



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GABRIELA DE BRITO UCHOA ARAÚJO

DEPENDÊNCIA DA POROSIDADE E DA PERMEABILIDADE COM O TAMANHO DE
GRÃOS EM ROCHAS ARTIFICIAIS NÃO CONSOLIDADAS

NATAL/RN

2018

GABRIELA DE BRITO UCHOA ARAUJO

DEPENDÊNCIA DA POROSIDADE E DA PERMEABILIDADE COM O TAMANHO DE
GRÃOS EM ROCHAS ARTIFICIAIS NÃO CONSOLIDADAS

Relatório para a obtenção do título de
Graduação em Geofísica Bacharelado pelo
Departamento de Geofísica da Universidade
Federal do Rio Grande do Norte.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Olímpio Cabral

NATAL/RN

2018

GABRIELA DE BRITO UCHOA ARAÚJO

DEPENDÊNCIA DA POROSIDADE E DA PERMEABILIDADE COM O TAMANHO DE
GRÃOS EM ROCHAS ARTIFICIAIS NÃO CONSOLIDADAS

Relatório para a obtenção do título de
Graduação em Geofísica Bacharelado pelo
Departamento de Geofísica da Universidade
Federal do Rio Grande do Norte.

Aprovado em: ___/___/___

Prof. Dr. Francisco de Assis Olímpio Cabral
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Orientador

Prof. Dr. Milton Morais Xavier Júnior
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Membro interno

Prof. Dr. Josibel Gomes de Oliveira Junior
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Membro interno

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Araújo, Gabriela de Brito Uchoa.

Dependência da porosidade e da permeabilidade com o tamanho de grãos em rochas artificiais não consolidadas / Gabriela de Brito Uchoa Araújo. - 2018.

41 f.: il.

Monografia (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Graduação em Geofísica. Natal, RN, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Olímpio Cabral.

1. Geofísica - Monografia. 2. Porosidade - Monografia. 3. Permeabilidade - Monografia. 4. Kozeny-Carman - modelo de permeabilidade. I. Cabral, Francisco de Assis Olímpio. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 550.3

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida e por todas as oportunidades que me foram e que me são concedidas.

Aos meus pais Maurizia e Edson, por todo amor que me foi dedicado, além de todo suporte e incentivo no decorrer da minha vida. Às minhas irmãs Tatiana e Isabela, que mesmo mais novas, me inspiram diariamente.

Aos meus familiares, em especial, à minha avó materna Lindalva, a quem tenho a mais profunda admiração.

Ao meu noivo Lucas, que me acompanha há 11 anos e sempre me demonstrou apoio incondicional.

Às minhas amigas da escola: Laira, Alessandra, Alexandra, Marinna, Mariana Nelson, Caroline e Emily, que tanto torcem por mim.

Aos primeiros amigos que fiz na Geofísica: Clara, Dany, Mari, Flávia, Jurandy, Raphael, Rodrigo e, em especial, Carla – minha amiga de todas as horas.

Aos colegas da Geofísica que tive a sorte de conhecer ao longo desses anos. Aos demais amigos que fiz durante o curso e que muito me ajudaram: Lidyane, Andressa, Yago, Denis e Aline. Sou grata por todo o apoio e companheirismo.

Minha eterna gratidão a Miguel e Daniela, que mesmo não sendo tão próximos a mim até então, me deram todo o suporte e incentivo nos últimos dias. Me faltam palavras para agradecer tamanha generosidade.

Aos amigos que o CSF me deu: Neida, Sara, Milton, Luiza, Vinícius e Nayra, que compartilharam comigo uma das melhores fases da minha vida.

A todos os professores do Departamento de Geofísica da UFRN pelo convívio por todo esse tempo e por todo aprendizado adquirido nesta etapa que aqui finda.

Ao meu orientador Francisco de Assis Olímpio Cabral por toda a sua atenção, paciência e disponibilidade no desenvolvimento deste trabalho. Ao professor Milton Moraes, por toda a ajuda

Aos professores Josibel Gomes, Marcos Nascimento e Rosangela Maciel, por terem me auxiliado por diversos momentos durante o curso e possuem a minha mais sincera admiração.

À professora Marcela Marques Vieira pela disponibilidade do Laboratório de Sedimentologia do departamento de Geologia da UFRN no início do desenvolvimento deste trabalho e, em especial, à Tarcila, por toda a atenção.

À professora Helenice Vital, por ter permitido meu acesso ao Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental para utilização da lupa eletrônica. E a todos do GGEMMA que me ajudaram.

Ao Laboratório de Engenharia de Reservatórios do Petróleo (LABRES) do Departamento de Engenharia do Petróleo da UFRN, onde tive acesso ao uso do Porosímetro à gás. Agradeço a Moisés e Clara, por toda a disponibilidade e ajuda.

Ao LABSIS por fornecer o espaço físico e os instrumentos necessários para que este trabalho fosse realizado.

A todos os funcionários do departamento de Geofísica, especialmente Hukanisa Dantas e Geraldo Fernandes, por toda a atenção e profissionalismo.

RESUMO

O modelo de Kozeny-Carman relaciona a permeabilidade intrínseca com a porosidade, com a superfície específica e a tortuosidade do meio, as quais dependem, de forma complexa, da dimensão, forma e classificação granulométrica dos grãos. O presente trabalho realizou uma análise granulométrica de dez amostras compostas de microesferas vítreas bem selecionadas e não consolidadas. As faixas granulométricas foram determinadas a partir de ensaios de peneiramento realizados em laboratório. Após a seleção, foram geradas imagens microscópicas das partículas selecionadas, através de uma câmera acoplada a um estereomicroscópio óptico. Em seguida, utilizando o software ImageJ, foram medidos os diâmetros de 100 grãos para cada amostra. Dessa forma, os diâmetros médios foram determinados através das escalas aritmética e logarítmica, sendo esta última a escala mais adequada para estudos de sedimentologia. Histogramas foram construídos para a visualização da distribuição dos tamanhos dos grãos, apresentando curvas próximas à log-normais. Após a classificação granulométrica, foram realizados ensaios de porosidade e de permeabilidade. As medidas das porosidades referentes a cada amostra foram realizadas em um porosímetro à gás hélio. De forma geral, os resultados de porosidade obtidos estavam de acordo com o previsto para amostras bem selecionadas, apresentando pouca variação. Em amostras bem selecionadas, a porosidade não varia em função do tamanho do grão. Por fim, as amostras foram submetidas a ensaios de permeabilidade, com um permeâmetro de carga variável. Assim, os tempos de escoamento da água referentes às amostras foram registrados e utilizados para determinar os coeficientes de permeabilidade e, por conseguinte, as permeabilidades. Integrando as informações anteriores e adotando-se como fundamento o modelo de Kozeny-Carman, tornou-se possível a elaboração de gráficos de dispersão envolvendo os valores de permeabilidade obtidos com o diâmetro médio dos grãos, os quais confirmaram as ideias presentes na literatura através da obtenção de uma curva corroborada com o resultado esperado para uma equação de segundo grau com tendência de $R^2=0.9976$.

Palavras-chaves: Porosidade. Permeabilidade. Kozeny-Carman.

ABSTRACT

The Kozeny-Carman model relates the intrinsic permeability to the porosity with the specific surface and the tortuosity of the medium, which depend in complex form on the size, shape and grading of the grain. The present work carried out a granulometric analysis of ten samples composed of well selected and unconsolidated glass microspheres. The granulometric bands were determined from sieving tests performed in the laboratory. After selection, microscopic images of the selected particles were generated, through a camera coupled to an optical stereomicroscope. Then, using ImageJ software, the diameters of 100 grains were measured for each sample. Thus, the mean diameters were determined through the arithmetic and logarithmic scales, the latter being the most adequate scale for sedimentology studies. Histograms were constructed to visualize the distribution of grain sizes, presenting curves close to log-normal. After grading, porosity and permeability tests were performed. The porosity measurements for each sample were performed on a porosimeter to the helium gas. In general, the obtained porosity results were in agreement with the predicted ones for well selected samples, presenting little variation. In well selected samples, the porosity does not change as a function of grain size. Finally, the samples were submitted to permeability tests, with a variable load permeameter. Thus, the water run-off times for the samples were recorded and used to determine the permeability coefficients and, therefore, the permeabilities. By integrating the previous information and adopting as basis the Kozeny-Carman model it became possible to elaborate dispersion graphs involving the permeability values obtained with the average grain diameter, which confirmed the ideas present in the literature by obtaining of an curve with a trend of $R^2 = 0.9976$.

