

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ALLAN THIERRY BRANCO TORRES**

**VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DA LAMA DO BENEFICIAMENTO DE  
ROCHAS ORNAMENTAIS COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR EM  
ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND**

**GUARAPUAVA**

**2023**

**ALLAN THIERRY BRANCO TORRES**

**VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DA LAMA DO BENEFICIAMENTO DE  
ROCHAS ORNAMENTAIS COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR EM  
ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND**

**Technical and environmental feasibility of the sludge from the processing of  
ornamental stone as a supplementary cementitious material in Portland cement  
mortars**

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).  
Orientador(a): Prof. Laura Silvestro

**GUARAPUAVA**

**2023**



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

**ALLAN THIERRY BRANCO TORRES**

**VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DA LAMA DO BENEFICIAMENTO DE  
ROCHAS ORNAMENTAIS COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR EM  
ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND**

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: 21/junho/2023

---

Laura Silvestro  
Doutorado em Engenharia Civil  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Géssica Katalyne Bilcati  
Mestrado em Engenharia Civil  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Artur Spat Ruviaro  
Mestrado em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Catarina

**GUARAPUAVA**

**2023**

Dedico este trabalho à minha família, por sempre acreditar em mim e me apoiar.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço muito à minha mãe Vanusa Branco e irmã Arielly Branco, por todo o amor, carinho, incentivo e ensinamentos, que apesar da distância nunca deixaram de comparecer em minha vida.

À minha grande orientadora Laura Silvestro, que nunca poupou esforços para me guiar nesta caminhada, com muita atenção, incentivo e dedicação. Obrigado por todos os momentos, ideias, conhecimentos e contribuições para o meu desenvolvimento e o deste trabalho.

Agradeço à minha Vó Maria, que apesar de não estar mais entre nós, nunca parou de me inspirar e orientar.

Ao meu pai por sempre ter acreditado no meu potencial e arcado com os custos dos meus estudos.

A todos da minha família que sempre me apoiaram em minhas decisões e nunca deixaram de acreditar em mim.

À minha cachorra Bituca, por ter me escolhido e por me proporcionar momentos únicos.

Às minhas amigas Camila Nazzari, Mariáh Spada e Nemi por sempre terem me ajudado, mesmo de longe, nos momentos mais difíceis quando pensava em desistir, vocês nunca mediram esforços para me ajudar e me animar.

Às minhas amigas Bruna Régio, Luana Nakamurakare, Nathália Fedechen e Sarah Muraoka, que sempre me deram todo o apoio possível, ajudando a superar medos, fazer atividades, aconselhando em todas as lágrimas e sempre trazendo diversão e momentos bons que carregarei para sempre, obrigado por terem tornado essa jornada mais tranquila.

Ao pessoal da Brick Engenharia, em especial Amanda Bartolomeus, Bruna Sahaidak, Giovanna Zaramella e Thalissa Vargas, que me agregaram muitos conhecimentos, sem contar as amizades e os momentos incríveis que colecionei nesse caminho.

Agradeço à Gabriele Oliveira, Larissa Gomes, Rafaella Salvador e novamente à Laura Silvestro, por todo o auxílio nas atividades de laboratório, principalmente nos finais de semana que nos dedicamos a isso.

Ao Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Prof. Dr. Philippe Gleize pelos ensaios de difração de raios-X e granulometria para a caracterização dos materiais empregados neste trabalho.

À UTFPR por ceder os materiais e os laboratórios para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus amigos que me ajudaram a revisar e refinar este trabalho.

Por fim, agradeço a todas as pessoas novas que conheci ao longo desses incríveis anos, e que de alguma forma me ajudaram a concluir esse sonho.

## RESUMO

O processo de beneficiamento a úmido de rochas ornamentais gera um resíduo na forma de lama que após secagem se torna um pó fino não biodegradável. A sua disposição inadequada pode gerar diversos impactos ambientais negativos, sendo assim, novas destinações para o resíduo devem ser avaliadas, em busca de inovação e sustentabilidade. No Brasil essa problemática é de particular interesse visto que o país se destaca mundialmente como um dos maiores produtores de rochas ornamentais, gerando expressivas quantidades de resíduo anualmente. Dessa forma, foram analisadas argamassas com percentuais de substituição (5%, 10%, 15% e 20%) de cimento Portland (CP V ARI) por Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO) como material cimentício suplementar (MCS) nas idades de 7 e 28 dias de cura, através dos ensaios de resistência à compressão, velocidade de pulso ultrassônico (VPU), difração de raios-X, além de uma análise simplificada das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Os resultados indicaram que a substituição parcial de CP por LBRO em teores de até 20% resulta em resistências à compressão aos 28 dias estatisticamente iguais à referência, o que pode ser atribuído ao efeito sinérgico entre o resíduo e o fíler calcário presente no CP, resultando na formação de fases AFm. Ao analisar as emissões de CO<sub>2</sub> das amostras, quanto maior foi o teor de substituição, menor foram as emissões relatadas, atingindo diminuição de 61,4% ao comparar o teor de 20% com a referência.

Palavras-chave: cimento Portland, rochas ornamentais, resistência à compressão, análise de CO<sub>2</sub>

## ABSTRACT

The wet beneficiation process of ornamental stone generates a waste in the form of sludge that, after drying, becomes a non-biodegradable fine powder. Its improper disposal can lead to various negative environmental impacts. Therefore, new destinations for the waste should be evaluated in search of innovation and sustainability. In Brazil, this issue is of particular interest since the country stands out globally as one of the largest producers of ornamental stone, generating significant quantities of waste annually. Thus, mortars with replacement percentages (5%, 10%, 15%, and 20%) of Portland cement (PC) by ornamental stone beneficiation sludge (LBRO) were analyzed as supplementary cementitious material (SCM) at curing ages of 7 and 28 days. The analysis included compressive strength tests, ultrasonic pulse velocity (UPV), X-ray diffraction, as well as a simplified analysis of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions. The results indicated that the partial replacement of PC by LBRO up to 20% resulted in compressive strengths at 28 days statistically equal to the reference, which can be attributed to the synergistic effect between the waste and the limestone filler present in PC, resulting in the formation of AFm phases. When analyzing the CO<sub>2</sub> emissions of the samples, higher substitution percentages were associated with lower reported emissions, reaching a reduction of 61.4% when comparing the 20% replacement with the reference.

Keywords: Portland cement, ornamental stone, compressive strength, CO<sub>2</sub> analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1 – Fluxograma do processo a seco da fabricação de cimento Portland.</b>	
.....	<b>16</b>
<b>Figura 2 – Tear de lâmina metálica (Convencional)</b>	<b>23</b>
<b>Figura 3 – Lagoa de sedimentação</b>	<b>24</b>
<b>Quadro 1 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)</b>	
.....	<b>18</b>
<b>Quadro 2 – Evolução da produção, em toneladas, de cimento com adições minerais no Brasil</b>	<b>21</b>
<b>Quadro 3 – Quantidades de materiais para a produção das argamassas</b>	<b>32</b>



## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1 – Difratoograma da LBRO .....</b>	<b>37</b>
<b>Gráfico 2 – Distribuição do tamanho de partícula do CP e da LBRO .....</b>	<b>38</b>
<b>Gráfico 3 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo .....</b>	<b>39</b>
<b>Gráfico 4 – Resistência à compressão das argamassas aos 7 e 28 dias de hidratação .....</b>	<b>40</b>
<b>Gráfico 5 - Comparação de médias dos resultados de resistência à compressão das argamassas após (a) 7 dias e (b) 28 dias de hidratação.....</b>	<b>41</b>
<b>Gráfico 6 – Velocidade de pulso ultrassônico das argamassas aos 7 e 28 dias de hidratação .....</b>	<b>42</b>
<b>Gráfico 7 - Comparação de médias dos resultados de velocidade de pulso ultrassônico das argamassas após (a) 7 dias e (b) 28 dias de hidratação.....</b>	<b>43</b>
<b>Gráfico 8 – Relação entre resistência à compressão e a velocidade de pulso ultrassônico .....</b>	<b>44</b>
<b>Gráfico 9 - Difratoogramas das pastas de cimento Portland com diferentes teores de LBRO aos 28 dias de hidratação (E – etringita, AFm – hemicarboaluminato + monocarboaluminato, P – portlandita, Q – quartzo, A - alita).....</b>	<b>45</b>
<b>Gráfico 10 - Difratoogramas das pastas de cimento Portland com diferentes teores de LBRO aos 28 dias de hidratação no intervalo 2<math>\theta</math> entre 5 e 15° (E - etringita e AFm – hemicarboaluminato e monocarboaluminato).....</b>	<b>46</b>
<b>Gráfico 11 - Relação entre resistência à compressão e a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.....</b>	<b>48</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidades de materiais para produção das pastas de cimento ...	33
Tabela 2 – Consumo de material por m <sup>3</sup> de argamassa.....	34
Tabela 3 - Equivalência de kgCO <sub>2</sub> /kg de material utilizado .....	35
Tabela 4 – Composição química e massa específica do cimento Portland e da LBRO .....	36
Tabela 5 - Análise de variância (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão das argamassas .....	41
Tabela 6 - Análise de variância (ANOVA) dos resultados de velocidade de pulso ultrassônico das argamassas .....	43
Tabela 7 - Quantidade de kgCO <sub>2</sub> -e/m <sup>3</sup> de argamassa.....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A0	Amostra Referência
A5	Amostra com 5% de Substituição
A10	Amostra com 10% de Substituição
A15	Amostra com 15% de Substituição
A20	Amostra com 20% de Substituição
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
a/c	Relação Água Cimento
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CP	Cimento Portland
CP V ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DRX	Difração de Raios-X
FRX	Fluorescência de Raios-X
LBRO	Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais
NBR	Normas Brasileiras
MCS	Material Cimentício Suplementar
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VPU	Velocidade de Pulso Ultrassônico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Cimento Portland</b> .....	<b>16</b>
2.1.1	Processo de fabricação do Cimento Portland .....	16
2.1.2	Tipos de Cimento Portland .....	17
2.1.3	Impactos Ambientais Gerados pela Indústria Cimenteira .....	19
<b>2.2</b>	<b>Materiais Cimentícios Suplementares</b> .....	<b>19</b>
2.2.1	Adições Minerais .....	20
<u>2.2.1.1</u>	<u>Materiais Pozolânicos</u> .....	<u>21</u>
<u>2.2.1.2</u>	<u>Fíler</u> .....	<u>21</u>
<b>2.3</b>	<b>Rochas ornamentais</b> .....	<b>22</b>
2.3.1	Processo de extração .....	22
2.3.2	Beneficiamento .....	22
2.3.3	Geração de resíduos .....	23
2.3.4	Estudos com a utilização do LBRO em sistemas cimentícios .....	24
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Etapa 01 – Caracterização dos materiais</b> .....	<b>29</b>
3.1.1	Cimento Portland.....	29
3.1.2	Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO) .....	30
3.1.3	Agregado miúdo .....	30
3.1.4	Aditivo superplastificante .....	31
<b>3.2</b>	<b>Etapa 02 – Produção das argamassas e moldagem dos corpos de prova</b>	<b>31</b>
<b>3.3</b>	<b>Etapa 03 – Avaliação da resistência à compressão, velocidade de pulso ultrassônico, análise estatística e mineralogia</b> .....	<b>33</b>
<b>3.4</b>	<b>Etapa 04 – Análise ambiental simplificada</b> .....	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>36</b>
4.1	Caracterização dos materiais .....	36
4.2	Resistência à compressão das argamassas.....	39
4.3	Velocidade de pulso ultrassônico.....	42
4.4	Composição mineralógica das pastas .....	44
4.5	Análise ambiental simplificada .....	47
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>49</b>

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>
-------------------------	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

A destinação final de resíduos (ZHANG *et al.*, 2022; BATISTA, 2022), preservação do meio ambiente (ALVES; BONIFÁCIO, 2022) e desenvolvimento sustentável (SU *et al.*, 2022) são temáticas populares que, atualmente, estão recebendo grande atenção. E devido a isso, estudos sobre a viabilidade de incorporação de resíduos sólidos proveniente de outras indústrias em materiais de construção civil tem se tornado comuns (OLIVEIRA, 2015).

Como exemplo disso temos a Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO), que por se tratar de um resíduo, tem suas propriedades químicas e físicas variáveis, principalmente em função da sua origem, tipo e processo de beneficiamento empregado (ALMADA *et al.*, 2020). Nesse contexto, diversas pesquisas científicas já avaliaram a possibilidade de incorporar o resíduo do corte de granito como substituto parcial à cal (CALMON *et al.*, 1997a) e resíduo do corte de mármore, em substituição ao agregado miúdo (MOURA *et al.*, 2006) e como substituição combinada entre o agregado miúdo e o cimento (COLANGELO *et al.*, 2010). Conforme o artigo resumo de Nayak *et al.* (2022), em diversos estudos, a LBRO foi considerada adequada como substituição parcial dos agregados finos/grãos e cimento. Destacando assim que o uso da LBRO na produção de compósitos cimentícios vem apresentando resultados promissores, principalmente em substituição parcial ao cimento Portland (CP), reduzindo os efeitos nocivos da disposição inadequada do resíduo sobre o meio ambiente, assim como os custos de fabricação de concretos e argamassas e as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) associadas à produção do cimento (VINCO *et al.*, 2017).

A Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS, 2018) indicou que o Brasil está entre os 5 maiores produtores e exportadores mundiais no setor de rochas ornamentais, com produção na ordem de 10,5 milhões de toneladas no ano de 2013. Isso significa a geração de mais de milhares de toneladas/ano de rejeitos na forma de lama, considerando que em relação à quantidade de rochas produzidas, cerca de 25% a 40% de resíduo é gerado (MOURA *et al.*, 2002; BASTOS, 2013; ALYAMAÇ; TUGRUL, 2014; ALMADA *et al.*, 2020). Nesse contexto, a adequada disposição e aproveitamento desses rejeitos é uma problemática enfrentada pelo setor no país, trazendo notoriedade à abordagem

da incorporação de resíduos de outros setores na construção civil, o que pode contribuir para a redução do descarte inadequado da LBRO.

