

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RAFAEL DE PAULA PINHEIRO

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA VISCOSIDADE DO FLUIDO E DA
CONCENTRAÇÃO E GRANULOMETRIA DA AREIA NA
CONTENÇÃO DE AREIA EM TELAS STAND ALONE**

VITÓRIA

2021

RAFAEL DE PAULA PINHEIRO

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA VISCOSIDADE DO FLUIDO E DA
CONCENTRAÇÃO E GRANULOMETRIA DA AREIA NA
CONTENÇÃO DE AREIA EM TELAS STAND ALONE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira

Coorientador: Prof. Dr. Fabio de Assis Ressel Pereira

VITÓRIA

2021

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

P654a Pinheiro, Rafael de Paula, 1991-
avaliação dos efeitos da viscosidade do fluido e da concentração
e granulometria da areia na contenção de areia em telas stand
alone / Rafael de Paula Pinheiro. - 2021.
81 f. : il.

Orientador: Renato do Nascimento Siqueira.
Coorientador: Fabio de Assis Ressel Pereira.
Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Dinâmica dos fluidos. 2. Petróleo. 3. Areia. 4. Engenharia
mecânica. I. Siqueira, Renato do Nascimento. II. Pereira, Fabio
de Assis Ressel. III. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
CENTRO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA VISCOSIDADE DO FLUIDO E DA CONCENTRAÇÃO E GRANULOMETRIA DA AREIA NA CONTENÇÃO DE AREIA EM TELAS STAND ALONE

RAFAEL DE PAULA PINHEIRO

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira
Orientador (PPGEM/UFES)

Prof. Dr. Fabio de Assis Ressel Pereira
Coorientador (UFES)

Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro
Examinador Externo (PPGE/UFES)

Profa. Dra. Sandra Mara Santana Rocha
Examinadora Externa (UFES)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do
Espírito Santo como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Vitória (ES), 28 de julho de 2021.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
RENATO DO NASCIMENTO SIQUEIRA - SIAPE 99992560
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM/CT
Em 03/12/2021 às 18:40

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/323824?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
FABIO DE ASSIS RESSEL PEREIRA - SIAPE 1721466
Departamento de Tecnologia Industrial - DTI/CT
Em 03/12/2021 às 18:52

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/323833?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
DANIEL DA CUNHA RIBEIRO - SIAPE 1956013
Departamento de Engenharia e Tecnologia - DET/CEUNES
Em 03/12/2021 às 19:37

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/323872?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
SANDRA MARA SANTANA ROCHA - SIAPE 1802020
Departamento de Tecnologia Industrial - DTI/CT
Em 06/12/2021 às 13:17

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/324571?tipoArquivo=O>

AGRADECIMENTOS

Em primeiro agradeço a Deus pelo dom da vida e todas as bênçãos não merecidas que me são concedidas diariamente.

A minha amada esposa Jessica, por estar ao meu lado em todos os momentos, me apoiando, dando suporte e cuidando de mim. Sou grato por arcar com todas as tarefas com um sorriso no rosto, enquanto eu precisava me ausentar e me dedicar aos estudos. Sem esse apoio, tenho certeza que não seria capaz de superar os desafios de cursar o mestrado. Sou extremamente grato pela sua companhia e suporte psicológico, sentimental e espiritual.

Agradeço aos meus pais, Paula e Vivaldo, que me ensinaram a lutar e crescer a partir do suor do meu trabalho. A educação e exemplo que recebi são peças fundamentais na conclusão desta etapa da minha vida. Ao meu irmão, Marcos André, por todo incentivo e por depositar tanta confiança em mim.

Agradeço ao Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira pelos ensinamentos, pela compreensão, paciência e todas as orientações no meu desenvolvimento acadêmico. Ao meu coorientador, Prof. Dr. Fabio de Assis Ressel Pereira, por toda sabedoria compartilhada, por estar sempre pronto a me ajudar em todos os momentos e contribuir com minha formação.

Ao professor Lucas Silva, por todo o apoio e ensinamentos durante a execução dos testes no laboratório, apoio sem o qual a realização deste trabalho não seria possível.

Agradeço à Universidade Federal do Espírito Santo, pelo privilégio de realizar um curso de qualidade exemplar. A todos os professores, colaboradores e colegas que fizeram parte dessa jornada. A Universidade Centro Leste (UCL) por disponibilizar as instalações para a realização dos testes e por toda a equipe de apoio sempre disposta a prestar um bom trabalho. A equipe da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), por compartilhar o conhecimento.

Agradeço à EPC Engenharia por permitir a flexibilização do meu horário e assim, poder conciliar as atividades laborais ao mestrado.

Agradeço à Petrobras por disponibilizar o material necessário para a execução dos testes.

“Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário ver toda a escada. Apenas dê o primeiro passo.”

(Martin Luther King)

RESUMO

A produção de areia afeta mais de 70% dos reservatórios de petróleo e gás em todo o mundo e, para controlar os impactos da produção de sólidos em um poço, alguns mecanismos foram desenvolvidos ao longo dos anos, dentre eles o sistema *Stand Alone Screen*. Apesar da gama de trabalhos publicados a respeito do tema, estudos que objetivam verificar a influência das características do fluido de transporte e dos sólidos carregados na formação da torta e, conseqüentemente, na queda de pressão observada para telas de contenção ainda são escassos na literatura. Por isso, este trabalho se propõe a desenvolver uma bancada e avaliar os efeitos da viscosidade do fluido de transporte e da concentração e granulometria da areia na formação da torta, na queda de pressão, vazão e na permeabilidade do sistema. O aparato experimental desenvolvido possibilita o transporte de um fluido contendo areia através de conjunto de telas *premium* composta por uma tela do tipo *wire wrapped* e uma tela de malha metálica. As concentrações testadas estão entre 0,05% e 0,15% em massa de areia, viscosidades entre 9 e 47 cP para o fluido de transporte e areias com tamanhos característicos de 268 μm e 692 μm . Os resultados obtidos nos testes mostram que, a retenção de areia pode ser dividida em duas etapas. Na primeira, ocorre a filtração de profundidade, a queda de pressão aumenta significativamente, com incrementos entre 30 e 120 kPa. Na segunda região, ocorre a filtração de superfície, a queda de pressão assume comportamento mais linear e cresce de maneira menos acentuada, com incrementos entre 10 e 30 kPa. O aumento da queda de pressão resulta na redução da vazão. A permeabilidade viscosa medida vai desde $5,40 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ até $3,66 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ e os valores da permeabilidade inercial vão desde $5,29 \times 10^{-2} \text{ m}$ até $6,55 \times 10^{-1} \text{ m}$. Os resultados mostram que quanto maior a altura do leito formado, maior a queda de pressão observada, contudo, os escoamentos com fluido de transporte com viscosidade menor, soluções menos concentradas e escoamentos com partículas de granulometria menor, dão origem a um leito de areia menos permeável. A medição da queda de pressão, vazão, altura do leito e o cálculo da permeabilidade do sistema dão embasamento para estudar os fenômenos físicos que acontecem durante a retenção de areia e o processo de filtração. A bancada conforme construída possibilita a execução de trabalhos futuros em condições diversas, sendo versátil para a experimentação e seleção das telas de contenção de areia.

Palavras chave: Retenção de areia. Telas Stand Alone. Concentração. Viscosidade. Granulometria.

ABSTRACT

Sand production affects more than 70% of oil and gas reservoirs worldwide and, to control the impacts of solids production in a well, some mechanisms have been developed over the years, including the Stand Alone Screen system. Despite the range of published works on the subject, studies that aim to verify the influence of the characteristics of the transport fluid and the solids carried on the cake formation and, consequently, on the pressure drop observed for screens of containment are still scarce in the literature. For this reason, this work proposes to develop a bench and experimentally evaluate the effects of fluid viscosity and sand granulometry and concentration of cake formation, pressure drop, flow rate and permeability of the system. The experimental apparatus developed allows the transport of a fluid containing sand through a set of premium screens composed of a wire wrapped screen and a metallic mesh screen. The tested sand mass are between 0.05% and 0.15%, fluid viscosities between 9 and 47 cP and sands with characteristic sizes of 268 μm and 692 μm . The results obtained in the tests show that the sand retention can be divided into two regions. In the first, depth filtration occurs, the pressure drop increases significantly, with increments between 30 and 120 kPa. In the second region, surface filtration occurs, the pressure drop assumes a more linear behavior and grows less sharply, with increments between 10 and 30 kPa. Increasing the pressure drop results in reduced flow. The measured viscous permeability ranges from $5.40 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ to $3.66 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ and the inertial permeability values range from $5.29 \times 10^{-2} \text{ m}$ to $6.55 \times 10^{-1} \text{ m}$. The tests performed show results that have physical consistency, coherence and qualitative agreement with the results found in the literature. The results show that the greater the height of the formed bed, the greater the observed pressure drop, however, flows with transport fluid with lower viscosity, less concentrated solutions and flows with smaller particle size, give rise to a lesser sand bed. permeable. The measurement of pressure drop, flow rate, bed height and the calculation of the system's permeability provide the basis for studying the physical phenomena that occur during sand retention and the filtration process. The as-built bench allows the execution of future works under different conditions, being versatile for the experimentation and selection of sand containment screens.

Keywords: Sand retention. Stand Alone Screens. Experimental Bench. Concentration. Viscosity. Granulometry.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Mecanismos que comprometem a produção de petróleo causados por sólidos em suspensão..... | 18 |
| Figura 2 - Mecanismos de controle na contenção de areia..... | 19 |
| Figura 3 – Exemplos de telas utilizadas em sistemas <i>Stand Alone</i> para contenção de sólidos..... | 20 |
| Figura 4 - Mecanismos de filtração..... | 22 |
| Figura 5 - Pontes de areia..... | 23 |
| Figura 6 - Queda de pressão ao longo do tempo em teste de retenção de areia. | 27 |
| Figura 7 - Redução na vazão causada pela deposição de areia na tela..... | 28 |
| Figura 8 - Deposição de areia na tubulação..... | 29 |
| Figura 9 – Reômetro Anton Paar modelo Physica MCR 501 utilizado nos testes..... | 31 |
| Figura 10 – Bancada utilizada para a realização dos testes..... | 32 |
| Figura 11 - Visão geral da metodologia de execução dos testes..... | 33 |
| Figura 12 - Regressão linear dos dados de peneiramento das areias testadas..... | 38 |
| Figura 13 – Distribuição granulométrica das areias utilizadas nos testes..... | 39 |
| Figura 14 - Variação da altura do leito para diferentes concentrações mássicas de areia..... | 40 |
| Figura 15 – Gráfico da altura do leito formado ao longo dos testes para diferentes concentrações mássicas..... | 41 |
| Figura 16 – Queda de pressão para diferentes concentrações de areia..... | 42 |
| Figura 17 - Comportamento da queda de pressão para escoamento contendo 0,05% de concentração mássica de areia por tempo prolongado..... | 44 |
| Figura 18 – Vazão medida para escoamento com diferentes concentrações de areia..... | 45 |
| Figura 19 - Número de Reynolds ao longo dos experimentos com diferentes concentrações mássicas de areia..... | 47 |
| Figura 20 - Gradiente de pressão em função da velocidade para escoamento com diferentes concentrações mássicas de areia..... | 48 |
| Figura 21 - Valores das constantes de permeabilidade viscosa (k_1) e inercial (k_2) para escoamento com diferentes concentrações mássicas de areia..... | 49 |
| Figura 22 - Queda de pressão para leitos de areia de mesma altura formados por escoamentos de diferentes concentrações..... | 50 |

| | |
|---|----|
| Figura 23 - Variação da altura do leito para soluções com diferentes viscosidades. | 52 |
| Figura 24 – Gráfico da altura do leito formado para escoamento com diferentes viscosidades..... | 53 |
| Figura 25 - Aumento da queda de pressão através da seção de teste para diferentes viscosidades..... | 54 |
| Figura 26 – Vazão medida para escoamento com diferentes viscosidades..... | 56 |
| Figura 27 - Número de Reynolds ao longo dos experimentos com viscosidades diferentes..... | 57 |
| Figura 28 - Gradiente de pressão em função da velocidade para escoamento com diferentes viscosidades..... | 58 |
| Figura 29 - Valores das constantes de permeabilidade viscosa (k_1) e inercial (k_2) para escoamento com diferentes viscosidades..... | 59 |
| Figura 30 - Queda de pressão para leitos de areia de mesma altura formados por escoamentos de diferentes viscosidades..... | 60 |
| Figura 31 - Variação da altura do leito para soluções com areias de diferentes granulometrias..... | 61 |
| Figura 32 – Gráfico da altura do leito formado para escoamento com diferentes granulometrias..... | 62 |
| Figura 33 – Queda de pressão ao longo do experimento para diferentes granulometrias..... | 64 |
| Figura 34 – Vazões para escoamento com diferentes granulometrias..... | 65 |
| Figura 35 - Número de Reynolds ao longo dos experimentos com areias de granulometrias diferentes..... | 66 |
| Figura 36 - Gradiente de pressão em função da velocidade para escoamento com areias de diferentes granulometrias..... | 67 |
| Figura 37 - Valores das constantes de permeabilidade viscosa (k_1) e inercial (k_2) para escoamento com areia de diferentes granulometrias..... | 68 |
| Figura 38 – Esquema da bancada original para testes com polímeros redutores de arrasto..... | 79 |
| Figura 39 – Seção de teste conforme construída (a esquerda) e vista explodida (a direita). | 80 |
| Figura 40 – Configuração final da bancada utilizada nos experimentos. | 81 |

NOMENCLATURA

| | | |
|------------|---|---|
| ΔP | – | Queda de Pressão (Pa) |
| P | – | Pressão (Pa) |
| Q | – | Vazão (m ³ /h) |
| L | – | Altura do leito de areia (m) |
| μ | – | Viscosidade dinâmica (Pa.s) |
| v | – | Velocidade do escoamento (m/s) |
| ρ | – | Peso específico (kg/m ³) |
| k_1 | – | Permeabilidade viscosa (m ²) |
| k_2 | – | Permeabilidade inercial (m) |
| v_s | – | Velocidade de sedimentação (m/s) |
| v_p | – | Velocidade da partícula (m/s) |
| ρ_p | – | Peso específico da partícula (kg/m ³) |
| V | – | Volume (m ³) |
| g | – | Aceleração da gravidade (m/s ²) |
| d | – | Diâmetro da partícula (m) |
| d' | – | Tamanho característico da partícula (m) |
| d_i | – | Diâmetro interno do tubo (m) |
| t | – | Tempo (min) |
| Re | – | Número de Reynolds |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 17 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 22 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 31 |
| 3.1 | PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DAS SOLUÇÕES..... | 31 |
| 3.2 | DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS..... | 32 |
| 4 | RESULTADOS | 37 |
| 4.1 | DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA..... | 37 |
| 4.2 | EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE AREIA NO PROCESSO DE CONTENÇÃO | 39 |
| 4.3 | EFEITO DA VISCOSIDADE SOBRE O PROCESSO DE CONTENÇÃO DE AREIA | 51 |
| 4.4 | EFEITO DA GRANULOMETRIA NA CONTENÇÃO DE AREIA | 61 |
| 5 | CONCLUSÃO | 70 |
| | REFERÊNCIAS..... | 73 |
| | APÊNDICE A | 79 |

1 INTRODUÇÃO

A produção de areia afeta mais de 70% dos reservatórios de petróleo e gás em todo o mundo (KHAMEHCHI et al., 2015). Esta produção ocorre mais comumente em arenitos não consolidados e trata-se de um processo que depende das características da formação rochosa e dos fluidos a produzir. Assim, as forças de coesão intergranular das rochas de formação são fatores relevantes, visto que o desprendimento das partículas ocorrerá apenas se estas forem inferiores às forças devidas ao fluxo de produção (SILVESTRE, 2004).

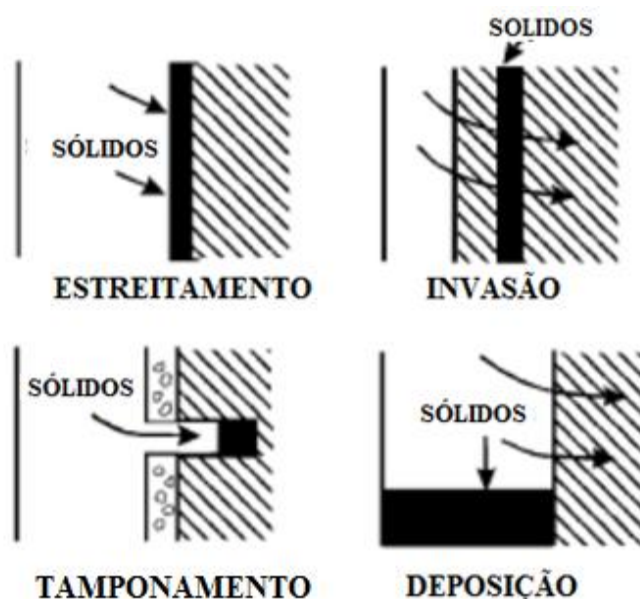
Segundo Fjaer e colaboradores (2008), a produção de sólidos pode ser classificada em três tipos, baseados na observação de campo: produção de areia contínua, que possui uma quantidade de sólidos formados relativamente constante durante toda a operação; produção de areia transiente, frequentemente observada logo após a perfuração, que possui como característica apresentar inicialmente uma alta taxa de produção de areia que diminui gradativamente até patamares assintóticos; e produção de areia catastrófica, que ocorre quando a taxa de areia produzida é muito elevada, acarretando o colapso do poço. A quantidade de sólidos que podem levar à produção contínua, transiente ou catastrófica depende das características construtivas e capacidade de produção de cada poço.

A falta de medidas preventivas para a produção de sólidos, pode ocasionar em colapso da zona produtora e tamponamento do poço, bloqueio parcial das ranhuras do revestimento, abrasão e desgaste de ferramentas, hastes e equipamentos, além de problemas ambientais derivados da necessidade de disposição de resíduos impregnados por hidrocarbonetos (DUSSEULT; SANTARELLI, 1989).

Os sólidos produzidos durante a extração em um poço de petróleo podem comprometer a operação através de quatro mecanismos distintos como visto na Figura 1. Os sólidos podem formar uma torta na face do poço devido a filtração de superfície, causando o estreitamento do poço, podem invadir a formação chegando até o maquinário, provocando o desgaste prematuro, podem ficar alojados nas perfurações ou no interior do elemento filtrante devido a filtração de profundidade, provocando o tamponamento, ou ainda, podem se depositar no fundo do poço por gravidade, provocando a redução da área útil total (BARKMAN; DAVIDSON, 1972).

Figura 1 – Mecanismos que comprometem a produção de petróleo causados por sólidos em suspensão.

Fonte: Adaptado de Barkman e Davidson (1972).

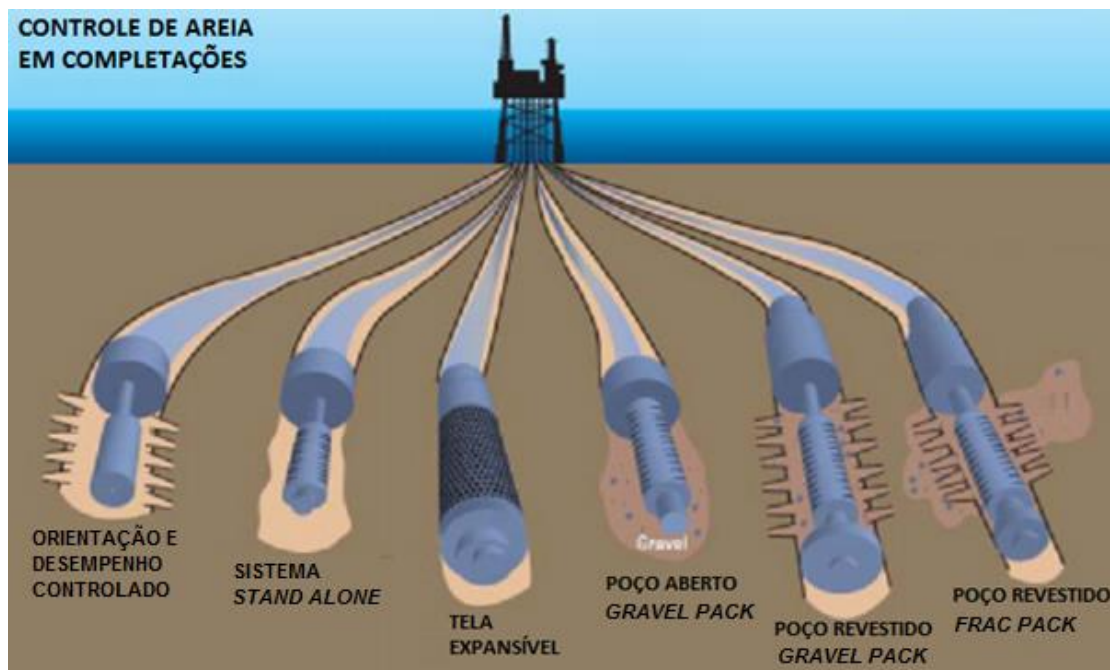


Mesmo partículas de granulometria inferior à abertura das telas podem formar uma torta sobre os dispositivos de contenção (GILLESPIE et al., 2000). Este fenômeno acontece baseado nas forças de interação entre o fluxo em contato com a tela e, o contato entre os próprios grãos no escoamento. Sob essas condições, pontes ou arcos de areia se formam na superfície da tela, o tamanho efetivo da abertura diminui e os grãos mais finos são retidos, apesar de serem menores do que a abertura da tela limpa. Contudo, a produção de sólidos pode propiciar trechos de alta porosidade, o que pode elevar a produtividade do poço de 10 a 30%, sobretudo em reservatórios contendo óleos pesados (DUSSEULT; SANTARELLI, 1989).

Para controlar os impactos da produção de sólidos em um poço, alguns mecanismos foram desenvolvidos ao longo dos anos como os apresentados na Figura 2. Dentre eles é possível citar o *Gravel Packing*, o *Frac-Pack*, as telas expansíveis, o mecanismo de orientação e desempenho controlado e, por fim, os tubos ranhurados e telas de contenção, denominados sistema *Stand Alone Screen* (PESSOA, 2011).

Figura 2 - Mecanismos de controle na contenção de areia.

Fonte: Adaptado de Pessoa (2011).



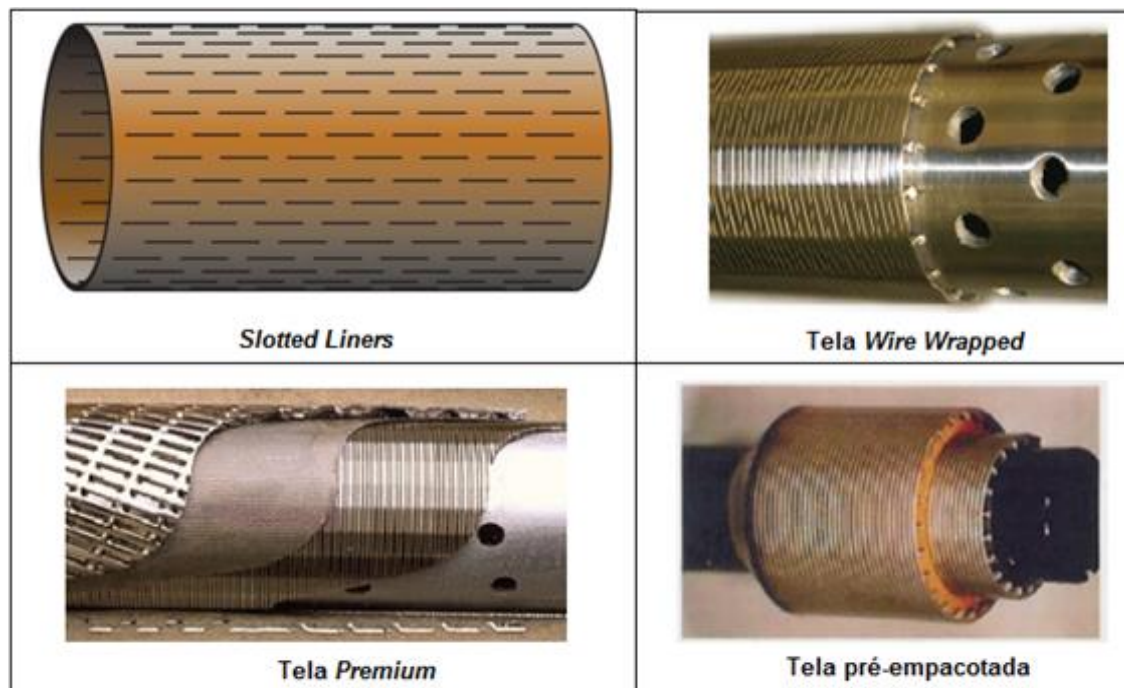
O *gravel packing* consiste no preenchimento dos canhoneados (caso existir) e anular do tubo telado/revestimento com cascalho de granulometria selecionada que atua como um filtro e impede a movimentação dos grãos da formação. O *Frac-Pack* é uma técnica de estimulação e contenção de sólidos, resultante de duas outras técnicas originalmente distintas: o fraturamento hidráulico e o *Gravel Pack*. As telas expansíveis deformam-se plasticamente e ao expandir provocam um empacotamento dos grãos da rocha de formação. O mecanismo de orientação e desempenho controlado pode ser realizado de duas maneiras: aumentando a área de fluxo ou diminuindo a restrição da vazão de produção. O sistema *Stand Alone Screen* consiste na utilização de um tubo ranhurado ou uma tela em contato direto com a formação para a contenção dos sólidos formados. Estes mecanismos, apesar da função de controlar a produção de sólidos, podem apresentar um alto custo de implementação, além da redução na produção do poço, de forma que a seleção correta da contenção é fundamental para garantir a capacidade produtiva. (MORITA et al., 1989).