Keywords: Porosity. Permeability. Kozeny-Carman.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tipos de Porosidades: A – intergranular; B – de fissura; C – cárstica.....	9
Figura 2.2 – Permeâmetro de carga variável e respectivas equações.....	12
Figura 2.3 – Previsão de permeabilidade usando a equação de Kozeny-Carman e a escala de sub-poros. O gráfico Permeabilidade em função do diâmetro do grão tem o comportamento de uma curva.....	14
Figura 3.1 – Peneiras e respectivas malhas dispostas em ordem decrescente e acopladas ao agitador.....	15
Figura 3.2 – Separação de partículas após o peneiramento. Exemplo da faixa granulométrica 0,18-0,125 mm.....	16
Figura 3.3 - Microscópio Discovery V8 da Carl Zeiss e câmera acoplada (seta vermelha)	17
Figura 3.4 - Contagem dos diâmetros de 100 partículas da amostra 4 (linhas amarelas), utilizando as ferramentas do Image J.....	18
Figura 3.5 – Porosímetro a gás hélio.....	20
Figura 3.6 - Permeâmetro de carga variável adaptado para calcular os coeficientes de permeabilidade de cada amostra.....	21
Figura 4.1: Gráfico elucidando o comportamento da porosidade com o aumento do diâmetro médio dos grãos em ϕ	23
Figura 4.2 – Histograma referente à amostra da peneira de malha > 1.000 mm e $\bar{X}_\phi=0,28$, considerando as dez classes ($m\Phi$) e suas respectivas frequências.....	24
Figura 4.3 – Histograma referente à amostra da peneira de malha entre 0,355-0,250 mm e e $\bar{X}_\phi=1,877$, considerando as dez classes ($m\Phi$) e suas respectivas frequências.....	24
Figura 4.4 – Histograma referente à amostra da peneira de malha <0,062 mm e e $\bar{X}_\phi=3,859$, considerando as dez classes ($m\Phi$) e suas respectivas frequências.....	25
Figura 4.5 - Representação gráfica Permeabilidade em função do diâmetro médio da partícula.....	30
Figura 4.6 - Representação gráfica da Permeabilidade em função do diâmetro médio ao quadrado da partícula.....	30

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
Lista de Figuras.....	v
CAPÍTULO 1-INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Apresentação.....	1
1.2 Relevância do Tema.....	1
1.3 Objetivo.....	2
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1 Análise Granulométrica e Histogramas.....	2
2.2 Escalas Granulométricas.....	2
2.3 Propriedades e Parâmetros das Rochas.....	6
2.3.1 Porosidade.....	7
2.3.2 Medidas de Porosidade.....	10
2.3.3 Permeabilidade.....	11
2.3.4 Medidas de Permeabilidade.....	12
2.3.5 Modelo de Kozeny Carman (tubo capilar).....	12
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
3.1 Esferas Vítreas.....	14
3.2 Ensaio de Peneiramento.....	14
3.3 Imagens Microscópicas e Image J.....	17
3.4 Porosímetro à gás.....	19
3.5 Permeâmetro de Carga Variável.....	20
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	21
4.1 Porosidade e Diâmetro Médio.....	21
4.2 Análise Granulométrica e Histogramas.....	23
4.3 Permeabilidade.....	26
64.3.1 Coeficiente de Permeabilidade e Condutividade Hidráulica.....	26
4.3.2 Medidas de Permeabilidade.....	27
4.3.3 Modelo de Kozeny Carman.....	29

CAPÍTULO 5- CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31
REFERÊNCIAS.....	32

CAPÍTULO I- INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Este relatório consiste no trabalho de conclusão do curso de graduação em geofísica através da disciplina obrigatória GEF0161 – RELATÓRIO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA, realizada no período 2018.2. Esta disciplina é o requisito final para concluir o curso de graduação em Geofísica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte e, dessa forma, obter o título de Bacharel em Geofísica. As etapas que permitiram a finalização desse trabalho foram orientadas pelo Professor Prof. Dr. Francisco de Assis Olímpio Cabral.

1.2 Relevância do tema

A porosidade, a distribuição e a conectividade dos poros têm grande influência nas propriedades de transporte de fluido em meios porosos. São nos espaços vazios das rochas que estão armazenados diversos recursos naturais de interesse humano: água, minerais, petróleo e gás. Dessa forma, estudos petrofísicos voltados para o melhor entendimento do espaço poroso são importantes para descrever e caracterizar o volume dos poros, com o intuito de compreender melhor o comportamento do fluxo de fluidos em solos e reservatórios.

A petrofísica, com toda a sua complexidade e multidisciplinaridade, permite um amplo conhecimento sobre as rochas, através das propriedades físicas dos materiais que as compõem. Originalmente, os estudos objetivavam avaliar reservatórios de hidrocarbonetos, hoje estão relacionados às diversas áreas da Geofísica aplicada. Dessa forma, a sua crescente visibilidade é decorrente da grande relevância para a hidrogeologia subterrânea, geotecnia e também para o monitoramento ambiental.

Os estudos petrofísicos podem ocorrer por meio de uma perfilagem geofísica local, obtendo informações físicas da subsuperfície ou através de medidas de amostras de rochas sintéticas produzidas em laboratório. Estas últimas possibilitam, a partir de simulação de condições mais próximas às ideais, avaliar e testar de forma satisfatória as interações fluidos-sólidos nas rochas e sedimentos.

Para determinação das propriedades das amostras (esferas vítreas) estudadas neste trabalho foram realizados ensaios de peneiramento com diferentes malhas, análise microscópica para

contagem de grãos, medição de diâmetros, medidas de porosidade no porosímetro à gás e medidas de permeabilidade com permeâmetro de carga variável.

1.3 Objetivo

Os objetivos do presente estudo são de caráter acadêmico e científico. O cunho científico do projeto foi a análise da permeabilidade e da porosidade das amostras artificiais não consolidadas fabricadas de microesferas de vidro, visando a comparação com Modelo de Kozeny-Carman.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Análise Granulométrica e Histogramas

O termo granulometria pode ser entendido como a medida do tamanho dos grãos (SUGUIO, 1973) e é uma das propriedades físicas fundamentais dos sedimentos. A análise granulométrica consiste em determinar os tamanhos das partículas e a frequência em que ocorrem em determinada classe ou tamanho (LIMA et al., 2001). A partir disso, é possível deduzir determinadas informações sobre os sedimentos como a rocha de origem, transporte e ambientes deposicionais (DIAS, 2004).

Para realizar a análise granulométrica, é necessário determinar as dimensões das partículas individuais de uma amostra e estudar a distribuição delas. Em relação aos tamanhos, as partículas sedimentares apresentam uma elevada variação. Os sedimentos variam de extremamente finos (argila) a espessos (seixos). No estudo comparativo de sedimentos de diferentes granulometrias, as distribuições são descritas pelo desvio padrão. O desvio padrão representa o espalhamento em torno da média e indica a predominância ou não de uma granulometria (VELOSO, 2001).

2.2 Escalas Granulométricas

Escala Granulométrica são escalas de distribuição de tamanhos em classes. Criadas com a finalidade de atribuir nomenclaturas e terminologias através de uma base uniforme para resultados das análises granulométricas, geralmente expressam o diâmetro médio de cada partícula (GUY, 1969).

Foram elaboradas dois tipos de escalas. As que atribuem classificações verbais de acordo com valores numéricos são denominadas escalas de classes. Aquelas que relacionam os tamanhos

dos grãos de acordo com as malhas das peneiras utilizadas são denominadas de escalas numéricas (GUTIERREZ, 2009).

A primeira escala, referente ao tamanho dos grãos, foi proposta em 1898 e trata-se de uma escala geométrica que utiliza potências de 2mm (DIAS, 2004). Em 1922, Wentworth fez modificações na referida escala que passou a ser amplamente utilizada. Esta escala possui um intervalo geométrico fixo, baseados numa escala logarítmica de base 2 e considera as propriedades físicas dos grãos envolvidas em seu transporte para determinar os limites de suas classes (SUGUIO, 1973).

Como adaptação da escala de Wentworth, em 1934, Krumbein criou a escala Φ (fi) como uma transformação logarítmica da escala de Wentworth (Folk, 1968), com intenção de facilitar a aplicação dos métodos estatísticos convencionais à sedimentologia (GUY, 1969). A escala fi representa o logaritmo negativo na base 2 do diâmetro em milímetro, o que faz com que a escala seja inversa ao tamanho dos grãos, e é vantajosa pelo fato de representar as classes apenas por valores inteiros, facilitando sua representação e cálculo dos parâmetros estatísticos. (SUGUIO, 1973). A Tabela 2.1, definida por Wentworth (1922), expressa a classificação dos sedimentos em diversas granulometrias (mm):

Tabela 2.1 – Classificação dos sedimentos em diversas granulometrias

Nome	Limites de Classe (mm)
Matacão	4096,0 a 256,0
Bloco	256,0 a 64,0
Seixo	64,0 a 4,0
Grânulo	4,0 a 2,0
Areia muito grossa	2,0 a 1,0
Areia grossa	1,0 a 0,5
Areia média	0,5 a 0,25
Areia fina	0,25 a 0,125
Areia muito fina	0,125 a 0,0625
Silte grosso	0,0625 a 0,031
Silte médio	0,031 a 0,0156
Silte fino	0,0156 a 0,0078
Silte muito fino	0,0078 a 0,0039
Argila	0,0039 a 0,00006

Na sedimentologia, a escala aritmética é pouco utilizada, uma vez que esta gera desvios padrões demasiadamente grandes para as maiores classes de partículas, o que dificulta o estudo comparativo entre amostras com diâmetros médios distintos. Sendo assim, a escala logarítmica é a mais utilizada e apresenta uma distribuição em forma bastante próxima de uma curva log-normal nos histogramas de tamanho.