A LBRO é gerada através do corte a úmido das rochas ornamentais, que após sua secagem total, se torna um pó fino e não biodegradável (MANHÃES; HOLANDA, 2008). Este material usualmente é destinado para aterros e, se ocorrer o descarte incorreto, pode afetar as paisagens naturais e causar diversos problemas ambientais, com destaque na destinação para redes fluviais, que através do acúmulo de resíduo no fundo dos rios, afetará o curso da água, gerando risco de assoreamento e danos à fauna e à flora (BUYUKSAGIS *et al.*, 2017). Paralelamente, o processo de estocagem e o transporte de LBRO para aterros acarreta custos consideráveis para as beneficiadoras (BASTOS *et al.*, 2013).

Por esse motivo, a substituição parcial do CP pela LBRO gera menores impactos ambientais e redução de custos tanto para a indústria da construção civil quanto para as beneficiadoras do setor de rochas ornamentais. Materiais alternativos ao CP são de particular interesse, porque podem contribuir para a redução do impacto ambiental da indústria produtora de cimento. Estima-se que para a produção de 1 tonelada de clínquer Portland, são emitidos cerca de 0,815 tonelada de CO<sub>2</sub> na atmosfera (COSTA *et al.*, 2013). De acordo com dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), em 2020, a produção nacional de cimento atingiu valores na ordem de 60 milhões de toneladas (SNIC, 2020). Enquanto que em 2014 a indústria produtora de cimento foi responsável por aproximadamente 8% da emissão mundial de CO<sub>2</sub> (SCRIVENER *et al.*, 2018).

Ao fazer uma média entre a quantidade de resíduo que é gerado no processo de beneficiamento, chegamos ao valor de 32,5%, que representa 3,4 milhões de toneladas geradas por ano, e ao comparar com as 60 milhões de toneladas, é possível verificar que a quantidade de LBRO produzida é de apenas 5,67%, e ao fazer essa substituição, ocorrerá a redução da extração da matéria prima natural da produção do CP, e por consequência, as emissões de CO<sub>2</sub> dessas etapas.

Seguindo este viés, a importância do estudo da viabilidade da implementação do uso de LBRO na produção de argamassas é notória, uma vez que ajudará as beneficiadoras a dar uma destinação final correta ao seu resíduo, reduzindo impactos ambientais e custos de transporte. Paralelamente, também trará benefícios ambientais e monetários à indústria da construção civil, através da

redução do consumo de cimento, que é um material cuja produção tem elevados níveis de CO<sub>2</sub>.

Os objetivos deste trabalho foram produzir argamassas com a incorporação de LBRO, coletada em uma indústria de beneficiamento em Guarapuava – PR. Os teores de substituição avaliados foram de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% de LBRO em relação à massa de cimento, a fim de analisar sua influência mecânica e mineralógica nas argamassas. Foram analisados também a composição química do resíduo e sua granulometria. E por fim, uma análise simplificada das emissões de CO<sub>2</sub> da produção das argamassas de cimento Portland, para avaliar a viabilidade ambiental da utilização da LBRO em sua produção.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

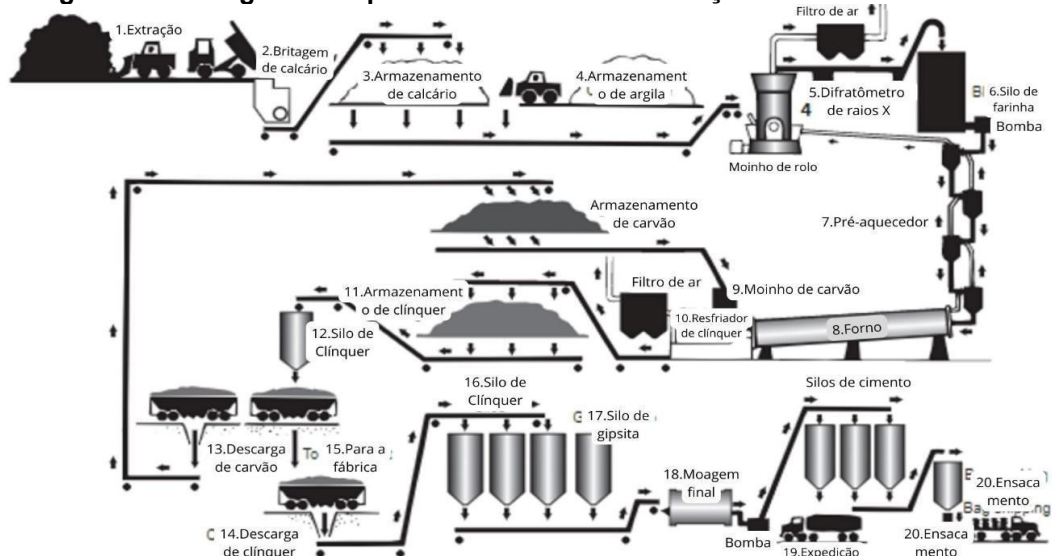
### 2.1 Cimento Portland

O cimento Portland (CP) é definido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua Norma Brasileira (NBR) 11172:1990 como um aglomerante hidráulico artificial, que corresponde a um pó fino resultado da mistura, calcinação e moagem de materiais calcários e argilosos em proporções adequadas, possuindo como característica a capacidade de endurecimento pela ação da água, e posteriormente, se tornar resistente a ela. Este material também possibilita a incorporação de outras substâncias a fim de melhorar suas propriedades e desempenho, como fibras vegetais e outros tipos de MCS (BILCATI, 2015).

#### 2.1.1 Processo de fabricação do Cimento Portland

O processo de fabricação do CP envolve resumidamente 20 etapas, conforme a Figura 1, sendo as etapas de 1 a 15 relacionadas ao processo de produção do clínquer Portland; e as etapas de 16 a 20 associadas à moagem final do clínquer para obtenção do cimento, estocagem e expedição. Esse processo pode ser feito com ou sem a utilização de água durante o resfriamento das etapas de moagem e homogeneização, sendo que o processo por via seca, utilizado no Brasil, torna a fabricação energeticamente mais eficiente. (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

**Figura 1 – Fluxograma do processo a seco da fabricação de cimento Portland.**



Fonte: Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2008 p. 206.

O principal componente do CP é o clínquer Portland, que está presente em todos os tipos de cimento e é produzido a partir da retirada da matéria prima (argila e calcário) das jazidas, comumente localizadas próximas às fábricas de cimento para facilitar seu transporte (RODRIGUES, 2018). Após este material ser homogeneizado e armazenado, é feito o processo de esmagamento e trituração, etapas onde são adicionados minério de ferro e bauxita, para que o composto alcance a composição química ideal (RODRIGUES, 2018). A partir disso, o próximo passo para a produção do clínquer são os processos de moagem, secagem e mistura, originando a farinha cru, que em seguida passa por um processo de pré aquecimento para que posteriormente seja submetida a queima em forno rotativo, atingindo uma temperatura média de 1450°C (SOARES, 2014). Esse processo de queima é responsável por cerca de 94% da emissão de CO<sub>2</sub> no meio ambiente. Deste total, a calcinação do calcário que ocorre nesse processo é responsável por 52% das emissões, enquanto o consumo de 800 Kcal/kg de combustível fóssil, corresponde ao restante (COSTA *et al.*, 2013; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Após a queima no forno rotativo, é feito rapidamente o resfriamento em um arrefecedor, a fim de minimizar a perda de energia e passar para a finalização da produção do cimento, que é a adição de sulfato de cálcio (CaSO<sub>4</sub>) na mistura, para regular o tempo de pega (RODRIGUES, 2018).

Dessa forma, podemos resumir que após passar por estes processos, o clínquer é composto por: (i) Silicato Tricálcico (C<sub>3</sub>S) que se torna importante no endurecimento e na resistência mecânica do CP nas idades de 1 a 28 dias. (ii) Silicato Dicálcico (C<sub>2</sub>S) que tem sua importância nas idades avançadas de mais de 28 dias devido a sua hidratação mais tardia. (iii) Aluminato Tricálcico (C<sub>3</sub>A) que é o constituinte de maior reatividade do clínquer, se tornando responsável pela pega e pela falsa pega. (iv) Ferro-Aluminato Tetracálcico (C<sub>4</sub>AF) elemento estável que contribui no equilíbrio da composição química. (v) Gipsita (CSH<sub>4</sub>) que retarda o tempo de pega do cimento (RODRIGUES, 2018).

### 2.1.2 Tipos de Cimento Portland

De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), o mercado nacional abrange oito tipos de CP, conforme apresentado no Quadro 1. Cada tipo de cimento possui características especiais dependendo da reatividade relativa dos produtos de hidratação dos compostos individual, como resistência moderada a sulfato e alta

resistência inicial. Além disso, como pode ser observado, percentuais de substituição de CP por materiais cimentícios suplementares (MCS) de até 75% são estabelecidos pela norma. Entretanto, de acordo com Scrivener *et al.* (2018), a disponibilidade de cinza volante em todo o mundo é de 30% em relação à quantidade de cimento produzida, enquanto a quantidade de escória é de apenas 5 a 10%. Diante deste limitante associado à disponibilidade destes MCS, novos materiais precisam ser avaliados e incorporados para a produção de cimentos.

**Quadro 1 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)**

Designação normalizada		Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Materia I carbonático
Cimento Portland comum		CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 - 100	0 - 5		
		CP I-S			90 - 94	0	0	6 - 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno		CP II-E			51 - 94	6 - 34	0	0 - 15
Cimento Portland composto com material pozolânico		CP II-Z			71 - 94	0	6 - 14	0 - 15
Cimento Portland composto com material carbonático		CP II-F			75 - 89	0	0	11 - 25
Cimento Portland de alto forno		CP III			25 - 65	35 - 75	0	0 - 10
Cimento Portland pozolânico		CP IV			45 - 85	0	15 - 50	0 - 10
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V <sup>a</sup>	ARI		90 - 100	0	0	0 - 10
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40		75 - 100	-	-	0 - 25
	Não estrutural		-	-	50 - 74	-	-	26 - 50

<sup>a</sup> No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfato (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

Fonte: ABNT, NBR 16697 (2018).

### 2.1.3 Impactos Ambientais Gerados pela Indústria Cimenteira

A fabricação de cimento é responsável por 88,6% a 92,2% das emissões de CO<sub>2</sub> do processo de produção do concreto, sendo que a maior parte dessas emissões, se dá até a finalização do desenvolvimento do clínquer (LIMA, 2010). A produção de uma tonelada de clínquer no Brasil, ocasiona a emissão de uma média de 866 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento. 40% deste valor é proveniente da queima de combustíveis fósseis para gerar energia, já o restante advém da decomposição do carbonato de cálcio durante a calcinação das matérias primas (ABRÃO, 2019; COSTA *et al.*, 2013).

Segundo estudos de Abrão (2019), entre os anos de 2005 a 2015, houve um aumento crescente na produção de cimento utilizando MCS, e o índice de liberação de CO<sub>2</sub> manteve-se com um desvio padrão baixo, indicando que um maior teor de substituição do aglomerante está associado com um menor índice de liberação do gás. Sendo assim, uma estratégia para auxiliar na mitigação da emissão de CO<sub>2</sub> é a substituição do cimento por MCS, levando em conta o grande número de pesquisas desenvolvidas nesse assunto, é possível alcançar substituição de até 40% cimento para misturas, fazendo com que a capacidade de mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>, da indústria cimenteira, para o ano de 2050 seja maior do que 10% (ABRÃO, 2019).

## 2.2 Materiais Cimentícios Suplementares

Materiais Cimentícios Suplementares, ou também conhecidos como Adições Minererais, podem ter origem natural, através de erupções vulcânicas ou argila calcinada, ou origem artificial, como subprodutos industriais que iriam para descarte, tendo como exemplo a Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO) (MARTINS, 2018; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), é possível agrupar os aditivos e adições em três categorias: i) Substâncias químicas tensoativas; ii) Substâncias químicas modificadoras de pega; iii) Adições minerais. Nesse contexto, como o foco do trabalho é avaliar a viabilidade de utilização de LBRO como MCS, nos subitens a seguir, o enfoque será justamente neste tópico.

### 2.2.1 Adições Minerais

Há vários anos as adições minerais vêm sendo utilizadas em cimentos, e estudos sobre o aumento de resistência a compressão do concreto, modificação de trabalhabilidade, redução de custo de produção e até destinação correta para resíduos industriais vem sendo feitas por diversos pesquisadores (RAISDORFER, 2015).

Adições minerais são materiais silicosos e carbonáticos moídos, com características cimentantes, pozolânicas e de efeito fíler (não reativas), com capacidade especial de interagir química e fisicamente com produtos da hidratação do clínquer e do CP, modificando a microestrutura da pasta (MEHTA e MONTEIRO, 2008; DAL MOLIN, 2011; SILVA; BATTAGIN; GOMES, 2017).

Segundo Dal Molin (2011), as adições minerais podem ser divididas em três grupos: (i) materiais pozolânicos, que são materiais silicosos ou silicoaluminosos processados para a produção de uma pozolana, usualmente esse processo abrange britagem, moagem e peneiramento, podendo também haver a necessidade de ativação térmica, como por exemplo cinza volante com baixo teor de cálcio e cinza de casca de arroz; (ii) materiais cimentantes, caracterizados por não precisar do hidróxido de cálcio, produto de hidratação do cimento Portland, para formar materiais cimentantes, tendo como exemplo a escória granulada de alto-forno; (iii) já o fíler, é conhecido por ser uma adição mineral finamente dividida e não possuir atividade química, agregando o efeito físico de empacotamento granulométrico e criando pontos de nucleação para que ocorra a hidratação dos grãos de cimento, tendo como exemplo pó de pedra e pó de quartzo.

Considerando toda a produção brasileira de cimento dos anos de 2009 a 2014, como apresentado no Quadro 2, é possível notar que com o passar do tempo, verifica-se um aumento expressivo na utilização de adições minerais, sugerindo que este teor de substituição seja mantido ou aumentado (RODRIGUES, 2018).

**Quadro 2 – Evolução da produção, em toneladas, de cimento com adições minerais no Brasil**

<b>Ano</b>	<b>Cimento</b>	<b>Clínquer</b>	<b>Cinzas volantes e pozolanas</b>	<b>Escória de alto-forno</b>
2009	44.449.701	28.303.477	-	-
2010	45.271.790	31.426.412	-	-
2011	49.072.518	33.387.807	202.174	-
2012	52.621.466	34.893.011	141.925	177.731
2013	54.329.309	36.451.887	229.319	247.729
2014	53.341.235	35.842.816	414.884	308.065

**Fonte: WBCSD, 2016.**

### 2.2.1.1 Materiais Pozolânicos

Materiais pozolânicos podem ser classificadas em três grupos: pozolana natural, que passa apenas pela moagem para apresentar atividade pozolânica, sem necessitar de nenhum tipo de tratamento prévio, por exemplo rochas piroclásticas (SNELLINGS *et al.*, 2012); já as pozolanas artificiais ou naturais processadas necessitam de tratamento externo para possuir atividade pozolânica, sendo resíduos industriais ou subprodutos de atividades térmicas que sofreram resfriamento abrupto (ABRÃO, 2019).

