

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ELABORAÇÃO DE UM MODELO FÍSICO DE POÇO INSTALADO EM AQUÍFERO
FRATURADO PARA SIMULAR ENSAIOS HIDRÁULICOS**

Gabriel da Silva Costa

Orientador: Reginaldo Antonio Bertolo

De acordo:

Co-Orientador: Marcos Bolognini Barbosa

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF – 18/14)**

São Paulo, 2018

Sumário

1. AGRADECIMENTOS	3
2. RESUMO	4
3. ABSTRACT	5
4. INTRODUÇÃO	6
5. METAS E OBJETIVOS	7
6. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	7
6.1 Potencial total da água e carga hidráulica.....	8
6.2 Transmissividade.....	9
6.3 Fluxo através de fraturas.....	10
6.4 Lei cúbica	11
6.5 Distúrbios ou efeitos de perfurações e carga hidráulica média (Hbl).....	11
6.6 Ensaios de campo.....	13
7. MATERIAIS E MÉTODOS	15
7.1 Montagem do modelo	15
7.2 Ensaios para calibração do medidor de vazão.....	18
7.3 Ensaios preliminares	20
7.4 Ensaios de fluxo simples.....	21
7.5 Ensaios de fluxo natural com duas fraturas	22
7.6 Ensaios com obturador pneumático	23
8. RESULTADOS.....	24
8.1 Apresentação.....	24
8.1.1 Ensaios preliminares	26
8.1.2 Ensaios de fluxo simples.....	26
8.1.3 Ensaios de fluxo natural com duas fraturas	29
8.1.4 Ensaios com obturador pneumático	34
8.2 Comentários críticos e eventuais dificuldades	37
9. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	38
10. CONCLUSÕES	39

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41
-------------------------------------	----

1. AGRADECIMENTOS

Gostaria de aproveitar este espaço para agradecer à todas as pessoas que fizeram parte não só deste trabalho, mas que dividiram momentos e compartilharam experiências comigo durante estes cinco anos de universidade. Acredito que mais do que uma formação, este período me fez crescer de uma forma imensa. Por este caminho, gostaria de agradecer à todos os amigos e amigas, funcionários e funcionárias, técnicos e técnicas de laboratório, professores e professoras, monitores e monitoras. Agradecer nunca é demais. Foram cinco longos anos. Intensos, de muitas maneiras diferentes. Se cheguei até aqui, devo esta conquista a vocês.

Obrigado à todas as amigas e amigos da geologia, que dividiram tantos trabalhos, tantos prazos, tanta correria. À todos vocês que conviveram de alguma forma com minhas incertezas em relação ao curso, acredito que este trabalho me mostra que essa persistência de fato me trouxe presentes incríveis. Presentes que quero carregar por muito tempo. A lista é longa: Tom, Baia, Gretchen, Indi, Kef, Bia, Júlia, Elis, Crô, Mama, Brioco, Caloi, Thales, Lelek, Carlos, Sacolé, Tutu, Bilbo, Loló, Madre, Xita, Menos eu, Kibe, Carol, Samara, Jade, Narúbia, Thaizão, Bassan, Rafa, Willy, Baba, Igor, Kiwi, Porca, Blá, Vera, Ariadna e muitos (muitos!) outros. Não poderia me esquecer também das grandes amizades que fiz aqui e que acabaram seguindo outros caminhos na universidade: Lígia, Isabella, Eduardo, Denner, Thayna, e tantos outros. Vocês também são parte disso.

Obrigado também à todas as pessoas com as quais morei junto nestes cinco anos. Foram muitas histórias. Incontáveis. Muita coisa dividida com vocês. Como pessoa, acredito que vocês me fizeram aprender muita coisa, e foi um prazer conhecer e descobrir São Paulo junto com vocês. À Caiã, Anna, Arthur, Ananda, Higor, Compa e Thais, o tempo que passei com vocês vale pra toda a vida.

Obrigado aos meus orientadores, Reginaldo e Marcos, por me auxiliarem neste longo processo, por todas as oportunidades, e por todo o aprendizado, acima de tudo. Espero levar este conhecimento comigo por toda a vida, e sou muito grato por me proporcionarem isso.

Por fim, gostaria de agradecer especialmente meu pai, Alexandre, e minha mãe, Marília. Vocês fizeram isso acontecer. Todas as pessoas que pude conhecer, todas as realidades que pude entrar em contato, todas as vivências, todo o suporte, toda a minha história e evolução. Muito obrigado.

2. RESUMO

Em decorrência da necessidade de ampliar o conhecimento a respeito de poços em aquíferos fraturados, este trabalho visou a elaboração de um modelo físico que simule o comportamento de um poço instalado em um aquífero fraturado em laboratório. Através desta nova abordagem, distinta das já encontradas na literatura, se procura avaliar o efeito que as perfurações produzem em um aquífero fraturado, bem como pretende-se facilitar a visualização dos processos que ocorrem nestes sistemas e aprimorar as interpretações decorrentes de trabalhos de campo.

O desenvolvimento deste trabalho contemplou uma série de etapas, desde a concepção teórica até a instalação dos equipamentos em laboratório e realização de ensaios. Além de simular diferentes cenários de fluxo em uma perfuração, este modelo também foi utilizado para reproduzir ensaios de campo, por meio de diferentes métodos e equipamentos, como um obturador pneumático.

O modelo elaborado consiste num tubo de acrílico, que simula um poço, e uma série de mangueiras e registros foram conectados a este tubo, simulando a ocorrência de duas fraturas que interceptam este poço. Foram inicialmente executados testes em cada uma das fraturas, separadamente, a fim de verificar a relação entre pressão e vazão nestas. Assim, pode-se observar que a variação de pressão em cada uma das fraturas se reflete em uma variação de mesma proporção na altura da coluna de água no tubo (a partir de um nível de referência, estabelecido de forma empírica). Em seguida, foi testada uma situação sob a ação das duas fraturas juntas, e através de um corante pode-se visualizar a dinâmica de fluxo no sistema. Novamente, valores de pressão e vazão foram coletados, e pode-se registrar a variação dos parâmetros de uma situação com uma fratura ativa para uma situação governada por duas fraturas ativas.

Por fim, um obturador pneumático foi inflado dentro do tubo, de forma a isolar uma fratura da outra. Assim, se verificou como as variáveis se comportam de uma situação onde as fraturas ocorrem separadas para uma condição onde elas interagem entre si. Nesta etapa, também se testou a eficiência deste obturador em isolar de forma absoluta os dois trechos do tubo.

3. ABSTRACT

Due to the need to increase the knowledge about wells in fractured aquifers, this work aimed the elaboration of a physical model that simulates the behavior of a well installed in a fractured aquifer in laboratory. Through this new approach, distinct from those already found in the literature, it is intended to evaluate the effect that the perforations produce in a fractured aquifer, as well as to facilitate the visualization of the processes that occur in these systems and to improve the interpretations resulting from field works.

The development of this work contemplated a series of steps, from the theoretical conception of the model to the installation of the equipment in laboratory and the realization of hydraulic tests. In addition to the simulation of different flow scenarios, this model was also used to reproduce field tests, using different methods and equipment, such as a straddle packer.

The model consists of an acrylic tube, which simulates a well, and a series of hoses and valves were connected to this tube, simulating the occurrence of two fractures that intercept this well. Tests were initially performed on each of the fractures separately, in order to verify the relationship between pressure and flow in these fractures. Thus, it can be observed that the pressure variation in each of the fractures is reflected in a variation of the same proportion in the height of the water column in the tube (from an empirically established reference level). Then, a situation was tested under the action of the two fractures together, and through a stain the flow dynamics in the system was visualized. Again, pressure and flow values were collected, and the variation of the parameters from a situation with an active fracture to a condition governed by two active fractures was recorded.

Finally, a straddle packer was inflated inside the tube, in order to isolate the two fractures. Thus, it was verified how the variables behave from a situation where the fractures occur separately to a condition where they interact with each other. In this step, the efficiency of this packer in the tube was also tested.

4. INTRODUÇÃO

Os aquíferos fraturados representam um recurso hídrico de grande importância econômica, chegando a ocupar cerca de 37% do território do estado de São Paulo (Fernandes *et al.*, 2007). Nestes sistemas, a água se movimenta através de descontinuidades da rocha, geradas por deformações rúpteis decorrentes de esforços tectônicos. A dinâmica de fluxo de água subterrânea é resultado da conexão entre fraturas com capacidade de transmitir água e a variação de cargas hidráulicas destas.

A caracterização hidráulica dos aquíferos fraturados é um grande desafio, devido à sua heterogeneidade e anisotropia. Entender a dinâmica das águas subterrâneas neste tipo de aquífero tem valor científico e prático para a sociedade, uma vez que a água é um recurso valioso para a vida e o desenvolvimento econômico. Recorrentes períodos de crise hídrica, como os que ocorreram no sudeste brasileiro em 1953, 1971, 2001 e 2014 reforçam a importância dos reservatórios subterrâneos, pois estes estão menos sujeitos a efeitos climáticos de ciclos curtos. Por outro lado, a poluição das águas subterrâneas põe em risco os seus usuários, de forma que o gerenciamento deste recurso é fundamental para evitar problemas de saúde pública.

Seja para a produção de água ou para a caracterização de aquíferos, a perfuração de poços é uma das principais formas de obtenção de dados físicos e químicos em subsuperfície. No entanto, estas geram desequilíbrios hidráulicos e químicos no aquífero, de forma que se modifica a dinâmica de fluxo em condições naturais. Tendo em vista a importância das perfurações para a caracterização de aquíferos fraturados, é fundamental entender sua influência no estudo do aquífero, a representatividade e a limitação dos dados obtidos em ensaios de poços profundos e de monitoramento.

A interceptação de fraturas com diferentes aspectos hidráulicos e geométricos, ao longo de uma perfuração, gera conexões hidráulicas que favorecem um fluxo vertical artificial. Este distúrbio tem influência sobre os dados obtidos em ensaios para a caracterização do aquífero. Existem diversas técnicas de caracterização de aquíferos que buscam minimizar ou eliminar a influência da perfuração na obtenção de dados representativos. Contudo, este ainda é um tema recente e que carece de pesquisa aplicada. Portanto, é importante entender quais são os efeitos da perfuração de poços nestes aquíferos e nos próprios métodos de caracterização destes meios, amplamente utilizados para seu estudo.

No que tange ao estudo do comportamento hidráulico de sistemas fraturados, a literatura descreve modelos físicos de fraturas, bem como de aquíferos fraturados em pequena escala (Abdelaziz e Merkel, 2012; Karay e Hajnal, 2015). Este trabalho, entretanto, busca a elaboração de um modelo físico que simule o comportamento de um poço instalado em um aquífero fraturado em laboratório, de modo a avaliar o efeito que as perfurações produzem nas condições hidráulicas de um aquífero fraturado e possibilitar a execução de

ensaios procedidos em campo, a fim de verificar a eficiência dos métodos e equipamentos empregados.

5. METAS E OBJETIVOS

Para entender melhor os efeitos decorrentes das perfurações em aquíferos fraturados, o presente trabalho consiste em, dando continuidade a um projeto de iniciação científica do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (PIBIC – CNPq) iniciado em Agosto de 2017, desenvolver em laboratório um modelo físico de um poço perfurado neste tipo de aquífero. Com isso, se pretende facilitar a visualização dos processos que ocorrem nestes sistemas, bem como aprimorar as interpretações decorrentes de trabalhos de campo.

Por meio deste modelo, buscou-se analisar a dinâmica de fluxo que ocorre em um poço instalado em um aquífero fraturado. Foram simulados regimes de fluxo de água variando-se os seguintes parâmetros: gradiente de carga hidráulica entre fraturas, abertura das fraturas, número de fraturas hidráulicamente ativas e vazão, a fim de compreender e visualizar como se dá a estabilização das cargas hidráulicas, bem como a magnitude e o sentido do fluxo.

Desta maneira, objetivou-se determinar como a pressão, vazão e carga hidráulica resultante no tubo se relacionam, em diversos cenários: inicialmente numa situação sob ação de apenas uma fratura hidráulicamente ativa; em seguida sob a ação de duas fraturas simultaneamente ativadas. Por fim, foi simulada uma dinâmica onde inicialmente as fraturas não estão interligadas, situação análoga à de um aquífero fraturado, antes da perfuração de um poço. Em seguida, estas duas unidades passaram a se comunicar, permitindo-se visualizar os efeitos desta interligação. Foram utilizados corantes, a fim de obter um registro visual do fluxo de água nas mangueiras, e um obturador pneumático, instalado dentro do poço, com o intuito de avaliar sua eficiência.

6. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Neste item, serão apresentados os principais parâmetros que governam o movimento da água subterrânea em meios fraturados, como carga hidráulica e transmissividade. Em seguida, serão descritos os efeitos da perfuração de poços na dinâmica de águas subterrâneas, bem como a maneira com que a variação destes fatores altera as condições hidráulicas de um aquífero após a instalação de um poço. Por fim, serão introduzidos alguns conceitos a respeito do fluxo de água em fraturas, bem como de alguns ensaios procedidos em campo.

6.1 Potencial total da água e carga hidráulica

Para compreender os mecanismos responsáveis pela movimentação da água, é preciso considerar a princípio uma massa unitária de fluido, situada no ponto A, em uma posição arbitrária com altura igual à zero (Figura 1).

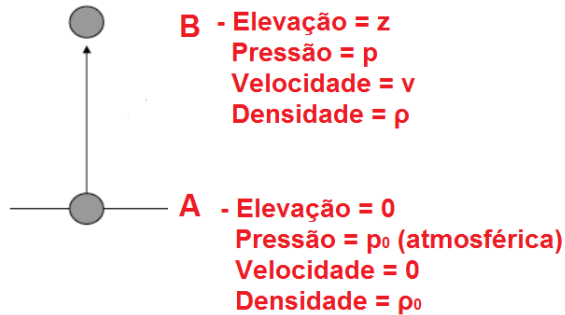


Figura 1. Situação exemplo para cálculo do potencial total de uma massa unitária de fluido (adaptado de Freeze e Cherry, 1979).