Para este trabalho, a escala aritmética foi utilizada somente para calcular o diâmetro médio das partículas (mm), para melhor visualização dos dados na correlação com as malhas de peneiras. A média calculada mediante o uso da escala aritmética foi realizada adotando-se como fundamento a equação:

$$\bar{X}_a = \frac{\sum f m_m}{100} \quad (2.1)$$

onde f representa a frequência e m_m o ponto médio de cada classe de tamanhos.

Já a escala logarítmica foi empregada para calcular o diâmetro médio, o desvio padrão e os histogramas associados à classificação granulométrica, sendo a mais adequada para as classificações. Esta escala, quando se trata de sedimentologia, possui uma profunda aceitação, com comportamento semelhante à curvas de log-normal nos histogramas de tamanho. Sua determinação dá-se mediante a aplicação de uma função logarítmica de base 2 sobre os valores dos diâmetros médios em mm (Equação 2.2), outorgando-lhe um fator de dois sobre os limites entre cada uma das suas respectivas classes como pode ser evidenciado na Tabela 2.2.

$$\varphi = -\text{Log}_2 d_m \quad (2.2)$$

Em que d_m representa o diâmetro médio da partícula em mm. Um fator negativo que deve ser levado em consideração quando se trata da escala logarítmica faz referência aos valores negativos evidenciados quando tratamos de amostras com granulometria maiores do que 2mm. Apesar disso, sua aplicabilidade é exaltada quando tratamos de amostras com granulometrias inferiores ao limite anteriormente citado, sendo a média destes valores calculada através da Equação 2.3

$$\bar{X}_\varphi = \frac{\sum f m_\varphi}{100} \quad (2.3)$$

Na qual f representa a frequência e m_φ o ponto médio de cada classe granulométrica na escala logarítmica (φ).

Na tabela 2.2 pode ser evidenciada a classificação granulométrica em escala logarítmica (φ) definida por Wentworth (1922) para sedimentos:

Tabela 2.2 – Classificação granulométrica em escala logarítmica

Nome	Limites de Classe (m φ)
Matação	-12 a -8
Bloco	-8 a -6
Seixo	-6 a -2
Grânulo	-2 a -1
Areia muito grossa	-1 a 0
Areia grossa	0 a 1
Areia média	1 a 2
Areia fina	2 a 3
Areia muito fina	3 a 4
Silte grosso	4 a 5
Silte médio	5 a 6
Silte fino	6 a 7
Silte muito fino	7 a 8
Argila	8 a 14

Com intuito de verificar o quão semelhante é um grão em relação ao outro ferramentas matemáticas são empregadas. Na Equação 2.4 encontrasse retratado dita ferramenta através do desvio padrão realizado sobre a escala logarítmica:

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\frac{\sum f(m_\varphi - \bar{X}_\varphi)^2}{100}} \quad (2.4)$$

Em que f representa a frequência, m_φ o ponto médio de cada classe granulométrica na escala logarítmica (φ) e \bar{X}_φ a média granulométrica em φ .

Através da estipulação dos valores referentes ao cálculo do desvio padrão, sua classificação qualitativa, de acordo com o selecionamento, pode ser realizada através das informações expostas por Blott e Pye (2001) na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Classificação em relação ao grau de seleção de acordo com os valores do desvio padrão na escala logarítmica.

Selecionamento	Desvio Padrão (ϕ)
Muito bem Selecionada	<0.35
Bem Selecionada	0.35 -0.50
Moderadamente Bem Selecionada	0.50-0.70
Moderadamente Selecionada	0.70-1.00
Mal Selecionada	1.00 -2.00
Muito Mal Selecionada	2.00 - 4.00
Extremamente Mal Selecionada	>4.00

Fonte: Adaptado de Blott e Pye (2001).

Para uma caracterização quantitativa dos parâmetros físicos, incluindo os tamanhos das partículas, é preciso seguir várias etapas, que vão da determinação de escalas até a escolha dos métodos de caracterização (FOLK, 1968). Essas dimensões podem ser obtidas a partir de métodos descritos e são representadas por gráficos e diagramas, sendo então avaliadas através parâmetros estatísticos (SUGUIO, 1973). Nesses estudos, as representações gráficas dos resultados são realizadas por meio de histogramas. Os histogramas são gráficos da distribuição de frequências de um conjunto de dados quantitativos contínuos.

2.3 Propriedades e parâmetros das rochas

Archie (1950) propôs a introdução do termo petrofísica, para agrupar todos os estudos de propriedades físicas das rochas relacionadas à distribuição de fluidos em seu espaço poroso. Hoje é definido como petrofísica o conjunto de estudos e disciplinas que dizem respeito às propriedades físicas de rochas e minerais, seja na matriz ou preenchendo poros, além dos fluidos que percolam no meio poroso.

Propriedades petrofísicas importantes em uma rocha reservatório incluem: porosidade, permeabilidade, textura, resistividade da rocha e do seu fluido à corrente elétrica, conteúdo de água como função da pressão capilar e a natureza tortuosa dos interstícios ou canais de poro. No entanto, segundo Tiab e Donaldson (2012), as duas propriedades petrofísicas mais importantes para o estudo de rochas reservatório são porosidade e permeabilidade. Ambas propriedades são detalhadas nos tópicos seguintes.

2.3.1 Porosidade

Segundo Karmann (2000), “a porosidade é uma propriedade física definida pela relação entre o volume de poros e o volume total de certo material”.

$$\Phi = \frac{Vp}{Vt} \times 100 \quad (2.5)$$

$$Vt = Vp + Vs \quad (2.6)$$

Onde: Φ é o valor de porosidade (%); Vp é volume total que os poros ocupam na rocha; Vt é o volume total da rocha; Vs é o volume sólido da rocha.

A porosidade assim definida é designada como porosidade total e é apresentada em porcentagem. Esta engloba todos os poros presentes na rocha, independente deles estarem ou não ligados entre si. A porosidade total é o volume de todos os poros, fraturas, fendas etc. ou, de modo generalizado, de todo fluido (por exemplo, água, gás, hidrocarbonetos) ou “não sólido” relacionado com o volume total da amostra (Equação 2.6) (SCHON, 2014).

Entretanto, poros não conectados são irrelevantes em estudos de reservatório. Dessa forma, adota-se uma outra medida chamada de porosidade efetiva, a qual depende unicamente dos poros interconectados. A definição de porosidade efetiva leva em consideração apenas os poros interconectados, os quais podem haver uma percolação de fluidos. Pode-se determinar essa porosidade por saturação de uma rocha com um fluido. Utiliza-se a razão entre volume de fluido presente em uma rocha e o seu volume total.

$$\Phi_e = \frac{V_e}{V_{total}} \times 100 \quad (2.7)$$

$$V_e = V_{total} - V_{seco} \quad (2.8)$$

Onde Φ_e é a porosidade efetiva (%), V_e volume de poros efetivamente conectados, V_{total} volume total da rocha e V_{seco} volume seco.

Grande parte dos reservatórios conhecidos apresenta porosidades que variam entre os 5 e 30% (Costa Silva, 2004). Os reservatórios são geralmente classificados em:

- Sem interesse: 0-5%
- Fraca: 5-10%
- Razoável: 10-15%
- Boa: 15-20%
- Muito boa: 20-30%

Considerando a formação dos poros no interior de uma rocha, esses podem possuir formação conjunta com a rocha ou posterior à sua formação, sendo denominadas de porosidade primária e secundária, respectivamente.

A porosidade primária ou deposicional é formada durante o processo de deposição dos sedimentos. Os principais fatores que influenciam na formação desse tipo de porosidade, são: empacotamento, tamanho dos grãos, compactação, seleção, angularidade e grau de cimentação.

A porosidade secundária ou pós-deposicional representa o resultado de processos geológicos subsequentes à conversão dos sedimentos em rocha. Os processos de geração de porosidade secundária são: rupturas, dissolução, dolomitização e fraturamento (FLUGEL, 2004). Geralmente, a porosidade em rochas carbonáticas é secundária, esse fato pode ser explicado devido ao processo de solução, dolomitização ou fraturamento.

Uma outra forma usual de classificar a porosidade é em função da natureza dos poros, onde surgem três tipos de porosidade (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Tipos de Porosidades: A – intergranular; B – de fissura; C – cárstica.



Fonte: http://www.sgguarani.org/microsite/pages/pt/info_aguas.php

A porosidade intergranular (Figura 2.1A) é característica de rochas sedimentares e sedimentos inconsolidados, sendo também conhecida como porosidade interpartícula (KARMANN, 2000). Essa porosidade (que varia de 10-40%) depende de alguns fatores para poder conter maiores ou menores quantidades de água. Quanto maior o tamanho dos grãos e menor o seu empacotamento (compactação) e maior é o espaço existente entre eles. Por outro lado, quanto menores as partículas e maior a cimentação entre elas, menos espaço sobra para ser preenchido pela água (PRESS et al., 2006).

A porosidade de fissura (Figura 2.1B) é também conhecida como porosidade de fraturas e pode ocorrer em rochas ígneas, metamórficas, ou mesmo sedimentares, bastando que hajam fraturas nessas rochas por onde a água pode penetrar e ficar armazenada. A porosidade nesse tipo é bem menor que no exemplo A, variando de 1-2% (PRESS et al., 2006).

Já a porosidade cárstica (Figura 2.1C) é apontada por Karmann (2000) como um tipo especial de porosidade que ocorre em rochas solúveis como calcários e mármore, onde os fluidos podem se acumular nos grandes vazios existentes no interior dessas rochas. Esses espaços vazios decorrem da dissolução parcial dessas rochas.