No ano de 2013, 30% da produção total de cimento no Brasil foi utilizando materiais pozolânicos como constituinte, representando cerca de 21 milhões de toneladas, e deste total, 60% do material empregado corresponde à pozolanas artificiais, já o restante pode ser atribuído à pozolanas naturais e naturais processadas (ABRÃO, 2019).

### 2.2.1.2 Fíler

Martins (2018) define fíler como um elemento constituído de partículas minerais oriundo de agregados miúdos ou grãos que são aplicados em misturas de CP, massa asfáltica, e outros compostos.

Essas aplicações, principalmente no CP, se devem ao diâmetro da partícula de fíler ser próxima a do cimento, fazendo com que a ação física traga melhorias nas propriedades de trabalhabilidade, massa específica, permeabilidade, exsudação e a tendência à fissuração do concreto em porcentagens menores que 15% com relação a massa de cimento (SILVA, 2010).

Conforme os estudos de Melo (2016), a ação física da adição de fíler consiste no preenchimento de vazios por suas partículas, gerando o aumento da densidade

do concreto, por apresentar um grande módulo de finura. E também a redução ou eliminação de acúmulo de água sob os agregados graúdos.

### **2.3 Rochas ornamentais**

A NBR 15012 (ABNT, 2013) define as rochas ornamentais como material pétreo natural, extraídos de jazidas na forma de blocos ou pedras e submetidos a diferentes tipos de beneficiamento. Esses materiais rochosos possuem características de alta durabilidade e resistência, que em conjunto com uma boa aparência estética, acabam sendo utilizados como materiais de acabamento e trabalhos artísticos (FRASCÁ, 2010; MELO, 2016). No ano de 2008, o Brasil atingiu a ordem de 7,8 milhões de toneladas de rochas ornamentais produzidas e exportadas, classificando o país como um dos 5° maiores desse ramo (BRASIL, 2009).

#### **2.3.1 Processo de extração**

O processo de produção das rochas ornamentais é iniciado pela pesquisa e definição das jazidas de extração do material em forma de blocos (BASTOS *et al.*, 2013; MELO, 2016). Nessa etapa, os blocos são cortados em formatos retangulares de volume variados entre 5 a 10m<sup>3</sup> gerando o resíduo de lavra, que são pedaços sem aproveitamento ou rochas fissuradas, então é feito o transporte do material que possui utilização para as beneficiadoras (BASTOS *et al.*, 2013).

#### **2.3.2 Beneficiamento**

Após a chegada dos blocos nas beneficiadoras, chamadas de marmorarias, inicia-se o processo de beneficiamento (MELO, 2016). Esse processo faz referência ao desdobramento dos blocos, onde eles são cortados através da serragem em chapas, utilizando equipamentos denominados teares, que podem ser convencionais (Figura 2) ou multi-fios diamantados, de várias dimensões (BASTOS, 2013; RODRIGUES, 2018). Nesta etapa, acontecem o polimento, o corte e o acabamento final das peças, que variam de acordo com a finalidade do uso (MELO, 2016).

Os teares convencionais cortam o bloco utilizando lâminas metálicas com o auxílio da lama abrasiva, que é uma mistura de água, pó de rocha e granalha de ferro, que acaba sendo lançada no bloco na hora do corte para resfriar, lubrificar e

reduzir a oxidação da lâmina, além de servir também para facilitar o corte da peça (BASTOS, 2013). Por ser um processo úmido, é gerado uma lama residual, chamada de Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO), objeto de pesquisa neste trabalho.

**Figura 2 – Tear de lâmina metálica (Convencional)**



**Fonte: Rodrigues, 2016.**

Por outro lado, o corte utilizando multi-fios utiliza apenas lâminas ou fios diamantados, tornando o uso da granalha de aço dispensável, mas ainda utilizando água para resfriar e lubrificar os fios (RODRIGUES, 2018; BASTOS, 2013).

Nos dois casos a lama gerada é filtrada, possibilitando reutilizar a água, e posteriormente, o resíduo é transportado para lagoas, tanques de sedimentação e aterros (BASTOS, 2013).

### 2.3.3 Geração de resíduos

Os ambientalistas costumam considerar as marmorarias como fonte de contaminação e poluição ao meio ambiente, uma vez que o volume de resíduo gerado é grande e o descarte acontece de maneira, em muitos casos, inadequado no ecossistema (REIS, 2008). Os resíduos gerados pelo processo de fabricação das rochas ornamentais existem desde as etapas de extração nas jazidas, até o beneficiamento final nas marmorarias (MELO, 2016). E durante a etapa de desdobramento do bloco em chapa, pelo tear convencional, cerca de 25% a 40% do volume do bloco se torna pó, sem contar a lavra que ficou no local da extração



(MOURA; GONÇALVES; LEITE, 2002; BASTOS, 2013; ALYAMAC; TUGRUL, 2014; ALMADA *et al.*, 2020).

As beneficiadoras, localizadas em centros urbanos, muitas vezes retêm este resíduo em forma de lama em lagoas de sedimentação (Figura 3), para que depois de secos, sejam retirados e descartados em caçambas para depois serem transportadas para aterros, acarretando em custos de armazenamento e poluição ambiental (MELO, 2016; BASTOS, 2013).

**Figura 3 – Lagoa de sedimentação**



**Fonte: Autoria própria, 2022.**

#### 2.3.4 Estudos com a utilização do LBRO em sistemas cimentícios

Existem trabalhos atuais que trazem pesquisas utilizando este resíduo, devido ao grande desenvolvimento desse setor, e a maioria é com a finalidade de encontrar um destino para a LBRO, a fim de buscar sustentabilidade e melhora nas propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios (DANISH *et al.*, 2021).

CALMON *et al.* (1997a) realizaram um dos primeiros estudos brasileiros na produção de argamassas de assentamento, utilizando como amostragem apenas blocos de granito de uma marmoraria. Eles caracterizaram as amostras através de

ensaios químicos, físicos e morfológicos. Foi feita a substituição da cal contida em dois traços (1:2:8 e 1:1:6 – cimento:cal:areia) por 25%, 50%, 75% e 100% do resíduo. Analisando os resultados nos estados frescos e endurecidos, foi visto um grande potencial de utilização do resíduo para argamassas de assentamento.

CRUZ *et al.* (2003) estudaram a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de argamassas com porcentagens de 5%, 10%, 15% e 20% do resíduo em substituição ao agregado miúdo, utilizando traço de 1:3 (cimento:areia) em massa. Analisando os resultados da resistência à compressão axial foi notado um ganho significativo de resistência nas idades de 7 até 28 dias, e os melhores resultados foram encontrados em duas amostragens com 15% e 20%. Já no módulo de elasticidade houve aumento quando comparado com a argamassa de referência até a substituição de 15% do resíduo, o que é um indicativo de ganho de resistência à compressão, e após isso, houve redução dos valores.

COLANGELO *et al.* (2010) avaliaram argamassas com substituição parcial do cimento e do agregado miúdo por resíduo de mármore, utilizando 10%, 20% e 30% em relação a areia e 10%, 15% e 20% em relação ao cimento. Eles analisaram a resistência à compressão e a trabalhabilidade das misturas, e concluíram que em substituição do agregado existiu melhora na maioria das porcentagens analisadas e nas duas propriedades avaliadas, com exceção dos teores acima de 10% em substituição da massa de cimento, que mostraram valores de resistência à compressão em decréscimo quando comparados com a argamassa de referência.

ULIANA *et al.* (2014) realizaram o tratamento térmico da LBRO tendo como objetivo a produção de um material pozolânico. Foi feita a caracterização do resíduo e então a moagem para produção de material vítreo. A substituição foi feita no volume de cimento de 5%, 10%, 15% e 20% para cada resíduo tratado (com e sem granalha) e também nos teores de 5% e 15% para os resíduos sem tratamento térmico (com e sem granalha). As análises verificaram a atividade pozolânica, com incrementos na resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico, sendo esses resultados todos promissores, uma vez que o material apresentou pozolanicidade.

VINCO *et al.* (2017) pesquisaram sobre as propriedades nos estados fresco e endurecido, para argamassas de revestimento feitas com a incorporação de LBRO sem nenhum tipo de tratamento. Os teores analisados de LBRO em relação ao volume de cimento foram de 50%, 100% e 150%. Pelos dados dos ensaios feitos

com a argamassa no estado fresco, perceberam uma melhoria nas propriedades de retenção de água e de consistência. Já no estado endurecido, obtiveram resultados com tendência de crescimento nas resistências à compressão e tração.

RODRIGUES (2018) investigou como o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais com tratamento térmico pode influenciar, ao ser incorporado na etapa final de moagem do clínquer na produção de um cimento Portland composto com pozolana. O autor avaliou diferentes teores (6%, 10% e 14%) de substituição, que foram analisados estatisticamente nas idades de 3, 7, 28, 91 e 120 dias. Os resultados obtidos indicaram que até 28 dias a utilização do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais apresentou valores dentro das exigências normativas. O autor reportou também que os cimentos compostos obtiveram um aumento na resistência à compressão, comparado a uma de suas amostras de referência, chegando a 32% de aumento aos 3 dias, 49% de aumento aos 7 dias, 42% de aumento aos 28 dias para o teor de 6%, 27% de aumento aos 91 dias e 25% de aumento aos 120 dias para o teor de 14%.

SILVA (2019) desenvolveu uma argamassa para revestimento utilizando a substituição parcial de areia natural pelo resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais. No ensaio de absorção de água por capilaridade, analisou que a argamassa de referência em substituição até 20% da areia pelo resíduo obteve propriedades semelhantes. Enquanto na proporção de 10% na composição da argamassa reduziu a absorção de água. Já a resistência à compressão obteve aumento no 21º dia de cura na substituição de 10% da areia.

ALMADA *et al.* (2020) estudaram a influência da heterogeneidade da LBRO coletada em três unidades de beneficiamento e em épocas do ano diferentes (fevereiro e setembro). Fizeram análises quanto ao desempenho mecânico e durabilidade de compósitos de CP compostos por 20% da lama seca e peneirada (75 µm) em substituição à massa de cimento, mantendo uma relação de 1:3 (cimento+resíduo:areia) e 0,48 (água:cimento+resíduo). A LBRO de todas as coletas foram caracterizadas e obtiveram minerais principais semelhantes, mas composições químicas diferentes, principalmente entre diferentes empresas, devido ao tipo de rocha beneficiada. Após os ensaios, os autores concluíram que a heterogeneidade dos resíduos não afetou de maneira significativa as propriedades que foram analisadas, trazendo resultados semelhantes entre todas as amostras, sendo que todos os corpos de prova atingiram resistência à compressão acima de

40 MPa na idade de 28 dias. Por fim, os autores apontaram que o uso de aditivos superplastificantes poderiam melhorar os resultados.

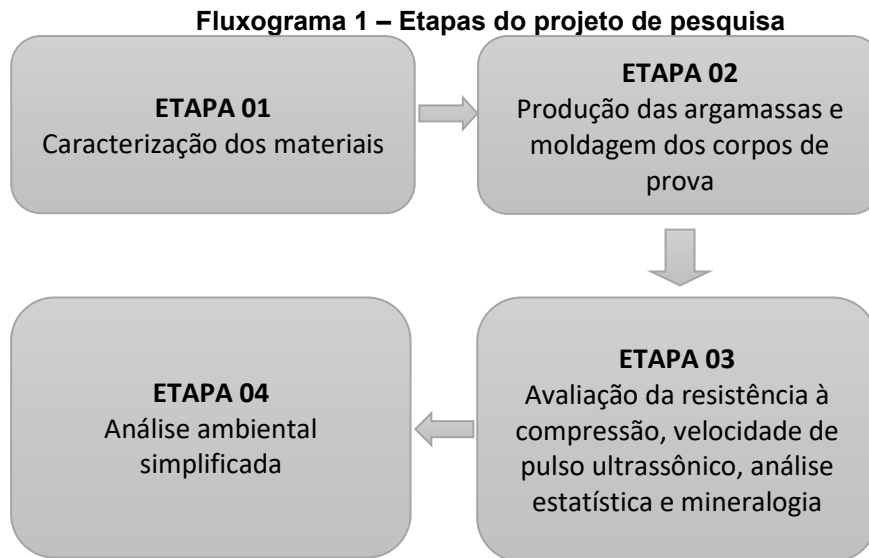
TANGARAMVONG *et al.* (2021) investigaram a influência dos resíduos de partículas de granito industrial, nas propriedades no estado fresco e no desempenho mecânico, empregados como substitutos parciais de agregado miúdo nas proporções de 20%, 30% e 50% para a produção de concreto de baixa (20 MPa) e alta (50 MPa) resistência na idade de 28 dias. Após análises, concluíram que (i) o slump test de ambos os concretos diminuiram conforme a incorporação do resíduo, e o tempo de pega para o concreto de alta resistência diminuiu apenas na substituição de 50%, enquanto para o concreto de baixa resistência nenhuma variação foi encontrada, (ii) a resistência à compressão de todas as amostras foram próximas à do concreto convencional, mas a resistência à tração diminuiu com o incremento do resíduo, principalmente para o concreto de baixa resistência.

NAYAK *et al.* (2022) fizeram uma revisão de mais de 100 trabalhos científicos sobre a utilização de resíduo de pó de mármore e granito em substituições parciais de agregados finos e graúdos, cimentos e produtos cimentícios, cargas particuladas em polímeros, e também carga secundária em vidro-poliéster multicamadas. Os autores concluíram (i) que existem poucos estudos sobre as aplicações em compósitos funcionais a base de polímeros, (ii) os resíduos de pó de mármore e granito foram considerados adequados para utilização como substitutos parciais de cimento e agregados finos/graúdos, salientando que as propriedades físicas, térmicas e mecânicas do concreto com a substituição foram afetadas positivamente e os custos de produção foram reduzidos, (iii) a reutilização dos resíduos de mármore e granito é vantajosa para o meio ambiente e para a saúde humana, uma vez que reduz a emissão de gases tóxicos, (iv) a substituição de 10% em massa como substituto parcial do cimento foi relatada como a ótima para as melhores propriedades da argamassa e do concreto, e que a necessidade de água foi reduzida, (v) a taxa de substituição de agregados finos pelos resíduos, no concreto, é limitada a 20%, sendo que a partir disso houve queda nos valores de resistência à compressão, resistência à tração e resistência à flexão, (vi) o resíduo do pó de mármore pode ser utilizado como enchimento funcional em compósitos de vidro-poliéster, produzindo resultados promissores no que diz respeito à maior resistência ao desgaste em um deslizamento seco.

