

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**MARIA EDUARDA DE OLIVEIRA**

**ANÁLISE DOS EFEITOS DE CARBONATAÇÃO NA RESISTÊNCIA  
AO ESMAGAMENTO DE FILTROS GRANULARES**

**TOLEDO**

**2024**

**MARIA EDUARDA DE OLIVEIRA**

**ANÁLISE DOS EFEITOS DE CARBONATAÇÃO NA RESISTÊNCIA  
AO ESMAGAMENTO DE FILTROS GRANULARES**

**Analysis of the effects of carbonation on resistance  
when crushing granular filters**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientadora: Patrícia Casarotto de Oliveira.

**TOLEDO**

**2024**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**MARIA EDUARDA DE OLIVEIRA**

**ANÁLISE DOS EFEITOS DE CARBONATAÇÃO NA RESISTÊNCIA  
AO ESMAGAMENTO DE FILTROS GRANULARES**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 05 de junho de 2024

-----  
Alana Dias de Oliveira  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

-----  
William Hideki Ito  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

-----  
Patrícia Casarotto de Oliveira  
Mestrado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

**TOLEDO**

**2024**

“O mestre disse: por natureza,  
os homens são próximos;  
a educação é que os afasta”.  
(Confúcio, 551 a.C.)

## RESUMO

É comum a utilização de filtros permeáveis em obras hidráulicas, a fim de controlar a passagem dos materiais percolados. Os sistemas de filtração podem ser executados, por exemplo, com material geotêxtil e/ou areia artificial, esta que por sua vez, se dá por fabricação através de rochas britadas ou moídas, até que se atinja granulometria indicada por norma. Dito isto, torna-se necessário o conhecimento das características físicas, químicas e mecânicas, além do grau de alteração e alterabilidade da rocha a ser utilizada. Em filtros granulares utilizados em obras de drenagem de estradas, barragens e aterros, a oscilação do nível de água pode promover ciclos de saturação e alterar os parâmetros geotécnicos do material rochoso ao longo do tempo de operação. Ressalta-se que o material rochoso utilizado em filtros granulares se encontra em constante processo de esmagamento, este, tende a alterar a granulometria do material, podendo ocasionar obstrução dos filtros ou até carregando de partículas além da água, tornando o filtro ineficiente. No presente trabalho avaliou-se a influência de ciclagem acelerada com água saturada por gás carbônico na resistência ao esmagamento de agregados de basalto, em granulometria típica de filtros granulares. Foram avaliadas três variações de basalto, diferenciados pela presença de microamígdalas e colocação da matriz. Verificou-se que a presença de argilominerais expansivos contidos nas microamígdalas possui influência na resistência ao esmagamento do basalto devido a reação de carbonatação consequente da reação dos minerais com o  $\text{CO}_2$  contido na água percolada. Dessa forma, entende-se a necessidade do conhecimento das características intrínsecas do material utilizado como filtro granular.

**PALAVRAS-CHAVE:** basalto, carbonatação, alterabilidade, filtros granulares, esmagamento

## **ABSTRACT**

It is common to use permeable filters in hydraulic works, in order to control the passage of percolated materials. Filtration systems can be executed, for example, with granular materials, geotextile material and/or artificial sand, which is manufactured in the laboratory through crushed or ground rocks, until the granulometry indicated by standard is reached. That said, it is necessary to know the physical, chemical and mechanical characteristics, as well as the degree of alteration and alterability of the rock to be used. In granular filters used in drainage works of roads, dams and embankments, the oscillation of the water level can promote saturation cycles and alter the geotechnical parameters of the rock material over the time of operation. It should be noted that the rocky material used in granular filters is in a constant process of crushing, which tends to alter the granulometry of the material, which can cause clogging of the filters or even loading particles in addition to the water, making the filter inefficient. In the present work, the influence of accelerated cycling with water saturated by carbon dioxide on the crushing strength of basalt aggregates was evaluated, in a typical granulometry of granular filters. Three variations of basalt were evaluated, differentiated by the presence of microtonsils and matrix placement. It was found that the presence of expansive clay minerals contained in the microtonsils has an influence on the crush resistance of basalt due to the carbonation reaction consequent to the reaction of the minerals with the CO<sub>2</sub> contained in the percolated water. Thus, it is necessary to know the intrinsic characteristics of the material used as a granular filter.

**KEYWORDS:** basalt, carbonation, alterability, granular filters, crushing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa geológico do Grupo Serra Geral.....	15
Figura 2: Barragem de terra com sistema de drenagem vertical.....	22
Figura 3: Barragem de terra com sistema de drenagem horizontal.....	22
Figura 4: Conjunto cilindro e êmbolo para ensaio de esmagamento.....	26
Figura 5: Componentes aparato cilíndrico para ensaio de esmagamento .....	30
Figura 6: Etapas de montagem do ensaio de resistência ao esmagamento .....	32
Figura 7: Resultados típicos para o teste ACV.....	32
Figura 8: Organograma de ensaios realizados.....	33
Figura 9: Análise qualitativa das amostras originais.....	35
Figura 10: Índice de esmagamento dos litotipos basálticos. Valores das duplicatas sem e após a ciclagem .....	37
Figura 11: Relação granulométrica das amostras BMR .....	38
Figura 12: Relação granulométrica das amostras BMA .....	39
Figura 13: Relação granulométrica das amostras BMC .....	39
Figura 14: Curvas de deslocamento das amostras .....	40
Figura 15: média entre pontos máximos de deslocamento .....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Detalhes de peneiras de teste para frações de agregado de outros tamanhos.....	27
Tabela 2 – Ensaios de resistência ao esmagamento realizados.....	27
Tabela 3 – Medidas do aparato de ensaio .....	31

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Justificativa.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>14</b>
<b>2 CARACTERÍSTICAS DO BASALTO NO CONTEXTO DA BACIA DO PARANÁ</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Alteração e alterabilidade da rocha .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.1 Intemperismo e reações de carbonatação .....</b>	<b>19</b>
<b>3 FILTROS GRANULARES: DEFINIÇÕES E APLICAÇÕES .....</b>	<b>21</b>
<b>4 RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO DE AGREGADOS DE ROCHA .....</b>	<b>25</b>
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>35</b>
<b>6.1 Descrição qualitativa dos basaltos.....</b>	<b>35</b>
<b>6.2 Resistência ao esmagamento .....</b>	<b>36</b>
<b>6.3 Curvas granulométricas após ensaio de esmagamento.....</b>	<b>38</b>
<b>6.4 Curvas força versus deslocamento .....</b>	<b>40</b>
<b>7 CONCLUSÕES .....</b>	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de agregados rochosos como material de construção faz parte de diversas etapas das obras de engenharia civil. Assim, o conhecimento de suas características físicas, químicas, petrográficas e mecânicas é de extrema importância. Essas características estão relacionadas com o estado de alteração e alterabilidade do material, podendo assim, oscilar ao longo do tempo.

Dentre os agregados utilizados na construção civil tem-se o basalto, uma rocha magmática encontrada na Bacia do Paraná, no contexto do Grupo Serra Geral. O basalto, assim como demais materiais rochosos, quando exposto à agentes intempéricos de diferentes intensidades, sendo eles de caráter físico ou químico, pode ter suas características e desempenho alterados. O intemperismo físico ocorre quando o material rochoso é fragmentado e suas características químicas se mantêm, enquanto o intemperismo químico se dá pela alteração dos minerais de sua composição. Dentre as diversas reações de intemperismos tem-se a carbonatação, que por sua vez trata-se de um tipo de intemperismo químico em que a reação de dióxido de carbono com água, forma ácido carbônico, e este, reage com os minerais que compõem as rochas.

Sabe-se da influência da carbonatação nas características de um material como o basalto, mas pouco se fala sobre as possíveis alterações mecânicas do mesmo. Um exemplo prático são as rochas utilizadas como filtros granulares em obras de drenagem, em que a água percolada pode conter níveis de ácido carbônico não previstos. Estas estruturas civis, de acordo com a profundidade e local de instalação, podem estar em constante processo de esmagamento, e neste aspecto, o presente trabalho consiste em avaliar os efeitos da carbonatação na resistência ao esmagamento de agregados de basalto.

### 1.1 Justificativa

Todo material geológico está suscetível a alterações físico-químicas cuja intensidade irá depender das condições ambientais a que são submetidos e das suas características intrínsecas. As rochas alocadas como filtros granulares em obras drenagem, como é o caso das barragens, estão em constante processo de esmagamento. Assim, é importante identificar se a atuação dos processos intempéricos pode interferir na resistência ao esmagamento. Essa preocupação

ganha relevância prática quando consideramos o risco de falhas estruturais em barragens, podendo comprometer a estabilidade da barragem ao longo do tempo de operação. Portanto, compreender e monitorar a resistência ao esmagamento dos materiais geológicos empregados nas barragens é crucial para garantir a segurança e a durabilidade dessas estruturas.

Dentre os tipos de intemperismo químico, a carbonatação é bastante comum. Atualmente, a reação tem sido explorada como uma forma de capturar CO<sub>2</sub> da atmosfera e armazenamento em maciços rochosos, porém, pouco se fala sobre alteração da resistência mecânica do material rochoso quando nessas condições.

