

LAÍS BENTO CAZELATO

**Caracterização da porosidade de agregados miúdos reciclados por
curva de retenção de água**

São Paulo

2018

LAÍS BENTO CAZELATO

**Caracterização da porosidade de agregados miúdos reciclados por
curva de retenção de água**

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Minas do curso de graduação do Departamento
de Engenharia de Minas e de Petróleo da
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Orientadora: Profa. Dra. Carina Ulsen

Co-orientador: Prof. Dr. Fernando Marinho

São Paulo

2018

TF-20/18
C267e
synt 2928355

#20/18f



Escola Politécnica - EPMI



31700001403

Catálogo na publicação

Cazelato, Laís Bento

Caracterização da porosidade de agregados miúdos reciclados por curva de retenção de água / L. Cazelato -- São Paulo, 2018.

29 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.Porosidade 2.Densidade 3.Curva de retenção de água 4.Distribuição do tamanho de poros I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho foi um grande desafio, acompanhado por momentos de entusiasmo, alegria, desespero, dedicação, nervosismo, mas acima de tudo por pessoas que tornaram a jornada mais leve.

Agradeço primeiramente a Deus, que desde o início da graduação não me desamparou e esteve sempre presente em todos os momentos, nos dias felizes e naqueles em que a vontade de desistir falava muito alto.

Obrigada aos meus pais, Sidnei e Tereza, por todo amor e dedicação e por estarem sempre dispostos a fazer o possível e até impossível pela criação de suas filhas, vocês são minha inspiração. Obrigada a minha irmã, Beatriz, minha atriz predileta que até nas horas mais difíceis arranca sorrisos com seu jeito doce de ser. Assim como só tenho a agradecer por todo apoio dos demais familiares.

Aos meus amigos pelas palavras de carinho e que, mesmo muitas vezes distantes, estiveram presentes.

Agradeço à minha orientadora, Carina Ulsen, pelo suporte, dedicação e, principalmente, pela confiança que depositou em mim ao dizer que deveria fazer algo mais desafiador.

Ao professor Fernando Marinho e ao técnico do Laboratório de Mecânica dos Solos da Escola Politécnica da USP, Antonio Carlos Heitzmann, por toda ajuda para o desenvolvimento deste trabalho, tanto nas pesquisas como nas tardes de laboratório.

Ao grupo *Reciclar para Construir*, cada um de vocês tem um lugar especial no meu coração, obrigada pelo companheirismo.

Aos professores pelo conhecimento e experiência transmitidos. Cada um deixa um pouquinho de si na formação dos alunos. Aos funcionários do Departamento por toda ajuda nas mais diversas áreas, pelas conversas e até desabafos.

Obrigada também ao *USP Mining Team* por proporcionar experiências inimagináveis e pela compreensão na minha ausência.

O trabalho carece de perfeição, mas foi desenvolvido com carinho dentro de uma série de limitações.

EPÍGRAFE

“Tudo o que fizerem, façam de todo o coração, como para o Senhor, e não para os homens”

(Bíblia NVI – Colossenses 3:23)

RESUMO

A porosidade é uma das características dos materiais de grande relevância para estudo, principalmente por interferir em suas propriedades físicas. Esta característica muitas vezes é analisada como uma relação entre diferentes tipos de densidades, cuja medição é realizada por meios laboratoriais manuais ou equipamentos analíticos. O método mais empregado para isso é a porosimetria com intrusão de mercúrio, que fornece informações como distribuição do tamanho de poros, porosidade total, densidade aparente e área de superfície específica de materiais particulados. Entretanto, a análise é limitada pelo uso do mercúrio, metal pesado altamente tóxico, e pelo tamanho máximo de amostra possível de ser caracterizado. Como alternativa, este trabalho propõe o estudo da porosidade de agregado miúdo reciclado por meio da curva de retenção de água, técnica reconhecida em mecânica de solos mas não difundida na engenharia mineral e que permitiria mitigar as dificuldades da porosimetria. Os resultados experimentais da curva de retenção permitiram parametrizar uma curva e determinar a distribuição de tamanho de poros da amostra estudada.

Palavras-Chave: Porosidade. Densidade. Curva de retenção de água. Distribuição do tamanho de poros.

ABSTRACT

Porosity is one of the materials characteristics of great relevance for study, mainly because it interferes in its physical properties. This feature is often analyzed as a relation between different types of density, which is measured by manual techniques or analytical equipment. The most used method to do it is porosimetry with mercury intrusion, which provides information such as pore size distribution, total porosity, apparent and skeleton density, and specific surface area of particulates. However, the analysis is limited by the use of mercury, highly toxic heavy metal and by the maximum possible sample size to be characterized. As an option, this work proposes the study of recycled aggregate porosity through water retention curve, a technique recognized in soil mechanics but not diffused in mineral engineering and that would allow mitigate difficulties of porosimetry. The experimental results of the retention curve allowed us to parameterize a curve and determine the pore size distribution of the sample studied.

Key-words: Porosity. Density. Water retention curve. Pore size distribution.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – EXEMPLO DE POSSÍVEIS ARRANJOS E IMPACTO NA POROSIDADE.	2
FIGURA 2 – ESFERICIDADE E ARREDONDAMENTO DE PARTÍCULAS.....	3
FIGURA 3 – DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS.....	4
FIGURA 4 – VARIAÇÃO DA POROSIDADE DE ACORDO COM O GRAU DE CIMENTAÇÃO EM ARENITO.	4
FIGURA 5 – PARTÍCULAS RETRATANDO VAZIOS IMPERMEÁVEIS E VAZIOS PERMEÁVEIS.	6
FIGURA 6 – VOLUME ESQUELETO UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE ESQUELETO.....	6
FIGURA 7 – VOLUME ENVELOPE UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE ENVELOPE.....	7
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO DOS DIFERENTES VOLUMES PARA CÁLCULO DAS DIFERENTES DENSIDADES.	7
FIGURA 9 – ÂNGULO DE CONTATO DO MERCÚRIO E PRESENÇA DE FORÇA EXTERNA PARA INTRUSÃO NO SÓLIDO.	8
FIGURA 10 – EXEMPLOS DE FORMAS DE REPRESENTAÇÃO DE UMA CURVA DE RETENÇÃO.	10
FIGURA 11 – PARÂMETROS DE UMA CURVA DE RETENÇÃO.	11
FIGURA 12 – ALGUNS FORMATOS TÍPICOS DE CURVAS DE RETENÇÃO.	11
FIGURA 13 – PLACA DE SUCÇÃO.....	13
FIGURA 14 – ESQUEMA DA PLACA DE PRESSÃO.....	14
FIGURA 15 – FLUXO DA ÁGUA NO MÉTODO DO PAPEL FILTRO.....	15
FIGURA 16 – PICNOMETRIA.....	16
FIGURA 17 – AMOSTRAGEM.....	18
FIGURA 18 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL NA PLACA DE SUCÇÃO.....	19
FIGURA 19 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL NA PLACA DE PRESSÃO.....	21
FIGURA 20 – CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA.....	23
FIGURA 21 – GRAU DE SATURAÇÃO EFETIVO X SUCÇÃO.....	24
FIGURA 22 – CURVA AJUSTADA.....	25
FIGURA 23 – DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE POROS.....	26

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – RELAÇÃO ENTRE DENSIDADES E ASPECTOS.....	8
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DA AREIA RECICLADA.	17
TABELA 3 – UMIDADE GRAVIMÉTRICA, VOLUMÉTRICA E GRAU DE SATURAÇÃO EM FUNÇÃO DA SUÇÃO.	22

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1	POROSIDADE	2
2.1.1	<i>Fatores que influenciam na porosidade de um sistema</i>	<i>2</i>
2.1.2	<i>Importância na determinação da porosidade</i>	<i>4</i>
2.2	DENSIDADE	5
2.2.1	<i>Densidade absoluta</i>	<i>5</i>
2.2.2	<i>Densidade relativa</i>	<i>5</i>
2.2.3	<i>Outras definições de densidade e porosidade</i>	<i>5</i>
2.3	MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE E/OU DENSIDADE.....	8
2.3.1	<i>Porosimetria de mercúrio.....</i>	<i>8</i>
2.3.2	<i>Curva de retenção de água</i>	<i>9</i>
2.3.3	<i>Picnometria</i>	<i>15</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
3.1	AMOSTRA	17
3.2	AMOSTRAGEM	17
3.3	DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA.....	18
3.3.1	<i>Placa de sucção.....</i>	<i>18</i>
3.3.2	<i>Placa de pressão</i>	<i>20</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	22
4.1	CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA EXPERIMENTAL	22
4.2	CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA PARAMETRIZADA	24
4.3	DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE POROS.....	26
5	CONCLUSÕES.....	27
6	REFERÊNCIAS	28
APÊNDICE – DADOS PARA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE POROS		

1 INTRODUÇÃO

O conceito de porosidade é utilizado em diversas áreas de pesquisa, como na Geologia em que corresponde à porcentagem de volume de vazios em uma rocha que pode conter líquidos (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006); na Ciência dos Materiais e Biologia como uma relação entre diferentes tipos de densidades ou volumes que englobam ou não poros abertos e/ou fechados de uma amostra (BREWER *et al.*, 2014; WEBB, 2001). O estudo da porosidade dos materiais é de extrema importância devido a sua interferência nas propriedades físicas destes (SHAOCHENG JI; BIN XIA, 2006), como no caso de agregados reciclados, aumentando a absorção de água e impedindo sua aplicação para usos nobres.

Os métodos aplicados para a determinação de densidades ou volumes e, por consequência, porosidade são os mais variados podendo ser realizados por meio de dispositivos manuais de laboratório, como a picnometria líquida, coluna de gradiente de densidade, hidrômetros, entres outros; ou por equipamentos analíticos com estas finalidades, como a picnometria a gás e de pó e a porosimetria de mercúrio (WEBB, 2001).

Embora os equipamentos analíticos sejam usados em larga escala, algumas limitações podem ser encontradas, principalmente em relação ao tipo de porosidade analisada. No caso da porosimetria de mercúrio, observa-se, que o poro medido pode ter dimensão maior que o valor obtido, o mercúrio é um metal tóxico, e pode haver compressão do material analisado (WESTERMACK, 2000)

Uma alternativa ao estudo da porosidade com o intuito de diminuir estas limitações é a curva de retenção de água, e, a partir de sua parametrização obtém-se distribuição do volume de poros (GITIRANA JR.; MARINHO; SOTO, 2015; FREDLUND-XING, 1940). Esta técnica é amplamente aplicada no estudo de solos, com poucas aplicações em estudos de matérias-primas minerais, como no trabalho realizado por Marinho e Pinto (2002).

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a possibilidade de caracterizar a distribuição de tamanho de poroso e a porosidade de agregados miúdos reciclados utilizando curva de retenção de água.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 POROSIDADE

Ao se tratar de porosidade é importante ressaltar que esta pode ser de um sistema, considerando poros entre partículas, como é o caso das rochas e do solo; ou a porosidade da própria partícula, como é o caso dos materiais particulados porosos, onde há maiores dificuldades de medição.