Três componentes de trabalhos atuam para deslocar esta massa de uma posição A para B. Um deles é gravitacional, responsável por elevar a massa de 0 até a altura z (Equação 1A). Outro é cinético, necessário para acelerar esta massa de uma velocidade 0 até uma velocidade igual à v (Equação 1B). Por fim, existe um componente elástico, que proporciona o aumento de pressão de p_0 até p (Equação 1C).

1A	1B	1C
$w_1 = mgz$	$w_2 = \frac{mv^2}{2}$	$w_3 = m \int_{p_0}^p \frac{V}{m} dp = m \int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho}$

Equação 1: Componentes de peso (1A), movimento (1B) e pressão (1C) do potencial total de uma massa m de fluido (adaptado de Freeze e Cherry, 1979).

Desta forma, o potencial total da água (Φ) é representado como resultado da somatória entre estes três componentes. Assumindo uma massa correspondente à 1, a Equação de Bernoulli (Equação 2) simplifica a relação entre estes trabalhos.

$$\Phi = gz + \frac{v^2}{2} + \int d\frac{p}{\rho}$$

Equação 2. Equação de Bernoulli, simplificação da somatória entre os componentes de trabalho gravitacional, cinético e elástico para um fluido de massa igual à 1 (Extraído de Freeze e Cherry, 1979).

A Figura 2 ilustra uma situação na qual mede-se a pressão no ponto P. A elevação deste ponto em relação a um datum de referência é conhecida como potencial de elevação (z), e o potencial de pressão (Ψ) corresponde à altura da coluna d'água acima deste ponto de

medição. Assim, o conceito de carga hidráulica (h) se relaciona à somatória entre estes dois principais componentes (Freeze e Cherry, 1979). Esta relação entre potenciais é fundamental para o entendimento da dinâmica de águas subterrâneas, visto que o fluxo se dá de locais de maior carga para pontos de menor carga hidráulica.

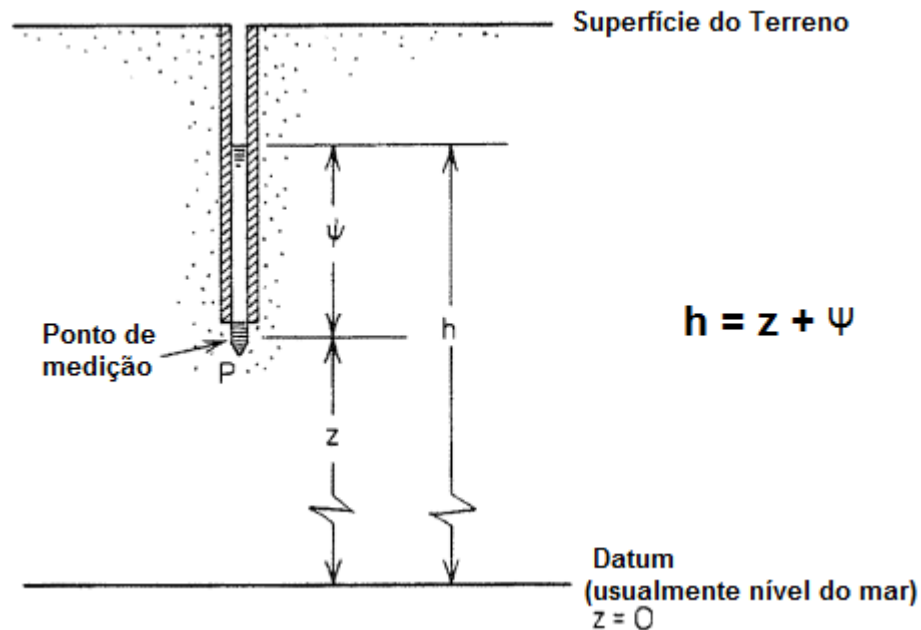


Figura 2. Relação entre carga hidráulica (h), potencial de elevação (z) e potencial de pressão (Ψ) em um determinado ponto P. (extraído de Freeze e Cherry, 1979).

Por fim, assumindo que a velocidade é extremamente baixa em meios porosos e que nestes casos o fluido pode ser considerado incompressível, pode-se simplificar a equação de Bernoulli, de forma a demonstrar que o potencial total de fluido Φ e a carga hidráulica h estão intimamente relacionados (Equação 3).

$$\Phi = gh$$

Equação 3. Simplificação da equação de Bernoulli para uma situação onde a velocidade é desprezível e o fluido é considerado incompressível (extraído de Freeze e Cherry, 1979).

6.2 Transmissividade

O vetor energia potencial, traduzido pela carga hidráulica, indica a direção em que a água irá se deslocar. Contudo, para que haja fluxo é necessário que exista um caminho que permita a movimentação da água. Assim, a condutividade hidráulica (K) pode ser definida como a taxa volumétrica de fluxo por unidade de área por unidade de gradiente (Cleary, 1989). Conforme ilustra a Equação 4, a condutividade hidráulica é função de características do meio poroso, como k (correspondente à permeabilidade intrínseca), e de propriedades do fluido, onde ρ equivale à densidade e μ é igual a viscosidade dinâmica do fluido. É importante ressaltar que no estudo da dinâmica de águas subterrâneas em sistemas fraturados a matriz não é porosa, mas sim constituída por condutos.

$$K = \frac{k \rho g}{\mu}$$

Equação 4. Solução empregada para a obtenção da condutividade hidráulica (Extraído de Freeze e Cherry, 1979).

O conceito de transmissividade é definido como a taxa volumétrica de fluxo através de uma secção de largura unitária e altura equivalente à espessura b de um aquífero, quando o gradiente hidráulico é igual 1 (Cleary, 1989). Desta maneira, a transmissividade de um corpo de espessura b pode ser calculado através da Equação 5:

$$T = K \cdot b$$

Equação 5. Solução empregada para a obtenção do valor de transmissividade de um corpo de espessura igual a b , e condutividade hidráulica correspondente a K (extraído de Cleary, 1989).

6.3 Fluxo através de fraturas

Para o estudo do fluxo de água que existe em discontinuidades presentes em sistemas fraturados, assume-se que este fluxo obedece à lei de Darcy, e que as fraturas podem ser idealizadas como aberturas plano-paralelas (Gale, 1982). A Figura 3 esquematiza esta premissa, onde b corresponde à abertura da fratura.

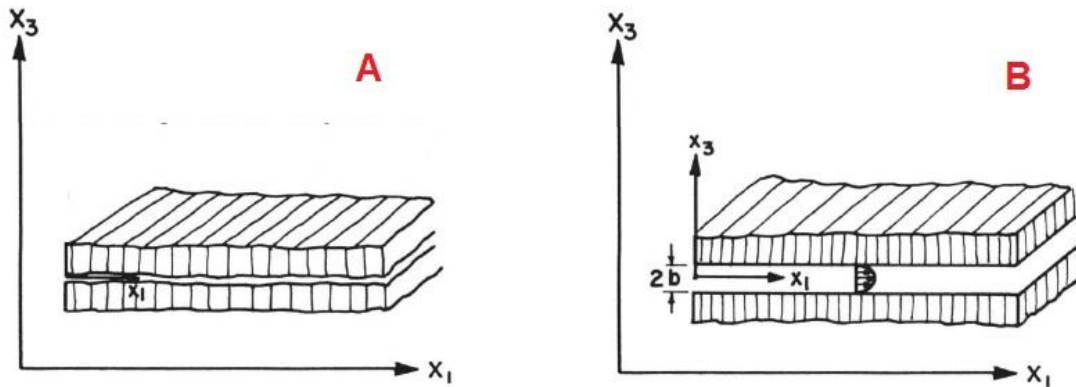


Figura 3. Esquema ilustrando fratura natural (A) e fratura assumida como abertura plano-paralela (B), onde b corresponde à abertura desta. (adaptado de Gale, 1982).

Assim, para a determinação da condutividade hidráulica desta fratura, sob esta premissa e para um fluido não turbulento e incompressível, utiliza-se uma adaptação da equação de Navier-Stokes (Gale, 1982). Esta é ilustrada na Equação 6, onde K_f corresponde à condutividade hidráulica de uma fratura individual, ρ equivale à densidade do fluido, g consiste na aceleração da gravidade, μ se relaciona à viscosidade dinâmica do fluido e b corresponde à abertura da fratura.

$$K_f = \frac{\rho g}{12\mu} (2b)^2$$

Equação 6. Adaptação da equação de Navier-Stokes para determinação da condutividade hidráulica de uma fratura idealizada como abertura plano-paralela (extraído de Gale, 1982).

6.4 Lei cúbica

Para a caracterização de aquíferos fraturados, a relação entre transmissividade e abertura das fraturas pode ser representada por meio da Lei cúbica (Snow, 1965), assumindo-se que as descontinuidades são planos paralelos entre si. A Equação 7 ilustra esta solução, onde T corresponde à transmissividade, 2b equivale à abertura das fraturas, μ representa a viscosidade absoluta da água, ρ diz respeito à densidade da água e N corresponde ao número de fraturas hidráulicamente ativas, assumindo que todas são idênticas.

$$T = \frac{\rho \cdot g \cdot (2b)^3}{12 \cdot \mu} \cdot (N)$$

Equação 7. Lei cúbica, empregada para a caracterização de aquíferos fraturados (extraído de Snow, 1965).

6.5 Distúrbios ou efeitos de perfurações e carga hidráulica média (Hbl)

Ao se realizar uma perfuração numa rocha, é estabelecido um novo equilíbrio hidráulico entre as várias unidades hidrogeológicas intersectadas (ou mesmo fraturas), resultado da distribuição de cargas ao longo de suas descontinuidades rúpteis, de diferentes transmissividades e permeabilidades. Para ilustrar melhor este conceito, a Figura 4 apresenta um aquífero com fluxo predominantemente horizontal, sendo que entre zonas de fluxo ocorrem aquitardes limitando a componente vertical de fluxo, que neste caso é descendente (representando tipicamente uma zona de recarga). Em 4A, é representada a distribuição natural de cargas hidráulicas antes da perfuração de um poço. Após a perfuração, ocorre a conexão entre todas as unidades que intersectam o poço, de forma a interligar zonas com propriedades hidráulicas distintas.

Assim, após a perfuração do poço (4B), um novo estado de equilíbrio é então estabelecido: o nível d'água estático medido é conhecido como carga hidráulica média, ou *blended head* (Hbl), resultado do equilíbrio dinâmico entre as cargas hidráulicas e transmissividades individuais de cada fratura intersectada (Quinn *et al.*, 2015). Uma vez estabelecida a Hbl, as fraturas que apresentam carga individual maior fornecem água para o poço e as com cargas menores retiram a água. No exemplo da Figura 4, a zona superior fornece água para o poço e as três inferiores recebem essa água, resultando em um fluxo descendente.

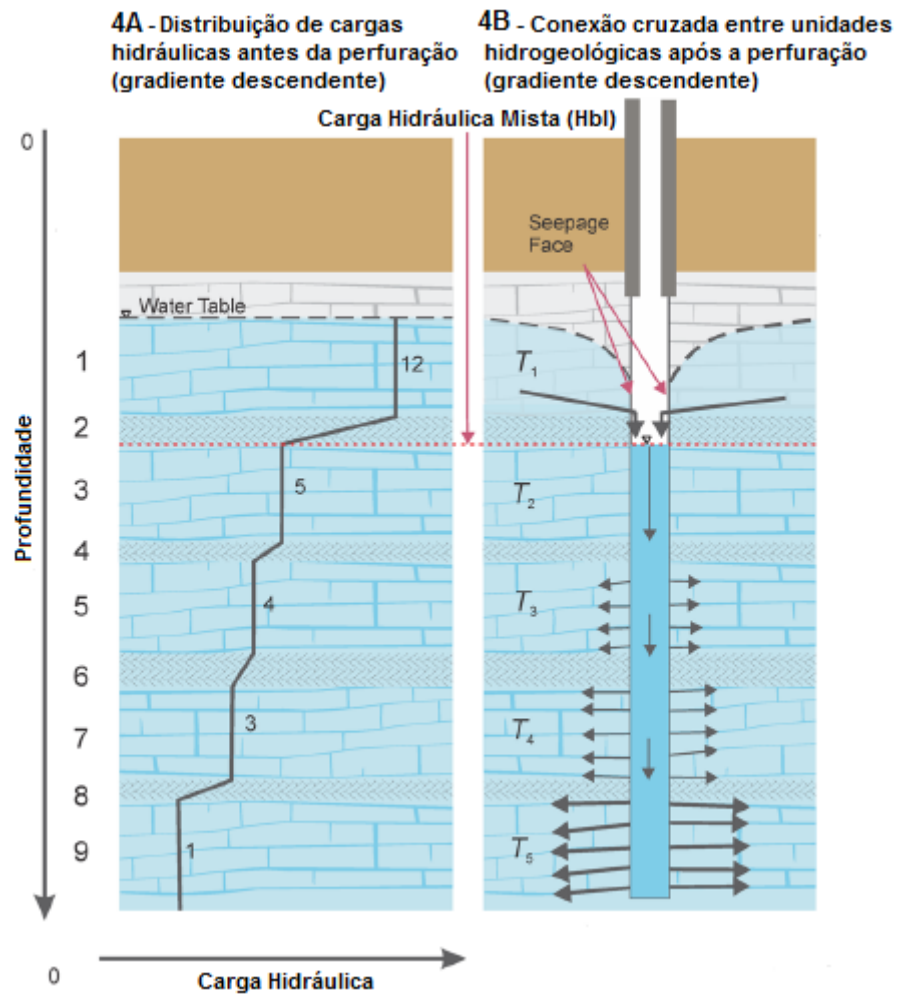


Figura 4. Configuração modelo, sob condições de gradiente descendente, na qual são descritas as situações antes da perfuração de um poço (8A), e após a perfuração (8B) (extraído de Quinn *et al.*, 2015).

A relação entre os valores de transmissividade das unidades hidrogeológicas e a carga hidráulica média é demonstrada através da equação de Thiem (Sokol, 1963), assumindo neste caso que o raio de influência (*radius of influence* (ROI)) é variável. Desta forma, utiliza-se a Equação 8 para a avaliação da influência do valor de transmissividade em trechos específicos de poços profundos, onde T corresponde à transmissividade, H equivale à carga hidráulica e C diz respeito a uma constante que varia com o raio de influência. O subscrito i se refere a um trecho específico do poço.

$$H_{BL} = \frac{\sum C_i T_i H_i}{\sum C_i T_i}$$

Equação 8. Solução da equação de Thiem (extraído de Sokol, 1963), utilizada para a avaliação do fluxo para dentro e fora do poço, assumindo o valor de ROI como variável.