A utilização do sistema *Stand Alone* possui custo reduzido quando comparado ao *gravel packing* ou às telas expansíveis. Outra vantagem do sistema é ser de simples instalação e possuir boa eficiência em formações com granulometria homogênea (VILLARROEL, 2009). Em sistemas *stand alone*, tipicamente são utilizados alguns

modelos de tubos/telas como os apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Exemplos de telas utilizadas em sistemas *Stand Alone* para contenção de sólidos.

Fonte: Adaptado de Bellarby (2009) e Machado (2003).



Os *Slotted Liners* são tubos com ranhuras longitudinais ou transversais. Estes, apesar do baixo custo, tem uma área aberta ao fluxo menor quando comparados a outros modelos e, por isso, são comumente utilizados em poços de baixa produtividade. As Telas *Wire Wrapped* são constituídas por um tubo base perfurado envolvida de fios de arame de soldagem helicoidal ao redor das hastes. Essas telas têm uma área de fluxo maior quando comparadas aos *slotted liners* e oferecem boa resistência e um controle preciso da retenção. As Telas *premium*, consistem em uma ou mais camadas de malha metálica filtrante sobrepostas ao redor de uma tela *Wire Wrapped*, que confere a malha à resistência mecânica necessária. A malha filtrante é comumente protegida por uma carcaça externa para garantir a sua integridade durante a descida, a fim de evitar a abrasão da malha pelo contato com o poço aberto. As telas pré-empacotadas (*Pre-packed*), são construídas de forma similar às *Wire Wrapped*, contudo, possui duas telas conjuntas com um espaço anular entre elas preenchido por cascalho de granulometria específica (BELLARBY, 2009).

A seleção do tamanho de tela ideal para a contenção de areia no passado era realizada utilizando correlações empíricas e regras práticas, como a desenvolvida

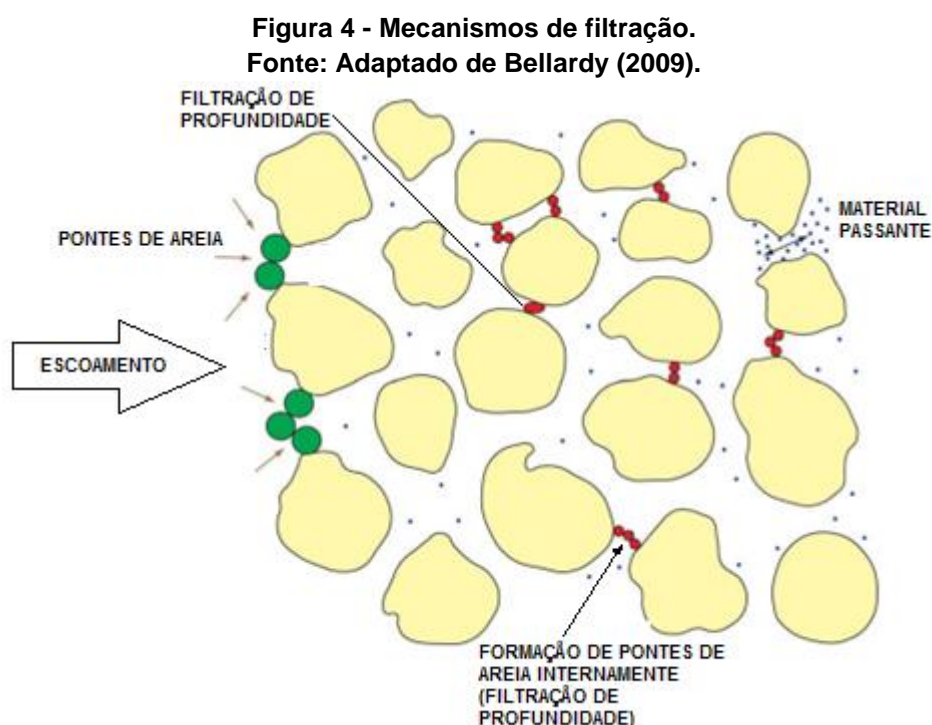
por Coberly (1937) que define o tamanho da fenda em função do tamanho do grão de areia. Contudo, essas correlações possuem limitações e a prática padrão da indústria é realizar testes de retenção de areia em laboratório, que podem ser divididos em dois grupos principais: testes de retenção com fluido de transporte contendo areia e testes com o leito de areia pré formado conhecido como *prepack* (BALLARD, 1999). Testes de retenção com fluido de transporte contendo areia consistem em passar uma solução com areia de granulometria pré-definida em suspensão por um cupom da tela a ser estudada a uma determinada vazão até que um leito de areia, também conhecido como reboco ou torta, se forme sobre a tela. Já o *prepack* consiste em bombear um fluido limpo através de um leito previamente formado sobre o cupom da tela em questão.

A realização dos testes e a seleção correta do elemento filtrante é de vital importância para a produção, visto que, o fluxo de material extraído é afetado pela restrição ao escoamento imposta pelos dispositivos de contenção e pelo leito de areia formado sobre eles. Assim, conhecer o comportamento dos elementos filtrantes ao longo do tempo, significa conhecer parte dos elementos que são responsáveis pela capacidade de produção do poço.

Vários trabalhos para estimar experimentalmente a eficiência da retenção de areia em diferentes telas *Stand Alone* foram conduzidos ao longo dos anos como será apresentado no capítulo 2, contudo, as condições de extração nos campos de exploração podem variar de forma significativa e, estudos que objetivam verificar não apenas a eficiência da tela mas também a influência de parâmetros como viscosidade, concentração e granulometria dos sólidos, na formação do reboco e, conseqüentemente, na queda de pressão observada para telas de contenção ainda são escassos na literatura. Por este motivo, este trabalho se propôs a construir uma unidade experimental e realizar testes sob diferentes condições para determinar experimentalmente a influência destes parâmetros na restrição ao escoamento. Mais especificamente, este trabalho se propõe a analisar a formação do leito de areia sobre uma tela *stand alone premium* e os efeitos dessa formação sobre a queda de pressão, sobre a vazão e sobre a permeabilidade da torta, comparando a formação do leito para diferentes viscosidades do fluido de transporte, granulometrias e concentrações mássicas de areia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Mahmoudi e colaboradores (2018), a utilização de telas na contenção de areia resulta na filtração dos particulados. A filtração ocorre através de dois mecanismos distintos, filtração em profundidade e filtração de superfície que, para telas, podem ou não acontecer em sequência. Em telas de malha, telas pré-empacotadas e em cascalhos, primeiramente ocorre a filtração de profundidade. Na filtração de profundidade, durante os instantes iniciais, as partículas de sólidos adentram a malha filtrante, ficando retidas no interior do filtro, seja pelo tamanho da restrição interna, seja pela formação de pontes de areia no interior do elemento filtrante (Figura 4). Este mecanismo resulta em um aumento abrupto da queda de pressão através do filtro (ROCHA, 2010; KOCH; KRAMMER, 2008) em função da redução da permeabilidade (MAHMOUDI et al., 2018).

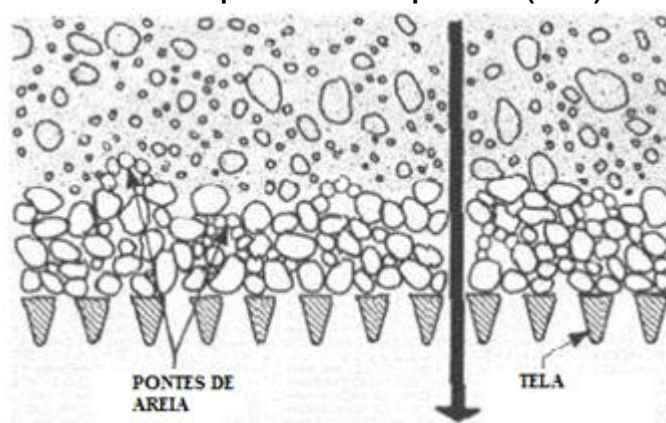


De acordo com Rocha (2010), a filtração em profundidade é seguida da formação da torta na superfície do elemento filtrante. Esta torta passa a ser responsável por capturar e reter as partículas que continuam chegando com o escoamento. O aumento significativo da queda de pressão no início do escoamento tende a tornar-se menos pronunciado e mais linear com a formação da torta. O mecanismo de filtração passa a ser a filtração de superfície e o elemento filtrante passa a servir apenas de suporte para a torta.

Em alguns dispositivos, a etapa de filtração de profundidade pode não ocorrer, acontecendo apenas a filtração de superfície, como é o caso de telas do tipo *slotted liners* e do tipo *wire wrapped*. Nestes modelos de tela, as partículas com tamanho superior ao tamanho da fenda ficam retidas por exclusão de tamanho, ou ainda, ficam retidas nas pontes de areia que se formam sobre as fendas da tela, de forma que um leito é formado na superfície do meio filtrante (MAHMOUDI et al., 2018).

As pontes de areia são formadas através da interação entre as partículas sólidas presentes no escoamento e o elemento filtrante. Segundo Gillespie e colaboradores (2000), desde que o fluxo de partículas no escoamento permita a interação entre partículas, os grãos de sólidos apoiam-se uns nos outros formando arcos sobre a tela, apesar de possuir tamanho menor que a malha, isto quer dizer que, quanto maior a quantidade de partículas no escoamento, maior a propensão em formar pontes de areia sobre a abertura das telas. Estes arcos causam o tamponamento da abertura da tela como apresentado na Figura 5, também sobre eles, o leito de areia é formado. Os autores destacam ainda que este fenômeno acontece no início do escoamento, quando a camada de sólidos sobre a tela é muito fina. Conforme a torta aumenta de espessura, a queda de pressão passa a ser mais dependente da resistência imposta pelo leito.

Figura 5 - Pontes de areia.
Fonte: Adaptado de Gillespie et al. (2000)



A obstrução do elemento filtrante, seja pela filtração em profundidade seja pela filtração de superfície, causa uma restrição ao escoamento ao atravessar um meio poroso. A propriedade que define a facilidade do fluido em passar através dos poros ou espaços vazios do meio é denominada permeabilidade (PRADO, 2014).

Para fluidos incompressíveis à baixa velocidade escoando através de um meio poroso, a permeabilidade pode ser expressa através da lei de Darcy ((1). Esta equação é válida quando os efeitos de inércia sobre o escoamento são desprezíveis em relação as forças viscosas, ou seja, baixo número de Reynolds, quando o escoamento é monofásico e há uma relação linear entre a velocidade e o gradiente hidráulico (MONICARD, 1980).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v \quad (1)$$

ΔP é a queda de pressão, L é o comprimento do meio poroso, μ é a viscosidade dinâmica, v é a velocidade do escoamento e k_1 é a constante de permeabilidade viscosa. A permeabilidade viscosa é uma propriedade da estrutura porosa na qual os efeitos viscosos durante o escoamento em baixas velocidades referem-se ao atrito entre as moléculas do fluido e as paredes do meio poroso (MILAK, 2018).

Wang e colaboradores (2019) destacam que a lei de Darcy deve ser aplicada a escoamentos com número de Reynolds até 10, para valores superiores a este, os efeitos inerciais podem ser suficientes para afetar a permeabilidade medida.

Forchheimer propôs um termo adicional à equação de Darcy para representar as forças inerciais quando estas são relevantes para o escoamento. Para estes escoamentos, o peso específico do fluido (ρ) é considerado e, uma nova constante é adicionada denominada constante de permeabilidade inercial, representada por k_2 , como é possível verificar na (2 (MILAK, 2018).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v + \frac{\rho}{k_2} v^2 \quad (2)$$

A constante k_2 , adicionada por Forchheimer na equação de Darcy, está relacionada a turbulência do escoamento estimada pelo número de Reynolds e pela tortuosidade do meio poroso, isto é, pelo caminho que o fluido percorre no interior dos poros. Quanto mais tortuoso um meio poroso, maior a área de interação entre as camadas do fluido e as paredes dos poros, o que potencializa os efeitos viscosos e inerciais que causam a queda de pressão do fluido (INNOCENTINI, 1999). Não há métodos definidos para medir a tortuosidade, porém, quanto mais tortuoso o percurso do fluido através do meio poroso, menor será a permeabilidade medida

no coeficiente proposto por Forchheimer (GÓMEZ, 2013).

Um dos estudos pioneiros na determinação de um método para dimensionar a tela a ser utilizada foi o de Coberly (1937). O autor propôs que para desempenhar a função adequadamente, a tela deveria possuir abertura igual a duas vezes o tamanho do sólido para fendas retangulares ou de três vezes o tamanho do grão quando a abertura fosse circular, isso por causa da formação das pontes de areia sobre a abertura, que proporcionavam a retenção de partículas menores que a fenda. Com aberturas excedendo esses valores em aproximadamente 25 por cento, nenhuma ponte se formava e a retenção não ocorria. Os estudos de Coberly (1937) foram limitados à geometria do dispositivo de retenção e à relação entre o tamanho da fenda e da partícula, contudo, observando apenas esta correlação, parâmetros importantes para a determinação da melhor tela a ser utilizada são suprimidos, como a estrutura da torta que se forma sobre a tela, os efeitos inerciais que podem estar presentes no escoamento e a construção da tela (CHANPURA et al., 2011).

Para avaliar o comportamento das telas de retenção de areia em situações controladas, testes laboratoriais foram realizados, como o trabalho apresentado por Ballard (1999) que alertou sobre a importância utilização de baixa vazão e baixa concentração de areia nos experimentos para possibilitar a visualização do fenômeno de formação do leito, além da utilização de um agente regulador da viscosidade para estabilizar a suspensão dos sólidos na solução e, assim, garantir a reprodutibilidade dos experimentos. Ballard mostrou que, soluções com uma quantidade maior de agente viscosificante carregavam uma quantidade maior de sólidos. Desta forma, baixas vazões (até 0,3 m³/h), baixa concentração de areia (0,05% em peso) e a utilização de agente controlador de viscosidade são condições que devem ser observadas para a realização dos testes segundo o autor.

A importância da viscosidade no transporte de sólidos também é destacada por Yao (1970) que define a velocidade de sedimentação (v_s) conforme a (3). O autor utiliza a Lei de Stokes para definir a equação e, apesar desta lei ser limitada a valores muito baixos de Reynolds, a equação proposta revela que a viscosidade é inversamente proporcional a velocidade de sedimentação das partículas no escoamento, ou seja, o incremento na viscosidade favorece o transporte dos sólidos.

$$\vec{v}_s = \vec{v}_p - \vec{v} = \frac{(\rho_p - \rho)V\vec{g}}{3\pi\mu d_p} \quad (3)$$

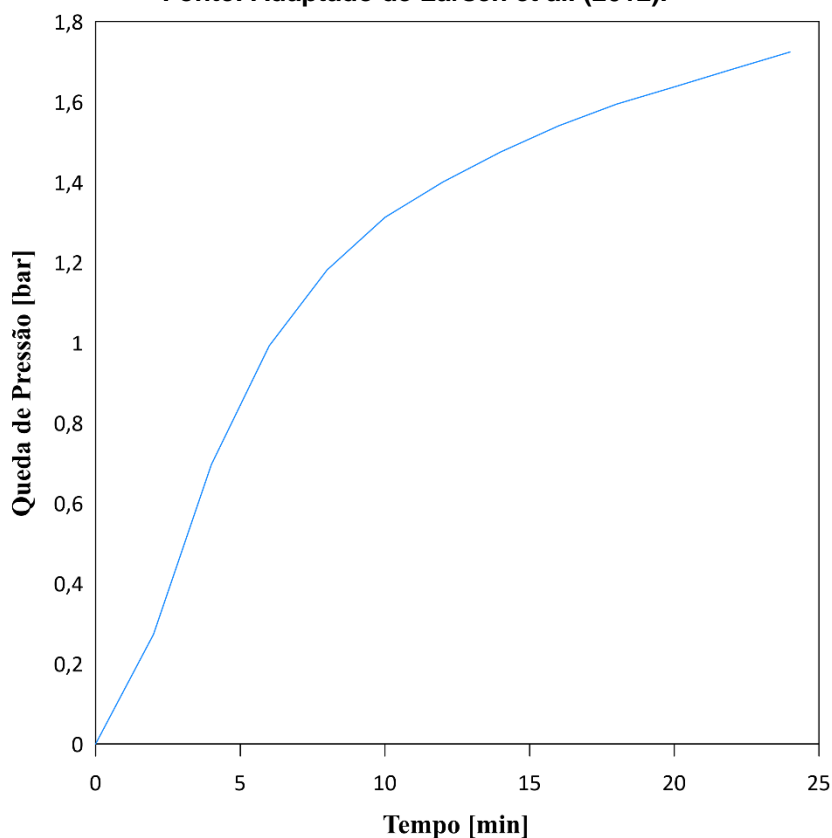
Em que v_s é a velocidade de sedimentação, v_p é a velocidade da partícula, ρ_p é o peso específico da partícula, ρ é o peso específico do fluido, V é o volume da partícula, g é a aceleração da gravidade, d_p é o diâmetro da partícula e μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

O efeito da viscosidade no transporte de sólidos foi testado por Changyin e colaboradores (2019). Os autores realizam testes com fluidos de diferentes viscosidades transportando sólidos através de uma contenção do tipo *gravel pack* e concluíram que a viscosidade do fluido tem efeito direto no grau de entupimento do elemento filtrante. De acordo com os autores, quanto maior a viscosidade do fluido, maior será a capacidade de transporte de areia, portanto, mais partículas de areia serão transportadas para a contenção.

A influência da restrição ao escoamento em testes de contenção de areia e seus efeitos na queda de pressão foram alvo de estudos neste campo de pesquisa, como o trabalho apresentado por Larsen e colaboradores (2012). Em seus testes, o comportamento de queda de pressão mais pronunciado no início foi observado, indicando a filtração em profundidade seguida da filtração de superfície como apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Queda de pressão ao longo do tempo em teste de retenção de areia.

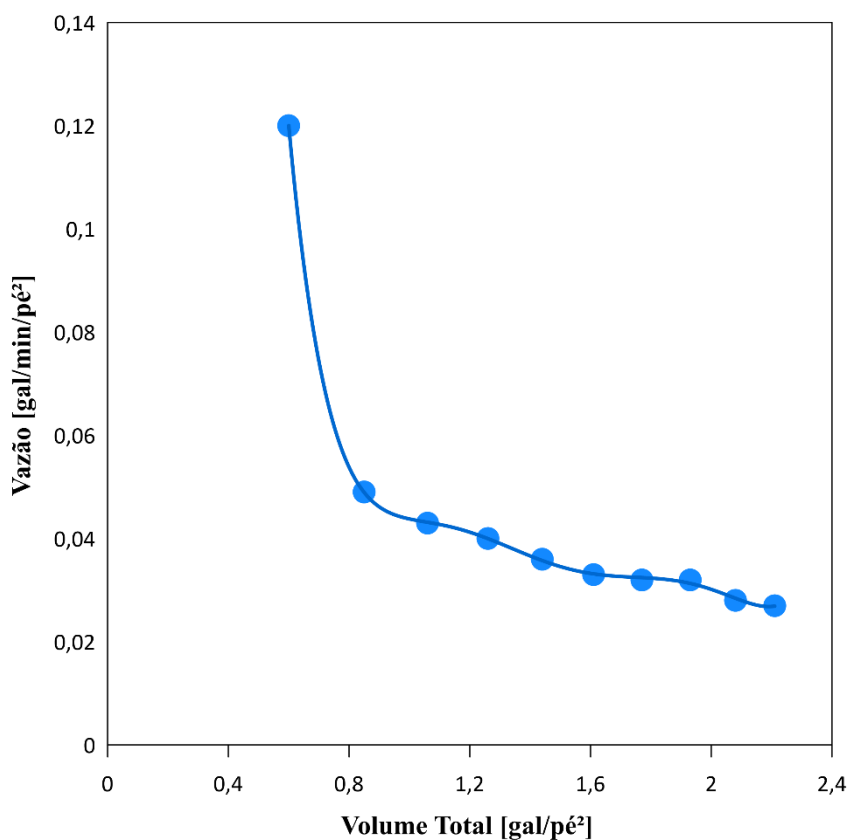
Fonte: Adaptado de Larsen et al. (2012).



A influência da restrição ao escoamento na vazão também é um parâmetro alvo de estudos, como no trabalho apresentado por Hodge e colaboradores (2002). Em seu trabalho, os autores constataram que a vazão reduz à medida que a areia é depositada sobre o elemento filtrante, indicando que a permeabilidade da formação pode controlar a vazão. Nos dados apresentados na Figura 7, é possível perceber que a vazão cai significativamente no início do teste e tende a reduzir de forma menos acentuada posteriormente, novamente evidenciando os efeitos da filtração de profundidade e de superfície.

Figura 7 - Redução na vazão causada pela deposição de areia na tela.

Fonte: Adaptado de Hodge (2002).



A influência da construção da tela também é alvo de estudos neste campo de pesquisa. Furgier e colaboradores (2013) comparam o desempenho em telas do tipo *wire wrapped* e telas de malha. Os autores identificam que a diferença no desempenho das telas é pouco significativa, contudo, as telas de malha se mostraram menos suscetíveis a obstrução, permitindo aberturas menores quando comparadas às *wire wrapped*. Segundo a pesquisa, telas *wire wrapped* devem possuir abertura mínima de 200 μm . Caso seja necessária uma abertura ainda menor, telas de malha devem ser utilizadas.

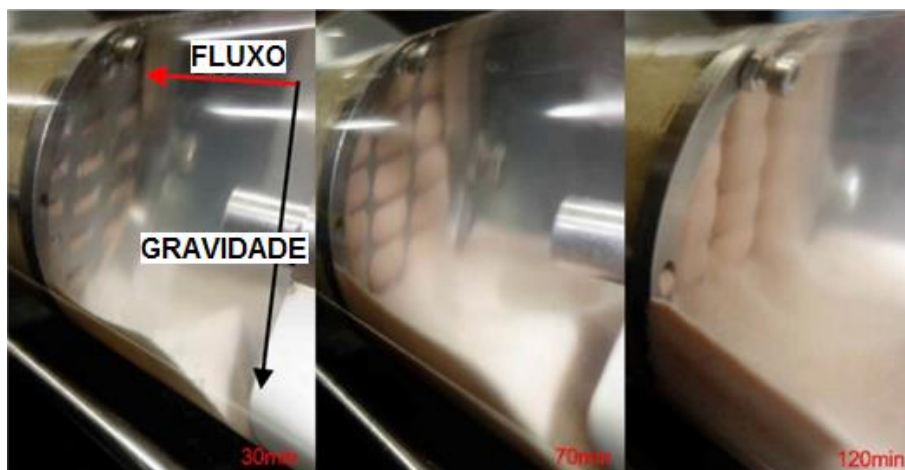
Outro parâmetro estudado a respeito da construção do elemento filtrante é a influência do tamanho da abertura da tela na contenção de sólidos, como no trabalho de Ballard e Beare (2003). Nos testes, os autores observam que, a única diferença observada para telas de diferente aberturas é o início da formação do leito e, consecutivamente, o início do aumento da pressão, indicando que o gradiente das curvas de pressão está relacionado ao tamanho da malha e classificação da

areia. Um trabalho similar foi desenvolvido por Fischer e Hamby (2018) que realizaram testes para comparar telas *premium* com aberturas distintas. Os autores observam que telas com malhas menores resultam em uma queda de pressão maior.

As partículas sólidas retidas na tela formam um leito de areia sobre ela. A fim de verificar e acompanhar esse processo de formação, Wu e colaboradores (2016) realizaram testes com uma célula de retenção de seção transparente. Os autores observaram que, a altura da coluna de areia crescia ao longo do experimento e, provocava um aumento da pressão medida na célula de teste aproximadamente linear com o tempo. Um experimento similar foi realizado por Ma e colaboradores (2020). Contudo, além da seção transparente, o aparato permitia a realização dos testes na posição horizontal e na vertical. O elemento filtrante era o cascalho com diferentes densidades. Ao realizarem testes com a célula de retenção de areia na posição horizontal, os autores diagnosticaram uma deposição de sólidos no fundo da tubulação como apresentado na Figura 8. Essa deposição foi atribuída ao efeito da gravidade sobre a própria massa da areia utilizada nos testes.