De acordo com ENGLER (2010), a porosidade não é alterada com a variação do tamanho médio das partículas. Rochas que são constituídas de partículas finas ou grossas de mesmo material devem apresentar aproximadamente a mesma porosidade. O tamanho dos grãos só influencia na porosidade quando há diferença no grau de seleção das partículas. Visto que na presença de diferentes texturas granulométricas, os grãos de menores dimensões preencherão os espaços

gerados por aqueles de maiores diâmetros, resultando assim em uma redução de porosidade da rocha.

2.3.2 Medidas de porosidade

Os métodos que determinam a porosidade em rochas podem ser classificados como diretos ou indiretos. Os diretos medem a porosidade efetiva em amostras pontuais de rocha no laboratório. Já os indiretos avaliam a porosidade total da formação da rocha, utilizando dados obtidos na perfilagem geofísica. (Nery, 1989 apud Jesus, 2004).

O método direto por injeção de gás é bastante empregado para medição de porosidade. Seu funcionamento tem como base “O princípio de expansão dos gases” – também conhecido como lei de *Boyle-Mariotte*. A variação de Volume V e a Pressão P de um gás ideal em temperaturas constantes estão relacionados da seguinte forma:

$$PV = \text{constante} \quad (2.9)$$

$$P_i V_i = P_f V_f \quad (2.10)$$

O porosímetro à gás é composto por duas câmaras. Uma é chamada de câmara de referência, a qual possui um volume constante conhecido. A outra contém a amostra que vai ser analisada. Ambas as câmaras são conectadas por uma válvula. O gás é injetado na câmara de referência de volume V_1 a uma pressão P_1 . A válvula que liga as câmaras é aberta, liberando o gás para penetrar na amostra (que está dentro da outra câmara). A pressão final de equilíbrio é P_2 .

Após a abertura da válvula, o gás ocupa o volume V_2 , o qual corresponde ao volume da câmara de referência V_1 adicionado a uma variação de volume devido aos poros da rocha (ΔV). Obtendo-se assim a equação:

$$V_2 = V_1 + \Delta V \quad (2.11)$$

Substituindo V_2 na Equação $P_1 V_1 = P_2 V_2$:

$$P_1 V_1 = P_2 (V_1 + \Delta V) \quad (2.12)$$

Dessa forma, a variação de volume ΔV corresponde ao volume de vazios da rocha (V_v), sendo assim, pode-se calcular a porosidade efetiva uma vez que seja conhecido o volume total da amostra.

Embora este método faça uso de equipamento de alto custo, apresenta uma grande vantagem no que concerne a preservação da amostra após o ensaio, podendo a mesma ser utilizada posteriormente.

2.3.3 Permeabilidade

A capacidade de um material conduzir fluidos através de seus poros é conhecida como permeabilidade. A definição matemática clássica para a permeabilidade surge dos experimentos de Henry Darcy, que em 1856 propôs a seguinte equação para o fluxo em um meio poroso:

$$K = \frac{Q \mu L}{A \Delta P} \quad (2.13)$$

Onde: K é a permeabilidade (Darcy); Q é a vazão volumétrica do fluido (cm^3/s); μ é a viscosidade do fluido (cP); L é o comprimento da seção porosa por onde o fluxo segue (cm); A é a área de seção da amostra da rocha-reservatório (cm^2); ΔP é diferença de pressão hidrostática (atm);

Sendo Q o fluxo de água (cm^3/s) por meio do cilindro de areia, A é seção transversal do cilindro (cm^2), h_1 e h_2 (cm) nível de água em manômetros colocados nas faces de entrada e saída do filtro, L (cm) é a altura do meio poroso e k é uma constante de proporcionalidade característica do meio.

Em um olhar prático existem relações intrínsecas entre a porosidade e a permeabilidade onde, geralmente, a permeabilidade aumenta com a porosidade, mas em alguns casos há materiais que contem poros de dimensões consideráveis, entretanto, não há intercomunicação entre esses poros e a água fica impossibilitada de circular dentro do material. Um outro caso bastante estudado é o das argilas, que podem atingir até 50% de porosidade, porém a permeabilidade quase que inexistente, fator que decorre devido ao tamanho diminuto dos poros onde a água fica presa por absorção (KARMANN, 2000). Os estudos de reservatórios de água subterrânea são bons exemplos de análises que dependem fortemente da relação entre porosidade e permeabilidade.

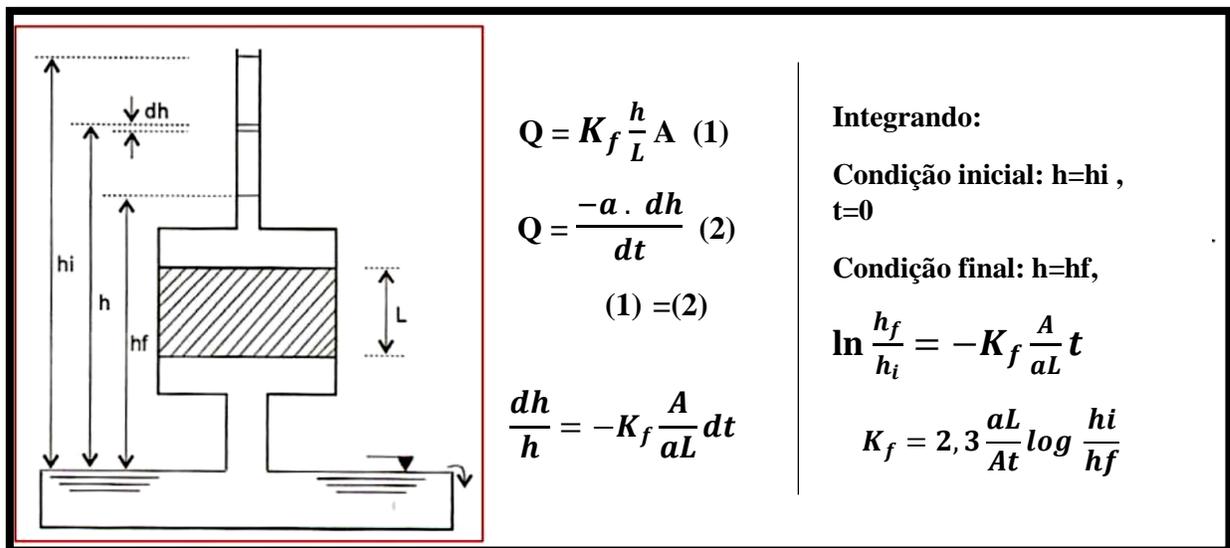
Na natureza, no entanto, diferentes tipos de fluido podem coexistir no interior de uma rocha, como água, gás e óleo. Assim surge a necessidade uma medida da facilidade de escoamento de um fluido em presença de outro, que é a chamada permeabilidade efetiva e depende das características de cada fluido. A permeabilidade relativa é a forma normalizada de quantificar a permeabilidade

efetiva e resulta da razão entre a permeabilidade efetiva do fluido e a permeabilidade absoluta da rocha.

2.3.4 Medidas de permeabilidade

Existem diferentes maneiras de determinar a permeabilidade. Pode ser a partir de equações, através de medidas feitas em laboratório com o uso de permeâmetros (de carga constante ou variável) ou no campo por meio de ensaio de bombeamento. O método a ser escolhido depende do meio estudado e das condições disponíveis. Neste trabalho, foram realizados ensaios utilizando um Permeâmetro de Carga variável. Este tipo permeâmetro é geralmente utilizado para solos finos ou amostras com baixa vazão, de forma que o volume de fluido que o percola é pequeno. Nessas amostras, o coeficiente de permeabilidade é muito baixo e a determinação deste coeficiente através do permeâmetro de carga constante seria impreciso. É registrado o tempo que a água na bureta superior leva para baixar da altura inicial h_i à altura final h_f num instante t qualquer.

Figura 2.2 – Permeâmetro de carga variável e respectivas equações.



Fonte: Prof. Pedro Monteiro (2006).

2.3.5 Modelo de Kozeny-Carman (tubo capilar)

Quantificar a permeabilidade em estudos é fundamental para a descrição de diferentes processos físicos, devido a geometria complicada dos espaços vazios, diversos modelos de permeabilidade foram criados para simplificar o estudo. Esses são criados a partir de equações

desenvolvida a partir da informação teórica e adequações obtidas de modo empírico, as quais variam com as condições geológicas e texturais específicas para cada estudo. Os modelos visam descrever os principais mecanismos de controle.

O modelo de Kozeny-Carman é um dos modelos mais utilizados para análise de permeabilidade, principalmente de sedimentos clásticos, já que consiste em uma simplificação, em que se considera que os poros estão conectados por um tubo capilar que representaria um canal poroso e o fluxo comporta-se de acordo com a lei de Darcy e é constante, o fluido é newtoniano e incompressível. A rocha seria representada por um cubo feito de material impermeável. A equação de Kozeny-Carman é:

$$K = \frac{1}{cS^2} \frac{\varphi^3}{(1-\varphi)^2} \quad (2.14)$$

Onde c = constante de Kozeny-Carman; S = superfície da área. A constante c é usada considerando a tortuosidade dos caminhos vazios e formas dos poros.

