

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Revisão sobre o uso de adições minerais em concretos sustentáveis

Laura Helena Teodoro

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para a conclusão da graduação em Engenharia Civil

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Fernanda Giannotti da Silva Ferreira

São Carlos
2022

DEDICATÓRIA

Às memórias das minhas avós Elza e Maria, que além de terem me ensinado as lições mais valiosas da vida me deram todo o amor e carinho desse mundo. As lembranças do meu tempo com elas tornam a minha vida mais leve.

AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos pais, Maria Isaltina e Claudio, pelo amor e apoio incondicionais, por me incentivarem a seguir meus sonhos e me acompanhar a cada passo do caminho.

Ao meu irmão Sávio, por sempre me ouvir, me aconselhar, por ser meu melhor amigo e um ótimo exemplo a ser seguido.

A todos os professores, responsáveis por me moldar, me inspirar e por todo conhecimento obtido na minha formação.

À minha Professora e orientadora Fernanda, por ter tornado isso possível, por toda orientação, compreensão e pelas aulas que me despertaram interesse por esse tema.

Aos meus amigos de curso e da vida, Bruna, Carolina, Isabella, Amanda, Ana Laura, Vitória, Elisa, Nathalia Gabriel e Luan, por serem a minha segunda família, minha base e apoio depois que me mudei para São Carlos, em vocês eu encontrei um lar e os meus anos de graduação foram muito especiais graças a vocês.

RESUMO

O setor da engenharia civil, apesar de ser necessária para o conforto e desenvolvimento humano é um dos maiores contribuintes para o perecimento desses recursos. Portanto, é importante implementar técnicas para promover melhores condições ambientais e atingir uma construção sustentável. Dentro da temática da sustentabilidade na construção civil, a reciclagem e a reutilização de materiais como substitutos do cimento ou dos agregados apresenta um grande papel na diminuição da emissão de CO₂ e, conseqüentemente, em tornar o concreto mais sustentável. Sendo assim, o presente trabalho, de âmbito bibliográfico, busca avaliar as técnicas atuais para o reaproveitamento de materiais, usando-os como matéria-prima de outro produto. Na construção civil e em outras áreas existem muitos resíduos que são desperdiçados e podem ser reutilizados, sendo a solução para evitar a extração de produtos naturais. Neste trabalho foram avaliados alguns materiais cimentícios suplementares, teores de substituição incorporados, bem como o efeito dessas adições na resistência à compressão de concretos, destacando-se ainda a importância da reciclagem e reaproveitamento dos resíduos na construção civil. Para tanto, foi realizado um banco de dados formado com resultados de resistência à compressão disponíveis na literatura. Estes dados foram utilizados em análises comparativas que tomaram como referência os resultados correspondentes às adições de cinzas volantes, cinzas da casca de arroz, pó de vidro e escória de alto forno. Não foi possível chegar à uma conclusão definitiva, pois houve grande variação nos resultados de resistência à compressão dos concretos com a incorporação de todos os materiais estudados. Verificou-se que somente o pó de vidro não proporcionou aumento na resistência dos concretos aos 7 e aos 28 dias para os dados analisados. As cinzas volantes proporcionaram ao concreto um aumento da resistência em até 20% de substituição ao cimento; as cinzas da casca de arroz até 25% de substituição e a escória de alto forno, em que foram verificados melhores resultados de resistência à compressão para 100% de substituição ao cimento.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Concreto, Construção Civil.

ABSTRACT

The civil engineering sector, despite being necessary for human comfort and development, is one of the biggest contributors to the perish of these resources. Therefore, it is important to implement techniques to promote better environmental conditions and achieve sustainable construction. Within the theme of sustainability in civil construction, recycling and reuse of materials as substitutes for cement or aggregates plays a major role in reducing CO₂ emissions and, consequently, in making concrete more sustainable. Therefore, the present work, of bibliographic scope, seeks to evaluate the current techniques for the reuse of materials, using them as raw material for another product. In civil construction and other areas, there is a lot of waste that is wasted and can be reused, being the solution to avoid the extraction of natural products. Some additional cementitious materials, incorporated replacement levels, as well as the effect of these additions on the compressive strength of concrete were evaluated, highlighting the importance of recycling and reuse of waste in civil construction. For this evaluation, a database was created with compressive strength results available in the literature. These data were used in comparative analyzes that took as reference the results corresponding to the additions of fly ash, rice husk ash, glass powder and blast furnace slag. It was not possible to reach a definitive conclusion because there was a great variation in the results of compressive strength of concrete for all materials, only the glass powder that did not show an increase in strength at 7 and 28 days for the analyzed data, fly ash showed increases up to 20% replacement, rice husk ash showed improvement up to 25% replacement, and blast furnace slag had the best results for 100% replacement.

Key-words: Sustainability, Concrete, Civil Construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Impactos ambientais nas etapas da construção.....	17
Figura 2: Nível de impacto ambiental de acordo com a disposição de RCD.....	18
Figura 3: Siglas e classes do Cimento Portland	19
Figura 4: Limites de composição do Cimento Portland.....	20
Figura 5: Fluxograma do processo de seleção dos artigos	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variação da resistência à compressão de concretos com cinzas volantes.....	29
Tabela 2: Variação da resistência à compressão de concretos com cinzas da casca de arroz	31
Tabela 3: Variação da resistência à compressão de concretos com pó de vidro.....	32
Tabela 4: Variação dos ensaios de escória de alto forno	33
Tabela 5: Medidas de centralidade da resistência à compressão de concretos com cinzas volantes aos 7 dias	35
Tabela 6: Medidas de centralidade da resistência à compressão de concretos com cinzas volantes aos 28 dias	36
Tabela 7: Medidas de centralidade da resistência à compressão de concretos com cinzas da casca de arroz aos 7 dias	37
Tabela 8: Medidas de centralidade da resistência à compressão de concretos com cinzas da casca de arroz aos 28 dias	38
Tabela 9: Medidas de centralidade da resistência à compressão do concreto com pó de vidro aos 7 dias	40
Tabela 10: Medidas de centralidade da resistência à compressão do concreto com pó de vidro aos 28 dias	41
Tabela 11: Medidas de centralidade da resistência à compressão do concreto com escória de alto forno aos 7 dias	42
Tabela 12: Medidas de centralidade da resistência à compressão do concreto com escórias de alto forno aos 28 dias	43
Tabela 13: Maior ganho de resistência à compressão do concreto aos 7 dias.....	45
Tabela 14: Maior ganho de resistência à compressão do concreto aos 28 dias.....	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Escolha inicial dos trabalhos e suas bases de dados	27
Gráfico 2: Variação da resistência à compressão de concretos com cinzas volantes aos 7 dias.....	35
Gráfico 3: Variação da resistência à compressão de concretos com cinzas volantes aos 28 dias.....	36
Gráfico 4: Variação da resistência à compressão de concretos com cinzas da casca de arroz aos 7 dias	38
Gráfico 5: Variação da resistência à compressão de concretos com cinzas da casca de arroz aos 28 dias	39
Gráfico 6: Variação da resistência à compressão do concreto com pó de vidro aos 7 dias	40
Gráfico 7: Variação da resistência à compressão do concreto com pó de vidro aos 28 dias	41
Gráfico 8: Variação da resistência à compressão do concreto com escória de alto forno aos 7 dias .	43
Gráfico 9: Variação da resistência à compressão do concreto com escória de alto forno aos 28 dias	44

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 OBJETIVOS.....	11
1.1.1 Objetivo geral	11
1.1.2 Objetivo específico	11
1.2 JUSTIFICATIVA.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1. SUSTENTABILIDADE	13
2.2. SUSTENTABILIDADE DO CONCRETO.....	15
2.2.1. Adições minerais	21
3. METODOLOGIA.....	24
3.2. CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	24
3.3. PROCEDIMENTO DA COLETA E ANÁLISE DE DADOS	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
4.1. LEVANTAMENTO DO BANCO DE DADOS.....	27
4.2. BANCO DE DADOS	29
4.3. ANÁLISE DOS EFEITOS DAS CINZAS VOLANTES	34
4.4. ANÁLISE DOS EFEITOS DA CINZA DA CASCA DE ARROZ.....	37
4.5. ANÁLISE DOS EFEITOS DO PÓ DE VIDRO	40
4.6. ANÁLISE DOS EFEITOS DA ESCÓRIA DE ALTO FORNO	42
5. CONCLUSÕES.....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
APÊNDICE 1	53
APÊNDICE 2	58
APÊNDICE 3	61
APÊNDICE 4	64

1. INTRODUÇÃO

O tema deste trabalho é centrado na sustentabilidade na construção civil, mais especificamente no concreto e como implementar a reciclagem e reutilização na sua produção em massa. Tendo em conta que o setor da construção é um dos maiores consumidores de recursos naturais e que o concreto é uma constante na grande maioria das obras, se aprofundar nesse tema e encontrar alternativas que diminuam a geração de resíduos e a emissão de CO₂ é importante para atingir um mundo mais sustentável.

O cimento e o concreto são essenciais para a construção na atualidade. Em 2020, mesmo com a pandemia do Covid-19 no Brasil, o consumo de cimento apresentou 10,6% de crescimento, totalizando 60,6 milhões de toneladas consumidas no país. Esse número resulta em um consumo per capita de 286kg/hab/ano (SNIC, 2020).

Por causa da abundância do recurso, fácil operação, durabilidade e versatilidade eles são os materiais da construção mais utilizados no mundo. Em 2019, o uso, transporte, produção e demolição representaram aproximadamente 10% da emissão global de CO₂ relacionada a energia, que inclui combustível, consumo de energia elétrica e decomposição de carbonato (CAO *et al.*, 2021).

A divisão de População da ONU disponibilizou em 2019 novas projeções populacionais, e foi estimado que em 2050 a população mundial será de 9 bilhões. De acordo com o *World Urbanization Prospects* atualmente, 54% da população mundial vive em áreas urbanas, em 2050 a proporção pode chegar a 66%, o crescimento populacional e a urbanização podem levar a uma população de 6 bilhões de pessoas vivendo em áreas urbanas em 2045. Tais projeções indicam que a demanda de recursos naturais vai continuar aumentando, por isso é importante desenvolver técnicas e estratégias para diminuir o impacto ambiental de tais atividades.

A adoção da reciclagem, que consiste no reaproveitamento de materiais usando-os como matéria-prima de um novo produto é uma ótima forma de diminuir o impacto ambiental do uso do cimento e concreto. Assim sendo, tendo em conta a enorme quantidade de resíduos que são gerados diariamente no mundo, muitos materiais, após passarem por um processo industrial, podem ser tão eficientes quanto os materiais que são comumente utilizados na construção civil.

Logo a matéria-prima de outros setores, como a utilização de pó de vidro ou resíduos industriais como materiais cimentícios suplementares, pode ser uma alternativa para a diminuição da extração exacerbada dos recursos naturais do planeta, já que ao invés de

serem descartados, esses materiais serviriam de substitutos para a produção de cimento e de concretos. Assim, pode-se diminuir a emissão de CO₂ e evitar que mais matérias-primas sejam retiradas do meio-ambiente.

Outra forma de poupar esses recursos é através da reutilização, que consiste no reaproveitamento de materiais, tal como a reciclagem, mas podendo ser utilizada sem anteriormente ter passado por nenhum processo que altere suas características, sendo assim, uma solução ainda melhor.

É importante para o futuro do planeta que o setor da construção civil adapte as noções de reciclagem, reutilização e construção sustentável na produção em massa, pois esses conceitos são ainda pouco utilizadas no ramo, principalmente a nível nacional, mas terão uma importância muito significativa nos próximos anos.

Dado o risco de esgotamento dos recursos naturais, a sustentabilidade na construção civil é um tema que é discutido na área nos últimos anos. Técnicas para atingir uma construção responsável, com o mesmo nível de qualidade do concreto convencional vem sendo desenvolvidas e estudadas, pensando no futuro e se atentando aos riscos que as técnicas atuais apresentam.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é analisar os principais materiais utilizados como materiais cimentícios suplementares na produção do concreto e sua influência na resistência à compressão do concreto.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir do objetivo principal, foram definidos os objetivos específicos:

- a) A partir de resultados disponíveis na literatura, elaborar um banco de dados com as seguintes informações: tipo e teor de substituição do cimento pela adição mineral, relação água/cimento e resistência à compressão dos concretos;
- b) Fazer uma análise comparativa da influência do uso de cinzas volantes, cinzas da casca de arroz, pó de vidro e escória de alto forno na resistência à compressão dos concretos;
- c) Avaliar, dentre os teores de substituição avaliados, qual produz maior efeito nos valores de resistência à compressão dos concretos.

1.2 JUSTIFICATIVA

O setor da engenharia civil é um dos maiores responsáveis pela geração de resíduos, consumo de recursos naturais, aumento do consumo de energia, desperdício de água e emissão de CO₂ no mundo. Em 2019, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), apontou em seu relatório que das 75,8 milhões de toneladas de resíduos recebidas nas unidades de processamento em todo o país, 4,4 milhões de toneladas são de resíduos da construção civil.

O concreto comum tipicamente contém cerca de 12% de cimento, 8% de água de mistura e 80% de agregado por massa. Isso significa que, além do 1,5 bilhão de toneladas de cimento que está sendo utilizado hoje, o concreto está consumindo anualmente 9 bilhões de toneladas de areia e pedra junto com 1 bilhão de toneladas de água de mistura. Anualmente isso representa 11,5 bilhões de toneladas de uso de recursos naturais no mundo (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Além do uso de recursos não renováveis, segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), entre os anos de 1990 e 2019, o setor da construção civil conseguiu reduzir em 19% suas emissões de carbono, de 700kg CO₂/t cimento para 564kg CO₂/t (contra uma média anual de 635kg CO₂/t). Apesar de ser um bom avanço, ainda agride muito o meio ambiente e precisa continuar a ser reduzido.

A produção de cimento consome matérias-primas naturais não renováveis, matérias-primas residuais e energia térmica e elétrica. Na produção do cimento, cerca de 90% das emissões e 90% do consumo de energia ocorre na produção de clínquer. Se for reduzido o teor de clínquer, especialmente quando substituído por resíduos industriais com propriedades ligantes ou fíler calcário, as emissões podem ser muito reduzidas (JOHN, 2011).

Diminuir a emissão de carbono vai incluir todas as etapas do ciclo de vida do cimento. A primeira etapa é a fabricação envolvendo produtores de cimento e a cadeia de suprimentos associada. A segunda é o estágio material que envolve os produtores de concreto e os profissionais que prescrevem os critérios de construção, como engenheiros. A terceira consiste na etapa de uso e projeto envolvendo arquitetos, projetistas, clientes e construtoras. A quarta é a fase de fim de vida e reciclagem, envolvendo empresas de demolição e reciclagem. Para atingir o objetivo de descarbonização deste setor, é necessário envolver todas as fases e superar os desafios em cada cadeia de valor, ou seja, a forma como se projeta, constrói, se utiliza e desmantela estruturas cimentícias (BELAÏD, 2022).

