

3 Metodologia Experimental

Este capítulo descreve os dispositivos experimentais utilizados e os procedimentos experimentais adotados para realizar cada uma das experiências de deslocamento de óleo através de meios porosos saturados previamente com este fluido. Estes dispositivos experimentais são três: (i) Dispositivo experimental para **visualização do escoamento de emulsões através do meio poroso**, (ii) Dispositivo experimental para estudar o **efeito do número de capilaridade no processo de deslocamento de óleo por injeção de emulsões em meios porosos**, e (iii) Dispositivo experimental para determinar o **efeito da injeção de emulsões no deslocamento de óleo de duas amostras de arenito com diferentes permeabilidades colocadas em paralelo**.

O dispositivo experimental utilizado para realizar o estudo de deslocamento de óleo em amostras em paralelo e o dispositivo experimental de visualização do escoamento de emulsões em meios porosos, encontram-se no laboratório de Microhidrodinâmica e meios porosos, o qual pertence aos laboratórios de Termociências, do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, onde também foram projetados e construídos. O dispositivo experimental para estudar o efeito do número de capilaridade, foi adquirido da CORELAB (TEMCO) [50], e também está localizado no laboratório de Microhidrodinâmica e meios porosos.

Nas três bancadas experimentais realizaram-se experimentos de escoamentos monofásicos e bifásicos através dos meios porosos. Os escoamentos monofásicos foram utilizados para determinar a permeabilidade dos meios porosos. Os experimentos de escoamentos bifásicos consistiram em saturar as amostras com óleo (deslocando deste modo a água) e estudar o processo de deslocamento de óleo através da injeção de água e emulsões óleo-em-água.

3.1 Descrição experimental do dispositivo para visualização do escoamento de emulsões através do meio poroso

Para visualizar o escoamento dos fluidos em um processo de deslocamento de óleo mediante a injeção de água e emulsão, construiu-se um meio poroso transparente, este meio poroso consiste de uma câmara preenchida com pequenas esferas de vidro de tamanho micrométrico, formando assim um meio poroso transparente não consolidado. Uma representação esquemática do dispositivo é apresentada na Fig. 3.1. Este dispositivo experimental está conformado por, uma bomba de deslocamento positivo que alimenta um cilindro-pistão, onde o

pistão do interior é empurrado, obrigando a que o fluido armazenado na parte superior do cilindro seja deslocado através do circuito e do meio poroso, até ser coletado no tubo coletor. O fluido coletado é pesado constantemente para determinar a fração de óleo produzido. Um transdutor de pressão é colocado na entrada da câmara e os dados são capturados e armazenados por um computador. Uma câmera ultra-veloz de vídeo e outra fotográfica foram instaladas na parte superior da câmara portadora para capturar e salvar as imagens.

Os diferentes processos durante a execução do experimento são descritos resumidamente a seguir.

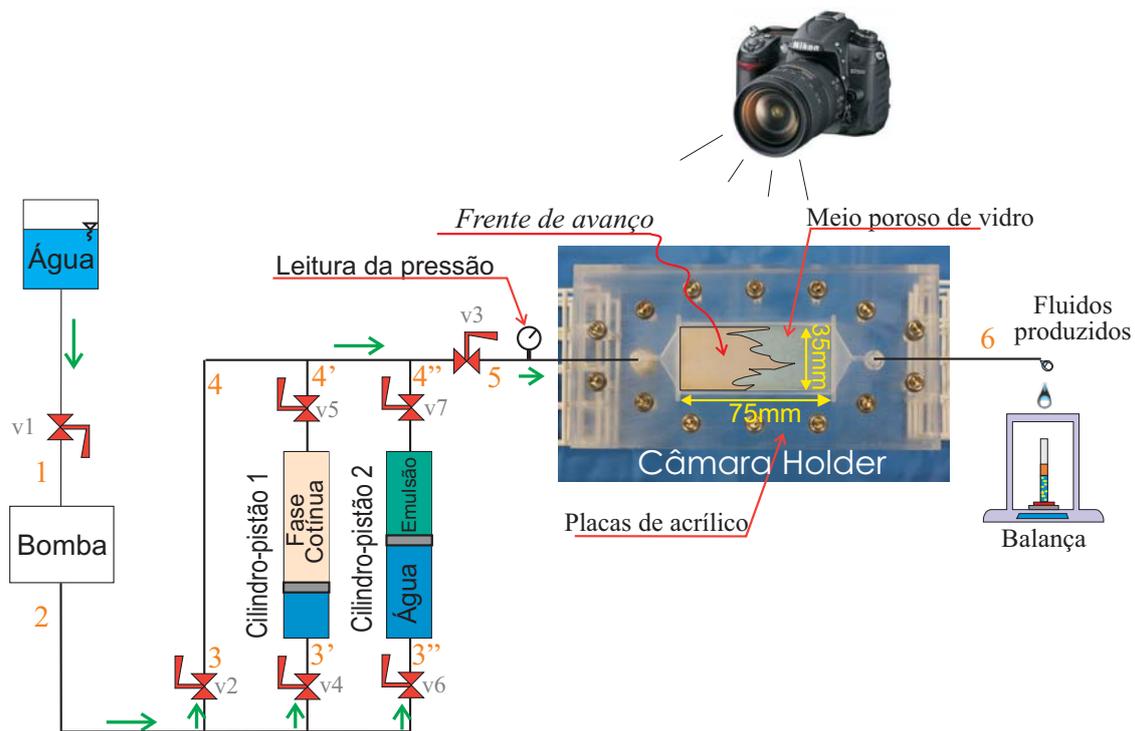


Figura 3.1: Esquema do dispositivo experimental de visualização do escoamento de emulsões através do meio poroso: (1) Bomba, (2) cilindro-pistão, (3) câmara portadora do meio poroso, (4) tubo coletor, (5) câmera de vídeo e fotografia, (6) computador, (7) transdutor de pressão, (8) placa de aquisição de dados.

- Processo 1: injeção de água, seguindo o percurso dos dispositivos (1)-(3)-(4) da Fig. 3.1. A água que sai da bomba é direcionada diretamente atravessando o meio poroso até o tubo coletor.
- Processo 2: injeção de óleo, seguindo o percurso (1)-(2)-(3)-(4) da Fig. 3.1. A água que sai da bomba ingressa no cilindro-pistão deslocando o óleo armazenado na parte superior do cilindro. O óleo desloca-se atravessando o meio poroso até a tubo coletor.