Esta equação demonstra que o valor de Hbl em poços de aquíferos fraturados se aproxima do valor de carga hidráulica dos trechos que apresentam maiores transmissividades. Caso duas unidades hidrogeológicas de mesma transmissividade sejam conectadas com a

perfuração de um poço, o valor de Hbl estabelecido corresponderá então a uma média entre as cargas hidráulicas destas unidades.

6.6 Ensaios de campo

Para a determinação de parâmetros hidráulicos em poços profundos situados em aquíferos fraturados, existem uma série de ensaios que podem ser efetuados, por meio de equipamentos e procedimentos distintos. Assim sendo, além de testes de bombeamento simples, em poço aberto, este conjunto de ensaios inclui testes de fluxo, realizados com uma sonda conhecida como *heat-pulse flow meter* (HPF), e ensaios procedidos em trechos isolados por obturadores.

Testes de bombeamento simples são efetuados em um sistema aberto, de maneira a avaliar a resposta das fraturas ao bombeamento de água, resultado obtido da interação de várias fraturas com aberturas e cargas hidráulicas diferentes. Este procedimento tem a vantagem da obtenção de parâmetros *in-situ*, como condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento, representativos de um volume significativo de um aquífero, além de também possibilitar a investigação de fluxos verticais de água em aquíferos. Em situações práticas de campo, é comum a realização de um teste de bombeamento logo após a perfuração de um poço, a fim de determinar a capacidade de produção de água do poço e o rebaixamento do nível d'água. Estes parâmetros são utilizados para o estabelecimento de um projeto de poços que satisfaçam as necessidades de bombeamento, sem produzir rebaixamentos exorbitantes (Freeze e Cherry, 1979).

A utilização da sonda *heat-pulse flow meter* (HPF) possibilita a detecção de fluxos de água de pequenas magnitudes (entre 0,1 e 4 L/min) e diferenças de velocidade de até $1,6 \cdot 10^{-6}$ m/s (Hess, 1986), bem como a identificação de zonas hidráulicamente ativas. Uma possível abordagem para a avaliação do fluxo consiste em dividir o poço em uma série de camadas, de forma que a transmissividade obtida em cada camada corresponde a uma fração da transmissividade total do poço (Molz, 1989). Através da combinação da análise de perfis de fluxo obtidos em condições próximas à estabilidade com os valores de diferença de nível d'água medidos sob condições ambiente e sob bombeamento em situação próxima à estabilidade, pode-se estimar a transmissividade de zonas mais distantes do poço, ampliando a área de abrangência dos ensaios (Paillet, 2000).

Ensaios hidráulicos, envolvendo a injeção ou remoção de água em poços profundos para a obtenção dos valores de transmissividade são comumente realizados com a utilização de obturadores pneumáticos (*straddle packers*), de forma a isolar trechos específicos do poço. Estes ensaios são conhecidos como *packer tests* e são empregados para uma série de situações, como a caracterização de zonas de recarga subterrânea e de sítios contaminados (Maini, 1971; Quinn *et al.*, 2012). Em geral, são inseridos no poço um conjunto de dois obturadores, a fim de isolar um determinado intervalo. Em outros casos, é empregado apenas

um obturador, de maneira a avaliar a porção situada abaixo do obturador. Assim, uma série de intervalos isolados do poço é então submetida a ensaios, de forma a obter perfis verticais de transmissividade representativos de cada poço.

Quando os obturadores são inflados, um novo equilíbrio é gerado no poço, delimitando três segmentos distintos, separados pelos obturadores. Desta forma, são estabelecidos três valores de carga hidráulica, e o fluxo de água acima e abaixo dos obturadores é alterado. É importante ressaltar que a carga hidráulica medida nos intervalos isolados pelos obturadores não é necessariamente igual à carga existente antes da perfuração do poço. Esta condição de igualdade só é válida em casos nos quais o poço é intersectado por fraturas horizontais, sem qualquer conectividade vertical entre elas (Quinn *et al.*, 2015), e quando há um isolamento total com o obturadores e se aguarda o tempo necessário para a estabilização completa da carga. A instalação de obturadores em ensaios hidráulicos dificilmente proporciona o selamento total de determinados trechos de um poço, condição que pode ser alcançada mais facilmente através de um sistema multi-nível (MLS). Em poços profundos, conexões entre zonas isoladas por obturadores podem ocorrer por irregularidades entre os obturadores e a parede do poço, através de conexões cruzadas na rede de fraturas e na matriz. Esta situação de comunicação entre setores discriminados por obturadores é exemplificada na Figura 5.

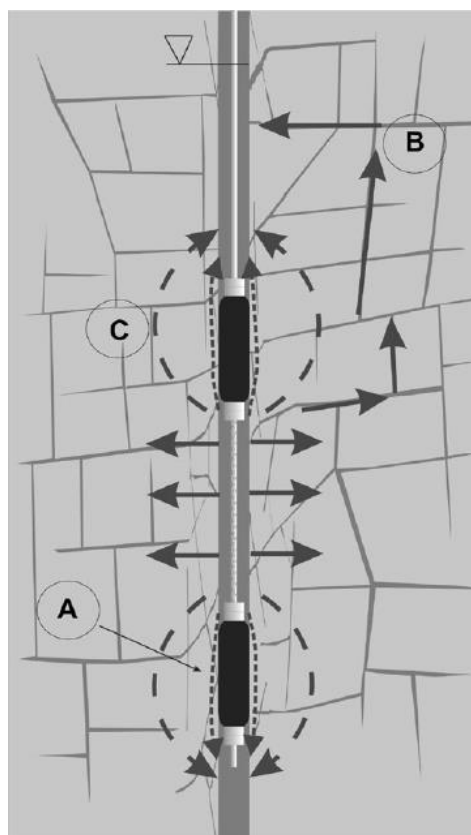


Figura 5. Três configurações de comunicação entre trechos separados por obturadores, sendo através de irregularidades entre os obturadores e a parede do poço (A), conexão cruzada na rede de fraturas (B) e através da matriz (C) (extraído de Quinn *et al.*, 2012).

7. MATERIAIS E MÉTODOS

7.1 Montagem do modelo

Durante a primeira etapa do trabalho, foi instalado em laboratório no Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas da Universidade de São Paulo (CEPAS) um tubo de acrílico, de forma a simular um poço profundo em ambiente de aquífero fraturado. O tubo possui 2,5 m de comprimento, 10 cm de diâmetro e 1 cm de espessura, com a base fechada por uma tampa de 10 cm de diâmetro por 1 cm de espessura. Nele, foram realizadas seis aberturas com rosca BSP de 12,7 mm, com a finalidade de simular diferentes fraturas e entradas e saídas de água. Nessas aberturas foram acoplados registros e mangueiras ligadas ao painel de controle. O tubo foi fixado no chão com um sistema articulado para inserir equipamentos (p.e. obturador pneumático), que podem ser movimentados por meio de um conjunto de roldanas fixadas no chão e no teto, instaladas com o auxílio de um pêndulo, a fim de que os instrumentos sejam inseridos de forma centralizada no tubo.

Foi também instalado um painel metálico para fixação dos equipamentos necessários para o trabalho. Estes equipamentos incluem mangueiras de polietileno translúcidas, com diâmetro de 12,7 mm, bem como conexões anilhadas, de aço inoxidável e latão, válvulas de agulha, válvulas de esfera, válvulas de retenção, conexões tripartidas, manômetros e medidores de vazão. As válvulas, de policloreto de polivinila (PVC) e aço inoxidável, apresentam roscas com diâmetro de 12,7 mm, e a junção de todas as mangueiras com os registros foi feita por meio de conexões de latão, anilhadas. Os manômetros instalados no painel tem visor com diâmetro de 6 cm e operam em faixas de pressão de até 10 metros de coluna d'água (ou *mca*). O medidor de vazão utilizado (modelo OMEGA FPR 300) detecta vazões na faixa de 0,0045 a 0,315 L/s, e suporta pressões de até 1000 KPa. Além destes, duas bombas hidráulicas foram também instaladas: uma delas atua com potência de 375 W, pressão máxima de 413,68 KPa, vazão de 0,5 L/s e tensão de alimentação 110/220 V (bivolt), enquanto a outra, que simula uma fratura de menor carga hidráulica, tem potência de 75 W, pressão máxima de 39,2 KPa, vazão de 75 L/s e tensão de alimentação 110 V. A bomba de menor potência opera submersa em um tanque com capacidade para 100 litros, enquanto que a bomba de maior potência capta água deste mesmo para o tubo de acrílico através de uma mangueira de polietileno. A instalação do conjunto de roldanas em laboratório e a disposição do painel, junto ao tubo de acrílico, são exibidas na Figura 6.

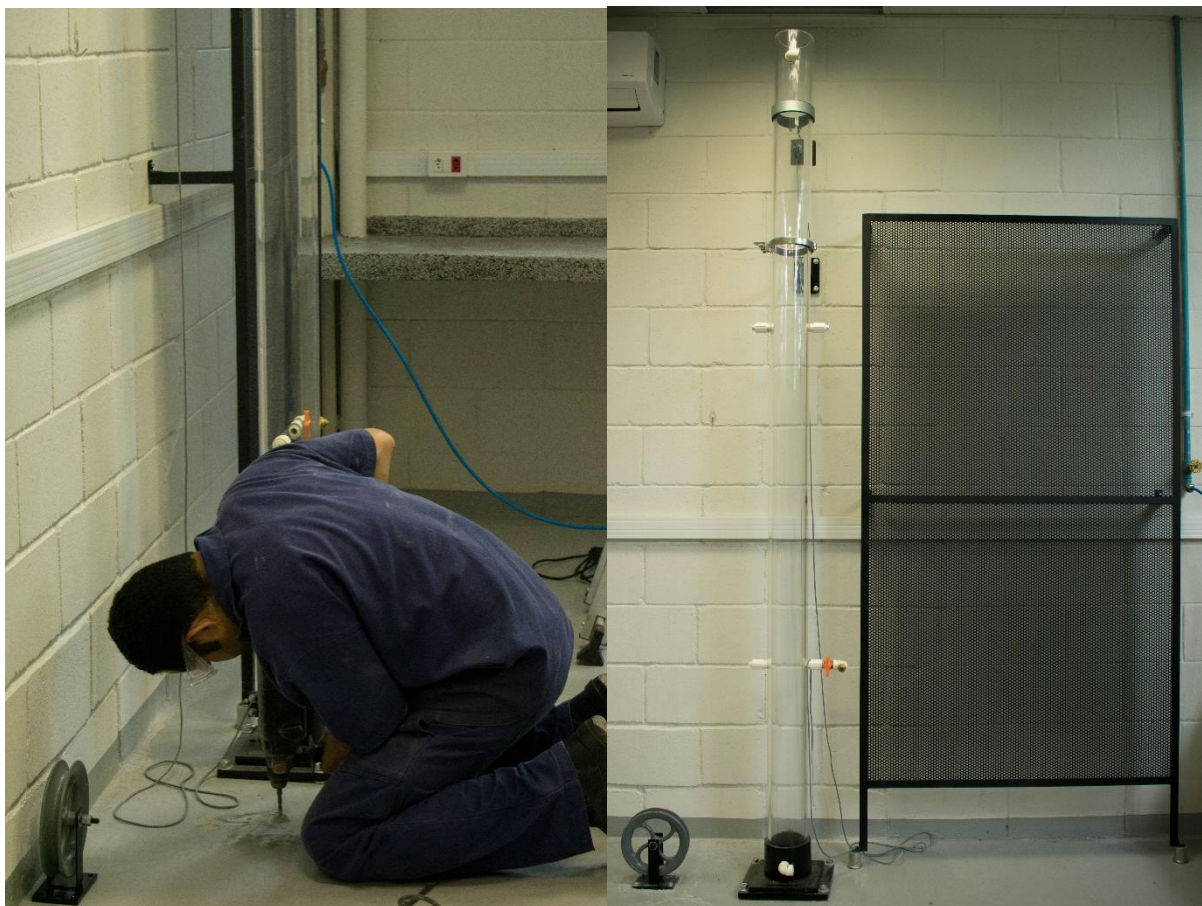


Figura 6: (esq.) Registro de instalação das roldanas em laboratório; (dir.) disposição do painel, junto ao tubo de acrílico.

Por fim, foi projetado e instalado junto ao painel um circuito de ar comprimido, responsável por inflar o obturador inserido dentro do tubo de acrílico. Este circuito começa com um registro já presente no CEPAS, por onde o ar comprimido é liberado. Assim, uma mangueira de poliuretano, com diâmetro de 3,175 mm foi conectada a este registro, de maneira a conduzir o ar até o obturador. Um manômetro também foi instalado em meio a este circuito, a fim de possibilitar maior precisão da pressão de ar liberada para o obturador. O manômetro possibilita a medição de pressões de até 140 *mca*, e tem visor com diâmetro de 6 cm. Este foi instalado junto a uma cruzeta (ou conector de quatro saídas), onde uma destas saídas foi ligada a um registro de esfera, com o intuito de permitir a liberação de ar e descompressão do sistema quando necessário. Todas as conexões entre as mangueiras, registros, cruzeta e obturador foram feitas através de engates rápidos, de diâmetros compatíveis com equipamentos instalados.

O funcionamento do modelo físico é ilustrado na Figura 7 e funciona da seguinte maneira: duas saídas do tubo de acrílico foram conectadas a mangueiras, de forma a simular a ocorrência de duas fraturas, com diferentes cargas hidráulicas. Cada uma destas mangueiras foi ligada a uma bomba hidráulica, que pressuriza de forma constante a linha, monitorada por manômetros e um medidor de vazão. O mesmo tanque abastece as duas bombas em um sistema fechado evitando-se o desperdício de água.