Considerando que a demanda por concreto cresce mais a cada ano, é importante aprofundarmos os conhecimentos em medidas que diminuam o uso de cimento, utilizando produtos residuais de outras indústrias e reutilizando os resíduos da própria construção civil para obter um concreto mais sustentável e diminuir os impactos ambientais causados pela indústria da construção civil.

De acordo com ROADMAP (2019), a produção de cimentos com escória granulada de alto forno (subproduto da obtenção de ferro gusa), cinzas volantes (resíduos das termelétricas a carvão mineral), argilas calcinadas (produzidas a partir de minas de argila) e fíler calcário (minas de calcário), além de diversificar as aplicações e características específicas do cimento, representa uma solução ambientalmente correta para subprodutos de outros processos produtivos e para a preservação de recursos naturais não renováveis.

Por diminuir o consumo de clínquer por tonelada de cimento, essas adições propiciam a redução das emissões de CO₂ e, conseqüentemente, contribui para a redução no processo de queima de combustíveis e a emissão por calcinação/descarbonatação, além de contribuir para a preservação de jazidas (ROADMAP, 2019).

O uso de substitutos de clínquer no cimento ou ainda a utilização de materiais cimentícios suplementares em concretos frequentemente apresenta vantagens relacionadas com a maior durabilidade e vida útil de estruturas de concreto: baixa permeabilidade, maior resistência ao ataque de cloretos e sulfatos, prevenção das reações álcali-agregado, elevada resistência à compressão do concreto em idades mais avançadas (ROADMAP, 2019). Este trabalho é uma revisão sistemática da literatura, em que foi realizada uma busca sobre os materiais cimentícios suplementares mais utilizados atualmente, quais teores empregados e o efeito na produção de concretos sustentáveis.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. SUSTENTABILIDADE

No final do século XVIII, houve um grande crescimento populacional que gerou apreensão em estudiosos da época e isso culminou nas primeiras definições e teorias sobre a sustentabilidade. Malthus, que era um economista e demográfico inglês defendia a ideia de que o controle de natalidade era imprescindível, pois a população crescia exponencialmente enquanto a produção de alimentos crescia de forma aritmética, o que ocasionalmente acarretaria no colapso da população em detrimento da falta de alimento.

Segundo Lucci *et. al.* (2005, p. 320):

“A explosão demográfica do século XX foi um fenômeno do mundo subdesenvolvido, que a partir da década de 1950 passou a registrar elevadas taxas de crescimento demográfico. Alguns países subdesenvolvidos chegaram a dobrar a sua taxa de crescimento em menos de três décadas. Foram esses países que mais contribuíram para o crescimento da população mundial nesse século. Atualmente eles concentram 80% da população do planeta, esse índice tende a aumentar. [...] O fenômeno da explosão demográfica assustou o mundo e fez surgirem novas teorias demográficas. As primeiras associavam o crescimento demográfico à questão do desenvolvimento e propunham soluções antinatalistas para os problemas econômicos enfrentados pelos países subdesenvolvidos. Ficaram conhecidas como teorias neomalthusianas, por serem catastróficas e apontar o controle populacional como única saída”

Apesar da teoria Malthusiana ser questionada e rebatida, o termo sustentabilidade começou a ser amplamente abordado somente após a Primeira Revolução Industrial, que deu início a um crescimento desenfreado, a urbanização e conseqüentemente a poluição, desmatamento e contaminação da água e do solo.

Bossel (1999) apontou que no passado, a sustentabilidade da sociedade humana não estava em risco, pois a mudança climática deixou muito tempo para a resposta adaptativa e evasão. Ameaças para a sustentabilidade de um sistema requerem atenção se o ritmo de mudança alcança a velocidade com a qual o sistema pode responder adequadamente. A sustentabilidade da vida humana agora está ameaçada por dois fatores: a dinâmica de sua tecnologia, economia e população aceleram o ritmo das mudanças ambientais e sociais, enquanto a crescente inércia estrutural reduz a habilidade do tempo de resposta, tornando a sustentabilidade da vida humana uma preocupação.

Para Portney (2015), sustentabilidade é sobre encontrar algum tipo de estado estável para que a Terra ou alguma parte dela possa suportar a população humana e o crescimento econômico sem ameaçar a saúde dos humanos, animais e plantas. A premissa básica da sustentabilidade é que os recursos do mundo não podem ser usados, esgotados e danificados indefinidamente. Não somente esses recursos vão acabar eventualmente, mas a exploração deles realmente impede a capacidade da vida de persistir e prosperar.

Por ser um tema recorrente e ter muitas teorias e estudiosos discutindo o tema, existem muitas definições diferentes de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável. Para conseguir a equidade social, democracia, aplicar práticas sustentáveis entre outros objetivos, vários eventos definiram diretrizes, metas e objetivos para alcançar o desenvolvimento sustentável.

Na Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente que ocorreu em 1987 foi apresentado o Relatório de Brundtland que definiu desenvolvimento sustentável como “aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas necessidades”.

Vasconcelos (2011) destaca que os preceitos do Relatório de Brundtland foram transformados em propostas, expostas na Convenção Quadro das Nações Unidas (COP), sobre as mudanças climáticas, conhecidas também como Rio 92, Eco-92, UNCED 92 ou ainda Cúpula da Terra, ocorrida na cidade do Rio de Janeiro no ano de 1992.

Vários outros eventos foram surgindo, como o COP 21 que aconteceu em 2015 que criou um acordo com o intuito de mitigar as emissões de CO₂ e das alterações climáticas. Eles chegaram em um acordo global sobre as mudanças climáticas. Essas ações culminaram em novos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), baseados nos oito objetivos do milênio (ODM).

A agenda para o desenvolvimento sustentável pós-2015, agora chamada Agenda 2030, corresponde a um conjunto de programas, ações e diretrizes para orientação dos trabalhos das Nações Unidas e de seus países membros rumo ao desenvolvimento sustentável do planeta (ONU, 2016).

2.2.SUSTENTABILIDADE DO CONCRETO

Segundo Algarvio (2009), a engenharia civil teve o seu início entre 4000 e 2000 a.C., no Egito e na Mesopotâmia, quando os humanos viram a necessidade de construir abrigos assim que começaram a abandonar a vida nômade.

Com o desenvolvimento das sociedades e principalmente depois da Primeira Revolução industrial o setor da construção civil ganhou força, e com isso cresceu também o uso desenfreado dos recursos naturais. Conto (2016) aponta que além de grande consumidor de recursos naturais, estima-se que esse setor consuma em torno de 9,4 ton/hab.ano de materiais de construção. Além do fato de que cada tonelada de concreto produzido libere uma tonelada de CO₂ no meio ambiente.

As empresas que fornecem insumos para a construção civil vêm consumindo gradativamente recursos naturais do planeta. Os resíduos oriundos dessas atividades não deixam de ser recursos que o ambiente fornece, os quais são modificados pelo ser humano para sanar necessidades e para administrar o setor da indústria de construção, ocorrendo, dessa forma, o desenvolvimento econômico de uma região (KARPINSK, 2009).

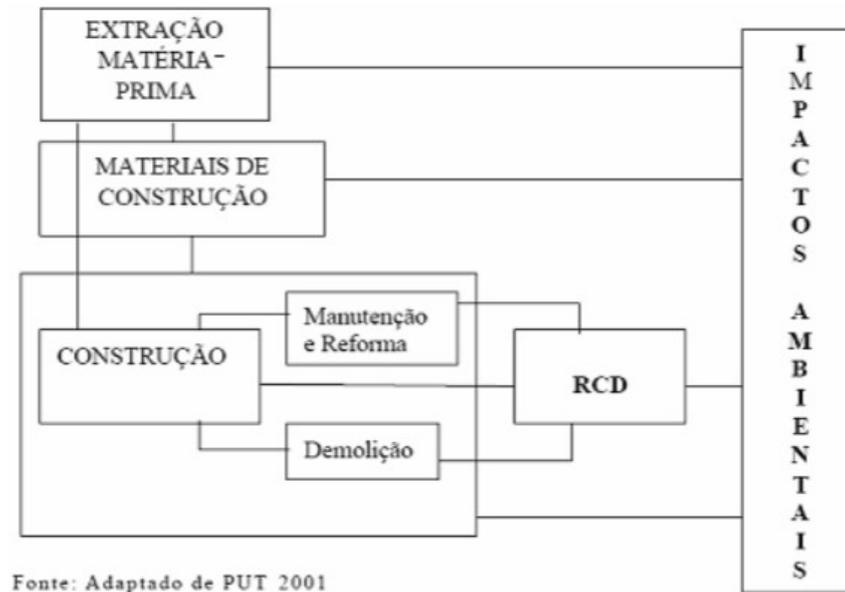
Por possuir uma posição de destaque na economia brasileira a indústria da construção civil é responsável por impactos ambientais, sociais e econômicos consideráveis. Isso é provado pelo crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) do setor da construção civil superar o do país. Em 2019, a indústria da construção civil movimentou 288,0 bilhões de reais (IBGE, 2019).

Roque (2019) aponta que com o mercado cada vez mais exigente e com o aumento da concorrência, produzir de modo sustentável se tornou um diferencial competitivo. A sustentabilidade na construção civil trata não só da redução do desperdício de materiais, mas de ações que permitam reduzir custos e insumos, que reaproveitem e promovam o uso inteligente de recursos naturais em obras de engenharia e que promovam o desenvolvimento econômico, regional e social. Não há como inserir sustentabilidade na construção civil, se esta não fizer parte desde a concepção do projeto.

A indústria da construção impacta significativamente no meio ambiente, na economia e na sociedade. Globalmente, a indústria da construção consome 40% da energia total de produção, 12 a 16% de toda água disponível, 32% dos recursos renováveis e não renováveis, 25% de toda a madeira, 40% de todas as matérias-primas, produz de 30 a 40% de todos resíduos sólidos e emite de 35 a 40% de CO₂ (DARKO *et al.*, 2017, SON *et al.*, 2011).

A Figura 1 mostra como o setor da construção civil causa impactos ambientais em todas as suas etapas, desde a extração da matéria-prima da natureza até a demolição das construções, causando resíduos da construção e, conseqüentemente, gerando impactos no meio ambiente.

Figura 1: Impactos ambientais nas etapas da construção

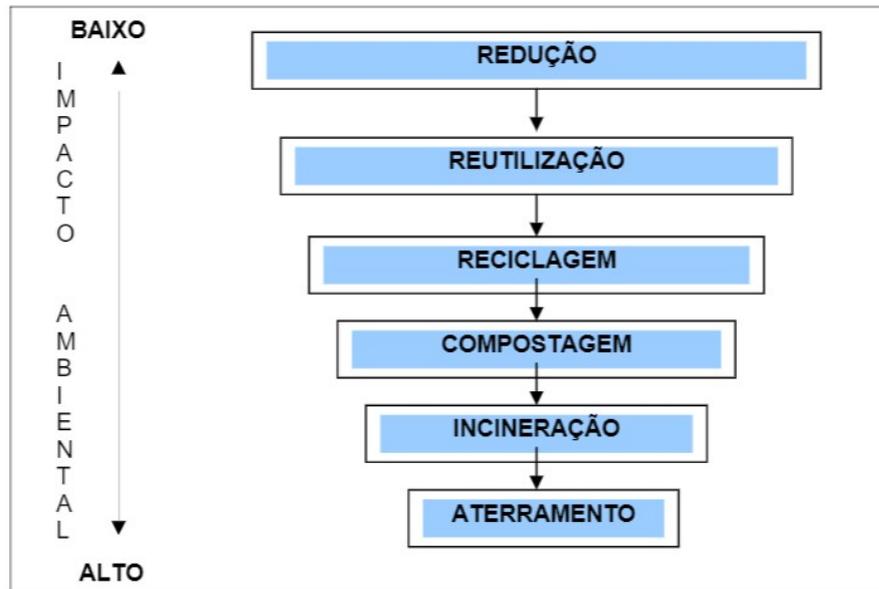


Fonte: PUT *apud* SCHNEIDER (2003)

Para Teodoro (2011), a construção sustentável procura seguir as premissas do desenvolvimento sustentável de forma a não esgotar os recursos naturais e a desenvolver métodos ambientalmente corretos de produção e consumo, que garantam a sobrevivência dos ecossistemas sem abdicar da evolução da tecnologia.

Como foi mencionado anteriormente, a construção civil é uma gera muitos resíduos e cada modo de disposição de resíduos da construção e demolição gera maior ou menor impacto ambiental. Logo, para tornar a construção civil mais sustentável, é necessário adotar mais redução, reutilização e reciclagem nos processos construtivos, como é exibido na Figura 2.

Figura 2: Nível de impacto ambiental de acordo com a disposição de RCD



Fonte: PENG *et al* apud LEITE (2001)

John (2000) afirma que a redução do impacto ambiental da construção civil é uma tarefa complexa, por isso, se faz necessário agir em várias frentes de maneira combinada e simultânea.

Na produção do concreto, o uso de clínquer na produção do cimento é o processo que gera a maior emissão de CO₂ na atmosfera, portanto a utilização de materiais cimentícios suplementares é uma ótima ferramenta para tornar o concreto sustentável.

Segundo Snerrlings (2014), os materiais cimentícios suplementares são materiais que têm comportamento hidráulico ou pozolânico. Os ligantes hidráulicos podem endurecer quando submersos em água formando produtos cimentícios em uma reação de hidratação. As escórias de alto-forno tem uma atividade hidráulica relativamente baixa quando comparada com o cimento Portland e a ativação é feita por meios químicos ou físicos para acelerar a reação da hidratação (LANG, 2002). A adição de hidróxidos alcalinos, como sulfatos na forma de gesso, anidrita e frequentemente pela adição de cal ou materiais produtores de cal, como o cimento Portland, podem ativar as escórias de alto forno quimicamente. Os materiais hidráulicos apresentam maior eficiência na substituição do cimento do que os materiais que apresentam comportamento pozolânico.

Uma pozolana é geralmente definida como um ou material silicioso e aluminoso, que por si só apresenta pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas que, de forma finamente dividida e na presença de umidade, reagem quimicamente com hidróxido de

cálcio em temperaturas normais para formar compostos que possuem propriedades cimentícias (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

No Brasil, a norma que regula a adição de materiais na produção do cimento é a NBR 16697 (ABNT, 2018), em que são indicadas as siglas e classes de resistência de acordo com a adição que é utilizada em determinado tipo de cimento. E a norma também determina o limite de pozolanas e escória granulada de alto forno que podem ser adicionadas na composição do cimento (Figuras 3 e 4).