Figura 8 - Deposição de areia na tubulação.

Fonte: Adaptado de Ma e colaboradores (2020).



O tipo de areia e o tamanho dos grãos são relevantes para a determinação da escolha da tela (COBERLY, 1937; MORITA et al., 1989). As areias não possuem tamanho uniforme para todas as partículas em toda a formação, por isso, a classificação é feita por uma distribuição de granulometria. Dentre os modelos clássicos de distribuição, está o modelo proposto por Rosin e Rammler (1933) que

é amplamente utilizado por se ajustar bem a diversas situações (VESILIND, 1980), descrito pela (4).

$$Y = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d}{d'} \right)^n \right] \quad (4)$$

Em que Y é função da fração cumulativa de material em peso menor para o tamanho d , n é a constante que descreve a uniformidade do material e, portanto, chamada de constante de uniformidade e d' é o tamanho característico de partícula, definido como sendo o tamanho da partícula no qual 63,2% dos sólidos são menores em peso (VESILIND, 1980). Os valores de n e d podem ser obtidos através da linearização da equação e em função dos dados de classificação do material. A função linearizada da equação de Rosin-Rammler é dada pela (5 (FRARE et al., 2000)).

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-Y} \right) \right] = n \ln(d) - n \ln(d') \quad (5)$$

A (5 possui a forma de uma equação de primeiro grau, assim, imprimindo graficamente as funções logarítmicas dos dados de fração acumulada (Y) e da abertura da malha de peneiramento (d) é possível obter os parâmetros n e d' da distribuição (FRARE et al., 2000).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo é destinado a descrever o preparo e caracterização das soluções utilizadas nos experimentos e a metodologia utilizada para execução dos testes.

3.1 PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DAS SOLUÇÕES

Nos testes, foram empregadas soluções aquosas de glicerina como fluido de transporte para a areia. Para a medição da viscosidade das soluções, foi utilizado o reômetro Anton Paar, modelo Physica MCR 501 com geometria *double-gap* exibido na Figura 9.

Figura 9 – Reômetro Anton Paar modelo Physica MCR 501 utilizado nos testes.

Fonte: Autor (2021).



As soluções aquosas de glicerina foram preparadas em frações mássicas para obter a viscosidade desejada. Foram selecionadas três viscosidades diferentes para os testes, 9, 20 e 47 cP. As porções mássicas das soluções de água e de glicerina, bem como as frações de areia, foram medidas em uma balança semi-

analítica Marte AC 10K, com capacidade máxima de 10.000 ($\pm 0,1$) g.

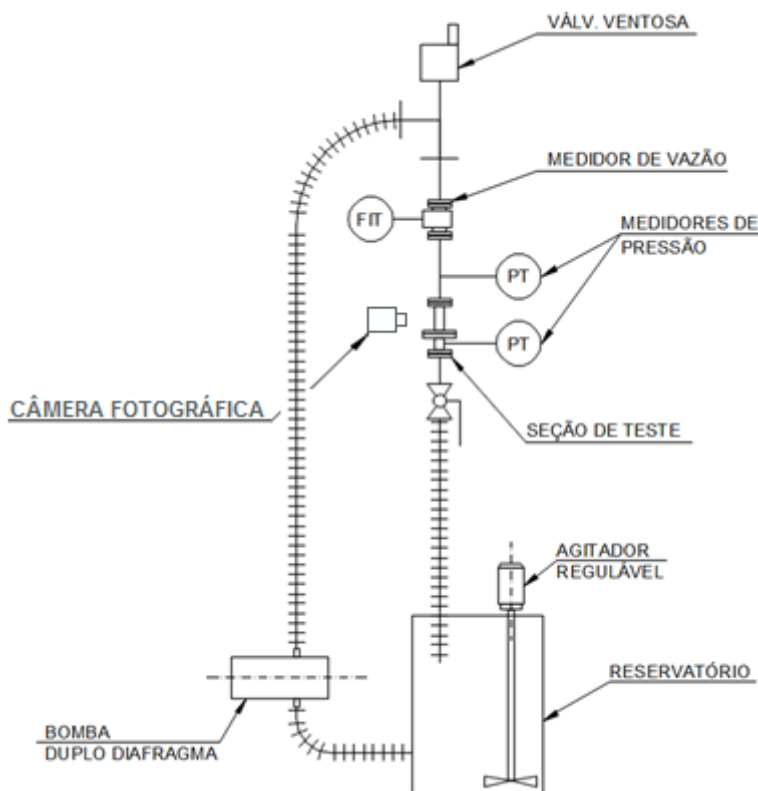
Para a realização dos testes, estavam disponíveis dois tipos de areia diferentes que foram classificadas através de peneiramento. O peneiramento foi feito com diferentes aberturas de malha durante um intervalo de tempo de 15 minutos em cada malha. A dispersão granulométrica foi calculada utilizando o modelo de Rosin-Rammler.

3.2 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS

A condução dos experimentos foi realizada em uma bancada construída para tal que está apresentada na Figura 10. Os detalhes da construção estão registrados no APÊNDICE A. Nos testes foram utilizados um conjunto de cupons feitos a partir de telas, sendo um do tipo *Wire Wrapped* com abertura de 220 μm e outro de tela de malha metálica com abertura 175 μm . As telas foram sobrepostas a fim de formar um conjunto *premium*.

Figura 10 – Bancada utilizada para a realização dos testes.

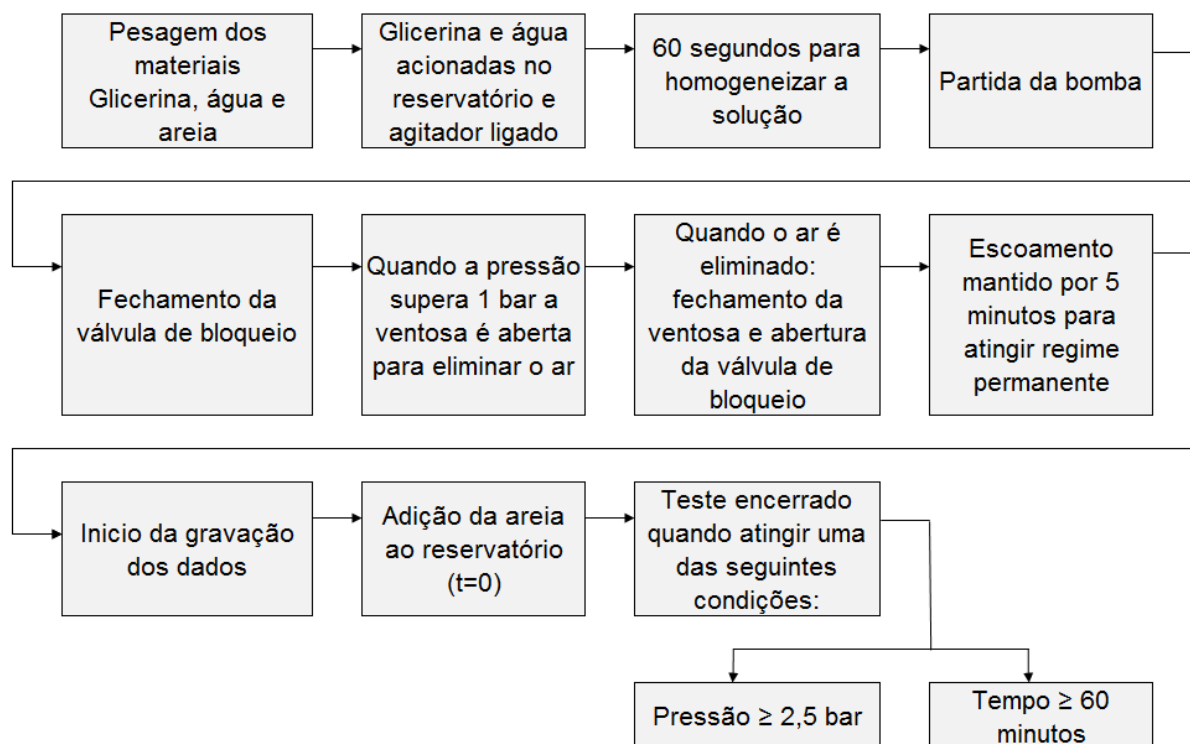
Fonte: Autor (2021).



Os experimentos descritos a seguir foram executados conforme esquema apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Visão geral da metodologia de execução dos testes.

Fonte: Autor (2021).



As porções de glicerina e água foram pesadas, adicionadas ao reservatório e o agitador foi ligado em rotação 750 rpm. O agitador era mantido em operação durante todo o experimento. Após 60 segundos a bomba era ligada, este período de tempo antes da partida da bomba era utilizado para homogeneizar a solução.

Com a bomba em operação, para eliminar o ar presente no interior da linha, a válvula de bloqueio era completamente fechada, com isso, a pressão medida nos transdutores começava a subir e, quando ultrapassa a marca de 1,0 bar, a saída manual da válvula ventosa era aberta, liberando o ar represado. No momento que o ar escapava completamente e parte da solução começava a vazar pela ventosa, a abertura manual era novamente fechada e a válvula de bloqueio era completamente aberta. Após o procedimento, o escoamento era mantido em recirculação por mais cinco minutos, de forma a permitir que atinja regime permanente. Só então a areia era adicionada ao reservatório. Este momento corresponde ao tempo $t = 0$ nos resultados apresentados.

Próximo à seção de teste, foi instalado um suporte para fixação de um celular do fabricante Lenovo modelo A6020L36 com câmera de resolução 4128x3096 pixels e abertura focal de f/2.2, utilizado para fazer o registro fotográfico do leito na seção de teste de acrílico. No aparelho foi instalado um aplicativo que realizava um disparo fotográfico a cada intervalo de cinco minutos. Este intervalo de tempo entre as medições foi suficiente para analisar o comportamento da formação do leito como apresentado nos resultados. A altura do leito foi medida de duas formas distintas, através de uma escala com graduação de 1 mm e através da foto registrada ao longo do tempo. A diferença média entre a medição dos dois métodos foi 7,2%. Por isso, o método escolhido para medição da altura foi através do registro fotográfico.

A cada cinco minutos, uma amostra de solução era retirada na descarga da bancada para verificar presença de sólidos que passavam pela seção de testes. As amostras ficavam em repouso para decantação da areia, contudo, em todas as amostras retiradas, não foi possível observar a presença do material, de forma que, é possível dizer que a areia foi retida praticamente em sua totalidade na seção de testes.

Foi possível observar em todos os testes, as regiões de filtração de profundidade e filtração de superfície dentro de 60 minutos. Quando estendido o tempo de execução do experimento, observou-se a interrupção do crescimento do leito e, conseqüentemente, a interrupção do crescimento da queda de pressão como apresentado na seção 4.2. Isso ocorreu, pois, a areia presente no escoamento esgotou-se. Como o alvo deste estudo é o comportamento da queda de pressão em função da formação do leito de areia, os testes foram finalizados com 60 minutos, que foi tempo suficiente para observar as regiões de interesse do trabalho. Assim, as condições para a finalização dos experimentos foram tempo igual a 60 minutos ou pressão no transmissor de pressão a montante da seção de teste superior a 2,5 bar para garantir a segurança da bancada.

As leituras de vazão foram feitas por um medidor de vazão magnético do fabricante Emerson Rosemount modelo 8705, com range de medição 0,00846 a 8,46 m³/h e precisão de 0,25%. A queda de pressão foi medida por um par de transmissores de pressão modelo Warme WTP-4010 com range de medição 0 a 3 bar e precisão de 0,50%. A vazão e pressão foram registradas no sistema supervisor a cada 0,5 s.

Após os testes, os resultados foram salvos em documento apropriado e compilados para apresentação dos resultados. Entre cada experimento, a bancada era limpa e preparada para uma nova rodada.

Foram realizados testes para validar a aplicabilidade da bancada sob diferentes circunstâncias e estudar o fenômeno de contenção de areia. Os testes realizados podem ser divididos em três grupos distintos: Testes com variação da concentração mássica de areia, testes com variação da viscosidade do fluido de transporte e testes com variação da granulometria da areia.

Para o primeiro grupo de testes, a viscosidade da solução foi mantida em 20 cP e foram testadas três concentrações mássicas de sólidos diferentes, 0,05%, 0,10% e 0,15%. A granulometria da areia utilizada foi a mesma para todos estes testes, 268 μm . Para os testes, foram escolhidas concentrações baixas de areia, respeitando as orientações de Ballard (1999) e os valores escolhidos são baseadas nas concentrações utilizadas na literatura (BALLARD, 1999; CHANPURA et al, 2011; BALLARD; BEARE, 2003).

No segundo grupo de testes, soluções aquosas de glicerina com três viscosidades distintas foram preparadas, 9, 20 e 47 cP. O range de viscosidades utilizado nos testes está de acordo com trabalhos encontrados na literatura (MA et al., 2019; CHANPURA et al, 2011; CHANGYIN et al. 2019). Os demais parâmetros foram fixados, a saber, concentração mássica de areia em 0,10% e granulometria do sólido com tamanho característico de 268 μm , de forma a avaliar apenas os efeitos da viscosidade sobre a formação do leito e comportamento do sistema.

Por fim, testes com sólidos de granulometrias distintas foram realizados na bancada, mantendo constante os parâmetros de viscosidade do fluido de transporte em 20 cP e concentração mássica de areia em 0,10%. As areias disponíveis para a realização dos testes tinham tamanho característico de 268 μm e 692 μm .

Os testes foram realizados em triplicata. Para todos os dados medidos diretamente são apresentadas a média dos valores medidos junto a barra de erros que representa a flutuação dos resultados (valores de máximo e mínimo obtidos nos testes).

As medições de queda de pressão e vazão foram feitas a cada 0,5 segundos,

porém, para melhor apresentação dos resultados, os dados foram compilados a cada 2 minutos, de forma que os gráficos apresentam a média móvel dos dados no intervalo de 2 minutos.

4 RESULTADOS

Os testes executados têm o objetivo de avaliar o efeito de diferentes viscosidades do fluido de transporte e diferentes concentrações e granulometrias da areia, na retenção de sólidos.

4.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

As areias disponíveis para os testes foram classificadas por peneiramento. As frações mássicas retidas e passantes para cada areia estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados da quantidade de material retido e passante no peneiramento das duas amostras de areia.

| Areia 1 | | | | | | |
|------------|----------------------------|------------------|------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|
| Malha ASTM | Abertura [μm] | Massa retida [g] | Massa retida [%] | Massa retida acumulada [%] | Massa Passante [g] | Massa Passante [%] |
| 45 | 355 | 0,03 | 0,15 | 0,15 | 19,48 | 99,85 |
| 50 | 300 | 2,95 | 15,12 | 15,27 | 16,53 | 84,73 |
| 60 | 250 | 8,43 | 43,21 | 58,48 | 8,10 | 41,52 |
| 70 | 212 | 4,82 | 24,71 | 83,19 | 3,28 | 16,81 |
| 80 | 180 | 0,62 | 3,18 | 86,37 | 2,66 | 13,63 |
| 100 | 150 | 2,27 | 11,64 | 98,00 | 0,39 | 2,00 |
| 120 | 125 | 0,39 | 2,00 | 100,00 | 0,00 | 0,00 |
| Areia 2 | | | | | | |
| Malha ASTM | Abertura [mm] | Massa retida [g] | Massa retida [%] | Massa retida acumulada [%] | Massa Passante [g] | Massa Passante [%] |
| 20 | 0,85 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 99,38 | 99,55 |
| 25 | 0,71 | 2,12 | 2,12 | 2,57 | 97,26 | 97,43 |
| 30 | 0,6 | 86,66 | 86,81 | 89,38 | 10,6 | 10,62 |
| 35 | 0,5 | 8,48 | 8,49 | 97,88 | 2,12 | 2,12 |
| 40 | 0,425 | 1,89 | 1,89 | 99,77 | 0,23 | 0,23 |

Em posse das massas e percentuais foram determinados os parâmetros da distribuição de Rosin-Rammler através da regressão linear dos dados. A curva da regressão está mostrada na Figura 12 e os valores dos parâmetros e coeficiente de correlação estão resumidos na Tabela 2.

Figura 12 - Regressão linear dos dados de peneiramento das areias testadas.

Fonte: Autor (2021).

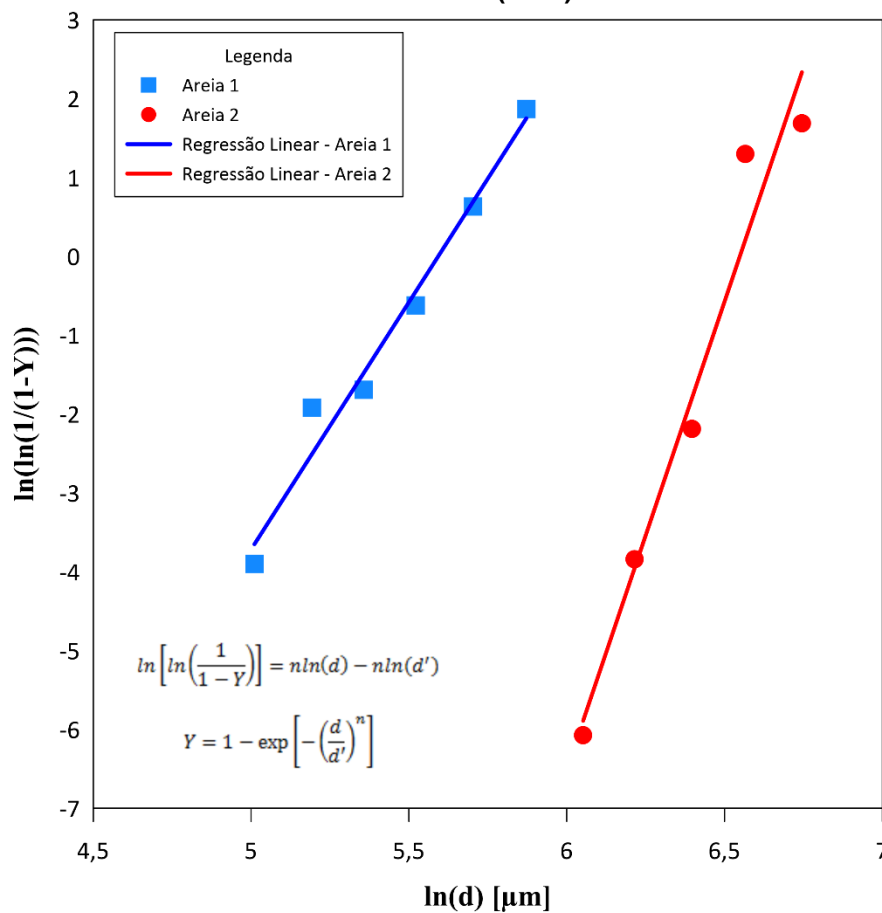


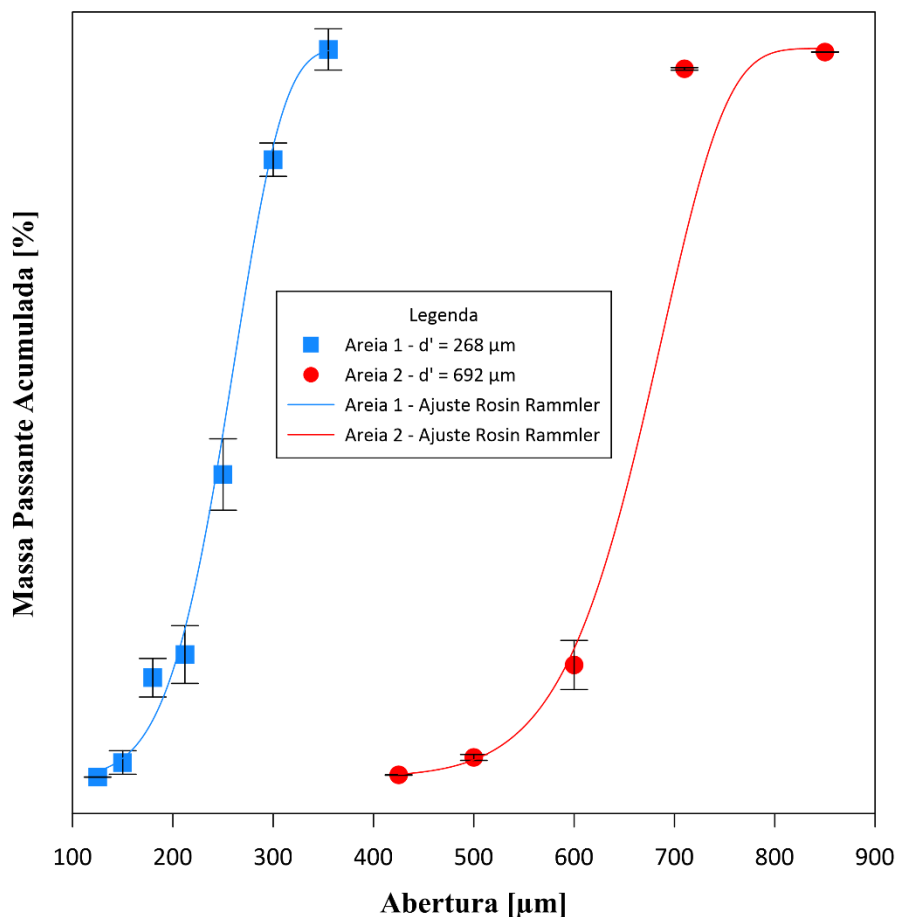
Tabela 2 - Coeficientes da distribuição de Rosin-Rammler obtidos através da regressão linear dos dados de peneiramento.

| Areia 1 | | Areia 2 | |
|----------------|--------|----------------|--------|
| n | 6,27 | n | 11,46 |
| d' | 268 | d' | 692 |
| R ² | 0,9758 | R ² | 0,9623 |

O coeficiente de correlação mostra um bom ajuste dos valores à regressão linear, assim, a curva de distribuição granulométricas das areias utilizadas é apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Distribuição granulométrica das areias utilizadas nos testes.

Fonte: Autor (2021).



A distribuição de Rosin-Rammler apresenta bom ajuste aos dados obtidos no peneiramento. De acordo com os dados obtidos, a areia 1 possui tamanho característico $268 \mu\text{m}$ e a areia 2 igual a $692 \mu\text{m}$.

4.2 EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE AREIA NO PROCESSO DE CONTENÇÃO

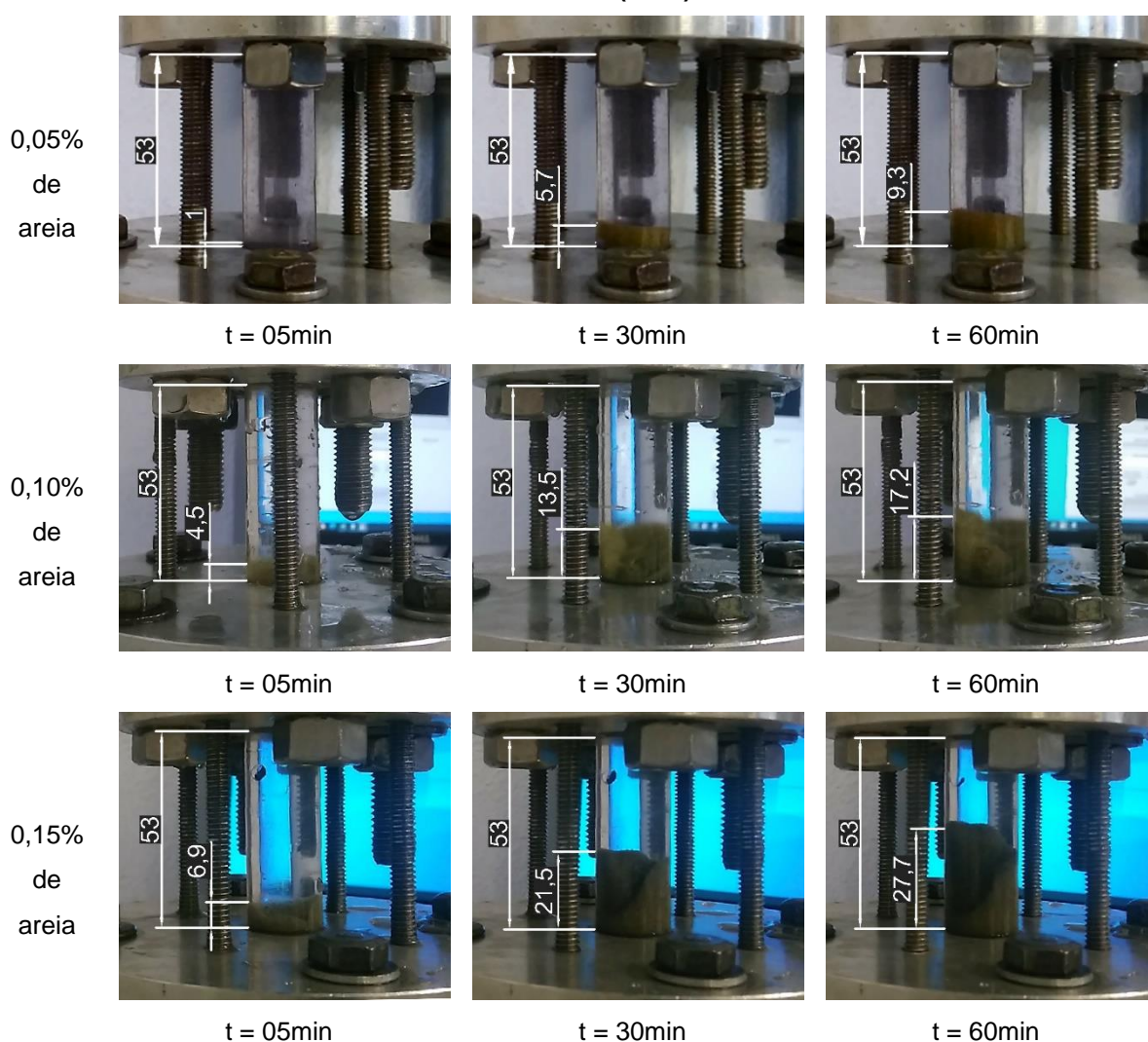
Para verificar a influência da concentração de sólidos na formação do leito e, consecutivamente, na diferença de pressão causada pelo reboco, foram realizados testes variando a fração mássica do sólido e fixando a viscosidade em 20 cP e a granulometria da areia com tamanho característico igual a $268 \mu\text{m}$. A temperatura

do laboratório foi mantida em aproximadamente 25°C. As concentrações adotadas foram de 0,05, 0,10 e 0,15% em massa. A queda de pressão, vazão e altura do leito são registradas e discutidas.