Dessa forma, o presente trabalho se justifica ao avaliar a alteração na resistência ao esmagamento de agregados de basalto quando submetidos a ensaios de ciclagem com água acidificada por gás CO<sub>2</sub>, e seus resultados podem ser levados em conta do dimensionamento de filtros granulares em barragens, reforçando a importância do conhecimento das características intrínsecas do material e sugerindo que isso, seja levado em conta na formulação de novas recomendações técnicas sobre o assunto.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho é estudar os efeitos do processo de carbonatação na resistência ao esmagamento de agregados de basalto.

Com relação aos objetivos específicos, cita-se:

- a) Analisar os efeitos na granulometria de agregados de basalto antes e após ensaios de esmagamento;
- b) Caracterizar a resistência ao esmagamento de três litotipos basálticos da região oeste do Paraná;
- c) Avaliar a curva de tensão versus deslocamento durante a aplicação do carregamento do ensaio de esmagamento, como uma análise complementar ao ensaio.



cada um deles intervalos temporais com milhões de anos de duração e envelopados por superfícies de discordância de caráter inter-regional: Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru. Contudo, o magmatismo Serra Geral, que é o de interesse neste trabalho, inclui-se na sequência Gondwana III (Reis, 2013).

O Magmatismo Serra Geral foi inicialmente denominado como Formação Serra Geral, como é descrita a província magmática relacionada aos derrames, representa os pacotes estratigráficos dos derrames de basalto com base nas variações laterais e verticais, diferente da denominação Grupo Serra Geral, que surgiu para definir unidades magmáticas existentes classificando os derrames de acordo com o mapeamento regional (MINEROPAR). Os autores explicam que na Bacia do Paraná, o conceito de grupo torna os estudos mais segmentados, e que dessa forma, o Grupo Serra Geral é uma subdivisão juntamente com outros membros.

O citado magmatismo caracteriza-se principalmente pelos extensos depósitos vulcânicos de lava basáltica, resultantes do intenso vulcanismo nas eras Mesozoica e Cenozoica, apresentando características singulares quando se diz respeito à rocha basáltica. As rochas vulcânicas básicas encontradas na bacia, apresentam cores variando em tons de cinza (devido à presença de minerais ferromagnesianos), textura fina sem ocorrência de fenocristais, com fenocristais ou micro fenocristais de augita e de plagioclásio, que geralmente são os principais minerais que compõem o basalto, juntamente com óxido de ferro e titânio.

Também são observados minerais opacos (magnetita e ilmenita) e mais raramente olivinas (Comin Chiaramonti et al., 1988). Na porção superior de cada derrame basáltico é comum a presença de vesículas, que possuem vazios com aspectos de bolhas (vesículas, sem material de preenchimento) ou, cavidades preenchidas por minerais secundários (amígdalas), de baixa temperatura relacionados à cristalização de fluidos (ZUQUETTE, 2018).

Além dos derrames basálticos, podem ser observadas também brechas basálticas, caracterizadas pelo acúmulo de basalto vesicular em zonas de transição entre os derrames, onde fragmentos angulosos de basalto vesicular são englobados por basalto maciço (Briske, 2017).

## 2.1 Alteração e alterabilidade da rocha

As estruturas rochosas são modificadas por fatores naturais (intemperismo físico-químico) ou artificiais (laboratoriais), que alteram suas características e desempenho. Englobados nos intemperismos físicos, que são alterações sem interferência na composição mineral, tem-se o surgimento de fissuras ou fragmentação da rocha pela variação de temperatura, ação abrasiva do vento e da chuva, entre outros. A presença de vazios torna a rocha suscetível a infiltração de água, o que ocasiona tensão nos vazios, devido a propriedade de expansibilidade dos minerais constituintes da matriz rochosa (Maia, 2001).

Já no intemperismo químico, a quebra, alteração, dissolução da estrutura mineral e/ou a decomposição química, são causados principalmente pela interação da água infiltrada com os minerais da rocha, podendo mobilizar significativamente os elementos químicos dissolvidos (Qiuhao Du, et al., 2019; Press et al., 2006).

A alteração química tem como consequência a formação de minerais secundários, como os argilominerais, que são formados pela alteração dos minerais primários das rochas, sendo constituídos por silicatos hidratados de alumínio, ferro e/ou magnésio, divididos em grupos como os das esmectitas, cloritas, caulinita e illita. Em materiais como o basalto, tem-se predominantemente argilominerais dos dois primeiros grupos (SANTOS,1989).

Dependendo da expansibilidade dos argilominerais presentes, a rocha exposta à diferentes condições de ambientes possui maior suscetibilidade à fragmentação, devido à variação de umidade, temperatura e pressão, e consequentemente tensão de tração nos espaços intergranulares da rocha, causando a desintegração do material devido ao enfraquecimento das ligações (Frazão, 2012). Porém, minerais sujeitos a mesmas ações podem apresentar alterabilidades diferentes, devido ao grau de alteração de cada um deles (SANTOS,1989).

De maneira geral, o grau de alteração se dá pelo estágio em que se encontram os constituintes minerais modificados. Assim, a norma NBR 6502/2022, também citada por Ferreira (2000), explica que a susceptibilidade do material em sofrer alterações de seus constituintes, a depender de características intrínsecas e intensidades dos agentes atuantes, pode ser quantificada através de índices que indicam o grau de alteração ao longo de determinado intervalo de tempo e depende da estabilidade química da rocha.

A alterabilidade da rocha também por ser analisada em laboratório, como por meio de ciclagem acelerada, que consiste na simulação das condições ambientais num curto intervalo de tempo.

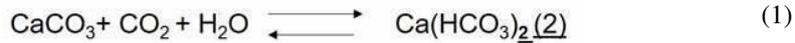
Frazão (2012) apresenta os diferentes ensaios existentes para avaliar a alterabilidade de um material rochoso, que são:

- a) Ciclos de saturação em sulfato e secagem em estufa: simula a solicitações de tensão de tração pela expansão dos minerais nos vazios da rocha, e distensão ao se dissociarem quando novamente imersas a solução.
- b) Ciclos de saturação em água e ciclagem em estufa: promove a hidratação dos minerais por meio da saturação em água, e dilatação das moléculas por meio do aquecimento numa temperatura de 110°C.
- c) Saturação em etilenoglicol: indicado quando há presença de argilominerais, em que as moléculas provocam expansão e consequentemente tração nos vazios da rocha.
- d) Lixiviação: consiste na solicitação por lixiviação contínua, a fim de promover a hidratação de minerais secundários.

Neste contexto, Farjallat (1971) classifica o comportamento da rocha após ciclagem acelerada em satisfatório (não alteraram suas características físicas) e não satisfatório (apresentaram alteração física). Também conclui que as rochas que apresentam maior valor de densidade, geralmente possuem menor valor de absorção de água.

### **2.1.1 Intemperismo por carbonatação**

A alteração química pode ocorrer por meio de diferentes tipos de reações químicas, como a hidrólise, a hidratação, a complexação, a redução-oxidação e a carbonatação. (Toledo, 2005; Vasconcelos, 2016). Especificamente sobre a carbonatação, trata-se da reação de carbonatos presentes nas rochas com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente na atmosfera ou dissolvido na água, formando assim o ácido carbônico ( $\text{CO}_3$ ), Equação 1.



Os campos de estabilidade dos compostos de carbono em solução estão intimamente relacionados com as condições de pH, temperatura e percentual total de atividade, portanto, sendo dissolvido em meio aquoso o gás carbônico constituirá o ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), em função da diminuição do pH (Sauerbronn, 2009).

Além disso, o agregado quando em contato com água acidificada por dióxido de carbono, pode apresentar alterações em suas condições físicas como densidade e porosidade. Devido a altas concentrações de CaO, MgO e FeO, e a grande reatividade de seus constituintes, os basaltos possuem alto potencial como reservatórios geológicos de carbono na forma de carbonatos. A carbonatação em rochas basálticas se dá, por exemplo, pela interação do dióxido de carbono com o mineral augita, que abrange uma série de reações até a formação química de minerais de carbonato (Toledo, 2005).

Durante as reações de carbonatação ocorre a captura de  $\text{CO}_2$ , motivando estudos de isolamento e armazenamento deste gás em rochas subterrâneas. O processo ocorre em três fases: separação, transporte e armazenamento (IPCC, 2005). A fase de armazenamento, onde o basalto é considerado como alto potencial para reservatório de  $\text{CO}_2$ , se dá de maneira direta ou indireta. Quando direta, o mineral é carbonatado somente numa etapa: tanto a extração dos metais do mineral, como a reação com o dióxido de carbono dissolvido ocorrem em um mesmo reator. Já a carbonatação indireta está dividida em várias etapas e baseia-se no fato que os componentes reativos com o  $\text{CO}_2$  são em sua maioria solúveis em meio ácido, e formam precipitados insolúveis na forma de carbonatos (Carneiro, et.al. 2013)

Neste contexto, pode-se explorar também estudos que mostram os efeitos da carbonatação em outros parâmetros da rocha, como densidade, porosidade, massa específica, absorção de água, bem como na resistência mecânica do material.