Diante da conjuntura previamente exposta, verifica-se que existe um grande potencial para utilização da LBRO como MCS em matrizes cimentícias. Contudo, como as propriedades físicas e químicas destes resíduos são variáveis, estudos que avaliam a viabilidade técnica de utilização de resíduos gerados localmente são de particular interesse.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico será apresentada a descrição dos materiais e métodos utilizados e as etapas da pesquisa, conforme o Fluxograma 1.



Fonte: Autoria própria (2022).

#### 3.1 Etapa 01 – Caracterização dos materiais

Neste subitem serão apresentados os métodos de caracterização dos materiais utilizados na pesquisa, sendo eles: cimento Portland (CP), lama do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO), agregado miúdo e aditivo superplastificante.

##### 3.1.1 Cimento Portland

Um cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI) foi utilizado na pesquisa. Este tipo de cimento foi adotado em função do menor percentual de adições em relação aos demais tipos de cimentos disponíveis comercialmente. O cimento foi caracterizado através dos ensaios de (i) granulometria a laser para determinação da distribuição do tamanho de partícula, (ii) fluorescência de raios-X (FRX) para determinação do percentual de óxidos em sua composição e (iii) massa específica, seguindo os procedimentos da NBR 16605 (ABNT, 2017). A distribuição granulométrica do CP foi realizada no equipamento S3500 (Microtrac), que opera por via seca e possui intervalo de detecção entre 0,1 – 3500  $\mu\text{m}$ . O ensaio de FRX

foi realizado em um espectrômetro EDX-700 (Schimadzu). A determinação da perda ao fogo do cimento foi realizada de acordo com a NBR 18 (ABNT, 2012).

### 3.1.2 Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO)

Foi feita a coleta da lama resultante do beneficiamento de rochas ornamentais em uma Marmoraria localizada na cidade de Guarapuava – PR. Foram coletados aproximadamente 60 kg do resíduo do processo de beneficiamento da máquina com tear de lâmina metálica antes do transporte para a lagoa de sedimentação. De acordo com a literatura, nesta etapa, o material possuía um teor de umidade de aproximadamente 30% (ULIANA *et al.*, 2014; DIETRICH *et al.*, 2017).

Após a coleta, o material foi submetido à secagem em estufa na temperatura de  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 24 horas.

Posteriormente, o material passou pelo peneirador com peneira de malha 53  $\mu\text{m}$ , fundo coletor e tampa para fazer o peneiramento de aproximadamente 2000 g do resíduo, utilizando a vibração máxima do aparelho durante um período de 185 minutos. Esse diâmetro de abertura da peneira foi escolhido por poder proporcionar granulometria semelhante à do CP.

Por fim, o material passado pela peneira foi armazenado em sacos plásticos até a data de preparação das argamassas. Para a caracterização da LBRO, foram realizados os ensaios de (i) granulometria a laser, (ii) fluorescência de raios-X (FRX), (iii) perda ao fogo, (iv) difração de raio-X (DRX) e (v) massa específica. Os ensaios de caracterização foram realizados de acordo com as condições e utilizando os equipamentos descritos anteriormente no item 3.1.1. O ensaio de DRX foi realizado em um difratômetro Miniflex (Rigaku), operando com 30 kV/15 mA, radiação de  $\text{CuK}\alpha$ , com intervalo de análise de  $3\text{-}70^\circ 2\Theta$  e passo de  $0.05^\circ 2\Theta$ . A identificação das fases cristalinas da amostra foi realizada no software HighScore Plus utilizando a base de dados ICDD (*International Centre for Diffraction Data*).

### 3.1.3 Agregado miúdo

Como agregado miúdo foi utilizada uma areia natural. O agregado miúdo foi caracterizado através dos ensaios de (i) densidade e absorção de água, seguindo os procedimentos da NBR 16916 (ABNT, 2021), (ii) composição granulométrica,

seguindo os procedimentos da NBR 17054 (ABNT, 2022) e (iii) massa específica seguindo a NBR 9776 (ABNT, 1987).

#### 3.1.4 Aditivo superplastificante

Nesta pesquisa foi utilizado um aditivo redutor de água tipo 2 - RA2 (superplastificante poliéter carboxilato de pega normal) de alto desempenho, baseado na tecnologia de polímeros da marca MC, PowerFlow 4000. O teor de aditivo foi definido experimentalmente para que todas as argamassas apresentassem um índice de consistência fixado em  $260 \pm 10$  mm no ensaio do Flow Table, realizado de acordo com o procedimento descrito na NBR 13276 (ABNT, 2016).

### 3.2 Etapa 02 – Produção das argamassas e moldagem dos corpos de prova

Neste subitem serão apresentados os métodos de produção das argamassas com substituição e seu processo de moldagem.

Foram produzidas argamassas compostas de uma parte de aglomerante e três de agregado miúdo, em massa, e com relação de água/cimento (a/c) de 0,48, seguindo as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 2019).

O desenvolvimento das argamassas iniciou com a separação e pesagem dos aglomerantes (cimento + LBRO), agregado miúdo, aditivo e da porção de água, com as quantidades em massa de acordo com o Quadro 3. Os teores de substituição da LBRO avaliados foram de 5%, 10%, 15% e 20%, tendo como parâmetro comparativo a argamassa de referência (A0), com 0% de substituição.



**Quadro 3 – Quantidades de materiais para a produção das argamassas**

Amostra	Teor de substituição	Massa (g)					Quantidade de corpos de prova produzidos por idade
		Cimento CP - V	LBRO	Areia	Água	Aditivo <sup>a</sup> (%)	
A0	0%	624,00	0,00	1872,0	300,0	0,40	5
A5	5%	592,80	31,20			0,38	5
A10	10%	561,60	62,40			0,30	5
A15	15%	530,40	93,60			0,25	5
A20	20%	499,20	124,80			0,29	5

<sup>a</sup>Teor em relação à massa de aglomerante (cimento + LBRO)

**Fonte: Autoria própria, 2023.**

Após a pesagem e separação dos insumos, foi feita a limpeza e lubrificação dos moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, com a finalidade de facilitar o desmolde dos corpos de prova.

Posterior à separação e preparação dos materiais, ocorreu o procedimento de mistura das argamassas, todas respeitando os tempos da NBR 7215 (ABNT, 2019). Para isto, foi utilizado um misturador mecânico.

Então, as argamassas foram transferidas para os moldes para a preparação de 5 corpos de prova para cada teor de substituição, seguindo os procedimentos da NBR 7215 (ABNT, 2019). Os corpos de prova foram conservados em temperatura ambiente para cura inicial de 24 horas. Após este tempo, ocorreu o desmolde dos corpos de prova, que posteriormente foram submersos em água saturada com cal até a data de ruptura. Nessa data, os corpos de prova foram retirados da água e retificados.

Também foram preparadas pastas de forma manual seguindo as mesmas proporções das argamassas, mas sem a utilização de aditivo ou agregado miúdo, quantidades expressas na Tabela 1, para posterior análise de DRX.

**Tabela 1 – Quantidades de materiais para produção das pastas de cimento**

Amostra	Cimento (g)	LBRO (g)	Água (g)
A0	100,0	0,0	48,0
A5	95,0	5,0	48,0
A10	90,0	10,0	48,0
A15	85,0	15,0	48,0
A20	80,0	20,0	48,0

Fonte: Autoria própria, 2023.

### **3.3 Etapa 03 – Avaliação da resistência à compressão, velocidade de pulso ultrassônico, análise estatística e mineralogia**

Neste subitem serão apresentados os métodos de ensaios realizados nos corpos de prova.

A velocidade de pulso ultrassônico (VPU), analisada nas idades de 7 e 28 dias, foi determinada para fornecer um indicativo da porosidade das argamassas. Um equipamento da marca ZBL e modelo U5100 foi utilizado para determinar a VPU, seguindo o procedimento adotado pela NBR 15630 (ABNT, 2009). Inicialmente, foi inserido no equipamento a altura dos corpos de prova (100 mm), e posteriormente os transdutores foram acoplados em suas extremidades e a velocidade de propagação, expressa em Km/s, foi determinada.

Para a análise da resistência à compressão, os corpos de prova retificados foram submetidos a uma máquina universal de ensaios, da marca EMIC modelo DL30000. O ensaio, realizado de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019) foi conduzido nas idades de 7 e 28 dias, e a carga aplicada foi de 0,45 MPa/s, até a ruptura do corpo de prova.

Os resultados dos ensaios de velocidade de pulso ultrassônico e resistência à compressão também foram avaliados estatisticamente através do software Origin, onde foi utilizada uma metodologia estatística de análise de variância (ANOVA), que busca uma análise mais profunda da interação entre os parâmetros avaliados. O nível de significância adotado para a análise foi de 5%, induzindo o intervalo de confiança de 95%. E como resultado da análise, o software gera um parâmetro p, que se for menor que 0,05, significa que a variante analisada influencia significativamente no resultado, do contrário, a variável não exerce influência

significativa. Para as duas análises, as variáveis controláveis foram: teor de substituição de cimento pela LBRO e idade de ensaio. E posteriormente à análise estatística foi feita a comparação entre as médias, através do teste de Tukey.

A composição mineralógica das pastas de cimento Portland foi avaliada na idades de 28 dias, através do ensaio de DRX e com as mesmas condições e equipamentos descritos anteriormente no item 3.1.2. Inicialmente, as pastas foram moídas manualmente utilizando almofariz e pistilo e peneiradas em peneira com abertura de 53  $\mu\text{m}$ . Posteriormente, as reações de hidratação do cimento foram interrompidas através da técnica de troca de solvente utilizando álcool isopropílico. As amostras permaneceram imersas em álcool isopropílico por aproximadamente 30 minutos e, posteriormente, filtradas e secas em estufa a 40 °C por 24 horas. Este procedimento foi adaptado do estudo de Snellings *et al.* (2018).

### 3.4 Etapa 04 – Análise ambiental simplificada

A análise ambiental simplificada avaliou as emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) das argamassas produzidas. O procedimento adotado teve como base os trabalhos de Ruviano *et al.* (2021) e Scolaro *et al.* (2022). Utilizando a massa específica de cada material, foi feita a estimativa do consumo de material por  $\text{m}^3$  de argamassa produzida, quantidades expressas na Tabela 2, e em seguida multiplicado cada quantidade por sua respectiva emissão de  $\text{CO}_2$ .

**Tabela 2 – Consumo de material por  $\text{m}^3$  de argamassa**

Amostra	CP (kg)	LBRO (kg)	Areia (kg)	Água (kg)
A0	531,43	0	1594,29	255,09
A5	504,86	25,63	1594,29	255,09
A10	454,37	51,26	1594,29	255,09
A15	386,22	76,89	1594,29	255,09
A20	308,97	102,51	1594,29	255,09

**Fonte: Aatoria própria, 2023.**

O valor de emissão adotado para o CP, tendo como base a Declaração Ambiental de Produto do CP V ARI (VOTORANTIN, 2016), foi de 0,892  $\text{kgCO}_2/\text{kg}$  de aglomerante utilizado. Com base nos trabalhos de Ruviano *et al.* (2022) e Sukontasukkul (2009), foi adotado o valor de emissão de 0,0046  $\text{kgCO}_2/\text{kg}$  de agregado miúdo na mistura. Já a emissão da água é muito baixa e, portanto, foi

desconsiderada na estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> (MADDALENA *et al.*, 2018; REFFOLD *et al.*, 2008). Para a LBRO, foi utilizado a equivalência de 0,123 kgCO<sub>2</sub>/kg de resíduo, que corresponde ao processo de secagem, que advém do valor médio de secagem na estufa, onde 1 kWh utilizado está associado com a emissão de 0,135 kg de CO<sub>2</sub> (MATOS *et al.*, 2019a), e foram utilizados 0,9143 kWh/kg do material. A quantidade de kWh/kg do material foi obtida a partir da multiplicação da potência da estufa (1,2 kW) pelo tempo por ciclo da estufa (24 horas), e logo em seguida dividido pela quantidade de resíduo que estava na estufa (descontando a umidade inicial de 30%). Na Tabela 3 é possível conferir um resumo da quantidade de kgCO<sub>2</sub>/kg de material utilizado.

**Tabela 3 - Equivalência de kgCO<sub>2</sub>/kg de material utilizado**

Material	kgCO <sub>2</sub> /kg de material
CP	0,8920
LBRO	0,1234
Água	0,0000
Areia	0,0046

**Fonte: Autoria própria, 2023.**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização dos materiais

A composição química do CP e da LBRO estão apresentados na Tabela 4. Como pode ser observado, a LBRO apresentou uma perda ao fogo de aproximadamente 43,0% e é composta predominantemente por SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Essa composição está de acordo com os valores reportados no levantamento feito por Nayak *et al.* (2022), que engloba a composição química de resíduos de granito de diversos trabalhos publicados na literatura sobre o tema. Contudo, é importante destacar que a composição química da LBRO é bastante variável, visto que está associada ao tipo de rocha beneficiada. Nesse contexto, a NBR 12653 (ABNT, 2015) estabelece que os materiais pozolânicos da Classe E devem apresentar soma dos óxidos SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≥ 50% e perda ao fogo ≤ 6,0 %. Diante disso, embora o resíduo em análise não atenda esses requisitos no que tange à pozolanidade, salienta-se que o mesmo pode apresentar um efeito sinérgico com o filer calcário presente no cimento Portland comercial, como será discutido posteriormente na seção 4.4.