Após as bombas, foi instalada uma válvula de agulha, que permite a regulação do fluxo de água nas mangueiras, e uma válvula de retenção, impedindo o retorno da água pela linha da bomba. Também foram instaladas em pontos do circuito válvulas de esfera, com o intuito de abrir ou fechar trechos específicos do sistema. Assim, ao percorrer este conjunto de válvulas e medidores, a água passa por uma conexão tripartida, que conecta a mangueira pela qual a água vem das bombas com duas saídas para o tubo de acrílico. No lado oposto do tubo, foram conectados registros de esfera e mangueiras, que conduzem a água do tubo de volta para o reservatório de água, e também permitem a remoção de toda a água presente dentro do tubo.

O controle das válvulas de agulha permite a simulação de fraturas com diferentes aberturas, enquanto que o funcionamento das bombas em diferentes faixas de potência possibilita a execução de ensaios sob diversas condições de vazão e fluxo de água. Para a realização de testes, buscou-se fixar outras variáveis presentes no modelo, de maneira a produzir menores interferências nos resultados obtidos. Assim, a altura do nível de água no reservatório foi fixada em 0,45 metros, e as saídas das mangueiras que conduzem a água do tubo de volta para o reservatório foram fixadas em uma altura de 0,75 metros.

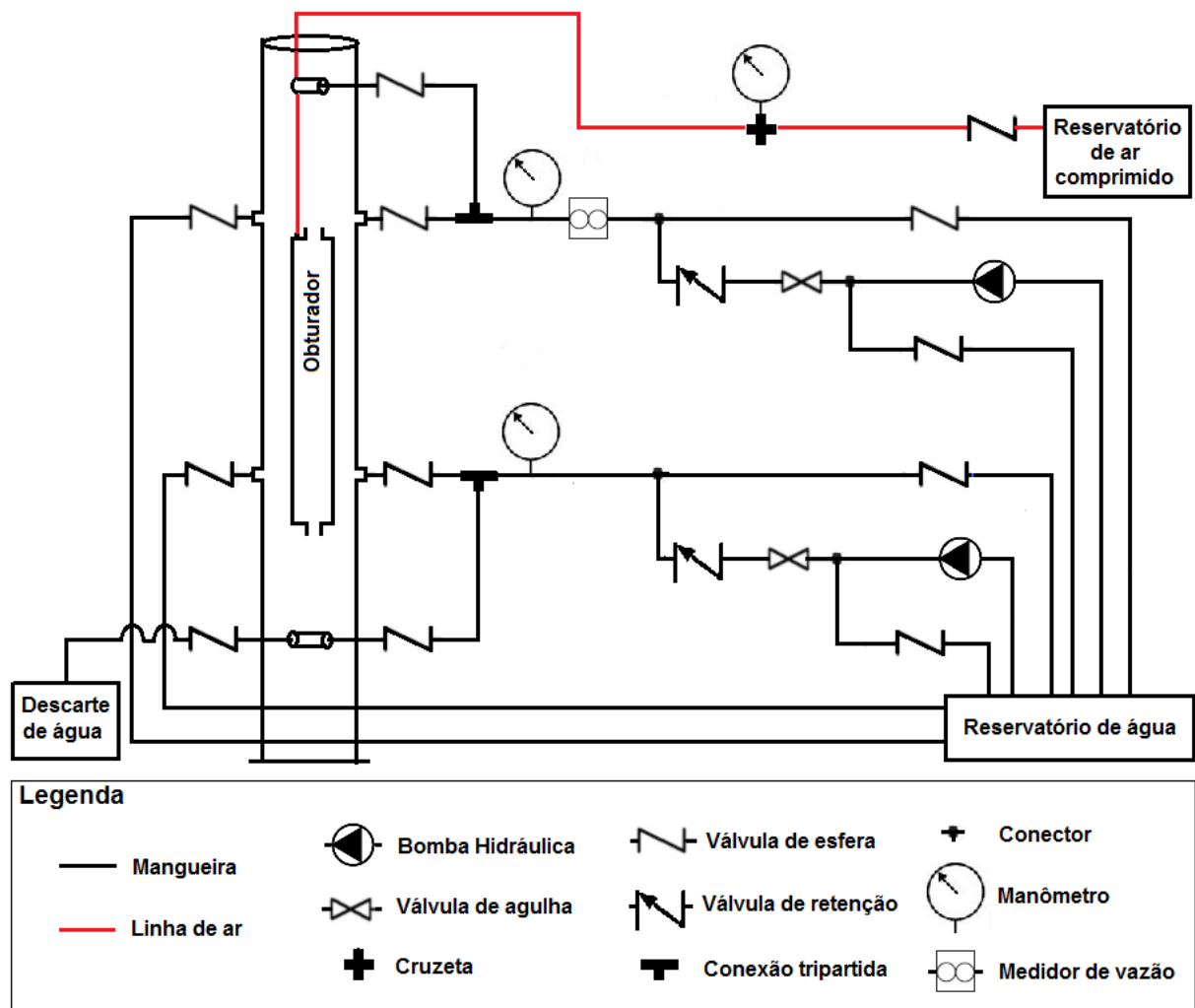


Figura 7. Esquema da configuração inicial dos equipamentos em laboratório, simulando um poço instalado em um aquífero fraturado, onde o conjunto de mangueiras representa duas fraturas, de diferentes transmissividades e cargas, por onde a água se movimenta.

7.2 Ensaios para calibração do medidor de vazão

Inicialmente, foram feitos ensaios para calibrar o medidor de vazão instalado no painel. Para isso, apenas a bomba hidráulica conectada ao conjunto superior de mangueiras foi acionada, e as saídas do tubo opostas às entradas de água foram fechadas, de maneira a simular uma situação onde a água impulsionada pela bomba percorre o conjunto superior de mangueiras (passando pelo medidor de vazão), entra no tubo de acrílico e retorna ao reservatório pelo conjunto inferior de mangueiras, conforme ilustrado na Figura 8.

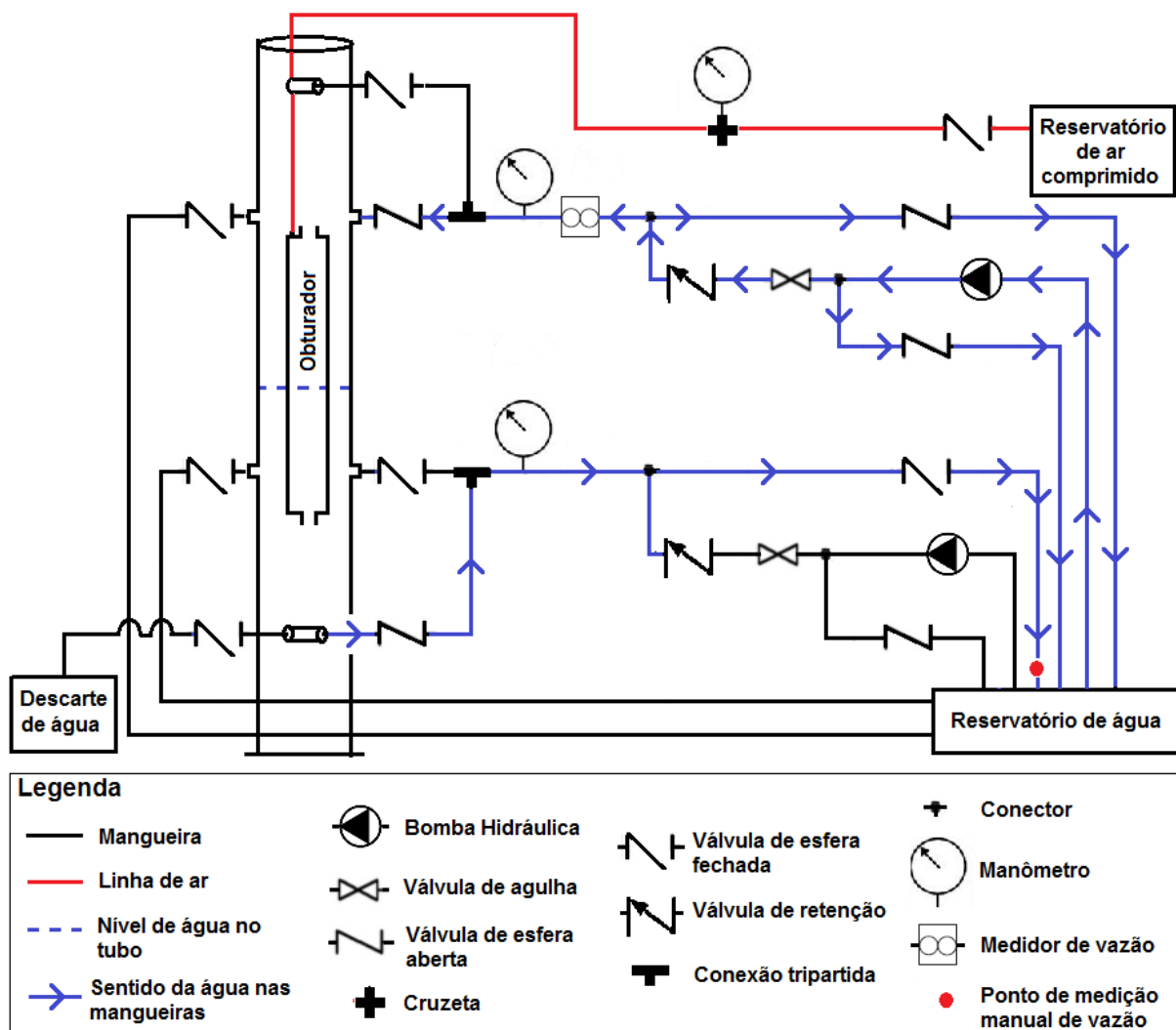


Figura 8. Configuração do sistema para calibração do medidor de vazão, onde a água do reservatório chega até o tubo pelo conjunto superior de mangueiras e retorna ao reservatório pelas mangueiras posicionadas na parte inferior do painel metálico.

Desta maneira, foram simuladas diversas condições de vazão e pressão (através do controle das válvulas de agulha), e em cada situação induzida foram feitas duas medições de vazão: uma através do medidor de vazão, na entrada de água superior do tubo, e outra manualmente, quando a água retorna ao reservatório pela mangueira inferior (posição indicada pelo ponto vermelho na Figura 8). A leitura de vazão pelo medidor instalado no painel foi feita através de um *data logger* (modelo CR10X – Campbell Scientific), que converte o sinal emitido pelo dispositivo em vazão, em um *software* (LoggerNet 4.3) instalado em computador. Assim, espera-se que ambas as leituras sejam iguais, de forma que se ajustou o fator multiplicador no LoggerNet para que o valor de entrada apresentado fosse igual à vazão medida manualmente. Os resultados são apresentados na Tabela 1 e Figura 9.

Vazão de entrada (FPR 300) (L/min)	Vazão de saída (L/min)
1,540	1,564
1,155	1,262
1,457	1,467
1,622	1,557
1,622	1,557
0,550	0,764
1,650	1,657
1,045	1,085
3,660	3,696
3,620	3,564
1,320	1,290
2,365	2,298

Tabela 1. Valores de vazão obtidos pelo medidor de vazão e medidos manualmente no retorno de água ao reservatório.

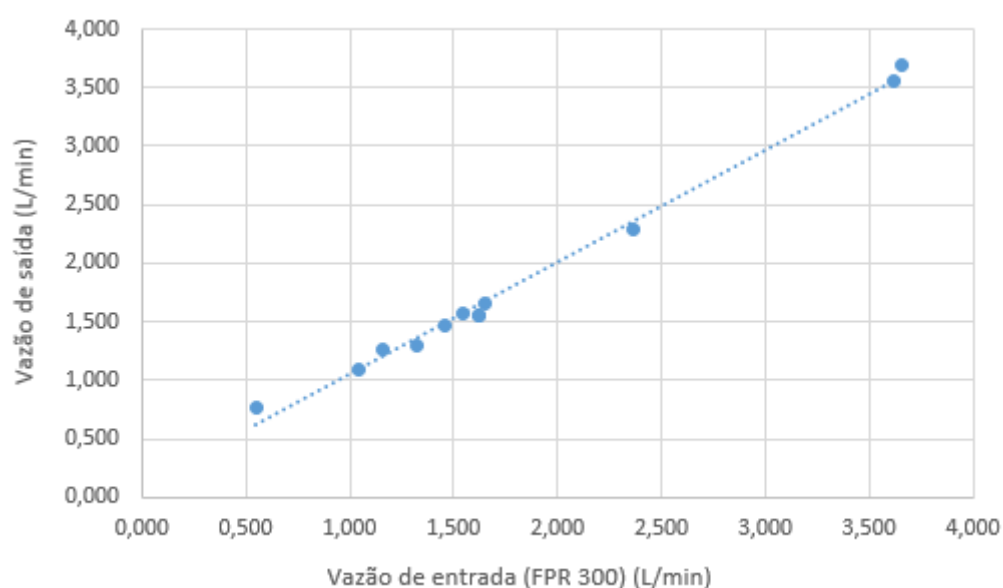


Figura 9. Gráfico que ilustra relação linear entre os valores de vazão apresentados na Tabela 1.

7.3 Ensaios preliminares

Nesta etapa, foram feitos testes nas duas fraturas separadamente, a fim de se estabelecer os níveis de referência no tubo, a partir dos quais pode-se observar uma variação na altura da coluna d'água equivalente à pressão de água indicada nos manômetros instalados. Nestes testes, foi registrada a altura da coluna d'água no tubo em diferentes situações de pressão. A regulagem de pressão foi feita através do controle das válvulas de agulha, que permitem um ajuste mais fino na abertura da linha, e os dados foram coletados após estabilização de todos os parâmetros do sistema.

Neste procedimento, todas as saídas de água do tubo foram fechadas, de tal forma que a situação de equilíbrio se dá quando a pressão exercida pela coluna de água sobre um ponto (situado no nível de referência) se iguala à pressão da água impulsionada pelas bombas hidráulicas. Assim, a variação de pressão indicada no manômetro da linha deve ser

correspondente à variação de altura da coluna d'água no tubo, de tal maneira que subtraindo o valor de pressão indicado no manômetro *mca* da altura de coluna d'água observada no tubo, determina-se o nível de referência para cada fratura.