Figura 3: Siglas e classes do Cimento Portland

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo		
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b –		
	Com adição	CP I-S				
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E				
	Com material carbonático	CP II-F				
	Com material pozolânico	CP II-Z				
Cimento Portland de alto-forno		CP III				
Cimento Portland pozolânico		CP IV				
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI ^d			
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 ^c			
	Não estrutural	CPB	–	–		

^a O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^b O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^c As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.

^d Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018)

Figura 4: Limites de composição do Cimento Portland

Designação normalizada		Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material 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 ^a			ARI	90 – 100	0	0	0 – 10	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB			25, 32 ou 40	-	75 – 100	-	-	0 – 25
	Não estrutural				-		-	50 – 74	-	-

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

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018)

Mehta e Monteiro (2014) apontam que a única forma de diminuir o impacto da produção do concreto é desenvolver ecologia industrial, que resumidamente é os rejeitos de uma indústria serem substitutos reciclados da matéria-prima de outras indústrias, diminuindo o impacto ambiental de ambas.

Porém, o tema é muito amplo e existem várias medidas que podem ser tomadas para tornar aumentar a sustentabilidade do concreto. JOHN (2011) discorre sobre possíveis estratégias que podem ser utilizadas para atingir esse objetivo, entre elas: a redução na informalidade do processo de extração de agregados e madeira, que gera destruição descontrolada de áreas protegidas e por isso é aconselhado exigir licenciamento ambiental dos fornecedores. Outra medida que pode ser tomada é a redução de perdas, concretos moldados em obra têm perdas maiores que os dosados em central ou usinados. Portanto, utilização de concretos usinados, melhoria do estoque de materiais, controle dimensional de formas, melhoria do planejamento e controle de horário de concreto usinado, são estratégias adequadas na redução de desperdício. Aumento na resistência mecânica gera estruturas com maior durabilidade e mais seguras, portanto reduz o consumo de matérias-primas. No geral, qualquer processo que diminua a emissão de CO₂ na atmosfera torna o concreto mais sustentável: a otimização da dosagem do concreto, do uso de ligantes, redução do uso de água e matérias-primas na confecção do concreto e a diminuição da quantidade de clínquer utilizada.

2.2.1. ADIÇÕES MINERAIS

2.2.1.1. Cinzas volantes

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), cinzas volantes são resíduos finamente divididos que resultam da combustão de carvão mineral pulverizado ou granulado com atividade pozolânica.

Como grandes quantidades de cinzas permanecem inutilizadas na maioria dos países do mundo, foram feitas tentativas de usar as cinzas na produção de agregados leves. Em um processo de fabricação típico, a cinza é peletizada e então sinterizada em um forno rotativo, forno de eixo ou uma grelha móvel em temperaturas na faixa de 1000 a 1200°C. Variações na finura e teor de carbono das cinzas são um grande problema no controle da qualidade do agregado sinterizado de cinzas (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A cinza volante, um subproduto principal das usinas termoelétricas a carvão, é bem aceita como um material pozolânico, que pode ser usado como componente de cimentos Portland misturados ou como adição mineral em concreto. Normalmente, 15% a 20% de substituição têm um efeito benéfico na trabalhabilidade e na economia de custos do concreto, mas pode não ser suficiente para melhorar suficientemente a durabilidade ao ataque de sulfato, expansão álcali-sílica e fissuração térmica. Para este efeito, estão a ser utilizadas maiores quantidades de cinzas volantes, na ordem dos 25% a 35%. Embora 25% a 35% de cinzas volantes em massa do material cimentício seja consideravelmente superior a 15% a 20%, isso não é alto o suficiente para classificar as misturas como concreto com alto volume de cinzas volantes (*High Volume Fly Ash – HVFA*). Com base nas considerações teóricas e experiência prática dos estudos, foi determinado que, com 50% ou mais de substituição do cimento por cinzas volantes, é possível produzir misturas de concreto sustentáveis e de alto desempenho que apresentam boa trabalhabilidade, aumento na resistência última e maior durabilidade (MEHTA, 2004).

HERRERA *et. al.* (2016) e PASTARIYA, (2016) apontam nos seus trabalhos sobre a influência das cinzas volantes na trabalhabilidade do concreto. Nos resultados obtidos por eles pode-se observar que para teores de até 15% a 20% de substituição, tem-se uma boa trabalhabilidade do concreto, porém conforme a proporção de cinzas volantes adicionadas aumenta, a trabalhabilidade do concreto diminui. Contudo a trabalhabilidade do concreto também é muito influenciada pelo tipo de cinza volante que se adiciona na mistura (LI *et. al.*, 2016)

O cimento Portland normalmente contém 95% de clínquer Portland e 5% de gesso. Um método bem conhecido que já está ajudando a reduzir o impacto da indústria de cimento na energia e nas emissões de dióxido de carbono é produzir cimentos Portland misturados

contendo muito menos de 95% de clínquer Portland. Hoje, em muitos países, cimentos Portland misturados contendo 15 a 25% de cinzas de carvão ou pó de calcário e 30 a 40% de escória granulada de alto-forno estão sendo amplamente produzidos (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

De acordo com a ASTM C 618 (2005), as cinzas volantes são classificadas em duas classes diferentes e segundo a sua composição: classe C e classe F. Quando a soma dos teores dos compostos de silicato, alumina, óxido de ferro e de cálcio for maior que 50%, elas são classificadas como classe C. Quando os teores ultrapassam os 70%, elas são classificadas como classe F.

2.2.1.2. Escória de alto forno

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), a escória granulada de alto forno é o subproduto da produção do ferro gusa, resultante do tratamento de minério de ferro em alto-forno, obtido sob forma granulada por resfriamento brusco, na forma vítrea, constituído em sua maior parte de silicatos e alumínio-silicatos de cálcio.

Na sua produção, quando a escória é resfriada lentamente ao ar, os componentes minerais geralmente presentes como melilitas cristalinas, não reagem com a água em temperatura normal. Quando moído em partículas muito finas, o material será fracamente cimentício e pozzolânico. No entanto, se a escória líquida for rapidamente resfriada a partir de uma alta temperatura por água ou uma combinação de ar e água, a maior parte da cal, magnésia, sílica e alumina são mantidas em um estado não cristalino ou vítreo. O produto temperado em água é chamado de escória granulada devido às partículas do tamanho de areia; o material extinguido pelo ar e uma quantidade limitada de água está na forma de pellets e é chamado de escória peletizada (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), embora as cinzas volantes com alto teor de cálcio sejam de origem relativamente recente e a produção e uso de escória granulada de alto-forno em produtos de cimento tenha mais de 100 anos, existem semelhanças no caráter mineralógico e na reatividade dos dois materiais. Ambos são essencialmente não cristalinos, e a reatividade do vidro com alto teor de cálcio em ambos os casos parece ser semelhante. Em comparação com a cinza volante, com baixo teor de cálcio, que geralmente não contribui muito para a resistência dos produtos de cimento Portland por duas semanas após a hidratação, a contribuição significativa da força pela cinza volante com alto teor de cálcio ou pela escória de alto-forno pode geralmente ocorrer tão cedo quanto 7 dias após a hidratação. Quando usadas em grandes quantidades, algumas cinzas com alto teor de cálcio tendem a retardar o tempo de pega das misturas de cimento Portland com cinzas.

Segundo Lee *et. al.* (2019), no estado fresco do concreto, a escória de alto-forno melhora a coesão e a trabalhabilidade, e as suas características também auxiliam no aumento da resistência à compressão do concreto no estado endurecido.

2.2.1.3. Pó de vidro

De acordo com CEMPRE (2011) o Brasil produz, por ano, cerca de 980 mil embalagens de vidro, e dessas embalagens, apenas 47% é reaproveitado como matéria-prima reciclada na forma de cacos e 3% do montante é despejado. O principal mercado para destinação do vidro é composto pelas vidrarias, que compram o material de cooperativas e sucateiros para a realização da reciclagem do mesmo devido o material apresentar ciclos infinitos. Atualmente, pesquisadores do setor da engenharia civil vêm incorporando no concreto diversos materiais com características pozolânicas, como o pó de vidro, a fim de investigar as novas propriedades do concreto realizado.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), os materiais pozolânicos são compostos silicosos ou silico-aluminosos que possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante quando estão isolados, no entanto, quando são transformados em partículas miúdas e com acréscimo de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando substâncias com propriedades aglomerantes.

Ferrari e Jorge (2014) afirmam que o vidro tem diversas aplicações, pois o mesmo apresenta propriedades propícias para isso, como, ser um óxido metálico superesfriado transparente de elevada dureza, essencialmente inerte e biologicamente inativo, com baixa porosidade, absorvidade, dilatação e condutibilidade térmica e capaz de suportar pressões de 5800 a 10800 kg/cm². Dyer e Dhir (2001) apontam que o vidro contém uma grande quantidade de silício e cálcio, tornando o material, em teoria, e de acordo com as definições da NBR 12653 (ABNT, 2014), pozolânico dependendo a granulometria usada.

2.2.1.4. Cinza da casca de arroz

As cascas de arroz são produzidas durante a operação de descasque do arroz. Por serem volumosas, as cascas apresentam um enorme problema de descarte para os moinhos de arroz. Cada tonelada de arroz em casca produz cerca de 200 kg de casca que, na combustão, rende aproximadamente 40 kg de cinzas. As cinzas formadas durante a queima em campo aberto ou combustão descontrolada em fornos geralmente contêm uma grande proporção de minerais de sílica reativos menos cristalinos, como cristobalita e tridimita, e devem ser moídos até um tamanho de partícula muito fino para desenvolver alguma atividade pozolânica. Por outro lado, uma cinza altamente pozolânica pode ser

produzida por combustão controlada quando a sílica é retida em uma forma não cristalina e em uma microestrutura celular (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Amostras produzidas comercialmente deste tipo de cinza da casca de arroz apresentam 50 a 60 m²/g de área superficial por adsorção de nitrogênio. O efeito das condições de processamento nas características da cinza da casca de arroz e os efeitos benéficos da cinza amorfa nas propriedades do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Righi (2015) explica que a combustão controlada desta casca remove a matéria orgânica de sua composição (lignina e celulose), que é parte predominante neste material, resultando em uma cinza que apresenta teor elevado de sílica vítrea microporosa, uma vez que em torno de 20% da casca de arroz é formada por silício. O teor sílica pode chegar em média a 90% (SENSALE, 2006).

As cinzas do arroz, quando queimadas em situações não controladas, o que acontece usualmente no processo de beneficiamento do arroz, possuem uma maior quantidade de materiais cristalinos, com índice de amorfismo baixo, não sendo as mais recomendadas para uso como pozolana (DAL MOLIN, 2011). Isto ocorre devido a queima incompleta da matéria orgânica, principalmente carbono ou da forma de suas partículas. Quando se trata de matéria orgânica, a solução seria uma nova queima ou tratamentos químicos com ácido. Quando se trata de forma das partículas, deve-se realizar a moagem da cinza. Dal Molin (2011) salienta que as cinzas da casca de arroz, consideradas cristalinas, após moagem de 8 horas, apresentaram resultados em argamassas semelhantes aos indicados por cinzas da casca de arroz amorfas com moagem de 2 horas. Isso ocorre, pois, cinzas cristalinas possuem grandes quantidades de materiais amorfos que se tornam reativos apenas quando apresentam uma maior área específica, consequência da moagem de seus grãos.

AMRAN *et. al.* (2021) apontaram que a substituição da cinza da casca de arroz diminui a trabalhabilidade do concreto, acarretando na necessidade do uso de superplastificantes e maior quantidade de água para melhorar essa característica.

3. METODOLOGIA

3.2. CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

O interesse deste trabalho é estudar as técnicas desenvolvidas para utilizar resíduos de outros setores como materiais cimentícios suplementares diminuindo o consumo de cimento e, dessa forma, obtendo um concreto sustentável que diminua as emissões de CO₂

na atmosfera. Os dados foram comparados pelo resultado do ensaio de resistência à compressão do concreto.

Esta pesquisa tem como objetivo gerar conhecimento que seja útil para a ciência e tecnologia, visto que existem muitos estudos sobre o objeto deste trabalho, havendo necessidade de compilar e aprofundar os conhecimentos já adquiridos. O procedimento de coleta escolhido para o desenvolvimento deste estudo foi a pesquisa bibliográfica, objetivando reunir as informações existentes sobre o tema que fossem úteis para o intuito do trabalho.

À vista disso, este estudo vai discutir o tema da pesquisa fundamentado em conceitos defendidos por autores que apresentem informações seguras.

3.3. PROCEDIMENTO DA COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Para a realização deste estudo foi utilizada a documentação indireta que consiste na etapa do estudo que busca extrair as informações prévias sobre o tema em questão, fazendo um levantamento dos dados por meio da pesquisa bibliográfica (MARCONI e LAKATOS, 2003).

O primeiro passo para o desenvolvimento da pesquisa foi a definição de palavras-chave, tanto em português quanto em inglês, para determinar a *string* de busca do estudo. Depois de uma busca preliminar para observar a eficácia das palavras na busca do tema, a *string* ficou definida como: (“green concrete” or “concrete sustainability” or “supplementary cement materials”). Para essa pesquisa serão utilizados acervo digital de domínio público e de acesso restrito, como Google Acadêmico, *Web of Science*, *Scopus* e *SciELO*. Esses instrumentos são eficazes quanto ao estudo dos métodos estruturais. Para refinar a pesquisa foram definidas algumas restrições para aparecer somente os estudos de maior interesse.

Os dados dessa pesquisa foram coletados por meio de pesquisa bibliográfica em, artigos científicos, monografias e teses, em inglês e português, por meio da disponibilidade em meios eletrônicos.

Para a seleção do material utilizado, foram consideradas como critério de inclusão as bibliografias relacionadas ao tema e objetivos desta pesquisa, e as que não satisfizerem esses critérios serão descartadas.

Para aprimorar a pesquisa, foi utilizado o software *State of the Art Through Systematic Review* (Start) que foi criado na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (Lapes), ele auxilia no planejamento, execução e sumarização de trabalhos acadêmicos.

Na parte do planejamento, que já foi citada anteriormente, foi definido o objetivo, o problema principal do trabalho, palavras chave e sinônimos, os idiomas, a base de dados, as fontes de seleção e a definição de critérios de seleção. A execução consistiu em exportar os estudos selecionados nos sites escolhidos para a pesquisa bibliográfica para o software, que classifica os trabalhos de acordo com número de citações e pontuação. A importação foi feita com a extensão "Bibtex" que é compatível ao software.