4.2.1 Altura do leito

O leito de areia formado para o escoamento com diferentes concentrações é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Variação da altura do leito para diferentes concentrações mássicas de areia.
Fonte: Autor (2021).

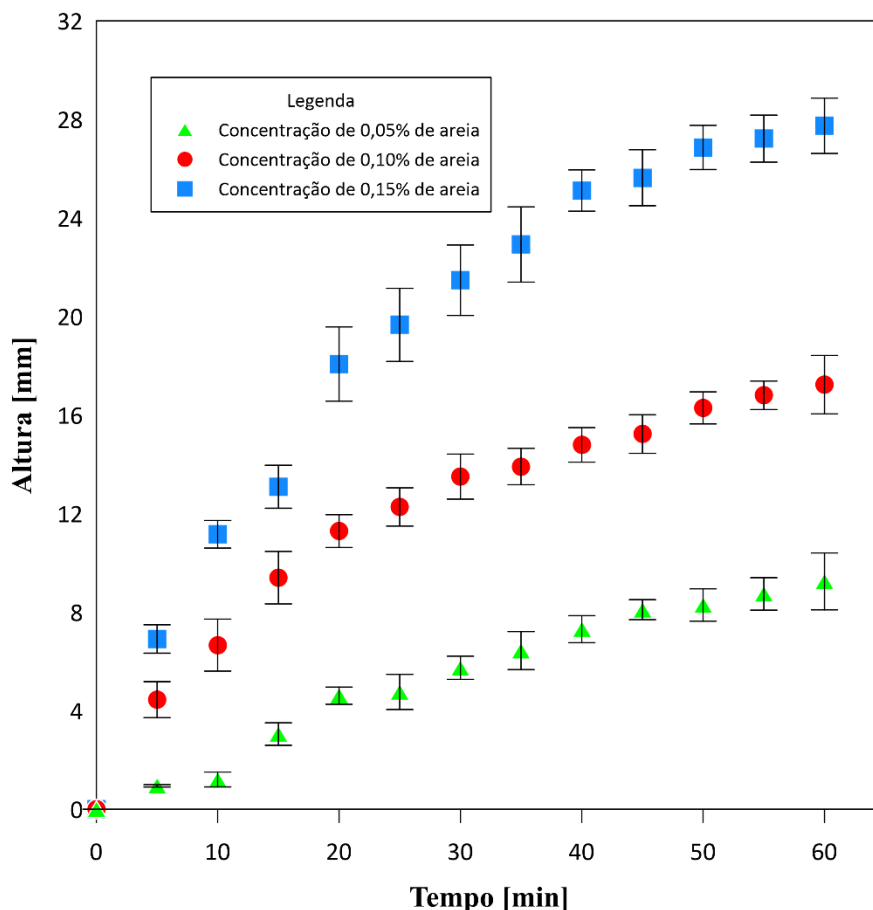


Os testes mostram que quanto maior a concentração de areia no escoamento, mais rapidamente o leito se forma sobre a tela. Na Figura 15 é apresentada a altura do leito formado ao longo do experimento para todas as concentrações testadas. A

altura de leito influencia na filtração de superfície, como será discutido na seção 4.2.2.

Figura 15 – Gráfico da altura do leito formado ao longo dos testes para diferentes concentrações mássicas.

Fonte: Autor (2021).



Como esperado, o leito de areia é maior para as soluções mais concentradas, chegando a 27,7 mm para o escoamento com 0,15% de areia e apenas 9,3 mm para o escoamento com 0,05%. O aumento da altura do leito provoca uma restrição ao escoamento elevando a queda de pressão e reduzindo a vazão como será discutido a seguir.

4.2.2 Queda de pressão

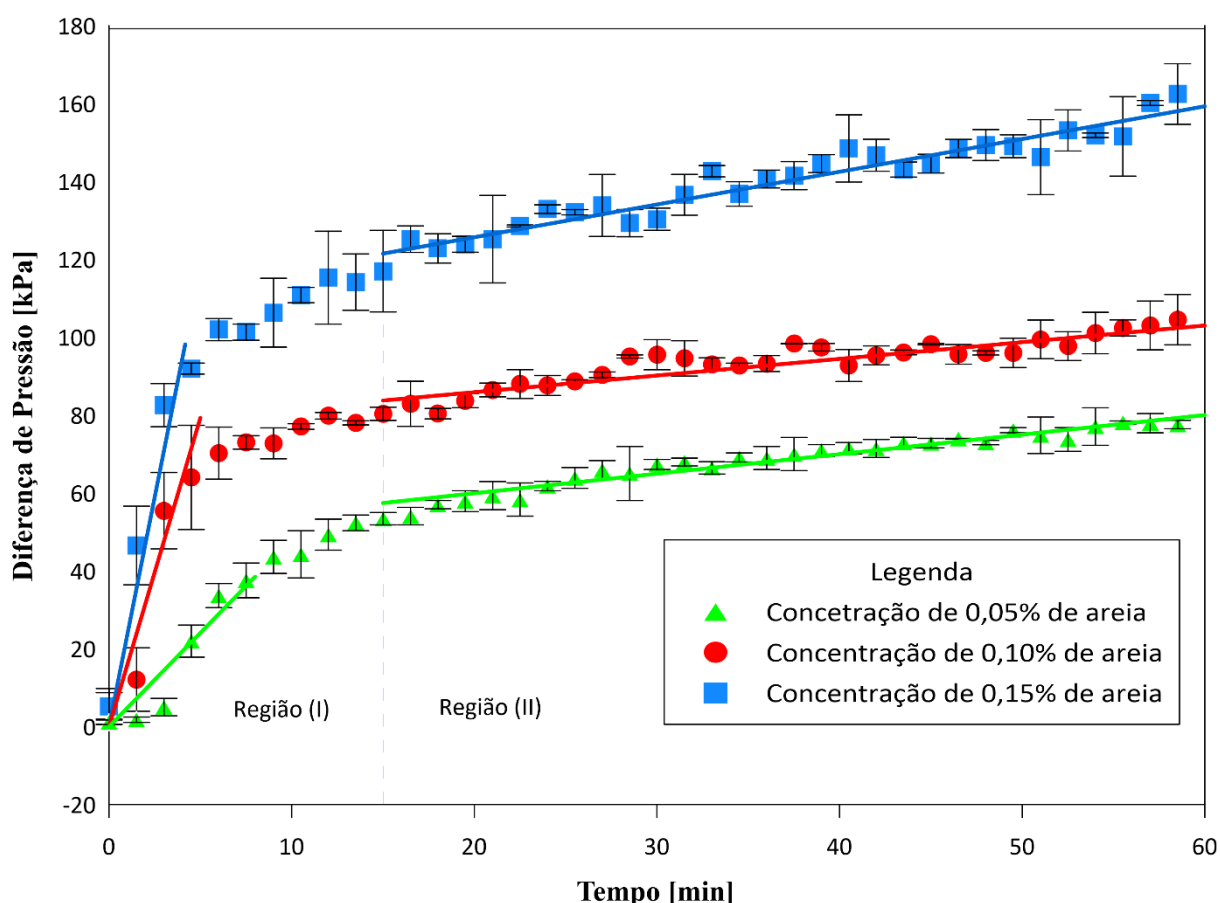
A queda de pressão foi medida com auxílio dos transmissores de pressão instalados a montante e a jusante da seção de testes. Os resultados são apresentados na Figura 16. A partir do instante em que a areia é adicionada ao

escoamento, a queda de pressão medida aumenta significativamente. Em apenas 15 minutos, a queda de pressão atinge valores de 120 kPa para o escoamento com 0,15% de areia, 80 kPa para o escoamento contendo 0,10% e 55 kPa para o escoamento contendo 0,05%. Neste período de tempo, denominado Região (I) na Figura 16, está ocorrendo a filtração em profundidade. Como a tela *premium* possui uma tela do tipo malha, os grãos de areia com menor granulometria adentram o elemento filtrante, e ficam aderidos em seu interior, restringindo a passagem do fluido. Neste momento, possivelmente são formadas pontes de areia, tanto no interior da tela como na superfície, estas formações também reduzem a passagem livre da malha, isto acarreta a redução da permeabilidade da tela.

Figura 16 – Queda de pressão para diferentes concentrações de areia.

Viscosidade 20 cP. Granulometria $d' = 268 \mu\text{m}$.

Fonte: Autor (2021).



Na Região (II) da Figura 16, o sistema assume comportamento mais linear e a queda de pressão continua aumentando, porém de forma menos acentuada e aproximadamente linear. Desde os 15 minutos de teste até os 60 minutos quando

o experimento é encerrado, é observado um aumento de apenas 40 kPa para o escoamento contendo 0,15% de areia, passando de 120 para 160 kPa, um incremento de 25 kPa para o escoamento contendo 0,10% de areia, passando de 80 para 105 kPa e um incremento de 25 kPa para o escoamento com 0,05% de areia chegando a 80 kPa. Nesta fase, denominada Região (II) na Figura 16, devido ao comportamento da curva da queda de pressão, acredita-se que esteja ocorrendo apenas os efeitos da filtração de superfície como descrito por Rocha (2010) e Koch e Krammer (2008). Os sólidos depositam-se na superfície da tela e formam um leito de areia e no momento em que toda a superfície da tela está coberta e a torta formada possui uma estrutura tal que, as partículas não chegam mais até a tela, o leito de areia formado que passa a exercer a função de elemento filtrante, retendo as partículas que chegam à seção de testes e a tela funciona apenas como suporte para o meio poroso. Por esse motivo, o crescimento da queda de pressão é linear e depende apenas da altura do leito formado. Os resultados de queda de pressão tem, qualitativamente, comportamento similar aos observados por Wu e colaboradores (2016), Larsen e colaboradores (2012) e Koch e Krammer (2008).

Na Figura 16, é possível observar que quanto maior a concentração de sólidos no escoamento, maiores são os valores de queda de pressão observados. Isso ocorre pois, com uma concentração maior de partículas no escoamento, uma quantidade maior de sólidos consegue adentrar a malha da tela na Região (I) antes que esta fique completamente coberta pelo leito e este tenha uma estrutura tal que não permita a passagem de sólidos até a tela, ou seja, devido a filtração de profundidade a tela fica mais obstruída. Apesar de não possuir um ajuste com alto índice de correlação, uma reta pode ser aproximada na Região (I) do escoamento na Figura 16 para observar, apenas qualitativamente, a diferença na inclinação do aumento da queda de pressão. É possível perceber que, a inclinação da reta de ajuste para o escoamento contendo 0,15% em massa de areia é mais acentuada que para 0,10% de areia, da mesma forma que 0,10% de areia é mais acentuada que para 0,05% de areia. Essa diferença de inclinação evidencia o aumento na restrição ao escoamento. É importante ressaltar que a formação da torta começa a ocorrer mesmo na fase de filtração em profundidade pois, uma parcela da areia fica retida na superfície por exclusão de tamanho ou até mesmo pela formação das pontes de areia na superfície da tela.

Uma vez estruturado o leito de areia, observa-se apenas a filtração de superfície. Com base nas equações das curvas de ajuste da queda de pressão no regime de filtração de superfície registradas na Tabela 3 é possível perceber a influência do crescimento do leito na queda de pressão medida. Quanto maior a concentração de areia no escoamento, maior a inclinação da curva de queda de pressão (ΔP) em função do tempo (t).

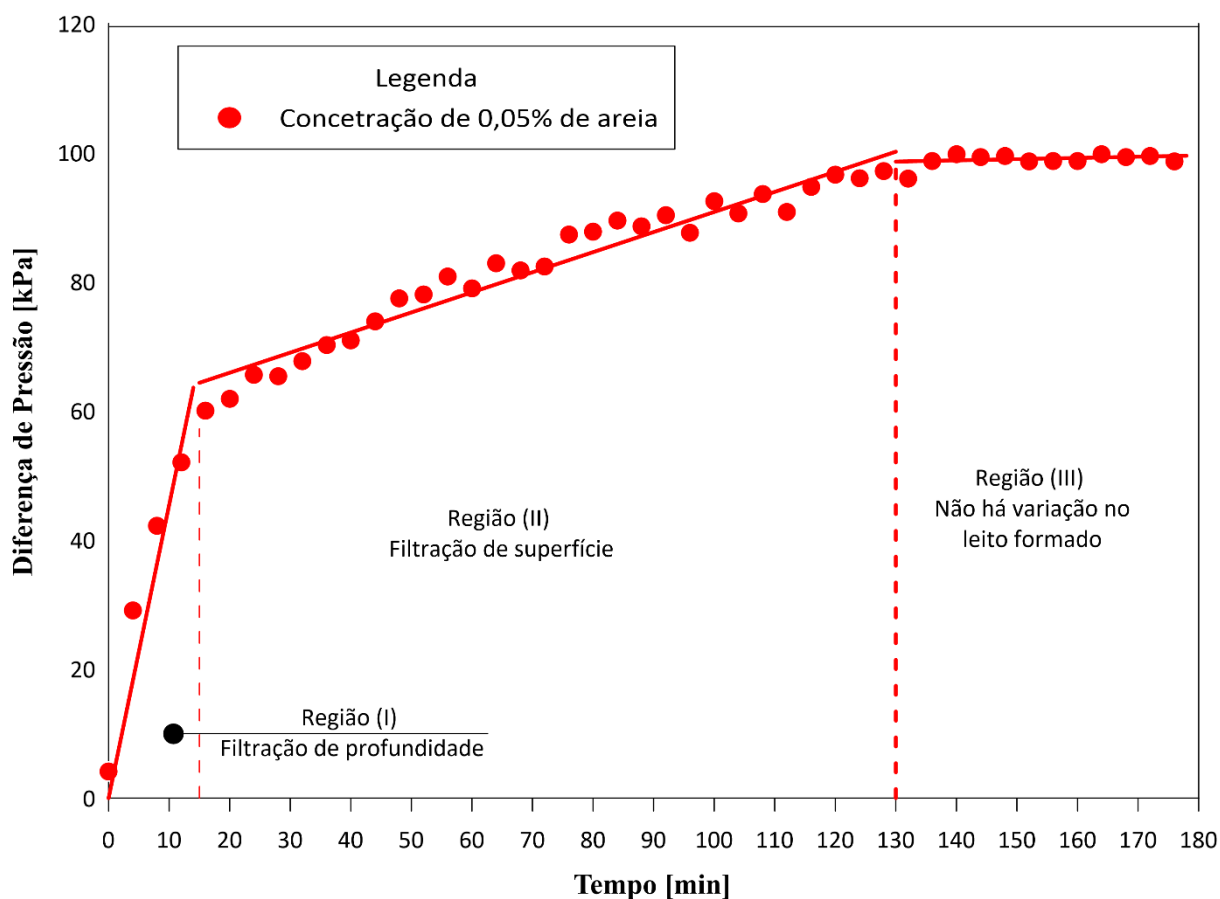
Tabela 3 - Equação das curvas de ajuste da queda de pressão para escoamentos com concentrações diferentes na região de filtração de superfície.

| | Equação |
|----------------|-----------------------------|
| 0,05% de areia | $\Delta P = 0,389t + 54,5$ |
| 0,10% de areia | $\Delta P = 0,428t + 75,1$ |
| 0,15% de areia | $\Delta P = 0,841t + 106,7$ |

Foi realizado um teste qualitativo com o intuito de verificar o comportamento do experimento por um tempo prolongado. O resultado do teste está apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Comportamento da queda de pressão para escoamento contendo 0,05% de concentração mássica de areia por tempo prolongado.

Fonte: Autor (2021).

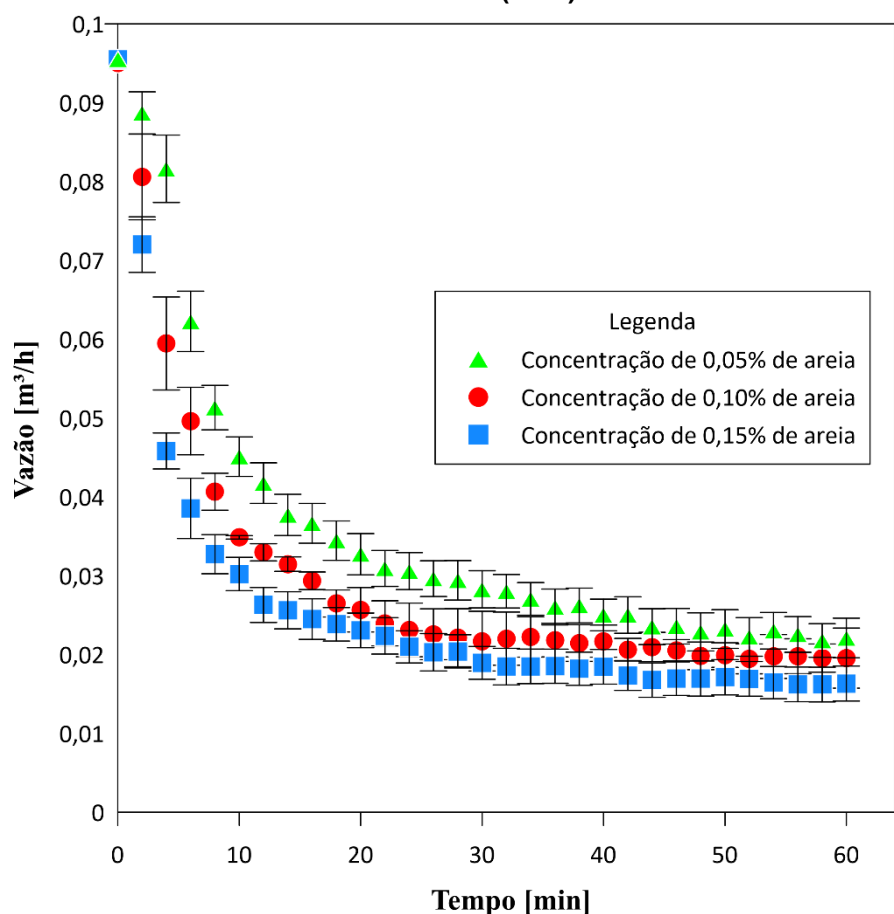


O resultado apresentado na Figura 17 mostra que o comportamento da queda de pressão se mantém até o momento em que os sólidos se esgotam no escoamento. Quando isso ocorre, o leito de areia para de aumentar de tamanho e a queda de pressão assume valores assintóticos. Esta região em que não há mais a formação do leito de areia não é de interesse deste estudo, visto que os fenômenos de filtração de superfície e profundidade, velocidade de formação do leito e a resistência que esse leito oferece estão todos contidos nas Regiões (I) e (II).

4.2.3 Vazão

Em resposta ao aumento da restrição ao escoamento observada na queda de pressão, a bomba que possui controle do tipo *by pass - demand*, reduz a vazão recirculando o fluido internamente nas câmaras de bombeamento. Os valores da vazão medida são registrados na Figura 18.

Figura 18 – Vazão medida para escoamento com diferentes concentrações de areia.
Fonte: Autor (2021).



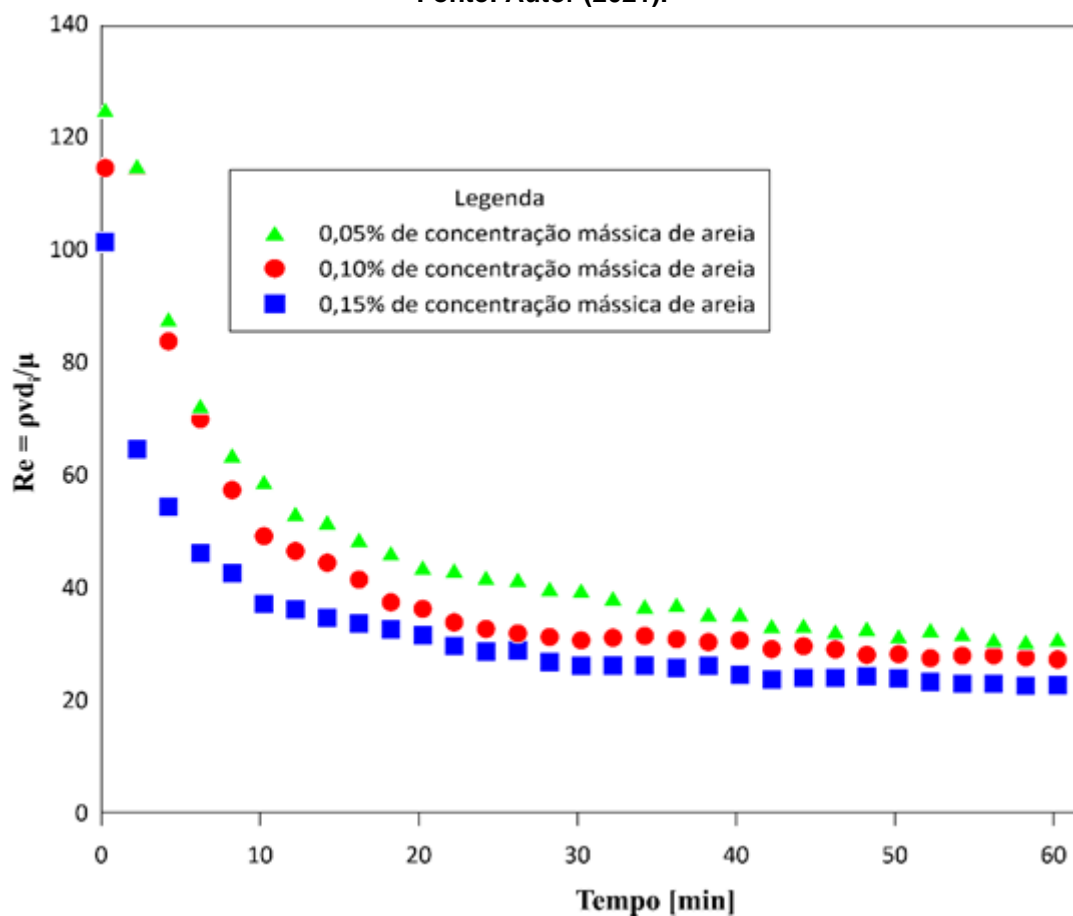
A partir dos dados apresentados na Figura 18 é possível verificar que, nos primeiros 15 minutos, quando ocorre a filtração de profundidade, ocorre uma redução significativa da vazão, passando de 0,095 m³/h no início dos experimentos para todas as concentrações testadas para 0,025 m³/h para o escoamento contendo 0,15% de areia, 0,030 m³/h para o escoamento com 0,10% e 0,380 m³/h para o escoamento com 0,05% de areia. Passada esta etapa, a vazão tende a reduzir e apresentar tendência mais linear e redução menos acentuada. Para o escoamento com 0,15% a vazão reduz 0,007 m³/h nos últimos 45 minutos de teste, para o escoamento com 0,10% a redução foi de 0,010 m³/h e para o escoamento que continha 0,05% a vazão caiu 0,013 m³/h. Este comportamento da vazão é similar aos registrados por Hodge e colaboradores (2002) em seus experimentos, o autor destaca que a redução da permeabilidade da tela nos primeiros instantes do escoamento provoca a redução abrupta na vazão medida. Quanto maior a restrição ao escoamento, menor a vazão observada, ou seja, quanto maior a queda de pressão, menor a vazão.