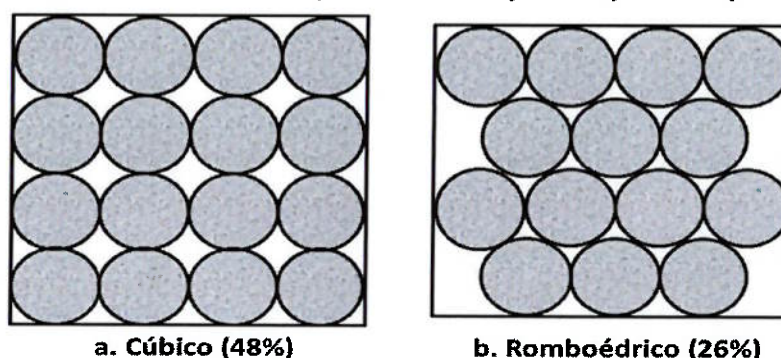
De acordo com a geologia, porosidade é a porcentagem de volume de vazios que pode conter líquidos. A porosidade absoluta é a razão entre o volume total de vazios de uma rocha e o volume total desta. Já a porosidade efetiva é a razão entre os espaços vazios interconectados de uma rocha e o volume total desta (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006).

A porosidade pode também ser definida como uma combinação entre densidades envelope e esqueleto (BREWER *et al.*, 2014), ou entre volumes *bulk* e esqueleto (WEBB, 2001).

2.1.1 Fatores que influenciam na porosidade de um sistema

Arranjo especial – Forma como os grãos/partículas estão distribuídos no espaço. Para cada tipo de arranjo (romboédrico, cúbico, hexagonal e ortorrômbico) encontra-se um tipo de porosidade (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006). A Figura 1 mostra esta diferença para arranjo cúbico e romboédrico.

Figura 1 – Exemplo de possíveis arranjos e impacto na porosidade.

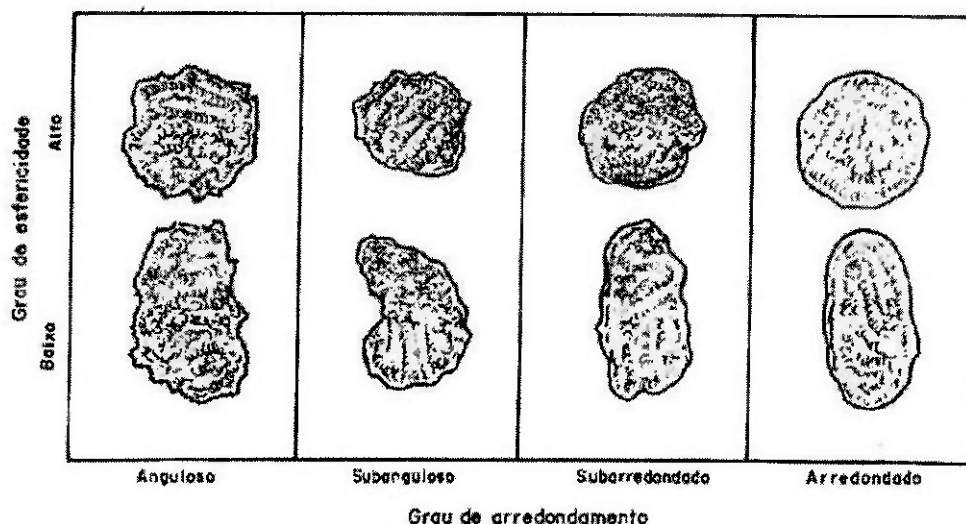


Fonte: Elaboração própria.

Arredondamento e esfericidade – O formato dos grãos/partículas também é um fator que influencia na porosidade. Basicamente, define-se o arredondamento pela

medida da angularidade de um grão/partícula, ou seja, pelo grau de curvatura de seus cantos; já a esfericidade é o quanto a partícula se aproxima de um perfil esférico. Desta forma, grãos menos arredondados e menos esféricos apresentam maior porosidade (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006). A Figura 2 mostra o arredondamento das partículas.

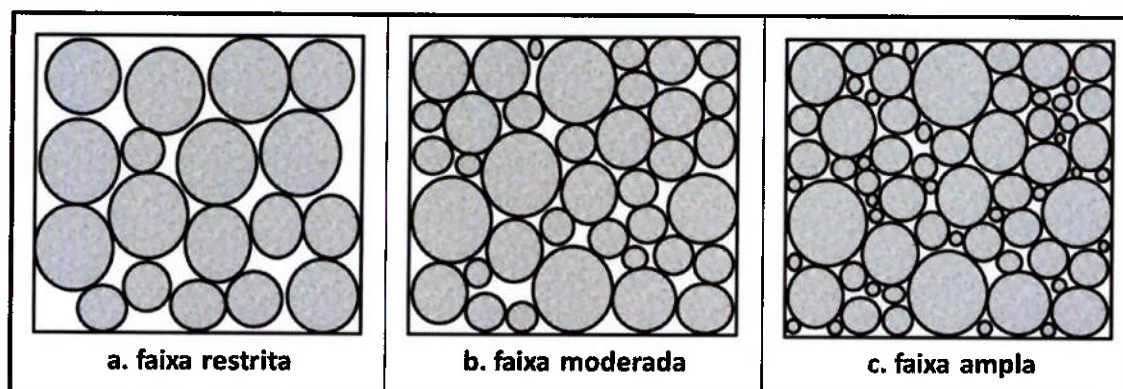
Figura 2 – Esfericidade e arredondamento de partículas.



Fonte: NBR 7389 (ABNT, 2009) *apud* FRANCISCO, 2004.

Distribuições de tamanho de partícula – As diferentes classes de tamanhos presentes na composição do material indicam a distribuição. Isto quer dizer que quando há somente uma classe dominante (intervalo de tamanho de partícula), o material apresenta menor faixa de distribuição de tamanho de partículas, e por consequência, formam-se espaços maiores entre as partículas resultando em alta porosidade. Caso contrário, sem existência de classe dominante, a faixa é mais ampla, o que resulta no preenchimento dos espaços formados entre as partículas maiores pelas menores, reduzindo então a porosidade. É importante ressaltar que o tamanho do grão por si só não exerce influência na porosidade, a interferência é causada pela distribuição do tamanho de partículas (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006). A Figura 3 mostra a distribuição de tamanho de partículas, considerando desde faixas restritas a amplas.

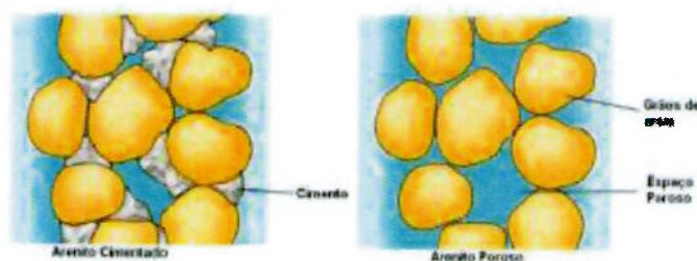
Figura 3 – Distribuição de tamanho de partículas.



Fonte: Elaboração própria.

Cimentação – A cimentação ocorre entre os grãos/partículas por meio da precipitação química de minerais a partir dos íons em solução na água intersticial. Sua relação com a porosidade no sistema é inversamente proporcional, ou seja, quando a cimentação é maior a porosidade é menor (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006), como observado na Figura 4.

Figura 4 – Variação da porosidade de acordo com o grau de cimentação em arenito.



Fonte: OLIVEIRA, 2012 *apud* CARVALHO, 2013.

2.1.2 Importância na determinação da porosidade

No âmbito da ciência dos materiais, a porosidade é uma característica de extrema importância para estudo de materiais naturais e artificiais, pois afeta suas propriedades físicas, como: permeabilidade a fluidos, condutividade térmica, condutividade elétrica, constante dielétrica, permeabilidade magnética, coeficiente de difusão, velocidades de ondas acústicas, módulos elásticos e rendimento, ruptura ou força dúctil (SHAOCHENG JI; BIN XIA, 2006).

É também essencial em Engenharia Mineral, por exemplo, no caso de agregados reciclados que apresentam maior porosidade que o agregado natural, o que é

indicado pela maior absorção de água destes materiais (ULSEN, 2011), também em bauxita e minério de ferro que podem apresentar porosidade e retenção de água.

2.2 DENSIDADE

Como a porosidade pode ser definida como uma relação entre densidades (BREWER *et al.*, 2014; WEBB, 2001), é importante conhecer os diferentes conceitos envolvidos ao se tratar de densidade.

2.2.1 Densidade absoluta

A densidade absoluta de um material (homogêneo e isotrópico), mais conhecida como massa específica, é definida pela razão entre sua massa e seu volume. Apresenta unidade de medida de quilograma por metro cúbico (kg/m³) no Sistema Internacional de Unidades (DOCA; BISCUOLA; BOAS, 2007).

2.2.2 Densidade relativa

A densidade relativa, mais conhecida somente por densidade é a razão entre as densidades absolutas de duas substâncias, por tanto é adimensional (DOCA; BISCUOLA; BOAS, 2007).

$$D = \frac{\mu A}{\mu B} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

- D = densidade (adimensional);
- μA é a massa específica da substância A; e
- μB é a massa específica da substância B.

Comumente considera-se a densidade de um material em relação a densidade da água. Por isso, encontra-se a densidade expressa em unidade de densidade absoluta, já que a massa específica da água é de aproximadamente 1000 kg/m³ a temperatura de 25 °C (DOCA; BISCUOLA; BOAS, 2007).

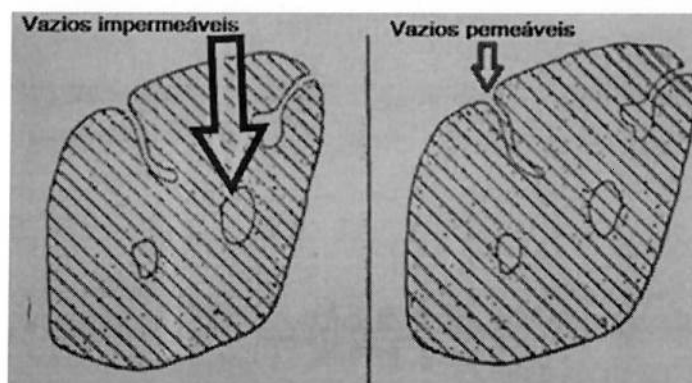
2.2.3 Outras definições de densidade e porosidade

Densidade real – Razão entre a massa e o volume ocupado pelo conjunto de grãos sem considerar os poros e os espaços vazios (LOWEL *et al.*, 2004; SAMPAIO e

SILVA, 2007). A acurácia da medida desta densidade é limitada, uma vez que é difícil medi-la em materiais porosos, sendo então necessária a utilização de um volume de líquido (menos indicado) ou gás para preencher estes poros e tornar possível a medida (LOWEL *et al.*, 2004).

Densidade aparente – Razão entre a massa e o volume da amostra, considerando espaços vazios (permeáveis e impermeáveis) contidos nela (SAMPAIO e SILVA, 2007). Desta forma, a densidade aparente é sempre menor que a densidade real (SAMPAIO e SILVA, 2007). Pode ser classificada como esqueleto, envelope, *bulk* ou *T.A.P.* Na Figura 5 encontram-se as especificações de vazios permeáveis e impermeáveis.

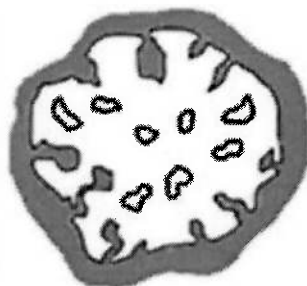
Figura 5 – Partículas retratando vazios impermeáveis e vazios permeáveis.



Fonte: LCT, 2017.