- Processo 3: injeção da solução água-surfatante, seguindo o percurso (1)-(2)-(3)-(4) da Fig. 3.1. A água injetada pela bomba empurra o pistão e este desloca a solução água-surfatante atravessando o meio poroso até o tubo coletor.
- Processo 4: injeção de emulsão, seguindo o mesmo percurso que o óleo, na Fig. 3.1. A água que sai da bomba ingressa no cilindro-pistão deslocando a emulsão armazenada na parte superior do cilindro, a emulsão movimentada-se atravessando o meio poroso e deslocando o óleo no seu interior, até o tubo coletor.

A bancada experimental de visualização do escoamento de emulsões através do meio poroso, foi montada com a finalidade de satisfazer três objetivos principais: 1. Visualizar o deslocamento, 2. Obter a queda de pressão no meio poroso, e 3. Determinar a fração de óleo produzido.

1. Visualização do deslocamento, com a ajuda de uma câmera de vídeo e de fotografia (5), observamos o fluxo dos fluidos, a passagem das gotas de emulsão através dos poros e gargantas de poros formados pelas esferas de vidro, a aglomeração das gotas de emulsão em alguns poros, e o deslocamento do óleo mediante a injeção de água e emulsão de forma alternada. Este foi o objetivo de maior interesse deste experimento.

2. Queda de pressão, Como mostra a fig. 3.1 (7), um transdutor de pressão foi instalado na entrada da câmara do meio poroso para determinar a pressão de entrada, e observar o seu comportamento ao longo do processo experimental.

3. Fração de óleo produzido, Os fluidos produzidos foram armazenados em um tubo coletor (4), onde também é possível observar os volumes de cada uma das diferentes fases.

3.1.1

Bomba de injeção

Uma bomba de deslocamento positivo e vazão constante, modelo Waters 515 HPLC [51] foi usada neste experimento.

Opera em uma faixa de fluxo entre 0 ml/min até 10 ml/min, com incremento de 0,001 ml/min e uma pressão máxima de 6000 psi (41370 kPa, 401 bares). Suas dimensões são 20,3 cm x 19,1 cm x 18.5 cm de altura, largura e profundidade respectivamente, e um peso de 15 kg. Temperaturas de operação na faixa de 4°C a 40°C, e a umidade deve ser 80%. Alimentação de 110 VA (max) com 55 VA, linha de voltagem de 85 a 264 Vac, frequência de 47 a 63 Hz monofásico, dois fusíveis de 3,15 A e 250 V.

Esta bomba foi escolhida pela grande exactidão que ela oferece para entregar vazão constante, e sua capacidade de trabalhar com vazões pequenas.

3.1.2

Mecanismo cilindro-pistão

Este sistema, evita o contato direto da bomba com fluidos que não sejam água destilada (óleo, solução água-surfactante e emulsão), evitando a contaminação dos seus componentes internos, que poderiam levar a uma diminuição no tempo de vida útil da bomba. Como o seu nome indica, este dispositivo é composto de um pistão, que se desloca no interior de um cilindro. Dois compartimentos são assim criados, os quais permitem separar os dois fluidos de trabalho: (i) água no compartimento inferior (em contato com a bomba), e (ii) óleo ou emulsão ou solução água-surfactante no compartimento superior (ligado à câmara com o meio poroso). Como o pistão é de teflon e o cilindro é de acrílico, permitem a visualização dos fluidos nos dois compartimentos.

A água impulsionada pela bomba, exerce pressão sobre o pistão móvel no interior do cilindro, que a sua vez empurra o fluido contido no compartimento superior deslocando-o ao longo da bancada experimental.

3.1.3

Câmara portadora do meio poroso transparente não consolidado

A câmara portadora do meio poroso transparente não consolidado, esta formada por duas placas de acrílico posicionadas paralelamente, na placa inferior foi usinada uma cavidade, a qual serve de alojamento das esferas de vidro utilizadas para criar o meio poroso transparente. A outra placa possui uma parte sobressalente com o formato da cavidade da outra placa, as duas placas são juntadas aplicando um pouco de pressão para evitar vazamentos e a movimentação ou deslocamento das esferas de vidro. Uma fotografia da câmara portadora é mostrada na Fig. 3.2.

A câmara tem duas entradas, uma no início da cavidade com meio poroso, e uma no final. A primeira está ligada à bomba e à saída do mecanismo cilindro-pistão, e a outra vai direto para o tubo coletor dos fluidos produzidos.

3.1.4

Meio poroso

As propriedades da amostra não-consolidada usadas nos experimentos, são mostradas na Tab. 3.1

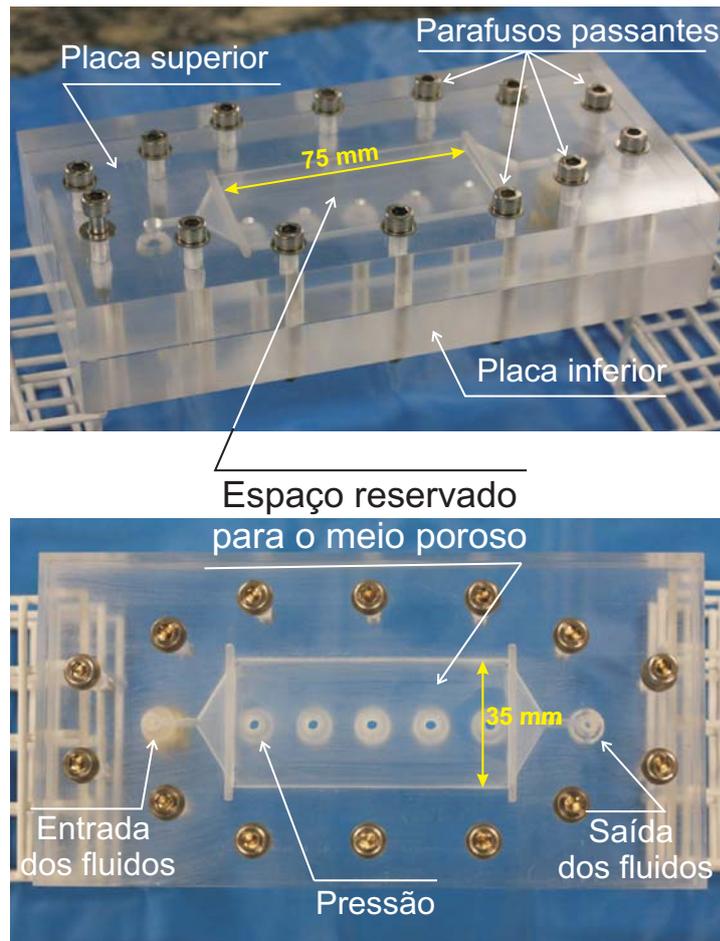


Figura 3.2: Fotografia da câmara portadora do meio poroso transparente não consolidado.