4.2.4 Permeabilidade

Para todos os testes, o número de Reynolds foi calculado a fim de verificar a relevância das forças inerciais em relação as forças viscosas no escoamento. O coeficiente é calculado em função da vazão medida ao longo dos 60 minutos de teste e os resultados são apresentados na Figura 19, Como é possível observar, apesar de poder considerar que o escoamento ocorre em regime laminar, os valores das forças inerciais não podem ser desprezados, visto que Reynolds está entre 20 e 140 em todos os testes realizados. Assim, para a avaliação da permeabilidade no escoamento, a equação proposta por Forchheimer é mais indicada.

Figura 19 - Número de Reynolds ao longo dos experimentos com diferentes concentrações mássicas de areia

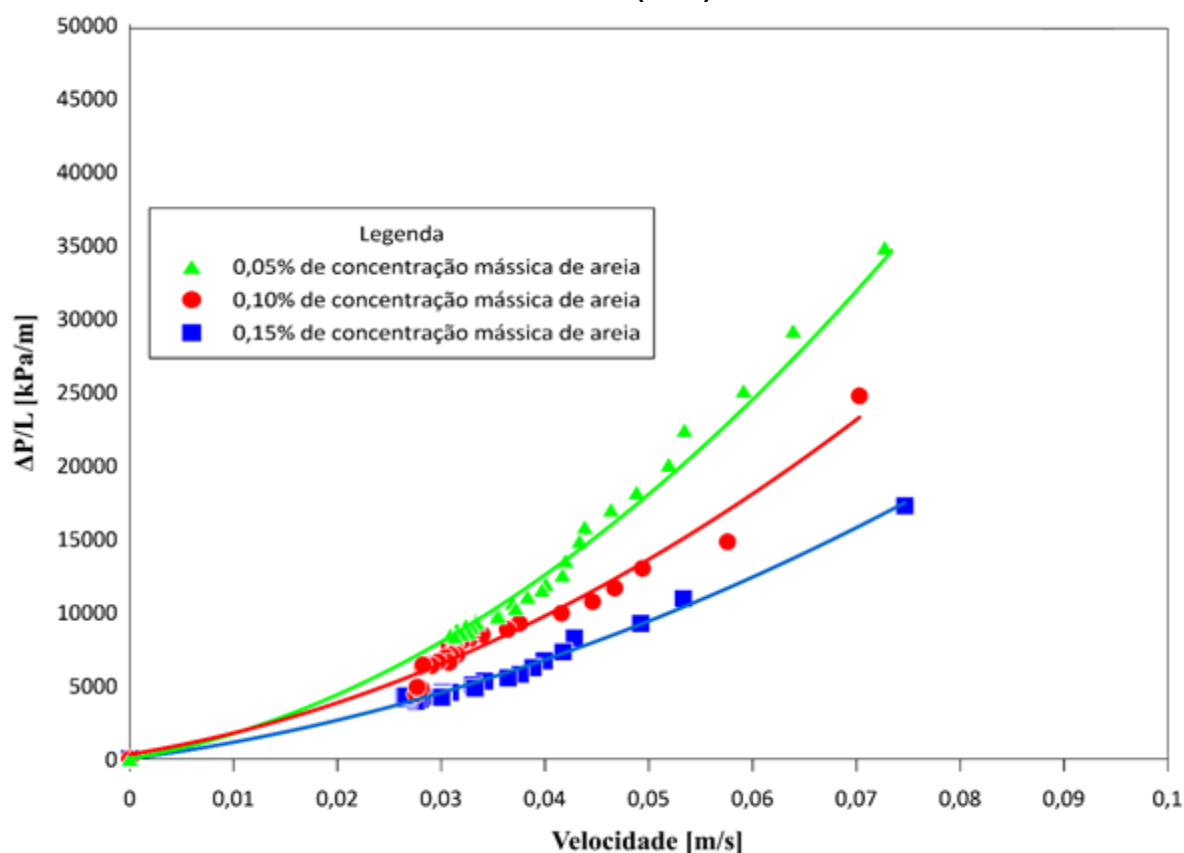
Fonte: Autor (2021).



O gradiente de pressão é função da velocidade, segundo a equação proposta por Darcy e posteriormente adaptada por Forchheimer. Assim, em posse dos valores de vazão, queda de pressão e altura do leito de areia formado é possível imprimir graficamente esta relação e, a partir dela, extrair os valores das constantes de permeabilidade. Na Figura 20 são apresentados os valores do gradiente de pressão em função da velocidade no escoamento.

Figura 20 - Gradiente de pressão em função da velocidade para escoamento com diferentes concentrações mássicas de areia.

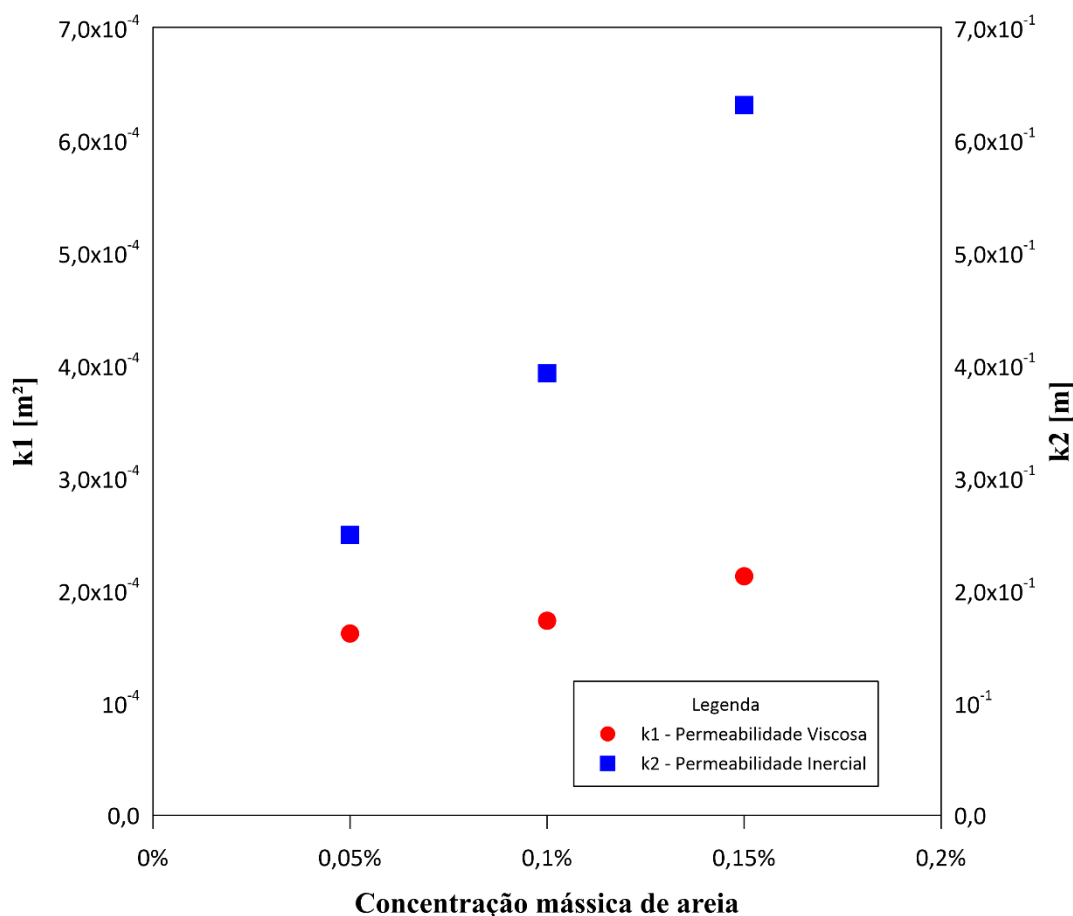
Fonte: Autor (2021).



As curvas de ajuste são equações de segundo grau. Os coeficientes de primeira e segunda ordem das equações de ajuste representam, respectivamente, os termos μ/k_1 e p/k_2 na equação proposta por Forchheimer. Como a viscosidade do fluido e o peso específico são conhecidos, a saber 20 cP e 1177,5 kg/m³ respectivamente, os valores de k_1 e k_2 foram calculados e estão apresentados na Figura 21.

Figura 21 - Valores das constantes de permeabilidade viscosa (k_1) e inercial (k_2) para escoamento com diferentes concentrações mássicas de areia.

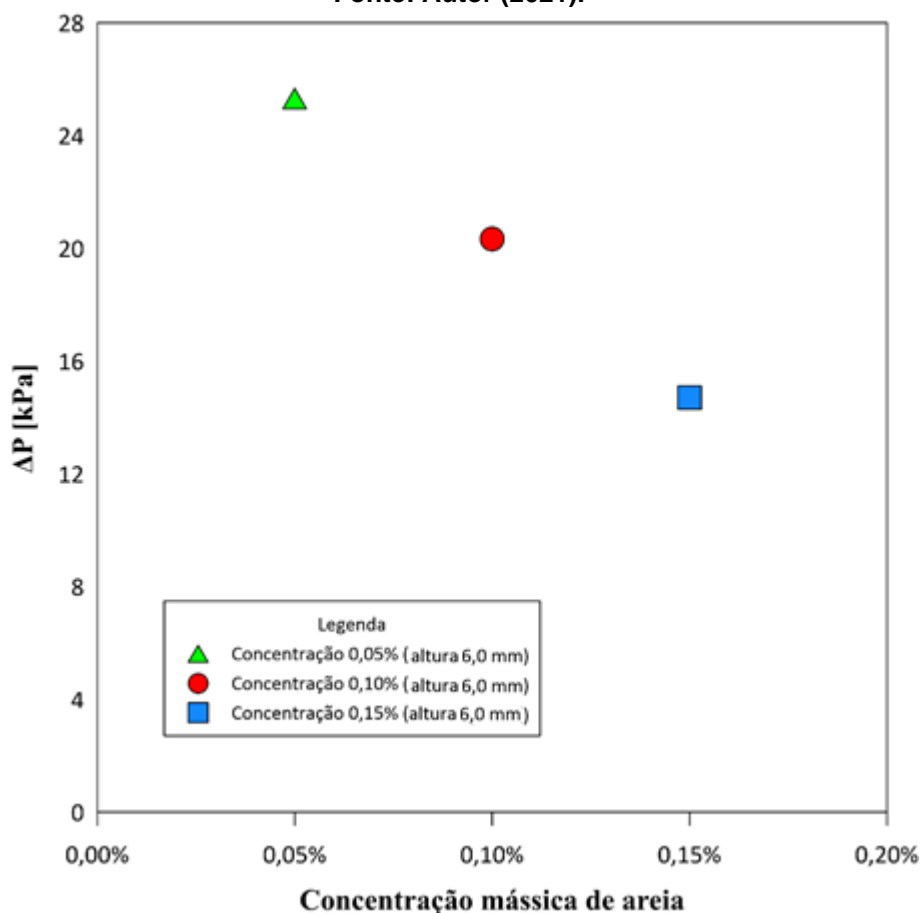
Fonte: Autor (2021).



Os resultados apresentados na Figura 21 mostram que o leito de areia formado por escoamento com concentrações menores possuem permeabilidade viscosa (k_1) menor quando comparados a escoamentos mais concentrados. Essa propriedade depende da estrutura do leito poroso, ou seja, é função do atrito entre o fluido e a estrutura porosa, assim, é possível dizer que o leito de areia formado pelo escoamento com concentração mássica de 0,05% de areia possui uma estrutura tal que, propicia o maior contato entre o fluido e o meio. Isso ocorre, pois, o meio poroso formado possui uma menor quantidade de espaços vazios, possivelmente devido à acomodação dos sólidos durante a formação do leito, indicando que uma menor taxa de deposição origina leitos menos permeáveis. Isso fica evidente quando comparado a queda de pressão e a altura do leito formado na fase de filtração de superfície apresentados na Figura 22.

Figura 22 - Queda de pressão para leitos de areia de mesma altura formados por escoamentos de diferentes concentrações.

Fonte: Autor (2021).



Os resultados apresentados na Figura 22 levam em consideração apenas a fase de filtração de superfície, ou seja, é apresentada apenas o incremento de queda de pressão desde os 15 minutos de teste, quando o sistema entra na Região (II) até o leito atingir aproximadamente 6,0 mm. Como na região (II) não ocorre mais a filtração de profundidade, o incremento na queda de pressão depende apenas do leito formado nesse intervalo. Os resultados mostram que o leito formado nessa região pelo escoamento com 0,05% de areia em massa exerce uma resistência que causa uma queda de pressão até 10 kPa maior que o escoamento com 0,15% de areia. Essa diferença é um indicativo que o leito formado pelo escoamento menos concentrado é menos permeável que o leito formado pelo escoamento mais concentrado.

A permeabilidade inercial (k_2) observada na Figura 21 é menor quanto menor a concentração mássica. Esta diferença está relacionada a diferença nos efeitos

inerciais presentes no escoamento. Durante todo o teste, os valores do número de Reynolds calculado para o escoamento contendo 0,05% de areia é maior que o calculado para 0,10% de areia que, por sua vez, é maior que para 0,15% de areia. Outro fator de influência na permeabilidade inercial é a tortuosidade do leito formado, ou seja, o caminho que o fluido precisa percorrer para atravessar o meio poroso. Com uma velocidade de deposição menor, o leito formado pelo escoamento com 0,05% de concentração mássica de areia possivelmente acomoda melhor as partículas, estreitando essa passagem e criando caminhos menos retilíneos e mais tortuosos, tornando mais difícil a transposição através dele quando comparado ao leito formado por 0,10%, que por sua vez, também é menos permeável que o leito formado por 0,15%.

4.3 EFEITO DA VISCOSIDADE SOBRE O PROCESSO DE CONTENÇÃO DE AREIA

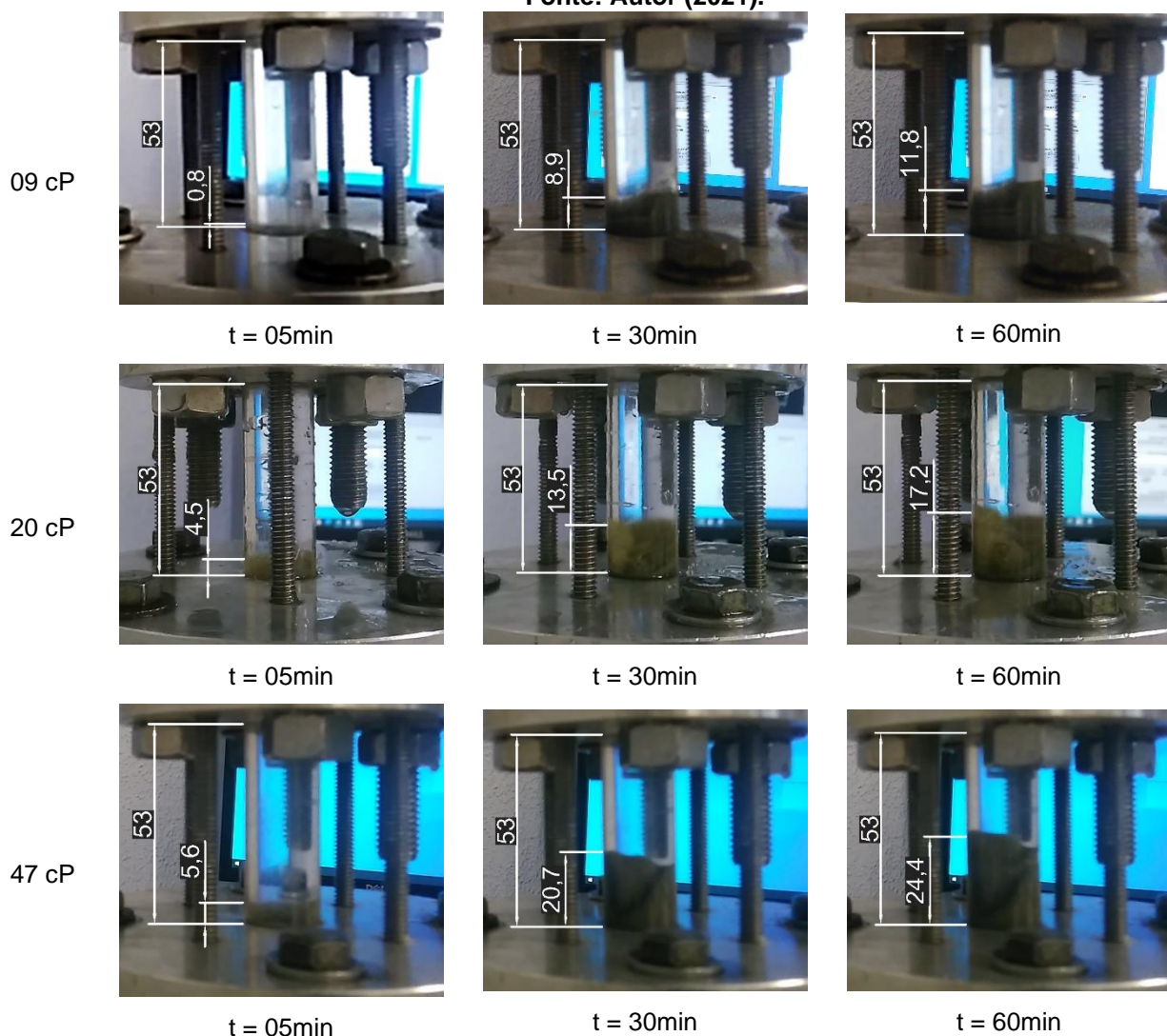
Para verificar a influência da viscosidade no processo de formação do leito e, consecutivamente na diferença de pressão causada, foram realizados testes com soluções de glicerina aquosa de diferentes viscosidades, fixando os demais parâmetros do escoamento, a saber, a concentração mássica de sólidos em 0,10% granulometria da areia utilizada com tamanho característico igual a 268 μm . As viscosidades utilizadas foram de 9, 20 e 47 cP.

4.3.1 Altura do leito

A coluna de areia formada para o escoamento com diferentes viscosidades é apresentada na Figura 23. Os resultados mostram que quanto maior a viscosidade do fluido de transporte, maior a quantidade de sólidos carregados no escoamento e, consecutivamente, maior a coluna de areia formada. Nos testes realizados, o escoamento com viscosidade igual a 47 cP formou um leito de 24,4 mm ao final dos 60 minutos de experimento, enquanto o com 9 cP formou um leito de apenas 11,8 cm no mesmo período de tempo.

Figura 23 - Variação da altura do leito para soluções com diferentes viscosidades.

Fonte: Autor (2021).

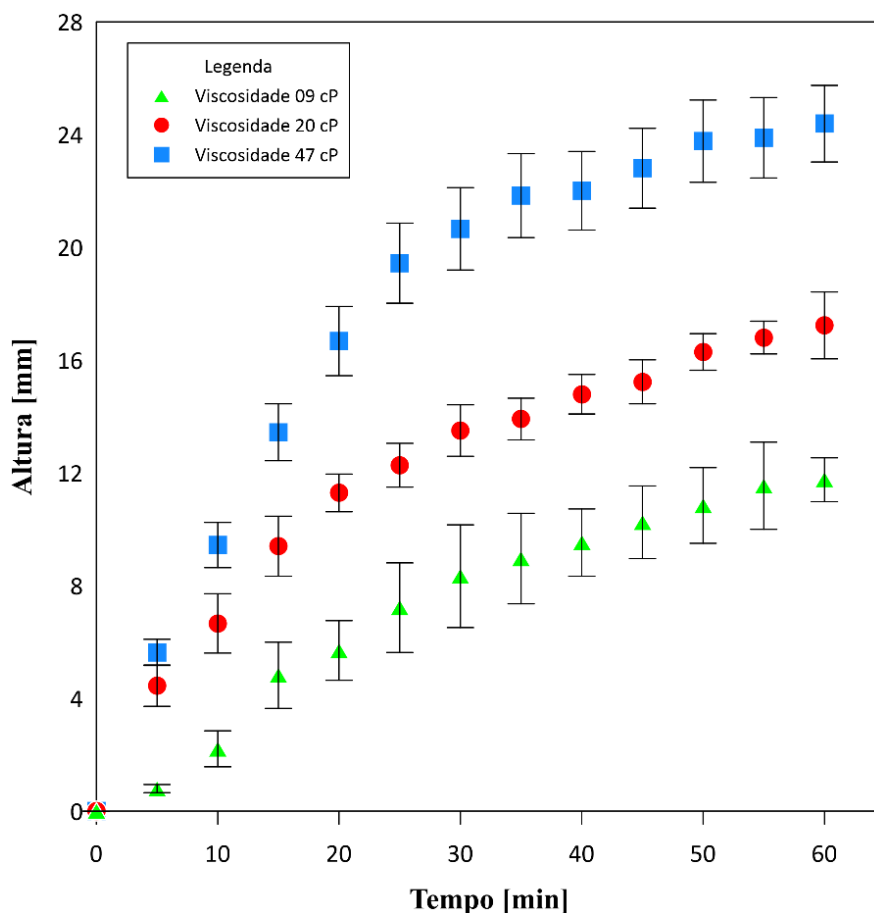


Na Figura 23 é possível perceber que fluidos mais viscosos possuem uma capacidade maior de transportar as partículas sólidas. O incremento da altura do leito em função do tempo exibida graficamente na

Figura 24.

Figura 24 – Gráfico da altura do leito formado para escoamento com diferentes viscosidades.

Fonte: Autor (2021).



Na

Figura 24 é possível observar a influência da viscosidade no transporte dos sólidos e, consecutivamente na formação do leito. Quanto maior a viscosidade, mais sólidos são transportados até a seção de testes. Este resultado está de acordo com o previsto por Yao (1970) e testado por Changyin e colaboradores. (2019), além de reforçar a recomendação de Ballard (1999) a respeito da importância da utilização de um viscosificante no fluido de transporte. Quanto maior o leito de areia formado, maior será a queda de pressão durante a filtração de superfície como será discutido na seção 4.3.2.

4.3.2 Queda de pressão

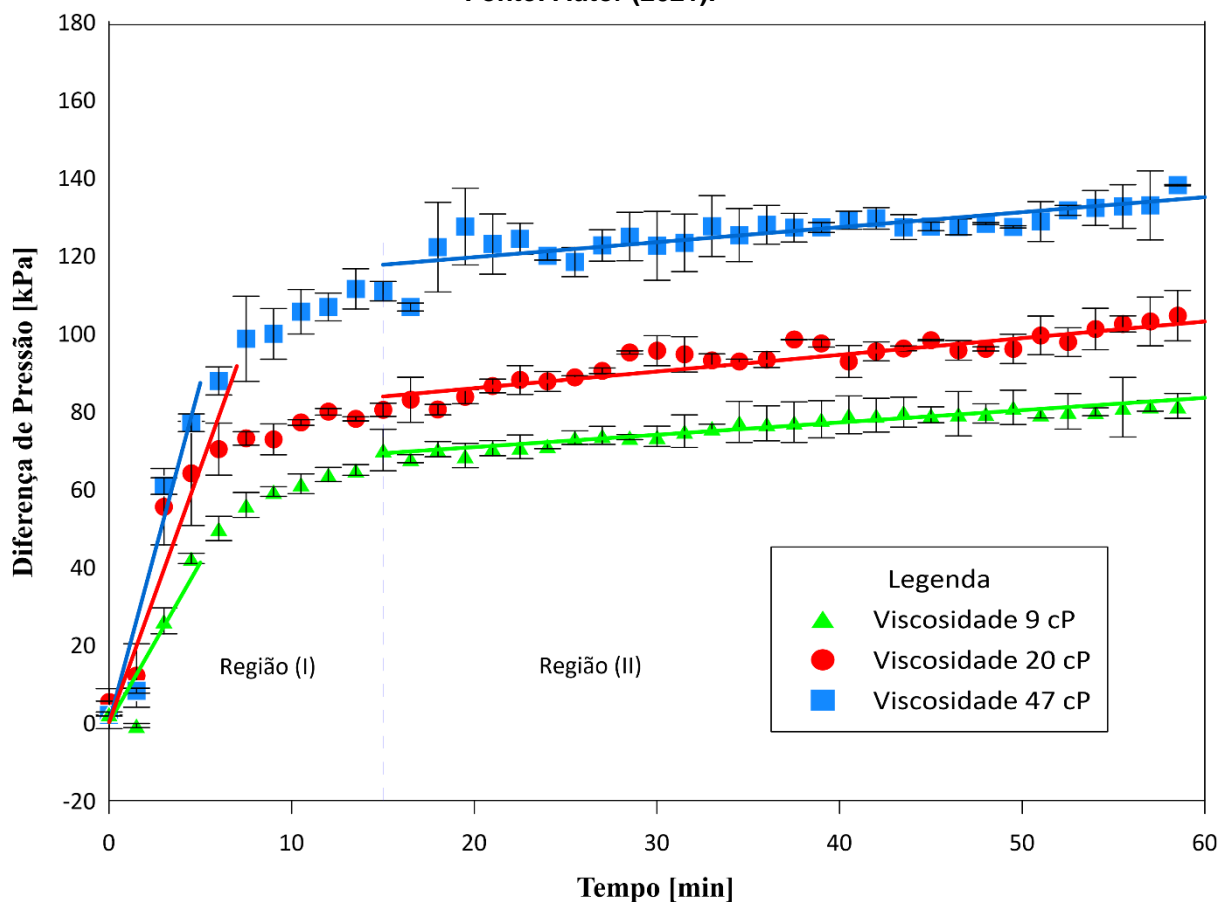
A queda de pressão medida nos transmissores de pressão está registrada na Figura 25. Novamente, é possível verificar a influência da filtração de profundidade nos

primeiros 15 minutos do escoamento. A pressão cresce rapidamente em função da redução da permeabilidade do elemento filtrante, devido às partículas que ficam presas no interior da malha. Neste intervalo de tempo, para o escoamento com 47 cP, a queda de pressão é 1,4 vezes maior que a queda de pressão para 20 cP, que por sua vez é apenas 1,2 vezes maior que para 9 cP.