Dessa forma, temos que a permeabilidade é função da porosidade, do raio do poro e da tortuosidade (propriedade relacionada ao real caminho percorrido por um fluido em uma amostra e o caminho teórico).

Para partículas esféricas de tamanho homogêneo, tem-se:

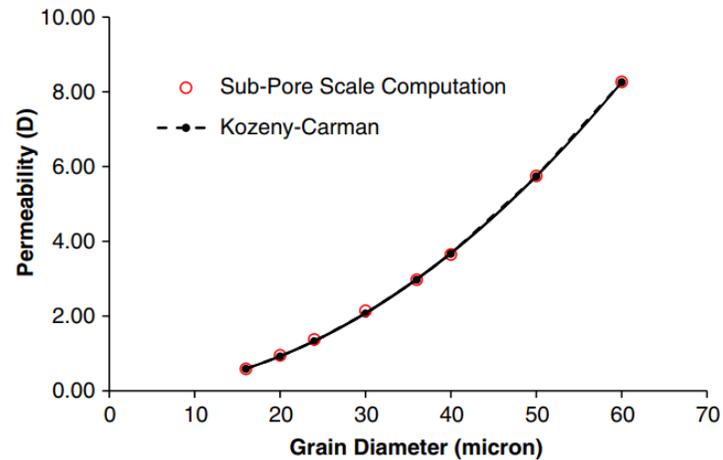
$$K = \frac{D_p^2 \varphi^3}{36\beta(1-\varphi)^2} \quad (2.15)$$

Onde D_p é o diâmetro da partícula, φ a porosidade, β varia de 4-5 (sendo que para partículas esféricas com porosidade entre 30-50% $\beta = 5$).

$$K = \text{constante} \times D_p^2 \quad (2.16)$$

Dessa forma, pode-se esperar num gráfico $K \times D_p$ uma função polinomial de 2º grau, como a descrita no exemplo da Figura 2.3:

Figura 2.3: Previsão de permeabilidade usando a equação de Kozeny-Carman e a escala de sub-poros. O gráfico Permeabilidade em função do diâmetro do grão tem o comportamento de uma curva.



Fonte: Retirado de Taheri et al. (2017)

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Esferas Vítreas

Foram utilizadas amostras fornecidas pelo Laboratório de Petrofísica I do Laboratório Sismológico (LABSIS/UFRN). Estas amostras consistem de microesferas vítreas de diferentes granulometrias, com mesmos graus de arredondamento e esferecidade. O vidro é uma substância amorfa e inorgânica, sendo fabricado pela fusão de sílica (dióxido de silício) com um óxido básico. Em geral é transparente, podendo também ser translúcido ou opaco. Apresenta propriedades como dureza e rigidez em temperaturas ambientes, embora a elevadas temperaturas torne-se altamente plástico.

3.2 Ensaio de Peneiramento

Para análise de amostras com bom grau de selecionamento, é necessário inicialmente que seja realizado um processo de peneiramento das amostras vítreas em questão. Esse processo foi realizado no Laboratório Sedimentologia do Departamento de Geologia da UFRN. Foram utilizadas nove peneiras de diferentes malhas, além de uma tampa e o fundo, ambos específicos para as peneiras. A Tabela 3.1, a seguir, reúne as dimensões escolhidas.

Tabela 3.1 – Malhas das Peneiras Utilizadas (mm).

Malhas das Peneiras utilizadas (mm)
1,000
0,710
0,500
0,355
0,250
0,180
0,125
0,090
0,062

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

O material foi sendo colocado nas peneiras que, dispostas verticalmente, foram então acopladas a um vibrador mecânico (Figura 3.1).

Figura 3.1 – Peneiras e respectivas malhas dispostas em ordem decrescente e acopladas ao agitador

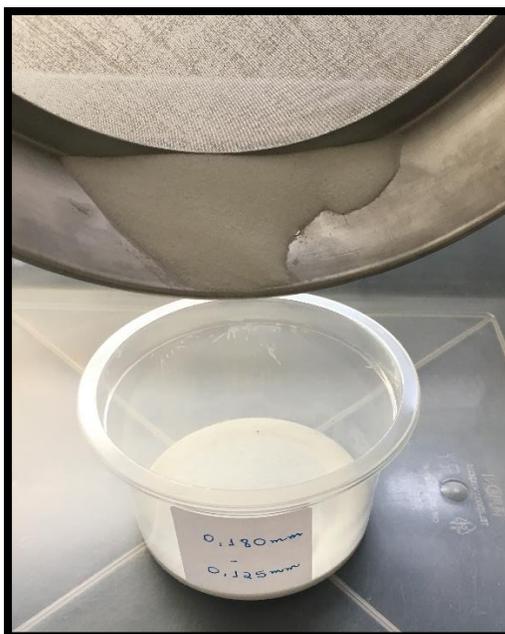


Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Este agitador de peneiras foi utilizado para acelerar e otimizar o processo de peneiramento, que foi realizado repetidas vezes. Finalmente, o material foi separado em dez faixa

granulométricas, onde cada faixa foi determinada por um par de peneiras, a que o material conseguiu atravessar e a outra onde ficou retido. As partículas foram sendo recolhidas e organizadas em diferentes recipientes, cada qual etiquetado com a faixa granulométrica correspondente (Figura 3.2). Assim, as partículas foram separadas em dez amostras com diferentes granulometrias (Tabela 3.2).

Figura 3.2 – Separação de partículas após o peneiramento. Exemplo da faixa granulométrica 0,18-0,125 mm.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Tabela 3.2 – Amostras obtidas após o peneiramento e suas respectivas faixas granulométricas

Número da amostra	Faixa Granulométrica (mm)
1	> 1,000
2	1,000 a 0,710
3	0,710 a 500
4	0,500 a 0,355
5	0,355 a 0,250
6	0,250 a 0,180
7	0,180 a 0,125

8	0,125 a 0,090
9	0,090 a 0,062
10	< 0,062

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

3.3 Imagens Microscópicas e Image J

Uma vez que as partículas foram separadas são realizadas fotos para cada faixa granulométrica. Estas fotos são registradas a partir de uma câmera acoplada ao microscópio Discovery V8 da Carl Zeiss (Figura 3.3), disponível no Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental (GGEMMA/UFRN).

Figura 3.3 - Microscópio Discovery V8 da Carl Zeiss e câmera acoplada (seta vermelha)



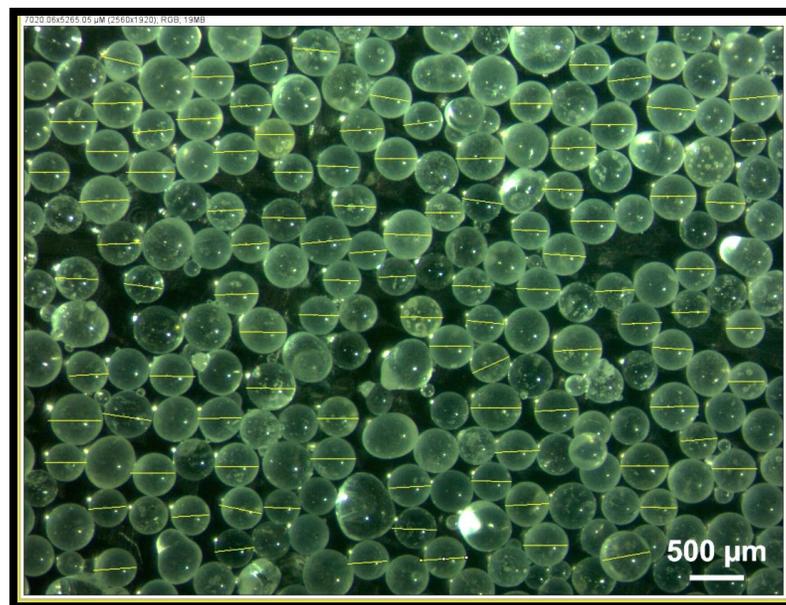
Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

As imagens obtidas foram em seguida analisadas no *software Image J* que possibilitou a contagem dos grãos. Este *software* foi desenvolvido pela *National Institutes of Health* e está disponível para domínio público. Para cada faixa granulométrica, foram medidos os diâmetros de

100 grãos para fins estatísticos e sua contagem, segundo Francisco Júnior (2017), é realizada a partir dos seguintes passos:

1. *File* -> *Open* -> Imagem em JPG: seleciona e abre a imagem;
2. *Plugins* -> *Shortcuts* -> *Add Shortcuts* -> selecionar algum número *Shortcut* qualquer e selecionar o comando *Measurement and Label*;
3. *Analyze* -> *Set Measurements* -> selecionar *Add to Overlay*: para realizar as medidas de imagem;
4. Selecionar o ícone *Straight*, na barra de tarefas; clicar e arrastar sobre a escala da imagem;
5. *Analyze* -> *Set Scale* -> colocar o tamanho e unidade da escala: para definir escalas de medida;
6. Para começar a medir os comprimentos dos diâmetros com a figura em primeiro plano, basta clicar e arrastar sobre um grão qualquer e pressionar a “letra M”. Imediatamente a caixa de resultados aparece constando as dimensões medidas (Figura 3.4).