3.1.5 Transdutor de pressão

Esta bancada experimental conta com um transdutor de pressão, com valor de fundo de escala igual a 23 psi. É um transdutor Validyne, com faixa de alimentação de voltagem entre 6,6 Vdc ate 35 Vdc, e a voltagem que entrega está de 0.1 Vdc para a pressão menor e 5.1 Vdc para a pressão maior.

O transdutor mede a pressão e transmite os dados em forma de voltagem para uma placa de aquisição de dados

3.1.6 Aquisição e armazenamento de dados

A parte responsável pela aquisição e armazenamento dos dados é composta pela placa de aquisição e o conjunto computador/software.

A placa de aquisição de dados recebe os sinais analógicos dos transdutores de pressão e os converte em sinais digitais, para que possam ser lidos pelo

MEIO POROSO		
Material das Esferas	Vidro Comum	–
Diâmetro das esferas	entre 100 e 200	μm
Altura	3	mm
Largura	35	mm
Comprimento	75	mm
Porosidade	35	%
Permeabilidade	2.1	Da
Volume Poroso	2980	mm^3

Tabela 3.1: Propriedades do meio poroso transparente

computador.

A bancada experimental conta com um computador Pentium 4, micro processador de 1,99 GHz e 480 MB de memória RAM.

A função do computador é receber os sinais entregados pela placa, para armazenar-lhos e registrar-lhos em arquivos de texto, permitindo um processamento futuro.

A aquisição de dados foi feita através de um programa escrito na linguagem do Labview[®] 7.1. A interface permite executar diversos comandos de controle e monitoramento das medidas, permitindo a verificação do andamento do trabalho em tempo real.

3.1.7

Balança eletrônica

Para medir a massa de fluido coletado é usada uma balança analítica eletrônica digital QUIMIS modelo Q500L210C, carga máxima de 210 g e sensibilidade 0.1 mg. conta com protetor de vento tipo capela de vidro que lhe-permite pesar com a máxima exatidão e mínima perturbação externa.

3.1.8

Fluidos utilizados no experimento visualização do escoamento de emulsões através do meio poroso

As propriedades dos óleos usados tanto para saturar o meio poroso quanto para preparar as emulsões, estão mostradas na Tab.3.2. E as emulsões preparadas para serem utilizadas nos experimentos como fluido aglomerante nos poros mais permeáveis, para assim aumentar o fator de recuperação de óleo, são do tipo óleo-em-água, com frações de 30 % de água e 70 % de óleo. As suas propriedades estão apresentadas na Tab.3.3.

O Talpa 30 foi utilizado para saturar o corpo de prova. Trabalhou-se com um óleo mineral para evitar os efeitos tóxicos dos componentes do óleo cru no

Óleos	Viscosidade (mPa-s)	Densidade (g/ml)
Óleo Mineral Talpa 30 (Satura o Testemunho)	410 ¹	0.9101
Óleo Sintético Tivela 460 (Prepara Emulsão)	1000 ¹	0.998
Volume Poroso	2980	mm ³
⁽¹⁾ : à temperatura de 25°C		

Tabela 3.2: Propriedades dos fluidos utilizados no experimento de visualização do escoamento de emulsões através do meio poroso

processo de recuperação.

O óleo Tivela 460 é um óleo sintético e foi utilizado para preparar as emulsões. Tem densidade muito similar à densidade da água destilada. Foi escolhido um óleo com esta densidade para reduzir a separação da fase contínua (água) com a fase dispersa (óleo) da emulsão.

O processo de mistura foi tal que a emulsão tinha um tamanho de gota de 60 μ m.

Emulsão	Viscosidade (mPa-s)	Densidade (g/ml)	Diâmetro de Gota (μ m)	Concentração (%/%)
Óleo-em-Água	120 ¹	0.9992	60	30/70
⁽¹⁾ : à temperatura de 23°C				

Tabela 3.3: Propriedades da emulsão utilizada nos experimentos de visualização do escoamento de emulsões através do meio poroso

3.2

Descrição do dispositivo experimental para estudo do efeito do número de capilaridade no processo de deslocamento de óleo.

Para estudar o efeito do número de capilaridade no processo de deslocamento de óleo mediante a injeção de água e emulsão, foi adquirido um dispositivo experimental semi automático, no qual se realizaram os experimentos. A Figs. 3.3 mostra a representação esquemática da bancada experimental, nela podemos observar os componentes principais e conexões auxiliares, como são: “porta-amostra” tipo Hassler (que serve de alojamento do corpo de prova), reservatório de água, bombas de vazão constante, cilindro-pistão 1, 2 e 3, transdutores de pressão, computador, tubulações, válvulas, balança eletrônica e o tubo coletor. Também na 3.4 podemos observar a fotografia da bancada experimental.

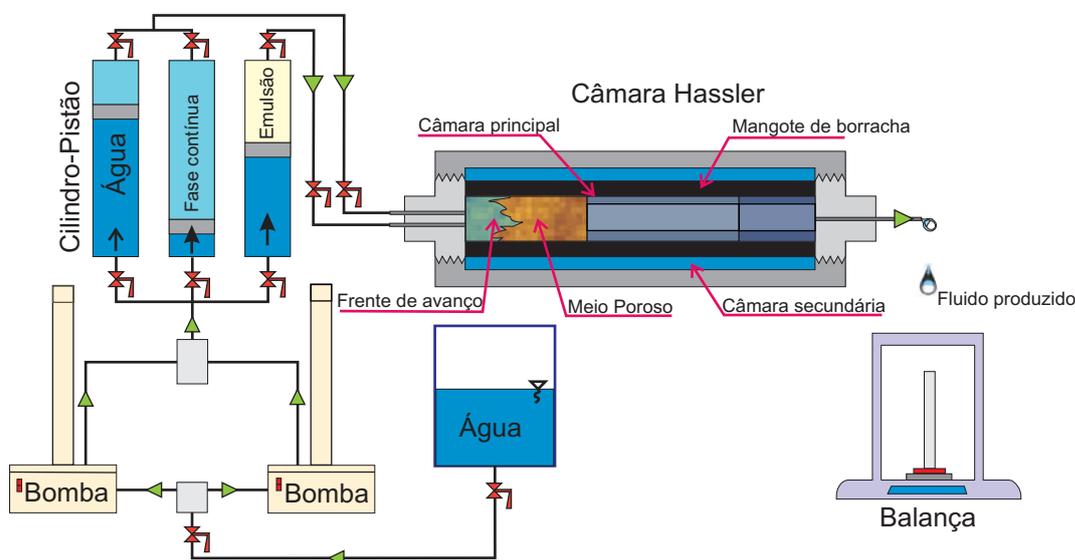


Figura 3.3: Representação esquemática do dispositivo experimental para o estudo do efeito do número de capilaridade no processo de deslocamento de óleo.