Após a importação, todos trabalhos vão para aba não classificados. Então são gerados quatro quadrantes, sendo Q1 para trabalhos com pontuação alta e muito citados, Q2 pontuação alta e pouco citados, Q3 pontuação baixa mas muito citados, e Q4 com pontuação baixa e pouco citados. Dentro dessa classificação de quadrantes, existe a opção de auto classificação, onde o software aceita 13% dos trabalhos do Q1 e rejeita 13% do Q4. Os demais estudos foram analisados caso a caso. Na análise manual dos artigos, foram observados os títulos e palavras-chave, voltando sempre nas definições do protocolo para poder aceitar ou rejeitar um a um. Concluída toda classificação, passou-se para fase de extração, onde uma análise mais minuciosa de cada artigo foi feita. Incluiu-se nessa etapa a leitura do resumo de cada trabalho para maior identificação do objetivo. Novamente os trabalhos foram aceitos ou rejeitados de acordo com o que foi pré-definido no protocolo. Na sequência, apenas os trabalhos aceitos foram para sumarização, onde a ferramenta fornece gráficos e várias outras informações dos trabalhos selecionados. Por fim, foi feita a leitura mais profunda dos trabalhos selecionados e o fichamento das informações para obter os dados de pesquisa.

A análise dos dados obtidos nos artigos selecionados vai ser dividida em duas etapas: a) Levantamento e elaboração de um banco de dados e b) Análises numérica e comparativa dos dados coletados sobre a resistência à compressão do concreto.

Para o levantamento do banco de dados, primeiramente foi feita a leitura dos 28 artigos selecionados, que foram divididos por categoria de material cimentício suplementar (cinza da casca de arroz, pó de vidro, cinzas volantes e escórias granuladas de alto forno).

Todos os resultados selecionados englobam os traços de referência e substituições de 2,5% a 100% do cimento por cinza da casca de arroz, pó de vidro, cinzas volantes ou escória granulada de alto forno.

No presente estudo, as análises foram realizadas como se fossem amostras diferentes, não houve tentativa numérica ou gráfica de encontrar alguma similaridade entre as duas variáveis, mas sim de encontrar um comportamento padrão no uso de materiais cimentícios suplementares e sua influência na resistência à compressão do concreto.

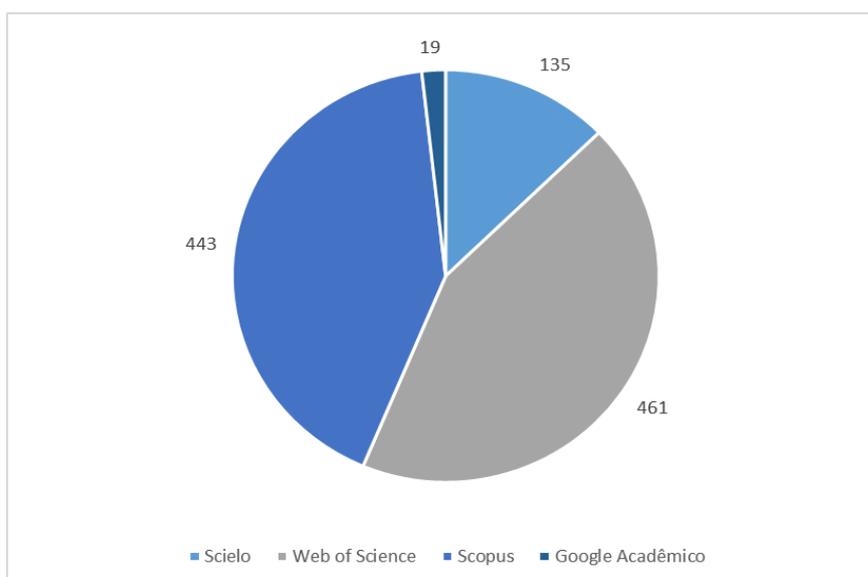
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. LEVANTAMENTO DO BANCO DE DADOS

Na base de dados *Web of Science* e *Scopus* a pesquisa foi restrita pelas áreas de estudo: “Engenharia Civil”, “Tecnologia de construção” e “Ciências multidisciplinares”. Foram aceitos somente os artigos em português e inglês, com “acesso aberto”. No *Web of Science* foram obtidos 461 resultados e no *Scopus* o número foi de 443.

No Scielo e no Google acadêmico não foi aplicado nenhum filtro quanto a área de estudo, porém as restrições de idioma, acesso e data de publicação foram mantidos. Resultando assim em 135 resultados do Scielo e 19 resultados no Google Acadêmico. Totalizando assim 1.058 resultados. No Gráfico 1 é possível visualizar a seleção por base de dados.

Gráfico 1: Escolha inicial dos trabalhos e suas bases de dados

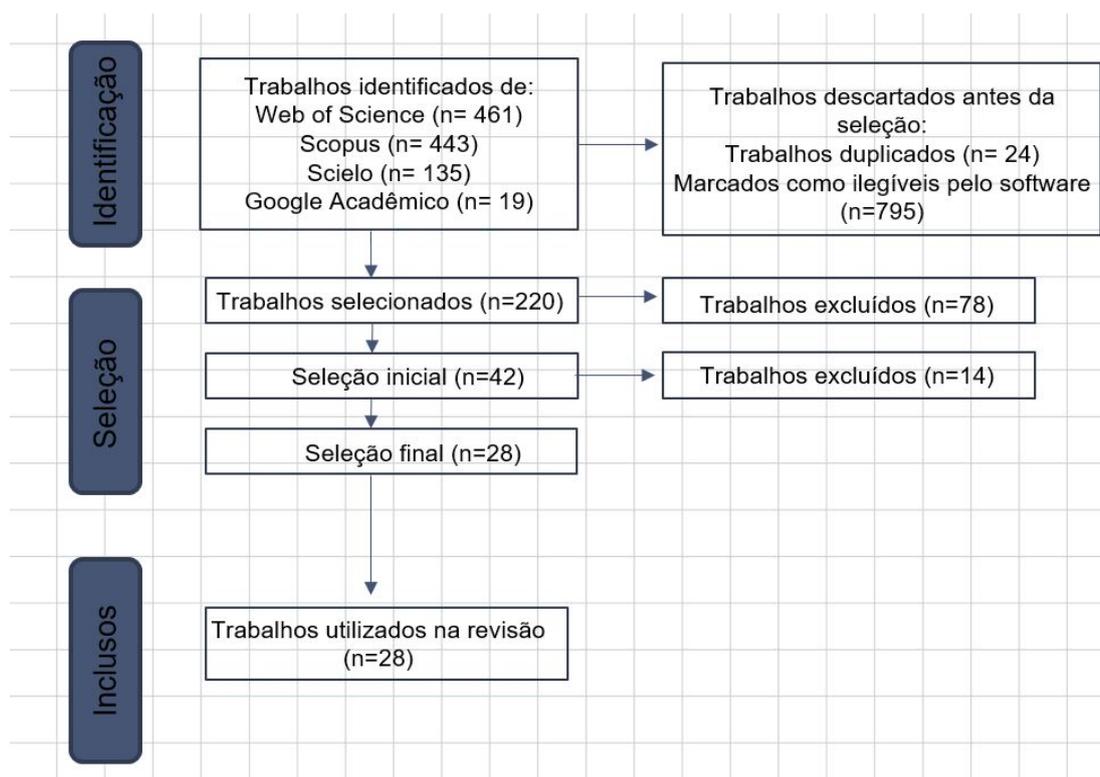


Fonte: Autora (2022)

Dos 1.058 trabalhos importados para o software, na primeira seleção foram identificados 24 trabalhos duplicados, 795 trabalhos foram rejeitados e 220 foram aceitos. Depois da checagem inicial, foi feita uma segunda seleção, que contava com a leitura dos resumos dos artigos, para identificar os artigos que estavam mais alinhados com o propósito deste trabalho e que poderiam auxiliar na escrita do mesmo. Por meio dessa filtragem foi possível selecionar 42 trabalhos que foram lidos integralmente por estarem diretamente

ligados ao tema pesquisado. Posteriormente, na extração dos resultados dos artigos para a construção do banco de dados, foi observado que alguns artigos não apresentavam os dados necessários para se realizar as análises, nessa seleção final foram escolhidos 28 artigos. A Figura 5 apresenta o fluxograma das fases de seleção dos artigos.

Figura 5: Fluxograma do processo de seleção dos artigos



Fonte: Autora (2022)

A utilização de materiais cimentícios suplementares é estudada mundialmente, tendo estudos no Brasil, Itália, Índia, Estados Unidos etc, como verificado neste trabalho. E é um assunto que vem ganhando mais atenção atualmente devido á urgência da melhora da questão ambiental no mundo, pela possibilidade da redução de CO₂ pelo setor da construção civil e também por possibilitar o descarte sustentável de resíduos de outras indústrias. Nos apêndices é apresentado um resumo das informações apresentadas nos artigos selecionados, como autor, relação água/cimento, adições utilizadas, teores de substituição e resistência à compressão do concreto.

A partir desses artigos, foram extraídos os resultados dos estudos realizados para montar o banco de dados e assim ser possível realizar a análise numérica dos dados.

4.2. BANCO DE DADOS

Os dados que foram utilizados foram obtidos a partir dos dados disponíveis na literatura. O critério de seleção dos artigos foi ter substituição parcial ou completa de cinzas volantes, cinzas da casca de arroz, escória de alto forno ou pó de vidro. Os artigos foram separados por tipo de adição e foi elaborada uma planilha que continha o teor de substituição, adições, a relação água/cimento e à resistência à compressão do concreto. As planilhas estão disponíveis nos Apêndices 1 a 4.

Cada teor de substituição foi associado à sua mistura de referência e durante esse processo, foi observado que alguns autores fizeram mais de uma mistura de controle, enquanto outros fizeram somente uma, ou seja, fizeram um concreto sem substituições e variaram a quantidade de adições, a relação água cimento e fizeram essas mesmas alterações nos concretos com substituição. Cada dado foi comparado a sua mistura de referência.

As análises levaram em conta a variação percentual entre os valores correspondentes aos teores de substituição e aqueles da mistura de referência. Isso foi feito pois a resistência do concreto nos ensaios de cinza volante variam entre 4,3 MPa e 105,9 MPa, e as outras adições tem uma variabilidade similar à essa; portanto uma variação de 1 MPa no primeiro indicaria aumento de 23,26% enquanto que para o concreto de 105,9 MPa representaria apenas 0,94%. Desse modo, em todas as análises foi considerada a variação percentual em relação ao concreto de referência.

Para a variável analisada, foram calculadas as seguintes medidas de centralidade: média, mediana, desvio padrão, maior e menor variação. É importante ressaltar que essas análises só foram feitas para os teores de substituição que apresentaram mais de 3 amostras, para as contas apresentarem um dado confiável. Nas Tabelas 1 a 4 é possível observar a variação dos resultados em relação ao traço de referência.

Tabela 1: Variação da resistência à compressão de concretos com cinzas volantes

Referência	Mistura	Substituição	Variação 7 dias (%)	Variação 28 dias (%)
Nicoara et. al. (2020)	1	10%	-11,51	-18,36
		20%	-27,09	-32,69
		30%	-30,93	-41,61
		40%	-47,18	-50,70
Pastariya e Keswani (2016)	1	2,5%	4,48	3,07
		5%	9,95	3,86
		10%	13,04	5,60
		20%	17,67	6,77
Yu et. al. (2018)	Mix 1.a	80%	-66,75	-55,58

	Mix1.b	80%	-6,20	-12,43
	Mix2.a	80%	-75,19	-69,65
	Mix 2.b	80%	-31,51	-31,63
	Mix3.a	85%	-80,65	-75,32
	Mix 3.b	85%	-31,76	-25,96
	Green concrete a	80%	-80,89	-74,95
	Green concrete b	80%	-30,77	-37,11
Amin et. al. (2019)	M2	10%	12,45	12,22
	M3	20%	16,74	16,08
	M4	30%	2,58	1,93
	M5	0%	136,91	136,33
	M6	10%	181,55	179,10
	M7	20%	185,41	182,64
	M8	30%	152,79	150,48
	M9	0%	162,23	159,81
	M10	10%	197,85	191,96
	M11	20%	203,86	198,71
	M12	30%	183,69	178,78
	Barbuta et. al. (2017)	B2a	10%	-
B2b		10%	-	-5,05
B2c		10%	-	-10,91
B3a		15%	-	-30,31
B3b		15%	-	-18,03
B3c		15%	-	-27,83
B4a		20%	-	-24,75
B4b		20%	-	-24,07
B4c		20%	-	-18,80
B5a		30%	-	-33,69
B5b		30%	-	-41,35
B5c		30%	-	-37,43
B6a		40%	-	-59,70
B6b		40%	-	-56,89
B6c	40%	-	-66,16	
Paliwal e Maru (2017)	0,6 LPDE+ 0 FA	0%	-2,66	-3,30
	0,6 LPDE+ 5 FA	5%	-3,72	1,83
	0,6 LPDE + 10 FA	10%	-5,32	7,69
	0,6 LPDE + 15 FA	15%	-11,70	3,30
	0,6 LPDE + 20 FA	20%	46,28	-42,12
Herrera et. al. (2010)		15%	-21,37	-15,40
		30%	-31,34	-25,29
	A	45%	-47,01	-45,29
		60%	-71,23	-61,38
		75%	-88,32	-83,91
		15%	-8,22	-12,43
	B	30%	-31,91	-31,35
		45%	-57,57	-47,03

		60%	-74,34	-64,59
		75%	-88,82	-83,78
		15%	-24,71	-14,33
		30%	-36,50	-33,64
	C	45%	-65,40	-58,26
		60%	-74,52	-69,47
		75%	-90,11	-84,42
	L24F20	20%	-9,57	1,60
	L24F40	40%	-19,62	2,40
	L24F60	60%	-30,62	-6,00
	L24F80	80%	-32,54	-16,40
	L35F20	20%	-12,13	5,80
	L35F40	40%	-9,19	16,81
	L35F60	60%	-30,51	0,00
	L35F80	80%	-39,34	-13,04
	H35F20	20%	-17,65	1,16
	H35F40	40%	-20,96	-1,16
	H35F60	60%	-34,56	-11,59
	H35F80	80%	-57,35	-26,96

Fonte: Autora (2022)

Tabela 2: Variação da resistência à compressão de concretos com cinzas da casca de arroz