Cardoso (2022) analisou os parâmetros físicos da rocha basáltica antes e após a ciclagem acelerada com água saturada por  $\text{CO}_2$ , e notou que a porcentagem da amostra retida na peneira utilizada diminuía conforme se passavam as baterias de ensaios realizados, situação ocorrida principalmente na amostra de basalto maciço com presença de argilominerais em sua matriz, tendo uma diminuição de material retido na peneira 6,5mm com até 27% de perda de peso. O ocorrido está relacionado

principalmente pelo abatimento das arestas ou desprendimento de partículas submilimétricas das faces ou microamígdalas dos agregados, partículas submilimétricas (inferiores a 1 mm).

Notou-se também o aumento nos parâmetros de porosidade (cerca de 8,7% de aumento nas amostras BMC e de 22,5% de aumento nas amostras BMA), que pode estar relacionado a precipitação de minerais nos poros das rochas, e na absorção de água, mostrando que a reação do basalto com a água saturada em CO<sub>2</sub> foi depreciativa.

### 3 FILTROS GRANULARES: DEFINIÇÕES E APLICAÇÕES

Na engenharia civil, o termo filtração é utilizado para descrever o processo de prevenção da migração de partículas de solo pelo meio permeável, juntamente com a água (Xiao, et al., 2013). Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), em barragens os filtros e drenos a serem construídos com materiais granulares desempenham o papel de controlar os escoamentos, através do corpo da barragem e da sua fundação, sendo essencial que conduzam os fluxos afluentes sem afogamento e que retenham os materiais adjacentes, evitando erosões internas.

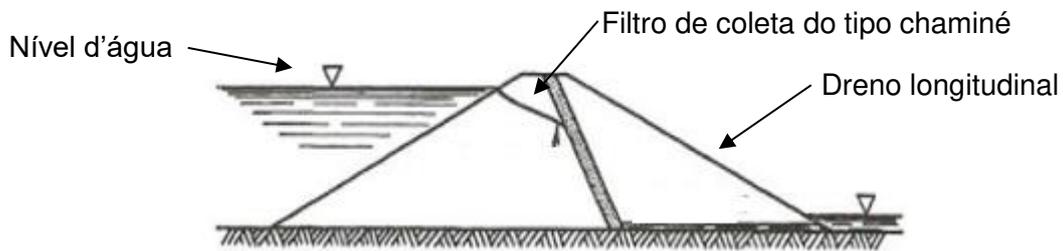
Os filtros são dimensionados para impedir o arrastamento de solos. Os drenos são dimensionados para escoar a água, mantendo os materiais a jusante secos. A combinação de filtros e drenos constitui uma boa solução de drenagem das barragens.

Dentre os tipos de filtros utilizados, tem-se os filtros granulares, que foram inicialmente utilizados em barragens de terra a fim de amenizar ou evitar a erosão do solo, retendo partículas e evitando o carreamento do solo maciço, além de promover a percolação da água pelos vazios. Para que haja a aplicação destes filtros, é necessário considerar o tipo de material a ser utilizado, levando em consideração sua formação geológica, que irá influenciar diretamente na sua durabilidade e resistência a intempéries (CRUZ, 2014).

Os filtros granulares são classificados de acordo com a posição em que ocupam num sistema de barramento, podendo ser classificados em verticais, quando são posicionados a jusante do eixo da barragem, como mostrado na figura 2; e horizontais, posicionados longitudinalmente entre o eixo da barragem e o pé de jusante, como apresentado na figura 3.

Os drenos de pé possuem a função de captar a água e conter as matérias granulares que podem desprender pelo dreno horizontal, enquanto os drenos horizontais são utilizados para interceptar e drenar a água que se infiltra através do corpo da barragem, são projetados para captar a água infiltrada e conduzi-la para fora da barragem, ajudando a reduzir a pressão hidrostática interna e prevenindo o acúmulo de água no interior da estrutura. (Cruz, 2014). É possível observar na figura 3 a representação de um sistema de drenagem vertical, em que a água percola pelo filtro tipo chaminé e é coletada por um dreno longitudinal, paralelo à saída da barragem.

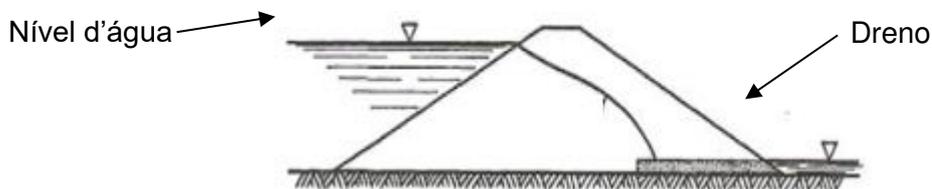
Figura 2: barragem de terra com sistema de drenagem vertical



Fonte: Traduzido de Lambe e Whitman, 1969

A altura dos filtros verticais geralmente é a altura do nível d'água no reservatório, e deve se estender por toda a extensão longitudinal da barragem e até a elevação do nível d'água máximo normal de operação do reservatório, enquanto o sistema de drenagem horizontal (Figura 3) não deve ter espessura superior a 2m por motivos econômicos (SILVA, 2006).

Figura 3: Barragem de terra com sistema de drenagem horizontal



Fonte: Traduzido de Lambe e Whitman, 1969

Pode-se citar também que filtros verticais são economicamente mais vantajosos que horizontais, devido ao maior gradiente hidráulico e menor perda de carga (Gaioto, 2003).

Os principais fatores que regem o funcionamento de um filtro granular são retenção do solo de base, permeabilidade do solo e espessura mínima, e foram explicados em Geotechnical Engineering Office (1993) e por Gaioto (2003), como a seguir:

- a) Retenção do solo de base - deve ser capaz de impedir uma perda contínua de partículas de solo do solo de base para o filtro.
- b) Permeabilidade do solo de base e do filtro - o filtro deve ser mais permeável do que o solo de base e ser capaz de acomodar o caudal de projeto

sem uma acumulação significativa de pressão de água. Foi proposta a relação entre os diâmetros  $d_{15}$  e  $d_{85}$  do material de base com o diâmetro  $D_{15}$  do material do filtro granular aplicado, a fim de garantir a permeabilidade (Equação 2) e estabilidade (Equação 3).

c) Espessura mínima do filtro - deve ter uma espessura suficiente para reter as partículas que migram do solo de base, de modo a que se possa formar uma interface estável por auto filtração.

$$D_{15}/d_{15} > 4 \text{ a } 5 \quad (2)$$

$$D_{15}/d_{85} < 4 \text{ a } 5 \quad (3)$$

Os fatores aplicados a fim de garantir a funcionalidade dos filtros granulares, são utilizados também no dimensionamento dos mesmos, satisfazendo os requisitos de desempenho e estabilidade. Araújo (2019) ressalta que o filtro deve ter capacidade de retenção, garantir a passagem do fluído, manter-se estável internamente sem que suas próprias partículas interfiram no processo e possuir resistência mecânica a fim de garantir sua estabilidade, sem que o mesmo sofra alterações de forma e tamanho.

Um dos principais e mais conhecidos critérios de dimensionamento foi estudado por Terzaghi (Terzaghi; Peck, 1962), e frisa a importância da capacidade de retenção da rocha a ser utilizada, ou seja, os poros internos devem ser suficientemente pequenos para impedir o transporte de partículas erodidas, mas também suficientemente grandes para não impedir a passagem do fluído, além da relevância da permeabilidade do material sem que haja alteração granulométrica. Este critério é válido para solos não coesivos (em geral, partículas grandes e grossas) e uniformes (diâmetros semelhantes entre os grãos). Um filtro deve ter um arranjo de vazios tais que os grãos do material a ser protegido não consigam ser transportados através dele, e esses vazios são controlados pelas partículas finas e definidos por  $D_{15}$ .

Assim, desde a publicação do estudo do engenheiro, novas pesquisas a respeito do dimensionamento basearam-se na distribuição granulométrica do material aplicado no processo de filtração (Silva, 2006). Segundo Raut (2008), o dimensionamento deve ser realizado levando em conta a dimensão dos grãos e

quantidade de vazios adequada para que haja o escoamento do fluído, ou seja, deve-se pensar na permeabilidade do meio, que será definida pelo deslocamento da água entre os vazios, conseqüente da aplicação de diferença de potencial.

Esta etapa de projeto numa barragem, por exemplo, deve garantir a segurança da estrutura, como também das instalações e populações localizadas à jusante da construção (Araújo, 2019). Diante disto, torna-se necessária a realização de um estudo preliminar para avaliar a granulometria e resistência à agentes externos do material a ser utilizado na filtração, tamanho da abertura dos vazios formados pelos grãos do material do filtro e sua distribuição granulométrica.

#### 4 RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO DE AGREGADOS DE ROCHA

Sabe-se que o intemperismo físico-químico influencia na resistência mecânica dos agregados, e para determinar tal grau de alteração, foram desenvolvidos ensaios laboratoriais a fim de obter-se maior precisão ao analisar amostras individualmente, tornando-se indicadores de alteração e alterabilidade, podendo assim verificar as propriedades mecânicas de agregados aplicados a obras de engenharias.

Ao tratar-se do ensaio de esmagamento, deve-se levar em conta a granulometria do material, para assim definir a carga a ser aplicada, e tem como proposta determinar a resistência do agregado sobre um carregamento compressivo gradual, ou seja, uma carga variando com uma taxa fixa em um intervalo de tempo (Ramamy, 2020; Shahrin, 2010).