Figura 3.4 - Contagem dos diâmetros de 100 partículas da amostra 4 (linhas amarelas), utilizando as ferramentas do *Image J*.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Os diâmetros foram medidos em micrômetros e estes valores ficam disponíveis em uma caixa de resultados do próprio programa *Image J*. Posteriormente, os valores obtidos foram transferidos para o *software Microsoft Office Excel*, onde foram convertidos de micrômetros para milímetros e organizados em tabelas. A partir dos diâmetros medidos de cada faixa granulométrica, foi realizada uma média aritmética para cálculo do diâmetro médio dos grãos (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Diâmetros médios obtidos por média aritmética para cada faixa granulométrica das dez amostras

Número da Amostra	Faixa granulométrica (mm)	Diâmetro médio (mm)
1	> 1,000	1,198
2	1,000 a 0,710	0,77828905
3	0,710 a 500	0,7003684
4	0,500 a 0,355	0,39362485
5	0,355 a 0,250	0,27930944
6	0,250 a 0,180	0,217028
7	0,180 a 0,125	0,14882043
8	0,125 a 0,090	0,112037
9	0,090 a 0,062	0,07306442
10	<0,062	0,0562481

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

3.4 Porosímetro à gás

As medidas de porosidade das amostras foram realizadas com o equipamento Porosímetro Educacional à Gás Hélio (Helium Porosimeter for Educational Purpose – HEP-E) do Laboratório de Engenharia de Reservatórios do Petróleo (LABRES) do Departamento de Engenharia do Petróleo da UFRN. Este porosímetro permite determinar o volume de grão e de poro de um determinado *plug* através da expansão isotérmica do gás hélio, juntamente com a aplicação da lei de *Boyle* e *Charles*. Subsequentemente, porosidade e densidade do grão podem ser calculados.

Através de um *template* de Excel fornecido para os cálculos desses parâmetros, foi possível registrar os valores de pressão medidos, assim como a massa e volume de cada amostra.

Considerando que as medidas eram feitas com amostras não consolidadas, foi necessário utilizar um pequeno recipiente que comportasse os sedimentos. No próprio *template* utilizado, o volume do recipiente foi acrescentado ao volume sólido da câmara, sendo assim desconsiderado para os cálculos de porosidade.

Figura 3.5 – Porosímetro a gás hélio



Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

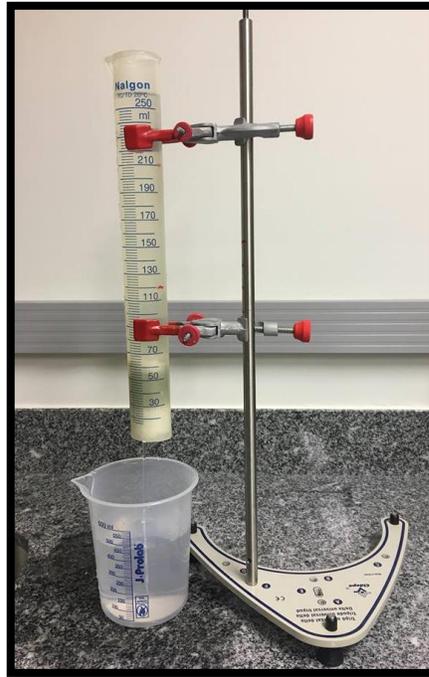
3.5 Permeâmetro de Carga Variável

Para medição das permeabilidades das amostras, foi realizada uma adaptação de permeâmetro de carga variável, utilizando uma proveta vazada milimetrada fixada no suporte universal e um béquer para armazenar a água que escoou. Como a amostra não é consolidada, foi necessário utilizar um material que pudesse dar um suporte aos sedimentos, mas que não interferisse no fluxo da água. Portanto, foi utilizada gaze estéril para tal finalidade.

Após colocar as microesferas de cada amostra no interior da proveta, foi sendo acrescentada água até atingir a saturação da amostra. Quando a saturação era atingida iniciava-se a medição de

tempo a partir de um cronômetro que registrasse o tempo de escoamento da água de H_i (altura inicial) para H_f (altura final). Com a finalidade de otimizar resultados, foram registrados dez tempos para cada amostra e depois realizada uma média aritmética dos valores.

Figura 3.6. - Permeâmetro de carga variável adaptado para calcular os coeficientes de permeabilidade de cada amostra.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Porosidade e Diâmetro Médio

A última etapa deste relatório consistiu na estipulação dos diâmetros médios das dez amostras analisadas. Estes foram obtidos através da aplicação da média aritmética e logarítmica sobre os valores adquiridos durante o estudo granulométrico de 100 partículas para cada uma das amostras.

Na Tabela 4.1 evidenciam-se os valores de porosidade obtidos referentes a cada uma das dez amostras analisadas, mediante a utilização do porosímetro a gás anteriormente definido. Nesta é possível visualizar que há uma variação pequena nos valores de porosidade. Este resultado encontra-se de acordo com o esperado, uma vez que a porosidade não depende da variação do tamanho do grão em uma amostra bem selecionada.

Tabela 4.1 – Amostras selecionadas com seus respectivos valores de diâmetros médios (mm e ϕ) e porosidades calculadas.

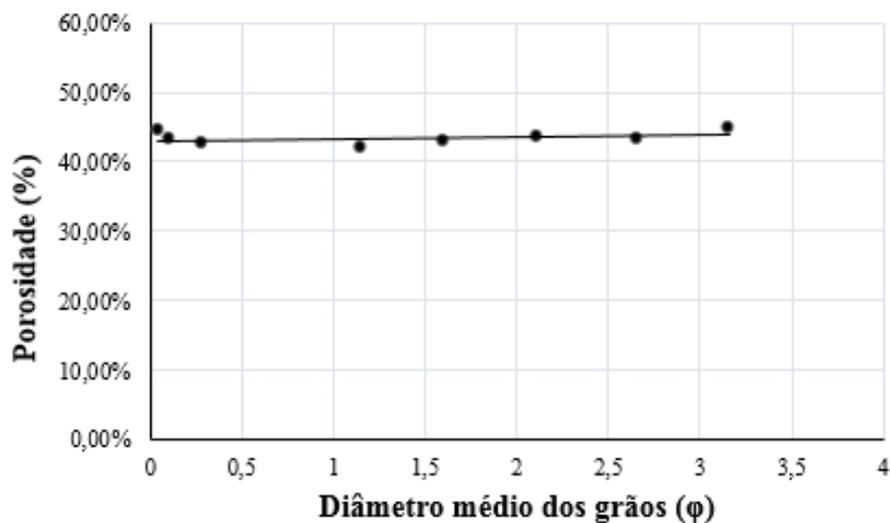
Amostra	Diâmetro médio dos grãos (mm)	Diâmetro médio dos grãos (ϕ)	Porosidade (%)
1	1,198	0,042898046	44,43%
2	0,77828905	0,097517183	43,36%
3	0,7003684	0,281	42,68%
4	0,39362485	1,146	42,08%
5	0,27930944	1,603	42,96%
6	0,217028	2,114	43,59%
7	0,14882043	2,660075	43,37%
8	0,112037	3,156	44,85%
9	0,07306442	3,726238402	49,54%
10	0,0562481	4,216684	54,45%

Fonte: Elaborada pela Autora, 2018

Analisando os valores obtidos referentes à porosidade, observa-se uma variação mais significativa presente nas amostras 9 e 10, sendo estes associados a dificuldades presentes na realização do estudo, mais precisamente à perda de material durante o processo de medição no interior do porosímetro. Como os grãos dessas amostras são de menor tamanho, estes sofreram deslocamento considerável e desencadeou um vazamento no equipamento. Para evitar a ocorrência deste fato, torna-se, portanto, necessário a utilização de um filtro. Dessa forma, o gás poderá penetrar na amostra e os sedimentos não serão deslocados. O processo de medição não pôde ser repetido devido a dificuldades técnicas associadas ao equipamento utilizado.

As informações contidas na Tabela 4.1, permitiram a correlação entre a porosidade e o diâmetro médio dos grãos das amostras, possibilitando a construção da Figura 4.1, na qual desconsidera-se os valores discrepantes obtidos para as amostras 9 e 10 e evidencia-se uma taxa constante de porosidade, oscilando entre 42,08% e 44,85%.

Figura 4.1: Gráfico elucidando o comportamento da porosidade com o aumento do diâmetro médio dos grãos em ϕ .

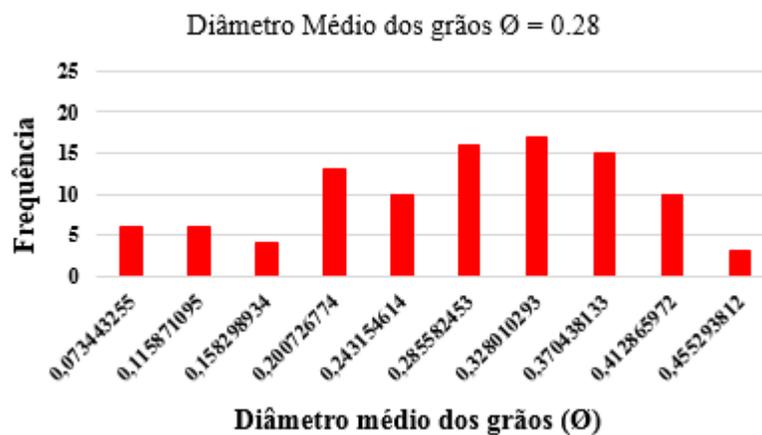


Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

4.2 Análise granulométrica e Histogramas

Como retratado anteriormente, um histograma pode ser entendido como uma ferramenta matemática que tem como objetivo ilustrar como uma determinada informação se encontra distribuída. Sendo assim, neste tópico, sua aplicabilidade deu-se através da possibilidade de visualizar a distribuição granulométrica em cada uma das dez amostras analisadas. Nestes histogramas, cada classe foi descrita de acordo com os valores referentes às suas respectivas granulometrias, as quais fundamentam-se nos intervalos delimitados na Tabela 2.2.