Referência	Mistura	Substituição	Variação 7 dias (%)	Variação 28 dias (%)
Medeiros et. al. (2022)	PCA20MK20	20%	-	18,78
	PCA30MK20	30%	-	13,60
Amin et. al. (2019)	M2	10%	21,03	20,58
	M3	20%	15,45	14,79
	M4	30%	3,86	3,22
	M6	10%	22,28	21,50
	M7	20%	19,57	18,50
	M8	30%	8,33	7,35
	M10	10%	18,99	17,20
	M11	20%	15,55	14,11
	M12	30%	9,33	7,92
	Camilo (2018)	CCA 10% moída	10%	-12,09
CCA 20% moída		20%	-15,42	-7,66
CCA 30% moída		30%	-37,58	-34,88
CCA 10% britada		10%	-35,13	-36,31
CCA 20% britada		20%	-47,88	-50,09
CCA 30% britada		30%	-59,65	-68,82
Chopra et. al. (2015)	2	15%	24,83	32,97
	3	10%	12,41	12,26
	4	20%	4,83	9,54
Rodríguez (2006)	2	20%	13,41	-11,55

	3	30%	7,01	-15,67
	4	40%	-14,33	-30,93
Makul e Sua-iam (2018)	2	10%	-13,42	-15,69
	3	20%	-62,08	-56,92
	4	40%	-75,31	-70,62
	5	60%	-85,15	-84,00
	6	80%	-94,99	-93,69
	Isaia et. al. (2010)	M15	15%	-
15%			-	10,84
15%			-	16,27
M25		25%	-	11,07
		25%	-	12,95
		25%	-	13,40
N15		15%	-	11,07
		15%	-	18,37
		15%	-	31,82
N25		25%	-	13,15

Fonte: Autora (2022)

Tabela 3: Variação da resistência à compressão de concretos com pó de vidro

Referência	Mistura	Substituição	Variação 7 dias (%)	Variação 28 dias (%)
Pitarch et. al. (2021)	Man15	15%	-13,60	-4,96
	Man25	25%	-24,27	-9,54
	Man35	35%	-37,45	-18,89
	Man50	50%	-54,60	-33,78
	Mec15	15%	-21,97	-9,16
	Mec25	25%	-27,41	-13,55
	Mec35	35%	-36,82	-22,14
	Mec50	50%	-54,18	-35,50
Islam e Rahman (2017)	5% pó de vidro	5%	-4,74	-1,00
	10% pó de vidro	10%	-7,76	-1,99
	15% pó de vidro	15%	-15,95	-1,33
	20% pó de vidro	20%	-19,83	-2,66
	25% pó de vidro	25%	-28,88	-8,31
Paul et. al. (2018)	2	10%	-5,57	-7,16
	3	15%	-9,62	-8,31
	4	20%	-17,97	-17,78
	5	25%	-30,63	-24,94
Anwar (2016)	2	5%	-	9,97
	3	10%	-	16,56
	4	15%	-	5,64
	5	20%	-	-2,06
	6	25%	-	-21,93
	7	30%	-	-25,57
	8	35%	-	-40,70

	9	40%	-	-46,36
	10	45%	-	-50,90
	11	50%	-	-54,36
Khan et. al. (2020)	2	10%	-34,48	-26,24
	3	15%	-4,14	-19,31
	4	20%	-47,59	-25,25
	5	25%	-42,07	-24,26
	6	30%	-56,55	-43,07
	7	35%	-63,45	-54,46
Al-Zubaidi et. al. (2017)	Brown glass 1	11%	-9,11	-5,39
	Brown glass 2	13%	-24,10	4,13
	Brown glass 3	15%	-46,87	-35,37
	Green glass 1	11%	-64,33	-11,49
	Green glass 2	13%	-73,43	-4,13
	Green glass 3	15%	-80,27	-21,01
	Neon glass 1	11%	-11,01	1,08
	Neon glass 2	13%	2,47	14,00
	Neon glass 3	15%	-58,25	-59,78

Fonte: Autora (2022)

Tabela 4: Variação dos ensaios de escória de alto forno

Referência	Mistura	Substituição	Variação 7 dias (%)	Variação 28 dias (%)
Cahyani e Rusdianto (2021)	2	20%	-	9,13
	3	40%	-	17,68
	4	60%	-	-0,19
	5	80%	-	-17,49
Soares (2020)	F1	50%	-	5,71
	F3	50%	-	9,80
	F5	50%	-	-4,08
	C1	50%	-	-38,78
	C3	50%	-	-2,45
	C5	50%	-	5,31
	M1	50%	-	-68,57
	M3	50%	-	-46,94
	M5	50%	-	-37,55
	Mavroulidou e Martynková (2018)		100%	-9,48
G_1WG_1N_6M		100%	33,64	17,51
		100%	12,84	-2,19
		100%	-71,25	6,78
G_1,5WG_1N_1M		100%	-48,93	-55,14
		100%	-39,14	-21,88
		100%	-29,36	-35,01
G_1,5WG_1K_1M		100%	7,95	-12,25
		100%	-29,05	-21,44

		100%	-4,28	-31,29
	G_1,5WG_1K_4M	100%	32,72	14,00
		100%	60,86	35,45
		100%	66,97	21,01
		100%	-49,54	59,30
	G_K_6M	100%	-45,57	-47,26
		100%	-63,91	-37,86
		100%	-48,32	-72,65
Lee et. al. (2019)	EAF15	15%	-14,20	-4,14
	EAF15-G	15%	4,40	-0,28
	GBF15	15%	-6,95	-2,50
	GBF30	30%	-9,80	-10,94
	GBF30-G	30%	13,21	19,79
Alanyali et. al. (2009)	1,18-9,5mm NM	20%	-24,40	-19,93
	3,35-9,5mm NM	20%	-25,49	-19,76
	1,18-9,5mm NM	30%	-34,73	-26,69
	3,35-9,5mm NM	30%	-34,29	-27,20
	1,18-9,5mm NM	50%	-60,44	-53,38
	3,35-9,5mm NM	50%	-61,10	-52,36
Peng (2016)	CSC28	5%	-36,73	-15,95
	CSC32	8%	-55,60	-41,30
	CSC40	10%	-24,69	-17,94
Chen et. al. (2018)	1	15%	-	-0,44
	2	15%	-	10,50
	3	15%	-	5,25
	4	20%	-	0,00
	5	20%	-	4,60
	6	20%	-	1,09
	7	25%	-	-6,13
	8	25%	-	-3,94
	9	25%	-	-5,03

Fonte: Autora (2022)

Com a variação de cada adição realizada, foi possível selecionar os teores que apareceram com maior frequência e realizar as medidas de centralidade para analisar a eficiência da substituição de cada material e discorrer sobre os resultados.

4.3. ANÁLISE DOS EFEITOS DAS CINZAS VOLANTES

Para as análises das cinzas volantes foram selecionadas as substituições em que houve pelo menos 3 amostras, ou seja, aquelas com menos de 3 foram isoladas, sendo utilizadas as substituições de 10%, 15%, 30%, 40% e 80% para resistência à compressão dos concretos aos 7 e 28 dias.

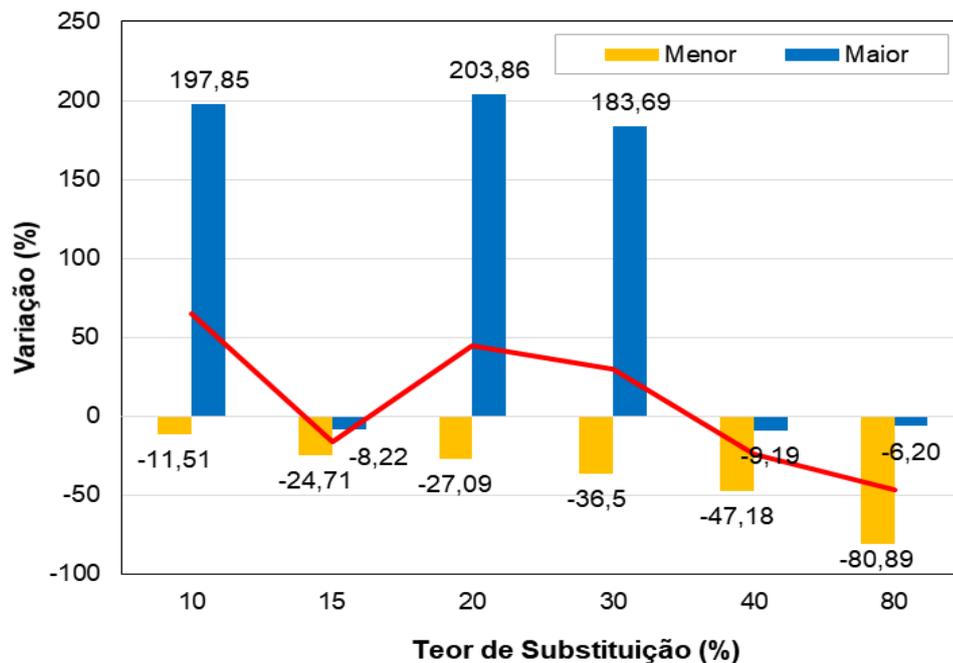
Primeiramente foram calculadas as medidas de centralidade. A Tabela 5 mostra os valores referentes à resistência à compressão do concreto aos 7 dias e o Gráfico 2 apresentando a menor variação, a maior e a média.

Tabela 5: Medidas de centralidade da resistência à compressão de concretos com cinzas volantes aos 7 dias

Variação (%)	Teor de Substituição (%)					
	10	15	20	30	40	80
Amostras	6	4	9	7	4	9
Média	64,68	-16,50	44,84	29,77	-24,24	-46,73
Mediana	12,75	-16,53	16,74	-30,93	-20,29	-39,34
Desvio Padrão	88,97	6,76	82,91	88,79	14,01	23,27

Fonte: Autora (2022)

Gráfico 2: Variação da resistência à compressão de concretos com cinzas volantes aos 7 dias



Fonte: Autora (2022)

Verificou-se que o menor resultado da variação na resistência à compressão dos concretos foi de -80,89% para o teor de 80% de substituição e o melhor resultado da variação foi de 203,86%, correspondente ao teor de 20% de substituição. Porém, é possível observar um grande desvio padrão e a menor variação é negativa, demonstrando que para esse teor de substituição houve amostras que apresentaram resistência à compressão menor que a amostra de controle. Neste contexto, é possível observar o quão divergente pode ser a adição de cinzas volantes em concreto, pois a sua influência também depende

de diversos fatores, como a relação água/cimento, origem, preparação, tipo de mistura, a presença ou não de aditivos na mistura etc. É possível observar uma falta de uniformidade nos resultados, o que culminou em desvios padrões significativos. O menor desvio padrão foi de 6,76% para o teor de substituição de 15%.

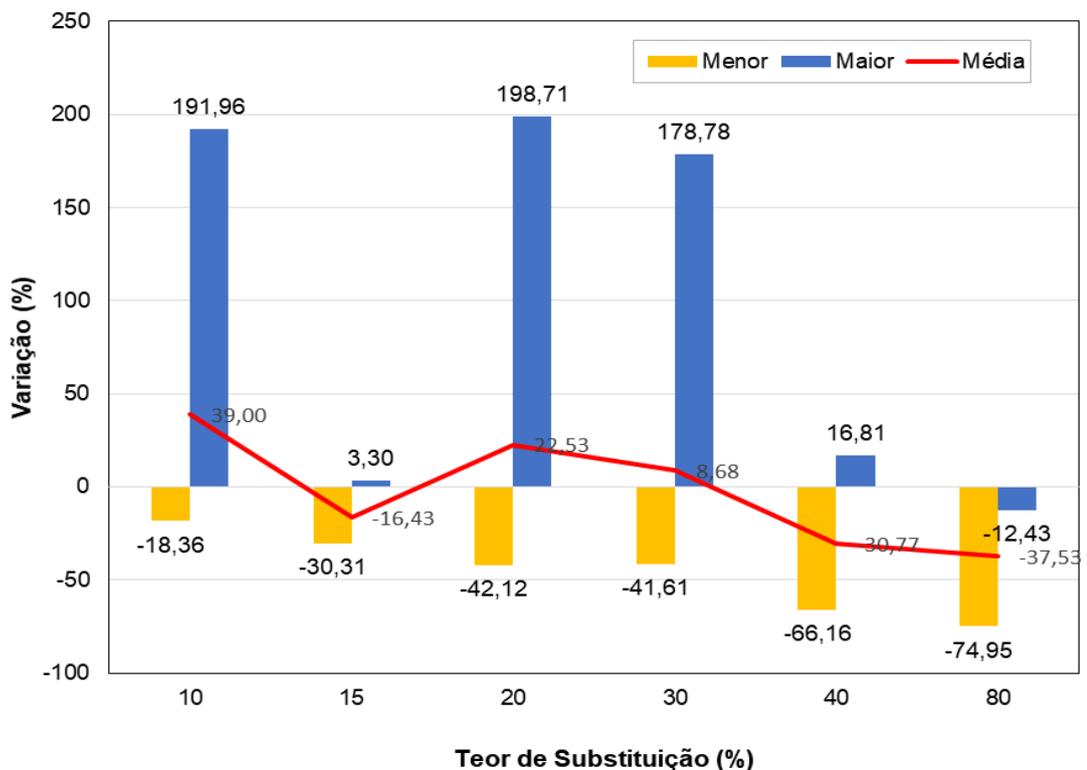
A Tabela 6 mostra os valores referentes à resistência à compressão aos 28 dias e o Gráfico 3 apresenta a menor variação, a maior e a média.

Tabela 6: Medidas de centralidade da resistência à compressão de concretos com cinzas volantes aos 28 dias

Variação (%)	Teor de Substituição (%)					
	10	15	20	30	40	80
Amostras	9	7	12	10	7	9
Média	39,00	-16,43	22,53	8,68	-30,77	-37,53
Mediana	5,60	-15,40	1,38	-32,50	-50,70	-31,63
Desvio Padrão	78,94	10,25	77,18	79,11	32,54	22,56

Fonte: Autora (2022)

Gráfico 3: Variação da resistência à compressão de concretos com cinzas volantes aos 28 dias



Fonte: Autora (2022)

O menor resultado da variação na resistência à compressão do concreto para o ensaio aos 28 dias foi de -74,95%, e verificou-se também para o teor de 80% de substituição

e a melhor variação foi de 198,71%, para o teor de 20% de substituição, similarmente aos resultados observados no gráfico dos 7 dias. A maior e a menor variação diminuíram para os 28 dias, apontando uma maior uniformidade nos resultados dos ensaios. O desvio padrão das amostras também diminuiu aos 28 dias, demonstrando resultados da resistência à compressão mais uniformes do que os resultados encontrados aos 7 dias, sendo o menor deles 10,25 para 15% de teor de substituição.

Nesse conjunto de dados pode-se concluir que as substituições de cinzas volantes são eficientes até os teores de 20% e que maiores teores de adições apresentam diminuição significativa na resistência à compressão do concreto, apresentando pouco ou nenhum aumento na resistência quando comparado com as amostras de controle.

