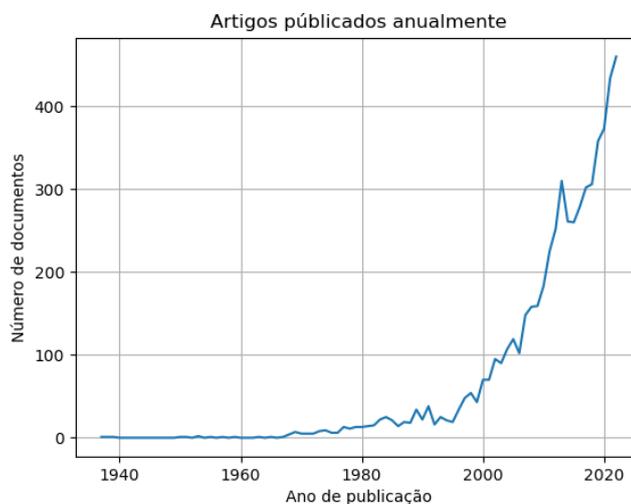
Neste Capítulo será explorada a importância do equipamento magnético como método alternativo para controle de incrustação carbonática a partir de uma revisão bibliométrica e os principais artigos provenientes desta pesquisa. Em sequência será apresentado o mecanismo de precipitação em sistemas pressurizados e o diagrama de fases do sal. Por fim serão apresentados os conceitos básicos utilizados para a construção da simulação que será responsável por promover a discussão do tópico deste trabalho.

2.1 Bibliometria

Nesta seção será apresentada uma breve pesquisa e ambientação do tema, assim como artigos mais recentes e de maior proximidade aos assuntos abordados no projeto de conclusão de curso. Expondo, a partir dos artigos mais recentes, reflexões, observações e análises.

O trabalho tem foco central nos estudos referentes às propriedades adquiridas em relação à precipitação de cristais de carbonato de cálcio presentes em ambientes de recuperação de petróleo, entretanto a literatura não está restrita apenas à esta situação. Por este motivo é utilizado o banco de dados *Scopus* para estruturar a parte inicial da pesquisa e validar os primeiros artigos a serem estudados. O primeiro passo foi a definição de palavras chaves, que quando detectadas no título, tópico ou resumo do artigo o computam para a base de dados.

Figura 2 – Gráfico referente aos documentos publicados que citam "*calcium carbonate*" e "*scale OR fooling*"

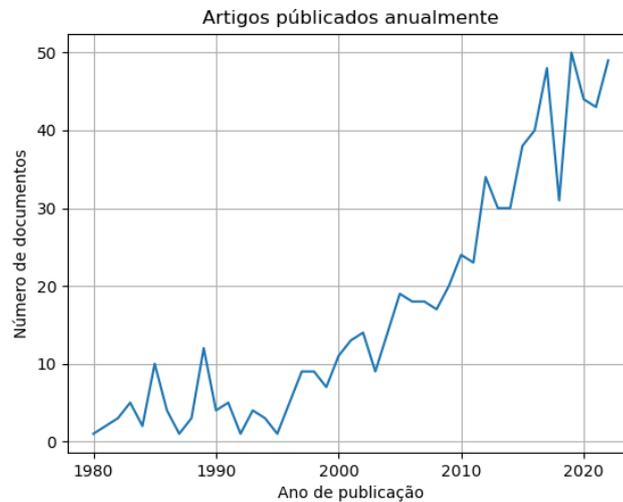


Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 2 apresenta a curva de artigos publicados por ano quando os parâmetros de pesquisa são definidos como ("*calcium carbonate*" AND ("*scale*" OR "*fooling*")) e o período de análise limitado até 2022. É possível notar que a incrustação carbonática é tema antigo dentro da comunidade científica, com o primeiro artigo do banco de dados publicado no ano de 1937. Nesta época pouco era o foco sobre este tema, mas com o passar do tempo a quantidade de estudos envolvendo o tema cresceu exponencialmente, demonstrando grande interesse sobre o assunto.

Apesar de ser um bom indicativo, os parâmetros desta primeira pesquisa são muito amplos, acrescentando mais parâmetros de pesquisa é possível afinar o tópico e assim verificar se esta tendência de crescimento da área pode ser traduzida a tópicos mais específicos.

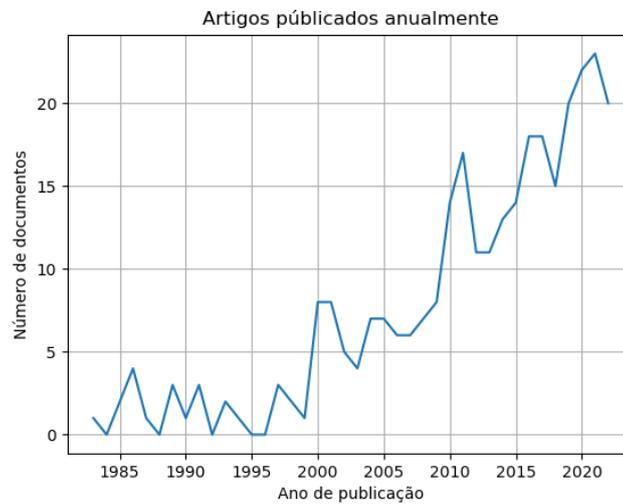
Figura 3 – Gráfico referente aos documentos publicados que citam "calcium carbonate", "scale"OR "fooling" e "scale mitigation"OR "scale control"OR "scale inhibitor"OR "anti fooling"



Fonte: Produção do próprio autor.

Quando comparadas as Figuras 2 e 3 é possível notar uma redução da quantidade global de artigos na segunda, isto ocorre pois essa representa apenas a parcela do primeiro *pool* cujo foco é o controle e mitigação do efeito incrustante. Embora ambas as curvas revelem um crescimento exponencial é notado que diferem no ano da primeira publicação, enquanto o primeiro gráfico apresenta o primeiro artigo no ano de 1937, o segundo tem o primeiro ponto da curva indicado pelo ano de 1980, demonstrando que a introdução da ideia de controle aparece anos depois na literatura.

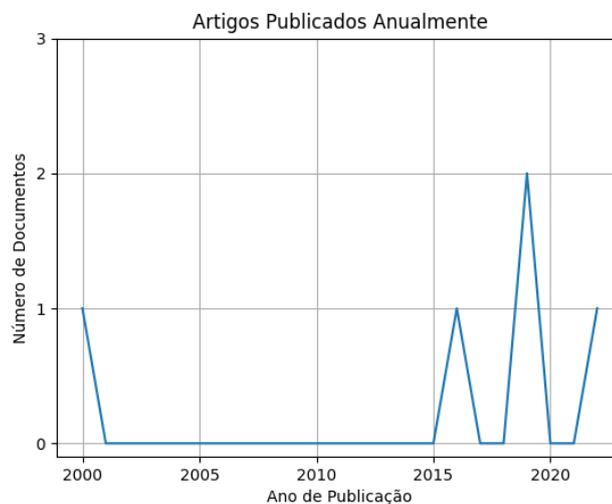
Figura 4 – Gráfico referente aos documentos publicados que citam "calcium carbonate", "scale"OR "fooling", "scale mitigation"OR "scale control"OR "scale inhibitor"OR "anti fooling" e "oil"OR "gas"OR "petroleum"



Fonte: Produção do próprio autor.

A análise ocorre de forma análoga quando comparados os gráficos 3 e 4. Com a introdução de filtros que objetivam o foco dos trabalhos para o ambiente de petróleo há uma redução ainda maior, porém com uma redução no intervalo entre os primeiros artigos. Da Figura 4 ainda é possível concluir que o crescente número de artigos indica um crescente interesse do campo mais específico.

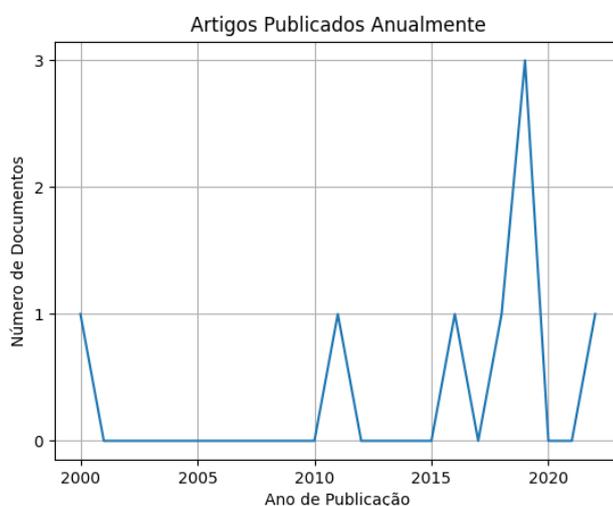
Figura 5 – Gráfico referente aos documentos publicados que citam "calcium carbonate", "scale"OR "fooling", "scale mitigation"OR "scale control"OR "scale inhibitor"OR "anti fooling", "oil"OR "gas"OR "petroleum" e "magnetic field"OR "electromagnetic field"



Fonte: Produção do próprio autor.

Posteriormente, com a introdução das palavras chaves ("*magnetic field OR electromagnetic field*"), há uma redução ainda maior, resultando em um total de 5 documentos como mostra a Figura 5. Embora a primeira aparição do método aponte para o ano 2000 com a publicação do artigo "*Assessing the effect of the application of magnetic treatment for the reduction of oilfield scale*" pode-se perceber que a concentração dos trabalhos se dá em um período mais recente, demonstrando uma exploração recente da lacuna de conhecimento referente à utilização de campo magnético para incrustação.

Figura 6 – Gráfico referente aos documentos publicados que citam "*calcium carbonate*", "*scale OR foiling*", "*scale mitigation OR scale control OR scale inhibitor OR anti foiling*" e "*magnetic field OR electromagnetic field*"



Fonte: Produção do próprio autor.

Para a última análise referente ao número de documentos obtidos é removido o filtro ("*oil OR gas OR petroleum*"). Na Figura 6 é possível notar um crescimento no número de artigos demonstrando que embora os estudos tenham seus objetivos relacionados à indústria petrolífera, seu entendimento também é buscado por pesquisadores de outras áreas.

2.2 Textos mais relevantes

A partir de uma leitura mais aprofundada de alguns dos artigos provenientes da pesquisa que resultou a Figura 5 é possível montar um panorama dos avanços, desafios e estado da arte.

Um dos parâmetros para avaliar a relevância dos artigos publicados foi o número de citações e o trabalho com maior quantidade foi o "*Characteristics and applications of magnetized water as a green technology*". Nele Esmailnezhad et al. (2017) apresenta uma revisão da literatura expondo e discutindo resultados provenientes de testes cujo tratamento da água, a partir de campo magnético, demonstram a aquisição de novas propriedades, entre elas o aumento da solubilidade de carbonatos. A partir dessas propriedades o autor afirma existir grande potencial para a utilização do método magnético dentro da indústria de petróleo, caracterizando a injeção de água magnetizada como uma forma aprimorada de recuperação de petróleo. Adicionalmente, o autor comenta sobre a complexidade do sistema devido à grande quantidade das variáveis de influência (como pressão, vazão, temperatura, pH e campo magnético), afirma que a comunidade científica ainda não possui completo entendimento do problema e complementa ressaltando a escassez de trabalhos considerando as altas pressões como encontradas nas plataformas de petróleo.

Como resposta à essa lacuna de conhecimento, recentemente surgiram mais implementações experimentais com pressões elevadas, como "*Experimental Study of the Effect of Magnetic Field Associated with Inhibitorin Calcium Carbonate Scale Formation*" (ALDEIA et al., 2022) e "*Large-Scale Pipe Flow Experiments for the Evaluation of Nonchemical Solutions for Calcium Carbonate Scaling Inhibition and Control*" (LOUREIRO et al., 2023). Os resultados para pressões elevadas obtidos nestes trabalhos estão de acordo com o esperado, condizentes com o que foi previsto por Esmailnezhad et al. (2017).

Além disso, o primeiro adiciona ao estudo em altas pressões a variação da temperatura e a combinação do método magnético com o método químico já utilizado na indústria. Aldeia et al. (2022) discute a influência do campo magnético e da temperatura sobre a morfologia dos cristais de carbonato precipitados e comenta como cada tipo de morfologia tem influência diferente na formação da camada incrustante.

O carbonato de cálcio pode assumir uma de três morfologias, calcita, vaterita ou aragonita. A calcita é a forma mais estável à temperatura ambiente e representa a forma que mais fortemente se adere a superfície da tubulação. Vaterita e aragonita são formas menos estáveis à temperatura ambiente e apresentam menor grau de adesão.

Loureiro et al. (2023) também apresenta uma análise morfológica da camada de carbonato de cálcio obtida em seus testes e obtém resultados similares aos já reportados. Adicionalmente ao estudo da influência magnética, são realizados testes com equipamento de ultrassom. Seus resultados mostram que em pressões menores, o ultrassom apresenta melhor resultado em relação ao método magnético na condição de mitigação do problema de incrustação carbonática, porém os resultados se invertem à medida que a pressão aumenta.

Embora reduza a eficiência do campo magnético essa redução é pequena quando comparado ao outro método, demonstrando que a pressão é parâmetro fundamental na modulação do problema e demonstrando o método magnético como um método não-químico promissor.

2.3 Processo de Formação do Cristal de Carbonato de Cálcio

Para poder entender como tratar o problema da incrustação carbonática, primeiro é necessário entender os fenômeno de formação do cristal de carbonato de cálcio e sua adesão, suas etapas e variáveis de interesse. As etapas estão evidenciadas na Figura 7 e se dividem em nucleação, crescimento, aglomeração e incrustação.