Figura 25 - Aumento da queda de pressão através da seção de teste para diferentes viscosidades.

Concentração 0,10%. Granulometria $d' = 268 \mu\text{m}$.

Fonte: Autor (2021).



Também é possível observar na Figura 25, que quanto maior a viscosidade do fluido de transporte, maiores são os valores de queda de pressão observados. Ao fim dos 60 minutos de teste, a queda de pressão observada para o escoamento com viscosidade igual a 47 cP é de cerca de 140 kPa, aproximadamente 40 kPa acima da queda de pressão medida para 20 cP, que por sua vez é 20 kPa superior à de 9 cP. Isso ocorre, pois, soluções mais viscosas possuem a capacidade de carregar uma quantidade maior de partículas como descrito por YAO (1970) e testado por Changyin e colaboradores (2019). Assim uma maior quantidade de partículas chega

até a seção de testes e fica retida no interior da tela por filtração de profundidade antes da formação da torta cobrir toda a superfície. Novamente, uma reta pode ser aproximada na Região (I) do escoamento na Figura 25, apenas com o intuito de avaliar qualitativamente a diferença na inclinação do aumento da queda de pressão. Fica evidenciado que, para o escoamento com maior viscosidade (47 cP), a queda de pressão acontece de forma mais rápida, indicando a maior taxa de filtração em profundidade das partículas.

Como viscosidades maiores transportam uma quantidade maior de areia, o crescimento do leito formado pelo escoamento com 47 cP é maior que o escoamento com 20 cP e 9 cP, assim, a queda de pressão na Região (II) que representa a filtração de superfície cresce mais rapidamente para o escoamento mais viscoso. Este aumento da queda de pressão pode ser quantificado pelas equações das curvas de ajuste no regime de filtração de superfície registradas na Tabela 4. Nela é possível perceber que, quanto maior a viscosidade do fluido de transporte, maior a inclinação da curva de queda de pressão.

Tabela 4 - Equação das curvas de ajuste da queda de pressão para escoamentos com viscosidades diferentes na região de filtração de superfície.

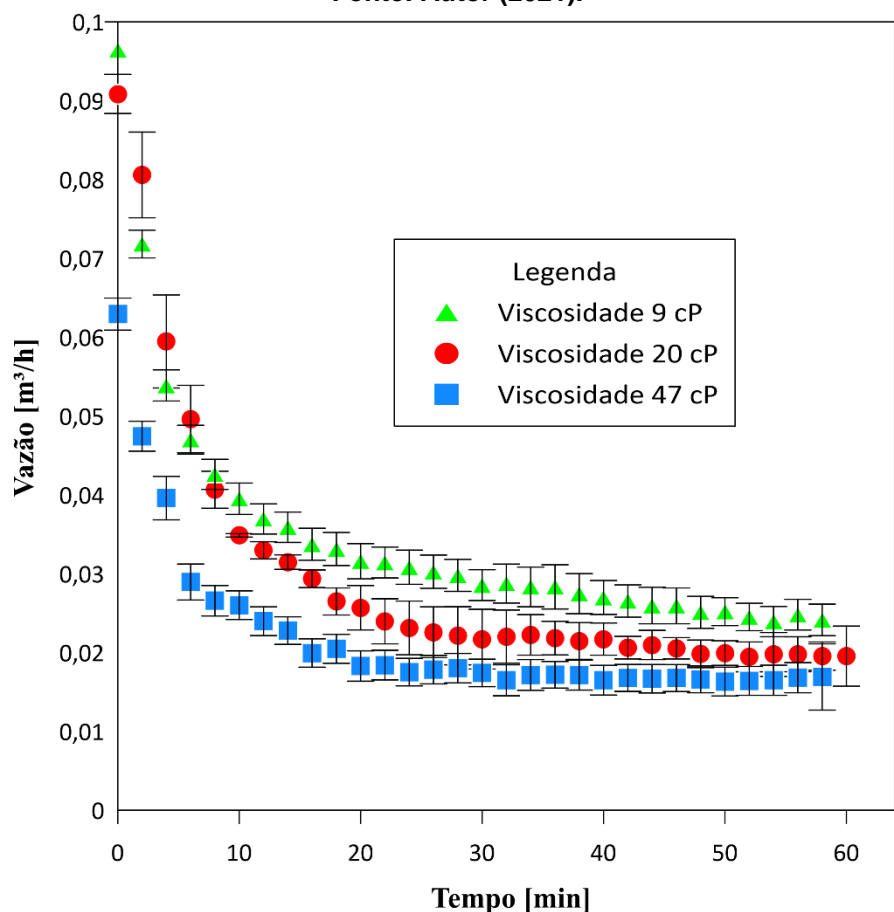
| | Equação |
|-------|-----------------------------|
| 09 cP | $\Delta P = 0,292t + 64,6$ |
| 20 cP | $\Delta P = 0,411t + 75,1$ |
| 47 cP | $\Delta P = 0,428t + 115,0$ |

4.3.3 Vazão

Durante a execução dos testes, a vazão foi medida e o resultado está registrado na Figura 26.

Figura 26 – Vazão medida para escoamento com diferentes viscosidades.

Fonte: Autor (2021).

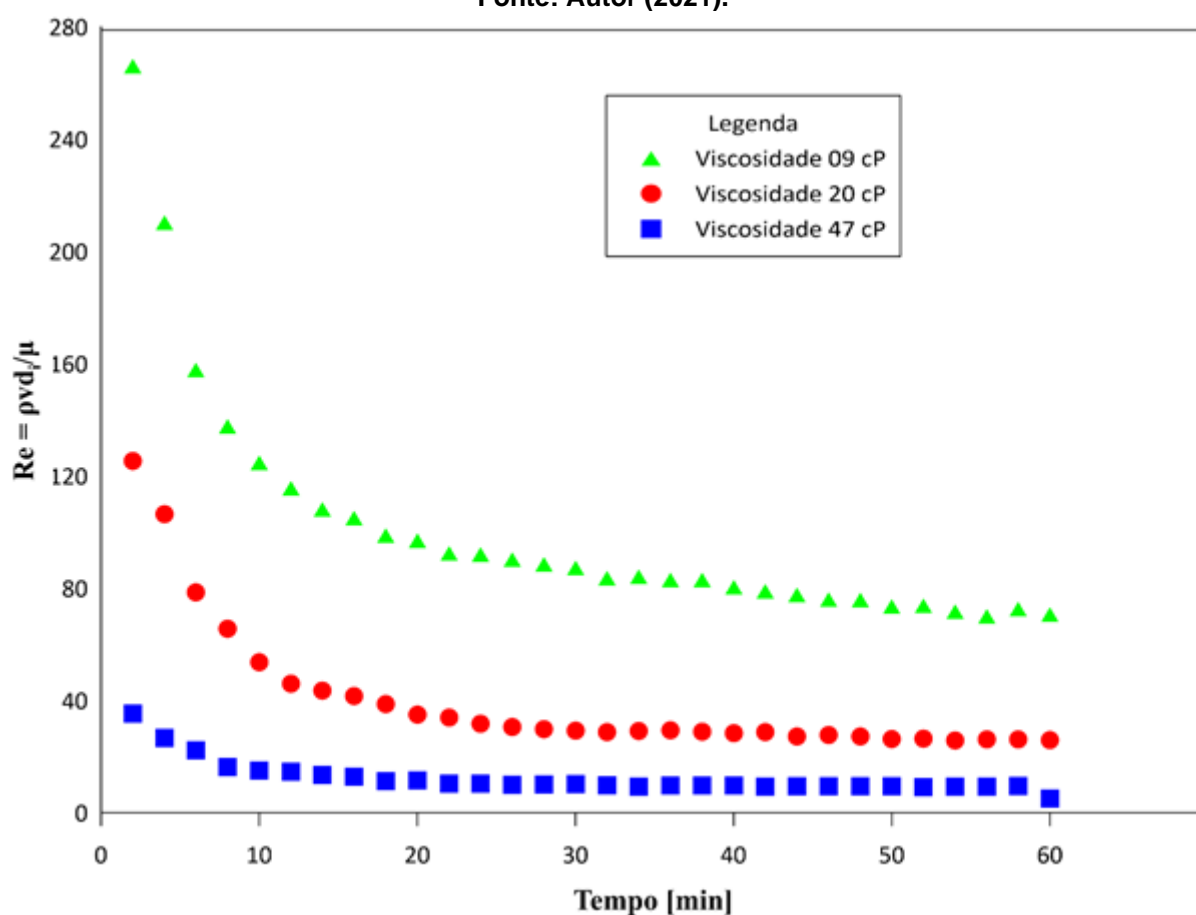


O comportamento da vazão apresentado na Figura 26 mostra novamente uma queda substancial na vazão até aproximadamente 15 minutos do escoamento para todas as viscosidades testadas, passando de 0,062 para 0,022 m³/h para o escoamento mais viscoso e de 0,095 para 0,047 m³/h para o menos viscoso. Como destacado anteriormente, esta queda de vazão é atribuída a redução abrupta da área de passagem livre sobre a tela, que causa o aumento significativo da pressão. A bomba responde a esta restrição devido ao seu sistema de controle interno, fazendo com que a vazão reduza. Para os escoamentos com maior viscosidade, as vazões iniciais medidas são menores devido ao aumento da perda de carga imposto pela diferença de viscosidade.

4.3.4 Permeabilidade

Para todos os testes, o número de Reynolds foi calculado a fim de verificar a relevância das forças inerciais em relação as forças viscosas no escoamento. Os resultados são apresentados na Figura 27 e, como é possível observar, apesar de poder considerar que o escoamento ocorre em regime laminar, os valores das forças inerciais não podem ser desprezados, visto que Reynolds está entre 10 e 270 em todos os testes realizados. Assim, para a avaliação da permeabilidade no escoamento, a equação proposta por Forchheimer é mais indicada. Destaca-se também o fato de as forças inerciais serem mais expressivas no escoamento com viscosidade igual a 9 cP.

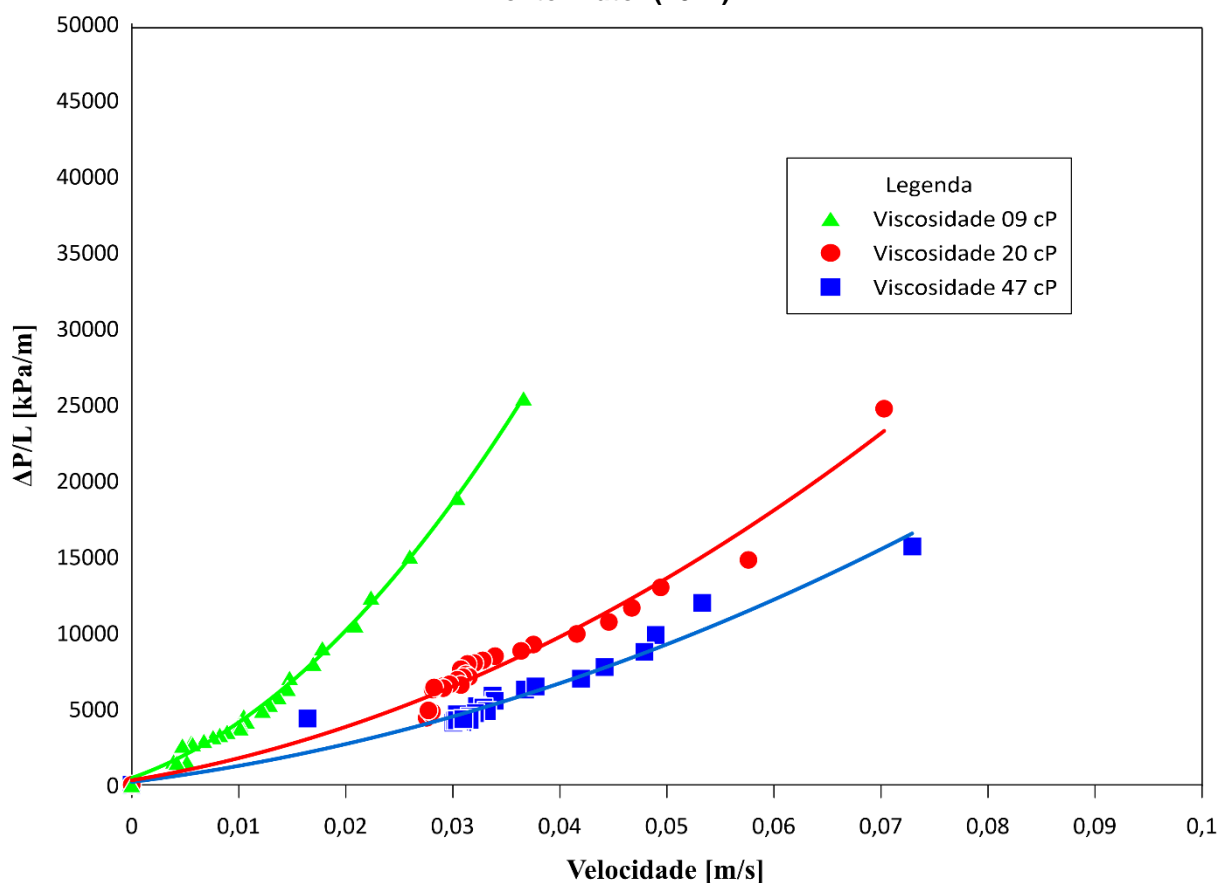
Figura 27 - Número de Reynolds ao longo dos experimentos com viscosidades diferentes.
Fonte: Autor (2021).



O gradiente de pressão é função da velocidade segundo a equação proposta por Darcy e posteriormente adaptada por Forchheimer, assim, em posse dos valores de vazão, queda de pressão e altura do leito de areia formado é possível imprimir graficamente esta relação e, a partir dela, extrair os valores das constantes de

permeabilidade. Na Figura 28 são apresentados os valores do gradiente de pressão em função da velocidade no escoamento.

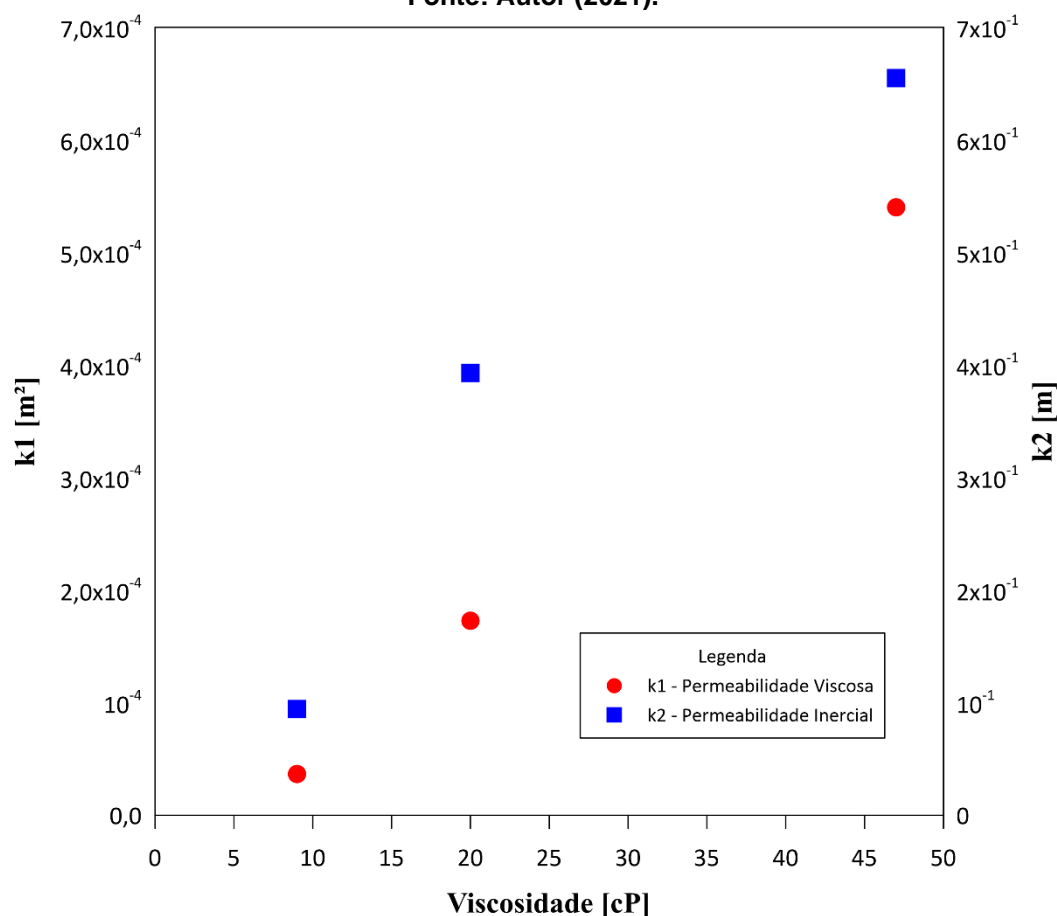
Figura 28 - Gradiente de pressão em função da velocidade para escoamento com diferentes viscosidades.
Fonte: Autor (2021).



Das curvas de ajuste apresentadas na Figura 28 é possível extrair a relação entre os coeficientes de permeabilidade. Os coeficientes de primeira e segunda ordem das equações de ajuste representam, respectivamente, os termos μ/k_1 e p/k_2 na equação proposta por Forchheimer. Como as viscosidades dos fluidos utilizados nos testes são 9, 20 e 47 cP, os pesos específicos são conhecidos e são 1125,75, 1177,45 e 1229,15 kg/m³ respectivamente, os valores de k_1 e k_2 foram calculados e estão apresentados na Figura 29.

Figura 29 - Valores das constantes de permeabilidade viscosa (k_1) e inercial (k_2) para escoamento com diferentes viscosidades.

Fonte: Autor (2021).

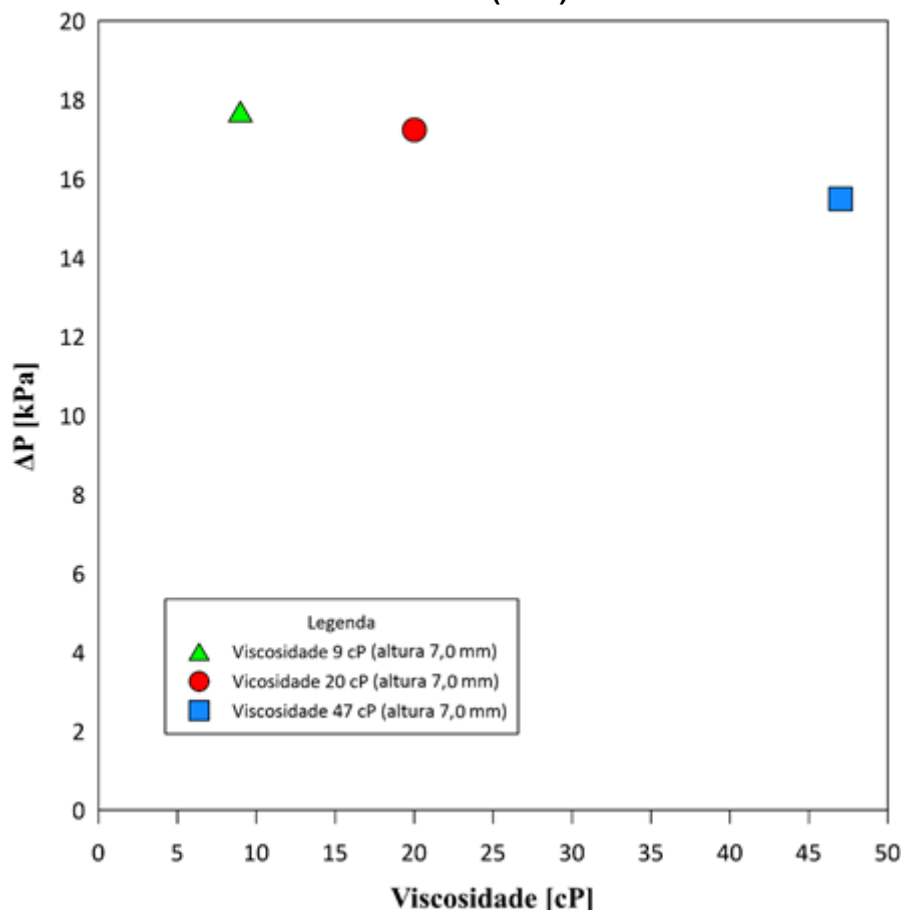


Os resultados apresentados na Figura 29 mostram que o leito de areia formado por escoamento com viscosidades menores possuem permeabilidade viscosa (k_1) menor quando comparados a escoamentos mais viscosos. Essa diferença fica evidente quando comparada a queda de pressão total e a altura do leito formado no final dos experimentos. Para o escoamento com maior viscosidade testada (47 cP) foi medida uma queda de pressão no final dos 60 minutos de teste 1,75 vezes maior que a queda de pressão total para o escoamento com menor viscosidade (9 cP), enquanto o leito formado para o escoamento mais viscoso foi cerca de 2,1 vezes maior que o leito formado para o teste com menor viscosidade, ou seja, a queda de pressão não teve um aumento tão pronunciado quanto à altura do leito. A permeabilidade viscosa (k_1) depende apenas da estrutura do leito, então, é possível afirmar que o leito formado pelo escoamento mais viscoso oferece uma resistência menor ao escoamento do que o leito formado pelo escoamento menos viscoso. Isso pode ser observado analisando a Figura 30, que apresenta a queda

de pressão para leitos de alturas similares na região de filtração de superfície.

Figura 30 - Queda de pressão para leitos de areia de mesma altura formados por escoamentos de diferentes viscosidades.

Fonte: Autor (2021).



Os resultados apresentados na Figura 30 levam em consideração apenas a fase de filtração de superfície, ou seja, é apresentada apenas o incremento de queda de pressão desde os 15 minutos de teste, quando o sistema entra na Região (II) até o leito atingir aproximadamente 7,0 mm. Como na região (II) não ocorre mais a filtração de profundidade, o incremento na queda de pressão depende apenas do leito formado nesse intervalo. O leito de areia formado pelo escoamento com fluido de transporte de viscosidade igual a 9 cP provoca uma queda de pressão que é 2 kPa superior ao leito formado pelo escoamento com 47 cP, novamente indicando que o leito formado pelo escoamento menos viscoso oferece uma resistência maior ao escoamento.

A permeabilidade inercial observada na Figura 29 para escoamentos com viscosidade igual a 9 cP é 4,17 vezes menor que a de 20 cP enquanto a de 20 cP

é apenas 1,67 vezes menor que a de 47 cP. Essa diferença é devido à forte influência das forças inerciais nos escoamentos menos viscosos, como fica evidente na diferença entre o número de Reynolds calculado e apresentado na Figura 27. Para o experimento realizado com viscosidade do fluido de transporte de 9 cP, o número de Reynolds é muito superior aos demais com valores até 7 vezes maiores ao do escoamento com 47 cP.