4.4. ANÁLISE DOS EFEITOS DA CINZA DA CASCA DE ARROZ

Para as análises das cinzas da casca de arroz foram selecionadas as substituições em que houve pelo menos 3 amostras, ou seja, aquelas com menos de 3 foram isoladas, sendo utilizadas as substituições de 10% e 20% para resistência à compressão dos concretos aos 7 e as substituições de 10%, 15% 20% e 25% para 28 dias.

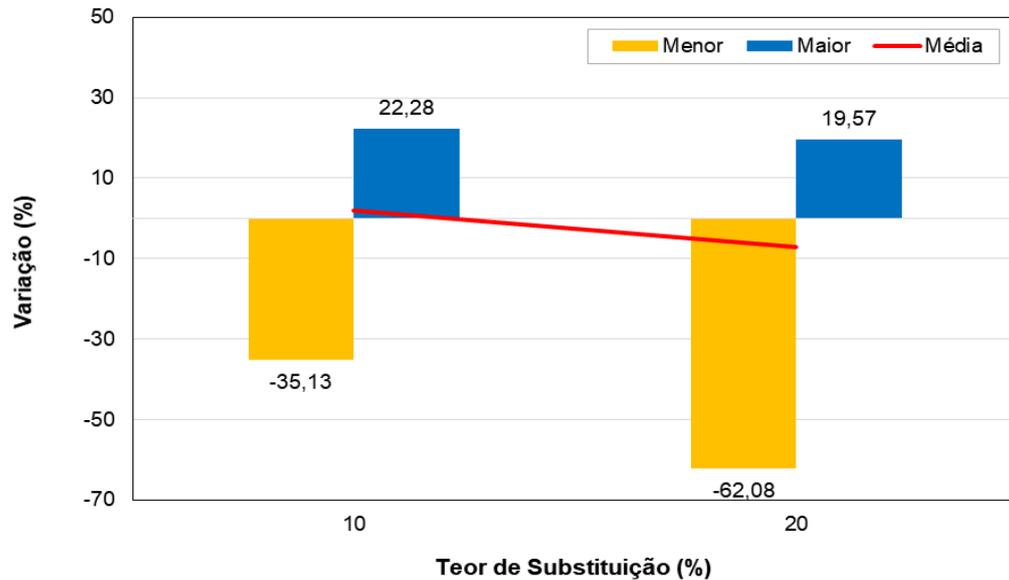
Primeiramente foram calculadas as medidas de centralidade, a Tabela 7 mostra os valores referentes à resistência à compressão aos 7 dias e o Gráfico 4, que apresenta a menor variação, a maior e a média.

Tabela 7: Medidas de centralidade da resistência à compressão de concretos com cinzas da casca de arroz aos 7 dias

Variação	Teor de Substituição (%)			
	10	15	20	25
Amostras	7	-	8	-
Média	2,01	-	-7,07	-
Mediana	12,41	-	9,12	-
Desvio Padrão	20,65	-	29,69	-

Fonte: Autora (2022)

Gráfico 4: Variação da resistência à compressão de concretos com cinzas da casca de arroz aos 7 dias



Fonte: Autora (2022)

O menor resultado da variação na resistência à compressão aos 7 dias foi de -62,08% para o teor de substituição de 20% e o melhor apresentou 22,28% de aumento na resistência para o teor de 10% de substituição. O desvio padrão para os dois teores de substituição são relativamente altos para esse material e nos dois casos tem-se tanto uma variação positiva quanto uma variação negativa, mostrando novamente o quanto as variações na produção de concretos com substituição de cimento por cinzas da casca de arroz são afetadas pela forma de obtenção e produção da adição mineral.

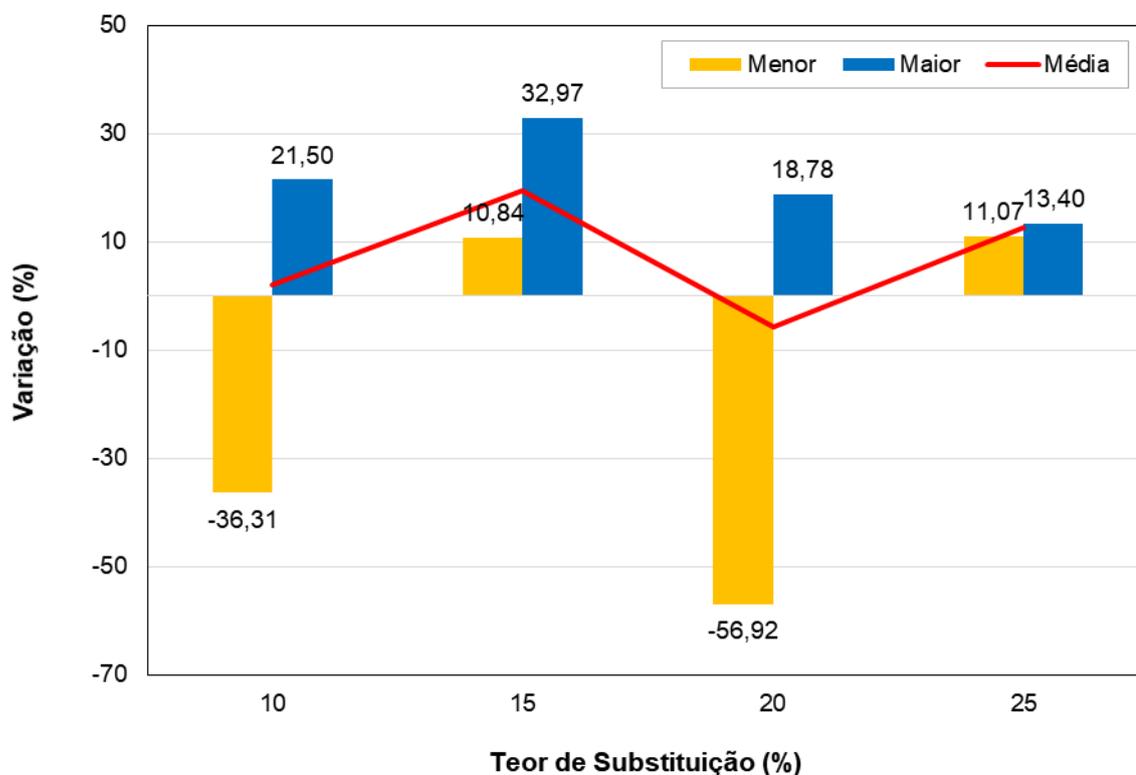
A Tabela 8 mostra os valores referentes à resistência à compressão aos 28 dias e o Gráfico 5, que apresenta a menor variação, a maior e a média.

Tabela 8: Medidas de centralidade da resistência à compressão de concretos com cinzas da casca de arroz aos 28 dias

Variação	Teor de Substituição (%)			
	10	15	20	25
Amostras	7	7	9	4
Média	2,06	19,41	-5,61	12,64
Mediana	12,26	16,27	9,54	13,05
Desvio Padrão	20,33	8,58	27,61	0,92

Fonte: Autora (2022)

Gráfico 5: Variação da resistência à compressão de concretos com cinzas da casca de arroz aos 28 dias



Fonte: Autora (2022)

Analogamente à variação da resistência à compressão aos 7 dias, o menor resultado aos 28 dias foi para o teor de substituição de 20%, porém a variação diminuiu 5,16%, apresentando um valor de -56,92%. Os resultados para os teores de 15% e 25% de variação apresentaram somente variações positivas, então nesses casos até a menor resistência a compressão observada foi maior que as das amostras base. O maior resultado foi observado na substituição de 15% que apresentou um aumento de 32,97% na resistência à compressão e para o teor de 25% o melhor resultado na variação foi um aumento de 13,40% na resistência. O desvio padrão para essas substituições foi pequeno, então pode-se concluir que os dados são relativamente mais uniformes que as das outras substituições.

Não houve muitas amostras com substituições superiores a 50% para realizar uma comparação entre as quantidades de substituições e a variação da resistência à compressão dos concretos, porém pode-se observar grande potencial desse material como substituinte do cimento.

4.5. ANÁLISE DOS EFEITOS DO PÓ DE VIDRO

Para as análises do pó de vidro foram selecionadas as substituições em que houve pelo menos 3 amostras, ou seja, aquelas com menos de 3 foram isoladas, sendo utilizadas as substituições de 10%, 15%, 20% e 25% para resistência à compressão dos concretos aos 7 e as substituições de 10%, 15%, 20% e 25% para 28 dias.

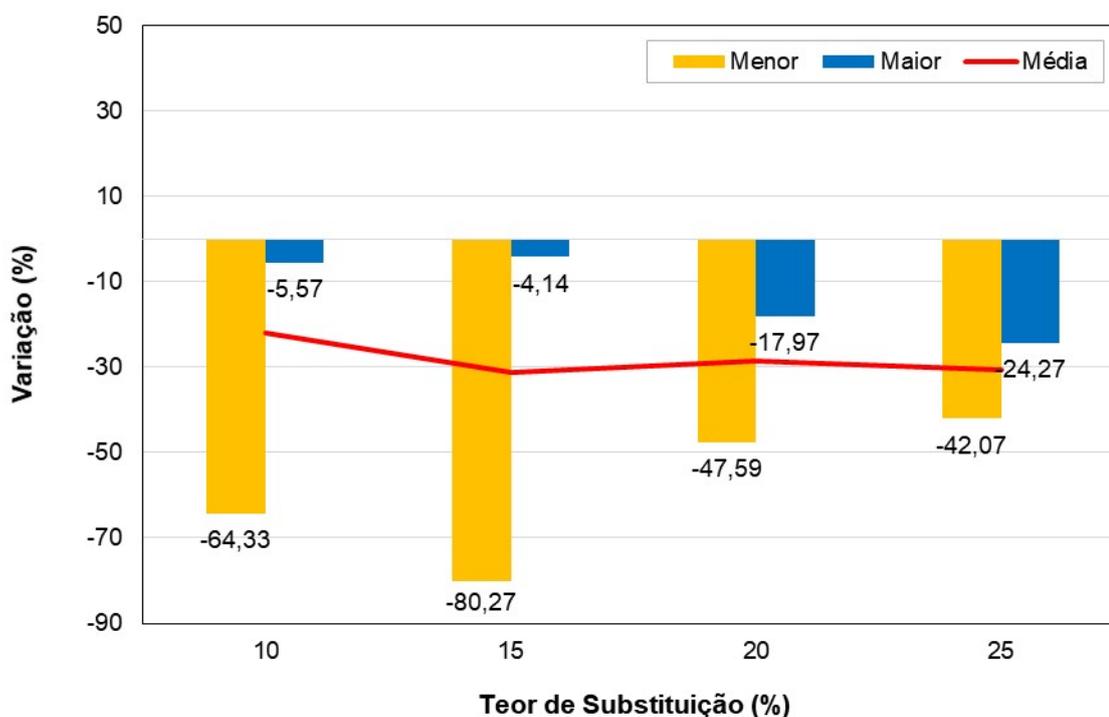
Primeiramente foram calculadas as medidas de centralidade, a Tabela 9 mostra os valores referentes à resistência à compressão aos 7 dias e o Gráfico 6, que apresenta a menor variação, a maior e a média.

Tabela 9: Medidas de centralidade da resistência à compressão do concreto com pó de vidro aos 7 dias

Variação	Teor de Substituição (%)			
	10	15	20	25
Amostras	6	8	3	5
Média	-22,04	-31,33	-28,46	-30,65
Mediana	-10,06	-18,96	-18,90	-28,88
Desvio Padrão	21,24	25,52	13,54	6,08

Fonte: Autora (2022)

Gráfico 6: Variação da resistência à compressão do concreto com pó de vidro aos 7 dias



Fonte: Autora (2022)

Na variação da resistência à compressão do concreto com pó de vidro aos 7 dias, é possível observar que tanto o menor quanto o maior resultado apresentaram valores negativos. Porém, na tabela resumo com as resistências à compressão de todos os trabalhos selecionados, que está no Apêndice 3, é possível observar que há uma grande variedade de tipos de vidro diferentes, e em nenhum artigo selecionado houve o uso de qualquer tipo de aditivo nas misturas, ao contrário dos outros materiais selecionados. Essa grande gama diferente de tipos de vidro e a falta do uso de aditivos pode ter afetado diretamente essas variações. O pó de vidro também foi o material com menos artigos selecionados. Dito isso, a menor e a maior variação foram para o teor de substituição de 15%, apresentando valores de -80,27% para a menor variação e -4,14% para a maior.

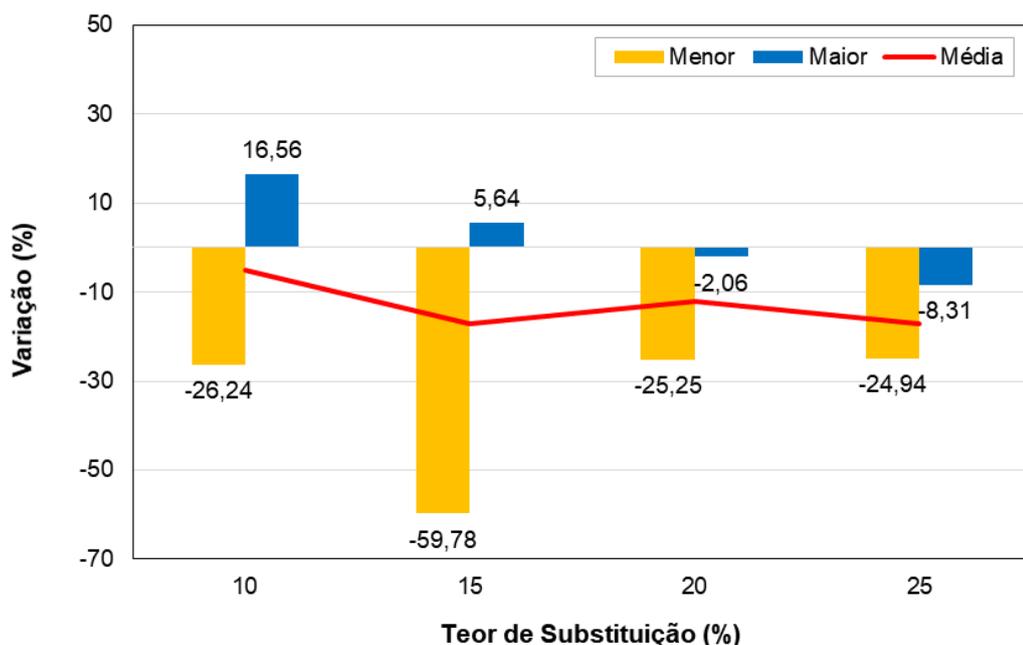
A Tabela 10 mostra os valores referentes à resistência à compressão aos 28 dias e o Gráfico 7, apresenta a menor variação, a maior e a média.