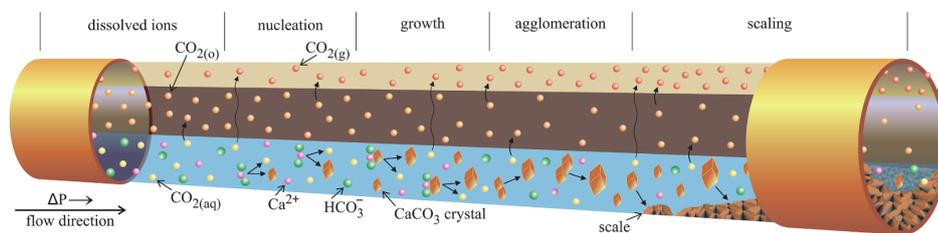


Figura 7 – Etapas envolvidas na formação de incrustações de CaCO_3 em um fluxo multifásico em um gasoduto.

Fonte: (Cosmo et al., 2022).

2.3.1 Íons dissolvidos em solução

Entre as espécies em solução a quantidade de CO_2 dissolvido é uma variável de extrema importância por estar diretamente relacionada ao equilíbrio das equações de formação de CaCO_3 .

A tabela 1 relaciona os dados de temperatura e pressão aos diferentes trechos do processo de extração. Estas relações são importantes para compreender o ponto de maior precipitação com base nas equações de equilíbrio.

As perdas de carga mecânica presentes ao longo da linha culminam na redução da pressão, esta redução de pressão por sua vez ocasiona um deslocamento do equilíbrio da equação 2.2 para à esquerda pelo princípio de Le Chatelier. Além da redução de pressão, o aumento do pH caracteriza mudança nas condições de equilíbrio ocasionando em mais precipitado de carbonato de cálcio devido ao aparecimento de HCO_3^- .

Tabela 1 – Pressão e temperatura para diversos trechos em plataforma de petróleo com produção de $3.300m^3/dia$.

Trecho	Pressão (bar)	Temperatura (°C)	pH
Reservatório	472	136	4,75
Perfuração	312	145	4,91
ANM	259	141	4,93
Riser / Linhas de produção	99	114	5,09
ESPO	66	99	5,16

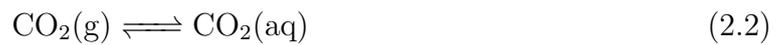
Fonte: adaptado de Cosmo et al. (2022).

A versão simplificada para formação de carbonato de cálcio, em meio aquoso à pressão ambiente, é a da união de íons de cálcio (Ca^{2+}) e de carbonato (CO_3^{2-}) presentes na solução, vide equação 2.1 (Cosmo et al., 2022).

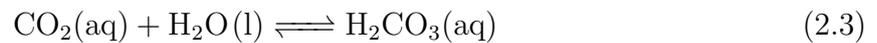


Entretanto, para ambiente de exploração como o pré-sal, o sistema é altamente pressurizado e essa diferença de pressão faz com que outras espécies precisem ser consideradas.

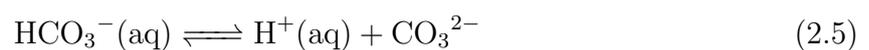
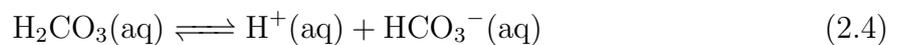
Nestes sistemas, CO_2 pode transitar entre as formas gasosa e líquida, a depender de fatores como temperatura e pressão parcial (2.2).



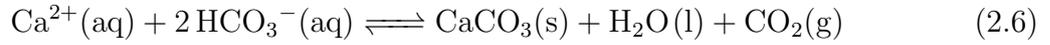
A união de $CO_2(aq)$ com a água forma ácido carbonato (H_2CO_3) (2.3).



O ácido carbonato por sua vez possui dois estágios de desassociação, descritos em sequência nas equações 2.4 e 2.5



Unindo as equações 2.1 com 2.3, 2.4 e 2.5 é possível obter a equação de equilíbrio que descreve a precipitação de carbonato de cálcio de forma mais direta (2.6) (Cosmo et al., 2022).



A relação da distribuição destas espécies e o pH estão diretamente relacionados como pode ser visto na Figura 8. Porém, variações nas relações de pressão, temperatura e concentração salina deslocam esse diagrama, como pode ser visto nas Figuras 9, 10 e 11.

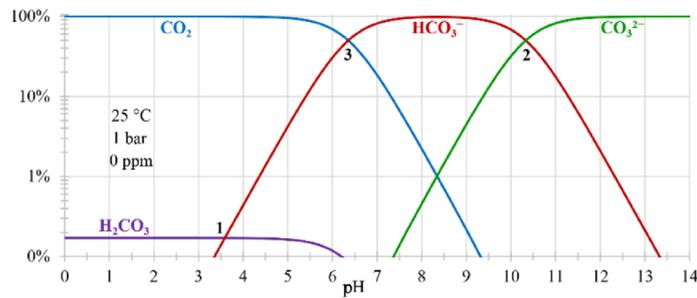


Figura 8 – Diagrama de distribuição do ácido carbônico para água pura a 25 °C e 1 bar.

Fonte: (Cosmo et al., 2022).

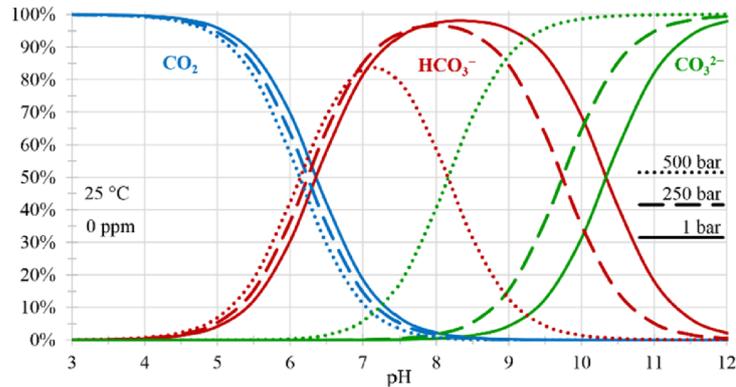


Figura 9 – Diagrama de distribuição do ácido carbônico para variações de pressão.

Fonte: (Cosmo et al., 2022).

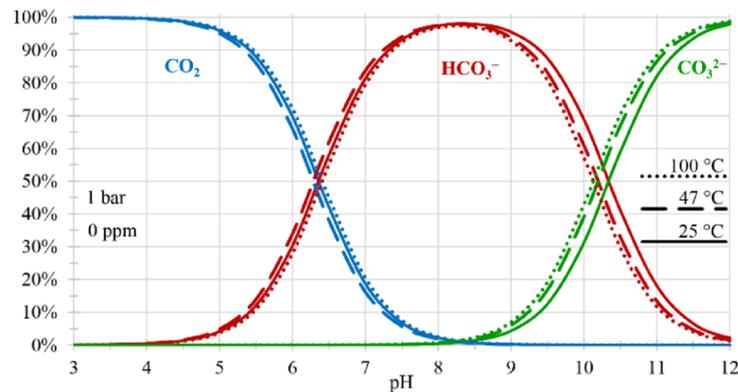


Figura 10 – Diagrama de distribuição do ácido carbônico para variações de temperatura.

Fonte: (Cosmo et al., 2022).

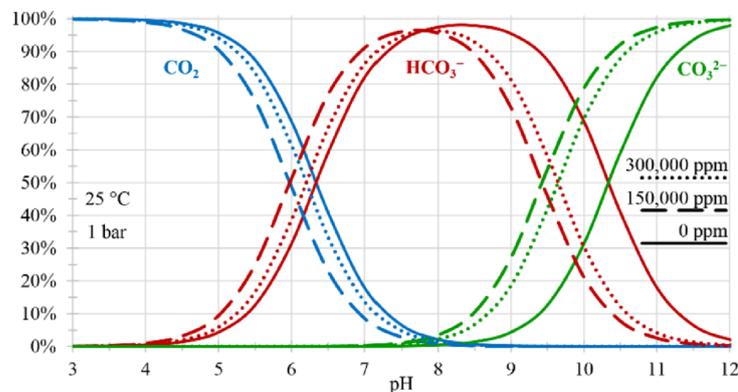


Figura 11 – Diagrama de distribuição do ácido carbônico para variações de salinidade.

Fonte: (Cosmo et al., 2022).

2.3.2 Nucleação, Crescimento e Aglomeração

Além da relação de íons dispersos, outro ponto importante na parte da nucleação, em especial para a relação de impacto do equipamento magnético, é a morfologia assumida pelo cristal em sua formação e crescimento. Isso, pois ambos artigos mais recentes discutidos na seção 2.2, identificam a morfologia como um fator importante no processo de incrustação, relatando diferenças em relação à força de adesão para diferentes fases alotrópicas.

Para poder interpretar os resultados dos testes experimentais é importante entender quais os fatores que atuam sobre o equilíbrio de precipitação das fases alotrópicas.

Kawano et al. (2009) realiza uma série de testes variando a temperatura e fornece à literatura um diagrama de fases para os cristais de carbonato de cálcio em função dessa e do produto de atividade da solução, relativo à força motriz de nucleação. A Figura 12 representa este diagrama.

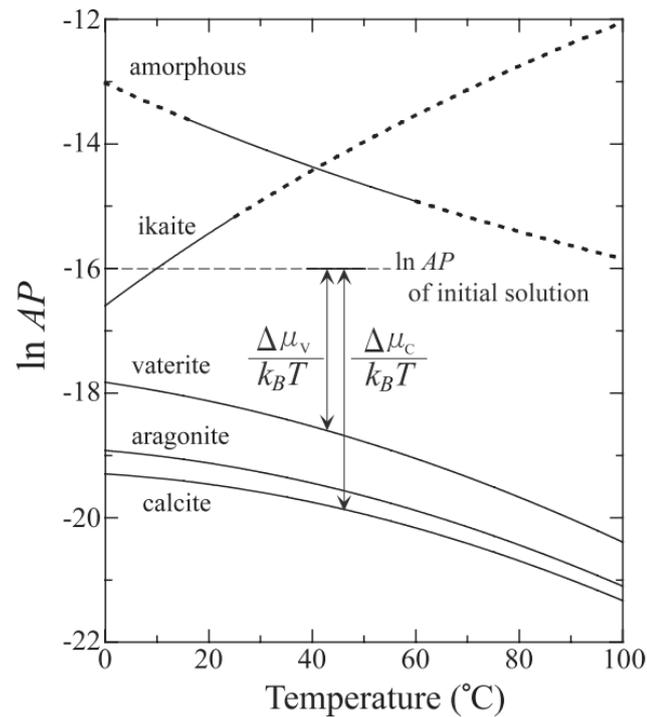


Figura 12 – Construção de um diagrama de precipitação, no qual o eixo vertical é o logaritmo natural do produto de atividade dos íons de cálcio e carbonato, $\ln AP$, e o eixo horizontal é a temperatura. Curvas de equilíbrio para a reação de formação dos polimorfos do carbonato de cálcio (calcita, aragonita, vaterita e ikaite) e carbonato de cálcio amorfo, calculadas a partir de suas constantes de equilíbrio.

Fonte: (KAWANO et al., 2009).

Pode notar-se a presença de uma fase alotrópica antes não mencionada, ikaite, essa fase não foi referenciada pelos outros autores pois sua formação não ocorre de forma natural e portanto não é de interesse desse trabalho.

A revisão bibliográfica reforça a previsão do equipamento magnético como meio de eficiência o processo de recuperação de petróleo, ao mesmo tempo que demonstra a necessidade de mais estudos serem realizados na área, principalmente nas considerações da morfologia dos cristais, pois embora o mecanismo de funcionamento do método ainda não seja completamente entendido é indicada a sua relação com este parâmetro.

Além da morfologia outro fator abordado é o tamanho dos cristais e estudos prévios apontam a alteração do tamanho das partículas formadas quando expostas ao campo magnético (PARSONS et al., 1997). Este relato é de interesse devido à próxima etapa, aglomeração.

A aglomeração representa o estágio em que os diversos clusters se unem formando um corpo maior. Este corpo pode ter dois destinos, escoar junto à solução e ser transportado para regiões à jusante de sua formação, ou pode aderir à parede da tubulação formando a

camada incrustada. O tamanho de partícula é importante pois é diretamente relacionado à força do efeito cisalhante do escoamento sobre o aglomerado.

$$F_D = \frac{\rho V^2 A C_D}{2} \quad (2.7)$$

Isto é visível a partir da equação 2.7 (PRITCHARD, 2010) em que F_D é a força de arrasto, C_D é o coeficiente de arrasto, ρ e V são, respectivamente, a densidade e velocidade do fluido e A é a área do objeto, neste caso, o precipitado formado.

Com o aumento do tamanho da partícula a área A aumenta, aumentando a força F_D da equação 2.7, se esta força for suficiente pode ocorrer a quebra do aglomerado desacelerando o crescimento da camada incrustante.

2.4 Conceitos fundamentais

Nesta subseção serão discutidos os conceitos fundamentais utilizados para a elaboração das simulações e modelagens analíticas.