4.4 EFEITO DA GRANULOMETRIA NA CONTENÇÃO DE AREIA

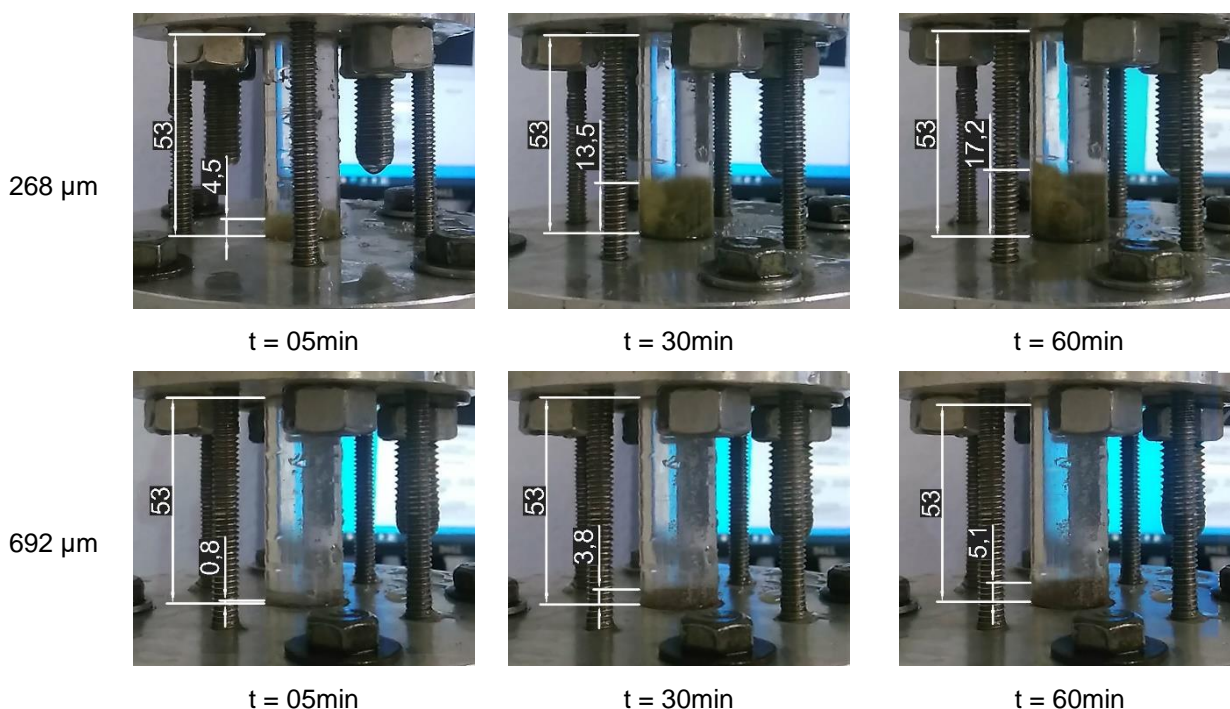
Para verificar a influência do tamanho do sólido na formação do leito e, consecutivamente na diferença de pressão, foram realizados testes utilizando duas areias com granulometrias distintas. Os demais parâmetros foram fixados, a saber, a viscosidade em 20 cP e a concentração mássica de sólidos em 0,10%. As areias utilizadas nos teste tinham tamanho característico igual a 268 e 692 μm .

4.4.1 Altura do leito

A coluna de areia formada nos testes é apresentada na Figura 31.

Figura 31 - Variação da altura do leito para soluções com areias de diferentes granulometrias.

Fonte: Autor (2021).

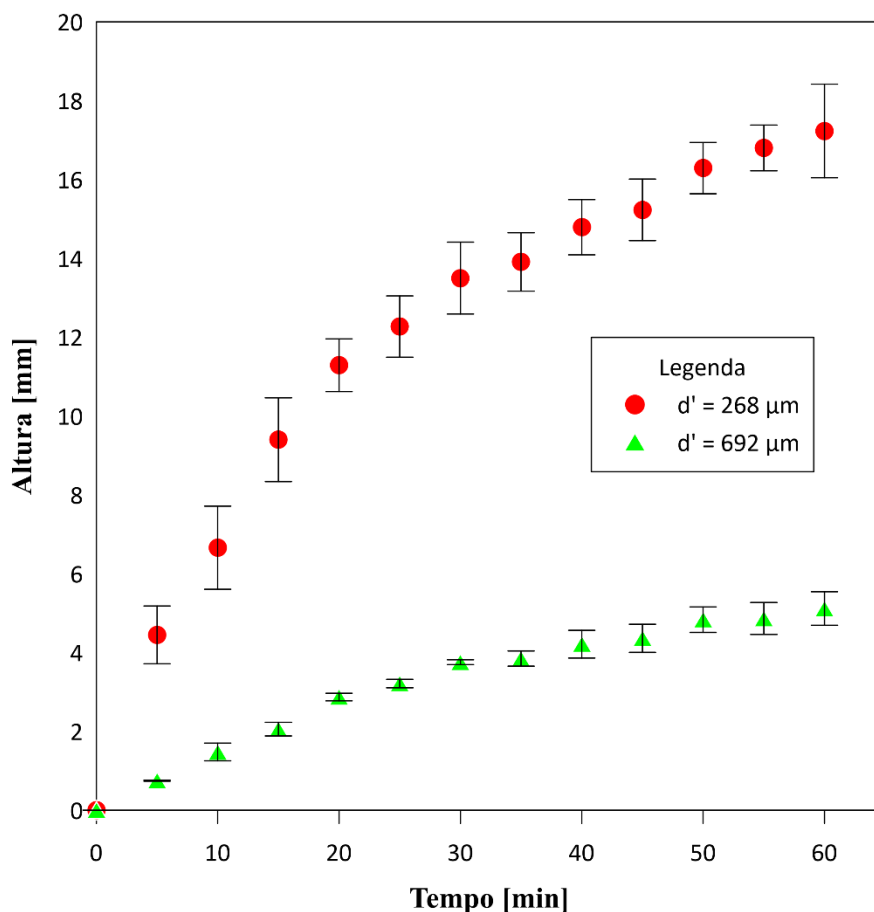


A menor deposição de areia na formação do leito leva à formação mais lenta da torta e, consecutivamente, uma inclinação menor da curva de ajuste na fase de

filtração de superfície para escoamentos com areia de maior granulometria. Os valores da altura do leito em função do tempo de experimento são registrados e exibidos na Figura 32.

Figura 32 – Gráfico da altura do leito formado para escoamento com diferentes granulometrias.

Fonte: Autor (2021).



Os resultados apresentados na Figura 32 mostram que, quanto maior a granulometria de areia na solução, menor a coluna de areia observada na seção de teste com altura máxima de 17,2 mm para o escoamento com areia de tamanho característico igual a 268 μm e apenas 5,1 mm para a areia com tamanho característico igual a 692 μm . Este fato é devido a massa dos grãos de areia com 692 μm ser maior que os de 268 μm , assim, o escoamento é capaz de carrear os sólidos a taxas menores. O aumento da altura do leito provoca uma restrição ao escoamento elevando a queda de pressão e reduzindo a vazão como será discutido a seguir.

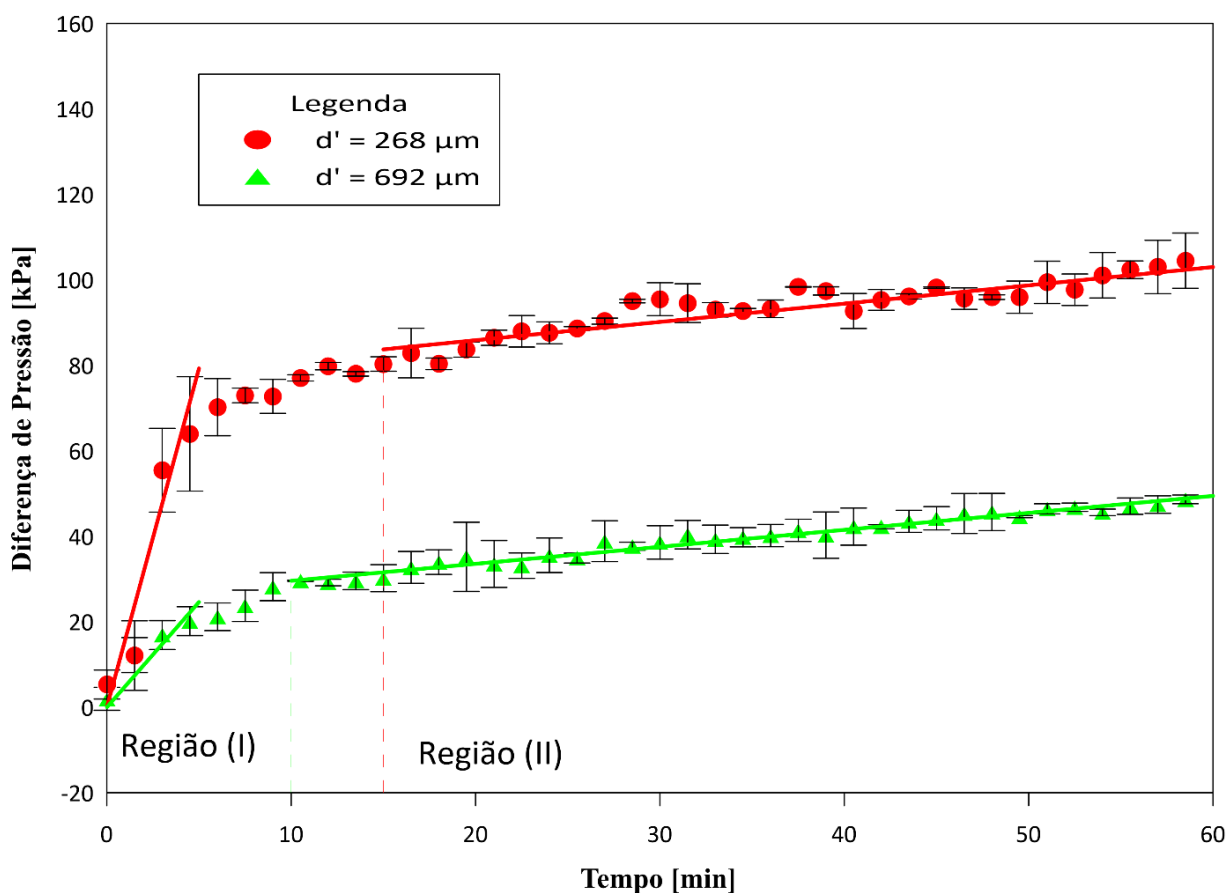
4.4.2 Queda de pressão

Em consenso com os resultados já apresentados, nos primeiros minutos do escoamento, denominado de Região (I) na Figura 33, é possível um significativo aumento na queda de pressão resultante da filtração de profundidade que tende a estabilizar e crescer de forma menos pronunciada e linear após este período. Contudo, durante a filtração de profundidade, a queda de pressão inicial para o escoamento com areia de tamanho característico igual a 268 μm é de 80 kPa enquanto a com escoamento com areia de tamanho característico igual a 692 μm é de apenas 30 kPa. Esta diferença significativa está na quantidade de partículas que possuem tamanho suficiente para adentrar o elemento filtrante e assim ocasionar a filtração de profundidade. Este comportamento fica claro ao observar as retas de ajuste impressas na Região (I) na Figura 33. Mesmo que apenas qualitativamente, a inclinação do crescimento da queda de pressão para o escoamento contendo areia com tamanho característico de 268 μm é consideravelmente maior que a inclinação da reta de ajuste do escoamento contendo areia de 692 μm . É possível perceber que o comportamento da queda de pressão torna-se mais linear aproximadamente 5 minutos antes para o escoamento com partículas maiores, indicando que a partir deste período já não há mais partículas sólidas adentrando o elemento filtrante e o leito já é responsável por reter todos os sólidos que chegam até a seção de testes.

Figura 33 – Queda de pressão ao longo do experimento para diferentes granulometrias.

Concentração 0,10%. Viscosidade 20 cP.

Fonte: Autor (2021).



As equações das curvas de ajuste da queda de pressão no regime de filtração de superfície são registradas na Tabela 5. Nela é possível perceber que, quanto menor a granulometria do sólido transportado, maior a inclinação da curva de queda de pressão. Isso acontece pois, as partículas menores são mais facilmente carregadas pelo escoamento e, por este motivo, o leito de areia formado é maior como visto na Figura 32, impondo uma restrição maior ao escoamento.

Tabela 5 - Equação das curvas de ajuste da queda de pressão para escoamentos com areia de granulometrias diferentes na região de filtração de superfície.

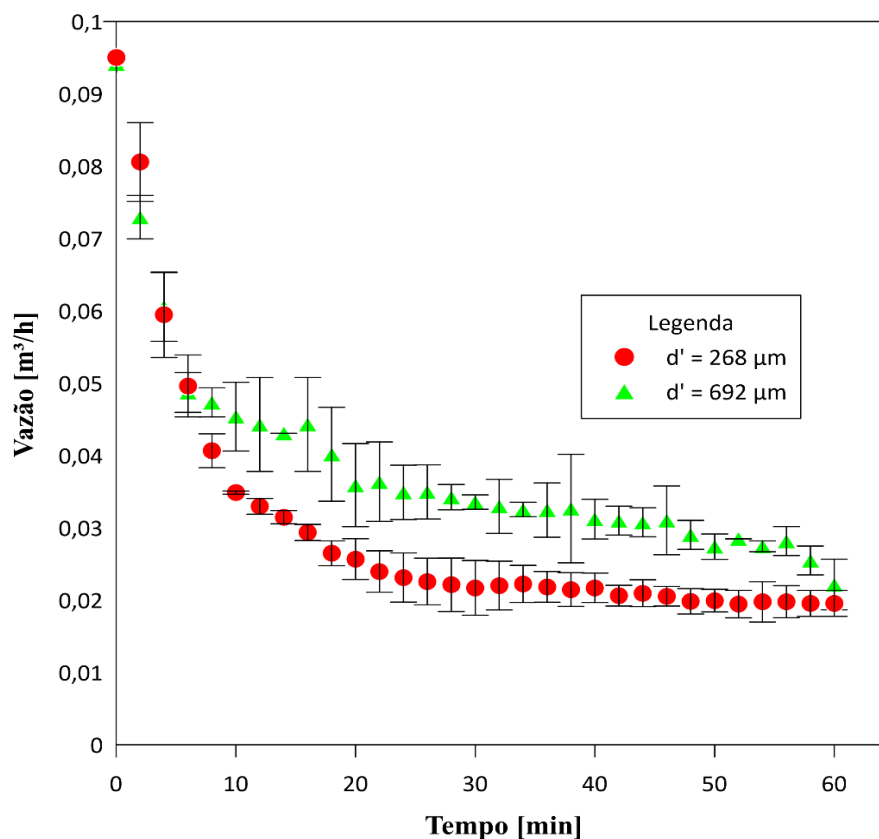
| | Equação |
|------------------------|----------------------------|
| $d' = 268 \mu\text{m}$ | $\Delta P = 0,428t + 75,1$ |
| $d' = 692 \mu\text{m}$ | $\Delta P = 0,371t + 28,1$ |

4.4.3 Vazão

As vazões ao longo dos experimentos foram medidas e registradas e são apresentadas na Figura 34.

Figura 34 – Vazões para escoamento com diferentes granulometrias.

Fonte: Autor (2021).



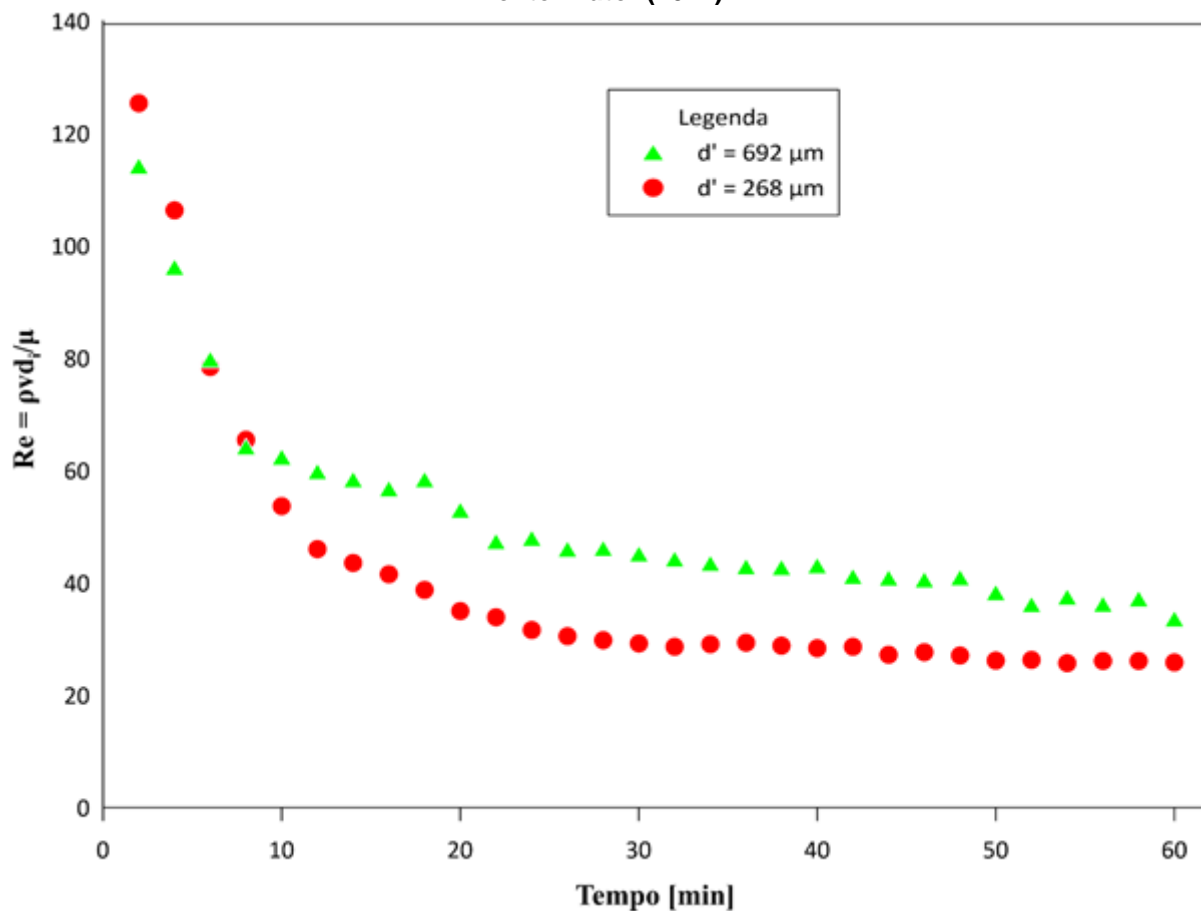
No resultado dos testes apresentado na Figura 34, foi observada a redução significativa da vazão nos primeiros 10 a 15 minutos resultante da queda de pressão crescente em função da filtração de profundidade. A vazão medida para o escoamento com partículas de $692 \mu\text{m}$ é maior que para $268 \mu\text{m}$, isso ocorre, pois, a restrição imposta pelo leito formado é menor.

4.4.4 Permeabilidade

O valor do número de Reynolds foi calculado para os testes com escoamentos contendo partículas de diferentes tamanhos. Os resultados destes cálculos estão apresentados na Figura 35. Nela é possível verificar que o valor calculado de Reynolds para todos os testes está entre 20 e 125, portanto, a equação proposta por Forchheimer é a mais indicada para avaliar os efeitos da permeabilidade do meio poroso formado.

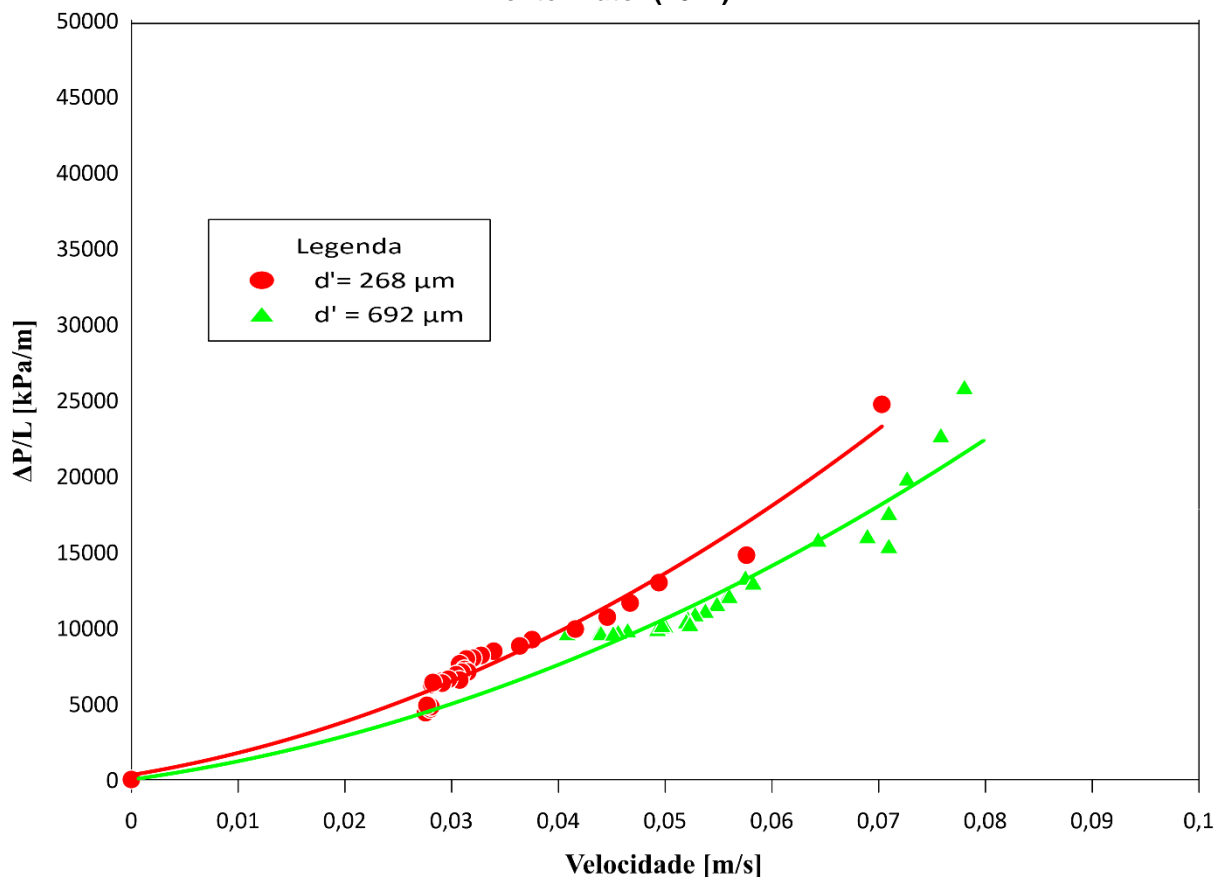
Figura 35 - Número de Reynolds ao longo dos experimentos com areias de granulometrias diferentes.

Fonte: Autor (2021).



Imprimindo os valores do gradiente de pressão em função da velocidade do escoamento na Figura 36 é possível extrair da curva de ajuste os termos de primeiro e segundo grau a partir dos quais os coeficientes de permeabilidade viscosa e inercial podem ser calculados.

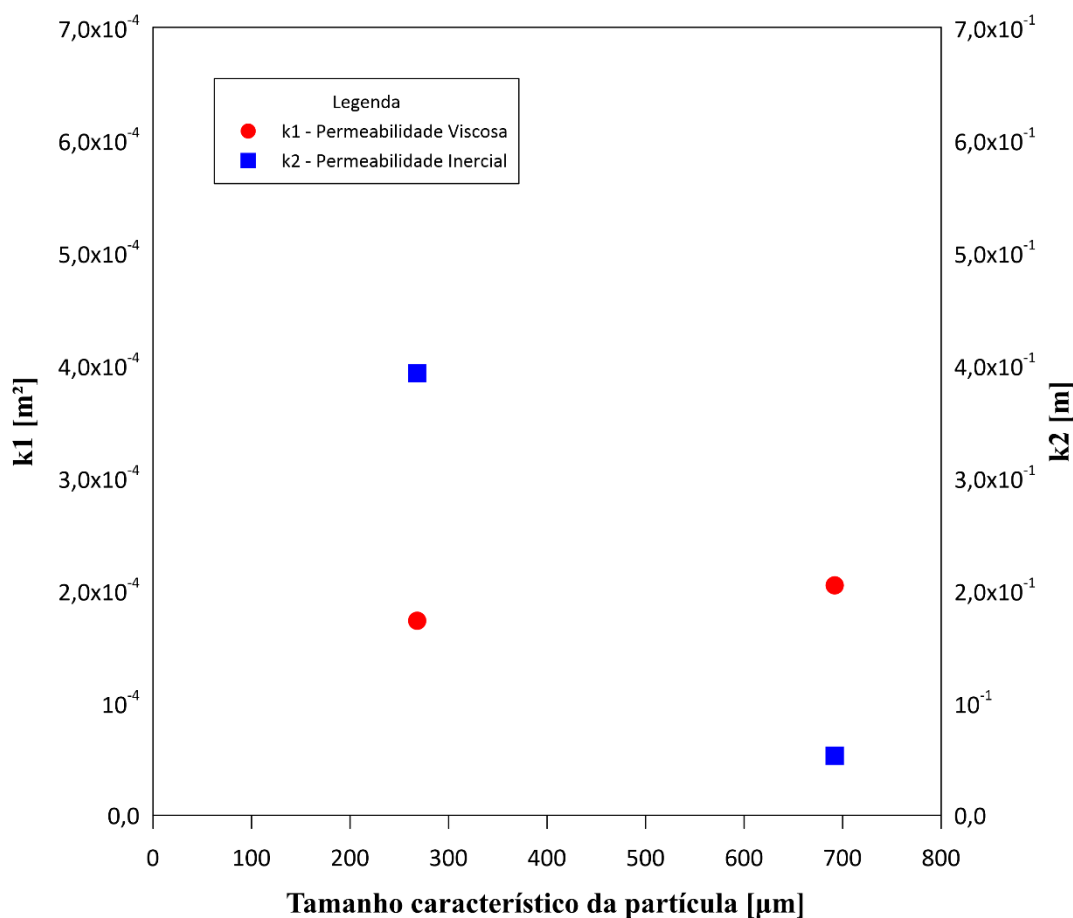
Figura 36 - Gradiente de pressão em função da velocidade para escoamento com areias de diferentes granulometrias.
Fonte: Autor (2021).