7.4 Ensaios de fluxo simples

Nestes ensaios, com o obturador desinflado, foram testadas cada uma das fraturas, separadamente, a fim de se analisar a relação entre pressão e vazão no sistema. Assim, cada uma das bombas hidráulicas foi acionada, e os valores de pressão de água, altura da coluna de água no tubo e vazão de água foram coletados, após atingir a condição de estabilidade. As aberturas de entrada e saída de água do tubo foram mantidas constantes durante os ensaios, de forma que a variação de pressão foi induzida através da regulação da válvula de agulha e dos demais registros de esfera posicionados no painel. A Figura 10 esboça o funcionamento deste ensaio, de maneira a ilustrar todo o trajeto percorrido pela água no teste da linha inferior.

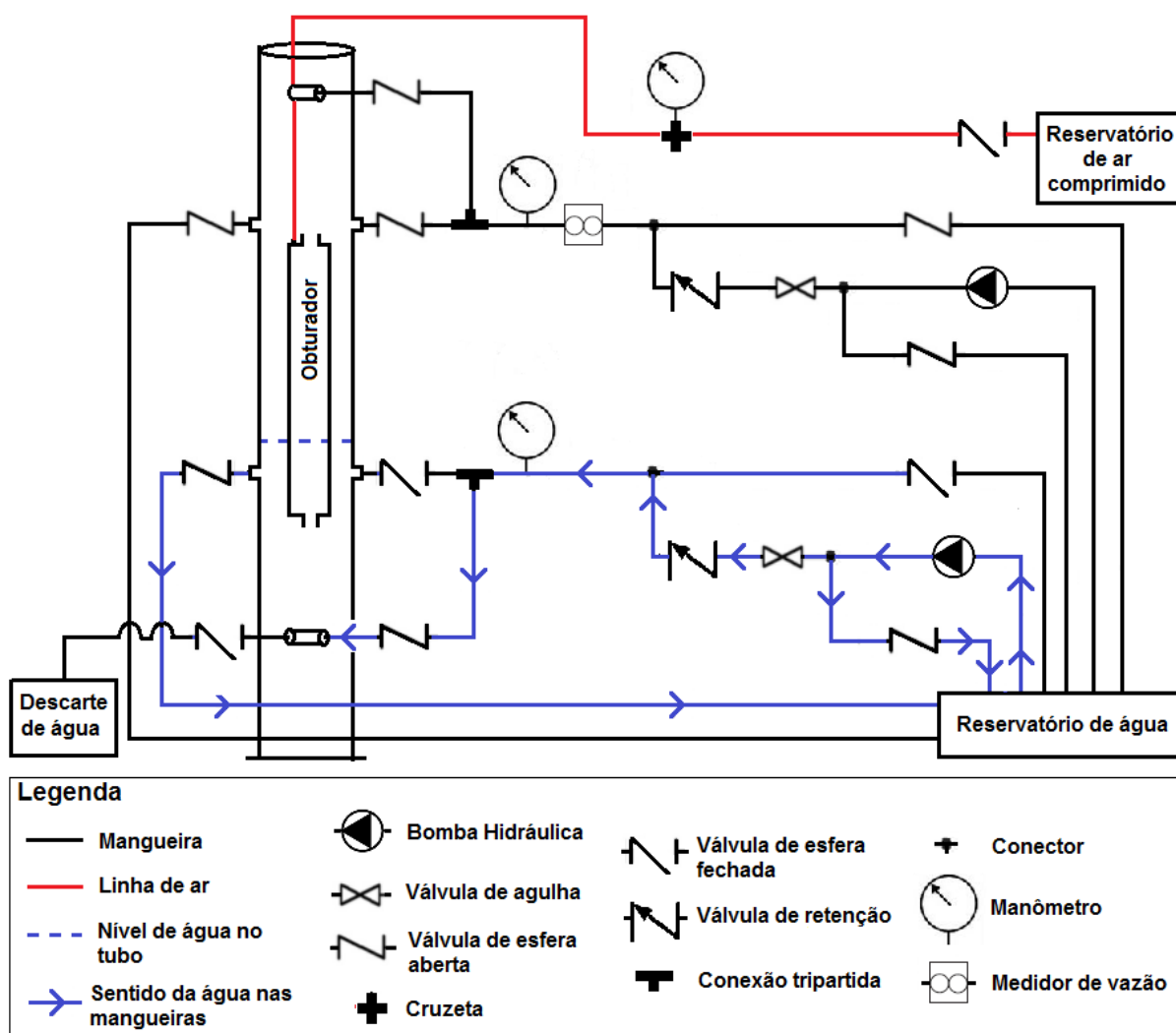


Figura 10. Exemplo de configuração do sistema para realização de ensaio preliminar, onde a água do reservatório que chega até o tubo é controlada através de válvulas de esfera e de agulha, e a abertura das válvulas de esfera posicionadas na entrada e saída do tubo é mantida constante durante todo o ensaio.

7.5 Ensaios de fluxo natural com duas fraturas

Nesta etapa, foram feitos ensaios divididos em duas partes: em um momento inicial, apenas a bomba hidráulica ligada ao conjunto superior de mangueiras foi acionada, de maneira que a água que entra no tubo retorna ao reservatório pelo conjunto inferior de mangueiras (configuração idêntica à Figura 8). Assim, com os parâmetros estabilizados, acionou-se a bomba hidráulica conectada à fratura inferior (Figura 11), a fim de visualizar como o aumento ou a redução de vazão da fratura inferior interfere na carga hidráulica resultante no tubo. Ao fim do processo, a bomba ligada à fratura inferior foi desligada e o sistema foi reiniciado nas condições estabelecidas inicialmente, com apenas uma fratura acionada. Então acionou-se novamente a fratura inferior, alterando-se a pressão induzida nesta, e os efeitos dessa mudança foram registrados. Para o cálculo dos potenciais de posição das fraturas, foram medidos os valores de 1,62 metros e 0,05 metros de altura das entradas de água no tubo para as fraturas superior e inferior, respectivamente.

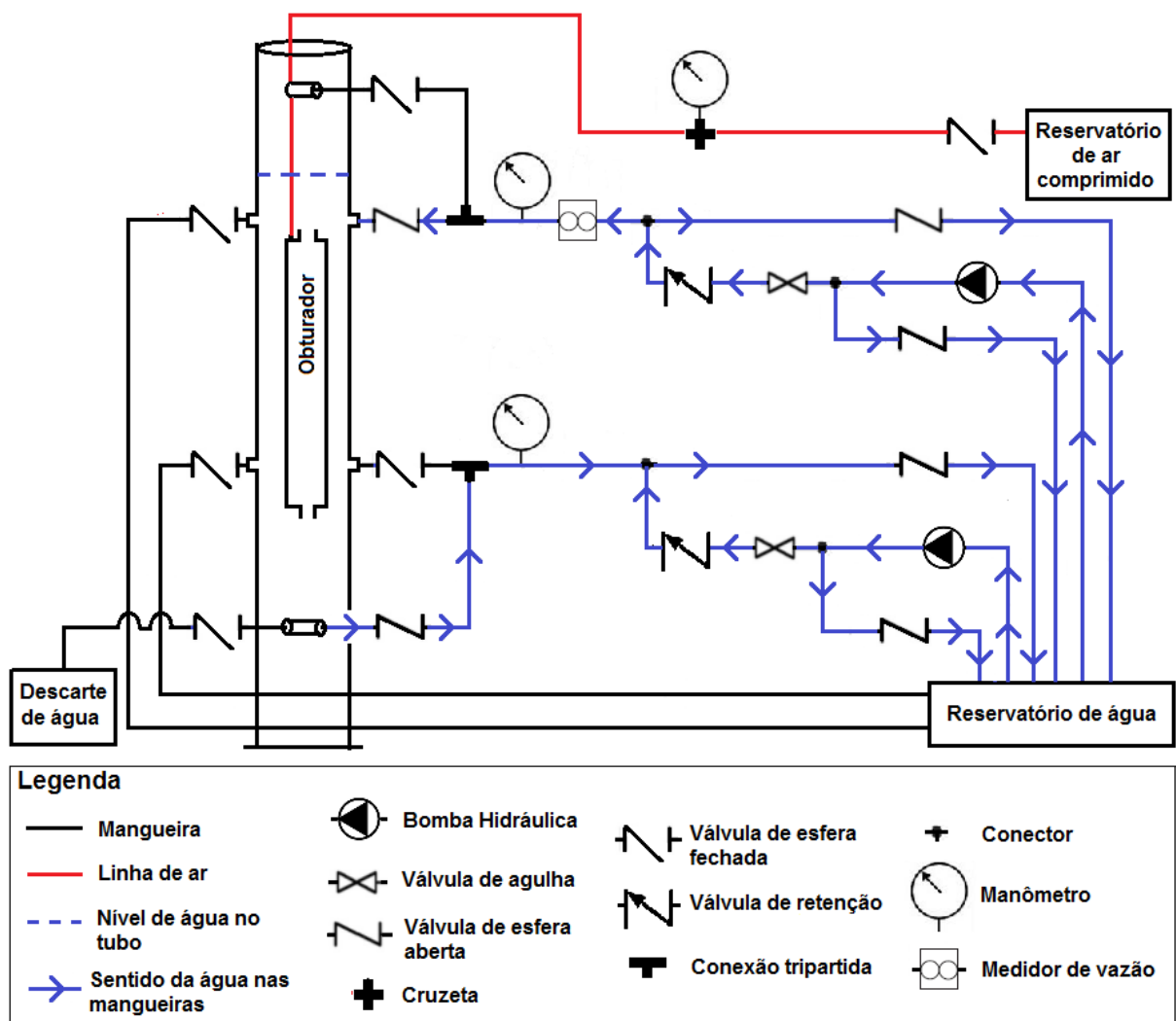


Figura 11. Exemplo de configuração do sistema para realização de ensaio de fluxo natural com duas fraturas, onde a água do reservatório chega até o tubo pela fratura superior, e retorna ao reservatório pela fratura inferior.

7.6 Ensaios com obturador pneumático

Nesta fase, foram realizados ensaios com um obturador pneumático, divididos também em duas etapas: inicialmente o obturador foi inflado (aplicando-se uma pressão de ar de aproximadamente 55 mca), e ambas as bombas hidráulicas foram ligadas. Após a estabilização das pressões e dos níveis de água no tubo, o obturador foi então desinflado, e os novos valores de pressão, vazão e coluna d'água foram registrados. Com isso, buscou-se inicialmente simular uma situação natural de aquífero fraturado, onde as fraturas apresentam-se isoladas. Com a depressurização do obturador, simula-se então a perfuração de um poço, que permite a comunicação entre as fraturas anteriormente isoladas. A Figura 12 esquematiza a configuração do sistema com o obturador inflado.

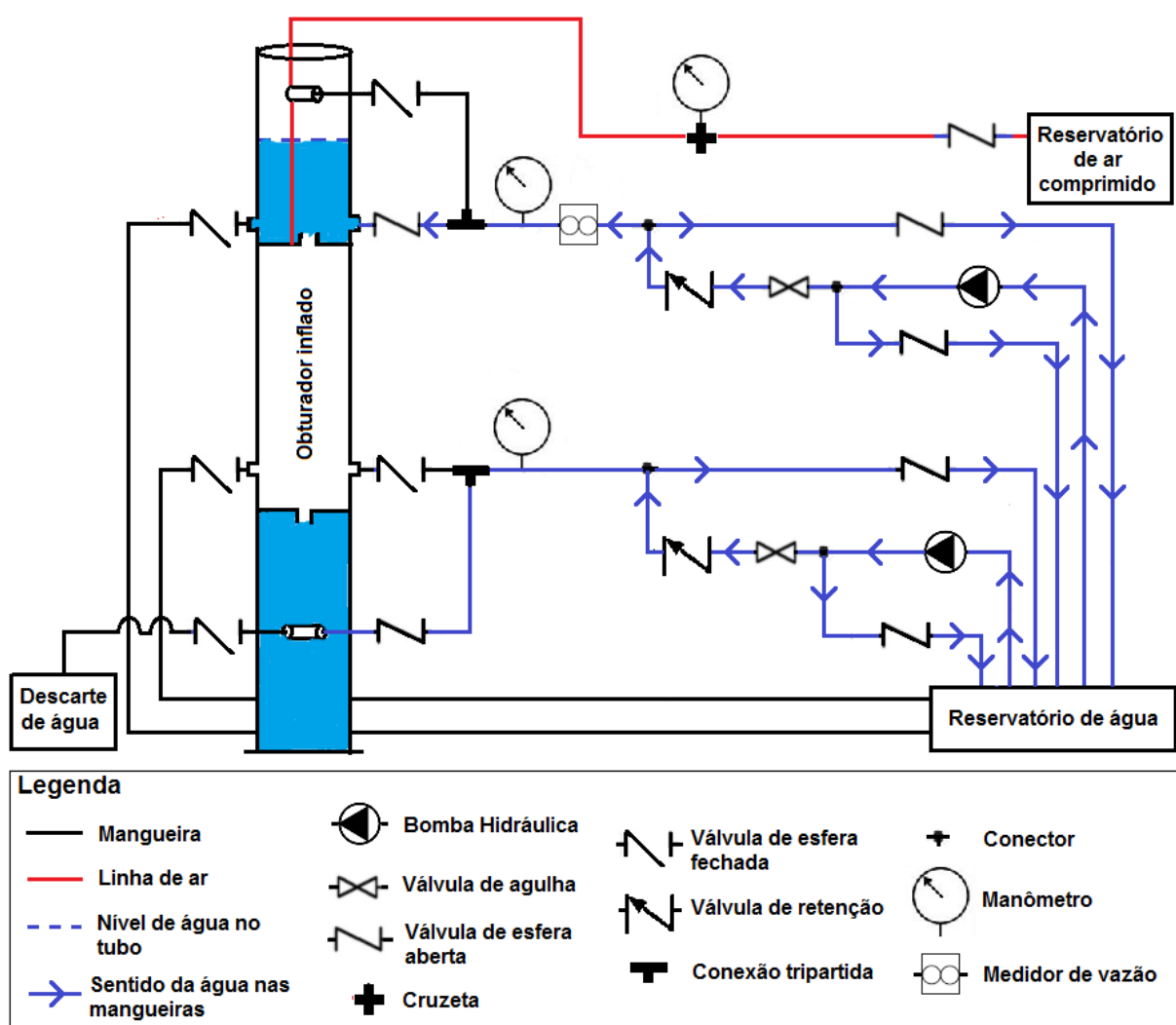


Figura 12. Configuração do sistema para realização de ensaio com obturador inflado, de forma que as fraturas não se comunicam, e são obtidos os valores de pressão e vazão para cada um dos setores isolados.