Densidade esqueleto – Considera somente os vazios impermeáveis das partículas e exclui vazios permeáveis e espaço entre as partículas (BREWER *et al.*, 2014), como observado na Figura 6.

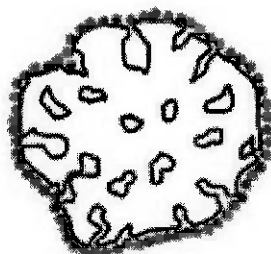
Figura 6 – Volume esqueleto utilizado para determinação da densidade esqueleto.



Fonte: Xavier, 2016.

Densidade envelope – Considera o volume interno de poros, ou seja, inclui poros fechados (vazios impermeáveis) e abertos (vazios permeáveis) da partícula (LOWEL *et al.*, 2004; BREWER *et al.*, 2014), de acordo com a Figura 7.

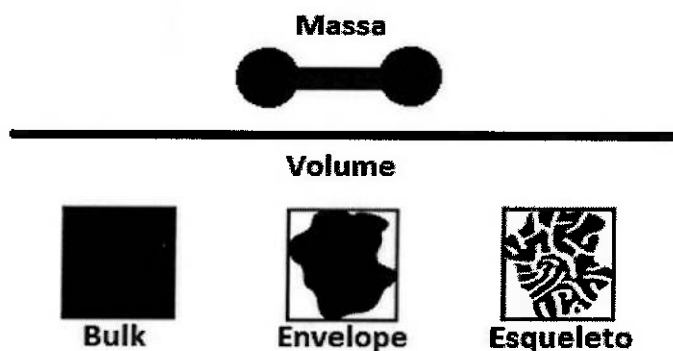
Figura 7 – Volume envelope utilizado para determinação da densidade envelope.



Fonte: Xavier, 2016.

Densidade bulk – Considera o volume interno dos poros (permeáveis e impermeáveis) e poros entre as partículas (LOWEL *et al.*, 2004; BREWER *et al.*, 2014). A Figura 8 traz um comparativo entre os diferentes volumes (*bulk*, envelope e esqueleto) que resultam em suas respectivas densidades.

Figura 8 – Representação dos diferentes volumes para cálculo das diferentes densidades.



Fonte: BREWER *et al.*, 2014 (modificada).

Densidade T.A.P. (transverse axial pressure) – Variação da densidade *bulk*, ou seja, considera volume interno de poros e volume de vazios entre partículas. Mas, além disso, esta densidade leva em consideração a compactação/compressão do material, esta característica faz com que o volume de vazios para a densidade T.A.P. seja menor que o da densidade *bulk*, assim, o resultado da primeira é maior que o da segunda (LOWEL *et al.*, 2004).

Um breve resumo dos diferentes conceitos de densidade considerando alguns aspectos podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação entre densidades e aspectos.

Densidade	Volume do material	Poros fechados	Poros abertos	Espaço entre partículas	Compactação/Compressão
Real	X				
Esqueleto	X	X			
Envelope	X	X	X		
Bulk	X	X	X	X	
TAP	X	X	X	X	X

Fonte: WEBB, 2001.

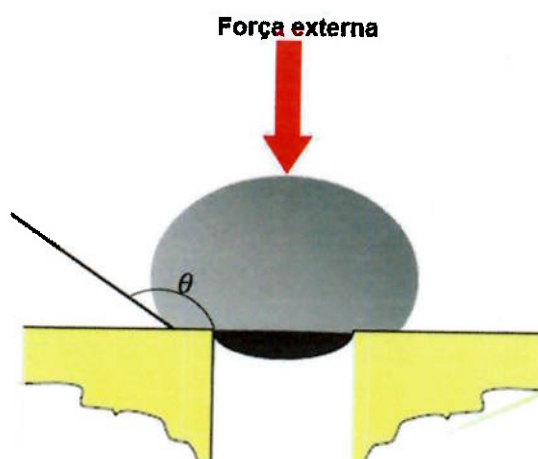
2.3 MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE E/OU DENSIDADE

2.3.1 Porosimetria de mercúrio

A porosimetria de mercúrio pode ser definida como a intrusão de mercúrio em um material por meio de aplicação de diferentes pressões (LOWEL *et al.*, 2004). É um método que fornece a distribuição de tamanhos de poros, porosidade total, densidade aparente e área de superfície específica da amostra (GIESCHE, 2006).

O mercúrio é utilizado por não interagir com a maioria dos materiais, apresentar alta tensão superficial e alto valor de ângulo de contato, o que o caracteriza como um líquido não molhável e se faz necessária a aplicação de uma força externa para que o haja intrusão do mercúrio no material estudado (LOWEL *et al.*, 2004), como observa-se na Figura 9.

Figura 9 – Ângulo de contato do mercúrio e presença de força externa para intrusão no sólido.



Fonte: LCT, 2017 (modificada).

Entre as limitações da porosimetria de mercúrio encontram-se a toxicidade deste material, a dimensão da célula do porosímetro limita o tamanho da amostra, o uso da pressão para que haja intrusão do mercúrio pode comprimir o material analisado e poros grandes, mas com pequena abertura para entrada de mercúrio, são identificados como poros menores do que seu real tamanho (WESTERMACK, 2000).

2.3.2 Curva de retenção de água

A curva de retenção de água relaciona a água presente no material poroso e a energia que esta está retida nos poros ou adsorvida nas partículas (MELO FILHO, SACRAMENTO, CONCEIÇÃO, 2015). É uma propriedade de extrema importância do solo não saturado. Para ser construída são consideradas as seguintes relações físicas para a quantidade de água armazenada (GITIRANA JR.; MARINHO; SOTO, 2015):

- Teor de umidade gravimétrico

$$w = \frac{V_w \rho_w}{V_s \rho_s} \text{ (equação 2)}$$

Onde: w é a umidade gravimétrica; V_w é o volume de água; ρ_w é a massa específica da água; V_s é o volume do sólido e ρ_s é a massa específica do sólido.

- Teor de umidade volumétrico

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \text{ (equação 3)}$$

Onde: θ é o teor de umidade volumétrico; V_t é o volume total.

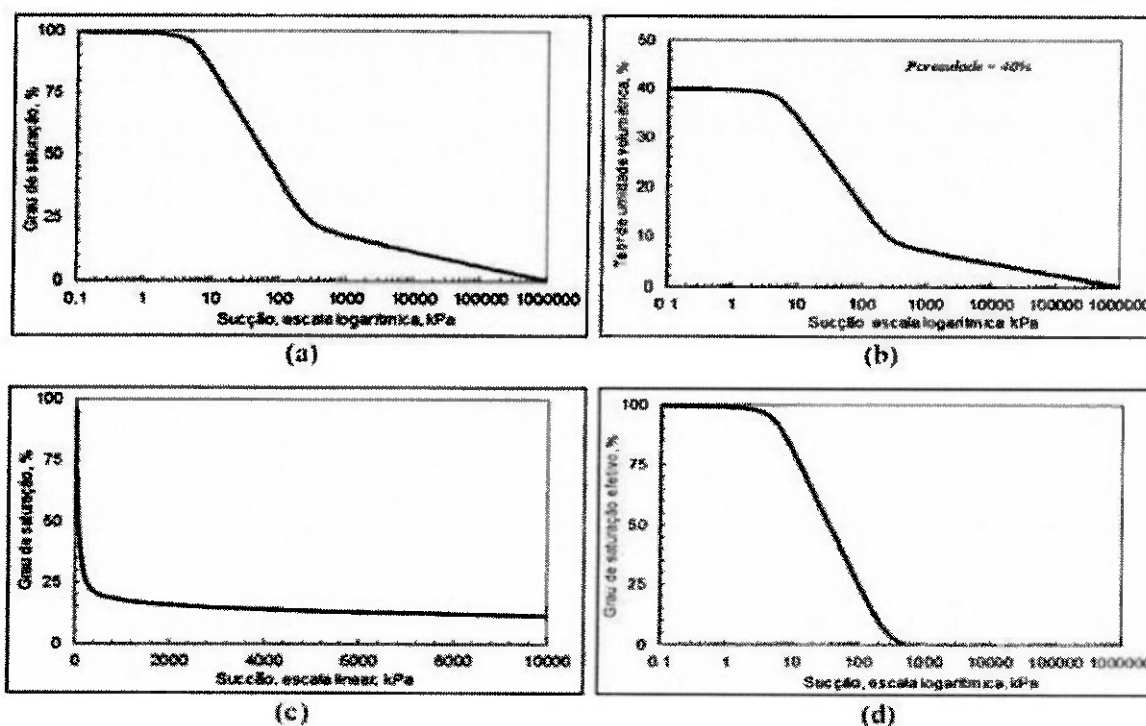
- Grau de saturação

$$S = \frac{V_w}{V_a + V_w} = \frac{V_w}{V_v} \text{ (equação 4)}$$

Onde: S é o grau de saturação; V_a é o volume de ar; V_v é o volume de vazios.

A curva de retenção depende também do estado de tensões e da capilaridade do material estudado. Sua forma de apresentação é variada, podendo ser representada em termos do grau de saturação ou do teor de umidade volumétrica ou do grau de saturação efetivo, todos em função da sucção em escala logarítmica, uma vez que a escala linear não é indicada. Estas representações podem ser observadas na Figura 10 (GITIRANA JR.; MARINHO; SOTO, 2015).

Figura 10 – Exemplos de formas de representação de uma curva de retenção.



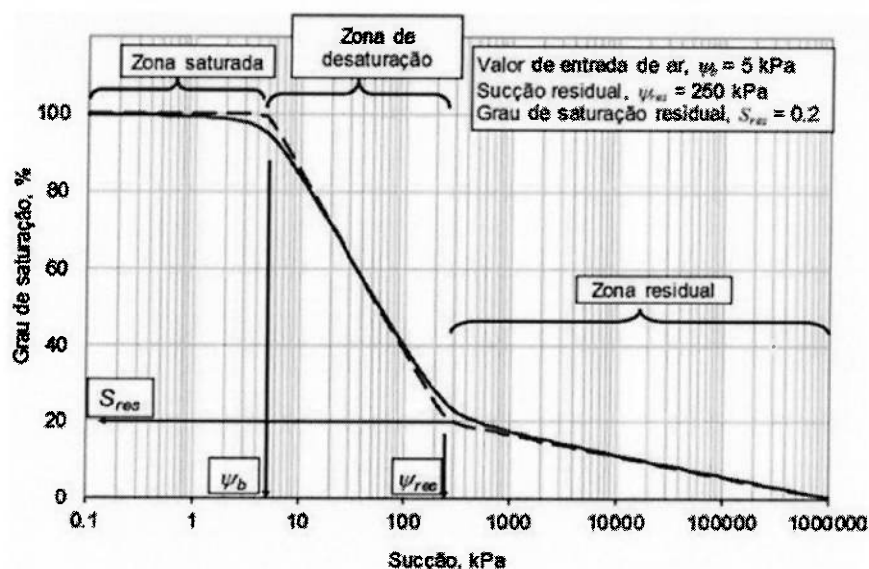
a) grau de saturação em escala linear e sucção em escala logarítmica; b) teor de umidade volumétrica; c) grau de saturação e sucção na escala linear; e d) grau de saturação efetivo.

Fonte: GITIRANA JR.; MARINHO; SOTO, 2015.