A viscosidade do fluido e o peso específico são conhecidos, a saber 20 cP e 1177,5 kg/m³ respectivamente. Os coeficientes de primeira e segunda ordem das equações de ajuste representam, respectivamente, os termos μ/k_1 e ρ/k_2 na equação proposta por Forchheimer. Desta forma os valores de k_1 e k_2 foram calculados e estão apresentados na Figura 37.

Figura 37 - Valores das constantes de permeabilidade viscosa (k_1) e inercial (k_2) para escoamento com areia de diferentes granulometrias.

Fonte: Autor (2021).



O valor da constante de permeabilidade viscosa (k_1) está associada a estrutura do meio poroso. Observando os resultados, é possível perceber que o leito formado pelo escoamento contendo areia com tamanho característico de 268 μm possui uma permeabilidade viscosa menor que o formado por areia de 692 μm , indicando que a estrutura porosa da torta impõe maior resistência ao escoamento, possivelmente porque a areia de granulometria menor se acomoda melhor proporcionando uma quantidade de vazios menor. Contudo, o coeficiente de permeabilidade inercial (k_2), que leva em consideração o efeito das forças inerciais e da tortuosidade do leito, é menor para teste realizado com partículas de característico igual a 692 μm , ou seja, as forças inerciais influenciam mais na queda de pressão para o leito formado por areia de maior granulometria. Isto fica evidente quando observados os valores de Reynolds calculados ao longo do tempo para os dois escoamentos. No escoamento

contendo areia de 692 μm , Reynolds é cerca de 50% maior que o com areia de 268 μm ao longo de quase todo o teste.

A queda de pressão para o leito com mesmo incremento de altura na fase de filtração em superfície mostra que o leito formado pela areia com tamanho igual a 268 μm oferece uma resistência maior ao escoamento. Entretanto, essa diferença é pouco significativa, 17,04 kPa para o leito formado pela areia de 268 μm e 16,80 kPa para o leito formado pela areia de 692 μm . A pequena diferença entre o incremento na queda de pressão ocorre provavelmente pois os efeitos da permeabilidade inercial, que é maior para o escoamento com areia de 692 μm , se fazem presentes, ou seja, apesar da estrutura do leito formado pela areia de menor granulometria oferecer uma resistência maior, os efeitos inerciais fazem com que a queda de pressão medida para os dois testes seja similar nessa região.

5 CONCLUSÃO

Para os testes com diferentes concentrações, foram utilizadas frações mássicas entre 0,05% e 0,015% de areia. Em todos os experimentos, um leito de areia foi formado sobre a tela e, quanto maior a concentração de areia maior foi o leito formado. Este leito provocava um aumento na queda de pressão medida. No comportamento da queda de pressão foi possível observar duas regiões distintas. Na primeira região ocorria a filtração de profundidade. Quanto maior a concentração de sólidos, mais sólidos chegavam até a seção de testes e maior quantidade de partículas que adentravam a malha da tela, por isso, maior a queda de pressão. Ainda nesta região, a torta já começa a ser formada sobre a tela, seja pelos sólidos que ficam retidos por exclusão de tamanho, seja pelas pontes de areia que são formadas sobre a tela. Na segunda região, o leito que se forma sobre a tela é responsável por reter todas as partículas que chegam à seção de testes e o aumento da queda de pressão depende apenas do incremento na altura do leito. Para todos os testes, a vazão foi afetada pela restrição ao escoamento e, os valores medidos reduzem com comportamento condizente com a queda de pressão, com duas regiões distintas. Foi verificado que a permeabilidade viscosa, que está ligada a estrutura do leito, era menor quanto menor a concentração de sólidos, ou seja, quanto menor a taxa de deposição de sólidos, menos permeável o leito formado, possivelmente devido a melhor acomodação das partículas. A permeabilidade inercial também foi calculada e, assim como a permeabilidade viscosa, tem valores menores quanto menor a concentração de sólidos. Os efeitos inerciais são mais presentes no escoamento com menor concentração de sólidos como indica o número de Reynolds, fator que contribui com a redução da permeabilidade inercial. Outro fator que afeta esse parâmetro é a tortuosidade do leito, indicando que os canais internos que permitiam a transposição do fluido no leito eram menos lineares quanto menor a concentração de sólidos no escoamento.

Também foram realizados testes com diferentes viscosidade do fluido de transporte (entre 9 e 47 cP). Os resultados mostraram que quanto mais viscosa a solução, maior a capacidade do fluido de carregar as partículas sólidas presentes no escoamento. Essa capacidade ficou comprovada na altura final do leito formado, que é 2,1 vezes maior para o escoamento mais viscoso. Novamente, foi possível observar duas regiões distintas no escoamento, na primeira, até 15 minutos de

teste, ocorreu a filtração de profundidade e a segunda, após esse período, a filtração de superfície. A queda de pressão na região de filtração de profundidade para o escoamento com 47 cP foi 1,8 vezes maior para 9 cP, comportamento que indica a importância da viscosidade no transporte de partículas, permitindo que mais partículas chegassem até a seção de testes e adentrassem a malha da tela. Os resultados mostraram que a permeabilidade viscosa (k_1), que depende apenas da estrutura do leito, era menor para o leito formado pelo escoamento menos viscoso indicando uma estrutura menos permeável com melhor acomodação das partículas. A permeabilidade inercial calculada para o escoamento com fluido de transporte de viscosidade igual a 9 cP foi 7 vezes menor que a permeabilidade inercial calculada para o escoamento com 47 cP evidenciando a relevância das forças inerciais na resistência a passagem do fluido pelo leito de areia formado.

Por fim, foram realizados testes com dois tipos de areia com granulometrias diferentes. As partículas maiores foram mais dificilmente carregadas pelo escoamento. Isso ficou evidente na altura do leito de areia formada para os testes realizados. Em concordância com os demais testes realizados, a queda de pressão apresentou duas regiões distintas, uma que ocorria a filtração em profundidade e outra que ocorria a filtração de superfície. Os resultados mostraram também que a filtração de profundidade ocorreu por menos tempo no escoamento contendo a areia de diâmetro característico igual a 692 μm , terminando aproximadamente 5 minutos antes do experimento com areia de menor tamanho. Isso ocorreu pois, para areia de granulometria maior, apenas uma pequena fração da areia conseguiu adentrar a malha da tela e obstruir internamente o elemento filtrante. A grande maioria dos sólidos ficou retida na superfície da tela por exclusão de tamanho, de forma que, o aumento da queda de pressão se deu, em quase todo o escoamento, em função do leito formado sobre a tela. Com base nos resultados foi calculada a permeabilidade do sistema. O valor da permeabilidade viscosa foi 1,18 vezes maior para o escoamento contendo areia de 692 μm , isso sugere que o leito formado por esta areia era mais permeável que o leito formado pela areia de 268 μm , ou seja, oferecia menos resistência ao escoamento. Isso ocorre pois, possivelmente, as partículas maiores não se acomodam da mesma forma que as menores e, por isso, uma quantidade maior de espaços vazios são criados. Contudo, a permeabilidade inercial é 7,5 vezes menor para o teste realizado com areia de maior granulometria,

indicando que os efeitos inerciais são mais presentes para este escoamento e aumentam significativamente a restrição ao escoamento.

Os testes realizados apresentaram resultados que possuem consistência física além de coerência e concordância com os resultados encontrados na literatura. A medição da queda de pressão, vazão, altura do leito e o cálculo da permeabilidade do sistema dão embasamento para estudar os fenômenos físicos que acontecem durante a retenção de areia e o processo de filtração. A bancada, conforme construída, possibilita a execução de testes em condições diversas, sendo versátil para a experimentação e seleção das telas de contenção de areia. Assim, próximos trabalhos podem aprofundar os estudos no efeito da viscosidade sobre o transporte de partículas de diferentes tamanhos, investigar o efeito do tamponamento das tela pelas partículas, verificar a influência dos parâmetros de granulometria, viscosidade e concentração na formação das pontes de areia sobre a tela, além de utilizar telas de modelos e aberturas diferentes sob condições específicas de viscosidade, concentração e granulometria. Também é possível realizar análises numéricas calibradas a partir dos dados obtidos na bancada e assim, prever matematicamente o comportamento das telas sob as condições desejadas.

REFERÊNCIAS

AHAD, N. A.; JAMI, M.; TYSON, S. A review of experimental studies on sand screen selection for unconsolidated sandstone reservoirs. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology**, [s.l.], v. 10, n. 4, pp. 1675-1688, 2020.

BALLARD, T.; KAGESON-LOE, N.; MATHISEN, A. The development and application of a method for the evaluation of sand screens. In: **SPE European Formation Damage Conference**. 1999, The Hague. OnePetro, 1999. pp. 377-388.

BALLARD, T.; BEARE, S. Media sizing for premium sand screens: Dutch twill weaves. In: **SPE European Formation Damage Conference**. 2003, The Hague. OnePetro, 2003. pp. 1-9.

BALLARD, T.; BEARE, S. An investigation of sand retention testing with a view to developing better guidelines for screen selection. In: **SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control**. 2012, Lafayette. OnePetro, 2012. pp. 1-13.

BARKMAN, J. H.; DAVIDSON, D. H. Measuring water quality and predicting well impairment. **Journal of Petroleum Technology**, [s.l.], v. 24, n. 07, pp. 865-873, 1972.

BELLARBY, J. Sand Control: Sand Control Screen Types. In:_____. **Well completion design**. 1 ed. [s.l.]: Elsevier, 2009. Cap. 3. pp. 129-239.

CARPENTER, C. Evaluating Sand-Screen Performance With Sand-Retention Tests and Numerical Modeling. **Journal of Petroleum Technology**, [s.l.] v. 68, n. 10, pp. 76-78, 2016.

CHANGYIN, D. et al. Effects of fluid flow rate and viscosity on gravel-pack plugging and the optimization of sand-control wells production. **Petroleum Exploration and Development**, [s.l.], v. 46, n. 06, pp. 1251-1259, 2019.

CHANPURA, R. A. et al. State of the Art Screen Selection for Standalone Screen Applications. In: **SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control**. 2010. Lafayette. OnePetro, 2010. pp. 1-18.

COBERLY, C. J. Selection of screen openings for unconsolidated sands. In: **Drilling and Production Practice**. 1937, New York. OnePetro, 1937. pp. 189-201.

COSTALONGA, M. L. **Redução de Arraste Por Adição de Polímeros em Escoamentos turbulentos em Espaços Anulares**. 2017. 77 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

DUSSEAULT, M. B.; SANTARELLI, F. J. A conceptual model for massive solids production in poorly-consolidated sandstones. In: **ISRM International Symposium**. 1989, Paul. OnePetro, 1989. pp. 789-797.

EMMETI. **Catalogo de Produtos**. 2020. 96 f. Catálogo. Disponível em: <<https://www.emmeti.com.br/pdf/catalogo-agua-gas-2020.pdf>> . Acesso em: 12 jul. 2021.

FENG, Y. et al. Evaluation of sand screen performance using a discrete element model. In: **SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition**. 2012, Perth. OnePetro, 2012. pp. 1-12.

FISCHER, C.; HAMBY, H. A novel approach to constant flow-rate Sand retention testing. In: **SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control**. 2018, Lafayette. OnePetro, 2018. pp. 1-14.

FJÆR, E. et al. Solids production. **Developments in Petroleum Science**, [s.l.], v. 53, pp. 341-368, 2008.

FRARE, L. M. et al. Linearização do modelo log-normal para distribuição de tamanho de partículas. **Acta Scientiarum. Technology**, [s.l.], v. 22, pp. 1235-1239, 2000.

FURGIER, J. et al. Stand Alone Screens: what key parameters are really important for a successful design?. In: **SPE European Formation Damage Conference & Exhibition**. 2013, Noordwijk. OnePetro, 2013. pp. 1-12.

GILLESPIE, G.; DEEM, C. K.; MALBREL, C. Screen selection for sand control based on laboratory tests. In: **SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition**. 2000, Brisbane. OnePetro, 2000. pp. 1-15.

GÓMEZ, D. A. O. **Modelagem de problemas de fluxo na escala granular usando o método Lattice Boltzmann**. 2013. 146 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

HODGE, R. M. et al. An evaluation method for screen-only and gravel-pack completions. In: **International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control**. 2002, Lafayette. OnePetro, 2002. pp. 1-15.

INNOCENTINI, M. D.; PANDOLFELLI, V. C. Considerações sobre a estimativa da permeabilidade em concretos refratários através das equações de Darcy e de Forchheimer. **Cerâmica**, [s.l.], v. 45, n. 293, pp. 61-67, 1999.

KHAMEHCHI, E.; REISI, E. Sand production prediction using ratio of shear modulus to bulk compressibility (case study). **Egyptian Journal of Petroleum**, [s.l.], v. 24, n. 2, pp. 113-118, 2015.

KOCH, M.; KRAMMER, G. The permeability distribution (PD) method for filter media characterization. **Aerosol science and technology**, [s.l.], v. 42, n. 6, pp. 433-444, 2008.

LARSEN, O. S. et al. New sand retention test setup exhibits no plugging tendencies with various screen types using nonuniform test sand. In: **SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control**. 2012, Lafayette. OnePetro, 2012. pp. 1-16.

MA, C. et al. A new laboratory protocol to study the plugging and sand control performance of sand control screens. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, [s.l.], v. 184, pp. 106548-106559, 2020.

MACHADO, F.A. **Desenvolvimento de critério para seleção de material para empacotamento de gravel em poços produtores horizontais não revestidos**. 2003. 154 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2003.

MAHMOUDI, M. et al. Standalone Sand Control Failure: The Role of Wellbore and Near Wellbore Hydro-Thermo-Chemical Phenomenon on the Plugging and the Flow Performance Impairments of the Standalone Sand Screen. In: **SPE Thermal Well Integrity and Design Symposium**. 2018. Banff. OnePetro, 2018. pp. 1-27.

MILAK, G. B. **Cerâmicas porosas obtidas a partir da substituição parcial de matérias-primas por resíduos da indústria de papel e celulose e utilização de fibras poliméricas para aumento de permeabilidade**. 2018. 121 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2018.

MONICARD, R. pp. Permeability of reservoir rocks. In:_____. **Proprieties of reservoir rocks : Core analysis**. 1 ed. [s.l.]: Editions Technip, 1980. Cap. 2. pp. 43-84.

MORITA, N. et al. Realistic sand-production prediction: numerical approach. **SPE Production Engineering**, [s.l.], v. 4, n. 01, pp. 15-24, 1989.

PESSOA, T. F. pp. **Análise Numérica de Medidas de Contenção de Sólidos em Rochas Produtoras de Óleo do Brasil**. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

PRADO, G. G. **Projeto e caracterização de membranas cerâmicas utilizando microfibras como precursoras de porosidade**. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

RENPU, W. Basis of Well Completion Engineering. In:_____. **Advanced well completion engineering**, 3 ed. [s.l.]: Elsevier, 2001. Cap. 1. pp. 1-74.

ROCHA, S. M. S. **Estudo da influência da velocidade e dos ciclos de filtração**

na formação da torta na limpeza de gases em filtros de mangas. 2010. 143 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

ROOSTAEI, M. et al. Sand Control Design through Assessment of Mathematical Models Representing Particle Size Distribution of Reservoir Sands. In: **SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control**. 2018, Lafayette. OnePetro, 2018. pp. 1-29.

ROSIN, pp. Laws governing the fineness of powdered coal. **Journal of Institute of Fuel**, [s.l.], v. 7, pp. 29-36, 1933.

SANTOS, A.R. **Análise do colapso de telas utilizadas em sistemas de contenção de areia em poços horizontais.** 2007. 123 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SEAFLO. **Diaphragm Pump 12V/24V 2.0-5.0LPM 17-120PSI.** 2021.Catálogo. Disponível em:< <http://www.seaflo.com/en-us/product/detail/602.html>>. Acesso em: 12 jul. 2021.

SILVESTRE, J. R. **Análise numérica de estabilidade de poços de petróleo com relevância à produção de areia.** 2004. 133 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

VESILIND, pp. A. The Rosin-Rammler particle size distribution. **Resource Recovery and Conservation**, [s.l.], v. 5, n. 03, pp. 275-277, 1980.

VILLARROEL, F. M. G. **Simulação física do comportamento mecânico de poços de petróleo.** 2009. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

WANG, L. et al. Experimental investigation of flow characteristics in porous media at low Reynolds numbers ($Re \rightarrow 0$) under different constant hydraulic heads. **Water**, [s.l.], v. 11, n. 11, pp. 2317-2331, 2019.

WU, B. et al. Development of a Novel Sand Retention Cell. In: **SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition**. 2016, Perth. OnePetro, 2016. pp. 1-14.

WU, C. et al. Factors Governing the Predicted Performance of Multilayered Metal-Mesh Screens. **SPE Drilling & Completion**, [s.l.], v. 32, n. 03, pp. 141-152, 2017.

YAO, K. M. Theoretical study of high-rate sedimentation. **Journal (Water Pollution Control Federation)**, [s.l.], v. 42, n. 02, pp. 218-228, 1970.

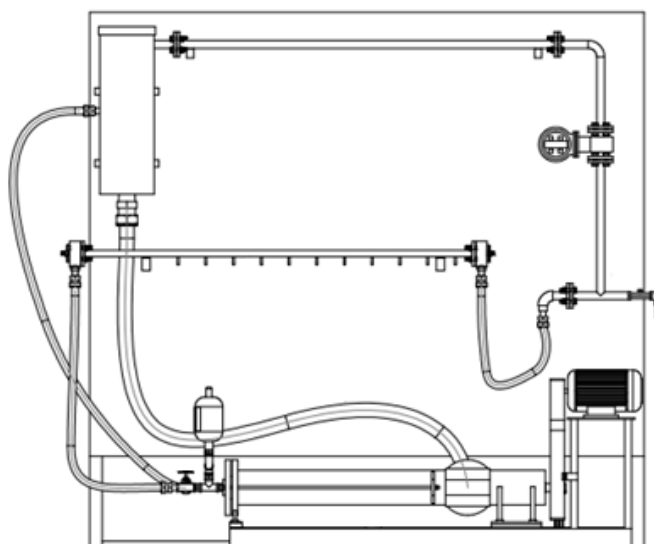
APÊNDICE A

Este apêndice é destinado a apresentar a concepção e o histórico de alterações realizadas na bancada até a configuração final, além de apresentar os testes preliminares realizados.

Para a construção do aparato experimental, a bancada desenvolvida por Costalonga (2017) apresentada na Figura 38, originalmente utilizada para testes com polímeros redutores de arrasto foi adaptada. A bancada nesta configuração, não possuía local para a instalação das telas de contenção em sua seção de testes e por isso precisou passar por modificações.

Figura 38 – Esquema da bancada original para testes com polímeros redutores de arrasto.

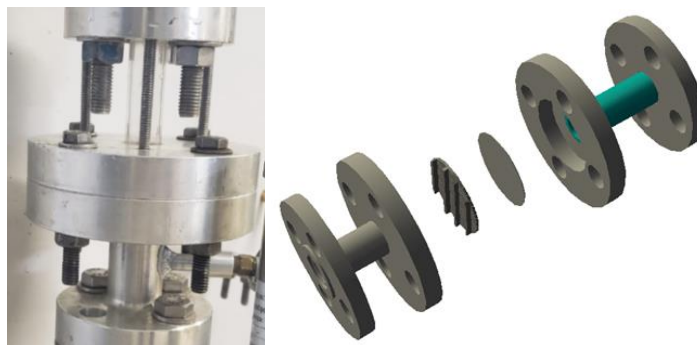
Fonte: Adaptado de Costalonga (2017).



Uma nova seção de testes foi projetada de forma que fosse possível fixar a tela para garantir estabilidade ao experimento. A nova seção de testes foi instalada na vertical a jusante do medidor de vazão e contava com um trecho de tubo em acrílico transparente de diâmetro interno 16 mm, possibilitando a observação e registro da formação do leito de areia que se deposita sobre a tela como é possível observar na Figura 39.

Figura 39 – Seção de teste conforme construída (a esquerda) e vista explodida (a direita).

Fonte: Autor (2021).



A montante e a jusante da seção de testes, foram posicionados medidores de pressão modelo Warme WTP-4010, range de medição 0 a 3 bar precisão $\pm 0,5\%$ para possibilitar medir a queda de pressão observada através da tela e do reboco formado. Os dados captados pelos medidores instalados eram registrados em um sistema supervisório baseado no LABView. As telas utilizadas foram fornecidas pela Petrobras. Trata-se de um conjunto de cupons feitos a partir de telas, sendo uma do tipo *Wire Wrapped* com abertura de 220 μm e outra tela de malha metálica com abertura 175 μm . As telas foram sobrepostas a fim de formar um conjunto *premium* conforme descrito por Bellarby (2009).

Os testes preliminares utilizaram o *by pass* para reduzir a vazão a fim de, evitar o bloqueio das telas muito rapidamente conforme indicado por Ballard (1999). Contudo, com o *by pass* aberto, mesmo que com menor abertura, não era possível observar areia chegando à seção de teste, e a areia ficava retida na mangueira do *by pass*. Para sanar o problema da vazão, a bomba a ser utilizada foi substituída por uma bomba de menor capacidade de forma que o uso do *by pass* não fosse mais necessário. Para isto, foi instalada na bancada uma bomba duplo diafragma do fabricante Seaflo modelo SFDP2-013-060-22 com controle do tipo *by pass - demand*. Bombas do tipo diafragma são comumente especificadas para escoamento com particulados e com potencial abrasivo, pois os elementos mecânicos não ficam em contato direto com o produto bombeado, visto que o deslocamento do material é feito pela movimentação da membrana diafragma. A vazão da bomba pode ser modulada variando a corrente de alimentação, para isso uma fonte de energia modelo Minipa MPL-3303M foi utilizada no bombeamento. Bombas com controle do tipo *by pass - demand* continuam operando independente

da pressão no sistema, contudo, possuem um sensor que reponde ao aumento da pressão e desviam o fluxo internamente na bomba reduzindo a vazão.

Com a nova bomba instalada, foi possível perceber um acúmulo de sólidos sobre a tela, contudo, os resultados ainda não eram satisfatórios. Para investigar os motivos da areia não chegar à seção de testes, a bancada foi desmontada, então foi possível verificar que no trecho horizontal anterior ao medidor de vazão, os sólidos haviam depositado por gravidade no inferior da tubulação. O ocorrido assemelha-se ao registrado por Ma e colaboradores (2020). Os trechos horizontais foram removidos para evitar a deposição da areia no fundo do tubo. Outra alteração feita, foi a substituição do reservatório por um menor e, com ele, foi instalado um novo agitador de altura regulável modelo Fisatom 542518, possibilitando assim a agitação do fluido mais próximo ao fundo do tanque. Foi instalada também na parte superior da bancada uma válvula ventosa simples 1/2", com operação manual e automática do fabricante Emmeti código 00400004, com pressão máxima de trabalho 10 bar, para remover as bolhas do escoamento e garantir a reprodutibilidade dos teste, além da instalação de uma válvula de bloqueio após a seção de testes para permitir interromper o fluxo e possibilitar a purga do ar. Por fim, a bancada assumiu a configuração vista na Figura 40, apresentando resultados consistentes para a proposta do trabalho.

Figura 40 – Configuração final da bancada utilizada nos experimentos.

Fonte: Autor (2021).