8. RESULTADOS

8.1 Apresentação

O modelo físico de um poço intersectado por duas fraturas (apresentado na Figura 13) funciona como o esperado, permitindo a simulação de diferentes condições hidráulicas neste meio. Através destes ensaios, pode-se visualizar como se dá a dinâmica da água dentro deste sistema, além de como a variação de fatores como pressão e vazão em cada uma das fraturas altera as condições de fluxo de água e carga hidráulica média obtida no tubo.



Figura 13. Configuração final do modelo elaborado em laboratório.

8.1.1 Ensaios preliminares

Através destes ensaios, foram coletados os valores de altura da coluna d'água no tubo, em diferentes condições de pressão indicadas no manômetro. Os valores obtidos na fratura superior e inferior são apresentados a seguir nas Tabelas 2 e 3, respectivamente, onde a bomba 1 corresponde àquela com pressão máxima de 4 mca, enquanto que a bomba 2 corresponde à bomba mais potente, com pressão máxima de 42,1 mca.

Fratura Superior			
	Pressão no manômetro (mca)	Altura da coluna d'água (metros)	Altura do nível de referência (metros)
Bomba 1	0,40	2,282	1,882
Bomba 1	0,49	2,391	1,901
Bomba 1	0,59	2,471	1,881
Bomba 2	0,40	2,288	1,888
Bomba 2	0,60	2,486	1,886

Tabela 2. Dados de pressão no manômetro, altura da coluna d'água registrada no tubo e altura correspondente ao nível de referência coletados em teste, para a fratura superior do modelo.

Fratura Inferior			
	Pressão no manômetro (mca)	Altura da coluna d'água (metros)	Altura do nível de referência (metros)
Bomba 1	0,61	1,937	1,327
Bomba 1	0,79	2,115	1,325
Bomba 2	0,42	1,768	1,348
Bomba 2	0,60	1,941	1,341

Tabela 3. Dados de pressão no manômetro, altura da coluna d'água registrada no tubo e altura correspondente ao nível de referência coletados em teste, para a fratura inferior do modelo.

Conforme os dados apresentados nas Tabelas 2 e 3, pode-se estabelecer níveis de referência no tubo de 1,887 e 1,335 para as fraturas superior e inferior, respectivamente. Visto que, assumindo estes níveis como *datum*, a variação de pressão é refletida na variação de altura do nível de água no tubo, os testes realizados demonstram a funcionalidade do modelo elaborado.

8.1.2 Ensaios de fluxo simples

Nestes ensaios, após a estabilização da pressão no manômetro e da altura da coluna d'água no tubo, a vazão de água que retorna ao reservatório foi medida. Nos ensaios

realizados na fratura inferior, a saída de água do tubo foi mantida totalmente aberta, enquanto que para a fratura superior esta saída estava apenas parcialmente aberta, de maneira a permitir a estabilização do nível de água no tubo. Os dados de pressão, vazão e altura da coluna de água foram registrados e são apresentados nas Tabelas 4 e 5.

Fratura Superior				
	Pressão no manômetro (mca)	Vazão (L/min)	Altura da coluna d'água (metros)	Altura da coluna d'água a partir do nível de referência (metros)
Bomba 2	0,80	1,781	2,451	0,564
Bomba 2	0,60	1,643	2,312	0,425
Bomba 2	0,40	1,523	2,126	0,239

Tabela 4. Valores de pressão, vazão e altura da coluna d'água para ensaio de fluxo simples na fratura superior, utilizando bomba com pressão máxima de 215,6 KPa, e com o registro de saída de água do tubo parcialmente aberto.

Fratura Inferior				
	Pressão no manômetro (mca)	Vazão (L/min)	Altura da coluna d'água (metros)	Altura da coluna d'água a partir do nível de referência (metros)
Bomba 1	1,20	4,054	1,866	0,531
Bomba 1	1,00	3,906	1,802	0,467
Bomba 1	0,80	3,688	1,696	0,361
Bomba 1	0,60	3,374	1,578	0,243
Bomba 1	0,40	3,020	1,457	0,122

Tabela 5. Valores de pressão, vazão e altura da coluna d'água para ensaio de fluxo simples na fratura inferior, utilizando bomba com pressão máxima de 39,2 KPa, e com o registro de saída de água do tubo totalmente aberto.

Desta maneira, pode-se evidenciar uma relação diretamente proporcional entre a pressão de água induzida na linha principal e a vazão de água medida nos retornos de água para o reservatório, bem como entre esta vazão e a altura de coluna d'água registrada no tubo. Estas relações para a fratura superior e inferior são demonstradas a seguir nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

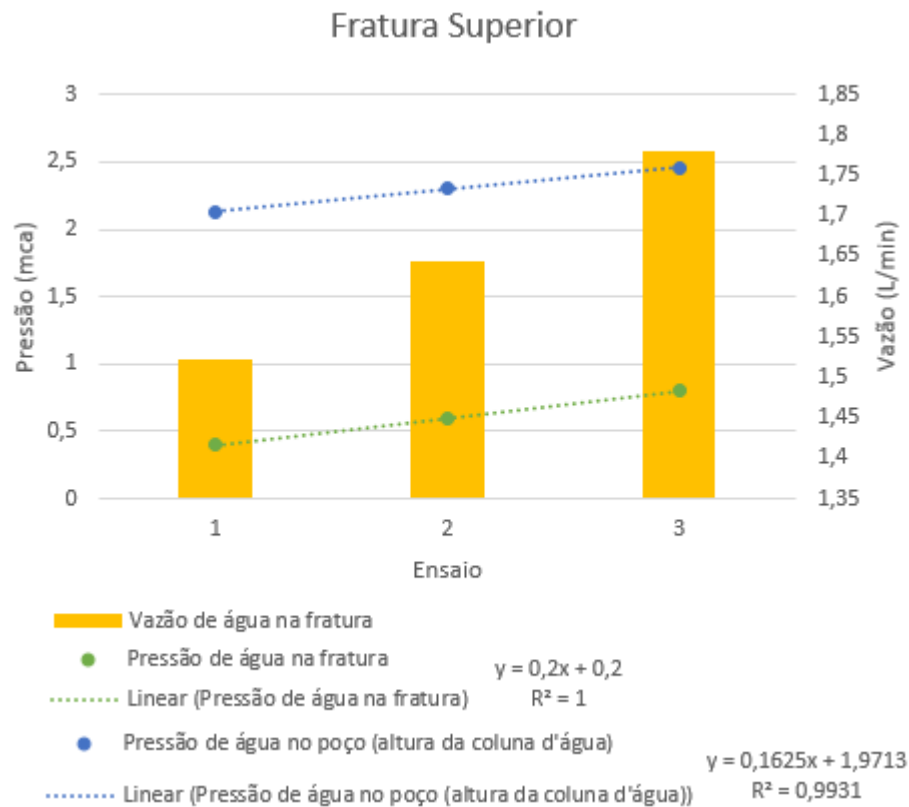


Figura 14. Gráfico de relações entre pressão, vazão e altura da coluna d'água estabelecidas em ensaio na fratura superior do modelo.

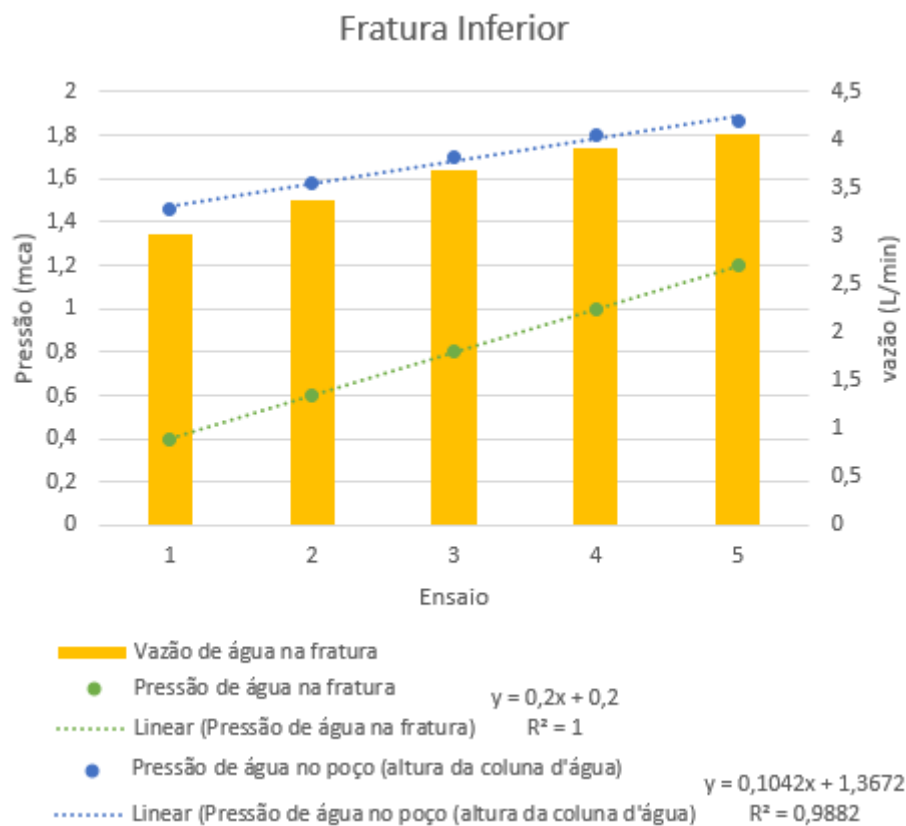


Figura 15. Gráfico de relações entre pressão, vazão e altura da coluna d'água estabelecidas em ensaio na fratura inferior do modelo.

Conforme ilustraram os gráficos apresentados, pode-se observar que as relações existentes entre a pressão nas mangueiras (fraturas), vazão de água no sistema e altura da coluna d'água no tubo são diretamente proporcionais, onde se constatou uma disposição linear dos pontos de pressão, vazão e altura de coluna d'água registrados. Além disto, as linhas de pressão de água nas fraturas e no poço tendem a ser paralelas, de forma que o incremento de pressão nas linhas resulta em um igual aumento de pressão no tubo. Na figura 14, as linhas apresentam-se praticamente paralelizadas, o que corrobora esta premissa; já na figura 15 as linhas apresentam uma leve diferença nos coeficientes angulares, o que pode ter sido causado por imprecisões tanto na medida de pressão indicada no manômetro quanto na medição de vazão.

8.1.3 Ensaios de fluxo natural com duas fraturas

Nesta etapa de ensaios, com a altura da coluna de água no tubo estabilizada em 2,47 metros, e com as pressões de 0,80 metros e 1,00 metros indicadas nos manômetros das fraturas superior e inferior, respectivamente, despejou-se diretamente da parte superior do tubo um corante, a fim de se obter um registro visual de como a água se movimentava dentro do sistema sob estas condições. Com isso, após cerca de um minuto pode-se notar que o conjunto de mangueiras que simula a fratura inferior estava tingido, indicando que a água estava chegando ao tubo através da fratura superior e retornava ao reservatório pela fratura inferior (como ilustrado na Figura 11). A Figura 16 registra a execução deste experimento em laboratório.



Figura 16. Experimento realizado onde após a estabilização do nível de água no tubo, com a operação simultânea das duas bombas hidráulicas, foi despejado um corante diretamente no tubo, de maneira a visualizar o trajeto percorrido pela água nesta situação.

Apesar de neste caso a indicação de pressão do manômetro superior ser ligeiramente menor que a do manômetro superior, verificou-se que a água retorna ao reservatório através do conjunto inferior de mangueiras, o que pode ser explicado devido à diferença de altura entre as fraturas. Assim, de acordo com a definição matemática de carga hidráulica (ilustrada na Figura 2), interpreta-se que o potencial de posição das fraturas neste caso têm mais peso na determinação das cargas hidráulicas do que o potencial de pressão das fraturas.

Tendo em mente esta dinâmica de fluxo, as Tabelas 6 e 7 apresentam os valores de pressão, vazão e altura da coluna d'água para situações de incremento de pressão na fratura inferior, partindo de uma determinada situação fixa sob a ação da fratura superior. Estes valores são também dispostos na Figura 17. Já a Tabela 8 indica os valores dos potenciais de posição e pressão de cada uma das fraturas, com as respectivas cargas hidráulicas calculadas.

FRATURA SUPERIOR				
Ensaio	Vazão de entrada superior (L/min)	Vazão de retorno ao reservatório (L/min)	Pressão da fratura superior (mca)	Altura da coluna d'água (metros)
1	0,907	0,937	-	0,969
2	0,907	0,937	-	0,969
3	0,907	0,937	-	0,969
4	0,907	0,937	-	0,969
(-) valores abaixo do limite de detecção do dispositivo utilizado				

Tabela 6. Valores de vazão, pressão e altura da coluna d'água do tubo para situação com apenas a fratura superior acionada.

FRATURA SUPERIOR + INFERIOR					
Ensaio	Vazão de entrada superior (L/min)	Vazão de retorno ao reservatório (L/min)	Pressão da fratura superior (mca)	Pressão da fratura inferior (mca)	Altura da coluna d'água (metros)
1	0,907	1,735	-	-	1,586
2	0,632	2,172	-	0,47	1,904
3	0,495	2,191	-	0,56	1,999
4	0,192	2,466	0,42	0,83	2,278
(-) valores abaixo do limite de detecção do dispositivo utilizado					

Tabela 7. Valores de vazão, pressão e altura da coluna d'água do tubo para situação com ambas as fraturas acionadas.

FRATURA SUPERIOR + INFERIOR						
Ensaio	Potencial de pressão da fratura superior (mca)	Potencial de posição da fratura superior (metros)	Carga hidráulica da fratura superior (mca)	Potencial de pressão da fratura inferior (mca)	Potencial de posição da fratura inferior (metros)	Carga hidráulica da fratura inferior (mca)
1	0,1*	1,62	1,72	0,1*	0,05	0,15
2	0,1*	1,62	1,72	0,47	0,05	0,52
3	0,1*	1,62	1,72	0,56	0,05	0,61
4	0,42	1,62	2,04	0,83	0,05	0,88

*: valor abaixo do limite de detecção dos manômetros utilizados, estimado em 0,1 mca.