Nacionalmente, a NBR 9938/13 define procedimentos para agregados graúdos, com granulometria entre 9,5mm e 12,5mm. Sugere-se o uso de cilindro vazado de ensaio em aço com  $(154,0 \pm 0,5)$  mm de diâmetro interno,  $(140,0 \pm 0,5)$  mm de altura e  $(15,0 \pm 0,5)$  mm de espessura (Figura 5). Após apiloamento do agregado, com uso de um cilindro de maciço sobre os agregados, é aplicada uma carga de 400kN uniformemente à razão de  $(40 \pm 5)$  kN/min. Assim, a análise da resistência ao esmagamento consiste basicamente em verificar a granulometria do agregado antes e após a aplicação de força mecânica, a fim de realizar comparativo entre a massa do material retido na peneira de abertura 2,4 mm. O índice de resistência ao esmagamento é dado pela Equação 4.

$$R = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 \quad (4)$$

Onde:

R: resistência do agregado ao esmagamento, em %;

Mf: massa final do material retido na peneira 2,4 mm, em gramas.

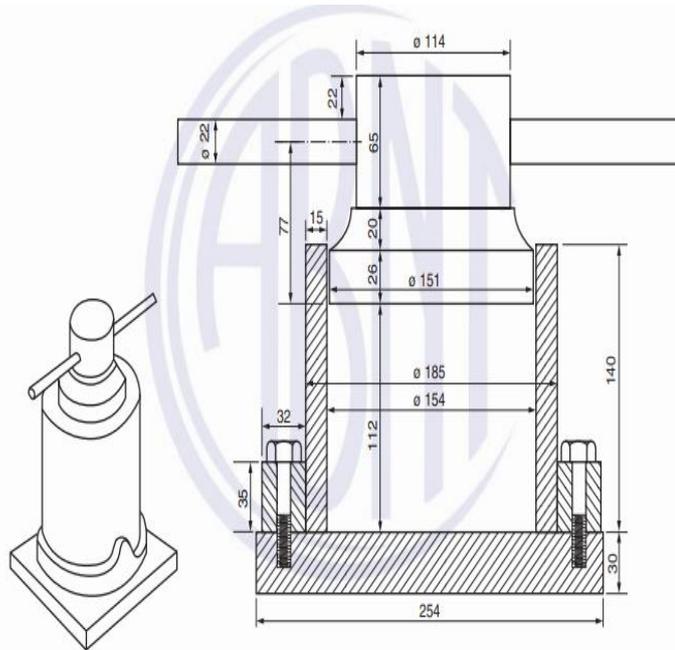
Mi: massa inicial da amostra seca antes do ensaio, em gramas;

O resultado é obtido pela média de duas determinações. A diferença entre a primeira e a segunda determinação não deve ser superior a 3%. Caso isto ocorra, realizar uma terceira determinação e adotar as duas que satisfaçam este limite.

São também pré-determinados as dimensões e equipamentos a serem utilizados no ensaio citado (Figura 4). As dimensões citadas estão em escala milimétrica. A saber:

- Cilindro vazado de ensaio em aço com  $(154,0 \pm 0,5)$  mm de diâmetro interno,  $(140,0 \pm 0,5)$  mm de altura e  $(15,0 \pm 0,5)$  mm de espessura;
- Base quadrada em chapa de aço (254mmx30mm);
- Haste metálica para socamento do corpo de prova, com extremidades arredondadas;
- Recipiente cilíndrico metálico resistente de  $(110 \pm 5)$  mm de diâmetro interno,  $(180 \pm 5)$  mm de altura e que permita o apiloamento do agregado nele contido.

Figura 4: Conjunto cilindro e êmbolo para ensaio de esmagamento (unidades em mm).



Fonte: NBR 9938/13

As normativas internacionais apresentam procedimentos similares para o cálculo da resistência ao esmagamento (ACV - Aggregate Crushing Value). A vantagem é que possuem recomendações alternativas para faixas granulométricas distintas (Tabela 2). Para agregados de dimensão inferior a 6,3mm, a carga máxima é de 100kN, com taxa de carregamento de 10kN/min, até que a carga máxima seja atingida.

Tabela 1: Detalhes de peneiras de teste para frações de agregado de outros tamanhos

Tamanho da partícula	Para preparação dos corpos de prova	
	Passante (mm)	Retido (mm)
>padrão	28	20
	20	14
Padrão	14	10
< padrão	10	6,3
	6,3	5
	5	3,35
	3,35	2,36

Fonte: traduzida de BS 812-110: 1990

A Tabela 2 apresenta alguns dos resultados de ACV relacionados à basalto. Nota-se que existe uma grande diferença nos valores de resistência ao esmagamento nos ensaios de cada autor, entre 10% e 36%. Essa, se dá pelas características intrínsecas da rocha basáltica utilizada por cada um deles.

Tabela 2: Ensaios de resistência ao esmagamento realizados em basaltos

Material geológico	Peneiras(#mm)		Carga Aplicada	ACV (%)		Autor (ano)
	Passante	Retido		mínimo	máximo	
Rocha basáltica	9,52	12,7	400kN	16,1	25,9	Rodgher (1996)
	-	-	-	20	36	Engidasew (2013)
	10	14	400kN	10,86	16,33	Korcanç (2004)
	9,5	12,7	1000kN	21,6	31,8	Alves (2014)
	2.36	-	400kN	8.51	-	Tahmoorian (2017)

Fonte: autor, 2023

Quanto à análise dos valores obtidos nos ensaios de resistência ao esmagamento, Abdallah (2008), assim como, Oluwole et. Al (2019), afirma que se os resultados forem inferiores a 20%, pode-se considerar que o agregado é pouco suscetível ao esmagamento, presumindo que quando os valores são superiores a 30%, trata-se de um agregado suscetível ao esmagamento. Entretanto, valores entre o máximo e mínimo apresentados, caracterizam agregados marginais, com valores úteis ainda não definidos em escala.

A norma internacional ISO:2384 também apresenta limites para diferentes aplicações dos materiais rochosos estudados. Em pavimentos de concreto, o valor não pode exceder os 30% (explicado com Abdallah (2008) como caracterização de um material pouco resistente), e em superfícies de desgaste não deve exceder 45%.

Não foi encontrado valores limites específicos para filtros granulares utilizados em sistemas de drenagem.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido para avaliação da resistência ao esmagamento de agregados antes e após a ciclagem com água saturada por CO<sub>2</sub>.

O material estudado trata-se de rochas basálticas no contexto da região oeste do Paraná, sendo abordados três litotipos basálticos: (i) BMA – basalto com microamígdalas de argilomineral de Foz do Iguaçu; (ii) BMC – basalto maciço cinza de Foz do Iguaçu; (iii) BMR - basalto maciço rosado de Toledo.

Os ensaios de ciclagem foram realizados anteriormente por Cardoso (2022), o qual foi focado no monitoramento físico-químico da água de ciclagem e na parâmetros físicos do agregado (densidade, porosidade e absorção de água), ensaios não destrutivos. A autora utilizou o método de triplicatas, sendo cada amostra constituída de aproximadamente 400 g de agregado com diâmetro entre 6,3 e 9,5 mm, característico da fração grossa de filtro granulares. Foram realizadas ao total doze baterias de ciclagem, sendo cada bateria constituída de um período de imersão em água saturada com CO<sub>2</sub> (30 dias), seguido de secagem ao sol (15 dias). Cada amostra recebeu em torno de 400mL de água acidificada com CO<sub>2</sub>. O processo de acidificação foi por borbulhamento de CO<sub>2</sub> em água destilada, sob pressão de 5 psi, até atingir o pH de  $4,3 \pm 0,3$ .

Os parâmetros utilizados nas baterias de ciclagem são justificados pelas recomendações da NBR 2696/92, a qual estipula 12 baterias de ciclagem água-estufa. A pressão e tempo da saturação foram determinados em função do pH, até que o mesmo atingisse valor entre 3 e 5, este, característico de um ambiente de hidrólise parcial. Já os ciclos de imersão em água saturada com CO<sub>2</sub> tiveram duração de 30 dias, pois é o tempo em que se tem a estabilidade química entre os minerais e a água, enquanto os 15 dias de ciclagem foram definidos pelo período mostrar-se favorável para secagem ao livre e organização de uma nova bateria.

Dessa forma, o presente trabalho utilizou as mesmas amostras cicladas por Cardoso (2022), submetendo-as ao ensaio de esmagamento, seguindo as recomendações da normativa BS 812-110 (1990), que possui procedimento específico para a dimensão do agregado do estudo. No procedimento, lista-se:

- a) Dimensão do aparato de acomodação específica para faixa granulométrica da amostra, que é de 6,3 a 9,5 mm (Figura 5);
- b) Carga máxima do ensaio: 100kN;

- c) Taxa de carregamento: 10 kN/min;
- d) Peneira limite para cálculo de ACV: 1,7mm;
- e) Ensaios em duplicata, conforme instrução normativa. Os valores individuais devem divergir em no máximo 0,07 vezes o valor entre as amostras.