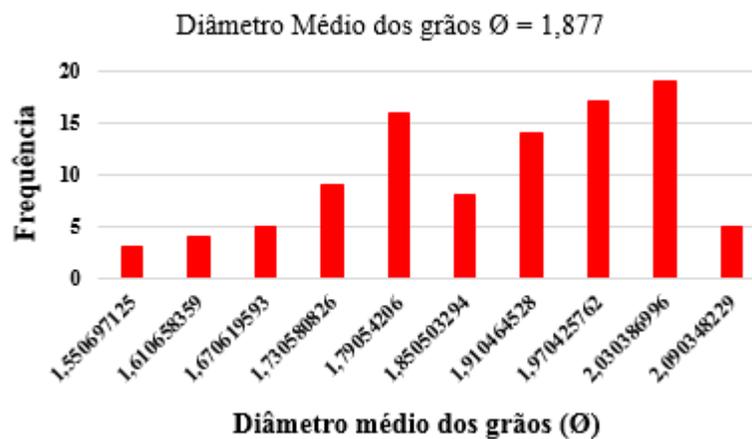
Figura 4.2 – Histograma referente à amostra da peneira de malha > 1.000 mm e $\bar{X}_\varphi=0,28$, considerando as dez classes ($m\varphi$) e suas respectivas frequências.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Na figura 4.2, ocorre a representação do histograma referente à maior fração granulométrica (amostra 1), com valores oscilando entre 0.007 a 0.455, correspondentes à classificação de Areia grossa.

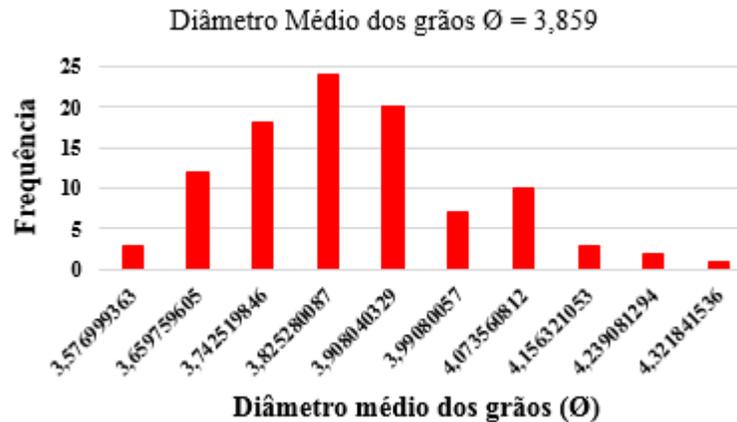
Figura 4.3 – Histograma referente à amostra da peneira de malha entre 0,355-0,250 mm e $\bar{X}_\varphi=1,877$, considerando as dez classes ($m\varphi$) e suas respectivas frequências.



Fonte: Elaborada pela Autora, 2018.

Na figura 4.3, ocorre a representação do histograma referente à fração granulométrica intermediária (amostra 5), com valores oscilando entre 1.55 a 2.09 correspondentes a uma variação textural entre areia média e areia muito fina.

Figura 4.4 – Histograma referente à amostra da peneira de malha <0,062 mm e $\bar{X}_\varphi=3,859$, considerando as dez classes ($m\varphi$) e suas respectivas frequências.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Na figura 4.4, ocorre a representação do histograma referente à menor fração granulométrica (amostra 10), com valores oscilando entre 3,57 a 4,32 correspondentes a uma variação textural entre areia muito fina e silte grosso.

Assim como nessas três amostras, um histograma foi realizado para cada uma das outras restantes, sendo suas faixas granulométricas dominantes retratadas na Tabela 4.2. Na mesma tabela também estão presentes os valores de desvio padrão e o grau de seleção das amostras.

Tabela 4.2 – Classificação textural realizada adotando-se a morfologia descrita anteriormente por Wentworth (1922) de acordo com a análise granulométrica efetuada para as dez amostras em análise. Todas as amostras foram classificadas como muito bem selecionadas, com base na tabela 2.3.

Amostras	Diâmetro Médio dos Grãos (φ)	Predominância	Desvio Padrão	Grau de seleção
1	0.28	Areia Grossa	0,101452229	Muito bem selecionada
2	0.393	Areia Grossa	0,105452564	Muito bem selecionada
3	0.564	Areia Grossa	0,122047333	Muito bem selecionada

4	1.379	Areia Média	0,111562036	Muito bem selecionada
5	1.877	Areia Média	0,141646203	Muito bem selecionada
6	2.214	Areia Fina	0,055278814	Muito bem selecionada
7	2.778	Areia Fina	0,103148634	Muito bem selecionada
8	3.178	Areia Muito Fina	0,095397977	Muito bem selecionada
9	3.809	Areia Muito Fina	0,133326109	Muito bem selecionada
10	3.859	Areia Muito Fina	0,153759122	Muito bem selecionada

Fonte: Elaborada pela Autora, 2018.

4.3 Permeabilidade

4.3.1 Coeficiente de permeabilidade ou Condutividade hidráulica

Realizou-se ensaio de condutividade hidráulica variável em laboratório. Aplicando as medidas de tempo obtidas com o Permeâmetro de carga variável, foi possível encontrar os valores dos coeficientes de permeabilidade referentes às dez amostras selecionadas. A equação utilizada foi a referente à figura 2.2:

$$K_f = 2,3 \frac{a.L}{A.t} \log \frac{h_i}{h_f} \quad (4.1)$$

Em que: k = coeficiente de permeabilidade ; a = área da seção interna do tubo; L = altura da amostra; A = área da base da amostra do solo; t = tempo de escoamento decorrido durante o ensaio; hi , hf = alturas inicial e final da lâmina de água. Como o permeâmetro foi feito a partir de uma proveta vazada, os valores de a (área da seção interna do tubo) e de A (área da base da amostra) são coincidentes, logo:

$$a = A \quad (4.2)$$

$$K_f = 2,3 \frac{L}{t} \log \frac{h_i}{h_f} \quad (4.3)$$

A tabela 4.3 reúne as medidas referentes aos ensaios de permeabilidade:

Tabela 4.3 - Valores referentes ao permeâmetro e as medidas de tempo de escoamento para as amostras

L (m)	hi (m)	hf (m)	t (s)	Amostra
0.03	0.24	0.14	19.1	1

			41.73	2
			50.15	3
			108	4
			140	5
			175.11	6
			270	7
			350	8
			500.92	9
			730	10

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Os valores de coeficiente de permeabilidade calculados foram reunidos na tabela:

Tabela 4.4 – Coeficientes de permeabilidade para as dez amostras

Amostra	Coeficiente de permeabilidade (m/s)
1	0,0008456
2	0,0003871
3	0,0003221
4	0,0001496
5	0,0001154
6	0,0000922
7	0,0000598
8	0,0000461
9	0,0000322
10	0,0000221

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

4.3.2 Medidas de permeabilidade

Encontrados os valores de coeficiente de permeabilidade (k_f) de cada amostra, é possível então determinar os valores de permeabilidade (K), através da equação:

$$K = \frac{\eta}{\gamma} k_f \quad (4.4)$$

Em que K é a permeabilidade, η é a viscosidade dinâmica do fluido, γ o peso específico da água e k_f é o coeficiente de permeabilidade.

Para a água, $\eta = 1,0030 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$ e $\gamma = 1,000 \times 10^4 \text{N/m}^3$. Aplicando os valores na equação com os valores de k_f , pode-se encontrar os valores para permeabilidade de cada amostra. A tabela 4.5 reúne os valores de permeabilidade obtidos para as dez amostras nas unidades m^2 , mD ($1 \text{mD} \approx 10^{-12} \text{m}^2$) e mD .

Tabela 4.5 - Valores de permeabilidade para as 10 amostras, em m^2 e mD

Amostra	K (m^2)	D	mD
1	$8,48178 \times 10^{-11}$	84,81778241	84817,78241
2	$3,88215 \times 10^{-11}$	38,82146283	38821,46283
3	$3,23035 \times 10^{-11}$	32,30348243	32303,48243
4	$1,50002 \times 10^{-11}$	15,00018189	15000,18189
5	$1,15716 \times 10^{-11}$	11,57156889	11571,56889
6	$9,25144 \times 10^{-12}$	9,251439918	9251,439918
7	$6,0000 \times 10^{-12}$	6,000072756	6000,072756
8	$4,62863 \times 10^{-12}$	4,628627554	4628,627554
9	$3,23409 \times 10^{-12}$	3,234088565	3234,088565
10	$2,2192 \times 10^{-12}$	2,219204992	2219,204992

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

4.3.3 Modelo de Kozeny-Carman

Conhecendo os valores de diâmetro médio, porosidade e permeabilidade de todas as amostras, pode-se, portanto, fazer uma avaliação de como essas grandezas estão correlacionadas. O modelo de Kozeny-Carman relaciona a permeabilidade intrínseca com a porosidade, com a superfície específica e a tortuosidade do meio, as quais dependem, de forma complexa, da dimensão, forma e classificação granulométrica dos grãos.