A curva de retenção geralmente é dividida em três trechos, como se vê na Figura 11 (GITIRANA JR.; MARINHO; SOTO, 2015):

- Zona de saturação: onde o material encontra-se saturado e é possível identificar o valor de entrada de ar, ψ_b .
- Zona de desaturação: onde ocorre drenagem por meio da sucção e identifica-se a sucção residual, ψ_{res} .
- Zona residual: onde quando toda água livre foi drenada e identifica-se o grau de saturação residual, S_{res} .

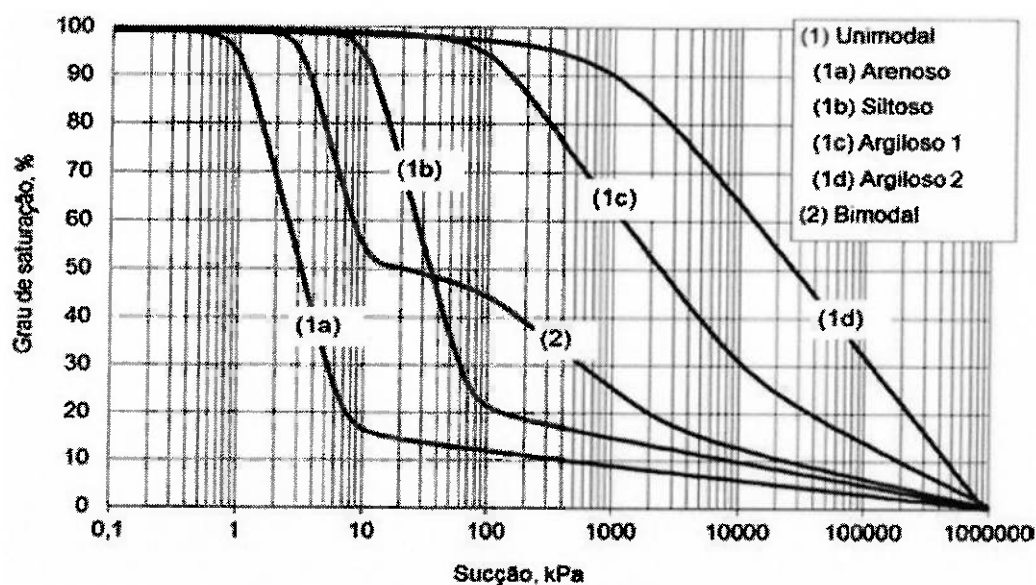
Figura 11 – Parâmetros de uma curva de retenção.



Fonte: GITIRANA JR.; MARINHO; SOTO, 2015.

É importante ressaltar que a curva de retenção de água está diretamente relacionada a distribuição do tamanho de poros, que por sua vez, está relacionada a distribuição granulométrica do material, podendo resultar em alguns comportamentos típicos, como os unimodais e bimodais que conteriam mais de uma zona de desaturação, envolvendo diferentes tamanhos de poros. Como pode ser observado na Figura 12 (GITIRANA JR.; MARINHO; SOTO, 2015).

Figura 12 – Alguns formatos típicos de curvas de retenção.



Fonte: GITIRANA JR.; MARINHO; SOTO, 2015.

A curva de retenção pode ser representada por meio de uma função contínua de para realização de análises numéricas de fluxo de água e também na previsão de propriedades do material estudado. Existe uma variedade de equações que podem ser usadas para este intuito, no entanto, a mais aplicada é da van Genuchten, pois apresenta flexibilidade em seu formato e permite o uso conjunto com método analítico de previsão de permeabilidade não saturada (GITIRANA JR.; MARINHO; SOTO, 2015).

$$S_e = \frac{1}{(1 + (\alpha\psi)^n)^m} \text{ (equação 5)}$$

Onde: S é o grau de saturação efetivo, ψ é a sucção, α parâmetro empírico da curva com unidade kPa^{-1} (inverso a entrada de ar), n e m ($m = 1 - 1/n$) são parâmetros empíricos adimensionais (GHANBARIAN-ALAVIJEH *et al.*, 2010).

Com os dados fornecidos pela equação de van Genuchten, é possível calcular a distribuição de poros pela seguinte função proposta por Fredlund-Xing (1994) (*apud* Fredlund, *et al.*, 2012):

$$f(\psi) = \frac{mn(\alpha\psi)^{n-1}}{[1/\alpha][e + (\alpha\psi)^n]\{\log[e + (\alpha\psi)^n]\}^{m+1}} \text{ (equação 6)}$$

Relacionando-a com a equação, que considera o tamanho de poros, tem-se a distribuição de tamanhos de poros das partículas:

$$r = \frac{2\gamma\cos\beta}{\psi} \text{ (equação 7)}$$

Onde: r é o raio do poro, γ é a tensão superficial da água, β é o ângulo de contato entre a água e a superfície (LOWEL *et al.*, 2004). Esta equação é a mesma considerada na porosimetria de mercúrio, mas com diferente sinal por se tratar de ascensão capilar.

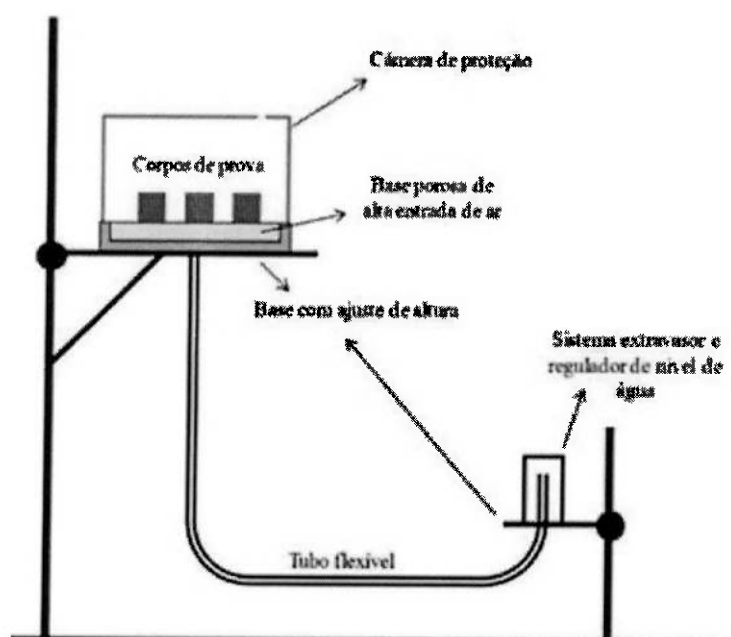
Para determinar a curva de retenção de um material podem ser utilizados diversos métodos, sendo os mais comuns a placa de sucção, placa de pressão e método do papel filtro (GITIRANA JR.; MARINHO; SOTO, 2015).

Placa de sucção

Método que permite definir com precisão o trecho inicial da curva e entrada de ar; indicado para baixas pressões, entre 0 e 40 kPa, devido a limitações laboratoriais e a complexidade para manter a continuidade hidráulica (MARINHO; SOTO; GITIRANA JR., 2015).

O equipamento consiste em uma placa porosa saturada com valor de entrada de ar compatível com a maior sucção a ser imposta que está inserida a um compartimento preenchido com água que, por sua vez, está conectado a um sistema regulador/extravasor de água, como representado na Figura 13 (MARINHO; SOTO; GITIRANA JR., 2015).

Figura 13 – Placa de sucção.



Fonte: MARINHO; SOTO; GITIRANA JR., 2015.

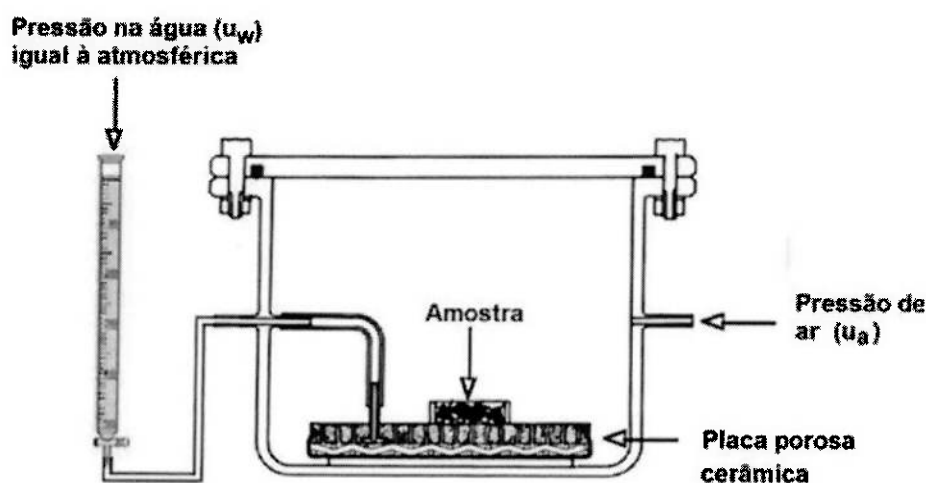
A sucção é a pressão negativa aplicada por meio de carga hidráulica que devido a uma condição de equilíbrio pode ser considerada desnível entre a amostra e a saída inferior do sistema. Sendo assim, a sucção é a altura entre os pontos mencionados multiplicado pelo peso específico da água. No entanto, considerando distribuição constante de carga hidráulica ao longo do corpo de prova indica-se medir a sucção no seu ponto do médio (MARINHO; SOTO; GITIRANA JR., 2015).

Placa de pressão

Método indicado para solucionar problemas enfrentados pela placa de sucção como a dificuldade no controle da pressão negativa devido a cavitação. É aplicada uma mudança de referencial de pressão de ar elevando-a e, por consequência, elevando a pressão da água para valores acima do zero absoluto, de modo a manter a sucção do material estudado. Sendo assim, neste método o intervalo de entrada de ar apresenta maior amplitude, geralmente entre 100 e 1.500 kPa (MARINHO; SOTO; GITIRANA JR., 2015).

O equipamento é formado por uma câmara hermeticamente fechada e contém uma placa porosa de elevada pressão de entrada de ar e a ela ligada uma bureta para controle da pressão de água, como mostrado na Figura 14 (MARINHO; SOTO; GITIRANA JR., 2015).

Figura 14 – Esquema da placa de pressão.



Fonte: MARINHO; SOTO; GITIRANA JR., 2015.

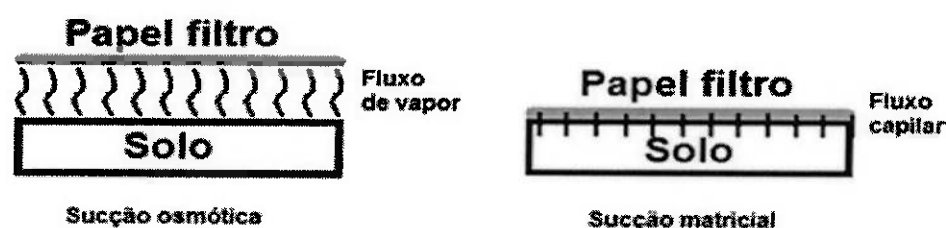
Aplica-se uma pressão de ar desejada e a água da amostra é expulsa por meio da placa porosa em direção a bureta. A sucção é calculada pela diferença entre a pressão de ar aplicada e a pressão de água na amostra (MARINHO; SOTO; GITIRANA JR., 2015).

Método do papel filtro

Método que apresenta maior faixa de sucção, variando entre 10 e 100.000 kPa. Ao contrário do que foi visto nos demais métodos para este não há imposições de sucção, a curva é construída por variações impostas pelo teor de umidade do meio poroso (MARINHO; SOTO; GITIRANA JR., 2015).