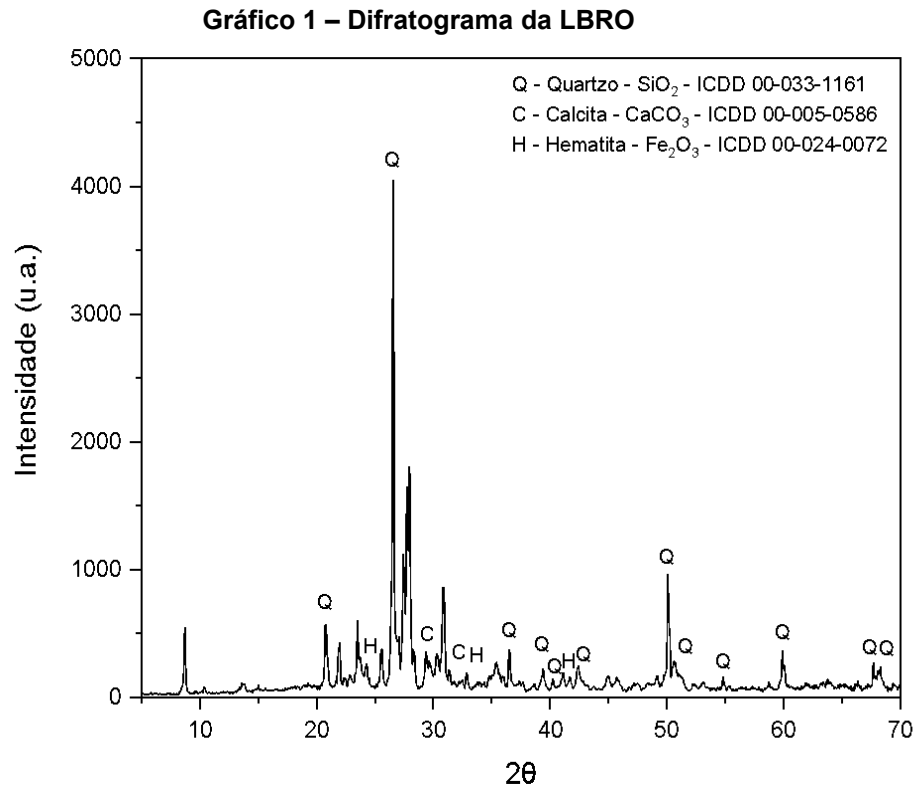
**Tabela 4 – Composição química e massa específica do cimento Portland e da LBRO**

Propriedades	CP	LBRO
<i>Composição química (%)</i>		
SiO <sub>2</sub>	31,88	37,40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,27	8,84
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,23	2,59
CaO	47,25	5,36
SO <sub>3</sub>	2,92	0,08
K <sub>2</sub> O	1,91	2,29
TiO <sub>2</sub>	0,63	0,74
MnO	0,11	0,04
Perda ao fogo	4,80	42,47
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,09	2,99

**Fonte: Autoria própria, 2023.**

O difratograma da LBRO é apresentado no Gráfico 1. A identificação dos picos cristalinos foi realizada através do software HighScore Plus, indicando a presença das seguintes fases mineralógicas: quartzo, calcita e hematita. Como pode ser observado, no geral, o resíduo apresenta-se predominantemente cristalino, com um pequeno halo amorfo. Isso pode indicar que o material analisado é

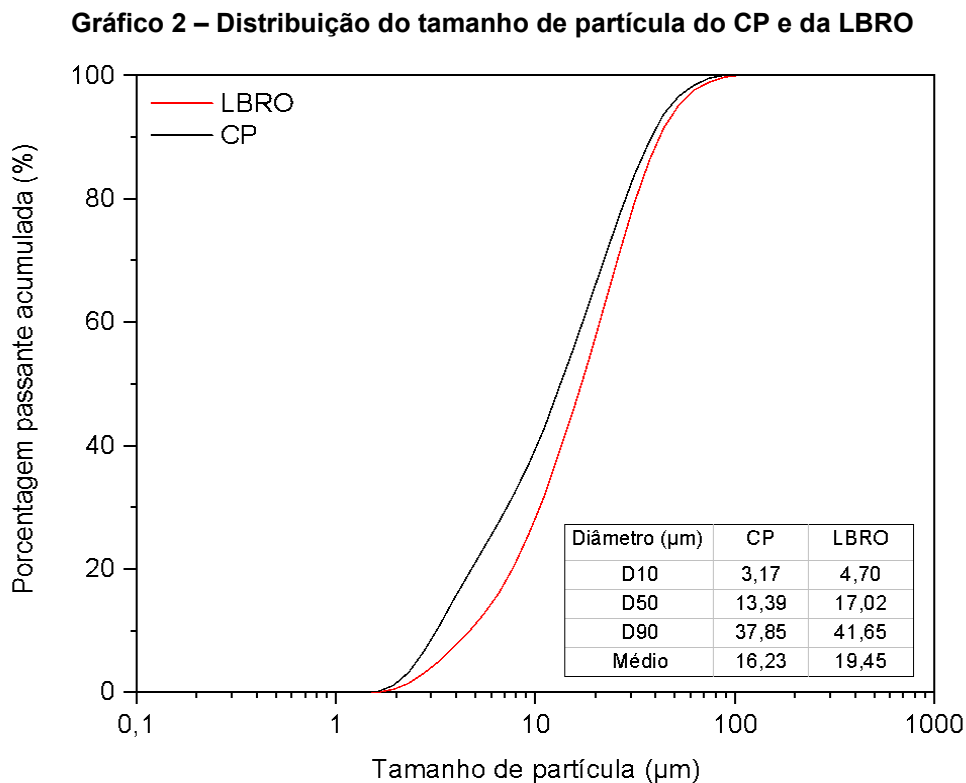
predominantemente cristalino e pouco reativo. A presença de Quartzo e Hematita também pode ser comprovada através da Tabela 4, que indica os mesmos elementos na composição química da LBRO.



**Fonte: Autoria própria, 2023.**

Além da reatividade do MCS ter relação com a composição química da amostra conforme previamente discutido, o tamanho da sua partícula também está associado a este índice, uma vez que quando o resíduo foi adicionado ao aglomerante, a distribuição do tamanho das partículas terá influência na reação da amostra. Nesse contexto, no Gráfico 2 são apresentadas as distribuições de tamanho de partícula da LBRO e do CP para fins comparativos. Como pode ser observado, a LBRO possui uma curva de distribuição semelhante ao CP, com valores de D10, D50, D90 e diâmetro médios similares. Desta forma, como previamente mencionado, a reatividade do resíduo está diretamente relacionada com o seu tamanho de partícula, de forma que quanto mais fino, maior a sua reatividade e mais significativo é o efeito do fíler. Contudo, é importante notar que a obtenção de partículas de MCS com um pequeno diâmetro usualmente requer a aplicação de um processo de moagem, o que pode acarretar um gasto energético e, conseqüentemente, emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao seu beneficiamento. Desta

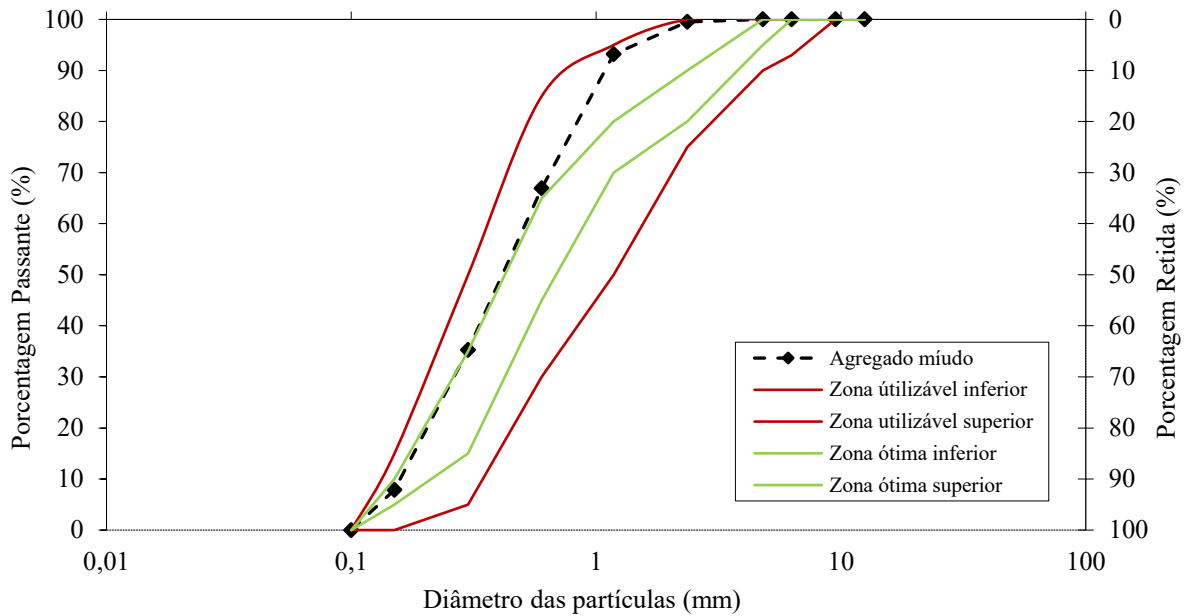
forma, esta etapa de beneficiamento pode contrapor o objetivo de produzir argamassas com um menor impacto ambiental. Diante dessa conjuntura, é importante destacar que a LBRO avaliada neste estudo já foi coletada em uma forma fina, apresentando tamanho de partícula semelhante ao CP, mesmo sem processo de moagem. O material foi utilizado nesta forma, sem ser submetido à beneficiamento (por exemplo, moagem), evitando assim gastos energéticos e emissões de CO<sub>2</sub>.



**Fonte: Autoria própria, 2023.**

A distribuição granulométrica do agregado miúdo está apresentada no Gráfico 3. É possível verificar que a curva granulométrica da areia está dentro dos limites da NBR 17054 (ABNT, 2022), e encontra-se em sua maioria na zona utilizável de acordo com a norma, o que indica que o agregado miúdo é adequado para o uso. O módulo de finura do agregado miúdo é de 1,97 e, de acordo com a NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 1997) pode ser classificada como uma areia média. O agregado miúdo apresentou massa específica de 2,78 g/cm<sup>3</sup> e teor de absorção de água é de 0,6775%.

Gráfico 3 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo



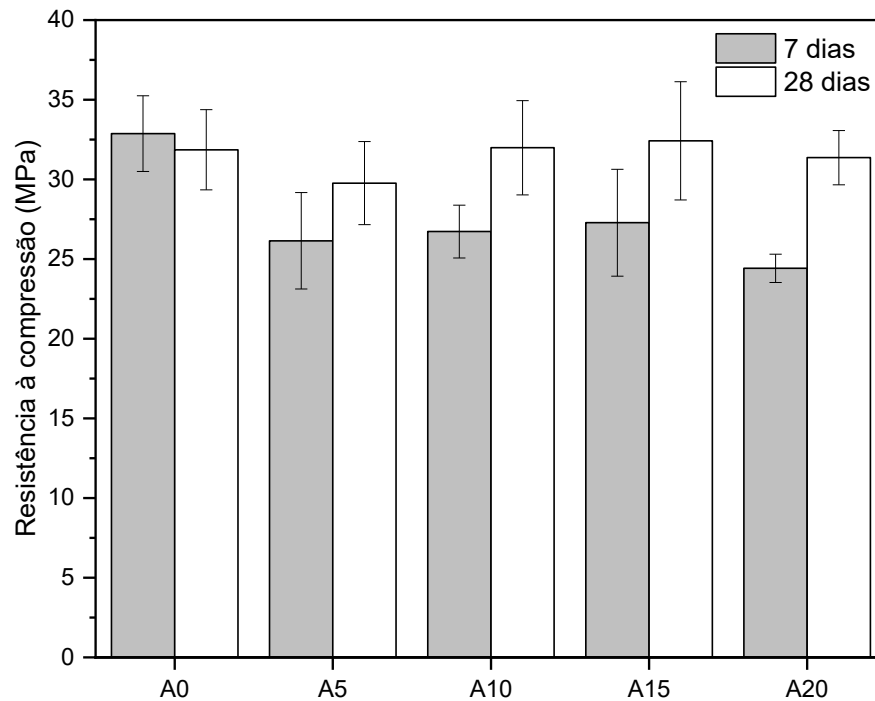
Fonte: Autoria própria, 2023.

## 4.2 Resistência à compressão das argamassas

Os resultados da resistência à compressão aos 7 e 28 dias de hidratação das argamassas são apresentados no Gráfico 4. Como pode ser observado, a argamassa utilizada como referência (A0) manteve sua resistência nos dois períodos de análise, e aos 28 dias alcançou 31,86 MPa, enquanto as amostras com substituição (A5, A10, A15 e A20) tiveram um ganho de resistência ao longo do tempo.

É possível observar também que, na idade inicial de 7 dias, as amostras com resíduos apresentaram perda de até 25,71% (A20) de resistência com relação à A0, enquanto aos 28 dias, a substituição de até 20% de CP por LBRO apresentou valores de resistência à compressão estatisticamente iguais à referência, conforme será apresentado a seguir nos resultados da análise estatística.



**Gráfico 4 – Resistência à compressão das argamassas aos 7 e 28 dias de hidratação**

**Fonte: Autoria própria, 2023.**

Conforme previamente mencionado, aos 28 dias, as amostras com a incorporação de LBRO não apresentaram ganhos ou perdas significativas de resistência à compressão em relação à mistura de controle (A0). A tendência observada corrobora os resultados de Gonçalves (2000). O autor observou que teores de substituição de até 20% de LBRO como MCS em argamassas não trazem mudanças de comportamento quanto a resistência à compressão, uma vez que não traz melhoras significativas no empacotamento das partículas. Almada *et al.* (2020) utilizaram LBRO proveniente de diversas empresas, encontrando diferenças nas composições químicas das amostras, e em seus resultados, a resistência à compressão tendeu a diminuir com a substituição do cimento pela LBRO, sugerindo que a composição do resíduo influencia na resistência à compressão da argamassa.

Os valores apresentados na Tabela 5 ilustram os resultados da análise de variância (ANOVA) da resistência à compressão, onde é possível observar que as variáveis Teor de LBRO e Idade do ensaio foram significativas nos resultados da compressão, enquanto a interação entre elas não foi significativa. Os resultados obtidos corroboram com os estudos de Uliana *et al.* (2014) e Rodrigues (2018), que obtiveram resultados similares ao realizar a análise de variância utilizando os mesmos parâmetros de controle.