2.4.1 Campo magnético

O primeiro passo para compreender o impacto do campo magnético no regime de escoamento interno da tubulação é entender a disposição do campo na região. Para modelar o campo foi proposta a utilização da Lei de Bio-Savart (2.8) (WENTWORTH, 2006) que relaciona o campo gerado por uma corrente.

$$H = \int \frac{IdL \times a_R}{4\pi R^2} \quad (2.8)$$

Onde, H é o campo gerado, I é a corrente, dL é a seção que representa a distância percorrida pela corrente, a_R é o vetor normalizado da distância do ponto onde deseja-se o campo magnético e a região onde a corrente circula e R é a distância entre o ponto de estimativa do campo e o ponto da corrente.

Desta forma as linhas de campo geradas pela corrente que passa por uma linha infinita pode ser vista na Figura 13.

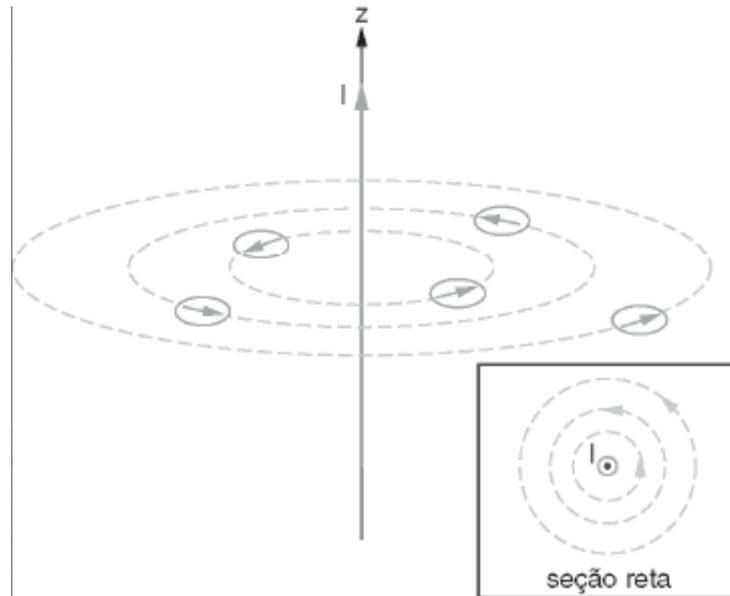


Figura 13 – Linhas de campo gerados pela corrente que passa por um fio de dimensão infinita percorrendo o eixo z no sentido positivo

Fonte: Wentworth (2006)

2.4.2 Perfil de escoamento

A análise do perfil de velocidade de escoamento é interessante para este trabalho pois ele tem relação direta com a vazão, vide equação 2.9 onde Q é a vazão em m^3/s , A é a área em m^2 e v é a velocidade em m/s .

$$Q = A \times v \quad (2.9)$$

Desta forma a relação $B \times V$, campo magnético por vazão é diretamente proporcional à relação campo x velocidade de escoamento.

Para a simplificação do problema, serão considerados casos para líquidos incompressíveis em regimes completamente desenvolvidos em tubulação lisa e cilíndrica. O tipo de escoamento neste sistema é definido em princípio pelo número de Reynolds, que para o sistema descrito apresenta-se na equação 2.10.

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (2.10)$$

Sendo:

- ρ é a densidade do fluido,
- u é a velocidade do fluido,
- L é uma dimensão característica (neste caso o diâmetro do tubo),
- μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

Sob condições normais, sistemas com valores até $Re \approx 2300$, apresentam característica de escoamento laminar, cujo perfil de velocidade é regido pela equação 2.11.

$$u = -\frac{R^2}{4\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2.11)$$

Em que:

- R é o raio da tubulação;
- r é a distância do ponto observado ao centro da seção circular;
- $\frac{\partial p}{\partial x}$ é a derivada parcial em relação à x da pressão.

Ademais a expressão 2.11 pode ser simplificada para:

$$\frac{u}{U} = 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad (2.12)$$

em que U é a velocidade máxima do escoamento, no centro da tubulação, que esta presente no centro da tubulação, $r = 0$.

Para valores de superiores à $Re \approx 2300$, em condições normais, o escoamento se torna turbulento. Nessa condição não há uma relação universal entre as forças de cisalhamento e a velocidade de escoamento (PRITCHARD, 2010), restando métodos empíricos e aproximações.

A aproximação pode ser realizada através da lei da potência, baseando se em dados empíricos. Como resultado a implementação com base na equação 2.12 passa a ser:

$$\frac{u}{U} = 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.13)$$

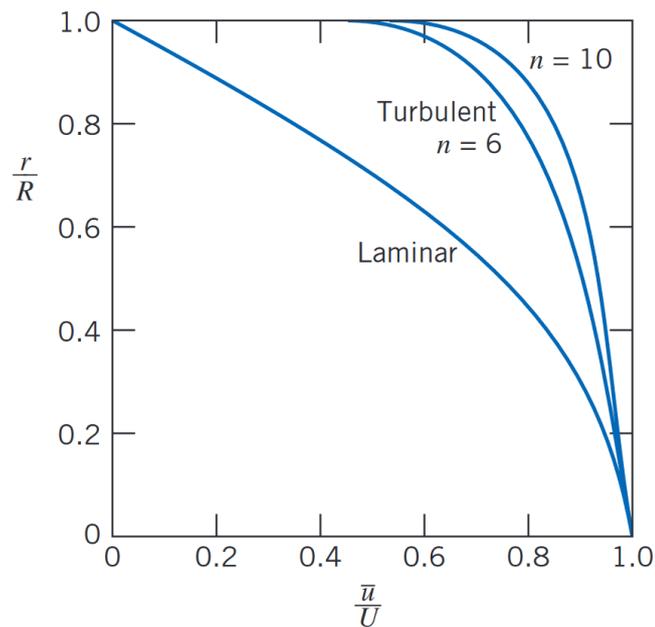


Figura 14 – relação de velocidade $\frac{u}{U}$ em função da relação de distância ao centro da tubulação $\frac{r}{R}$

Fonte: Pritchard (2010)

em que n é obtido em função do número de Reynolds 2.10 através da seguinte equação 2.14:

$$n = 1,7 - 1,8 \times \log Re \quad (2.14)$$

O gráfico abaixo demonstra o impacto de n no perfil de escoamento descrevendo a relação de velocidade $\frac{u}{U}$ em função da relação de distância ao centro da tubulação $\frac{r}{R}$ (Figura 14:

2.5 Magnetização da água

Sobre os efeitos do campo magnético sobre a água estão dois parâmetros importantes, a intensidade de campo e o tempo. Pang e Zhong (2016), demonstram que o tempo de exposição e intensidade de campo estão diretamente relacionados à força relativa do efeito magnético, isto é, as propriedades adquiridas se intensificam proporcionalmente ao campo e tempo. Porém, para ambos os parâmetros existe um determinado ponto de saturação. Os resultados de Pang e Zhong (2016) são expostos nas Figuras 15 e 16.

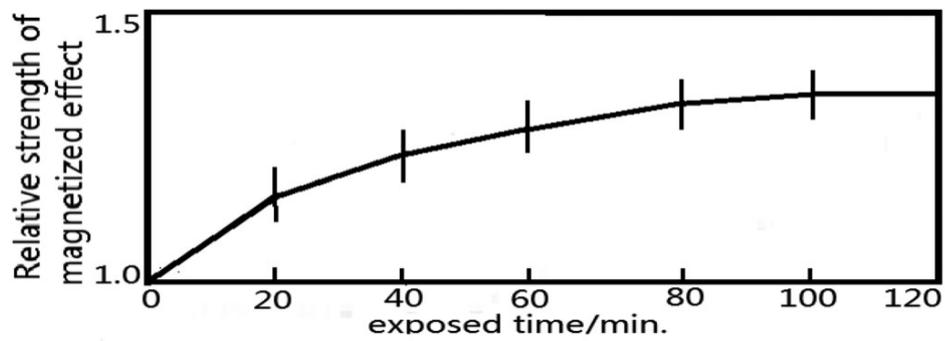


Figura 15 – Variações do efeito magnetizado da água com o aumento do tempo de exposição no campo magnético de 3000 G.

Fonte: Pang e Zhong (2016)

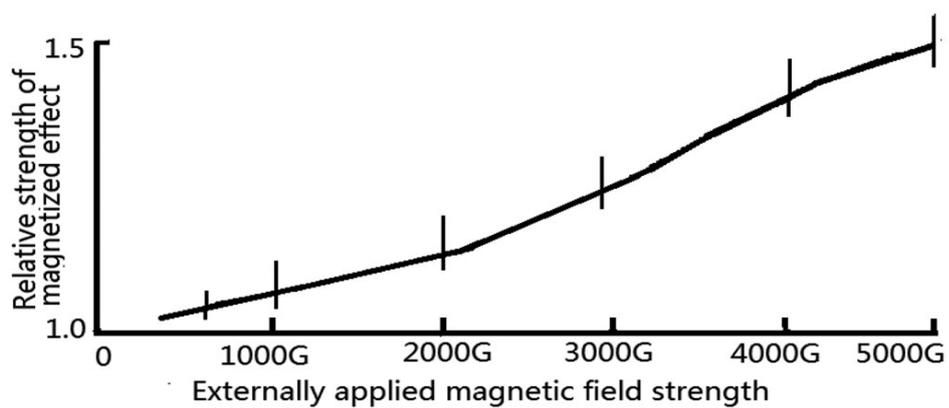


Figura 16 – Alterações do efeito magnetizado da água com a variação da intensidade do campo magnético aplicado externamente.

Fonte: Pang e Zhong (2016)

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os recursos utilizados na confecção das simulações além da modelagem das equações da seção 2.4 para formação das reações tridimensionais presentes no Capítulo 5.

3.1 Recursos Computacionais

Recursos de *Software* As simulações presentes neste trabalho foram feitas usando a linguagem Python e as bibliotecas *numpy*, *matplotlib* e *mpl toolkit*/ escolha desta linguagem e biblioteca foram baseadas na disponibilidade e acesso livre, além da familiaridade do autor com as mesmas.

Recursos de *Hardware* Além disso, a máquina utilizada nos experimentos possuía a seguinte configuração: (*i*) sistema operacional Windows 11 Home, versão 23H2; (*ii*) processador Intel Core i7-1355u; (*iii*) memória RAM de 16 GB; (*iv*) unidade de armazenamento de 512 GB;

3.2 Simulações

3.2.1 Simulação analítica do campo magnético

Para modelagem do campo magnético foi utilizado a equação 2.8 que relaciona campo magnético à corrente e distância. A integral denota que o campo é formado pela contribuição de todos os trechos infinitesimais que compõem cada um dos anéis.

Analisando a equação para o caso proposto, os primeiros parâmetros de modelagem foram os raios dos anéis por onde circulam a corrente, pela distância desses ao centro da tubulação e os pontos que compõem a área interna da tubulação.

Começando pelo último, o diâmetro da tubulação de extração (*Risers*) em instalações do pré-sal brasileiro tem variação alta, entre 2,5 à 18 polegadas (6,35 à 45,75 cm). Para as simulações foi escolhido um valor de 22cm (11cm de raio) (AZEVEDO et al., 2009)

para determinar a área de fluxo. Já para a distância dos anéis de corrente ao centro foi utilizado o raio de 18cm (36cm de distância entre anéis paralelos).

Por fim, para o tamanho e quantidade de anéis foi utilizado respectivamente 4cm e 10. Esta escolha foi arbitrária apenas obedecendo a relação em que os anéis não se tocassem.

Para a corrente dos anéis a escolha foi mantida entre -1 e 1 . A contribuição do sinal negativo é para inferir a direção da corrente, possibilitando a inversão de polos magnéticos, enquanto que o valor máximo de $|I|$ foi escolhido pois para corrente constante ao longo do anel, a variável I da equação 2.8 pode ser retirada de dentro da integral retornando 3.1. Desta forma, desde que seja respeitada a relação de corrente entre anéis, a distribuição do campo permanece a mesma respeitando a linear e diretamente proporcional ($H \propto I$).

Caso seja vontade do leitor verificar média da intensidade de campo, basta alterar o vector I do código presente no Apêndice .1.

$$H = I \times \int \frac{dL \times a_R}{4\pi R^2} \quad (3.1)$$

A unidade de medida apresentada nos gráficos é dada em $2 \times 10^2 [A/m]$. A presença do fator multiplicante 10^2 tem o objetivo de ajustar o tamanho dos vetores para facilitar comparação entre as imagens das diferentes configurações.

Os código utilizado para cálculo de campo magnético pode ser simplificado pelos fluxogramas apresentados nas Figuras 17 e 18. O primeiro (Figura 17) apresenta a idéia geral para relacionar o campo gerado pelos anéis e o espaço analisado. Já o fluxograma da Figura 18 representa a forma como foi implementada a Lei de Biot-Savart no código.