O instrumento utilizado é um papel filtro quantitativo calibrado que vai quantificar de maneira indireta a sucção da amostra. A sucção matricial é medida quando o papel está em contato com a amostra e o fluxo ocorre somente por capilaridade, já a sucção osmótica é medida pelo fluxo de vapor sem o contato entre amostra e papel; a soma destas sucções forma a sucção total, como observado na Figura 15 (MARINHO; SOTO; GITIRANA JR., 2015).

Figura 15 – Fluxo da água no método do papel filtro.



Fonte: MARINHO; SOTO; GITIRANA JR., 2015 (modificada).

O papel filtro usado é o Whatman 42 e a sucção é calculada por meio das seguintes equações (MARINHO; SOTO; GITIRANA JR., 2015):

$$\text{Para } w_{\text{papel}} \leq 47\%, \text{ Sucção (kPa)} = 10^{4,84 - 0,0622w(\%)}$$

$$\text{Para } w_{\text{papel}} > 47\%, \text{ Sucção (kPa)} = 10^{6,05 - 2,48\log(w(\%))}$$

2.3.3 Picnometria

Líquido – Determinação da densidade por meio da intrusão de líquidos com densidade conhecida, comumente água. Baseia-se na determinação do volume ocupado pelo sólido por medidas indiretas, relação entre as massas do picnômetro vazio, com a amostra, com o líquido, com amostra e líquido; não permite a determinação do volume envelope e da porosidade (WEBB, 2001).

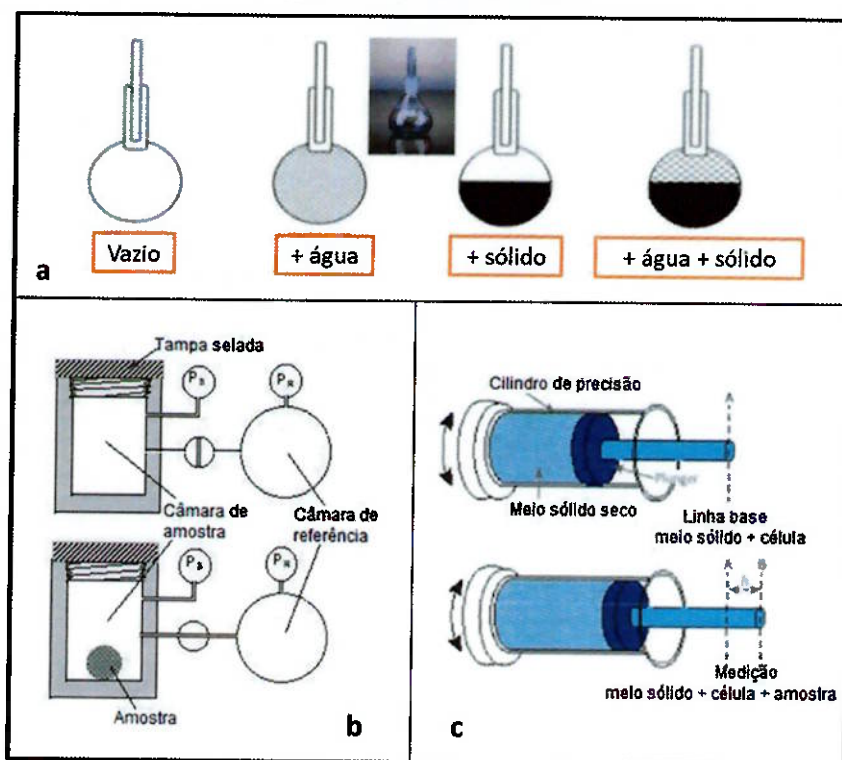
Gás – Determinação do volume e densidade de um sólido por meio da intrusão de gás, geralmente utiliza-se hélio. A medição se dá por meio da variação da pressão do gás em uma unidade de volume quando vazia e quando preenchida com sólido e,

a partir desta, cálculo do volume pela equação dos gases ideais; não permite a determinação da porosidade (MOURA; FIGUEIREDO, 2002; WEBB, 2001).

Pó – Determinação de volume e densidade por deslocamento de meio seco; ou seja, a amostra sólida é colocada em um meio de partículas sólidas com dimensões muito menores do que a primeira que se consolidam na superfície da amostra, sem invadir os poros, tornando possível as medições; entretanto, apresenta limitação quanto a amostra analisada, uma vez que é usualmente empregados para materiais com tamanho maior de dois milímetros (WEBB, 2001).

As técnicas de medição estão apresentadas na Figura 16.

Figura 16 – Picnometria.



a) em meio líquido; b) a gás; c) de pó.

Fonte: Slideshare, 2018; WEBB, 2001 (modificada).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental consiste nas seguintes etapas

- a) Amostragem
- b) Determinação da curva de retenção de água
 - b.1) Ensaio de placa de sucção
 - b.2) Ensaio de placa de pressão

3.1 AMOSTRA

As amostras de agregado miúdo reciclado utilizadas neste trabalho são provenientes de estudos já realizados anteriormente. Areia reciclada, proveniente de RCD (Resíduo de Construção e Demolição) misto britado até britagem quaternária em VSI (*Vertical Shaft Impact*) em circuito fechado por peneira com abertura da tela de 2 mm, que apresenta características que constam na Tabela 2.

Tabela 2 – Características da areia reciclada.

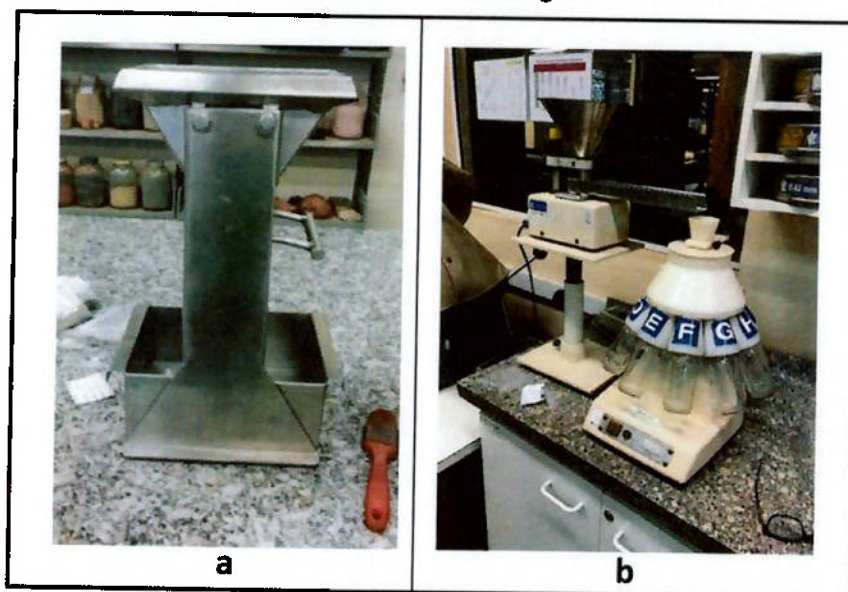
	D10 (mm)	D50 (mm)	D90 (mm)	Densidade (g/cm ³)	Absorção de água (%)	Porosidade (%)
Média	0,231	0,622	1,454	2,71	4,61	8,55
Desvio padrão	0,009	0,060	0,066	0,005	0,34	0,90

Fonte: ULSEN, 2018.

3.2 AMOSTRAGEM

O processo de fracionamento da amostra foi realizado em amostrador Jones (Figura 17-a) que dividiu a massa em duas alíquotas, seguido por amostrador rotativo (Figura 17-b). No amostrador rotativo juntaram-se quatro amostras formando uma com maior massa, a qual passou novamente pelo amostrador rotativo, o intuito foi obter amostras com massa mais próxima a que seria usada nos ensaios para obtenção da curva de retenção de água mitigando possíveis problemas de perda de representatividade do material estudado. O uso do amostrador rotativo foi realizado em busca de manter a representatividade das amostras e minimizar erros.

Figura 17 – Amostragem.



a) amostrador Jones; b) amostrador rotativo.

Fonte: Arquivo pessoal e LCT, 2017 (respectivamente).

Para os ensaios, as amostras foram dispostas em moldes em formatos de anéis; a partir do volume interno do molde e a densidade proposta calculou-se a massa do material utilizada para cada corpo de prova considerando-o seco, com umidade inexpressiva. Para formar cada um destes corpos foram usadas as amostras resultantes do processo de amostragem e foram realizadas amostragens sucessivas de modo a alcançar a massa exata calculada.

3.3 DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

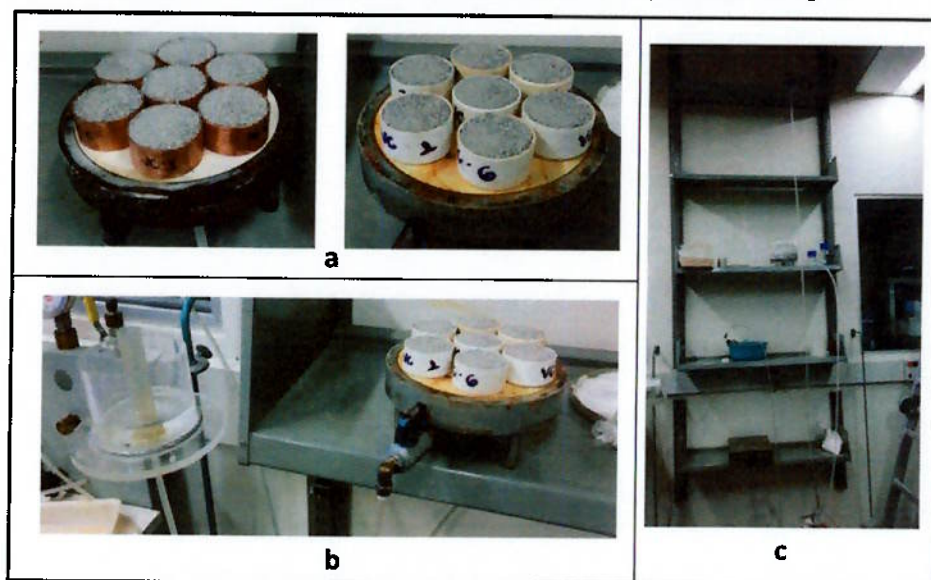
Para a determinação da curva de retenção de água do material foram realizados diferentes ensaios que contemplam cada trecho dela. Por ser um estudo pioneiro no contexto de agregados reciclados, algumas informações como curva de compactação, índice de vazios máximo e mínimo ainda não estão disponíveis; deste modo definiu-se que a densidade *bulk* do corpo de prova para todos os ensaios seria de 1,5 g/cm³.

3.3.1 Placa de sucção

Os corpos de prova foram montados na placa porosa (Figura 18-a) e foram saturados por capilaridade por meio da elevação do frasco extravasor para nível acima das amostras (Figura 18-b). Para garantir máxima saturação, os corpos

ficaram por 72 horas nesta condição. Após saturação, aplicou-se sucção em diferentes alturas (Figura 18-c), tomando por referência a metade da altura do corpo de prova. Para cada sucção a água flui da amostra para o corpo extravasor de modo a manter o equilíbrio da carga hidráulica.

Figura 18 – Procedimento experimental na placa de sucção.



a) corpo de prova; b) saturação das amostras; c) aplicação de diferentes sucções.

Fonte: Arquivo pessoal.