Tabela 10: Medidas de centralidade da resistência à compressão do concreto com pó de vidro aos 28 dias

Variação	Teor de Substituição (%)			
	10	15	20	25
Amostras	7	9	4	6
Média	-4,95	-17,07	-11,94	-17,09
Mediana	-5,39	-9,16	-10,22	-17,74
Desvio Padrão	12,00	18,94	9,94	6,87

Fonte: Autoria Própria (2022)

Gráfico 7: Variação da resistência à compressão do concreto com pó de vidro aos 28 dias



Fonte: Autora (2022)

No gráfico da variação da resistência à compressão do vidro aos 28 dias, é possível observar uma diminuição considerável das menores variações para cada teor, o que aponta o desenvolvimento de uma maior resistência em idades posteriores, ou seja, o material demora mais pra reagir. O menor resultado da variação para essa idade foi para a adição de 15%, que obteve uma variação de -59,78% e o melhor resultado na variação foi a de 16,56% para o teor de substituição de 10%. O desvio padrão das substituições para os 28 dias foram pequenos também, indicando uma certa precisão das variações e média. Os autores PITARCH *et. al.* (2021) e ISLAM e RAHMAN (2017) fizeram os ensaios pra 180 e 365 dias e é possível observar uma variação de até 6,8% aos 180 dias e 10,38 aos 365 dias para os teores de substituição de 15% e 20%.

4.6. ANÁLISE DOS EFEITOS DA ESCÓRIA DE ALTO FORNO

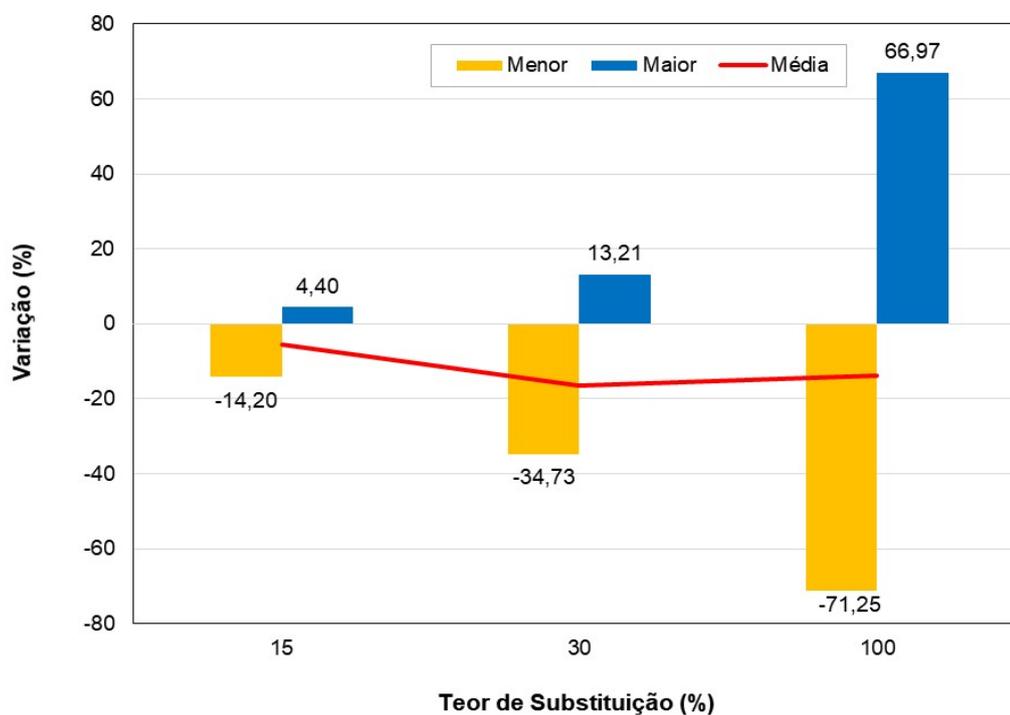
Para as análises da escória de alto forno foram selecionadas as substituições em que houve pelo menos 3 amostras, ou seja, aquelas com menos de 3 foram isoladas, sendo utilizadas as substituições de 15%, 30% e 100% para resistência à compressão aos 7 dias e as substituições de 15%, 20%, 30% e 100% para 28 dias.

Primeiramente foram calculadas as medidas de centralidade, a Tabela 11 mostra os valores referentes à resistência à compressão aos 7 dias e o Gráfico 8 apresenta a menor variação, a maior e a média.

Tabela 11: Medidas de centralidade da resistência à compressão do concreto com escória de alto forno aos 7 dias

Variação	Teor de Substituição (%)			
	15	20	30	100
Amostras	3	-	4	17
Média	-5,58	-	-16,40	-13,17
Mediana	-6,95	-	-22,04	-29,05
Desvio Padrão	7,66	-	19,85	41,61

Fonte: Autora (2022)

Gráfico 8: Variação da resistência à compressão do concreto com escória de alto forno aos 7 dias

Fonte: Autora (2022)

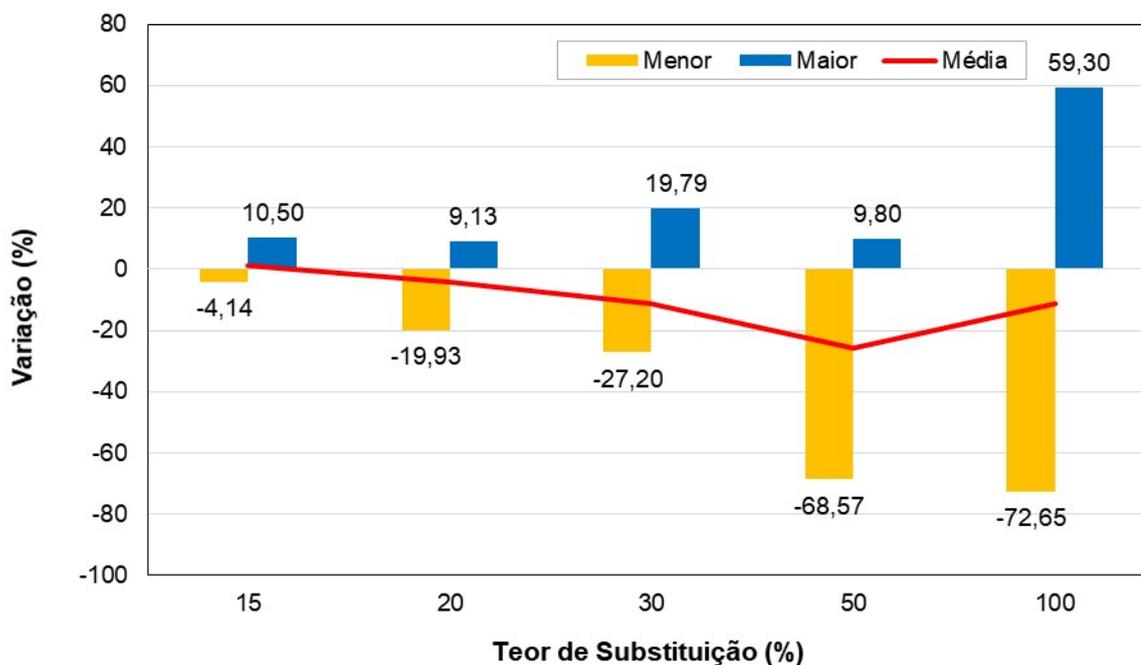
O menor resultado na variação na resistência à compressão aos 7 dias para a escória de alto forno foi de -71,25% para o teor de substituição de 100%, e o maior resultado na variação também foi para 100% de substituição, apresentando um aumento de 66,97% na resistência à compressão. As outras análises feitas, para os teores de 15% e 30% apresentaram uma variação tanto positiva quanto negativa, tendo suas maiores variações no valor de 4,4% e 13,21% respectivamente. Já as menores variações, para o teor de 15% a menor foi de -14,20 e para o de 30% o valor foi -34,73%.

A Tabela 12 mostra os valores referentes à resistência à compressão aos 28 dias e o Gráfico 9 apresenta a menor variação, a maior e a média.

Tabela 12: Medidas de centralidade da resistência à compressão do concreto com escórias de alto forno aos 28 dias

Variação	Teor de Substituição (%)				
	15	20	30	50	100
Amostras	6	6	4	11	17
Média	1,40	-4,15	-11,26	-25,75	-11,13
Mediana	-0,36	0,55	-18,82	-37,55	-12,25
Desvio Padrão	5,00	11,48	19,08	27,46	33,41

Fonte: Autora (2022)

Gráfico 9: Variação da resistência à compressão do concreto com escória de alto forno aos 28 dias

Fonte: Autora (2022)

A variação da resistência à compressão do concreto aos 28 dias foi realizada para mais teores, apresentando maiores variações para os teores de 100% e 30% de substituição, sendo eles 59,30% e 19,79%, respectivamente e os menores resultados foram de -68,57% de variação para 50% de substituição e -72,65% para 100% de substituição. Nas substituições de 100% é possível observar as maiores e menores variações, e nas duas idades, a 7 e a 28 dias, o desvio padrão é maior que 30, mostrando grande variabilidade dos dados. A média das variações para esse teor de substituição é de -11,13%. Somente o teor de 15% de substituição atingiu uma média positiva nessa análise. O menor desvio padrão para essa análise foi de 5, para o teor de substituição de 15%.

Nas Tabelas 13 e 14 abaixo, é apresentado um resumo dos teores que apresentaram maior ganho de resistência à compressão do concreto aos 7 e 28 dias.

Tabela 13: Maior ganho de resistência à compressão do concreto aos 7 dias

Adição mineral	Teores de substituição (%)	Melhor teor aos 7 dias	Ganho de resistência (%)
Cinzas Volantes	2,5 a 85	20%	203,86
Cinzas da Casca de Arroz	10 a 80	15%	24,83
Pó de Vidro	10 a 50	13%*	2,47
Escória de Alto Forno	5 a 100	100%	66,97

*Não aparece nos gráficos, pois este teor foi estudado por um único pesquisador.

Fonte: Autora (2022)

Tabela 14: Maior ganho de resistência à compressão do concreto aos 28 dias

Adição mineral	Teores de substituição (%)	Melhor teor aos 28 dias	Ganho de resistência (%)
Cinzas Volantes	2,5 a 85	20%	198,71
Cinzas da Casca de Arroz	10 a 80	15%	32,97
Pó de Vidro	10 a 50	10%	16,56
Escória de Alto Forno	5 a 100	100%	59,30

Fonte: Autora (2022)

Como é possível observar, as cinzas volantes no teor de 20% obtiveram o maior ganho na resistência tanto aos 7 quanto aos 28 dias e o pó de vidro apresentou apenas 2,47% de aumento aos 7 dias e 16,56% de aumento aos 28 dias, sendo o material com o menor desempenho nas idades avaliadas.

5. CONCLUSÕES

Os estudos feitos até o momento revelam grande potencial nos materiais analisados como substitutos do cimento na produção de concreto. Porém, os teores de substituição para cada material pozzolânico ainda variam bastante, bem como seus efeitos, sendo importante ter um controle adequado da produção e aplicação desses materiais em concretos e argamassas. A maneira como tais materiais são processados pode alterar suas propriedades e afetar de forma direta as características do concreto no estado endurecido.

No presente estudo foi confeccionado um banco de dados para cada adição mineral avaliada (cinzas volantes, cinza da casca de arroz, pó de vidro e escória de alto forno), a partir dos resultados experimentais dos pesquisadores. Foram contabilizados os teores de substituição das adições minerais, a relação água/cimento e resistência à compressão dos concretos, a partir de 28 trabalhos selecionados. As análises comparativas se mostraram

coerentes e indicaram alta variação de resultados decorrente do uso dessas substituições. Apesar disso, foi possível concluir que:

- 1) Os concretos com adições de materiais como forma de substituição do cimento podem apresentar características semelhantes ao concreto produzido de forma tradicional, o que é um resultado otimista visto que os concretos com substituição do cimento diminuem significativamente a emissão de CO₂.
- 2) Os resultados variaram muito para cada material, pois foi observado que as características do concreto (resistência à compressão) não são somente influenciadas pelo tipo de substituição, mas sim pelas diversas etapas na produção do concreto, desde as variações de classe e de produção de cada material, a relação água/cimento, a composição química, o tipo de moagem, de agregado, de adição etc. E como foram reunidos resultados de diversos artigos diferentes de vários lugares do mundo, não é possível chegar em uma conclusão definitiva. Porém, pode-se observar tendências no efeito da incorporação de que cada material.
- 3) As cinzas volantes demonstram grande potencial como substituição do cimento entre 25% e 30% de incorporação. Conforme o teor de substituição aumenta, pode-se observar uma tendência na diminuição da resistência à compressão do concreto.
- 4) A cinza da casca de arroz apresentou bons resultados na variação da resistência à compressão dos concretos para 10%, 15% e 25% de substituição, sendo que 15% de substituição apresentou o maior ganho na resistência à compressão do concreto.
- 5) A incorporação de pó de vidro proporcionou aumento na resistência à compressão dos concretos somente na idade de 28 dias. Todos os valores obtidos aos 7 dias foram menores que as amostras de controle, indicando variação negativa da resistência à compressão dos concretos. Diferente das outras adições, a reação do pó de vidro ocorre em idades posteriores.
- 6) A utilização da escória de alto forno em concretos nos teores de 15%, 30% e 100% proporcionou respostas positivas nos resultados de variação da resistência à compressão do concreto.

Novos estudos são necessários para aprofundar o conhecimento sobre a utilização de materiais cimentícios suplementares em concretos. É uma sugestão para trabalhos futuros é separar as análises pelas diferentes variações da composição/origem de cada adição. Exemplo: vidro marrom, verde, cinzas volantes classe F e C etc.

Por fim, pode-se observar que os materiais cimentícios suplementares podem ser utilizados na produção do concreto como substitutos do cimento, obtendo um valor igual ou maior a resistência à compressão do concreto tradicional, tornando possível a execução de um concreto mais sustentável e diminuindo o impacto ambiental causado pela construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing and Materials. **ASTM C618**: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohocken, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014

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

ALANYALI, H. *et. al.* Concrete Produced by Steel-Making Slag (Basic Oxygen Furnace) Addition in Portland Cement. **International Journal of Applied Ceramic Technology**. p. 736 – 748, 2009.

ALGARVIO, D. A. N. **Reciclagem de resíduos de construção e demolição: Contribuição para controlo do processo**. Dissertação (Mestrado) Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, PT, 2009.

AL-ZUBAIDI, A. *et. al.* Study The Effect of Recycled Glass on the Mechanical Properties of Green Concrete. **Energy Procedia**, 2017.

ANWAR, A. The influence of waste glass powder as a pozzolanic material in concrete. **International Journal of Civil Engineering and Tecnology**, 2016.

AMIN, M.; ABDELSALAM, B. A. Efficiency of rice husk ash and fly ash as reactivity materials in sustainable concrete. **Sustainable Environment Research**, 2019.