Os diferentes processos realizados em esta bancada seguidos para a realização destes experimentos são descritos de forma resumida a seguir:

- Processo 1: injeção de óleo. As válvulas são abertas e fechadas de forma que a água entregue pela bomba, ingresse no cilindro-pistão 1, empurrando o cilindro, e desta forma deslocando o óleo armazenado na parte superior do cilindro. O óleo desloca-se através do circuito e do meio poroso, até ser coletado no tubo coletor.
- Processo 2: injeção de fase contínua. Neste caso a água entregue pela bomba tem que empurrar o pistão do cilindro que contém a fase

contínua (solução água-surfactante). Para isso, as válvulas do dispositivo cilindro-pistão contendo óleo são fechadas e as válvulas do cilindro pistão contendo a fase contínua são abertas.

- Processo 3: injeção da emulsão. As válvulas do cilindro-pistão contendo emulsão são abertas e as válvulas dos outros cilindros são fechadas de forma que a água entregada pela bomba desloca a emulsão armazenada na parte superior do cilindro-pistão, para desloca-la através do circuito e do meio poroso, até ser coletada no tubo coletor.



Figura 3.4: Fotografia do dispositivo experimental para o estudo do efeito do número de capilaridade no processo de deslocamento de óleo.

3.2.1

Bomba de injeção

O dispositivo conta com duas bombas de deslocamento positivo com vazão constante (ou pressão constante se o experimento exige) da firma TELEDYNE ISCO [52], Estas são bombas de seringa, modelo D-Series 500D [53]. As duas bombas são unidas em um conjunto chamado pacote de válvulas check, as quais são acionadas mediante uma outra valvula que trabalha com ar comprimido. Este conjunto de válvulas garante que o sistema nunca fique sem água, já que enquanto uma bomba está fornecendo água pressurizada ao sistema, a outra poderia estar recolhendo água do reservatório.

As bombas operam em uma faixa de fluxo entre 0 ml/min até 204 ml/min , com incremento de 1 $\mu m/min$ e uma pressão máxima de 3741 psi (258000 kPa , 258 $bares$). Suas dimensões são, uma caixa de 13.59 cm x 46.74

cm x 27.18 *cm* de altura, largura e profundidade respectivamente, onde estão os engrenagens e parafusos sem fim. O cilindro tem diâmetro de 5 *cm* e altura de 102.36 *cm*, e um peso de 33.25 *kg*, com capacidade de 500 *ml*. Temperaturas de operação na faixa de 4°C a 40°C, e a umidade deve ser 80%. Alimentação de 110 VA (max) com 55 VA, linha de voltagem de 117 ± 12 Vac, frequência de 50 a 60 Hz monofásico, e dois fusíveis de 1,5 A e 117 V.

3.2.2

Mecanismo cilindro-pistão

Os mecanismos cilindro-pistão utilizados nesta bancada, estão compostos por um pistão de teflon, que se-desloca no interior de um cilindro de aço inox. Para maiores detalhes, ver seção 3.1.2.

3.2.3

Câmara “porta-amostra”, tipo Hassler

A câmara “porta-amostra” ou “core-holder” (em Inglês), tipo Hassler é utilizada para criar um fluxo unidireccional em uma amostra de rocha (câmara recomendada por Koederitz et. al. [54]), está construída de aço inox, e tem capacidade para um corpo de prova de comprimento máximo 250 *mm* e pressão de trabalho de 1500-3500 *psi*, com duas entradas e uma saída do fluxo. Na Fig. 3.5 é apresentado um esquema com os detalhes do conjunto. O core-holder é formado por duas câmaras cilíndricas concêntricas, separadas por um mangote de borracha. Uma câmara principal cuja parede externa é o tubo de borracha serve de recinto para o corpo de prova, e uma câmara secundaria ou externa à câmara principal, é preenchida com água a uma pressão confinante de 2000-3000 *psi*.

A câmara secundaria exerce uma pressão elevada sobre o mangote de borracha para manter-la unida à superfície do corpo de prova, evitando assim o vazamento do fluido deslocante ou deslocado, pelo espaço entre a borracha e a amostra. Com isso, o fluido é obrigado a escoar axialmente através dos poros do corpo de prova cilíndrico. Não há troca de fluidos entre as duas câmaras nem com o exterior.

A câmara principal tem duas tampas identificadas como de entrada e de saída. A tampa de entrada está ligada à saída da bomba e/ou ao cilindro-pistão, e a tampa de saída está ligada ao tubo que leva o líquido ao tubo coletor de fluidos produzidos.

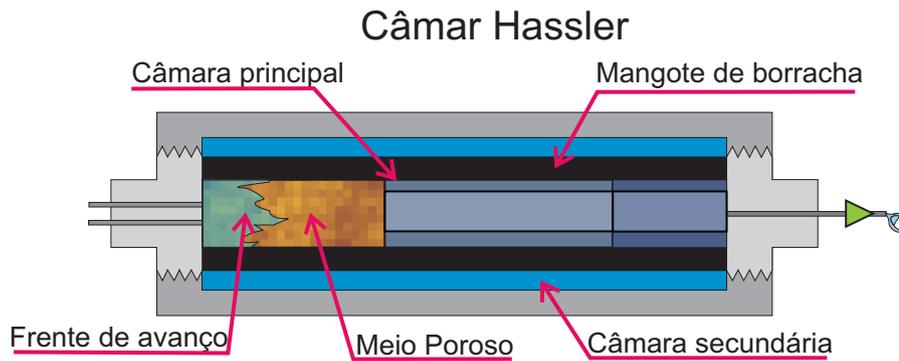


Figura 3.5: Esquema mostrando os componentes da câmara portadora de amostras tipo Hassler.

3.2.4 Corpos de prova

Os corpos de prova ou testemunhos são amostras de rochas arenito arcócio de coloração avermelhada da formação de Botucatu. Eles são o meio poroso por onde os fluidos escoam. Os corpos de prova foram cortados em formato cilíndrico.



Figura 3.6: A amostra de arenito.

A fotografia da Fig. 3.6 mostra um corpo de prova e as vistas parciais das tampas de entrada e saída da câmara Hassler, onde se pode apreciar os detalhes dos canais para uma distribuição uniforme do fluido.

O experimento 1, refere-se ao experimento com número de capilaridade baixa, $Ca = \mu \vec{v} / \sigma = 2 \times 10^{-5}$. O experimento 2, refere-se ao experimento com número de capilaridade elevada, $Ca = 2 \times 10^{-4}$.