Tabela 8. Valores de potencial de posição, potencial de pressão e carga hidráulica obtidos para cada uma das fraturas.

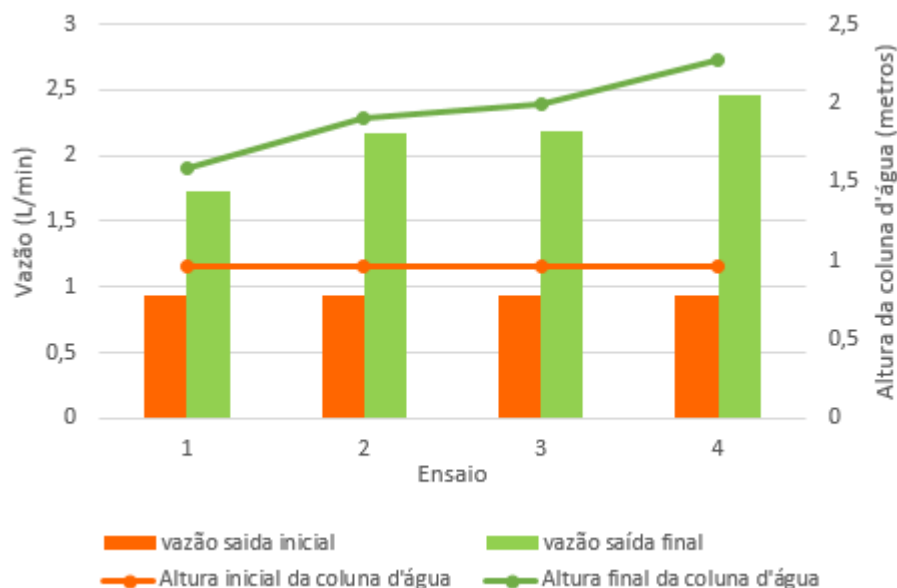


Figura 17. Gráfico que representa a variação de vazão de água no retorno do reservatório e a variação de altura da coluna d'água de uma situação inicial (apenas a fratura superior acionada) para uma situação final (fraturas superior e inferior acionadas).

Como indica a Tabela 8, apesar de nos ensaios as pressões serem maiores na fratura inferior, os potenciais de posição das fraturas desempenham um papel preponderante para a determinação da diferença de cargas hidráulicas das fraturas. Visto que o fluxo se dá de locais de maior carga para pontos de menor carga hidráulica, a diferença de cargas observadas entre as fraturas nos ensaios justifica a dinâmica de fluxo de água descrita na Figura 16.

Assim, como ilustrado na Figura 17, na situação inicial a vazão do sistema é estabilizada em 0,937 L/min, e a altura da coluna d'água estabilizada no tubo em 0,969 metros. Acionando a fratura inferior, verifica-se que a nova altura de coluna d'água estabelecida responde de forma proporcional ao aumento de vazão induzida na fratura inferior. Além disto, com o aumento da pressão na fratura inferior e o consequente aumento da coluna d'água, o valor de vazão de entrada de água pela fratura superior diminui, o que pode ser explicado pela Equação de Bernoulli, visto que com apenas a fratura superior acionada, era estabelecido um gradiente de pressão entre a carga hidráulica da fratura e a pressão atmosférica. Com a ativação da fratura inferior, a pressão exercida pela coluna d'água é maior, o que faz com que o valor de vazão de entrada se reduza.

Da mesma forma, foi simulada uma situação onde, a partir de uma vazão fixa de entrada de água pela fratura superior, acionou-se a fratura inferior, mas desta vez com pressões progressivamente menores. Os valores são apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11, e na Figura 18.

FRATURA SUPERIOR				
Ensaio	Vazão de entrada superior (L/min)	Vazão de retorno ao reservatório (L/min)	Pressão da fratura superior (mca)	Altura da coluna d'água (metros)
5	0,491	0,44	-	0,771
6	0,491	0,44	-	0,771
7	0,491	0,44	-	0,771
8	0,491	0,44	-	0,771
(-) valores abaixo do limite de detecção do dispositivo utilizado				

Tabela 9. Valores de vazão, pressão e altura da coluna d'água do tubo para situação com apenas a fratura superior acionada.

FRATURA SUPERIOR + INFERIOR					
Ensaio	Vazão de entrada superior (L/min)	Vazão de retorno ao reservatório (L/min)	Pressão da fratura superior (mca)	Pressão da fratura inferior (mca)	Altura da coluna d'água (metros)
5	0	2,584	-	0,65	2,425
6	0,22	2,147	-	0,5	1,861
7	0,385	1,715	-	-	1,419
8	0,385	1,345	-	-	1,122
(-) valores abaixo do limite de detecção do dispositivo utilizado					

Tabela 10. Valores de vazão, pressão e altura da coluna d'água do tubo para situação com ambas as fraturas acionadas.

FRATURA SUPERIOR + INFERIOR						
Ensaio	Potencial de pressão da fratura superior (mca)	Potencial de posição da fratura superior (metros)	Carga hidráulica da fratura superior (mca)	Potencial de pressão da fratura inferior (mca)	Potencial de posição da fratura inferior (metros)	Carga hidráulica da fratura inferior (mca)
5	0,1*	1,62	1,72	0,65	0,05	0,70
6	0,1*	1,62	1,72	0,50	0,05	0,55
7	0,1*	1,62	1,72	0,1*	0,05	0,15
8	0,1*	1,62	1,72	0,1*	0,05	0,15
*: valor abaixo do limite de detecção dos manômetros utilizados, estimado em 0,1 mca.						

Tabela 11. Valores de potencial de posição, potencial de pressão e carga hidráulica obtidos para cada uma das fraturas.

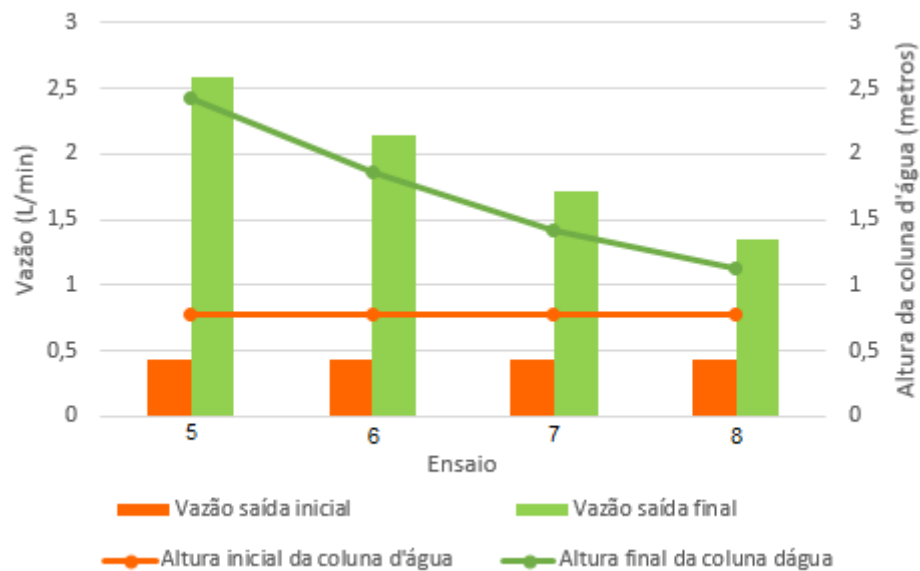


Figura 18. Gráfico que representa a variação de vazão de água no retorno do reservatório e a variação de altura da coluna d'água de uma situação inicial (apenas a fratura superior acionada) para uma situação final (fraturas superior e inferior acionadas).

Novamente, a Figura 18 indica que, a partir de uma situação inicial fixa (vazão de 0,44 L/min e altura da coluna d'água de 0,771 metros), os valores de vazão e altura de coluna d'água obtidos com a ação das duas fraturas juntas são compatíveis entre si. Os valores de potenciais de posição e pressão descritos na Tabela 11 seguem o mesmo comportamento observado nos ensaios 1 a 4 (Tabela 8), de maneira que a dinâmica de fluxo no modelo não foi modificada.

8.1.4 Ensaios com obturador pneumático

A fim de avaliar a eficiência do obturador pneumático instalado dentro do tubo de acrílico, despejou-se um corante na base do tubo. Em seguida, inflou-se o obturador, e então ambas as bombas hidráulicas foram acionadas. A execução deste teste é ilustrada a seguir, na Figura 19.

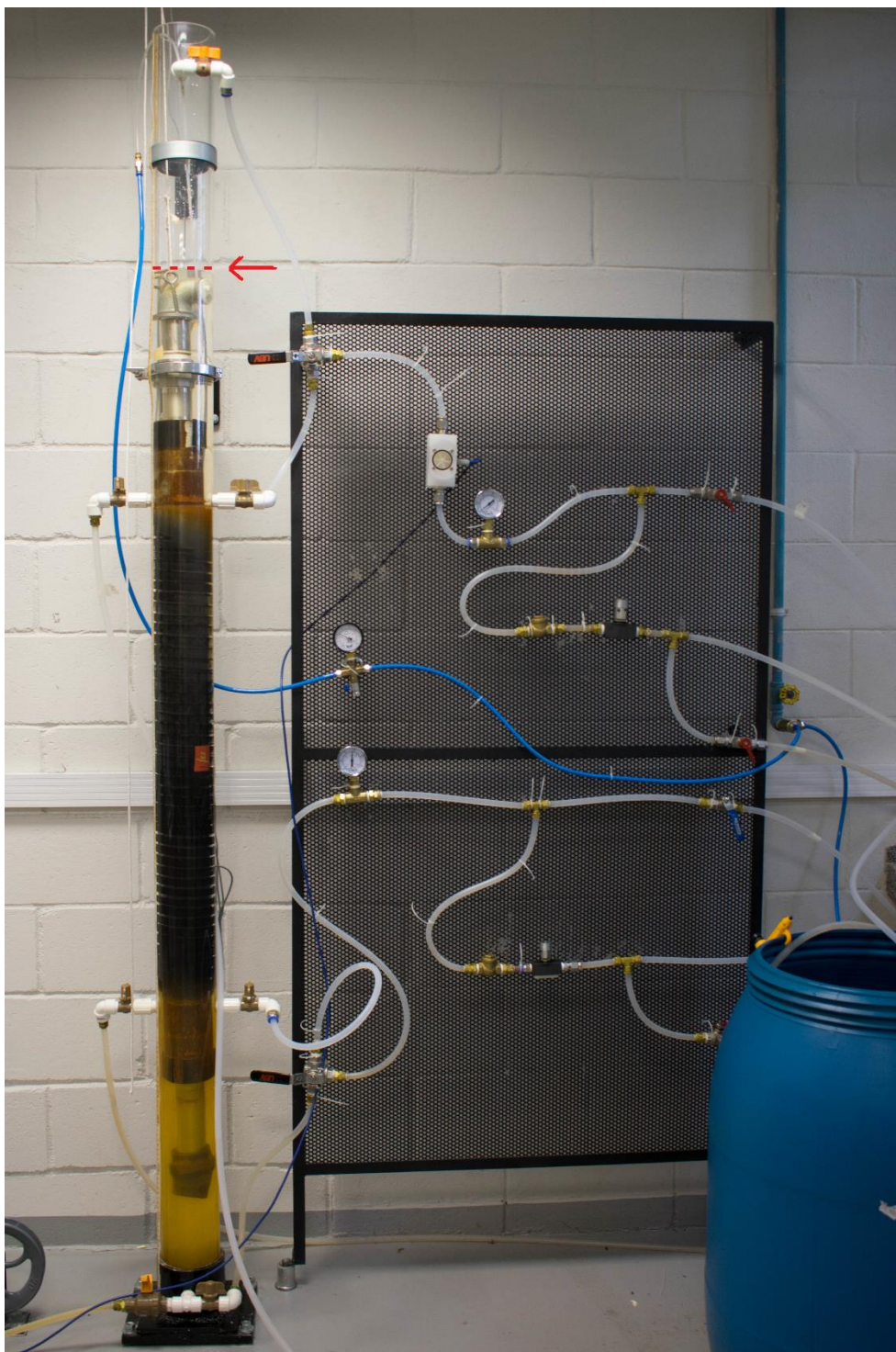


Figura 19. Realização de teste, onde foi despejado um corante na base do tubo, antes de inflar o obturador. A seta vermelha indica o nível de água estabilizado na porção isolada acima do obturador.

A Figura 19 indica que o obturador foi eficiente em isolar as duas fraturas simuladas no modelo, de maneira que o corante amarelado não alcançou a porção superior do tubo. Assim, a Tabela 12 apresenta os valores de pressão, vazão e altura da coluna d'água para cada uma das fraturas, quando estas apresentam-se isoladas pelo obturador, e a Tabela 13 apresenta os valores destes parâmetros quando este é desinflado.

FRATURAS SEPARADAS (SITUAÇÃO INICIAL)						
Ensaio	Pressão de ar no obturador (mca)	FRATURA SUPERIOR			FRATURA INFERIOR	
		Pressão da fratura superior (mca)	Vazão de água no retorno para o reservatório (L/min)	Altura da coluna d'água (metros)	Pressão da fratura inferior (mca)	Vazão de água no retorno para o reservatório (L/min)
1	60	0,45	3,88	2,232	0,63	2,440
2	55	0,45	3,88	2,232	1,13	2,752
3	55	0,45	3,88	2,232	1,25	2,798

Tabela 12. Valores de pressão, vazão e altura da coluna d'água numa situação inicial, com o obturador inflado e as fraturas isoladas.

FRATURAS CONECTADAS (SITUAÇÃO FINAL)						
Ensaio	Pressão de ar no obturador (mca)	FRATURA SUPERIOR		FRATURA INFERIOR		Altura final da coluna d'água (metros)
		Pressão na fratura superior (mca)	Vazão de água no retorno para o reservatório (L/min)	Pressão na fratura inferior (mca)	Vazão de água no retorno para o reservatório (L/min)	
1	0	-	3,795	0,58	2,688	2,248
2	0	-	3,834	1,01	2,948	2,402
3	0	-	3,866	1,1	3,022	2,485

Tabela 13. Valores de pressão, vazão e altura da coluna d'água numa situação final, após a despressurização do obturador, causando a conexão entre as fraturas.