As amostras deste estudo são compostas por microesferas bem selecionadas. Dessa forma, será aplicada a equação de Kozeny-Carman para partículas esféricas de tamanho homogêneo:

$$k = \frac{D_p^2 \phi^3}{36\beta(1-\phi)^2} \quad (4.5)$$

Onde D_p é o diâmetro da partícula, ϕ a porosidade, β varia de 4-5 (sendo que para partículas esféricas com porosidade entre 30-50% $\beta = 5$).

Substituindo estes valores na equação:

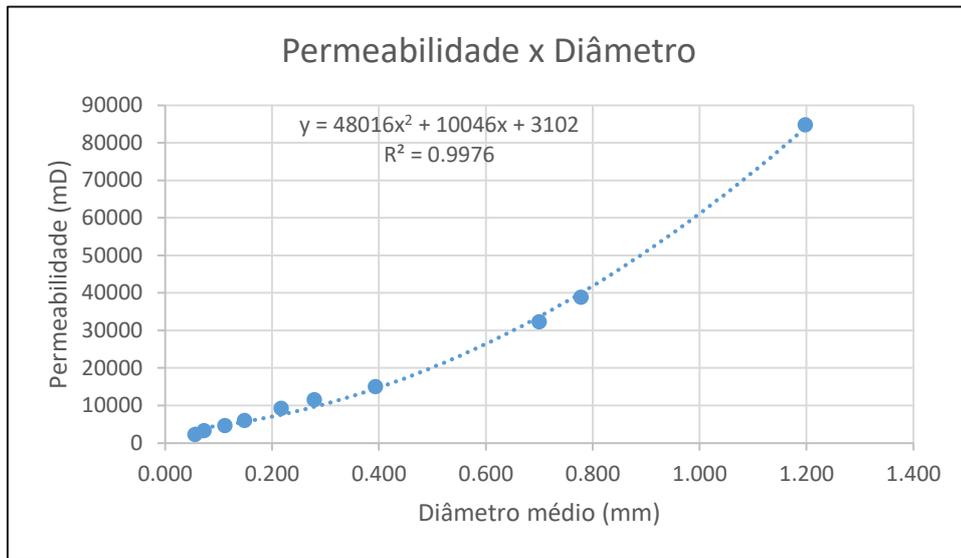
A porosidade média obtida neste estudo é de 43% (0,43).

$$K = \frac{D_p^2 (0,43)^3}{36 \times 5 (0,57)^2} \quad (4.6)$$

$$K = \text{constante} \times D_p^2 \quad (4.7)$$

Dessa forma, pode-se esperar num gráfico $K \times D_p$ uma função polinomial de grau 2. A figura mostra o gráfico que representa o comportamento da permeabilidade em função do diâmetro utilizando os dados deste estudo.

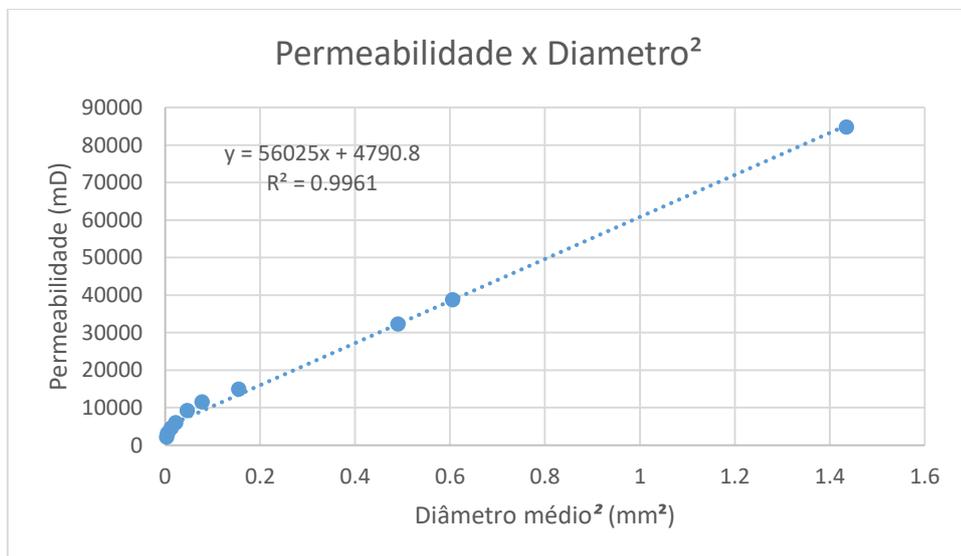
Figura 4.5 - Representação gráfica da Permeabilidade em função do diâmetro médio da partícula.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Fazendo um gráfico de K em função de D_p^2 , é de se esperar que a função seja uma reta. O resultado obtido está de acordo com o esperado, como mostra a figura :

Figura 4.6 - Representação gráfica da Permeabilidade em função do diâmetro médio ao quadrado da partícula.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2018

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo de Kozeny-Carman relaciona a permeabilidade intrínseca com a porosidade, a superfície específica e a tortuosidade do meio, as quais dependem, de forma complexa, da dimensão, forma e classificação granulométrica dos grãos. Neste trabalho, a etapa inicial consistiu na análise granulométrica dos grãos. A partir de ensaios de peneiramento, foi possível selecionar os grãos em dez amostras de distintas faixas granulométricas.

Através da utilização do software Image J, as faixas granulométricas anteriormente selecionadas foram classificadas manualmente de acordo com seus diâmetros. Com a aplicação da escala logarítmica nos dados obtidos, dez subníveis foram definidos para cada uma das faixas. A elaboração dos histogramas, envolvendo tais subníveis e a frequência, tornou possível uma melhor visualização do selecionamento dos grãos. Os histogramas realizados coincidiram com o que era esperado, visto que apresentaram um comportamento próximo à curva log-normal, estando de acordo com a literatura.

Os ensaios de porosidade foram realizados utilizando o porosímetro a gás Hélio. Por se tratar de amostras bem selecionadas, era esperado que as porosidades nas mesmas apresentassem valores bem semelhantes. Isso porque em amostras homogêneas, a porosidade não varia com o tamanho do grão. Entretanto, as amostras 9 e 10 apresentaram valores inconsistentes, superiores ao previsto. Durante as medições, foi possível perceber um vazamento de partículas. Como os grãos dessas amostras são de menor tamanho, estes sofreram deslocamento considerável e, assim, houve algum entupimento que pode ter desencadeado um vazamento no equipamento. Para evitar a ocorrência deste fato, torna-se, portanto, necessário a utilização de um filtro. Dessa forma, o gás poderá penetrar na amostra e os sedimentos não serão deslocados.

Por fim, as amostras selecionadas foram submetidas a ensaios de permeabilidade, com um permeâmetro de carga variável. Assim, os tempos de escoamento da água referentes às amostras foram registrados e utilizados para determinar os coeficientes de permeabilidade e, por conseguinte, as permeabilidades. Integrando as informações anteriores e adotando-se como fundamento o modelo de Kozeny-Carman tornou-se possível a elaboração de gráficos de dispersão envolvendo os valores de permeabilidade obtidos com o diâmetro médio dos grãos, os quais confirmaram o que se era esperado, através da obtenção de uma curva de grau 2 com tendência de $R^2 = 0.9976$.

REFERÊNCIAS

- ARCHIE, G. E. Introduction to Petrophysics of Reservoir Rocks. AAPG Bulletin, v. 34, n. 5, p. 943–961, 1950.
- BLOTT, S.J; PYE, K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. Earth Surface Processes and Landforms, v. 26, p.1237–1248, 2001.
- DIAS, J. A. A Análise Sedimentar e o Conehecimento dos Sistemas Marinhos (versão preliminar). Faro. 2004.
- ENGLER, T. W. Fluid Flow. In: Porous Media. New Mexico Tech. 2010.
- LIMA, E. M. F; LUZ, J. A. M. Análise Granulométrica por Técnicas que se Baseiam na Sedimentação Gravitacional: Lei de Stokes. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 54, n. 2, Abr./Jun. 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sciarttext&pid=S0370-44672001000200014>. Acesso em: 07 dez. 2018.
- Guy H. P. Laboratory Theory and Methods Jot Sediment Analysis: Techniques of Water-resources Investigations of the United States Geological Survey. 5. Ed. Cap 1. Washington, D. C: United States Government Printing Office, 1969, 69 p.
- SUGUIO, K. Introdução à Sedimentologia. 1. Ed. São Paulo: Edgar Blucher. 1973, 307 p.
- TIAB, D; DONALDSON, E. C. Applications of Darcy's Law. In: TIAB, D; DONALDSON, E. C. Petrophysics. 3. Ed. Boston: Gulf Professional Publishing, 2012. cap 7, p.419–483.
- WENTWORTH, C. K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. The Journal of Geology, v.30, n. 5, p. 377–392, Jul./Aug. 1922.