Amostra Arenito	Comprimento <i>mm</i>	Diâmetro <i>mm</i>	Permeabilidade <i>mD</i>	Porosidade %	Volume Poroso <i>ml</i>
Experimento 1	64.37	37.61	262.6	25.3	18.1
Experimento 2	93.88	37.44	239.0	25.5	26.4

Tabela 3.4: Tabela com algumas propriedades dos corpos de prova usados nos dois experimentos

3.2.5

Balança eletrônica

Para medir a massa de fluido coletado, também, foi usada a balança analítica eletrônica digital QUIMIS, modelo Q500L210C. Para maiores detalhes, ver seção 3.1.7

3.2.6

Fluidos utilizados no experimento de capilaridade

Os óleos utilizados em este experimento foram os mesmos do experimento de visualização, ver subseção 3.1.8.

No caso das emulsões, o processo de mistura foi tal que a emulsão tinha um tamanho de gota de 43 μm para o primeiro experimento e 50 μm para o segundo.

Emulsões Óleo-em-Água	Densidade (g/ml)	Diâmetro de Gota (μm)	Concentração (%/%)
Experimento 1	0.9992	43	30/70
Experimento 2	0.9992	50	30/70

(¹) : à temperatura de 23°C

Tabela 3.5: Propriedades das emulsões utilizadas nos experimentos para estudar o efeito do número de capilaridade no processo de deslocamento de óleo

O experimento 1, refire-se ao experimento com número de capilaridade baixa, $Ca = \mu \bar{v} / \sigma = 2 \times 10^{-5}$. O experimento 2, refire-se ao experimento com número de capilaridade elevada, $Ca = 2 \times 10^{-4}$.

3.3

Procedimento experimental para estudo do escoamento em amostras de rocha em paralelo

Com o objetivo de constatar a efetividade da aplicação de emulsões na recuperação de óleo em meios porosos heterogêneos, duas câmaras portadoras de amostras foram ligadas em paralelo com meios porosos de permeabilidades diferentes, como está mostrado na Fig. 3.7.

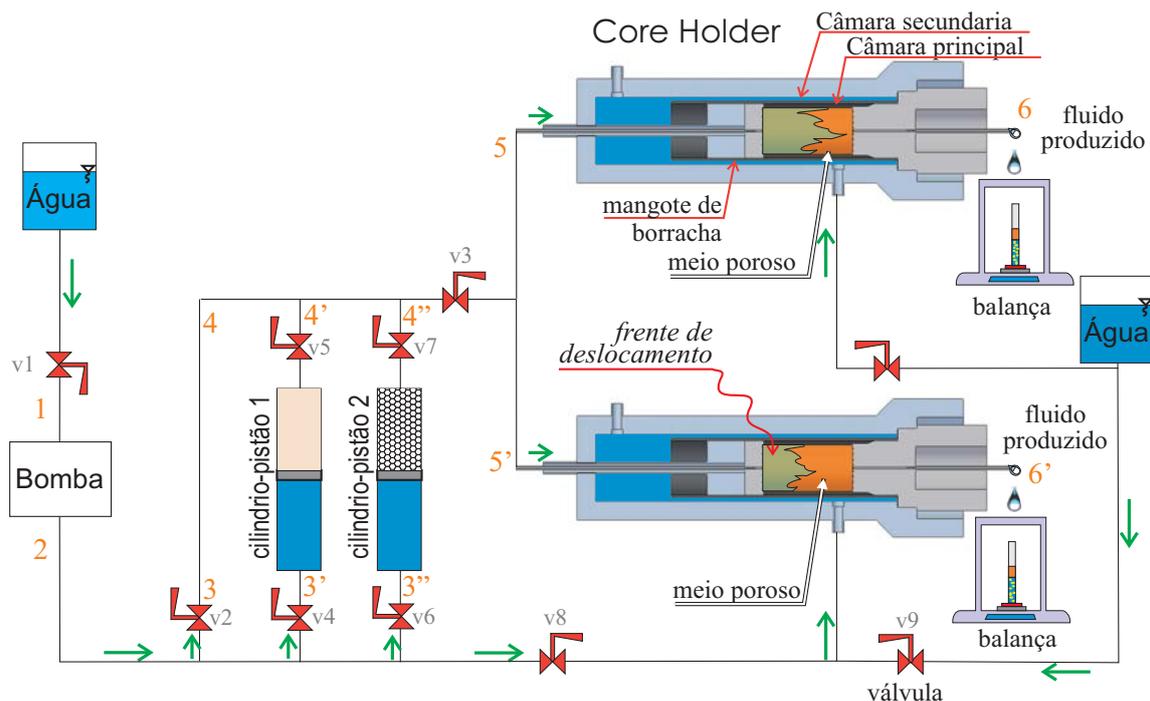


Figura 3.7: Representação esquemática do dispositivo experimental para o estudo do escoamento em amostras de rocha em paralelo.

3.3.1

Bomba de injeção

A bomba utilizada neste experimento foi a mesma utilizada no experimento de visualização. A descrição da mesma está apresentada na seção 3.1.1.

3.3.2

Mecanismo cilindro-pistão

Este mecanismo é o mesmo descrito nas seções 3.1.2 e 3.2.2. Neste experimento o cilindro é de acrílico e o pistão de teflon.

3.3.3

Câmara “porta-amostra”, tipo Hassler

As duas câmaras usadas para este experimento, também são do tipo Hassler [54], elas foram construídas de alumínio, com capacidade máxima para corpos de prova com comprimento máximo de 15 *cm* e pressão de trabalho de entre 2000-2500 *psi*, com uma entrada e uma saída do fluxo. Também está formado por duas câmaras concêntricas, conforme descrito na subseção 3.2.3. Na Fig. 3.8 podemos observar o esquema das câmaras portadoras de amostras de arenito.

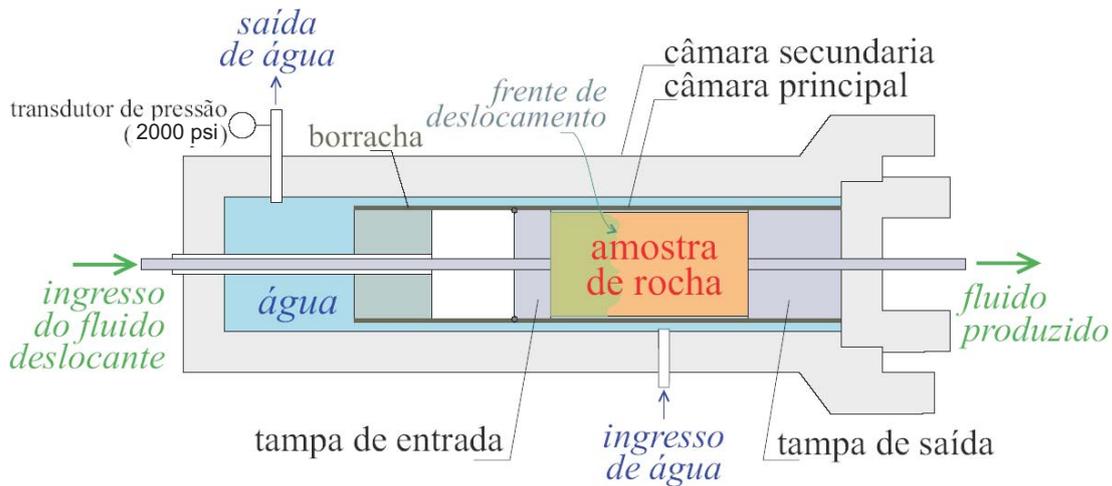


Figura 3.8: Esquema mostrando os componentes da câmara portadora de amostras.