Após estabilização para determinada sucção, foi retirado um corpo de prova e medida sua massa úmida. Como o material estudado foi uma areia e não possui consistência, cada medida implicou na retirada de uma amostra. Em seguida o material foi seco em estufa a 60°C por 24 horas até massa constante e foi medida sua massa seca. Por fim, com estes valores foram calculados as umidades gravimétrica e volumétrica e o grau de saturação de acordo com as equações, respectivamente:

$$w(\%) = 100 \times \frac{M_w - M_s}{M_s} \text{ (equação 8)}$$

Onde: w é a umidade gravimétrica, M_w é a massa úmida e M_s é a massa seca.

$$\theta(\%) = 100 \times \frac{M_w - M_s}{M_s} \times \frac{\rho_d}{\rho_w} \text{ (equação 9)}$$

Onde: θ é a umidade volumétrica, ρ_d a densidade seca e ρ_w a densidade da água.

$$Se = wG \text{ (equação 10)}$$

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1; G = \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

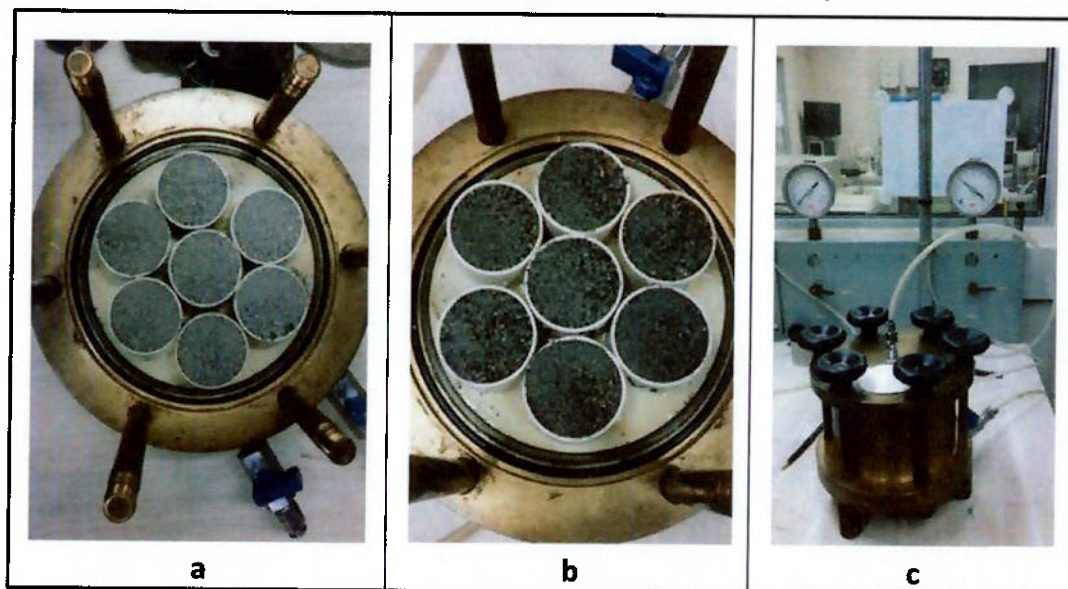
Onde: S é o grau de saturação, e é o índice de vazios; G a densidade relativa dos grãos; ρ_s a densidade dos sólidos.

Neste método, as medidas foram tomadas a pressão de sucção de 0,1 a 30 kPa em diferentes intervalos. O valor máximo foi definido devido a limitação da técnica com a altura máxima do laboratório.

3.3.2 Placa de pressão

A montagem dos corpos e condições de saturação das amostras aconteceu de maneira análoga ao método da placa de sucção (Figura 19-a). Neste método, a saturação também ocorreu por meio do gotejamento de água na placa e consequente saturação dos corpos de prova por capilaridade forçada (Figura 19-b). Após a saturação, foram aplicadas diferentes pressões em magnitude crescente (Figura 19-c). Para cada pressão a água flui da amostra para a bureta de modo a manter o equilíbrio da carga hidráulica, o nível da bureta é analisado e quando não sofre alterações significa que houve estabilização e o copo de prova pode ser retirado da placa.

Figura 19 – Procedimento experimental na placa de pressão.



a) corpo de prova; b) amostras saturadas; c) aplicação de diferentes pressões.

Fonte: Arquivo pessoal.

A medida das massas úmida e seca, assim como os cálculos da umidade gravimétrica e volumétrica e grau de saturação foram realizados do mesmo modo ao ensaio da placa de sucção.

Neste método, as medidas foram tomadas a pressão de 30 a 500 kPa em diferentes intervalos. Os valores mínimo e máximo da pressão buscaram avaliar toda faixa de operação do equipamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA EXPERIMENTAL

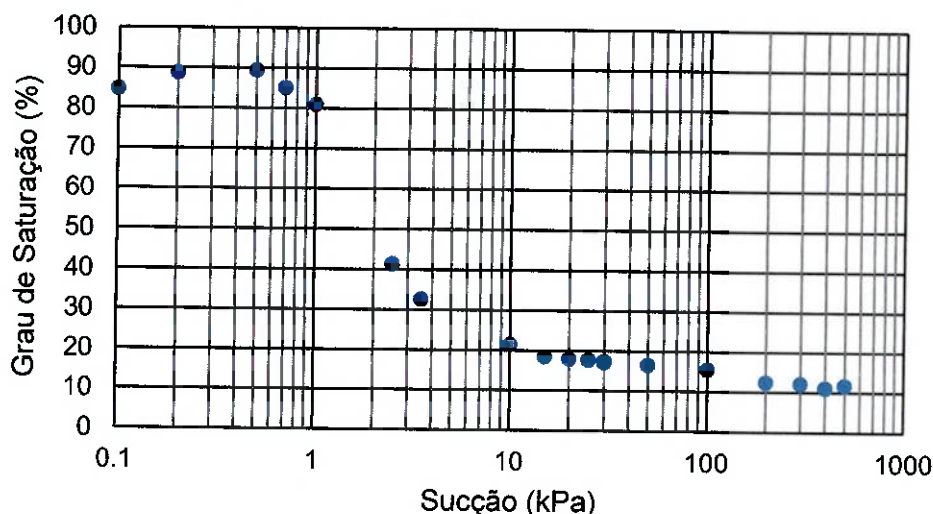
Tomando por base densidade dos sólidos de $2,71 \text{ g/cm}^3$, densidade seca $1,5 \text{ g/cm}^3$ e índice de vazios 0,81; os resultados obtidos nas placas de sucção e pressão constam na Tabela 3.

Tabela 3 – Umidade gravimétrica, volumétrica e grau de saturação em função da sucção.

Método	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	Umidade gravimétrica (%)	Umidade volumétrica (%)	Saturação (%)
Placa de sucção	0,1	40,06	32,02	25,11	37,66	84,35
	0,2	40,28	31,89	26,31	39,46	88,39
	0,5	39,8	31,46	26,51	39,76	89,06
	0,7	40,10	32,02	25,23	37,85	84,77
	1	39,57	31,91	24,01	36,01	80,64
	2,5	35,86	31,94	12,27	18,41	41,23
	3,5	35,11	32,01	9,68	14,53	32,54
	10	39,97	37,57	6,39	9,58	21,46
	15	39,89	37,82	5,47	8,21	18,39
	20	38,67	36,71	5,34	8,01	17,94
	25	39,43	37,46	5,26	7,89	17,67
	30	40,14	38,20	5,08	7,62	17,06
Placa de pressão	30	34,14	32,46	5,18	7,76	17,39
	50	34,68	33,06	4,90	7,35	16,46
	100	34,05	32,55	4,61	6,91	15,48
	200	33,67	32,47	3,70	5,54	12,42
	300	34,47	33,27	3,61	5,41	12,12
	400	33,25	32,19	3,29	4,94	11,06
	500	34,15	33,00	3,48	5,23	11,71

Com estes dados foi possível construir a curva de retenção de água, como pode ser observada na Figura 20.

Figura 20 – Curva de retenção de água.



Com estes resultados nota-se que no início da curva há oscilação do grau de saturação para diferentes sucções, isso pode estar associado a pequena variação da sucção, que corresponde a 0,1 ou 0,2 kPa. Verifica-se que para baixas pressões a saturação já não chega a valores maiores que 90% e que cai abruptamente de 81% para 41% ao passar de 1 kPa para 2,5 kPa. O comportamento apresentado pela amostra analisada remete ao comportamento de solos arenosos, que têm capacidade de drenar rapidamente a água, apresentando zona de desaturação bem definida e a baixas pressões.

A partir de 15 kPa é possível reparar que as mudanças de grau de saturação são menos significativas. Tal comportamento pode estar relacionado aos poros das partículas, que retêm menos água em comparação aos poros entre as partículas.

A medida em 30 kPa foi tomada duas vezes (uma para cada placa) para analisar se ambos os métodos deram resultados próximos.

Nota-se que para pressões entre 200 e 500 kPa o grau de saturação teve pequena alteração e a umidade volumétrica é de cerca de 5%, valor próximo ao da absorção de água (vide Tabela 2), o que pode estar relacionado ao volume envelope da partícula.

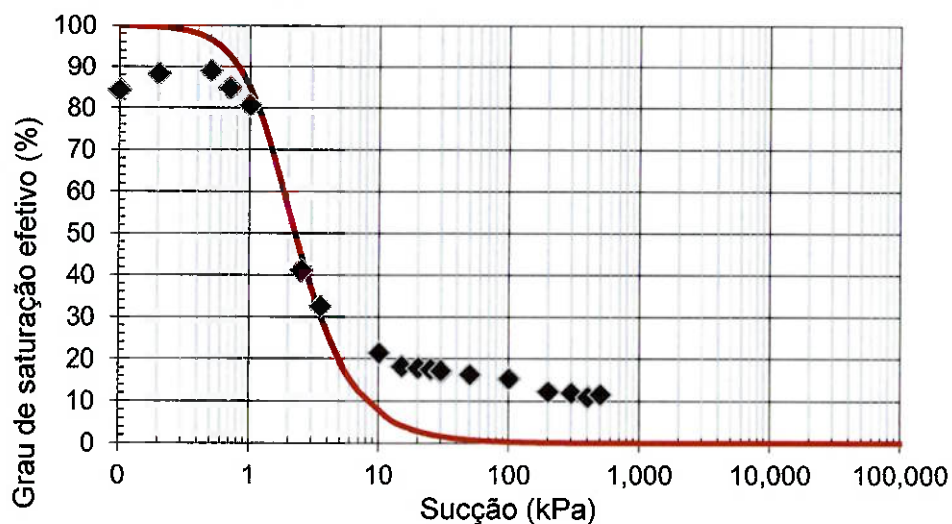
O grau de saturação não ter atingido 100% pode estar relacionado a presença de poros internos nas partículas, uma vez que a saturação está diretamente ligada ao volume de água e o volume de vazios. Isso pode significar que 10% dos poros não foram saturados por água.

Ao longo do procedimento experimental notou-se que há perda de massa, pois, por se tratar de uma areia, ao retirar os corpos de prova das placas um pouco da massa ficava no recipiente e por haver um pouco de água no entorno não poderia ser acrescido pois aumentaria a umidade do material analisado, não correspondendo a umidade do corpo de prova em questão. As medições foram realizadas como um teste a fim de verificar a possibilidade ou não de utilizar a curva de retenção de água. Os resultados foram promissores e retratam um cenário otimista para substituição do mercúrio para determinação de porosidade em materiais particulados; no entanto, estudos futuros devem considerar a realização de sucção em maiores pressões e realização de testes em duplicatas.