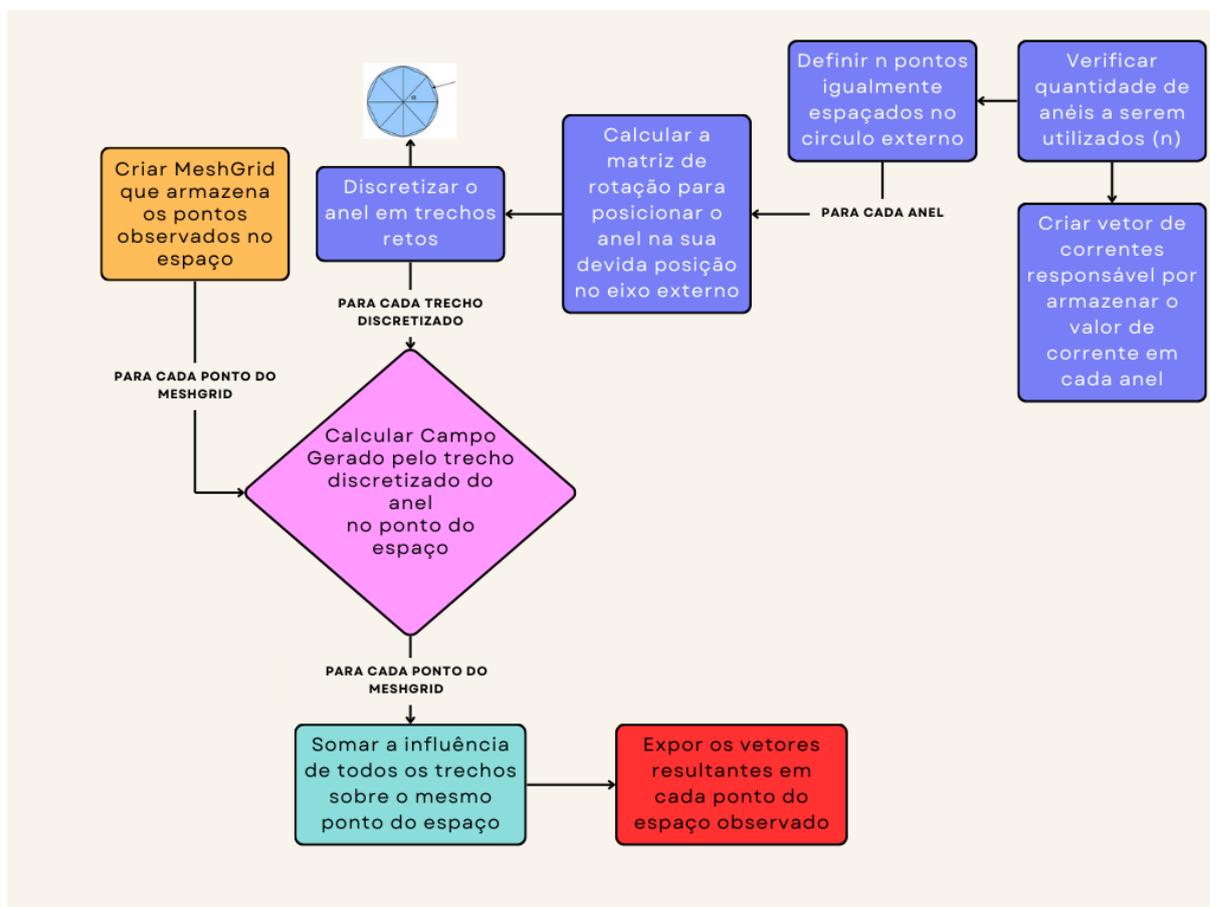


Figura 17 – Fluxograma do código de campo magnético (Apêndice .1).

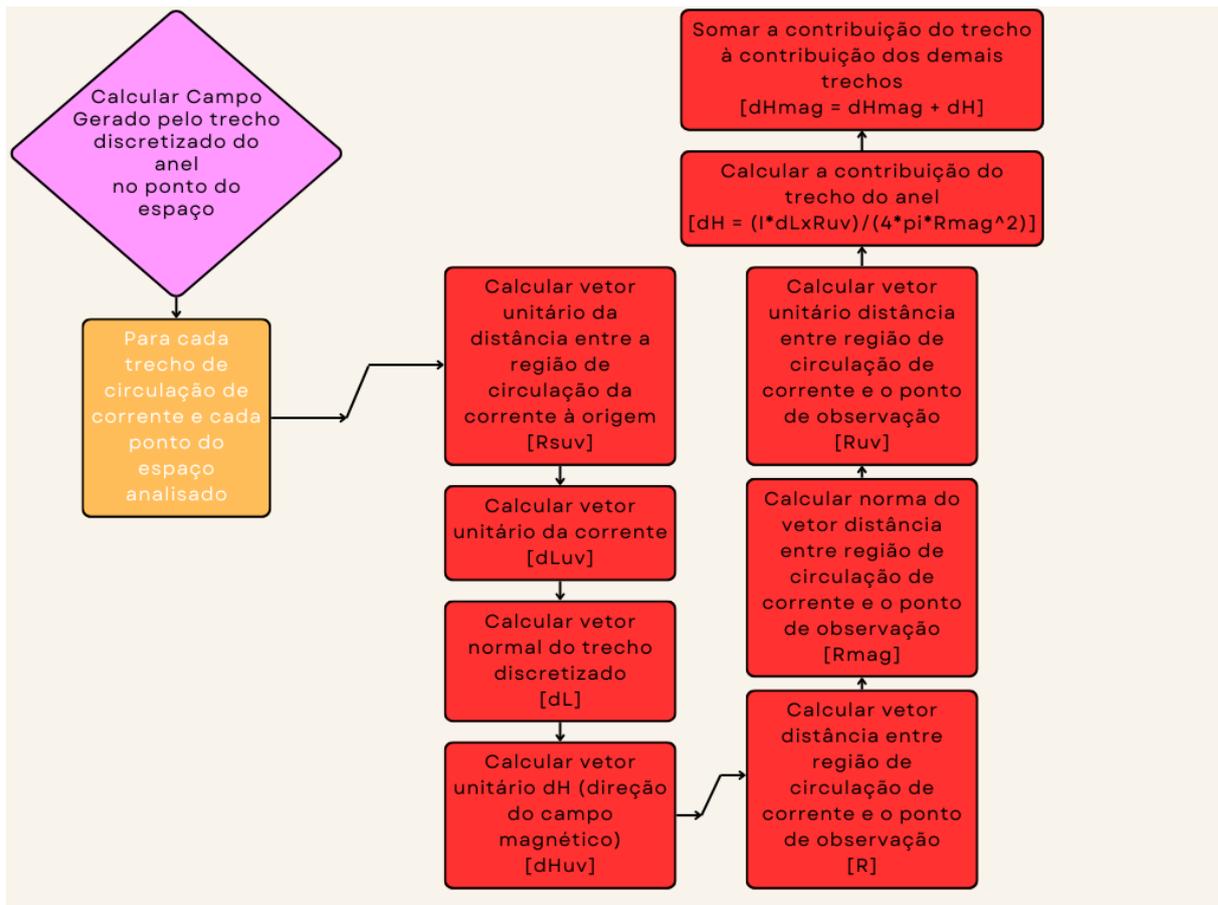


Figura 18 – Fluxograma do cálculo da Lei de Biot-Savart 2.8 realizada no código do Apêndice .1.

3.2.2 perfil de velocidade

Os códigos presentes nas seções .2 e .3 do Apêndice, são aplicações diretas das equações 2.12 e 2.13 respeitando os contornos definidos na modelagem magnético.

3.2.3 Configuração magnética

Foram simuladas três diferentes configurações do vetor corrente que designa um valor para cada anel. As características de cada uma delas serão discutidas na seção de Resultados (4).

3.3 Relação BxV

A importância da relação BxV é explorada no fluxograma 19 em conjunto com os fatores pH, temperatura e concentração que influenciam nas equações de equilíbrio, em que o aumento desses fatores favorecem a precipitação de Carbonato de Cálcio.

A literatura, através de teste experimentais demonstra que o efeito de magnetização tem propriedade mitigante no processo de formação de incrustação carbonática. As simulações serviram como base para entender a influência da relação BxV sobre este processo através das diferentes topologias e regimes de escoamento.

Para facilitar a visualização da distribuição do parâmetro BxV foram utilizados os códigos da geração do campo magnético e escoamento para formulação do código presente no Apêndice .4 que apresenta a variação dos parâmetros campo e velocidade, normalizados, ao longo do corte axial.

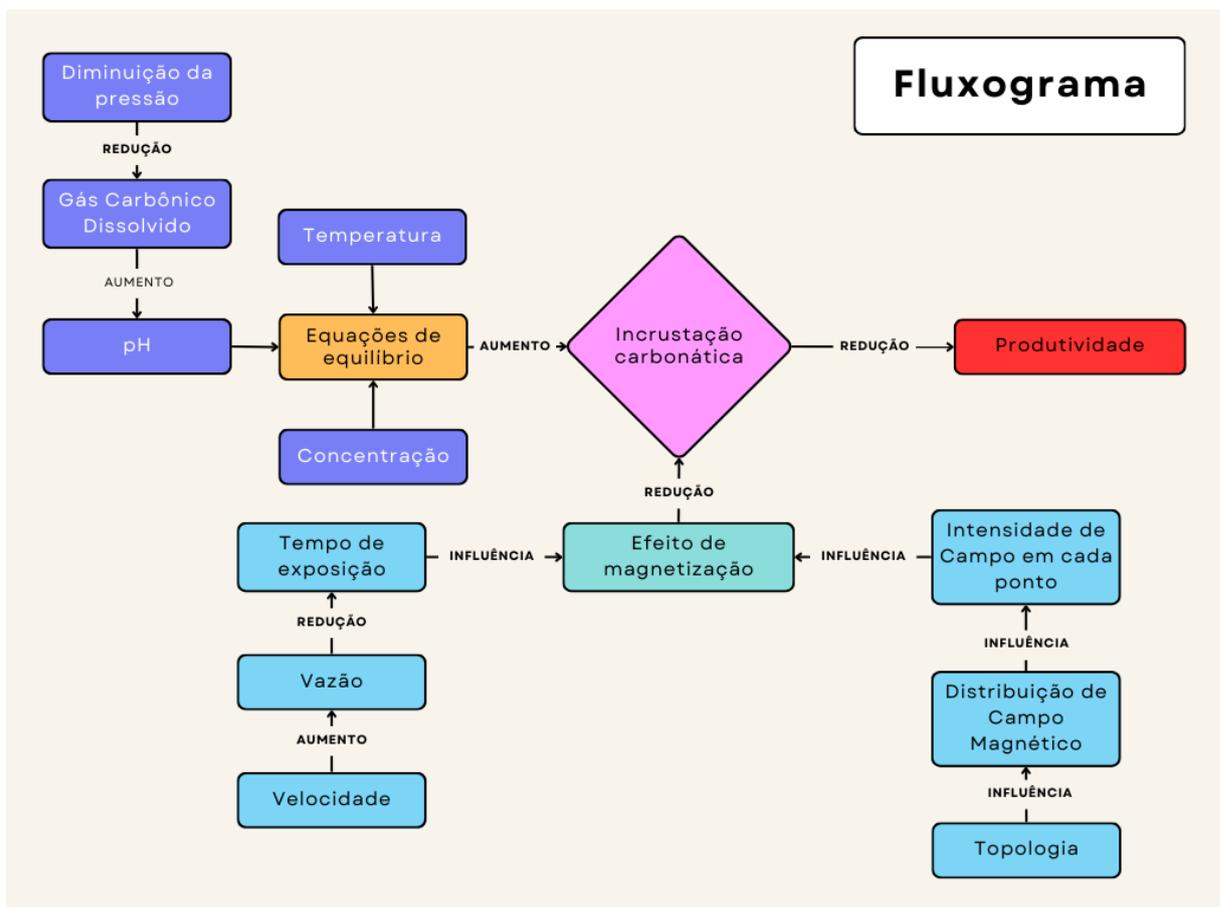


Figura 19 – Fluxograma que relaciona os parâmetros de Pressão, pH, temperatura, concentração, campo magnético e vazão ao fenômeno de incrustação carbonática.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas as simulações magnéticas e do perfil de escoamento, assim como uma discussão da relação delas com a relação $B \times V$.

4.1 Simulações

O resultado das simulações plotadas tridimensionalmente, assim como a descrição dos parâmetros físicos utilizados, estão descritas nas subseções seguintes.

4.1.1 Resultado das simulações numéricas do campo magnético

4.1.1.1 Sequência I - polaridades alternadas

Nesta configuração o sentido da corrente de cada anel vizinho tem mesma intensidade, porém sentido inverso. Esta configuração caracteriza-se pela igual distribuição de forças entres os anéis, distribuindo uniformemente a força sobre a estrutura que comporta cada um deles.

Entretanto, é visível pela Figura 21 que a intensidade de campo na área interna da tubulação é pequena e se concentra próximo à parede da tubulação. Este efeito fica ainda mais evidente quando comparado com as figuras 21 e 22.

Considerando os dados informados na seção 3.2.1 o campo médio é de 0,0888 [A/m].

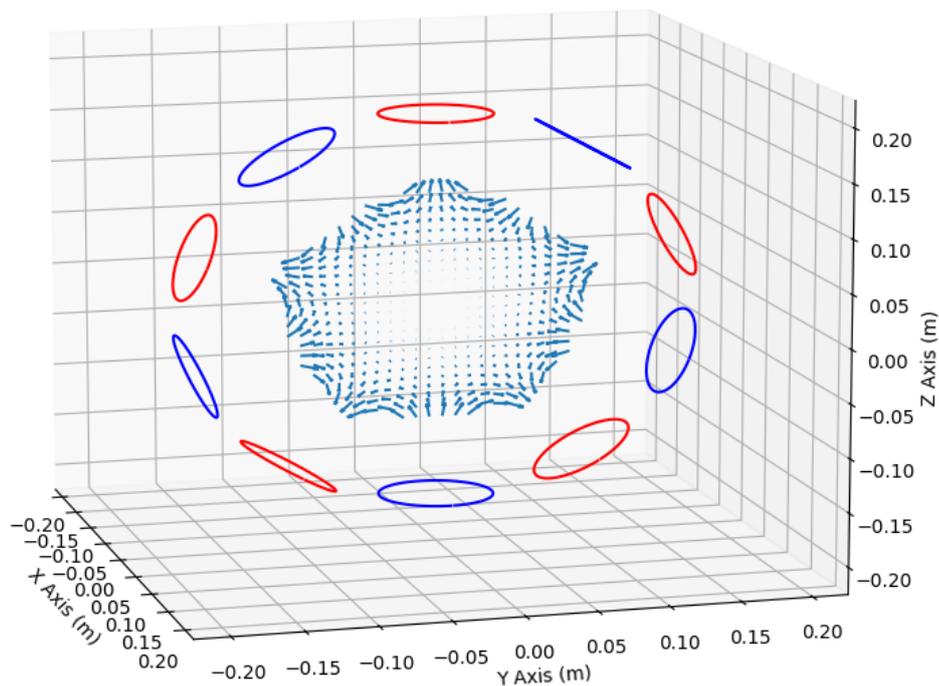


Figura 20 – Campo magnético vectorial, topologia I - bobinas alternando polos

4.1.1.2 sequência II

Nesta configuração os anéis abaixo da linha central da tubulação em relação ao eixo z tem linhas de campo com sentido para parte interna da tubulação, enquanto que os anéis acima deste corte possuem linhas de campo com sentido oposto. Esta configuração é alcançada variando o sentido da corrente que percorre pelo anel.