O cálculo da resistência ao esmagamento é realizado pela Equação 5.

$$ACV = \frac{M2}{M1} * 100 \quad (5)$$

Onde:

ACV: Resistência ao esmagamento;

M1: Massa inicial da amostra seca antes do ensaio, em gramas;

M2: Massa do material que passa pela peneira 1,7mm.

Figura 5: Componentes aparato cilíndrico para ensaio de esmagamento



1 – Adaptador para amostras; 2- Base circular; 3- Cilindro maciço de aplicação de carga; 4- Cilindro de acomodação da amostra; 5- Anel de fixação; 6- Pinos de fixação.

Fonte: autor, 2023

O aparato foi montado dispondo a amostra no cilindro de acomodação, que por sua vez é apoiado em uma base circular envolta por um cilindro maciço, a fim de estabilizar o conjunto (Figura 6.a). O cilindro maciço é apoiado sobre a amostra, o qual recebe a carga da prensa e a transfere para o agregado (Figura 6.b). Por fim, o conjunto do aparato contendo a amostra é centralizado na base de carregamento da

prensa universal (Figura 6.c). A prensa universal foi anteriormente configurada para aplicação de carga máxima de 100kN a uma taxa de 10kN/min.

As peças dos aparatos possuem dimensões específicas (Tabela 3) que devem ser consideradas na comparação entre amostras e ensaios realizados por outros autores.

Tabela 3: Medidas do aparato de ensaio

COMPONENTE	DIMENSÕES	mm
Adaptador para amostras	diâmetro interno	69
Base circular	diâmetro externo	150
Cilindro maciço de aplicação de carga	altura	100
	diâmetro externo	66
Cilindro de acomodação da amostra	diâmetro interno	69
	altura	90
Anel de fixação	diâmetro interno	71
	diâmetro externo	150
	altura	30
Pinos de fixação	diâmetro interno	11
	diâmetro externo	18

Fonte: autor, 2024

Após esmagamento, a amostra passou pelo processo de peneiramento (# 1,7 mm) para então ser realizado o cálculo de ACV, Equação 5. A norma recomenda arredondar o índice ACV para um valor inteiro a partir da média de dois valores. Os valores individuais não podem diferenciar de mais de 0,07 vezes o valor médio. Assim, como é um ensaio destrutivo, foi preservada uma amostra da triplicada de ciclagem para estudos complementares.

A prensa universal utilizada na realização do ensaio de esmagamento fornece valores da força aplicada em determinado intervalo de tempo, assim como a força gradual aplicada, permitindo assim a análise da curva de deslocamento da amostra.

Em referências como o trabalho de Abdallah (2008), tem-se o traçado da curva de deformação (%) em razão da tensão aplicada (psi), e através dessa e da interseção de duas retas, obtém-se os pontos de deformação máxima de compactação, módulo de compactação e de esmagamento, além do ponto de tensão máxima (Figura 7).

Figura 6– Etapas de montagem do ensaio de resistência ao esmagamento.



(A)

(B)

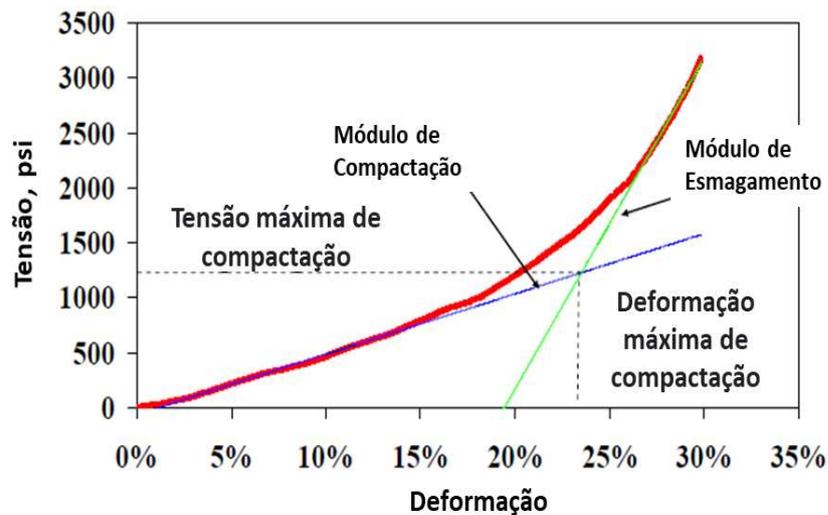
(C)

(A) Disposição da amostra no aparato; (B) Colocação do cilindro maciço de aplicação de carga; (C) Acomodação do conjunto aparato com amostra na prensa universal.

Fonte: autor, 2023

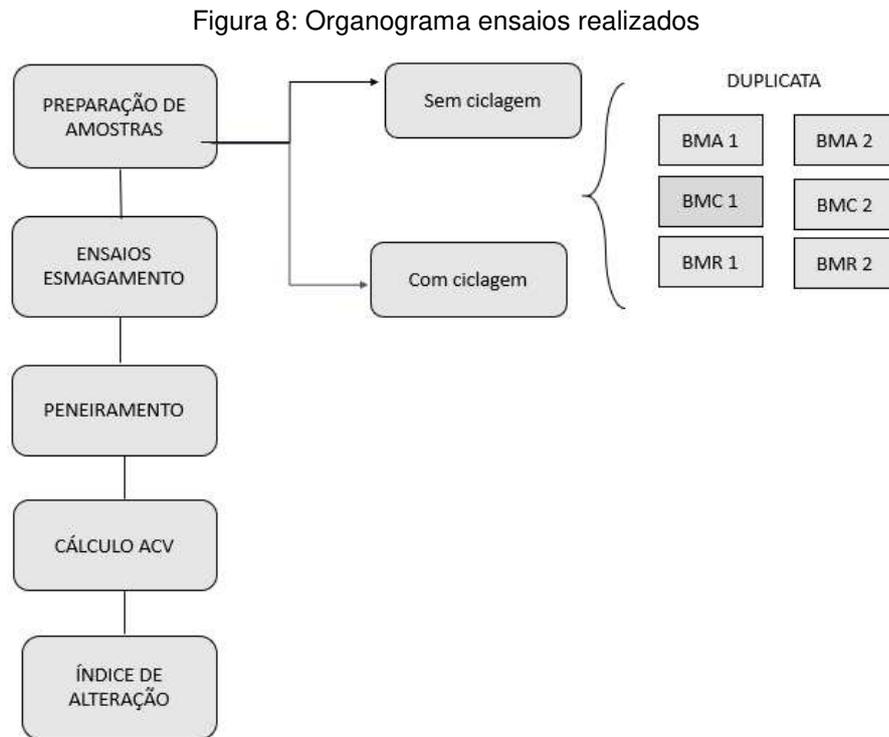
Porém no presente trabalho conservou-se apenas os dados de deslocamento, sem considerar a altura do corpo de prova para que fosse calculada a deformação. Dessa forma, serão apresentadas as curvas de tensão ( $\text{kN/m}^2$ ) em razão do deslocamento (milímetros).

Figura 7: Resultados típicos para o teste ACV



Fonte: traduzido de Abdallah, 2008.

Conforme relatado anteriormente, os resultados dos ensaios foram conduzidos a fim de avaliar a influência dos efeitos da carbonatação na resistência ao esmagamento, comparando os resultados entre as amostras com e sem ciclagem, conforme esquematizado na Figura 8.



Fonte: autor, 2024

De maneira complementar, em estudos de alteração e alterabilidade é comum aplicar o índice de qualidade de Iliev (1966) para mensurar a influência de um ensaio de ciclagem em um parâmetro geotécnico da rocha. O cálculo é realizado a fim de obter o grau de alteração da rocha em questão, conforme Equação 6.

$$I_i = \frac{i_0 - i_f}{i_0} \quad (6)$$

Na equação, a *simbologia* “*i*” refere-se originalmente à velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, mas posteriormente aplicada a diferentes parâmetros geotécnicos. O índice “0”, refere-se à condição inicial da amostra, antes dos ensaios de ciclagem, e o índice “f” a condição final, após finalização dos ciclos de alteração da amostra. O termo “*I<sub>i</sub>*” pode variar entre zero e um, quando o índice de

qualidade de  $I_{liv}$  é igual à condição inicial do material ( $i_f = i_0$ ), conclui-se que o material não apresenta alterações, e quando resulta em zero ( $i_f = 0$ ), o agregado está completamente alterado.

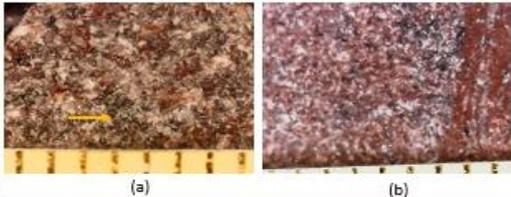
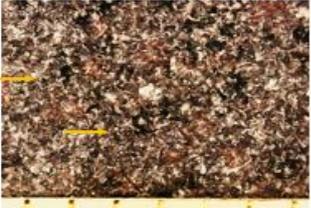
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o presente trabalho foi possível comparar e avaliar as alterações na resistência ao esmagamento de três diferentes litotipos basálticos, quando submetidos à ciclagem com dióxido de carbono, além de analisar as curvas de deslocamento e de granulometria das amostras.