Desta maneira, os dados foram ilustrados nas Figuras 20 e 21. Na Figura 20, se buscou demonstrar como a despressurização interfere nos valores de pressão na fratura inferior, e como estes novos valores de pressão refletem na variação do nível de água estabilizado no tubo de acrílico. Pode-se verificar que, partindo de uma situação inicial fixa na fratura superior e aumentando apenas a pressão na fratura inferior, a altura da coluna d'água resultante da interação entre as duas fraturas aumenta de forma compatível com o aumento da pressão induzido na fratura inferior.

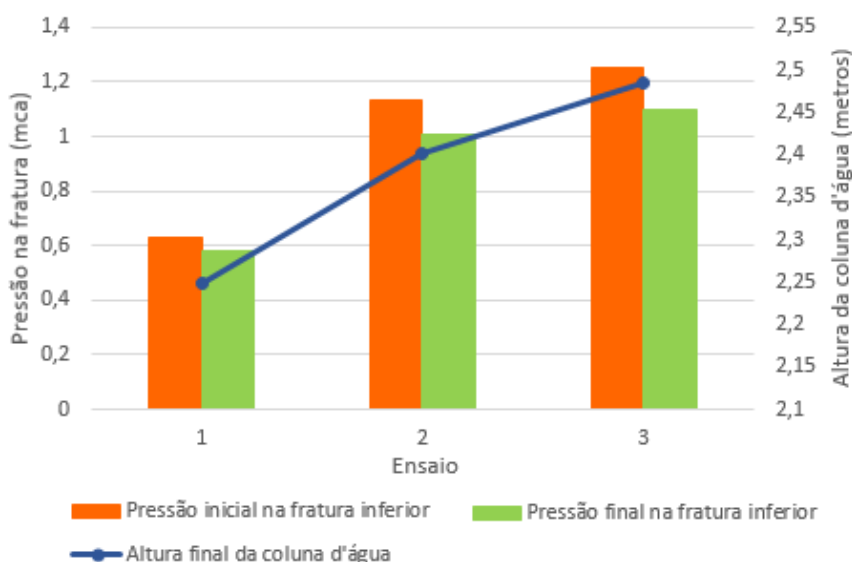


Figura 20. Gráfico que ilustra a variação de pressão na fratura inferior entre as etapas inicial (obturador inflado) e final (obturador desinflado) dos ensaios, e como esta variação influencia a altura da coluna d'água estabelecida ao final do ensaio.

Em relação à fratura superior, com a despressurização o valor de pressão fica abaixo do limite de detecção do manômetro instalado. Então, buscou-se demonstrar na Figura 21 como a variação da vazão de água no retorno superior ao reservatório se relaciona com a variação do nível de água resultante no tubo de acrílico.

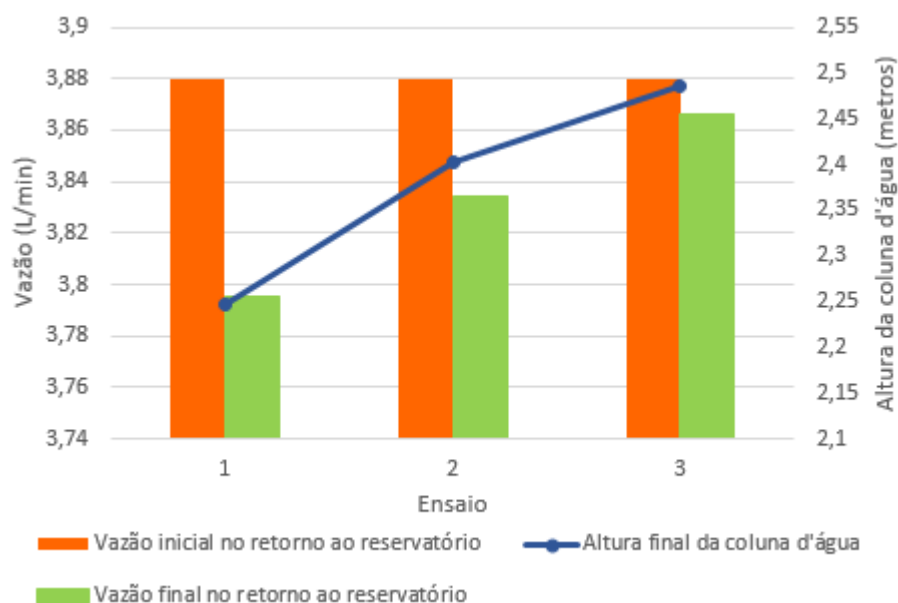


Figura 21. Gráfico que ilustra a variação de vazão no retorno superior para o reservatório entre as etapas inicial (obturador inflado) e final (obturador desinflado) dos ensaios, e como esta variação influencia a altura da coluna d'água estabelecida ao final do ensaio.

Assim, a Figura 21 ilustra que, partindo de uma situação inicial onde a vazão é fixa, a despressurização do obturador proporciona uma queda deste valor, e a aplicação de pressões progressivamente maiores na fratura inferior gera um aumento progressivo deste valor final de vazão, de tal modo que este aumento de vazão acompanha o aumento da coluna d'água resultante no tubo.

8.2 Comentários críticos e eventuais dificuldades

Em função de limitações do modelo, não foi possível realizar ensaios com ambas as fraturas e pressões significativas na fratura superior sem que a altura da coluna d'água resultante ultrapassasse o limite de 2,5 metros de altura do tubo. Além disto, para maior controle das variáveis no sistema, se mostrou necessária a instalação de manômetros nas mangueiras de retorno para o reservatório.

Com a realização dos ensaios de fluxo natural com as duas fraturas acionadas, se buscou avaliar matematicamente os valores de pressão e vazão obtidos através da Equação de *Blended Head* (Equação 8). Assim, o valor da constante C presente nesta equação segue a seguinte relação (Equação 9):

$$C = \left(\frac{2\pi}{\ln \left[\frac{r_o}{r_w} \right]_i} \right)$$

Equação 9. Definição da constante C utilizada para cálculo da blended head (Hbl), em função do raio do poço e do raio de influência (extraído de Quinn et al., 2015).

Assim, r_w corresponde ao raio do tubo e r_o se relaciona ao raio de influência da variação de carga hidráulica. Devido à perdas excessivas de carga hidráulica por fricção em zonas menos transmissíveis, é tido que o valor do raio de influência é maior para zonas mais transmissíveis (Quinn et al., 2015). Desta forma, o valor de C foi estimado, variando o valor de r_o de 1 a 100. Os resultados são ilustrados na Figura 22:

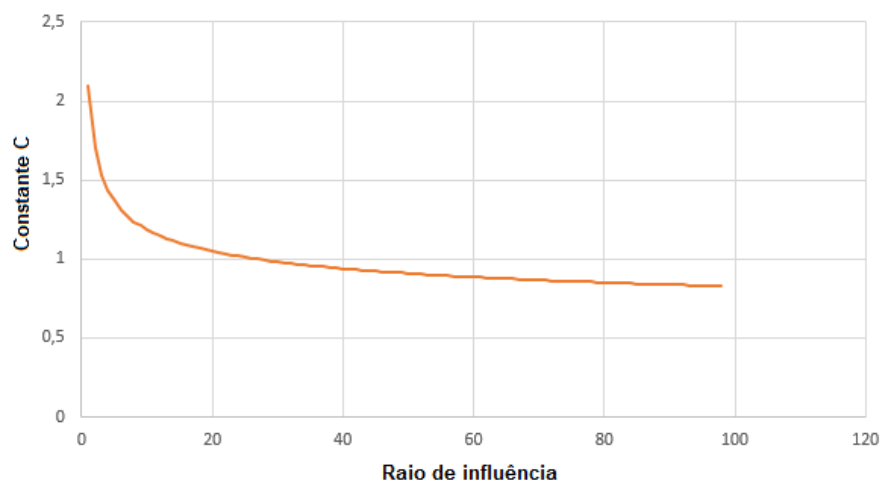


Figura 22. Valor da constante C (Equação 9), em função da variação de 1 a 100 do raio de influência.

Os resultados obtidos na Figura 22 indicam que o valor da constante C alcança valores maiores quando o raio de influência é menor. Desta maneira, seguindo a premissa de que r_o é menor para unidades menos transmissíveis, buscou-se avaliar segundo a Equação 8 se os valores de carga hidráulica média calculados eram compatíveis com os níveis de água medidos nos ensaios. Com isso, notou-se que os valores obtidos matematicamente eram distintos dos valores medidos em laboratório, de tal forma que interpretou-se que esta incompatibilidade é decorrente de algumas adaptações feitas em laboratório, como por exemplo a utilização de mangueiras cilíndricas para simular fraturas (planos de descontinuidade, por vezes irregulares). Desta maneira, não foi possível prosseguir com a avaliação matemática (por meio da Equação 8) dos dados obtidos.

9. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Através dos ensaios realizados, foram simuladas diversas condições dentro de um ambiente onde o fluxo de água é governado por uma ou duas fraturas hidráulicamente ativas. Partindo dos primeiros testes, onde cada uma das fraturas foi estudada separadamente, pode-

se visualizar como se dá a estabilização de cargas para cada uma das fraturas, ao modo que foram demarcados no tubo de acrílico os níveis a partir dos quais pode-se verificar uma variação de pressão correspondente à variação de pressão indicada nas fraturas.

Todavia, quando ambas as fraturas estão ativas, são estabelecidas novas condições de equilíbrio no sistema. Pode-se evidenciar que pressão e vazão se relacionam de forma diretamente proporcional, tanto em um cenário onde apenas uma das fraturas é ativa quanto em uma situação onde ambas as fraturas são acionadas. Por sua vez, a regulação de pressão e vazão nas mangueiras (feita através do ajuste dos registros instalados) se reflete na variação da carga hidráulica resultante no tubo, produto da interação entre os dois conjuntos de mangueiras. Devido à diferença de altura entre as fraturas, pode-se visualizar no modelo que a dinâmica de águas é dada de tal forma que a água tende a chegar até o tubo pela fratura superior, e retorna ao reservatório pela fratura inferior. O componente gravitacional da equação de Bernoulli desempenha fundamental papel nesta dinâmica, assim como o componente elástico, que trata das diferenças de pressão em cada uma das fraturas.

Por fim, os ensaios com o obturador pneumático permitiram visualizar que este de fato foi eficiente em isolar os trechos do tubo, e os resultados obtidos nesta fase de testes indicam que, ao desinflar o obturador e proporcionar a comunicação entre as fraturas, é estabelecido um novo equilíbrio hidráulico no tubo.

10. CONCLUSÕES

A construção do modelo físico de um poço intersectado por duas fraturas constitui uma importante ferramenta para auxiliar na compreensão dos mecanismos e fatores que governam o movimento da água em sistemas fraturados. A partir deste modelo é possível visualizar os efeitos que a perfuração de um poço provoca neste tipo de aquífero.

Durante os ensaios, foi possível observar como a abertura das fraturas, a pressão e a vazão têm influência direta na determinação da carga hidráulica média no tubo. Estes parâmetros têm um comportamento esperado, de forma que as variações de pressão e vazão se refletem na carga hidráulica resultante no tubo. Acionando-se ambas as fraturas, pode-se visualizar como as diferenças de potencial gravitacional e elástico entre as fraturas influenciam na dinâmica de fluxo de água dentro do sistema.

Os ensaios realizados com o obturador pneumático permitiram a simulação de um cenário natural, antes da perfuração de um poço, de maneira que a sua despressurização proporciona a conexão das fraturas por meio do tubo, e um novo equilíbrio hidráulico é então estabelecido.

Por fim, o modelo também foi empregado para a verificação da eficiência dos equipamentos utilizados em campo, como o obturador pneumático, e desta maneira pode ser utilizado para simular ensaios de campo, de forma a facilitar a visualização e interpretação

dos resultados obtidos. Assim, a elaboração deste modelo se mostra relevante para o desenvolvimento científico e didático da hidrogeologia de sistemas fraturados, podendo ser empregado tanto para a complementação de pesquisas científicas quanto para a demonstração de conceitos relacionados a este tema em cursos de graduação e pós-graduação.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelaziz, R.; Merkel, B. J. (2012). Analytical and Numerical Modeling of Flow in a Fractured Gneiss Aquifer. *Journal of Water Resource and Protection*, 4 (1), 657–662.
- Cleary, R. (1989). Águas subterrâneas. In: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. *Coleção ABRH de recursos hídricos*. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ.
- Freeze, R. A.; Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.
- Gale, J. E. (1982). Assessing the permeability characteristics of fractured rock. *Geological Society of America Special Papers*, 189, 163-181.
- Hess, A. E. (1986). Identifying hydraulically conductive fractures with a slow-velocity borehole flowmeter. *Canadian Geotechnical Journal*, 23(1), 69–78.
- Karay, G.; Hajnal, G. (2015). Modelling of Groundwater Flow in Fractured Rocks. *Procedia Environmental Sciences*, 25, 142–149.
- Maini, Y. N. T. (1971). *In-situ hydraulic parameters in jointed rock - their measurement and interpretation*. Londres: Prentice Hall.
- Molz, F. J. (1989). The impeller meter for measuring aquifer permeability variations: evaluation and comparison with other tests. *Water Resources Research*, 25(7), 1677–1683.
- Paillet, F. L. (2000). A field technique for estimating aquifer parameters using flow log data. *Ground Water*, 38(4), 510–521.
- Quinn, P.; Cherry, J. A.; Parker, B. L. (2012). Hydraulic testing using a versatile straddle packer system for improved transmissivity estimation in fractured-rock boreholes. *Hydrogeology Journal*, 20(8), 1529–1547.
- Quinn, P.; Parker, B. L.; Cherry, J. A. (2015). Blended head analyses to reduce uncertainty in packer testing in fractured-rock boreholes. *Hydrogeology Journal*, 24(1), 59–77.
- Snow, D. T. (1965). *A parallel plate model of fractured permeable media*. Tese (PhD). Berkeley: University of California.

Sokol, D. (1963). Position and fluctuations of water level in wells perforated in more than one aquifer. *Journal of Geophysical Research*, 68(4), 1079–1080.