Este arranjo apresenta um desafio estrutural maior, pois os anéis próximos às posições 3 e 6 horas são repelidos por um dos vizinhos enquanto atraídos pelos outros, gerando esforço desigual aumentando os estresses naqueles pontos.

O campo médio nesta configuração foi de 0,2543 [A/m].

A Figura 21 demonstra a disposição do campo magnético gerado pela configuração II.

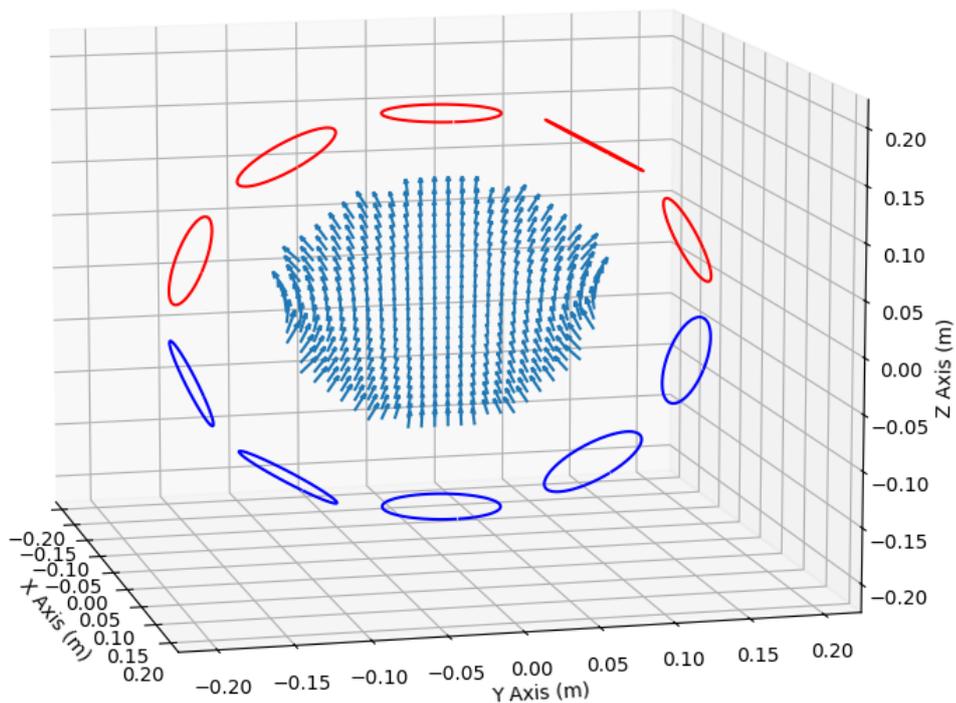


Figura 21 – Campo magnético vectorial, topologia II - divisão do sentido da corrente por hemisfério

4.1.1.3 sequência III

A terceira configuração é bastante parecida com a segunda, mas diferente da configuração I e II as correntes assumem valores diferentes de $|I| = 1$. A transição da troca de direção da corrente é feita de forma suave com o objetivo de reduzir os estresses físicos nos pontos críticos de II e aumentando a uniformidade de direção dos vetores de campo. Tal efeito pode ser evidenciado comparando as Figuras 21

O resultado é uma média menor que à da configuração II, mas superior à da I, com valor médio de 0,1631 [A/m].

A Figura 21 demonstra a disposição do campo magnético gerado pela configuração II.

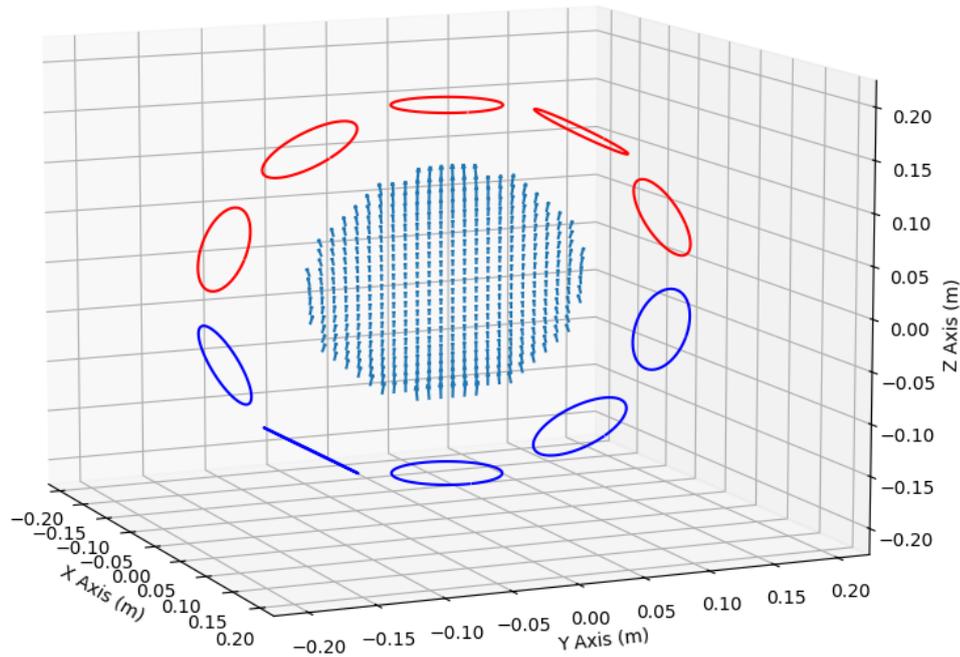


Figura 22 – Campo magnético vectorial, topologia III - divisão do sentido da corrente por hemisfério com transição suave

Considerando que o primeiro valor do vetor de correntes, dado em Amperes, representa o anel em 0 horas e que os seguintes são os adjacentes no sentido horário, os vetores corrente aplicados ao código são:

- Vetor corrente sequência I : $[+1, -1, +1, -1, +1, -1, +1, -1, +1, -1]$
- Vetor corrente sequência II : $[+1, +1, +1, -1, -1, -1, -1, -1, +1, +1]$
- Vetor corrente sequência III : $[+1.0, +0.6, +0.3, -0.3, -0.6, -1, -0.6, -0.3, +0.3, +0.6]$

4.1.2 Simulação analítica do perfil de velocidade

Diversas variáveis influenciam no tipo de escoamento em espaços confinados, mas o parâmetro de principal interesse é o número de Reynolds (Re). Em condições normais é o principal indicativo do regime de escoamento. Neste trabalho são simuladas as duas situações.

4.1.2.1 escoamento turbulento

A Figura 23 mostra os vetores de velocidade no perfil de escoamento, de forma análoga ao mapa de calor na Figura 24. É possível notar que o perfil de escoamento mais uniforme do que o comparado no escoamento laminar, representado nas Figuras 25 e 26.

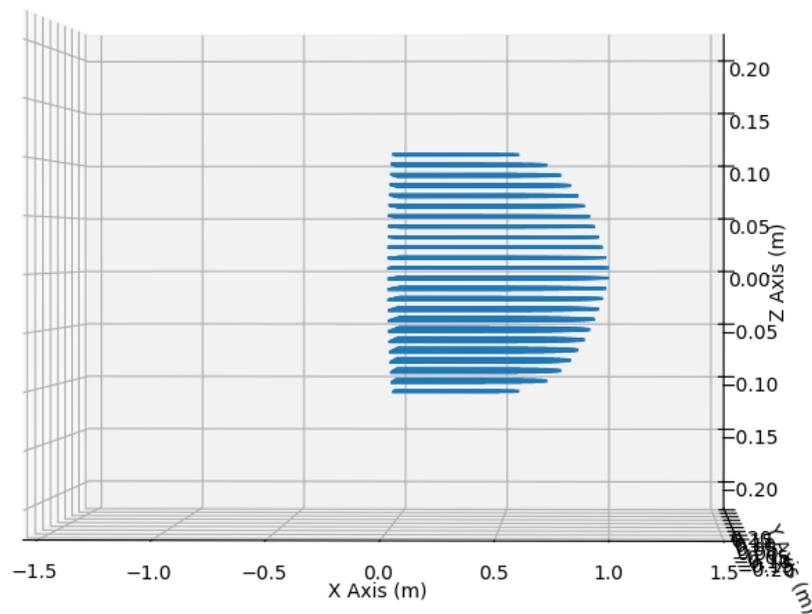


Figura 23 – Perfil de velocidade normalizado para número de Reynolds $2,3 \times 10^4$, escoamento turbulento

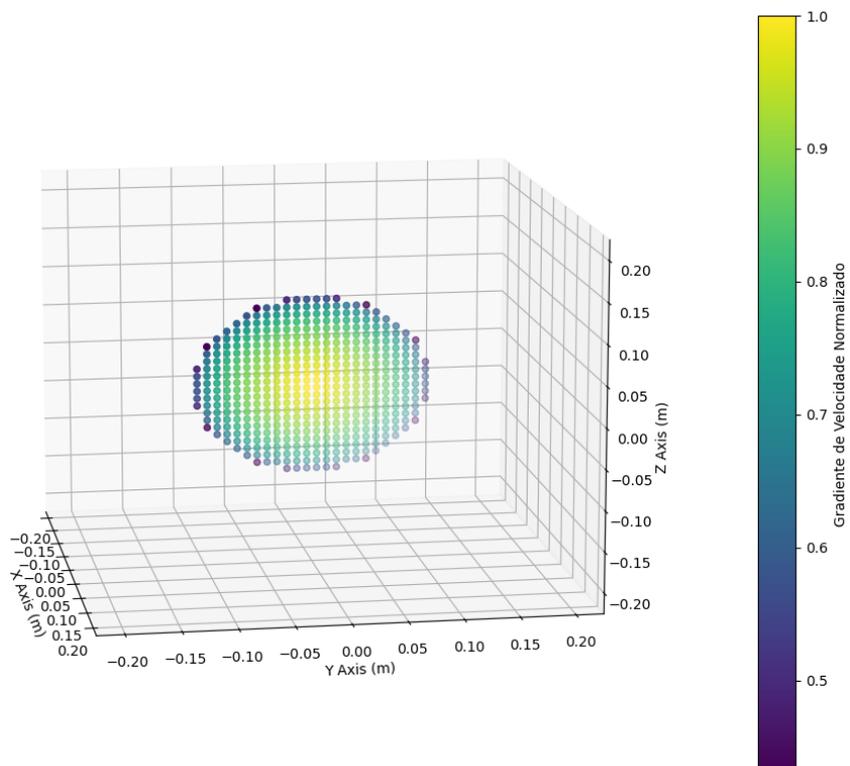


Figura 24 – Perfil de velocidade normalizado para número de Reynolds $2,3 \times 10^4$, escoamento turbulento

4.1.2.2 escoamento laminar

O escoamento laminar apresenta uma variação maior dos valores de velocidade para diferentes trechos da tubulação, com o fluxo no centro sendo consideravelmente maior do que nas bordas.