4.2 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA PARAMETRIZADA

Para os dados apresentados foi parametrizada a curva de van Genuchten que melhor se aproximava dos dados experimentais, oferecendo um grau de saturação efetivo para cada ponto, que é normalizado, como pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 – Grau de saturação efetivo X Sucção.



Lembrando que a curva é representada pela equação 5. Os valores de α, n, m são, respectivamente, $0,60 \text{ kPa}^{-1}$; 2,4 e 0,58.

No entanto, como a equação de van Genuchten fornece uma curva normalizada, faz-se necessário desenvolver um novo ajuste que considera o teor de umidade volumétrico do material máximo e residual e a porosidade *bulk* de modo a obter uma

curva que mais se aproxima da curva formada experimentalmente. Para isso, são apresentadas as relações entre estas variáveis nas equações 11, 12 e 13.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{max} - \theta_{res}} \text{ (equação 11)}$$

Onde: θ_{res} é o teor de umidade volumétrico residual, θ_{max} é o teor de umidade máximo, ajustados manualmente, e θ o teor de umidade no ponto.

$$d_b = \frac{e}{1 + e} \text{ (equação 12)}$$

Onde: d_b é a porosidade *bulk*, e é o índice de vazios.

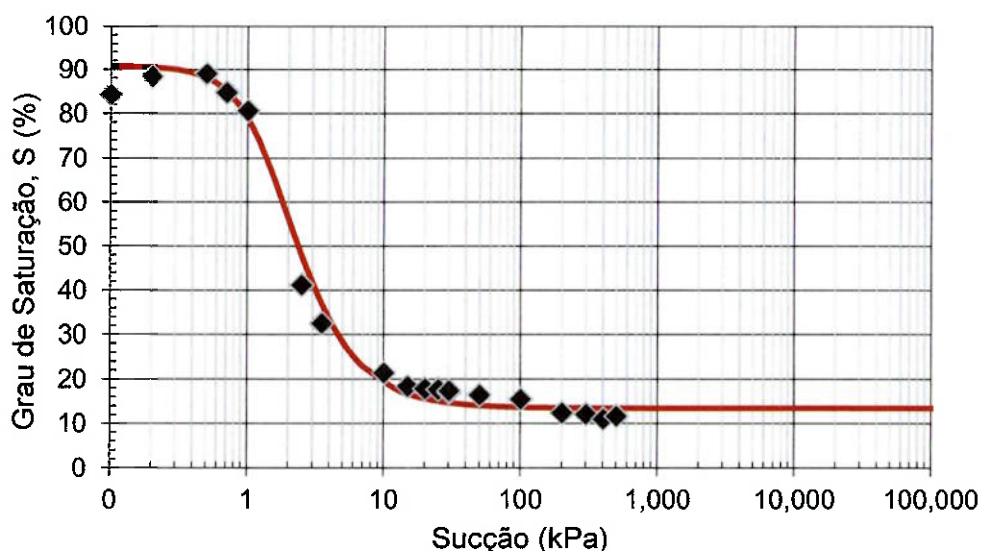
Como mencionado anteriormente, e é 0,81; deste modo, d_b é igual a 45%.

O grau de saturação é calculado por:

$$S = \frac{\theta}{d_b} \text{ (equação 13)}$$

E o resultado fornece a curva ajustada, como consta na Figura 22.

Figura 22 – Curva ajustada.



Os valores de θ_{res} e θ_{max} são, respectivamente, 0,06 e 0,405, ajustados de modo a obter a melhor configuração da curva.

Com os valores de θ_{res} e θ_{max} , calcula-se a porosidade efetiva (d_e) pela fórmula:

$$d_e = \theta_{max} - \theta_{res}$$

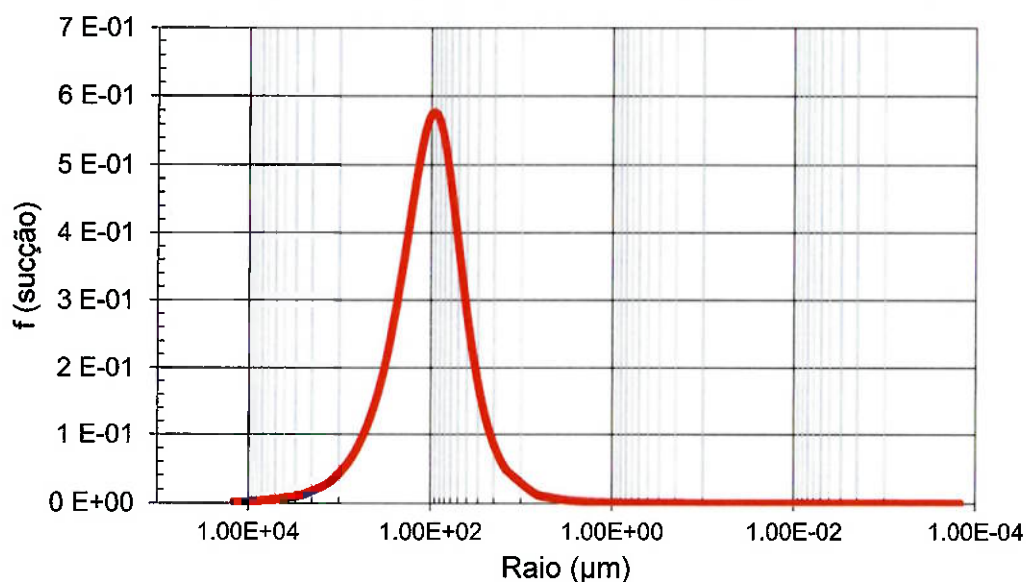
A porosidade efetiva calculada é igual 35%.

Como os valores de porosidade obtidos pela curva de retenção de água foram substancialmente maiores que o valor de porosidade obtido pela porosimetria de mercúrio (vide Tabela 2) entende-se que a primeira técnica considera poros das partículas e entre estas. Inviabilizando a caracterização da porosidade da partícula nas condições estudadas.

4.3 DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE POROS

Por fim, com as equações 6 e 7 foi realizada a distribuição de tamanhos de poros como consta na Figura 23.

Figura 23 – Distribuição do tamanho de poros.



Pela curva de distribuição de tamanho de poros nota-se que o valor mediano de poros é de aproximadamente 100 μm. O valor médio foi calculado com base nos valores da distribuição (vide Apêndice) e corresponde a 106 μm.

A distribuição do tamanho de poros apresentou valores maiores que os esperados, no entanto, esta configuração considera poros entre e intra partículas, e, por serem maiores influenciam a média que é superestimada.

Nota-se que a partir da sucção de 10 kPa (vide Apêndice) poros menores começam a ser identificados, isto mostra que dados referentes a pressões mais altas devem ser mais explorados para que se possa avaliar os poros das partículas.

5 CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho demonstram que a curva de retenção de água é uma importante ferramenta no estudo de porosidade de materiais particulados, mas apresentou limitações na determinação da porosidade de partículas nas condições em que os ensaios foram conduzidos, uma vez que não foi possível caracterizá-la e seu resultado apresentou valor cerca de 10 vezes maior que a porosidade encontrada na porosimetria de mercúrio.

Além disso, apesar da distribuição de tamanho de poros ser fortemente influenciada por valores de raios mais altos, correspondentes à porosidade do sistema, nota-se que para pressões mais altas é possível determinar poros menores que podem estar relacionados aos poros das partículas. Portanto, seriam necessários ensaios futuros buscando explorar esta região de altas pressões de modo a avaliar então a porosidade das partículas.

6 REFERÊNCIAS

- BREWER, C. E. *et al.* **New approaches to measuring biochar density and porosity.** *Biomass & Bioenergy*. n. 66. p. 176-185, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953414001883?via%3Dihub>>. Acesso em: 08 Jun. 2018.
- CARVALHO, M. R. T. **Estudo experimental do efeito da argilosidade sobre as propriedades petrofísicas de solos.** 2013. 40 p. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J.; BOAS, N. V. Estática dos fluidos. In: _____. **Tópicos de Física – Volume 1.** São Paulo: Saraiva, 2007. Parte III – tópico 2. p. 406-453. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAhBdlAG/topicos-fisica-vol-1-mecanica>>. Acesso em: 28 Ago. 2018
- FRANCISCO, R. C. **Estudo da viabilidade técnica de produção do concreto de alto desempenho utilizando agregados encontrados na região do vale do itajaí.** 2004. 65 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Programa de Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2004.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice.** New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2012.
- GIESCHE, H. **Mercury porosimetry: a general (practical) overview.** Wiley Interscience. n.23. p. 9-19, 2006. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ppsc.200601009>>. Acesso em: 11 Jun. 2018.
- GHANBARIAN-ALAVIJEH, B. *et al.* **Estimation of the van Genuchten Soil Water Retention Properties from Soil Textural Data.** *Pedosphere*. vol. 20. n. 4. p. 456-465, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953414001883?via%3Dihub>>. Acesso em: 20 Nov. 2018.
- GITIRANA JR., G. F. N., MARINHO, F.A.M., SOTO, M.A.A. A curva de retenção de água de materiais porosos. In: CARVALHO, J.C, *et al.* **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo, Associação Brasileira de Mecânica do Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. 206-229.
- LOWEL, S. *et al.* **Characterization of porous solids and powders: surface area, pore size and density.** Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004. 347p.
- MARINHO, F.A.M., SOTO, M.A.A., GITIRANA JR., G. F. N. Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção. In: CARVALHO, J.C, *et al.*

Solos não saturados no contexto geotécnico. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica do Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. 206-229.

MELO FILHO, J. F. M.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; CONCEIÇÃO, B. P. S. **Curva de retenção de água elaborada pelo método do psicrômetro para uso na determinação do índice "S" de qualidade física do solo.** Revista Engenharia Agrícola. v. 35. n. 35. p. 959-966, 2015.

MOURA, M.J., FIGUEIREDO, M.M. **Aplicação das técnicas de picnometria de gás e de porosimetria de mercúrio à caracterização da madeira de E. globulus.** Silva Lusitana 10(2). p. 207-216, 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.mec.pt/pdf/slu/v10n2/10n2a07.pdf>>. Acesso em: 13 Ago. 2018.

ROSA, A. J.; CARVALHO, R. S.; XAVIER, J. A. D. **Engenharia de reservatórios de petróleo.** Rio de Janeiro: Interciência: Petrobrás, 2006. 832p. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/21121696/livro-engenharia-de-reservatorios-de-petroleo>>. Acesso em: 07 Jun. 2018.

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. N. G. Determinação das densidades de sólidos e de polpa. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P.F. A. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais.** Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2007. p. 37-51. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1019/1/Cap%202%20Densidade%20Final.pdf>>. Acesso em: 08 Jun. 2018.

SHAOCHENG JI *, QI GU; BIN XIA. **Porosity dependence of mechanical properties of solid materials.** Journal of Material Science. Vol. 41.. p. 1757-1768, 2006. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-006-2871-9>>. Acesso em: 28 Ago. 2018.

ULSEN, C. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição.** 2011. 222 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

WEBB, P. A. **Volume and density determinations for particle technologists.** Micromeritics Instrument Corp. 2001. Disponível em: <http://www.mic-instrument.com.cnwww.micromeritics.com/Repository/Files/Volume_and_Density_de_terminations_for_Particle_Technologists.pdf>. Acesso em: 13 Set. 2018.

WESTERMARCK, S. **Use of mercury porosimetry and nitrogen adsorption in characterisation of the pore structure of mannitol and microcrystalline cellulose powders, granules and tablets.** 2000. 60 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Helsink, Helsink , Finlândia, 2000.