A câmara principal tem duas tampas identificadas como de entrada e de saída. A tampa de entrada está ligada à saída da bomba e/ou o cilindro-pistão, e a tampa de saída ao tubo que leva o líquido ao tubo coletor de fluidos exudantes.

3.3.4 Corpo de prova

Os corpos de prova utilizados nestes experimentos também foram amostras de arenito, conforme descrito na seção 3.2.4. Na Tabela 3.6, estão mostradas algumas propriedades dos meios porosos utilizados neste experimento.

Amostra de Arenito	L <i>mm</i>	D <i>mm</i>	K <i>mD</i>	ϕ %	VP <i>ml</i>
Experimento 1	64.83	37.37	1900.6	28.7	20.4
Experimento 1	58.22	37.49	239.0	22.0	14.2
Experimento 2	99.33	37.15	1704.2	29.6	31.82
Experimento 2	101.33	37.62	275.4	23.8	26.9

Tabela 3.6: Tabela com algumas propriedades dos corpos de prova usados nos dois experimentos para o estudo do escoamento em amostras de rocha em paralelo.

Onde, L denota o comprimento, D é o diâmetro, K a permeabilidade absoluta, ϕ é a porosidade e VP o volume poroso da amostra.

3.3.5

Transdutores de pressão

Esta bancada experimental conta com três transdutores de pressão, com valores de fundo de escala iguais a 60 psi, 500 psi e 3000 psi. Como mostram as Figs. 3.7 e 3.8, os transdutores de 60 psi (T1) e de 500 psi (T2) estão instalados na entrada da câmara Hasler e servem para registrar a pressão com que o fluido ingressa à câmara. O transdutor de 3000 psi (T3) permite verificar a pressão de confinamento das câmaras secundária de ambos Core Holder.

Os transdutores Validyne (de 23 psi, 500 psi e 3000 psi) são modelos P2-60-V, P2-500-V e P2-3000-V respectivamente. A faixa de alimentação de voltagem é de 6,6 Vdc até 35 Vdc, e apresentam voltagem de saída de 0,1 Vdc até 5,1 Vdc.

3.3.6

Aquisição e armazenamento de dados

O dispositivo de aquisição e armazenamento de dados utilizado neste experimento é o mesmo utilizado e descrito na Subseção 3.1.6.

3.3.7

Balança eletrônica

A balança eletrônica foi descrita na Subseção ??

3.3.8

Fluidos utilizados no experimento de amostras em paralelo

Os óleos utilizados neste experimento foram os mesmos dos experimentos de descritos anteriormente, ver subseção 3.1.8.

No caso das emulsões, o processo de mistura foi tal que as emulsões tinham um tamanho de gota de 100 μm para para ambos experimentos.

Emulsões Óleo-em-Água	Densidade (g/ml)	Diâmetro de Gota (μm)	Concentração (%/%)
Experimento 1	0.9992	100	30/70
Experimento 2	0.9992	100	30/70

(¹) : à temperatura de 23°C

Tabela 3.7: Propriedades das emulsões utilizadas nos dois experimentos para o estudo do escoamento em amostras de rocha em paralelo

Tentou-se manter as mesmas propriedades dos componentes e condições de trabalho para os dos experimentos, com a finalidade de determinar se tem o mesmo comportamento no fator de recuperação de óleo.

3.4

Metodologia Utilizada para Caracterizar os Meios Porosos e os Fluidos Utilizados

Esta seção descreve os procedimentos experimentais que foram adotados para determinar as propriedades dos corpos de prova e dos fluidos (água, óleos, surfactante, solução água-surfactante e emulsões) utilizados em todos os experimentos. A metodologia adota foi baseada em estudos e experiências anteriores [34].

Foram determinadas as seguintes propriedades: (1) Corpo de prova: volume poroso, permeabilidade absoluta. (2) Óleos: viscosidade e densidade. (3) Emulsões: Concentração, diâmetro médio de gota, viscosidade, densidade.

3.4.1

Caracterização dos Meios porosos

Talvez as propriedades dos meios porosos sejam as mais relevantes em qualquer processo de injeção de emulsões, já que com esses dados são determinadas a vazão do injeção, diâmetro de gota e concentração das emulsões necessários para obter o controle de mobilidade desejado.

Como exemplo para mostrar como se determinaram as propriedade do corpo de prova, vamos tomar um corpo de prova qualquer, sendo que, todos os corpos de prova utilizados nos experimentos desta tese, seguiram os mesmos procedimentos.

A seguir, explica-se as metodologias adotadas para determinar cada propriedade do corpo de prova.

3.4.1.1

Volume Poroso efetivo

Para determinar o volume poroso efetivo, utilizou-se o método de Barnes modificado [54]. A escolha foi baseada na disponibilidade de equipamentos.

Primeiramente o corpo de prova é submetido a um secagem durante 24 horas a temperatura de 110 °C numa estufa elétrica. Logo depois é pesado em uma balança eletrônica. O peso do corpo saturado com ar, também chamado de **peso seco** é de 149.81 g.

Agora, o corpo de prova é embebido em água, para determinar o volume poroso efetivo e para diminuir a tensão interfacial entre os fluidos na hora de submeter o meio poroso ao processo de saturação com óleo.