### 6.1 Descrição qualitativa dos basaltos

Foram analisados três litotipos basálticos, que se diferenciaram visualmente pela cor da matriz e presença ou não de microamígdalas de basalto, Figura 9.

Figura 9: Análise qualitativa das amostras originais (escala em mm). As flechas indicam a presença de microamígdalas.

	VISTA GERAL DOS AGREGADOS	IMAGEM COM MICROSCÓPIO DIGITAL USB
BMR		
BMC		
BMA		

(a) Agregados com microamígdalas (b) agregados de basalto denso

Fonte: autor, 2024

- BMC: basalto maciço cinza. Apresenta matriz fina, acinzentada com alguns pontos de oxidação da superfície do agregado. Observa-se maior presença de agregados alongados e lamelares nesta amostra;
- BMA: basalto com microamígdalas de argilomineral. A matriz de basalto varia de cinza a rosada, com presença de microamígdalas de argilomineral de cor verde. A forma dos agregados também predomina ser do tipo lamelar;

- BMR: observou-se uma variação de agregados de basalto maciço rosado e basalto rosado com microamígdalas de argilomineral. Predominam agregados com geometria cúbica.

## 6.2 Resistência ao esmagamento

Os resultados relacionados ao ACV foram dispostos num gráfico de barras, permitindo a observação da diferença entre os valores antes (ACVzero) e depois da ciclagem (ACVfinal), Figura 10. As amostras das duplicadas de cada litotipo se diferenciam no gráfico de barras por cor, sendo a Amostra 1 representada pela cor verde, e Amostra 2 representada pela cor azul.

As amostras de basalto maciço rosado (BMR) que não passaram por ciclagem em água saturada por CO<sub>2</sub>, apresentaram uma média de índice de esmagamento correspondente a 14,02%, e após ciclagem de 18,4%. O ensaio com amostras de basalto maciço cinza (BMC) antes da ciclagem, resultou num índice de esmagamento médio de 14,26%, e após ciclagem com valor médio de 19,6%. O litotipo BMC, apesar de possuir matriz densa, apresentou valores similares à BMR possivelmente por apresentar agregados mais lamelares.

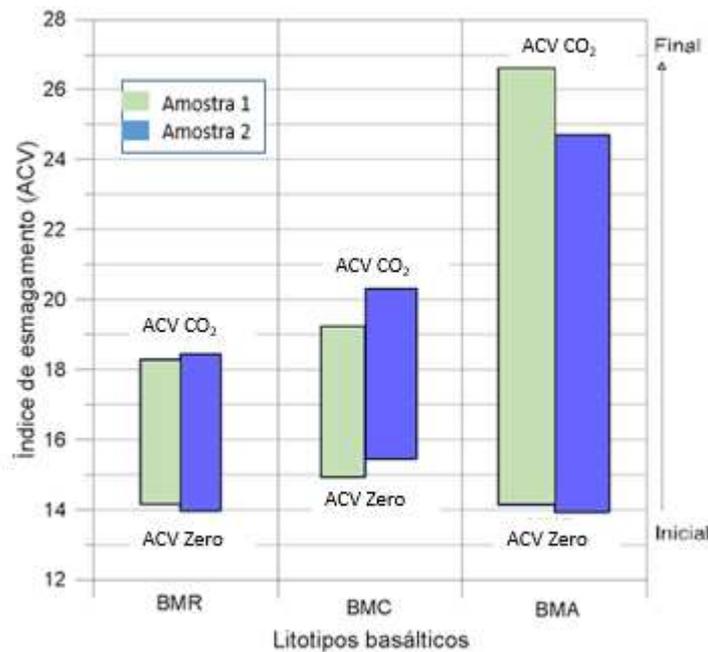
Com os valores obtidos na análise, nota-se a diminuição da resistência ao esmagamento dos agregados quando ciclados com água saturada por CO<sub>2</sub>, conclusão identificada pelo aumento da porcentagem de material passante na peneira 1,7mm, ou seja, diminuição dos grãos da amostra após a aplicação da carga no ensaio de esmagamento.

Por sua vez, o material caracterizado como basalto com presença de argilominerais em sua matriz (BMA) resultou numa variação entre os limites de 14,74% e 25,72%, antes e após a ciclagem, respectivamente. Nota-se que as amostras da duplicata de BMA apresentaram valores de ACV superiores aos demais após a ciclagem, o que indica um material com menor durabilidade em termos de resistência mecânica que os demais, possivelmente pela maior conectividade entre as microamígdalas.

De maneira geral, a redução da resistência ao esmagamento pode ser dada pela presença de argilominerais expansivos na composição da rocha, mas também pela interação das partículas do material entre si, favorecendo ou não o desprendimento das mesmas. Tal desprendimento e/ou diminuição das partículas

envolvidas na amostra do material granular impactam na durabilidade do filtro granular aplicado, uma vez que se tem como possíveis consequências o movimento e então a instabilidade do mesmo, além do carregamento dos grãos até que haja o entupimento dos vazios, impedindo a passagem de água num fluxo previsto.

Figura 10: Índice de esmagamento dos litotipos basálticos. Valores das duplicatas, sem e após a ciclagem.



\*ACV Zero: valores das amostras da duplicata sem ciclagem  
ACV CO<sub>2</sub>: valores das amostras da duplicata após ciclagem

Fonte: autor, 2024

Com as amostras ensaiadas, obteve-se um índice de qualidade de 0,31 para as amostras de BMR, 0,37 para BMC e 0,74 para o material BMA, assim, conclui-se que de acordo com as amostras utilizadas, a de basalto maciço rosado com microamígdalas de argilomineral apresenta melhor qualidade quando comparada com as demais. Porém, os resultados do índice de qualidade não devem ser tomados como regra, uma vez que as amostras do litotipo BMC, apesar de não possuírem argilominerais expansivos em sua composição, possuem geometria lamelar, interferindo nos resultados dos ensaios que envolvem a granulometria do material, uma vez que a massa retida na peneira utilizada no ensaio terá um valor significativo mesmo que não haja segregação de material após ciclagem.

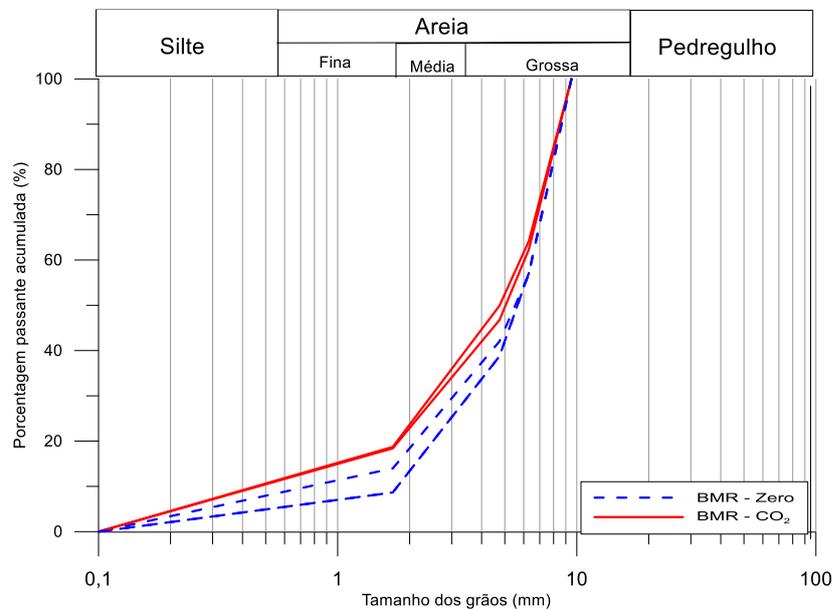
### 6.3 Curvas granulométricas após ensaio de esmagamento

As curvas granulométricas dos agregados foram analisadas após serem submetidos ao ensaio de esmagamento, sem e com ciclagem em CO<sub>2</sub>.

Para o litotipo BMR observou-se que os agregados passam de granulometria uniforme (100% passante na peneira 6,3 mm e retido na 4,75 mm) para graduado (Figura 11). As amostras que foram submetidas à ciclagem com CO<sub>2</sub> apresentaram leve aumento na porcentagem de finos após ensaio de esmagamento, sendo 13,97% passante na peneira 1,7 mm e de 56% na peneira 4,75mm quando sem ciclagem, e 18,5% e 65,13% passantes, respectivamente, quando submetido a ciclagem.

Quando realizada a curva granulometria das amostras referentes à duplicata do basalto caracterizado como BMA (Figura 12), obteve-se uma média de 15% de material passante na peneira 1,7mm na amostra sem ciclagem, enquanto as amostras cicladas apresentaram uma média de 25,7% na mesma peneira após ciclagem. Já na peneira 4,75mm a média de material passante foi de 52,09% na amostra sem ciclagem e de 92,91% na amostra ciclada. Essa diferença de material passante na menor peneira retrata a diminuição do tamanho dos grãos da amostra ensaiada.