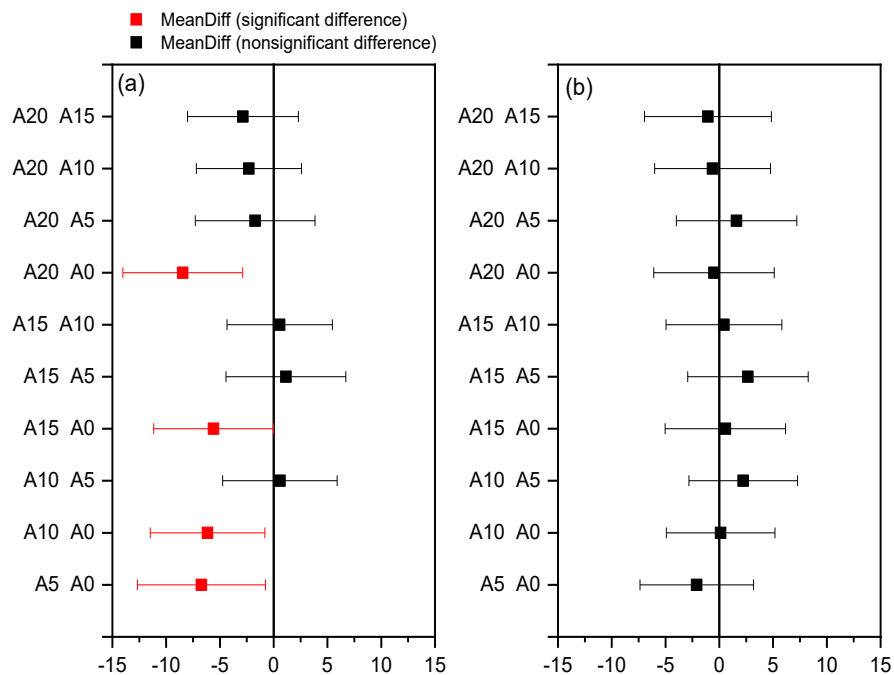
**Tabela 5 - Análise de variância (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão das argamassas**

Variável	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	p-valor	Significância
Teor de LBRO	101,32628	4	25,33157	0,01274	Significativo
Idade	163,66654	1	163,66654	2,326E-05	Significativo
Interação	71,51564	4	17,87891	0,05086	Não significativo
Erro	223,00951	33	6,75786	-	-
Total	559,51797	42	-	-	-

Fonte: Autoria própria, 2023.

Já fazendo a comparação das médias dos resultados de resistência à compressão das argamassas através do teste de Tukey (Gráfico 5) é possível verificar que na análise aos 7 dias (Gráfico 5a) todas as argamassas com a incorporação de LBRO apresentaram resultados de resistência à compressão estatisticamente inferiores, quando comparados com A0. Entretanto, aos 28 dias (Gráfico 5b), todos os traços avaliados apresentaram resultados de resistência à compressão estatisticamente iguais. Estes resultados sugerem que teores de substituição de CP por LBRO de até 20% alcançaram resistências equivalentes ao traço de referência.

**Gráfico 5 - Comparação de médias dos resultados de resistência à compressão das argamassas após (a) 7 dias e (b) 28 dias de hidratação**

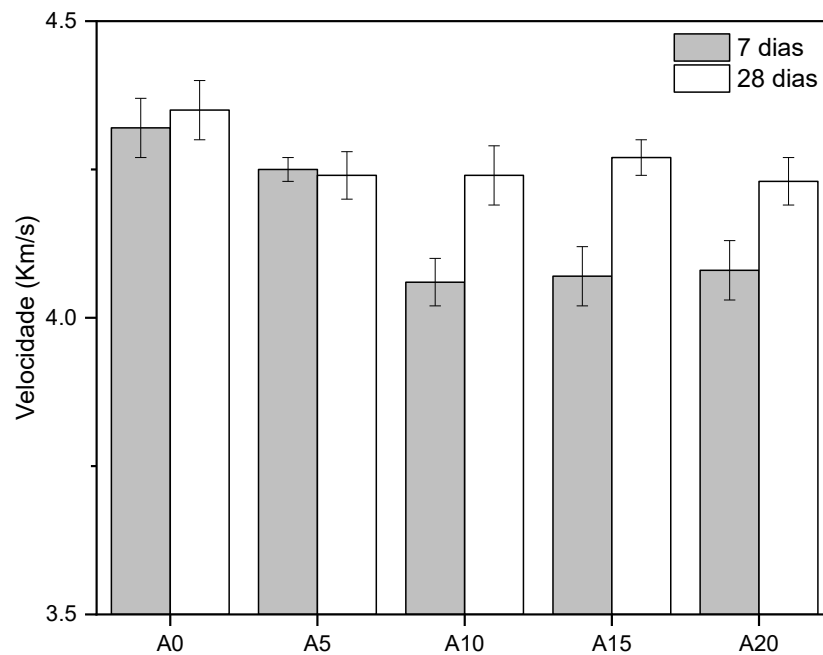


Fonte: Autoria própria, 2023.

### 4.3 Velocidade de pulso ultrassônico

A velocidade de pulso ultrassônico (VPU) também foi determinada como uma medida indireta da porosidade das argamassas avaliadas neste estudo. Os valores de VPU das argamassas aos 7 e 28 dias de hidratação são apresentados no Gráfico 6. É possível verificar que A0 e A5 mantiveram as VPU, nos dois períodos de análise, enquanto A10, A15 e A20 apresentaram um ganho de velocidade com o passar do tempo, o que está de acordo com o ganho de resistência à compressão verificado entre 7 e 28 dias para estes traços, que encontrou um aumento conforme a idade que foi feita o ensaio. Esse comportamento pode ser atribuído ao efeito sinérgico entre a LBRO e o fíler calcário presente no cimento, como será discutido na seção posterior.

**Gráfico 6 – Velocidade de pulso ultrassônico das argamassas aos 7 e 28 dias de hidratação**



**Fonte: Autoria própria, 2023.**

A análise ANOVA dos resultados de VPU estão apresentados na Tabela 6. É possível verificar que tanto as variáveis controláveis quanto sua interação possuíram p-valor < 0,05. Isso traz como resultado, que as variáveis independentes e sua interação influenciam a velocidade de pulso ultrassônico de maneira significativa.

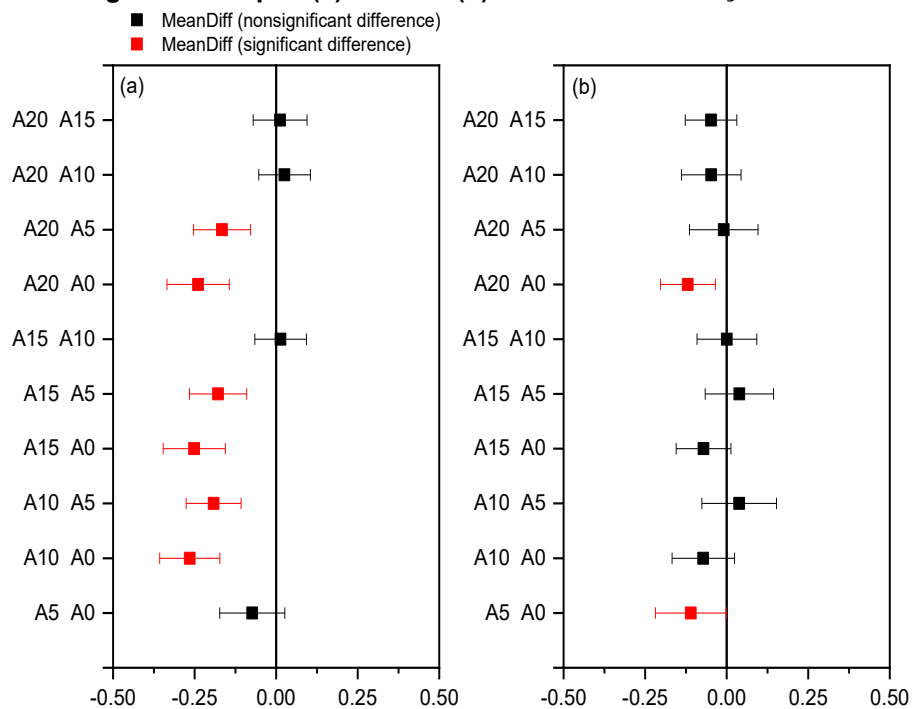
**Tabela 6 - Análise de variância (ANOVA) dos resultados de velocidade de pulso ultrassônico das argamassas**

Variável	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	p-valor	Significância
Teor de LBRO	0,16936	4	0,04234	2,87E-09	Significativo
Idade	0,12151	1	0,12151	1,67E-09	Significativo
Interação	0,07592	4	0,01898	1,17E-05	Significativo
Erro	0,05621	32	0,00176	-	-
Total	0,4230	41	-	-	-

Fonte: Autoria própria, 2023.

Já o teste de Tukey, apresentado no Gráfico 7, traz a comparação entre as médias dos resultados de VPU. É possível observar que aos 7 dias (Gráfico 7a) houve uma diferença estatística entre quase todas as amostras. Já aos 28 dias (Gráfico 7b), no geral as comparações realizadas não apresentaram diferenças estatísticas significativas. Embora as comparações A20-A0 e A5-A0 tenham apresentado diferenças estatísticas, verifica-se que as mesmas não são tão expressivas quando o desvio padrão é confrontado.

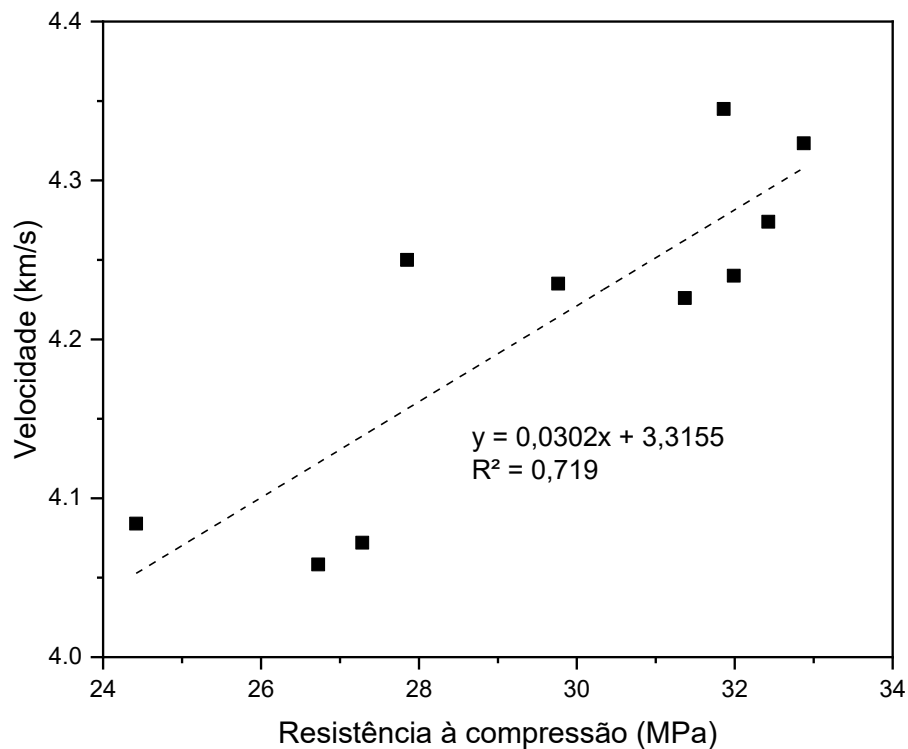
**Gráfico 7 - Comparação de médias dos resultados de velocidade de pulso ultrassônico das argamassas após (a) 7 dias e (b) 28 dias de hidratação**



Fonte: Autoria própria, 2023.

Ao fazer a comparação entre os Gráficos 4 e 6, é possível observar que os resultados apresentam uma tendência clara, ou seja, quanto maior a velocidade de propagação maior é a resistência à compressão. Nesse contexto, através do Gráfico 8 é possível verificar que foi encontrada uma boa correlação entre os resultados de resistência à compressão e a VPU, corroborando com os estudos de Vicentini e Ferrari (2020) e Evangelista (2002), que trouxeram a mesma comparação com resultados semelhantes, mas utilizando uma matriz cimentícia sem a utilização de MCS. Isso traz uma boa confiabilidade dos resultados, uma vez que os resultados de resistência à compressão e a VPU estão coerentes.

**Gráfico 8 – Relação entre resistência à compressão e a velocidade de pulso ultrassônico**



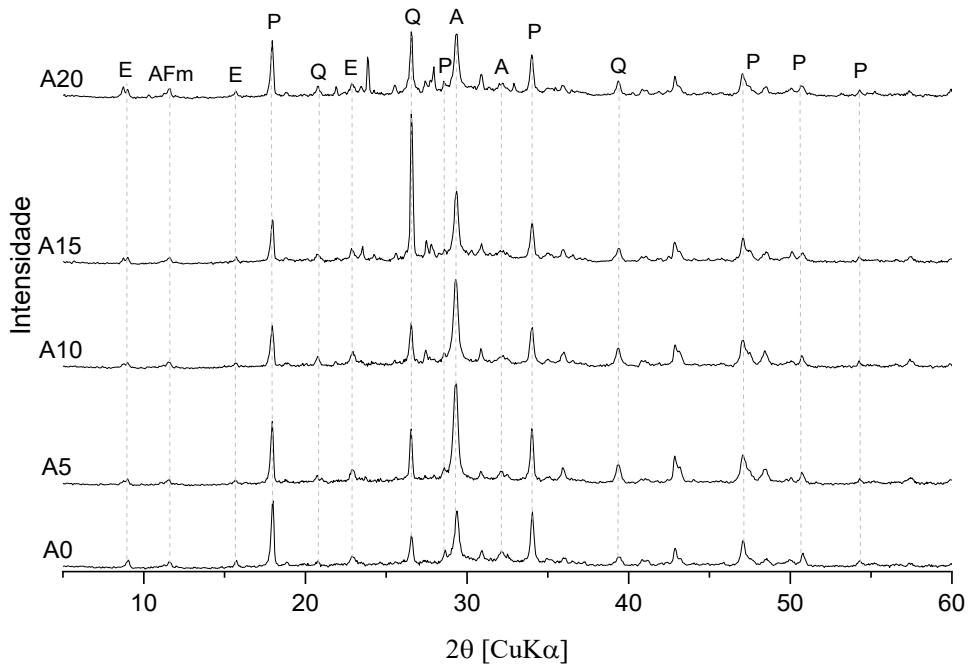
Fonte: Autoria própria, 2023.