XAVIER, F. O. L. **Porosidade de agregados miúdos reciclados a partir do processamento de resíduos de construção e demolição.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016. (Relatório Final de Iniciação Tecnológica).

APÊNDICE – DADOS PARA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE POROS.

Tabela 1 – Dados para distribuição de tamanho de poros.

Sucção (kPa)	Função sucção	Raio (μm)
0,01	0,00101	14600,00
0,02	0,00266	7300,00
0,05	0,00960	2920,00
0,1	0,02531	1460,00
0,15	0,04455	973,33
0,2	0,06643	730,00
0,25	0,09037	584,00
0,3	0,11593	486,67
0,35	0,14275	417,14
0,4	0,17049	365,00
0,45	0,19884	324,44
0,5	0,22750	292,00
0,55	0,25619	265,45
0,6	0,28465	243,33
0,65	0,31263	224,62
0,7	0,33988	208,57
0,75	0,36621	194,67
0,8	0,39141	182,50
0,85	0,41532	171,76
0,9	0,43780	162,22
0,95	0,45872	153,68
1	0,47800	146,00
1,1	0,51138	132,73
1,2	0,53765	121,67
1,3	0,55690	112,31
1,4	0,56948	104,29
1,5	0,57593	97,333
1,6	0,57694	91,250
1,7	0,57326	85,882
1,8	0,56566	81,111
1,9	0,55486	76,842
2	0,54156	73,000

Sucção (kPa)	Função sucção	Raio (μm)
2,1	0,52637	69,524
2,2	0,50983	66,364
2,3	0,49239	63,478
2,4	0,47444	60,833
2,5	0,45628	58,400
2,6	0,43817	56,154
2,7	0,42029	54,074
2,8	0,40279	52,143
2,9	0,38579	50,345
3	0,36936	48,667
3,1	0,35356	47,097
3,2	0,33840	45,625
3,3	0,32392	44,242
3,4	0,31011	42,941
3,5	0,29696	41,714
3,6	0,28447	40,556
3,7	0,27261	39,459
3,8	0,26135	38,421
3,9	0,25068	37,436
4	0,24057	36,500
4,1	0,23100	35,610
4,2	0,22192	34,762
4,3	0,21333	33,953
4,4	0,20518	33,182
4,5	0,19746	32,444
4,6	0,19014	31,739
4,7	0,18321	31,064
4,8	0,17662	30,417
4,9	0,17038	29,796
5	0,16444	29,200
5,1	0,15881	28,627
5,2	0,15345	28,077
5,3	0,14836	27,547
5,4	0,14351	27,037
5,5	0,13890	26,545
5,6	0,13450	26,071

Sucção (kPa)	Função sucção	Raio (μm)
5,7	0,13031	25,614
5,8	0,12632	25,172
5,9	0,12251	24,746
6	0,11887	24,333
6,1	0,11539	23,934
6,2	0,11207	23,548
6,3	0,10889	23,175
6,4	0,10585	22,813
6,5	0,10293	22,462
6,6	0,10014	22,121
6,7	0,09747	21,791
6,8	0,09491	21,471
6,9	0,09245	21,159
7	0,09008	20,857
7,1	0,08782	20,563
7,2	0,08564	20,278
7,3	0,08354	20,000
7,4	0,08152	19,730
7,5	0,07958	19,467
7,6	0,07772	19,211
7,7	0,07592	18,961
7,8	0,07418	18,718
7,9	0,07251	18,481
8	0,07090	18,250
8,1	0,06934	18,025
8,2	0,06784	17,805
8,3	0,06639	17,590
8,4	0,06499	17,381
8,5	0,06364	17,176
8,6	0,06233	16,977
8,7	0,06106	16,782
8,8	0,05983	16,591
8,9	0,05865	16,404
9	0,05750	16,222
9,1	0,05639	16,044
9,2	0,05531	15,870

Sucção (kPa)	Função sucção	Raio (μm)
9,3	0,05426	15,699
9,4	0,05325	15,532
9,5	0,05227	15,368
9,6	0,05131	15,208
9,7	0,05039	15,052
9,8	0,04949	14,898
9,9	0,04861	14,747
10	0,04777	14,600
20	0,01493	7,3000
30	0,00791	4,8667
40	0,00512	3,6500
50	0,00369	2,9200
60	0,00283	2,4333
70	0,00227	2,0857
80	0,00188	1,8250
90	0,00160	1,6222
100	0,00138	1,4600
110	0,00121	1,3273
120	0,00107	1,2167
130	0,00096	1,1231
140	0,00087	1,0429
150	0,00079	0,97333
160	0,00073	0,91250
170	0,00067	0,85882
180	0,00062	0,81111
190	0,00058	0,76842
200	0,00054	0,73000
210	0,00051	0,69524
220	0,00048	0,66364
230	0,00045	0,63478
240	0,00042	0,60833
250	0,00040	0,58400
260	0,00038	0,56154
270	0,00036	0,54074
280	0,00035	0,52143
290	0,00033	0,50345

Sucção (kPa)	Função sucção	Raio (μm)
300	0,00032	0,48667
310	0,00030	0,47097
320	0,00029	0,45625
330	0,00028	0,44242
340	0,00027	0,42941
350	0,00026	0,41714
360	0,00025	0,40556
370	0,00024	0,39459
380	0,00023	0,38421
390	0,00023	0,37436
400	0,00022	0,36500
410	0,00021	0,35610
420	0,00021	0,34762
430	0,00020	0,33953
440	0,00019	0,33182
450	0,00019	0,32444
460	0,00018	0,31739
470	0,00018	0,31064
480	0,00017	0,30417
490	0,00017	0,29796
500	0,00016	0,29200
510	0,00016	0,28627
520	0,00016	0,28077
530	0,00015	0,27547
540	0,00015	0,27037
550	0,00015	0,26545
560	0,00014	0,26071
570	0,00014	0,25614
580	0,00014	0,25172
590	0,00013	0,24746
600	0,00013	0,24333
610	0,00013	0,23934
620	0,00012	0,23548
630	0,00012	0,23175
640	0,00012	0,22813
650	0,00012	0,22462

Sucção (kPa)	Função sucção	Raio (μm)
660	0,00012	0,22121
670	0,00011	0,21791
680	0,00011	0,21471
690	0,00011	0,21159
700	0,00011	0,20857
710	0,00011	0,20563
720	0,00010	0,20278
730	0,00010	0,20000
740	0,00010	0,19730
750	0,00010	0,19467
760	0,00010	0,19211
770	0,00010	0,18961
780	0,00009	0,18718
790	0,00009	0,18481
800	0,00009	0,18250
810	0,00009	0,18025
820	0,00009	0,17805
830	0,00009	0,17590
840	0,00009	0,17381
850	0,00008	0,17176
860	0,00008	0,16977
870	0,00008	0,16782
880	0,00008	0,16591
890	0,00008	0,16404
900	0,00008	0,16222
910	0,00008	0,16044
920	0,00008	0,15870
930	0,00008	0,15699
940	0,00007	0,15532
950	0,00007	0,15368
960	0,00007	0,15208
970	0,00007	0,15052
980	0,00007	0,14898
990	0,00007	0,14747
1000	0,00007	0,14600
1500	0,00004	0,09733

Sucção (kPa)	Função sucção	Raio (μm)
2000	0,00003	0,07300
2500	0,00002	0,05840
3000	0,00002	0,04867
3500	0,00001	0,04171
4000	0,00001	0,03650
4500	0,00001	0,03244
5000	0,00001	0,02920
5500	0,00001	0,02655
6000	0,00001	0,02433
6500	0,00001	0,02246
7000	0,00001	0,02086
7500	0,00001	0,01947
8000	0,00001	0,01825
8500	0,00001	0,01718
9000	0,00000	0,01622
9500	0,00000	0,01537
10000	0,00000	0,01460
15000	0,00000	0,00973
20000	0,00000	0,00730
25000	0,00000	0,00584
30000	0,00000	0,00487
35000	0,00000	0,00417
40000	0,00000	0,00365
45000	0,00000	0,00324
50000	0,00000	0,00292
55000	0,00000	0,00265
60000	0,00000	0,00243
65000	0,00000	0,00225
70000	0,00000	0,00209
75000	0,00000	0,00195
80000	0,00000	0,00183
85000	0,00000	0,00172
90000	0,00000	0,00162
95000	0,00000	0,00154
100000	0,00000	0,00146
110000	0,00000	0,00133

Sucção (kPa)	Função sucção	Raio (μm)
120000	0,00000	0,00122
130000	0,00000	0,00112
140000	0,00000	0,00104
150000	0,00000	0,00097
160000	0,00000	0,00091
170000	0,00000	0,00086
180000	0,00000	0,00081
190000	0,00000	0,00077
200000	0,00000	0,00073
210000	0,00000	0,00070
220000	0,00000	0,00066
230000	0,00000	0,00063
240000	0,00000	0,00061
250000	0,00000	0,00058
260000	0,00000	0,00056
270000	0,00000	0,00054
280000	0,00000	0,00052
290000	0,00000	0,00050
300000	0,00000	0,00049
310000	0,00000	0,00047
320000	0,00000	0,00046
330000	0,00000	0,00044
340000	0,00000	0,00043
350000	0,00000	0,00042
360000	0,00000	0,00041
370000	0,00000	0,00039
380000	0,00000	0,00038
390000	0,00000	0,00037
400000	0,00000	0,00037
410000	0,00000	0,00036
420000	0,00000	0,00035
430000	0,00000	0,00034
440000	0,00000	0,00033
450000	0,00000	0,00032
460000	0,00000	0,00032
470000	0,00000	0,00031

Sucção (kPa)	Função sucção	Raio (μm)
480000	0,00000	0,00030
490000	0,00000	0,00030
500000	0,00000	0,00029
510000	0,00000	0,00029
520000	0,00000	0,00028
530000	0,00000	0,00028
540000	0,00000	0,00027
550000	0,00000	0,00027
560000	0,00000	0,00026
570000	0,00000	0,00026
580000	0,00000	0,00025
590000	0,00000	0,00025
600000	0,00000	0,00024
610000	0,00000	0,00024
620000	0,00000	0,00024
630000	0,00000	0,00023
640000	0,00000	0,00023
650000	0,00000	0,00022
660000	0,00000	0,00022
670000	0,00000	0,00022
680000	0,00000	0,00021
690000	0,00000	0,00021
700000	0,00000	0,00021
710000	0,00000	0,00021
720000	0,00000	0,00020
730000	0,00000	0,00020
740000	0,00000	0,00020
750000	0,00000	0,00019
760000	0,00000	0,00019
770000	0,00000	0,00019
780000	0,00000	0,00019
790000	0,00000	0,00018
800000	0,00000	0,00018
810000	0,00000	0,00018
820000	0,00000	0,00018
830000	0,00000	0,00018

Sucção (kPa)	Função sucção	Raio (μm)
840000	0,00000	0,00017
850000	0,00000	0,00017
860000	0,00000	0,00017
870000	0,00000	0,00017
880000	0,00000	0,00017
890000	0,00000	0,00016
900000	0,00000	0,00016
910000	0,00000	0,00016
920000	0,00000	0,00016
930000	0,00000	0,00016
940000	0,00000	0,00016
950000	0,00000	0,00015
960000	0,00000	0,00015
970000	0,00000	0,00015
980000	0,00000	0,00015
990000	0,00000	0,00015
1000000	0,00000	0,00015