Figura 11: Relação granulométrica das amostras BMR

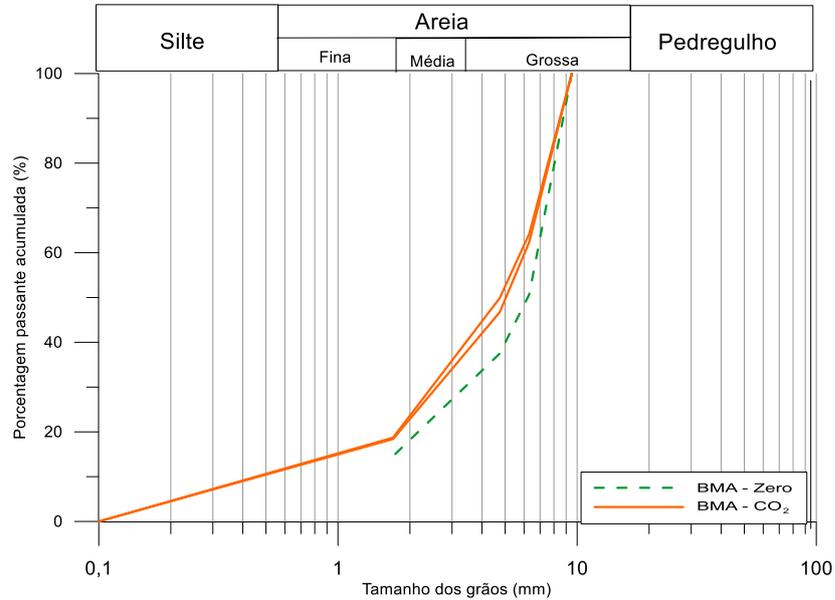


Fonte: autor, 2024

Já as amostras correspondentes ao litotipo classificado BMC, quando não submetidas à ciclagem, apresentam uma média de 14,6% de massa passante na peneira 1,7mm, indicada pela norma britânica, e de 57,25% na peneira de 4,75mm.

Após ciclagem, na primeira peneira a massa passante foi em torno de 21,9%, e na segunda, de 72,22% da massa total da amostra, conforme Figura 13.

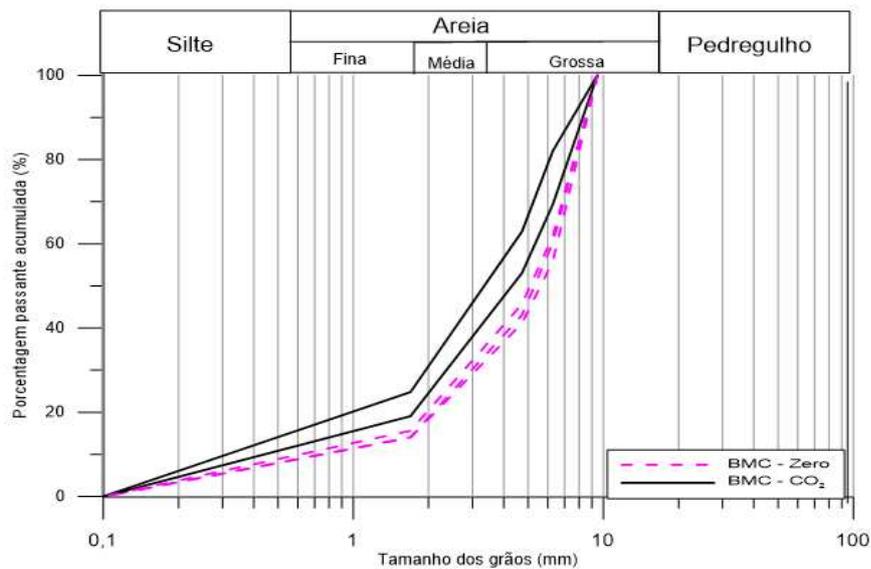
Figura 12: Relação granulométrica das amostras BMA



Fonte: autor, 2024

Essas amostras, apesar de não possuírem argilominerais expansivos em sua composição, possuem geometria lamelar que influenciou nos resultados durante a realização do peneiramento para análise da granulometria.

Figura 13: Relação granulométrica das amostras BMC



Fonte: autor, 2024

Dessa forma, dispondo dos gráficos dos três litotipos basálticos ensaiados, nota-se que a amostra BMC possui menor porcentagem de granulometria passante na peneira 1,7mm após ciclagem acelerada com CO<sub>2</sub>, quando comparada à sua condição inicial. Isso se dá pela sua geometria lamelar e sua maior área de contato.

#### 6.4 Curvas força versus deslocamento

A fim de analisar o deslocamento das amostras ensaiadas, com e sem ciclagem em água saturada com CO<sub>2</sub>, conforme a aplicação de uma carga constante de 10kN/m durante dez minutos. Foram traçadas curvas que relacionaram os dois fatores, permitindo a observação do ponto máximo de deslocamento na compactação do material, com maior interesse nos valores das amostras cicladas para que seja possível uma comparação dos efeitos do CO<sub>2</sub> na resistência mecânica da rocha.

Figura 14: Curvas de deslocamento das amostras (a) Basalto maciço rosado de Toledo (b) Basalto com microamígdalas de argilomineral de Foz do Iguaçu (c) Basalto maciço cinza de Toledo (continuação)

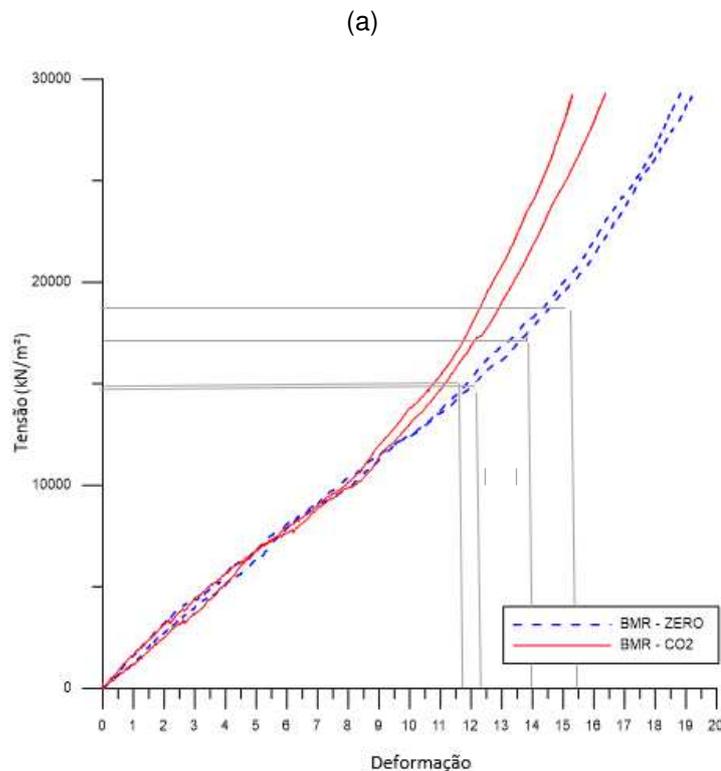
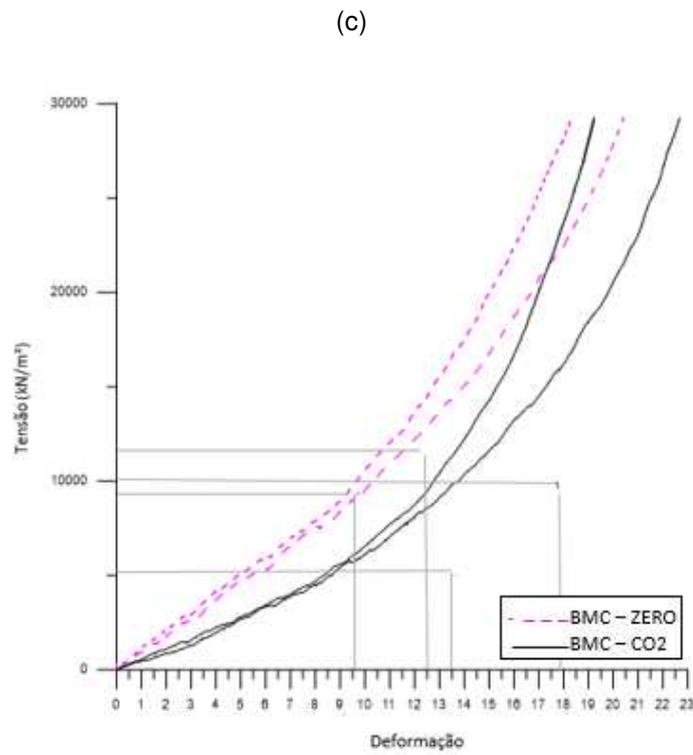
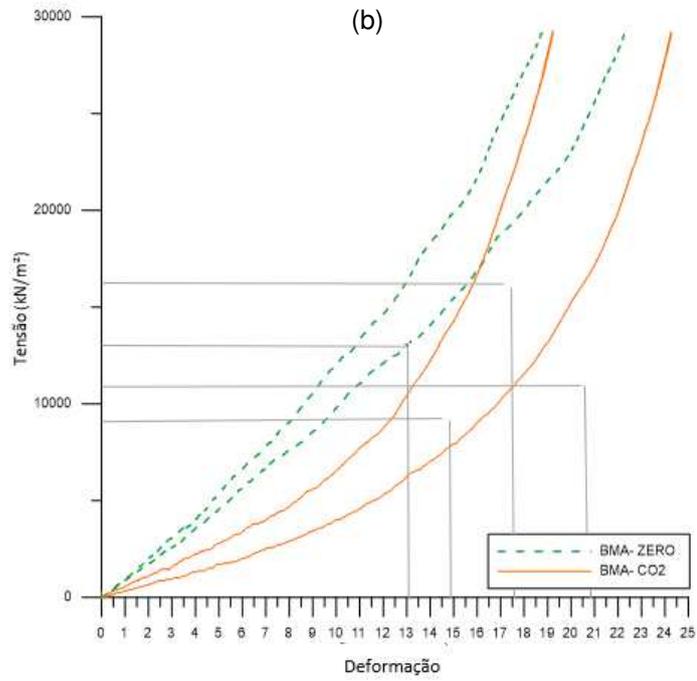