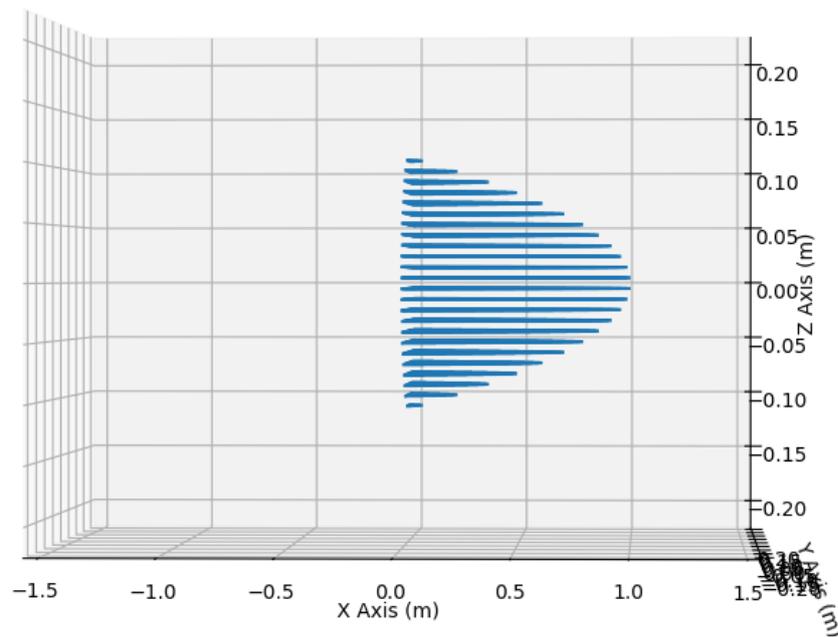


Figura 25 – Perfil de velocidade normalizado para número de Reynolds $< 2,3 \times 10^3$, escoamento laminar

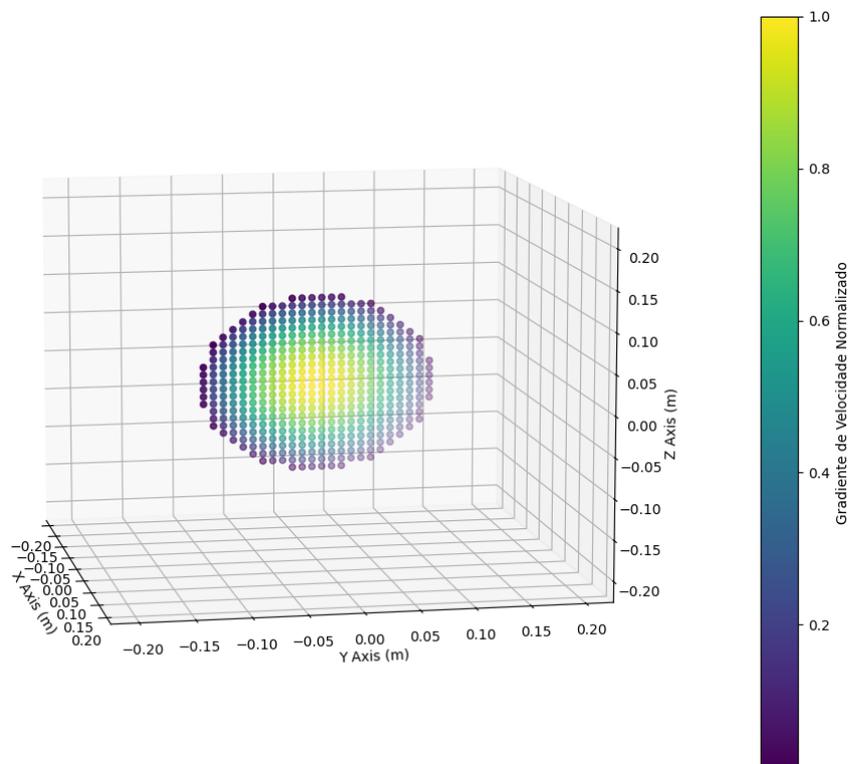


Figura 26 – Perfil de velocidade normalizado para número de Reynolds $< 2,3 \times 10^3$, escoamento laminar

4.1.3 Comparação da intensidade de campo e velocidade

Por fim unificou-se os códigos para obter se um gráfico em duas dimensões que relacionasse o campo magnético normalizado e a velocidade do escoamento.

Para facilitar a visualização a quantidade de pontos analisados foi reduzida. O vertical representa a intensidade de campo magnético, enquanto o eixo horizontal representa a velocidade. Os vetores por sua vez são a soma dos vetores campo e velocidade normalizados. Desta a medida que os vetores tem direção paralela ao eixo z positivo tem mais intensidade de campo e menor velocidade (maior tempo de exposição). Enquanto os vetores que se aproximam da direção positiva do eixo x representam uma redução da intensidade de campo e aumento da velocidade (menor tempo de exposição).

Importante ressaltar que por se tratar de valores normalizados a comparação direta entre os vetores de diferentes gráficos não pode ser feita, se restringindo a análise do conjunto.

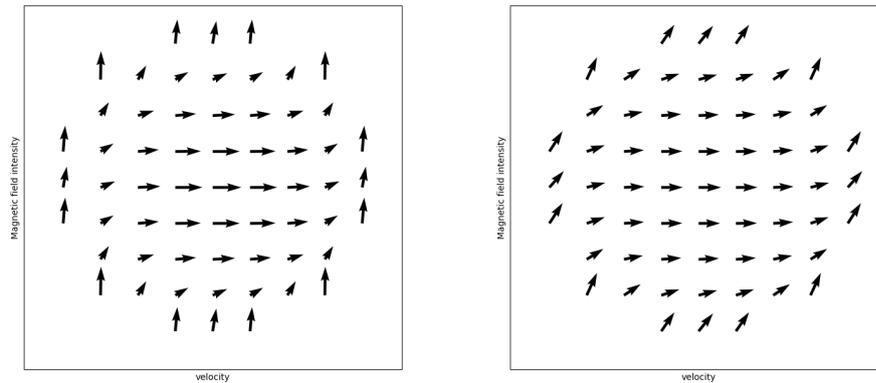


Figura 27 – Relação BxV, com parâmetros normalizados para topologia I em regime de escoamento laminar

Figura 28 – Relação BxV, com parâmetros normalizados para topologia I em regime de escoamento turbulento

4.2 Discussão

Primeiramente, analisando apenas as diferentes configurações destacadas em 4.1.1, é possível notar, comparando as Figuras 20, 21 e 22 e as médias das intensidades de campo relativas à elas, que a utilização de polos alternados apresenta baixa eficiência em gerar campo na seção interna da tubulação. Enquanto a configuração II apresenta a maior média e portanto espera-se maior impacto sobre o efeito de inibição.

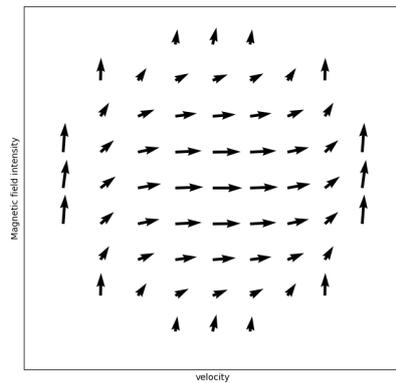


Figura 29 – Relação BxV, com parâmetros normalizados para topologia II em regime de escoamento laminar

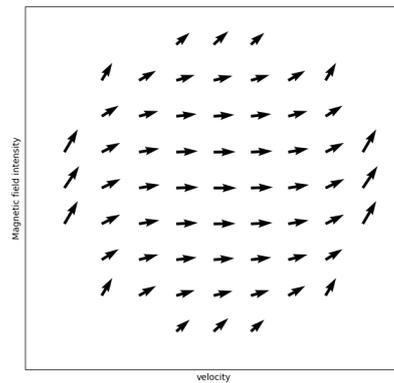


Figura 30 – Relação BxV, com parâmetros normalizados para topologia II em regime de escoamento turbulento

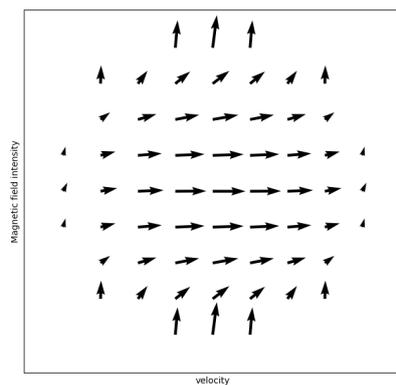


Figura 31 – Relação BxV, com parâmetros normalizados para topologia III em regime de escoamento laminar

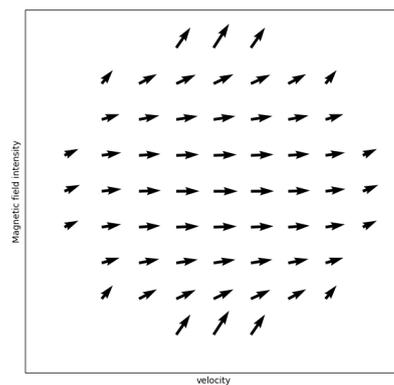


Figura 32 – Relação BxV, com parâmetros normalizados para topologia III em regime de escoamento turbulento

Entretanto, esta melhora vem a um custo estrutural, aumentando esforços entre os anéis com sentido de corrente contrária. Para tentar minimizar este problema foi proposta a configuração III, que embora diminua os esforços sobre os pontos de maior estresse da configuração II apresenta menor desempenho na média.

Além disso é interessante comentar que as linhas de campo para este caso (III) tendem a ter direção mais uniforme quando comparada com II. E embora não haja estudos na literatura relacionando os efeitos de mitigação à diferentes disposições dos componentes vetoriais das linhas de campo, esta informação pode ser útil à outras aplicações.

Envolvendo as simulações dos perfis de velocidade, devido à relação entre velocidade e espaço, sabe-se que uma partícula que flui por este trecho terá maior tempo de exposição

se sua velocidade for menor devido ao maior tempo de permanência perto desta zona.

Desta forma, baseando-se nas informações experimentais de Pang e Zhong (2016), caso o campo seja uniforme sobre toda a área analisada, a influência do campo magnético sobre uma partícula é inversamente proporcional à sua velocidade. Esta afirmação indica que as propriedades de magnetização não são uniformemente distribuídas sobre o perfil de fluxo, sendo que esta diferença aumenta com a diminuição do número de Reynolds, em especial para escoamentos em regime laminar.

Entretanto, devido à componente R^2 da equação de Biot-Savart 2.8, sabe-se que há uma queda quadrática na intensidade de campo à medida que se distânciam da fonte geradora. Consequentemente espera-se maior campo próximas às paredes da tubulação, intensificando ainda mais a discrepância da relação $B \times V$.

A partir dessas informações ainda é possível inferir que há um processo de otimização com base na velocidade, caso a velocidade seja alta, o tempo de exposição é baixo, resultando em um menor tempo de retenção das propriedades. Ao mesmo tempo, maior velocidade implica que os efeitos de solução magnetizada vão atuar por um trecho maior.

Portanto as análises das Figuras 27 à 32 trás uma reflexão sobre a relação $B \times V$ para diferentes pontos da tubulação e como a atuação da distribuição de campo e escoamento interferem para uniformidade e intensificação do efeito magnetizante para diferentes pontos.

Por fim, vale ressaltar que a influência de ambos, o tempo de exposição e intensidade de campo, tem um ponto de saturação e para poder estimar sua atuação em campo é necessário primeiro estimar como as diferenças das condições de testes experimentais influenciam estes pontos.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusão

O objetivo principal deste trabalho foi propor uma análise da distribuição de campo e perfil de velocidade de escoamento para supor o impacto de diferentes configurações de equipamentos magnéticos sob o efeito de memória relatado na literatura. A técnica proposta é baseada fundamentalmente em simulações analíticas regidas pelas equações de Bio-Savart, perfil de escoamento laminar e aproximação do perfil de escoamento turbulento.

A partir das equações e simulações foi possível identificar que diferentes configurações impactam diretamente a intensidade das propriedades adquiridas pelo fluido e este deve ser um ponto importante de consideração tanto para análise de testes experimentais como para a implementação em campo.

Adicionalmente, a reunião de artigos recentes fundamenta a importância de mais estudos em relação aos equipamentos magnéticos para mitigação de incrustação carbonática em poços profundos, em especial da condição brasileira, com a exploração do pré-sal. Este novo método se apresenta como uma forma mais segura e ecológica para o meio ambiente, além de reduzir os custos para as empresas petrolíferas e conseqüentemente outros setores, promovendo desenvolvimento tecnológico da sociedade.

5.2 Trabalhos Futuros

Assim como na reunião bibliométrica, em que foi discutida a importância de mais experimentos com pontos de operação distintos, a confirmação dos pontos levantados neste trabalho também devem ser testados e avaliados antes da implementação em campo, uma vez que a implementação é extremamente custosa e dificilmente revertida devido à localização da operação.

Com o avanço dos estudos na área é esperado melhor entendimento dos fatores que influenciam o processo. Sendo possível quantizar a influência desses no processo de formação de Carbonato de Cálcio, os códigos e análises apresentados neste trabalho podem servir como base para um estudo de modelagem que englobe algoritmos de otimização.

REFERÊNCIAS

Experimental Study of the Effect of Magnetic Field Associated with Inhibitor in Calcium Carbonate Scale Formation., Day 1 Wed, May 25, 2022 de SPE International Oilfield Scale Conference and Exhibition, (SPE International Oilfield Scale Conference and Exhibition, Day 1 Wed, May 25, 2022). D012S010R005 p. Citado 5 vezes nas páginas 11, 12, 13, 14 e 21.

AZEVEDO, F.; SOLANO, R.; MANOUCHEHRI, S.; DOLINSKI, A.; DENNIEL, S. Design, fabrication and installation of the first ever reeled pipe-in-pipe system in offshore brazil. 05 2009. Citado na página 32.

Cosmo, R. de P.; Pereira, F. de A. R.; Soares, E. J.; Martins, A. L. Modeling and validation of the co2 degassing effect on caco3 precipitation using oilfield data. Fuel, v. 310, p. 122067, 2022. ISSN 0016-2361. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236121019438>>. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23, 24 e 25.

CRABTREE, M.; ESLINGER, D.; FLETCHER, P.; MILLER, M.; JOHNSON, A.; KING, G. Fighting scale—removal and prevention. 1999. Disponível em: <<https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/fighting>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 12.

ESMAEILNEZHAD, E.; CHOI, H. J.; SCHAFFIE, M.; GHOLIZADEH, M.; RANJBAR, M. Characteristics and applications of magnetized water as a green technology. Journal of Cleaner Production, v. 161, p. 908–921, 2017. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617311186>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 21.