Para um melhor entendimento, uma explicação mais detalhada é descrita a seguir. O corpo foi colocado numa garrafa (Balão Kitassato) com água destilada de forma que, conforme mostrado na Fig. 3.9, a água não cobre

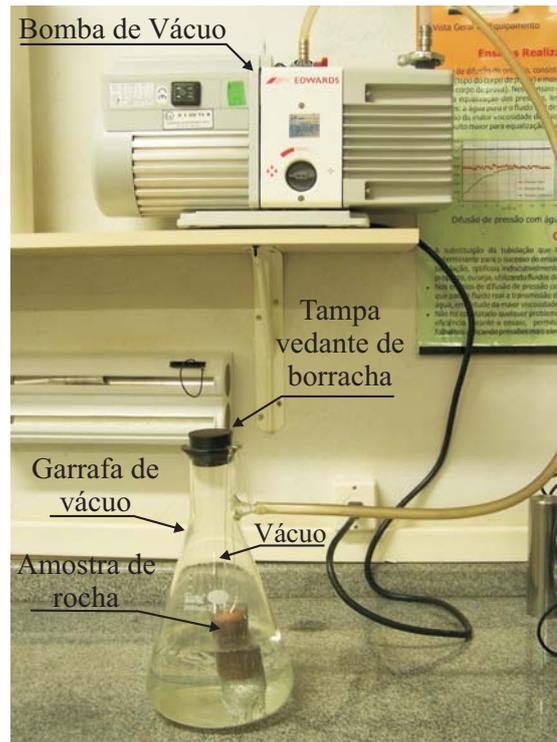


Figura 3.9: Fotografia do método utilizado para embeber o corpo de prova em água.

completamente o corpo de prova. A garrafa é vedada e submetida a uma pressão de vácuo (negativa) de 3×10^{-2} mbar, pelo tempo necessário, até não se observarem mais a formação de bolhas de ar saindo do corpo de prova. O meio poroso toma então uma aparência de umidade no corpo inteiro.

Logo o corpo de prova é cuidadosamente retirado da garrafa, secado superficialmente com uma toalha de papel e pesado, obtendo assim o peso do corpo embebido em água, chamado de **peso molhado**, neste caso com um valor de 169.84 g.

O aumento do peso do corpo de prova é devido à água que ficou entre os poros da rocha de arenito, ao deslocar o ar que estava contido nela. A massa de água embebida no corpo de prova, é a diferença entre o peso molhado e o peso seco, portanto, $m_a = 20.03$ g.

Como a massa específica da água destilada é 1 g/cm^3 , e da eq. (2-2), $V_a = V_p = 20.03 \text{ cm}^3$.

Para conhecer o volume total do corpo de prova, V_t , realizamos várias medições, tanto do diâmetro, D como do comprimento, L dele, a Tabela 3.8 mostra estes valores. Obtendo um diâmetro médio $\bar{D} = 37.60 \text{ mm}$, e comprimento médio $\bar{L} = 70.55 \text{ mm}$.

$$V_t = \frac{\pi D^2}{4} L \quad (3-1)$$

D	L
37.57	70.41
37.60	70.39
37.65	70.60
37.62	70.62
37.60	70.74
37.57	—

Tabela 3.8: Dimensões do corpo de prova.

Da eq. 3-1 determinamos o volume total V_t do meio poroso é 78.336 cm^3 .

Substituindo estes valores na eq. 2-1, foi possível determinar a porosidade do corpo de prova testado.

$$\phi = \frac{20.03}{78.336} = 25.6 \%$$

3.4.1.2

Permeabilidade absoluta

A permeabilidade absoluta foi determinada utilizando água destilada como o fluido que escoar através do meio poroso desde uma frente até a outra, a diferentes vazões de injeção, para isso utilizou-se a câmara portadora de amostras. A lei de Darcy indica que há direta relação entre a vazão e o gradiente de pressão através de um meio poroso [54] [36].

Água foi injetada através do arenito a diferentes vazões, e cada vazão, registra um diferencial de pressão distinto, como mostra a tabela 3.9.

Q <i>ml/min</i>	Q <i>m³/seg</i>	P Psi	P <i>kg/m.s²</i>
1	1.66667E-08	0.8	6896.552
3	0.00000005	2.8	19310.345
5	8.33333E-08	4	27586.207
7	1.16667E-07	5.2	35862.069
8	1.33333E-07	5.75	39655.172

Tabela 3.9: Tabela das vazões utilizadas e seus diferenciais de Pressões resultantes ao atravessar o meio poroso

Com os dados da tabela, se construiu uma curva Q-P (Vazão - Pressão), apresentada na Fig. 3.10.

Segundo Koederitz [54], a permeabilidade é determinada pelo coeficiente angular da linha de tendência formada por esta curva.

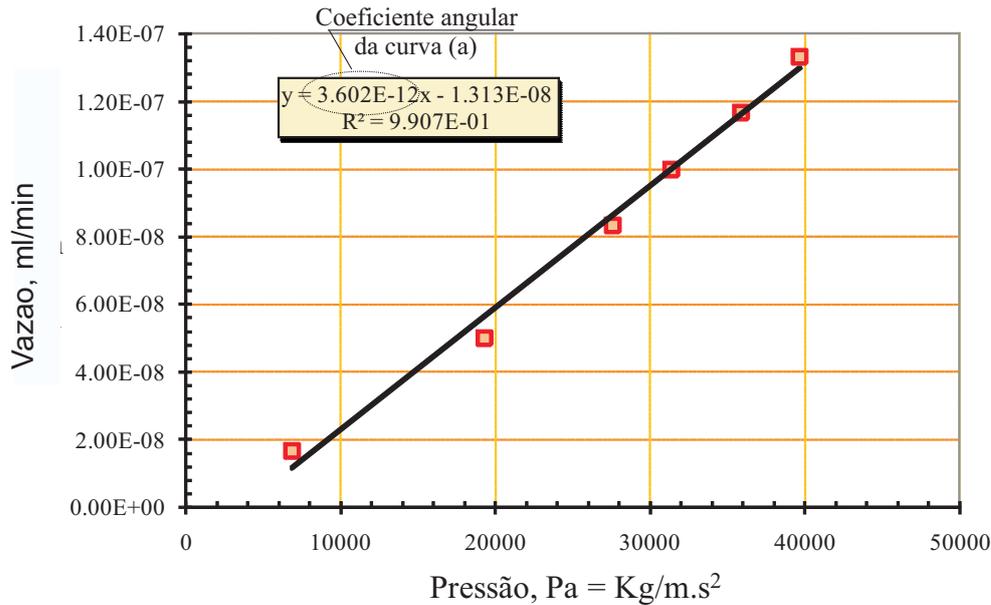


Figura 3.10: Curva de Vazão-Diferencial de Pressão.

Como mostra a Fig. 3.10, a reta que melhor ajusta os dados (por mínimos quadrados) possui um coeficiente angular a igual a 3.602×10^{-12} . Então, da eq. 2-7 obtemos:

$$K = \frac{a\mu L}{A} \quad (3-2)$$

onde:

$$a = 3.602 \times 10^{-12}$$

$$\mu = 1 \text{ cp} = 0.001 \text{ Kg/m.s.}$$

$$L = 0.07055 \text{ cm.}$$

$$A = 0.001110365 \text{ cm}^2$$

Então a permeabilidade do meio poroso é $K = 2.289 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ Em unidade técnica (miliDarcy), é dada por:

$$K = 231.9 \text{ mDa}$$

Esta permeabilidade esta de acordo com as referencias para este tipo de material com porosidade em torno de 26 % [55].