#### 4.4 Composição mineralógica das pastas

No Gráfico 9 está apresentado o DRX das pastas de CP com diferentes teores de LBRO, aos 28 dias de hidratação. As principais fases cristalinas identificadas em todas as amostras avaliadas são: etringita, fases AFm (hemicarboaluminato + monocarboaluminato), portlandita, alita e quartzo. A presença de quartzo pode ser atribuída à composição da LBRO (ver Gráfico 1). No geral, verifica-se uma tendência de picos de quartzo de maior intensidade (por

exemplo próximo a  $26,0^\circ 2\theta$ ) nas amostras com maiores teores de resíduo (A15 e A20). Além disso, verifica-se uma redução da intensidade dos picos de portlandita ( $\sim 18,1^\circ$  e  $34,0^\circ 2\theta$ ) e alita ( $\sim 29,0^\circ 2\theta$ ) nas amostras com LBRO. Esse comportamento é esperado e pode ser atribuído à substituição parcial do CP por LBRO. Contudo, verifica-se que essas reduções nos picos de portlandita não são qualitativamente expressivas, sugerindo que possivelmente o resíduo avaliado não possui atividade pozolânica. Esse resultado está de acordo com os resultados de caracterização do material apresentados na seção 4.1.

**Gráfico 9 - Difratomogramas das pastas de cimento Portland com diferentes teores de LBRO aos 28 dias de hidratação (E – etringita, AFm – hemicarboaluminato + monocarboaluminato, P – portlandita, Q – quartzo, A - alita)**

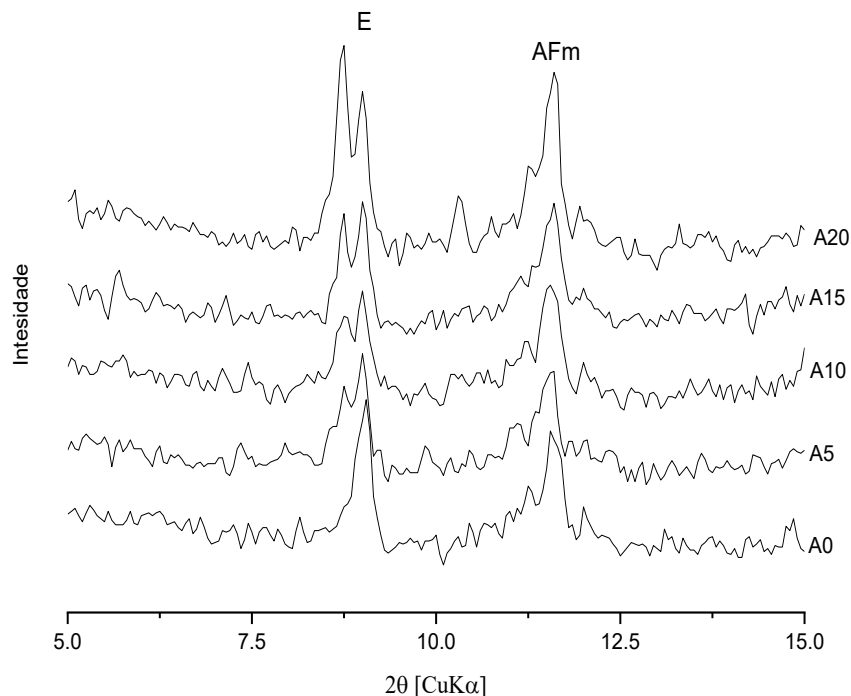


**Fonte: Autoria própria, 2023.**

Já o Gráfico 10 apresenta uma aproximação entre  $5^\circ$  e  $10^\circ 2\theta$  do Gráfico 9. É possível observar o pico característico de etringita próximo a  $9,0^\circ 2\theta$  e das fases AFm (hemicarboaluminato e monocarboaluminato) em torno de  $11,6^\circ 2\theta$ . Inicialmente, verifica-se picos de etringita com intensidades semelhantes para todas as pastas, apesar da redução no teor de cimento progressivo das amostras A5, A10, A15 e A20. Além disso, destaca-se que a presença do fíler calcário nos cimentos Portland comercializados no Brasil favorece a formação das fases AFm em relação ao monossulfato (LOTHENBACH et al., 2008; CARDINAUD et al., 2021). Nesse

contexto, verifica-se que existe uma tendência de aumento da intensidade do pico associado as fases AFm com o aumento do teor de incorporação de LBRO. Desta forma, a composição do resíduo previamente apresentada, principalmente no que tange à presença de  $Al_2O_3$  pode resultar um efeito sinérgico entre o resíduo e o filer calcário presente no CP, favorecendo a formação das fases AFm. Essas fases tem um efeito de preenchimento, contribuindo para a resistência da matriz (LOTHENBACH et al., 2008; RUVIARO et al., 2021). Nesse sentido, salienta-se ainda que a formação das fases AFm é intensificada entre 7 e 28 dias (RUVIARO et al., 2021). Isto posto, verificou-se que embora aos 7 dias as argamassas com LBRO tenham exibido resistências inferiores à amostra de controle (A0), aos 28 dias, teores de substituição parcial de CP por resíduo de até 20% apresentaram resistências à compressão estatisticamente equivalentes à mistura de controle, o que possivelmente pode ser associado ao efeito sinérgico previamente mencionado que resulta na formação das fases AFm e neste efeito de preenchimento.

**Gráfico 10 - Difratomogramas das pastas de cimento Portland com diferentes teores de LBRO aos 28 dias de hidratação no intervalo  $2\theta$  entre 5 e  $15^\circ$  (E - etringita e AFm – hemicarboaluminato e monocarboaluminato)**



**Fonte: Autoria própria, 2023.**

#### 4.5 Análise ambiental simplificada

Na Tabela 7 está apresentada a equivalência de emissão de CO<sub>2</sub> relacionada à produção de 1m<sup>3</sup> de cada argamassa estudada, assim como a emissão relacionada aos seus constituintes. É possível observar que a substituição do CP pela LBRO fez com que as emissões de CO<sub>2</sub> caíssem de maneira contínua entre A0 e A20, de 481,39 para 295,59 kgCO<sub>2</sub>-e/m<sup>3</sup> respectivamente, representando uma redução de 61,4%. Esse comportamento é relacionado às menores emissões do LBRO (0,1234 kg CO<sub>2</sub>/kg de material) em relação ao cimento Portland (0,892 kg CO<sub>2</sub>/kg de material).

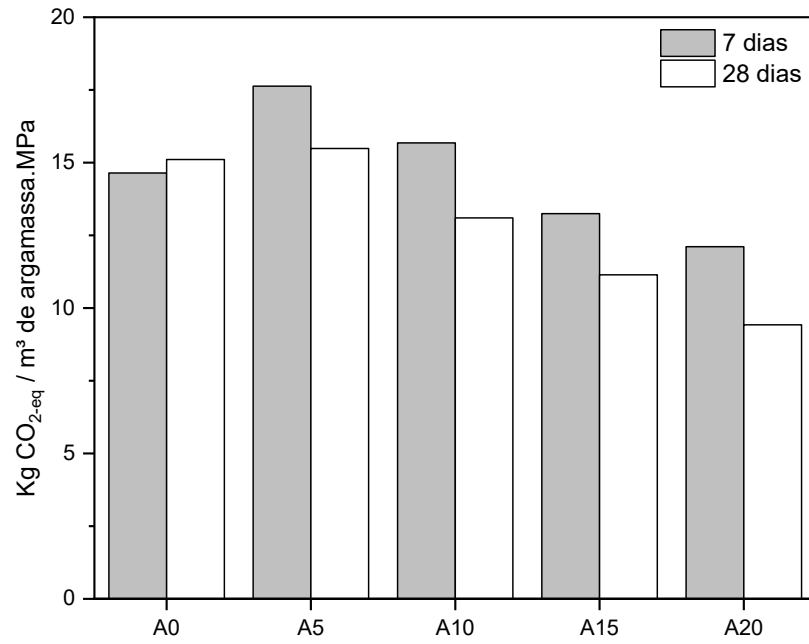
**Tabela 7 - Quantidade de kgCO<sub>2</sub>-e/m<sup>3</sup> de argamassa**

Amostra	CP	LBRO	Areia	TOTAL (kg.CO <sub>2</sub> -e/m <sup>3</sup> )
A0	474,04	0,00	7,33	481,39
A5	450,33	3,16	7,33	460,83
A10	405,30	6,33	7,33	419,96
A15	344,50	9,49	7,33	361,33
A20	275,60	12,65	7,33	295,59

**Fonte: Autoria própria, 2023.**

Já o Gráfico 11 exibe a razão entre a emissão de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> da argamassa pela sua respectiva resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias. Este valor é um indicativo da eficiência do traço utilizado, uma vez que traz como resultado o valor de emissão de CO<sub>2</sub> para 1 MPa da amostra que está sendo analisada. Fazendo a comparação entre os resultados para o período de 7 dias de cura, é possível notar que como a resistência à compressão das amostras com resíduo ficaram mais baixas que a referência, não houve uma redução significativa da quantidade de CO<sub>2</sub> emitido por MPa. Porém, ao comparar com os resultados do período de 28 dias, onde todas as amostras alcançaram resistências estatisticamente iguais, foi possível notar uma redução progressiva nos valores de emissão por MPa das amostras. Fazendo um comparativo entre A0 e A20, que seriam os dois extremos desta pesquisa, podemos notar que aos 28 dias a substituição de 20% do CP pela LBRO resultou em uma redução de 37,63% na quantidade de CO<sub>2</sub> emitido por MPa da argamassa, que é um valor extremamente significativo.



**Gráfico 11 - Relação entre resistência à compressão e a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>**

Fonte: Autoria própria, 2023.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou as características mecânicas e mineralógicas de argamassas produzidas com substituição parcial de cimento Portland por Lama do Beneficiamento de Rochas ornamentais (LBRO) como material cimentício suplementar (MCS), além de uma análise ambiental acerca da quantidade de CO<sub>2</sub> emitido para a produção das argamassas. Dessa forma, foi possível concluir que:

- Os resultados de caracterização da LBRO indicaram que o material é predominantemente cristalino, com um pequeno halo amorfo. Além disso, a composição química da LBRO não atende aos requisitos da NBR 12653 (2015) para utilização como material pozolânico. Contudo, o resíduo apresentou uma granulometria adequada para utilização como MCS sem a necessidade de um processo de moagem
- Teores de substituição de até 20% de CP por LBRO não resultaram em reduções nos valores de resistência à compressão nos 28 dias de cura das argamassas.
- Os resultados de VPU apresentaram ganho de velocidade para as amostras A10, A15 e A20 com o passar do tempo, além de ser possível encontrar uma boa correlação entre os resultados de resistência à compressão e a VPU, representando uma boa confiabilidade dos resultados encontrados.
- A análise mineralógica (DRX) das amostras evidenciou que a LBRO possivelmente não apresenta atividade pozolânica. Contudo, a sua composição química pode ter favorecido uma reação sinérgica entre o resíduo e o fíler calcário do cimento Portland, resultando na formação de maiores teores das fases AFm.
- A análise ambiental foi satisfatória, uma vez que quanto maior foi a substituição de CP por LBRO, menor foram as emissões de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de argamassa produzida, representando uma redução de 61,4% ao comparar A20 com A0. E ao relacionar a resistência à compressão e a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de argamassa, foi possível notar uma redução progressiva nos valores de emissão por MPa das amostras.

O trabalho evidenciou a viabilidade da utilização de percentuais de substituição de CP por LBRO de até 20% sem prejuízos à resistência à compressão aos 28 dias. Paralelamente, a utilização da LBRO como MCS contribui para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, e evita a extração de sua matéria prima. Isto posto, destaca-se a viabilidade técnica e ambiental da utilização da LBRO como MCS. Para o desenvolvimento de trabalhos futuros sugere-se (i) utilizar as formulações desta pesquisa para avaliação de desempenho de argamassas de revestimento/assentamento; (ii) realizar um tratamento térmico e de moagem da LBRO para melhorar a sua reatividade, além de analisar sua calorimetria e reologia.

## REFERÊNCIAS

ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland. Manual de Revestimentos de Argamassa. São Paulo: Abcp, 2002. 104 p.

ABRÃO, P. C. R. A. O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais. 2017. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

ALMADA, B. S.; MELO, L. S.; DUTRA, J. B.; BUBANI, L. B.; SILVA, G. J. B.; SANTOS, W. J.; AGUILAR, M. T. P. Influence of the heterogeneity of waste from wet processing of ornamental stones on the performance of Portland cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 262, 2020.

ALVES, B. O.; BONIFÁCIO, D. R. O direito ambiental como ferramenta para gestão de recursos hídricos na construção civil. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 14, n. 2, p. 234-245, 2022.

ALYAMAÇ, K. E.; TUGRUL, E. A durable, eco-friendly and aesthetic concrete work: Marble concrete. In Proceedings of the 11th **International Congress on Advances in Civil Engineering**, v. 50, p. 21–25, 2014.

ABIROCHAS, Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. 1º Relatório de Andamento - Estudo da competitividade brasileira no setor de rochas ornamentais e de revestimento. Brasília, p. 59. 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11172**: Aglomerantes de origem natural. Rio de Janeiro, p. 5. 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, p. 5. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman - Método de ensaio. Rio de Janeiro, p. 3. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, p. 7. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, p. 7. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, p. 4. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, p. 2. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, p. 4. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, p. 12. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, p. 4. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, p. 12. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, p. 6. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, p. 8. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15012**: Rochas para revestimentos de edificações - Terminologia. Rio de Janeiro, p. 23. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 3310-1**: Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação - Parte 1:Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro, p. 12. 1997.

BASTOS, R. S.; ULIANA, J. G.; CALMON, J. L. TRISTÃO, F. A.; VIEIRA, G. L.; DEGEN, M. K. Revisão bibliográfica dos estudos sobre a aplicação de lama do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de materiais de construção. In: 55° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO CBC, 16., Espírito Santo, 2013. **Anais...** Espírito Santo: Ibracon, 2013.

BATISTA, M. L. Gestão de resíduos na construção civil: ênfase no desenvolvimento sustentável. **Brazilian Journal Of Development**, v. 8, n. 4, p. 23356-23373, 2022.

BILCATI, G. K. Produção de painéis de cimento portland reforçados com fibra de curauá (*Ananas erectifolius*). Dissertação [Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná] PPGECC - UTFPR. Curitiba, 2015.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Relatório Técnico**: Rochas Ornamentais. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Brasília, 2009.