KAWANO, J.; SHIMOBAYASHI, N.; MIYAKE, A.; KITAMURA, M. Precipitation diagram of calcium carbonate polymorphs: Its construction and significance. Journal of Physics Condensed Matter, v. 21, 2009. ISSN 09538984. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

LOUREIRO, J. B. R.; MARTINS, A. L.; GONÇALVES, A. S.; SOUZA, B. G. B.; SCHLUTER, H. E. P.; SANTOS, H. F. L.; CASTRO, B. B.; PEPE, I. M.; JUNIOR, L. C. S. S.; DEMETINO, G. G.; SOARES, L. L. O.; SILVA, C. E. T.; FERREIRA, M. V. D. Large-Scale Pipe Flow Experiments for the Evaluation of Nonchemical Solutions for Calcium Carbonate Scaling Inhibition and Control. 2023. Disponível em: <<http://onepetro.org/SJ/article-pdf/28/01/201/3066455/spe-209476-pa.pdf/1>>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 21.

Ministério de Minas e Energias. Produção de petróleo e gás natural em 2023 apresenta resultados expressivos em comparação a 2022. 24 mai. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-petroleo-e-gas-natural-em-2023-apresenta-resultados-expressivos-em-comparacao-a-2022>>. Acesso em: 11 jul. 2023. Citado na página 12.

PANG, X.-F.; ZHONG, L.-S. The suspension of water using a superconductive magnetic-field and its features. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 26, n. 7, p. 1–4, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 14, 30, 31 e 45.

PARSONS, S.; JUDD, S.; STEPHENSON, T.; UDOL, S.; WANG, B. Magnetically augmented water treatment. Process Safety and Environmental Protection, v. 75, n. 2, p. 98–104, 1997. ISSN 0957-5820. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582097706554>>. Citado na página 26.

PIMENTEL, C. B. Projeto e comissionamento de uma planta experimental pressurizada para estudo da incrustação carbonática. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2022. Citado na página 14.

PRITCHARD, P. Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics, 8th Edition. John Wiley & Sons, 2010. ISBN 9781118139455. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=RdIbAAAAQBAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas 27, 29 e 30.

VAZQUEZ, O.; FURSOV, I.; MACKAY, E. Automatic optimization of oilfield scale inhibitor squeeze treatment designs. Journal of Petroleum Science and Engineering, Elsevier B.V., v. 147, p. 302–307, 11 2016. ISSN 09204105. Citado na página 12.

WENTWORTH, S. Fundamentos de Eletromagnetismo com Aplicações Em Engenharia. [S.l.]: Grupo Gen - LTC, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

Apêndices

.1 código para simulação de campo magnético

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits import mplot3d

#Rotate in the x axis
def x_rot(angle):
    rotation_matrix=np.array([[1,0,0],[0, np.cos(angle),-np.sin(angle)],
                              [0, np.sin(angle), np.cos(angle)
                              ]])

    return rotation_matrix

# Outer circle radius (distance from eletromagnetic rings to origin)
outer_circle_radius = 0.18

# Circle
Ndeg = 90          # numer of increments for phi
a = .04           # circle radius
df = 360.0/Ndeg  # differential load of
dLmag = (df* np.pi / 180) * a

Ncirc = 10        # number of electromagnetic rings
omega = 2 * np.pi / Ncirc # differential load of tubulation circle that
                           # will dictate the distance bewtween
                           # each electromagnetic field ring in
                           # degrees

##### Analised Points #####
Point = [0,0,0] # Reference Point, start (origin)

nx, ny, nz = (1, 40, 40)          # number of points (resolution)
xv = np.linspace(0, a, nx) # vector of the points relative to the x axis
yv = np.linspace(-1*outer_circle_radius, outer_circle_radius, ny) #
                           # vector of the points relative to the
                           # y axis
zv = np.linspace(-1*outer_circle_radius, outer_circle_radius, nz) #
                           # vector of the points relative to the
                           # z axis

x, y, z = np.meshgrid(xv, yv, zv)

# Set the dimensions of the cylinder
cylinder_radius = 0.11
cylinder_height = 1

# Calculate the distance from the origin for each point in 3D
```

```

distance_to_axis = np.sqrt(y**2 + z**2)

# Create a boolean mask for valid points within the cylinder
valid_points = (distance_to_axis <= cylinder_radius) & (np.abs(x) <=
                cylinder_height / 2)

# Create new matrices containing only the valid points
x_valid = x[valid_points]
y_valid = y[valid_points]
z_valid = z[valid_points]

# Current in rings
I = [-1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1] #
                Configuration I
#I = [1, 1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, 1, 1] # Configuration
                II
#I = [1, 0.6, 0.3, -0.3, -0.6, -1, -0.6, -0.3, 0.3, 0.6] # Configuration
                III

# ampere-turns in the coil
amp_turns = 1
I = np.array(I) * amp_turns
print (I)

##### Empty Matrices of magnetic force vectors #####
H = np.zeros((len(x_valid), 3))
Hz = np.zeros((len(x_valid)))

S = np.zeros((Ncirc, Ndeg, 3))

right_hand = [0,0,1] # right hand orientation at the first ring

for k in range(len(x_valid)):
    Point[0] = x_valid[k]
    Point[1] = y_valid[k]
    Point[2] = z_valid[k]

    for j in range(Ncirc): # number of circles
        ring_position_d = j * omega
        rot_matrix = x_rot(ring_position_d)

        dH = np.zeros((Ndeg, 3))
        dHmag = np.zeros(Ndeg)
        for i in range(Ndeg):
            f = df*i*np.pi/180 # transform Ndeg from deg to rad
            # point of circle in x*y plane
            xL = a * np.cos(f)

```

```

yL = a * np.sin(f)
zL = outer_circle_radius

S[j,i] = (xL, yL, zL)

# rotation of these points in relation to origin
S[j,i] = np.dot(S[j,i], rot_matrix)
rh_orientation = np.dot(right_hand, rot_matrix)

# distance from circle point to point in space
Rsuv = S[j,i] / np.linalg.norm(S[j, i]) # unitary vector of
                                         origin to circle(point)
dLuv = np.cross(rh_orientation, Rsuv) # unitary vector of
                                         current
Puv = np.linalg.norm(Point) # norm of origin to
                              space (point)
dL = dLmag*dLuv # norm of L
dHuv = np.cross(rh_orientation, dL) # unitary vector of dH
R = [Point - S[j,i]] # vector of distance
                              from circle to space (point)
Rmag = np.linalg.norm(R) # norm of R
Ruv = R/Rmag # unitary vector of R
dH[i, :] = I[j]*np.cross(dL, Ruv)/(4*np.pi*Rmag**2)
dHmag[i] = np.linalg.norm(dH[i])

H[k, 0] = np.sum(dH[:,0]) + H[k, 0]
H[k, 1] = np.sum(dH[:,1]) + H[k, 1]
H[k, 2] = np.sum(dH[:,2]) + H[k, 2]

# Calculate the magnitude of the magnetic field vectors
H_mag = np.linalg.norm(H, axis=1)

# Calculate mean magnitude
print(np.mean(H_mag))

# Normalize the magnitudes to be between 0 and 1 for colormap
H_mag_normalized = (H_mag - np.min(H_mag)) / (np.max(H_mag) - np.min(
    H_mag))

# Use a colormap to assign colors based on the normalized magnitudes
colors = plt.cm.viridis(H_mag_normalized)

# Plot color gradient
fig_color = plt.figure()
ax_color = fig_color.add_subplot(111, projection='3d')

# Plot circle

```

```

for j in range(Ncirc):
    if I[j] == 0:
        color = 'grey'
    elif I[j] > 0:
        color = 'red'
    elif I[j] < 0:
        color = 'blue'
    ax_color.plot3D(S[j, :, 0], S[j, :, 1], S[j, :, 2], label=f'Circle {j}', color=color)

# Create a scatter plot with colors representing the magnitude of the
# magnetic field vectors
scatter_color = ax_color.scatter(x_valid, y_valid, z_valid, c=
                                H_mag_normalized, cmap='viridis',
                                marker='o', s=20)

ax_color.set_xlim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 * outer_circle_radius)
ax_color.set_ylim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 * outer_circle_radius)
ax_color.set_zlim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 * outer_circle_radius)

plt.colorbar(scatter_color, ax=ax_color, label='Magnetic Field Magnitude
Normalized')

ax_color.set_xlabel('X Axis (m)')
ax_color.set_ylabel('Y Axis (m)')
ax_color.set_zlabel('Z Axis (m)')

# Plot quiver arrows
fig_quiver = plt.figure()
ax_quiver = fig_quiver.add_subplot(111, projection='3d')

# Plot circle
for j in range(Ncirc):
    if I[j] == 0:
        color = 'grey'
    elif I[j] > 0:
        color = 'red'
    elif I[j] < 0:
        color = 'blue'
    ax_quiver.plot3D(S[j, :, 0], S[j, :, 1], S[j, :, 2], label=f'Circle {j}', color=color)

# Create quiver arrows representing the magnetic field vectors
ax_quiver.quiver(x_valid, y_valid, z_valid, H[:, 0]/20, H[:, 1]/20, H[:, 2]/20)

```

```
ax_quiver.set_xlim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 * outer_circle_radius
                  )
ax_quiver.set_ylim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 * outer_circle_radius
                  )
ax_quiver.set_zlim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 * outer_circle_radius
                  )

ax_quiver.set_xlabel('X Axis (m)')
ax_quiver.set_ylabel('Y Axis (m)')
ax_quiver.set_zlabel('Z Axis (m)')

plt.show()
```

.2 código para simulação de perfil de velocidade em escoamento laminar

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

outer_circle_radius = 0.18

nx, ny, nz = (1, 40, 40)          # number of points (resolution)
xv = np.linspace(0, 1, nx)      #
                                # vector of the points relative to the
                                # x axis
yv = np.linspace(-1*outer_circle_radius, outer_circle_radius, ny) #
                                # vector of the points relative to the
                                # y axis
zv = np.linspace(-1*outer_circle_radius, outer_circle_radius, nz) #
                                # vector of the points relative to the
                                # z axis

x, y, z = np.meshgrid(xv, yv, zv)

# Set the dimensions of the cylinder
cylinder_radius = 0.11
cylinder_height = 1

# Calculate the distance from the origin for each point in 3D
distance_to_axis = np.sqrt(y**2 + z**2)

# Create a boolean mask for valid points within the cylinder
valid_points = distance_to_axis <= cylinder_radius

# Create new matrices containing only the valid points
```

```
x_valid = x[valid_points]
y_valid = y[valid_points]
z_valid = z[valid_points]

# Constants
delta_P = -1          # Pressure drop across the pipe
mu = 1e-3             # Dynamic viscosity of the fluid (adjust as needed)
L = cylinder_height   # Distance between the plates (cylinder height)
R = cylinder_radius   # Radius of the pipe

# Calculate the velocity at each point in the valid region
dist2axis = np.sqrt(y_valid**2 + z_valid**2) # distance from each valid
                                              # point to the x axis
velocity_profile = -(R**2 / 4 * mu) * (delta_P / L) * (1 - (dist2axis/R)
**2)

# Calculate the velocity vector components along the x-axis
vx = velocity_profile
vy = np.zeros_like(y_valid)
vz = np.zeros_like(z_valid)

# Normalize the velocity vector
max_value = np.max(vx)
vx /= max_value
vy /= max_value
vz /= max_value

# Create a 3D plot for the scalar field
fig_scalar = plt.figure()
ax_scalar = fig_scalar.add_subplot(111, projection='3d')

# Plot the scalar field with color representing the velocity gradient
scatter_scalar = ax_scalar.scatter(x_valid, y_valid, z_valid, c = vx,
                                  cmap='viridis')

# Add colorbar for the scalar field
cbar_scalar = plt.colorbar(scatter_scalar)
cbar_scalar.set_label('Gradiente de Velocidade Normalizado')

# Set labels for the scalar field
ax_scalar.set_xlabel('eixo x')
ax_scalar.set_ylabel('eixo y')
ax_scalar.set_zlabel('eixo z')
ax_scalar.set_xlim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 * outer_circle_radius
)
ax_scalar.set_ylim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 * outer_circle_radius
)
```

```

ax_scalar.set_zlim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 * outer_circle_radius
                  )

ax_scalar.set_xlabel('X Axis (m)')
ax_scalar.set_ylabel('Y Axis (m)')
ax_scalar.set_zlabel('Z Axis (m)')

# Create a 3D plot for the vector field (quivers)
fig_vector = plt.figure()
ax_vector = fig_vector.add_subplot(111, projection='3d')

# Plot the quiver arrows for the velocity vector field
quiver_vector = ax_vector.quiver(x_valid, y_valid, z_valid, vx, vy, vz,
                                 arrow_length_ratio=0)

# Set labels for the vector field
ax_vector.set_xlabel('X-axis')
ax_vector.set_ylabel('Y-axis')
ax_vector.set_zlabel('Z-axis')
ax_vector.set_xlim(-1.5, 1.5)
ax_vector.set_ylim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 * outer_circle_radius
                  )
ax_vector.set_zlim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 * outer_circle_radius
                  )

ax_vector.set_xlabel('X Axis (m)')
ax_vector.set_ylabel('Y Axis (m)')
ax_vector.set_zlabel('Z Axis (m)')

# Show both plots
plt.show()

```

.3 código para simulação de perfil de velocidade em escoamento turbulento

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

outer_circle_radius = 0.18

nx, ny, nz = (1, 40, 40)           # number of points (resolution)
xv = np.linspace(0, 1, nx)        #
                                   #
                                   # vector of the points relative to the
                                   # x axis

```

```
yv = np.linspace(-1*outer_circle_radius, outer_circle_radius, ny) #  
                                vector of the points relative to the  
                                y axis  
zv = np.linspace(-1*outer_circle_radius, outer_circle_radius, nz) #  
                                vector of the points relative to the  
                                z axis  
  
x, y, z = np.meshgrid(xv, yv, zv)  
  