Figura 14: Curvas de deslocamento das amostras (a) Basalto maciço rosado de Toledo (b) Basalto com microamígdalas de argilomineral de Foz do Iguaçu (c) Basalto maciço cinza de Toledo (continuação)

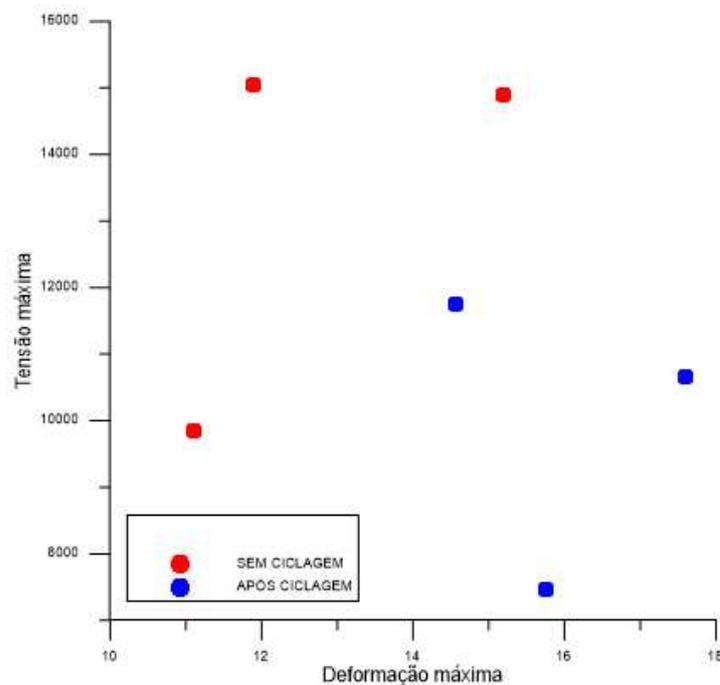


Fonte: autor, 2024

Nos gráficos apresentados na Figura 14, foram plotadas as curvas de força e de deslocamento, e através delas as retas de módulo de esmagamento para que então fosse possível traçar a tensão máxima de compactação de cada amostra (linha cinza horizontal) e deformação máxima de compactação (linha cinza na vertical).

Através da plotagem dos gráficos (Figura 14), foi possível observar que não há um padrão de valores quanto ao ponto máximo de deslocamento, como observado na Figura 15.

Figura 15: média entre pontos máximos de deslocamento



Fonte: autor, 2024.

Ou seja, o traçado nas retas mostra-se não ser significativo ao tratar-se da diferença de resistência mecânicas dos agregados com e sem ciclagem.

## 7 CONCLUSÕES

Ao início do presente estudo acreditava-se, com a realização da revisão bibliográfica, que as amostras do litotipo BMC seriam mais resistentes, por não haver argilominerais em sua composição que pudessem reagir com o CO<sub>2</sub> ao qual foram expostas. No entanto, após a execução dos ensaios de resistência ao esmagamento e granulometria, notou-se que sua geometria lamelar interferiu nos resultados, apresentando valores menores do que os esperados.

Além disso, com a plotagem das curvas de tensão versus deformação para comparação dos resultados antes e após a ciclagem em água saturada, concluiu-se que a exposição a níveis de CO<sub>2</sub>, quando há argilominerais expansivos na composição da rocha, interfere na resistência mecânica, no caso dos litotipos basálticos ensaiados, acarreta na diminuição de tal característica, sendo maior a influência quando há maior conectividade das microamígdalas.

Dessa forma, notou-se ser imprescindível o conhecimento prévio das características intrínsecas dos materiais a serem utilizados em filtros granulares, para que seja possível a previsão das possíveis reações dos materiais envolvidos em projetos de drenagem que utilizam de filtros granulares, mas também a caracterização da geometria dos materiais a serem utilizados, levando em conta o constante processo de esmagamento.

## REFERÊNCIAS

- I. ABDALLAH, E. MAHMOUD, S. NAZARIAN, AND E. MASAD. **Quantifying the Role of Coarse Aggregate Strength on Resistance to Load in HMA for Blended Aggregates**, 2008.
- ALMEIDA DE-GODOY, V.; ZUQUETTE, L.; GÓMEZ-HERNÁNDEZ, JJ. (09-2). **Scale effect on hydraulic conductivity and solute transport: Small and large-scale laboratory experiments and field experiments**, 2018.
- ALVES, VICTOR AUGUSTO H. **Avaliação da Resistência à Degradação Mecânica de Agregados da Região Metropolitana do Rio de Janeiro por Técnicas Digitais de Imagens**, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9938: Agregados – Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos métodos e ensaios**, 2013.
- ENGIDASEW, T.A; BARBIERI, GIULIO. **Geo-engineering evaluation of Termaber basalt rock mass for crushed stone aggregate and building stone from Central Ethiopia**, 2013.
- BRANCO, P. DE M. **Rochas**. Serviço Geológico do Brasil, 2015.
- BRISKE, DOUGLAS RICARDO. **Caracterização petrográficas e geoquímica em rochas da formação Serra Geral na cratera de impacto meteorítico de Vargeão, SC**, 2017.
- CARDOSO, SARA. **Ciclagem acelerada de agregados de basalto em água saturada por dióxido de carbono**, 2021.
- CARNEIRO, PATRICIA; DULLIUS, JEAN, ET AL; ROSANE LIGABUE; CLAUDIA MACHADO; JOÃO MARCELO KETZER. **Carbonatação do basalto e seu potencial uso no armazenamento de co2**, 2013.
- COMIN-CHIARAMONTI, P. et al. **Classification and petrography of continental stratoid volcanics and related intrusives from the Parana basin (Brazil)**. Mesozoic Flood Volcanism of the Parana Basin. Tradução. São Paulo: USP-IAG, 1988.
- DANIEL, D. E. **State of the art: laboratory hydraulic conductivity tests for sutured soils**. ASTM/STP 1142, Philadelphia, 1994.

FERREIRA, PAULO ALEXANDRE PEREIRA DOS Santos - **Alteração e alterabilidade das rochas: implicações em obras de engenharia.** Coimbra: Departamento de Engenharia Civil, 2000.

FRAZÃO, ELY BORGES. **Alteração de rochas como critério de seleção de agregados.** São Paulo, 2012.

GEOTECHNICAL ENGINEERING OFFICE. **Review of granular and Geotextile Filters.** GEO Publication, v. 93, n. 1, p. 1–141, 1993.

IPCC. **Carbon Dioxide Capture and Storage: Summary for Policymakers and Technical Summary.** Metz, B., Davidson, O., Coninck, H., Loos, M., Meyer, L. (Eds). IPCC Special Report. 2005.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics, SI version.** John Willey and Sons, Inc., Singapura (1969).

M. KORCANÇ; A. TUGÇRUL. **Evaluation of selected basalts from Niğde, Turkey, as source of concrete aggregate,** 2004.

MAIA, P. C. D. A. **Avaliação do comportamento geomecânico e de alterabilidade de enrocamentos.** 2001.

MILANI E.J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul ocidental.** Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, UFRGS, 1997.

MILANI E.J., MELO, J.H.G, SOUZA, P.A., FERNANDES, L.A., FRANÇA, A.B. **Bacia do Paraná.** Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v.15, n.2, p. 265-287, 2007.

MINEROPAR. Serviço Geológico do Paraná. **O Grupo Serra Geral no Estado do Paraná.** Curitiba: Mineropar, 2013.

PRESS, F. et al. **Para Entender a Terra.** Porto Alegre Bookman, 2006.

REIS, GLEICE DOS SANTOS. **A Formação Serra Geral (Cretáceo, Bacia do Paraná- como análogo para os reservatórios ígneo-básicos de margem continental brasileira.** Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2013.

RODGHER, SANDRA FABIANA. **Caracterização de agregados basálticos através da adsorção de azul de metileno,** 1996.

SILVA, ERIC MEDEIROS. **Slope stability analysis in soils of alteration of metamorphic rocks of Quadrilátero Ferrífero.** 2006. 143 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia; Saneamento ambiental) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

TAHMOORIAN, Farzaneh; et al. **Evaluation of Mechanical Properties of Recycled Material for Utilization in Asphalt Mixtures**, 2017.

VASCONCELOS, E. **Intemperismo por ação Química**. Disponível em: <https://www.logicambiental.com.br/intemperismo-quimico/>. Acesso em: 22 out. 2023.

XIAO, G. et al. **Granular bed filter**: A promising technology for hot gas clean-up. *Powder Technology*, ago. 2013.