3.4.1.3 Saturação de óleo

Antes de iniciar os experimentos, o meio poroso precisa estar saturado com óleo, para isso, é iniciado um processo de injeção de óleo no meio

poroso. Para determinar a saturação do óleo contido no corpo de prova S_o , primeiramente precisamos pesar a amostra de rocha depois do processo de embebição em água destilada (peso molhado). Também precisamos obter o peso do corpo de prova depois do processo de saturação com óleo. A saturação de óleo no corpo de prova, é obtida mediante a seguinte equação do balanço de massas:

$$m_{o+a} = \rho_o \cdot s_o \cdot V_p + \rho_a (1 - s_o) V_p \quad (3-3)$$

onde, m_{o+a} é a massa do fluido contido no corpo de prova, óleo mais água, V_p é o volume poroso efetivo do corpo de prova, ρ_a é a massa específica da água, ρ_o é a massa específica do óleo.

Logo isolando s_o na Eq. 3-3 obtemos:

$$s_o = \frac{\frac{m_{o+a}}{V_p} - \rho_a}{\rho_o - \rho_a} \quad (3-4)$$

3.4.2

Caracterização dos líquidos

Nesta seção, foram determinadas as propriedades mais relevantes dos fluidos utilizados para os experimentos realizados nesta tese. Os resultados obtidos são apresentados na tabela abaixo.

#	Líquido	Densidade (g/ml)	Viscosidade (mPa-s)	Tensão superficial (mN/m)
L1	água destilada - 20 °C	0.9988	1.0030	72.75
L2	óleo Talpa 30 - 25 °C	0.9101	410	42.2
L3	óleo Tivela 460 - 25 °C	0.998	1000	28.3
L4	emulsão 30% / 70%	0.9992	300	31.7
L6	solução água-surfatante	0.9998	1.0508	31.7
L7	surfactante ULTRANEX NP-110	1.065	260	—

Tabela 3.10: Caracterização dos líquidos utilizados.

Onde, cada um dos fluidos utilizados teve uma função específica nos experimentos. A água foi utilizada para embeber o corpo de prova, e para preparar a solução água-surfactante. O óleo Talpa 30 foi utilizado para saturar o corpo de prova. O óleo Tivela 460 e a solução água-surfactante foram misturadas para preparar as emulsões, onde. A solução água-surfactante também foi utilizada como fluido deslocante.

3.4.2.1

Óleo, água e solução água-surfatante

Para determinar as densidades dos fluidos, foi utilizado um picnômetro de capacidade volumétrica conhecida.

Para determinar as viscosidades dos óleos, foi utilizado um reômetro T.A. Rheometric Scientific, modelo Ares L.S., com geometria de cilindros concêntricos (Couette) [32].

Com a finalidade de estabilizar as emulsões óleo-em-água, utilizamos um surfactante, o qual foi misturado na água destilada, e chamamos esta mistura de solução água-surfactante. A solução água-surfactante está composta por água destilada e surfatante numa concentração de 2% em peso. Esta concentração corresponde a mais de 10 vezes a concentração micelar crítica (CMC) do surfactante. O surfatante utilizado é o ULTRANEX NP 110, e está composto por tensoativos obtidos através da reação de nonilfenol com óxido de eteno. Para determinar a CMC foram realizados testes de tensão superficial para diferentes concentrações de surfatante. Estes testes foram feitos em um tensiómetro manual Krüss 13240 no Laboratório de Físico-Química da PUC-Rio.

O tensiómetro utiliza o método do anel, onde um anel metálico é submetido no líquido a ser testado, um sistema manual eleva o anel até fazê-lo ultrapassar a interface. A força requerida para separar o anel da superfície é medida durante o processo, logo é dividida pela circunferência do anel e corrigida por um fator geométrico, determinando a tensão superficial do líquido. Para dissolver o surfactante na água destilada, utilizou-se um agitador magnético Fisatom 754A.

3.4.2.2

Emulsões

As emulsões estão compostas por 30% de óleo Tivela 460 e 70% da solução água-surfatante. Para preparar as emulsões utilizamos um misturador elétrico, chamado Ultraturrax, modelo T-25, e consiste de um rotor que gira dentro da cavidade de um estator, habendo um espaço entre as duas peças, com a finalidade de que o fluido que ingresse nele para que ocorra o cisalhamento que forma as gotas da fase dispersa. O tempo e a velocidade adotadas varia de acordo à emulsão que se espera obter.

A distribuição do tamanho de gotas da fase dispersa das emulsões preparadas foi determinada utilizando o instrumento Mastersizer 2000, da Malvern Instruments [56]. O princípio de funcionamento deste equipamento

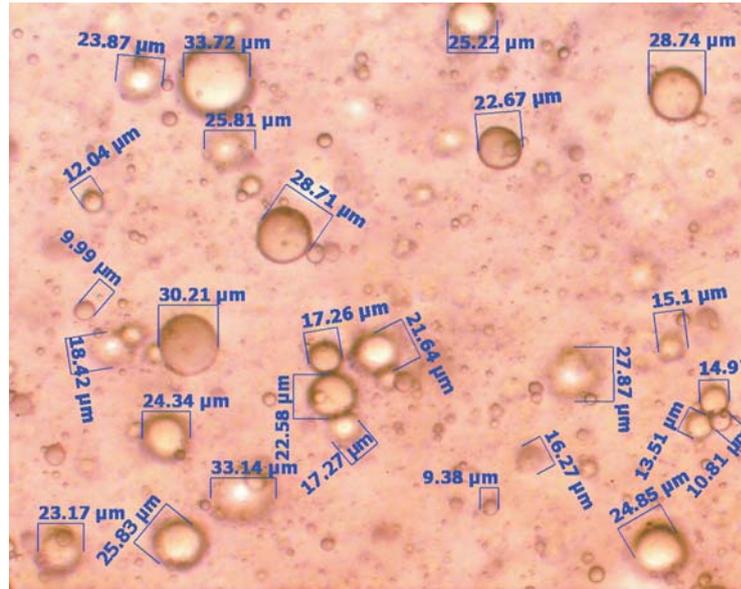


Figura 3.11: Fotografia de uma emulsão mostrando alguns diâmetros das gotas da emulsão $\bar{D}_2 = 20 \mu\text{m}$.

é por meio da análise da difração da luz de um laser ao passar através de um sensor óptico pelo qual escoava uma amostra de emulsão.

Para determinar a viscosidade das emulsões, é utilizado também o reômetro T.A. Rheometric Scientific, modelo Ares L.S., mas a geometria utilizada para estes casos foi de cilindros concêntricos Grooved Couette.

As emulsões são fluidos não newtonianos, pelo que, a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. Em um trabalho anterior, se fez uma análise mais detalhada das viscosidades das emulsões [34].