# Set the dimensions of the cylinder  
cylinder_radius = 0.11  
cylinder_height = 1  
  
# Calculate the distance from the origin for each point in 3D  
distance_to_axis = np.sqrt(y**2 + z**2)  
  
# Create a boolean mask for valid points within the cylinder  
valid_points = distance_to_axis <= cylinder_radius  
  
# Create new matrices containing only the valid points  
x_valid = x[valid_points]  
y_valid = y[valid_points]  
z_valid = z[valid_points]  
  
# Constants  
Re = 2.3e4  
n = -1.7 + 1.8 * np.log10(Re)  
R = cylinder_radius # Radius of the pipe  
  
# Calculate the velocity at each point in the valid region  
dist2origin = np.sqrt(y_valid**2 + z_valid**2)  
velocity_profile = (1-(dist2origin/R))**(1/n)  
  
# Calculate the velocity vector components along the x-axis  
vx = velocity_profile  
vy = np.zeros_like(y_valid)  
vz = np.zeros_like(z_valid)  
  
# Normalize the velocity vector  
max_value = np.max(vx)  
vx /= max_value  
vy /= max_value  
vz /= max_value  
  
# Create a 3D plot for the scalar field  
fig_scalar = plt.figure()  
ax_scalar = fig_scalar.add_subplot(111, projection='3d')
```

```
# Plot the scalar field with color representing the velocity gradient
scatter_scalar = ax_scalar.scatter(x_valid, y_valid, z_valid, c = vx,
                                  cmap='viridis')

# Add colorbar for the scalar field
cbar_scalar = plt.colorbar(scatter_scalar)
cbar_scalar.set_label('Gradiente de Velocidade Normalizado')

# Set labels for the scalar field
ax_scalar.set_xlabel('eixo x')
ax_scalar.set_ylabel('eixo y')
ax_scalar.set_zlabel('eixo z')
ax_scalar.set_xlim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 * outer_circle_radius
                  )
ax_scalar.set_ylim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 * outer_circle_radius
                  )
ax_scalar.set_zlim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 * outer_circle_radius
                  )

ax_scalar.set_xlabel('X Axis (m)')
ax_scalar.set_ylabel('Y Axis (m)')
ax_scalar.set_zlabel('Z Axis (m)')

# Create a 3D plot for the vector field (quivers)
fig_vector = plt.figure()
ax_vector = fig_vector.add_subplot(111, projection='3d')

# Plot the quiver arrows for the velocity vector field
quiver_vector = ax_vector.quiver(x_valid, y_valid, z_valid, vx, vy, vz,
                                 arrow_length_ratio=0)

# Set labels for the vector field
ax_vector.set_xlabel('X-axis')
ax_vector.set_ylabel('Y-axis')
ax_vector.set_zlabel('Z-axis')
ax_vector.set_xlim(-1.5, 1.5)
ax_vector.set_ylim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 * outer_circle_radius
                  )
ax_vector.set_zlim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 * outer_circle_radius
                  )

ax_vector.set_xlabel('X Axis (m)')
ax_vector.set_ylabel('Y Axis (m)')
ax_vector.set_zlabel('Z Axis (m)')
```

```
# Show both plots
plt.show()
```

.4 código para expor os vetores da relação BxV, com parâmetros normalizados

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits import mplot3d

#Rotate in the x axis
def x_rot(angle):
    rotation_matrix=np.array([[1,0,0],[0, np.cos(angle),-np.sin(angle)],
                              [0, np.sin(angle), np.cos(angle)
                              ]])

    return rotation_matrix

# Outer circle radius (distance from eletromagnetic rings to origin)
outer_circle_radius = 0.18

# Circle
Ndeg = 90          # numer of increments for phi
a = .04           # circle radius
df = 360.0/Ndeg  # differential load of
dLmag = (df* np.pi / 180) * a

Ncirc = 10        # number of electromagnetic rings
omega = 2 * np.pi / Ncirc # differential load of tubulation circle that
                           # will dictate the distance bewtween
                           # each electromagnetic field ring in
                           # degrees

##### Analised Points #####
Point = [0,0,0] # Reference Point, start (origin)

nx, ny, nz = (1, 15, 15)          # number of points (resolution)
xv = np.linspace(0, a, nx) # vector of the points relative to the x axis
yv = np.linspace(-1*outer_circle_radius, outer_circle_radius, ny) #
                           # vector of the points relative to the
                           # y axis
zv = np.linspace(-1*outer_circle_radius, outer_circle_radius, nz) #
                           # vector of the points relative to the
                           # z axis

x, y, z = np.meshgrid(xv, yv, zv)
```

```

# Set the dimensions of the cylinder
cylinder_radius = 0.11
cylinder_height = 1

# Calculate the distance from the origin for each point in 3D
distance_to_axis = np.sqrt(y**2 + z**2)

# Create a boolean mask for valid points within the cylinder
valid_points = (distance_to_axis <= cylinder_radius) & (np.abs(x) <=
                cylinder_height / 2)

# Create new matrices containing only the valid points
x_valid = x[valid_points]
y_valid = y[valid_points]
z_valid = z[valid_points]

##### Magnetic Field #####
# Current in rings
#I = [1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1] # Configuration
I
#I = [1, 1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, 1, 1] # Configuration
II
I = [1, 0.6, 0.3, -0.3, -0.6, -1, -0.6, -0.3, 0.3, 0.6] # Configuration
III

# ampere-turns in the coil
amp_turns = 1
I = np.array(I) * amp_turns
print (I)

# Empty Matrices of magnetic force vectors
H = np.zeros((len(x_valid), 3))
Hz = np.zeros((len(x_valid)))

S = np.zeros((Ncirc, Ndeg, 3))

right_hand = [0,0,1] # right hand orientation at the first ring

for k in range(len(x_valid)):
    Point[0] = x_valid[k]
    Point[1] = y_valid[k]
    Point[2] = z_valid[k]

    for j in range(Ncirc): # number of circles
        ring_position_d = j * omega
        rot_matrix = x_rot(ring_position_d)

```

```

dH = np.zeros((Ndeg, 3))
dHmag = np.zeros(Ndeg)
for i in range(Ndeg):
    f = df*i*np.pi/180 # transform Ndeg from deg to rad
    # point of circle in x*y plane
    xL = a * np.cos(f)
    yL = a * np.sin(f)
    zL = outer_circle_radius

    S[j,i] = (xL, yL, zL)

    # rotation of these points in relation to origin
    S[j,i] = np.dot(S[j,i], rot_matrix)
    rh_orientation = np.dot(right_hand, rot_matrix)

    # distance from circle point to point in space
    Rsuv = S[j,i] / np.linalg.norm(S[j, i]) # unitary vector of
                                             origin to circle(point)
    dLuv = np.cross(rh_orientation, Rsuv) # unitary vector of
                                             current
    Puv = np.linalg.norm(Point) # norm of origin to
                                  space (point)
    dL = dLmag*dLuv # norm of L
    dHuv = np.cross(rh_orientation, dL) # unitary vector of dH
    R = [Point - S[j,i]] # vector of distance
                                             from circle to space (point)
    Rmag = np.linalg.norm(R) # norm of R
    Ruv = R/Rmag # unitary vector of R
    dH[i, :] = I[j]*np.cross(dL, Ruv)/(4*np.pi*Rmag**2)
    dHmag[i] = np.linalg.norm(dH[i])

    H[k, 0] = np.sum(dH[:,0]) + H[k, 0]
    H[k, 1] = np.sum(dH[:,1]) + H[k, 1]
    H[k, 2] = np.sum(dH[:,2]) + H[k, 2]

# Calculate the magnitude of the magnetic field vectors
H_mag = np.linalg.norm(H, axis=1)

# Calculate H_mag normalized
H_mag_normalized = (H_mag - np.min(H_mag)) / (np.max(H_mag) - np.min(
    H_mag))

# Normalized vector mag
norm = np.sqrt(H[:, 0]**2 + H[:, 1]**2 + H[:, 2]**2)
x_mag_normalized = H[:, 0] / norm
y_mag_normalized = H[:, 1] / norm

```

```
z_mag_normalized = H[:, 2] / norm
# Calculate mean magnitude
print(np.mean(H_mag))

##### Flow #####
# Constants
delta_P = -1          # Pressure drop across the pipe
mu = 1e-3             # Dynamic viscosity of the fluid (adjust as needed)
L = cylinder_height  # Distance between the plates (cylinder height)
R = cylinder_radius  # Radius of the pipe

Re = 2.3e4
n = -1.7 + 1.8 * np.log10(Re)

# Calculate the velocity at each point in the valid region
dist2axis = np.sqrt(y_valid**2 + z_valid**2) # distance from each valid
                                              # point to the x axis

##### Laminar Flow #####
velocity_profile_lam = -(R**2 / 4 * mu) * (delta_P / L) * (1 - (
    dist2axis/R)**2)

# Calculate the velocity vector components along the x-axis
x_lam_flow_normalized = velocity_profile_lam
y_lam_flow_normalized = np.zeros_like(y_valid)
z_lam_flow_normalized = np.zeros_like(z_valid)

# Normalize the velocity vector
max_value = np.max(x_lam_flow_normalized)
x_lam_flow_normalized /= max_value

##### Turbulent Flow #####
velocity_profile_turb = (1 - (dist2axis/R))**(1/n)

x_turb_flow_normalized = velocity_profile_turb
y_turb_flow_normalized = np.zeros_like(y_valid)
z_turb_flow_normalized = np.zeros_like(z_valid)

# Normalize the velocity vector
max_value = np.max(x_turb_flow_normalized)
x_turb_flow_normalized /= max_value

##### Figure Plot #####
div = 40 # vector size division factor to facilitate visualization

# Plot quiver arrows
```

```

fig_quiver_lam = plt.figure()
ax_quiver_lam = fig_quiver_lam.add_subplot(111, projection='3d')

# Plot circle
for j in range(Ncirc):
    if I[j] == 0:
        color = 'grey'
    elif I[j] > 0:
        color = 'red'
    elif I[j] < 0:
        color = 'blue'
    ax_quiver_lam.plot3D(S[j, :, 0], S[j, :, 1], S[j, :, 2], label=f'
                        Circle {j}', color=color)

# Create quiver arrows representing the magnetic field vectors
ax_quiver_lam.quiver(x_valid, y_valid, z_valid, x_mag_normalized/div,
                    y_mag_normalized/div,
                    z_mag_normalized/div)
ax_quiver_lam.quiver(x_valid, y_valid, z_valid, x_lam_flow_normalized/
                    div, y_lam_flow_normalized/div,
                    z_lam_flow_normalized/div, color='
                    red')

ax_quiver_lam.set_xlim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 *
                        outer_circle_radius)
ax_quiver_lam.set_ylim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 *
                        outer_circle_radius)
ax_quiver_lam.set_zlim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 *
                        outer_circle_radius)

ax_quiver_lam.set_xlabel('X Axis (m)')
ax_quiver_lam.set_ylabel('Y Axis (m)')
ax_quiver_lam.set_zlabel('Z Axis (m)')

#Plot sum
# Plot quiver arrows
plt.figure()
# Plot the quiver graph
plt.quiver(y_valid*10, z_valid*10, x_lam_flow_normalized,
           H_mag_normalized)

# Create quiver arrows representing the magnetic field vectors

plt.xlim(-1.3, 1.3)
plt.ylim(-1.3, 1.3)

plt.xlabel('velocity')

```

```
plt.ylabel('Magnetic field intensity')

plt.xticks([])
plt.yticks([])

# Plot quiver arrows
fig_quiver_turb = plt.figure()
ax_quiver_turb = fig_quiver_turb.add_subplot(111, projection='3d')

# Plot circle
for j in range(Ncirc):
    if I[j] == 0:
        color = 'grey'
    elif I[j] > 0:
        color = 'red'
    elif I[j] < 0:
        color = 'blue'
    ax_quiver_turb.plot3D(S[j, :, 0], S[j, :, 1], S[j, :, 2], label=f'
                        Circle {j}', color=color)

# Create quiver arrows representing the magnetic field vectors
ax_quiver_turb.quiver(x_valid, y_valid, z_valid, x_mag_normalized/div,
                    y_mag_normalized/div,
                    z_mag_normalized/div)
ax_quiver_turb.quiver(x_valid, y_valid, z_valid, x_turb_flow_normalized/div,
                    y_turb_flow_normalized/div,
                    z_turb_flow_normalized/div, color='
                    red')

ax_quiver_turb.set_xlim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 *
                        outer_circle_radius)
ax_quiver_turb.set_ylim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 *
                        outer_circle_radius)
ax_quiver_turb.set_zlim(-1.2 * outer_circle_radius, 1.2 *
                        outer_circle_radius)

ax_quiver_turb.set_xlabel('X Axis (m)')
ax_quiver_turb.set_ylabel('Y Axis (m)')
ax_quiver_turb.set_zlabel('Z Axis (m)')

#Plot sum

# Plot quiver arrows
plt.figure()
# Plot the quiver graph
plt.quiver(y_valid*10, z_valid*10, x_turb_flow_normalized,
            H_mag_normalized)
```

```
# Create quiver arrows representing the magnetic field vectors

plt.xlim(-1.3, 1.3)
plt.ylim(-1.3, 1.3)

plt.xlabel('velocity')
plt.ylabel('Magnetic field intensity')

plt.xticks([])
plt.yticks([])

plt.show()
```