BUYUKSAGIS, I. S.; UYGUNOGLU, T.; TATAR, E. Investigation on the usage of waste marble powder in cement-based adhesive mortar. **Construction And Building Materials**, v. 154, p. 734-742, 2017.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÊLLO, F. S. S.; DA SILVA, S. A. C.; MATTOS, F. V. Aproveitamento do Resíduo de Corte de Granito Para a Produção de Argamassas de Assentamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., Salvador, 1997. **Anais...** Salvador: ANTAC, 1997a.

CARDINAUD, G.; ROZIÈRE, E.; MARTINAGE, O.; LOUKILI, A.; BARNES-DAVIN, L.; PARIS, M.; DENELE, D. Calcined clay – Limestone cements: hydration processes with high and low-grade kaolinite clays. **Construction and Building Materials**, v. 277, p. 122271, 2021.

COLANGELO, F.; MARROCCOLI, M.; CIOFFI, R. Properties of Self-Levelling Concrete Made With Industrial Wastes. **RILEM Proceedings Pro**, v. 40, p. 580-589, 2010.

COSTA, E. B; NOBRE, T. R. S; GUERREIRO, A. Q; MANCIO, M; KIRCHHEIM, A. P. Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 75-86, abr./jun. 2013.

CRUZ, D. F. M.; LAMEIRAS, R. M. Estudo das Propriedades Mecânicas de Argamassas Produzidas Utilizando-se Resíduo do Corte de Mármore e Granito. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 6., São Paulo, 2003. **Anais...** São Paulo: Ibracon, 2003.

DAL MOLIN, D.C.C. Adições minerais. In: ISAIA, G.C. (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2011, v.1, p.261-309.

DANISH, A.; MOSABERPAHAH, M. A.; SALIM, M. U.; FEDIUK, R.; RASHID, M. F.; WAQAS, R. M. Reusing marble and granite dust as cement replacement in cementitious composites: a review on sustainability benefits and critical challenges. **Journal of Building Engineering**, 2021.

DIETRICH, Y.P.; TELES, C.R.; VIEIRA, G.L. Desempenho mecânico e análise da corrosão das armaduras em concretos produzidos com adição de resíduos de rochas ornamentais. **Revista Matéria**, v. 22, n. 4, e-11891, 2017.

EVANGELISTA, A. C. L. Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

FRASCÁ, M. H. B. O. Rocha como Material de Construção. In: IBRACON Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2ª ed. São Paulo: G.C.Isaia, 2010 v.1 p. 439 – 480.

GONÇALVES, J. P. Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos. Dissertação [Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. Porto Alegre, 2000.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Editora Arte Interativa, v. 1, 2011.

LEA, F.M. The Chemistry of Cement and Concrete, Chemical Publishing Company, New York, p. 596. 1971.

LIMA, J. A. R. D. E. Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2010.

LOTENBACH, B.; LE SAOUT, G.; GALLUCCI, E.; SCRIVENER, K. Influence of limestone on the hydration of Portland cements. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 848–860, 2008.

MADDALENA, R.; ROBERTS, J. J.; HAMILTON, A. Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, 2018.

MANHÃES, J. P. V. T.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização e classificação de resíduo sólido “pó de rocha granítica” gerado na indústria de rochas ornamentais. **Química Nova**, v. 31, n. 6, p. 1301-1304, 2008.

MARGALHA, M. G. Argamassas. Universidade de Évora. Portugal, 2011.

MARTINS, M. M. Investigação da Influência do uso de materiais cimentícios suplementares utilizados em substituição parcial ao cimento Portland. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Sul de Santa Catarina. Tubarão, p. 79. 2018.

MATOS, P. R.; FOIATO, M.; PRUDÊNCIDO JR, L. R. Ecological, fresh state and long-term mechanical properties of high-volume fly ash high-performance self-compacting concrete. **Construct Build Mater**, v. 203, 2019.

MEHTA P. K.; MONTEIRO P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e materiais. 3ed. 674p. 2008.

MELO, L. S. C. Caracterização de compostos de cimento portland confeccionados com resíduos do processamento a úmido de rochas ornamentais de origem distintas. Dissertação [Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais]. Belo Horizonte, 2016.

MOURA, W. A.; LIMA, M. B. L.; CALMON, J. L.; MORATTI, M.; SANTOS SOUZA, F. L. Utilização de Resíduo de Serragem de Rochas Ornamentais (RSRO) Como Substituição Parcial do Cimento na Produção de Blocos Pré-Moldados de Argamassa. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., Florianópolis, 2006. **Anais...** Florianópolis, 2006.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, R. S. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. **Sitientibus, Feira de Santana**, n.26, p.49-61, jan./jun. 2002.

NAYAK, S. K.; SATAPATHY A.; MANTRY S. Use of waste marble and granite dust in structural applications: a review. **Journal of Building Engineering**, v. 46, 2022.

OLIVEIRA, L. S. Reaproveitamento de resíduos de marmoraria em compósitos cimentícios. Dissertação [Programa de Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação da Universidade Federal de São João Del-Rei] PPMEC-UFSJ. São João Del-Rei, 2015.

RAISDORFER, J. W. Influência da adição ou da substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2015.

REFFOLD, E.; LEIGHTON, F.; CHOUDHURY, F.; RAYNER, P. S. Green-house gas emissions of water supply and demand management options. **Environment Agency**, 2008.

REIS, A. S. Estudo do aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais na fabricação de ladrilho hidráulico piso tátil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em engenharia civil, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

RODRIGUES, L. H. C. H. Análise da incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente na composição do cimento Portland. Dissertação [Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo]. Vitória, 2018.

RUVIARO, A. S.; SILVESTRO, L.; SCOLARO, T. P.; DE MATOS, P. R.; PELISSER, F. Use of calcined water treatment plant sludge for sustainable cementitious composites production. **Journal of Cleaner Production**, v. 327, 2021.

RUVIARO, A. S.; SILVESTRO, L.; PELISSER, F.; DE AZEVEDO, A. R. G.; DE MATOS, P. R.; GASTALDINI, A. L. G. Long-term effect of recycled aggregate on microstructure, mechanical properties, and CO<sub>2</sub> sequestration of rendering mortars. **Construction and Building Materials**, v. 321, 2022.

SCOLARO, T. P.; SILVESTRO, L.; RUVIARO, A. S.; DE AZEVEDO, A. R. G.; MONTEIRO, S. N.; PELISSER, F. Effect of Ornamental Stone Waste Incorporation on the Rheology, Hydration, Microstructure, and CO<sub>2</sub> Emissions of Ordinary Portland Cement. **Materials**, v. 15, 2022.

SILVA, M. G. Cimento Portland com Adições Minerais In: IBRACON Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: G.C.Isaia, 2010 v.1 p. 809

SILVA, S. C. Caracterização do resíduo de serragem de blocos de granito. Estudo do potencial de aplicação na fabricação de argamassas de assentamento e de tijolos de solo-cimento. Tese (Mestrado): Universidade Federal do Espírito Santo, 1998.

SOARES, F. A. M. Incorporação de partículas de poliestireno expandido e resina epóxi em compósito cimentício. Tese (Mestrado): Universidade Federal de São João Del Rei, 2014

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub>cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**. 2018.



SCRIVENER, K.; MARTIRENA, F.; BISHNOI, S.; MAITY, S. Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement and Concrete Research**, Volume 114, p. 49-56, 2018.

SNELLINGS, R.; CHWAST, J.; CIZER, O.; DE BELIE, N.; DHANDAPANI, Y.; DURDZINSKI, P.; ELSEEN, J.; HAUF, J.; HOOTON, D.; PATAPY, C.; SANTHANAM, M.; SCRIVENER, K.; SNOECK, D.; STEGER, L.; TONGBO, S.; VOLLPRACHT A.; WINNEFELD, F.; LOTHENBACH, B. Report of TC 238-SCM: hydration stoppage methods for phase assemblage studies of blended cements—results of a round robin test. *Materials and Structures*, v. 51, n. 4, 2018.

Snellings, R.; Mertens, G.; Elsen J. Supplementary Cementitious Materials. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 74, p. 211-278, 2012.

SNIC. Relatório anual do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. São Paulo, 2020. Disponível em: <[http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/rel\\_anual\\_2020.pdf](http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2020.pdf)> Acesso em: ago, 2022.

SU, H.; AHMADOV, M.; TKACHENKO, D.; DANSHINA, S. Hedonic adaptation and conscious consumption in the civil engineering market: corporate reputation and user behavior strategies for sustainable development. **International Journal Of Low-Carbon Technologies**, v. 17, p. 23-32, 2021.

SUKONTASUKKUL, P. Methodology for Calculating Carbon Dioxide Emission in the Production of Ready-Mixed Concrete. 1st International Conference Computer Technology. **Concrete Structure**, v. CPN 137, p. 1-9, 2009

TANGARAMVONG, S.; NUAKLONG, P.; KHINE, M. T.; JONGVIVATSAKUL, P. The influences of granite industry waste on concrete properties with different strength grades. **Case Studies In Construction Materials**, v. 15, 2021.

ULIANA, J. G.; CALMON, J. L.; VIEIRA, G. L.; NUNES FILHO, E. Tratamento térmico do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais. Aplicação como substituição parcial de cimento. In: 56º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. IBRACON, 2014.

VOTORANTIM CIMENTOS. EPD – Environmental Product Declaration: CP II E 40, CP III-40 RS and CP V-ARI; Votorantim Cimentos: São Paulo, Brasil, 2016.

VINCENTINI, J.M.; FERRARI, V. J. Esclerometria e velocidade de propagação do pulso ultrassônico para a estimativa da Resistência à Compressão do concreto por meio de curvas de correlação. **Revista Tecnológica**. 29. V. 1, p. 49-61, 2020.

VINCO, L. G. F.; OLIVEIRA, J. D. de; TRISTÃO, F. A.; VIEIRA, G. L. Viabilidade técnica e econômica de argamassas de revestimento produzidas com incorporação de resíduos de rochas ornamentais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 165-182, out./dez. 2017.

ZHANG, T.; ZHANG, D.; ZHENG, D.; GUO, X.; ZHAO, W. Construction waste landfill volume estimation using ground penetrating radar. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 40, n. 8, 2022.



**Presidência da República  
Casa Civil  
Subchefia para Assuntos Jurídicos**

**LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998<sup>1</sup>.**

**Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.**

**O PRESIDENTE DA REPÚBLICA** Faço saber que o Congresso Nacional decreta e eu sanciono a seguinte Lei:

Título I - Disposições Preliminares

Art. 1º Esta Lei regula os direitos autorais, entendendo-se sob esta denominação os direitos de autor e os que lhes são conexos.

Art. 2º Os estrangeiros domiciliados no exterior gozarão da proteção assegurada nos acordos, convenções e tratados em vigor no Brasil.

Parágrafo único. Aplica-se o disposto nesta Lei aos nacionais ou pessoas domiciliadas em país que assegure aos brasileiros ou pessoas domiciliadas no Brasil a reciprocidade na proteção aos direitos autorais ou equivalentes.

Art. 3º Os direitos autorais reputam-se, para os efeitos legais, bens móveis.

Art. 4º Interpretam-se restritivamente os negócios jurídicos sobre os direitos autorais.

Art. 5º Para os efeitos desta Lei, considera-se:

I - publicação - o oferecimento de obra literária, artística ou científica ao conhecimento do público, com o consentimento do autor, ou de qualquer outro titular de direito de autor, por qualquer forma ou processo;

II - transmissão ou emissão - a difusão de sons ou de sons e imagens, por meio de ondas radioelétricas; sinais de satélite; fio, cabo ou outro condutor; meios óticos ou qualquer outro processo eletromagnético;

III - retransmissão - a emissão simultânea da transmissão de uma empresa por outra;

IV - distribuição - a colocação à disposição do público do original ou cópia de obras literárias, artísticas ou científicas, interpretações ou execuções fixadas e fonogramas, mediante a venda, locação ou qualquer outra forma de transferência de propriedade ou posse;

V - comunicação ao público - ato mediante o qual a obra é colocada ao alcance do público, por qualquer meio ou procedimento e que não consista na distribuição de exemplares;

VI - reprodução - a cópia de um ou vários exemplares de uma obra literária, artística ou científica ou de um fonograma, de qualquer forma tangível, incluindo qualquer armazenamento permanente ou temporário por meios eletrônicos ou qualquer outro meio de fixação que venha a ser desenvolvido;

VII - contrafação - a reprodução não autorizada;

VIII - obra:

a) em co-autoria - quando é criada em comum, por dois ou mais autores;

b) anônima - quando não se indica o nome do autor, por sua vontade ou por ser desconhecido;

c) pseudônima - quando o autor se oculta sob nome suposto;

d) inédita - a que não haja sido objeto de publicação;

e) póstuma - a que se publique após a morte do autor;

f) originária - a criação primígena;

g) derivada - a que, constituindo criação intelectual nova, resulta da transformação de obra originária;

h) coletiva - a criada por iniciativa, organização e responsabilidade de uma pessoa física ou jurídica, que a publica sob seu nome ou marca e que é constituída pela participação de diferentes autores, cujas contribuições se fundem numa criação autônoma;

i) audiovisual - a que resulta da fixação de imagens com ou sem som, que tenha a finalidade de criar, por meio de sua reprodução, a impressão de movimento, independentemente dos processos de sua captação, do suporte usado inicial ou posteriormente para fixá-lo, bem como dos meios utilizados para sua veiculação;

IX - fonograma - toda fixação de sons de uma execução ou interpretação ou de outros sons, ou de uma representação de sons que não seja uma fixação incluída em uma obra audiovisual;

X - editor - a pessoa física ou jurídica à qual se atribui o direito exclusivo de reprodução da obra e o dever de divulgá-la, nos limites previstos no contrato de edição;

XI - produtor - a pessoa física ou jurídica que toma a iniciativa e tem a responsabilidade econômica da primeira fixação do fonograma ou da obra audiovisual, qualquer que seja a natureza do suporte utilizado;

XII - radiodifusão - a transmissão sem fio, inclusive por satélites, de sons ou imagens e sons ou das representações desses, para recepção ao público e a transmissão de sinais codificados, quando os meios de decodificação sejam oferecidos ao público pelo organismo de radiodifusão ou com seu consentimento;

XIII - artistas intérpretes ou executantes - todos os atores, cantores, músicos, bailarinos ou outras pessoas que representem um papel, cantem, recitem, declamem, interpretem ou executem em qualquer forma obras literárias ou artísticas ou expressões do folclore.

Art. 6º Não serão de domínio da União, dos Estados, do Distrito Federal ou dos Municípios as obras por eles simplesmente subvencionadas.

<sup>1</sup> Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19610.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19610.htm).