AMRAN M. *et. al.* Rice Husk Ash-Based Concrete Composites: A Critical Review of Their Properties and Applications. **Crystals**, 2021.

BARBUTA, M. *et. al.* Combined effect of fly ash and fibers on properties of cement concrete.

Procedia Engineering, p.280-284, 2017.

BOSSEL, H. **Indicators for sustainable development : theory, method, applications : a report to the Balaton Group**, 1999.

CAHYANI, R. A. T.; RUSDIANTO, Y. **An overview of behaviour of concrete with granulated blast furnace slag as partial cement replacement**. IOP Conference Series. Earth and Environmental Science, 2021.

CAMILO, M. G. **Estudo do uso de cinza de casca de arroz como material cimentício suplementar para produção de concreto**. Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, SC. 2018.

CAO, Z.; MASANET, E.; TIWARI, A.; AKOLAWALA, S. **Decarbonizing Concrete: Deep decarbonization Pathways For the Cement and Concrete Cycle in the United States, India, and China**. Industrial Sustainability Analysis Laboratory, Northwestern University, Evanston, IL 2021.

CEMPRE - COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM (São Paulo). **Vidros**. Ficha Técnica Disponível em: < <https://cempre.org.br/vidro/>>. Acesso em: 26 de julho 2022.

CHEN, W. *et. al.* **Study on the performance of green cement with large amount of steel slag addition**. IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 2019

CHOPRA, D.; SIDDIQUE, R. Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash. **Biosystems Engineering**, 2015.

CONTO, V.; OLIVEIRA, M. L.; RUPPENTHAL, J. E. **Certificações ambientais: contribuição à sustentabilidade na construção civil no Brasil**. GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, Bauru, nº4, p.100-127, 2017.

DAL MOLIN, D. C. C.. Adições minerais. In: **Concreto: Ciência e tecnologia**. ISAIA, G. C. São Paulo: IBRACON, Cap. 8. p. 261-310, 2011.

DARKO, A.; CHAN, A. P. C.; OWUSU, M. D. G.; AMEYAW, E.E. Drivers for implementing green building technologies: An international survey of experts, **Journal of Cleaner Production**, vol. 145, p. 386-394, 2017.

DYER, T. D., DHIR, R. K. Chemical Reaction of Glass Cullet Used as Cement Component. **ASCE Journal of Materials in Civil Engineering**, vol.13, n.6, p. 412-417, 2001.

FERRARI, G.; JORGE, J. **Materiais e Tecnologias**. São Paulo: Universidade Bandeirantes. (Notas de aula), 2014. p22. Disponível em: <<https://www.docsity.com/pt/apostila-de-materiais-e-tecnologias/4715624/>> . Acesso em Junho de 2022.

HERRERA, D. et. al. Evaluation of sustainable high-volume fly ash concretes. **Cement and Concrete Composites**. v. 33, p. 39-45, 2010.

IBGE, **Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Serviços e Comércio, Pesquisa Anual da Indústria da Construção** 2019. Disponível em:

https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/54/paic_2019_v29_informativo.pdf

ISAIA, G. C. et al. Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte I): propriedades mecânicas e microestrutura. **Ambiente Construído**. v. 17. p. 233-252, 2010.

ISLAM, G. M. S. et. al. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*. v. 6, p. 37-44, 2017.

JOHN, V. M. Concreto sustentável. In: **Concreto: ciência e tecnologia**. ISAIA, G. C. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1842-1869.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Livre Docência) – USP, São Paulo, 2000.

KARPINSKI, L. A. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: uma abordagem ambiental**. Edipucrs. 2008.

KHAN, F. A. et. al. Development of environment-friendly concrete through partial addition of waste glass powder (WGP) as cement replacement. **Civil Engineering Journal**. vol. 6, 2020.

LANG, E. **Blast furnace cements**. In: **Structure and Performance of Cements**. 2nd edition. Spon Press, London, p. 310-325.

LEE, J.Y. et. al. Comparing Properties of Concrete Containing Electric Arc Furnace Slag and Granulated Blast Furnace Slag. **Materials**, 2019.

LEITE, B. M. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001 Tese (Doutorado) -

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LI, G. *et. al.* Fly Ash Application as Supplementary Cementitious Material: A Review. **Materials**, 2022

LUCCI, E. A. *et al.* **Território e sociedade**: Geografia geral e do Brasil. São Paulo: Saraiva, 2005.

MAKUL, N; SUA-AIM, G. Effect of granular urea on the properties of self-consolidating concrete incorporating untreated rice husk ash: flowability, compressive strength and temperature rise. **Construction and Building Materials**, 2018.

MANZI, S.; MAZZOTI, C.; BIGNOZZI, M.C. **Short and Long-Term Behavior of Structural Concrete with Recycled Concrete Agreggate**. Departamento de Engenharia Civil, Química, Ambiental e Engenharia de Materiais da Universidade de Bolonha. Bolonha, Itália, jan. 2013.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas 2003. Disponível em:
<https://docante.ifrn.edu.br/olivianeta/disciplinas/copy_of_historia-i/historia-ii/china-e-india>
Acesso em: 01 abr. 2022.

MAVROULIDOU, M.; MARTYNKOVA, R. A study of alkali-activated concrete mixes with ground granulated blast furnace slag. **Global Nest Journal**, 2018.

MEDEIROS, F. K. *et. al.* Concretos autoadensáveis com baixo consumo de cimento e incorporação da casca do arroz e metacaulim. **Revista Matéria**, vol. 27 n.01, 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEHTA, P.K. **High-performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development**. Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology. 2004.

MILLER, S. A., CUNNINGHAM, P. R., HARVEY, J. T. Rice-based ash in concrete: A review of past work and potential environmental sustainability. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, p. 416-430, 2019.

NICOARA, A. I. *et. al.* End-of-life materials used as supplementary cementitious materials in the concrete industry. **Materials**, 2020.

ONU - **Organização das Nações Unidas. Declaração Universal dos Direitos Humanos da ONU**. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br> > Acesso em: 30 jun.2022.

PALIWAL, G.; MARU, S. Effect of fly ash and plastic waste on mechanical and durability properties of concrete. **Advances in Concrete Construction**, v. 5, n. 6, p. 575–586, 2017.

PASTARIYA, S; KESWANI, S. Experimental Investigation on Strength Characteristics of Fly Ash as Partial Replacement of Cement for M-20 grade of Concrete 1. **International Journal of Software & Hardware Research in Engineering**, 2016.

PENG, Y. C.; HWANG, C. L. Carbon Steel Slag as Cementitious Material for Self-Consolidating Concrete. **Journal of Zhejiang University - Science A: Applied Physics & Engineering**. p. 488-494, 2016.

PITARCH, A. M. *et. al.* Reutilisation of hazardous spent fluorescent lamps glass waste as supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 292, 2021.

PORTNEY, K. E. **Sustainability**, 2015. p.248

RIGHI, D. P. **Caracterização do comportamento de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação com a utilização de fibras de polipropileno e cinza de casca de arroz**. 2015. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050 / coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019 64 p.

ROQUE, R. A. L.; PIERRI, A. C. Uso inteligente de recursos naturais e sustentabilidade na construção civil. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 2, p. 01-18, 2019.

SENSALE, G. R. Strength development of concrete with rice-husk ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 2, p.158-160, 2006.

SNELLINGS, R.; MERTENS, G.; ELSEN, J. Supplementary Cementitious Materials. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 74, p. 211-278, 2012.

SNIC. **Relatório Anual - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento**. Brasil, 2020.

SNIS. **Diagnóstico Anual dos Resíduos Sólidos 2021**. Brasil, 2021.

SOARES, G. S. **Influência das propriedades físico-químicas de diferentes escórias**

como material cimentício suplementar. Universidade de São Paulo, São Paulo SP, 2020.

TEODORO, N. F. G. **Contribuição para a Sustentabilidade na Construção Civil: Reciclagem e Reutilização de Materiais.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 2011.

VASCONCELLOS, B. C. **A construção de um método para avaliação do ambiente construído.** 2011.Tese (Doutorado) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. **United Nations, Department of Economic and Social Affairs**, 2018. Disponível em: <<https://population.un.org/wup/>>. Acesso em: 01 jul. 2022.

YU 余靖, J. Very high volume fly ash green concrete for applications in India. **Waste Management & Research**, 2018.

APÊNDICE 1 – TABELA RESUMO: CINZAS VOLANTES

Referências	Misturas	Substituição do cimento (%)	Resistência à Compressão (MPa)											Aditivos	Água/cimento
			Idade (dias)												
			1	3	7	14	21	28	56	60	90	180	360		
Nicoara et. al. (2020)	1	0%	-	-	44,3	-	-	57,2	63	-	64,3	66,7	67,4	-	-
		10%	-	-	39,2	-	-	46,7	51,2	-	53,2	53,5	53,4	-	-
		20%	-	-	32,3	-	-	38,5	44,5	-	50,2	52,7	51,5	-	-
		30%	-	-	30,6	-	-	33,4	43,2	-	48,2	55,4	57,2	-	-
		40%	-	-	23,4	-	-	28,2	33,4	-	42,7	47,3	49,6	-	-
Pastariya e Keswani (2016)	1	0%	-	-	12,96	15,62	-	18,92	-	-	-	-	-	-	-
		2,5%	-	-	13,54	17,89	-	19,5	-	-	-	-	-	-	-
		5%	-	-	14,25	18,3	-	19,65	-	-	-	-	-	-	-
		10%	-	-	14,65	18,67	-	19,98	-	-	-	-	-	-	-
		20%	-	-	15,25	19,25	-	20,2	-	-	-	-	-	-	-
Yu et. al. (2018)	Mix 1.a	80%	-	-	13,4	-	-	24,3	-	-	-	-	-	Teor não informado	25
	Mix1.b	80%	-	-	37,8	-	-	47,9	-	-	-	-	-	Teor não informado	25
	Mix2.a	80%	-	-	10	-	-	16,6	-	-	-	-	-	Teor não informado	0,3
	Mix 2.b	80%	-	-	27,6	-	-	37,4	-	-	-	-	-	Teor não informado	0,3
	Mix3.a	85%	-	-	7,8	-	-	13,5	-	-	-	-	-	Teor não informado	0,3
	Mix 3.b	85%	-	-	27,5	-	-	40,5	-	-	-	-	-	Teor não informado	0,3
	Green concrete a	80%	-	-	7,7	-	-	13,7	-	-	-	-	-	0,0016	0,3
	Green concrete b	80%	-	-	27,9	-	-	34,4	-	-	-	-	-	0,0016	0,42
	Control sample	0%	-	-	40,3	-	-	54,7	-	-	-	-	-	0	0,42

Amin et. al. (2019)	M1	0%	-	12,4	23,3	-	-	31,1	-	32,9	34,5	-	-	0	0,55
	M2	10%	-	14,1	26,2	-	-	34,9	-	37,3	39,1	-	-	0	0,55
	M3	20%	-	14,6	27,2	-	-	36,1	-	38,8	40,5	-	-	0	0,55
	M4	30%	-	12,8	23,9	-	-	31,7	-	33,9	35,5	-	-	0	0,55
	M5	0%	-	37,1	55,2	-	-	73,5	-	78,6	82,3	-	-	3	0,25
	M6	10%	-	45,1	65,6	-	-	86,8	-	93,8	98,1	-	-	3	0,25
	M7	20%	-	45,6	66,5	-	-	87,9	-	95,1	99,4	-	-	3	0,25
	M8	30%	-	40,5	58,9	-	-	77,9	-	84,3	88,1	-	-	3	0,25
	M9	0%	-	43	61,1	-	-	80,8	-	87,2	91,2	-	-	3	0,25
	M10	10%	-	49,9	69,4	-	-	90,8	-	98,9	103,5	-	-	3	0,25
	M11	20%	-	51,1	70,8	-	-	92,9	-	101,3	105,9	-	-	3	0,25
	M12	30%	-	47,7	66,1	-	-	86,7	-	93,7	98,9	-	-	3	0,25
Barbuta et. al. (2017)	B1a	0%	-	-	-	-	-	33,45	-	-	-	-	-	-	-
	B2a	10%	-	-	-	-	-	29,68	-	-	-	-	-	-	-
	B2b	10%	-	-	-	-	-	31,76	-	-	-	-	-	-	-
	B2c	10%	-	-	-	-	-	29,8	-	-	-	-	-	-	-
	B3a	15%	-	-	-	-	-	23,31	-	-	-	-	-	-	-
	B3b	15%	-	-	-	-	-	27,42	-	-	-	-	-	-	-
	B3c	15%	-	-	-	-	-	24,14	-	-	-	-	-	-	-
	B4a	20%	-	-	-	-	-	25,17	-	-	-	-	-	-	-
	B4b	20%	-	-	-	-	-	25,4	-	-	-	-	-	-	-
	B4c	20%	-	-	-	-	-	27,16	-	-	-	-	-	-	-
	B5a	30%	-	-	-	-	-	22,18	-	-	-	-	-	-	-
	B5b	30%	-	-	-	-	-	19,62	-	-	-	-	-	-	-
	B5c	30%	-	-	-	-	-	20,93	-	-	-	-	-	-	-
	B6a	40%	-	-	-	-	-	13,48	-	-	-	-	-	-	-
	B6b	40%	-	-	-	-	-	14,42	-	-	-	-	-	-	-
B6c	40%	-	-	-	-	-	11,32	-	-	-	-	-	-	-	
OLPDE + O FA	0%	-	-	18,8	-	-	27,3	-	-	-	-	-	-	-	

Paliwal e Maru (2017)	0,6 LPDE+ 0 FA	0%	-	-	18,3	-	-	26,4	-	-	-	-	-	-	
	0,6 LPDE+ 5 FA	5%	-	-	18,1	-	-	27,8	-	-	-	-	-	-	
	0,6 LPDE + 10 FA	10%	-	-	17,8	-	-	29,4	-	-	-	-	-	-	
	0,6 LPDE + 15 FA	15%	-	-	16,6	-	-	28,2	-	-	-	-	-	-	
	0,6 LPDE + 20 FA	20%	-	-	27,5	-	-	15,8	-	-	-	-	-	-	
Herrera et. al. (2010)	A	0%	15	26,9	35,1	38,8	41,4	43,5	44,9	-	-	-	-	2,2	0,5
		15%	15,6	24,8	27,6	29,3	30,5	36,8	40,1	-	-	-	-		
		30%	11,7	21,2	24,1	26,2	30	32,5	35,5	-	-	-	-		
		45%	6,4	14	18,6	19,2	23,7	23,8	26,8	-	-	-	-		
		60%	4,4	7,2	10,1	11,9	13,8	16,8	17,2	-	-	-	-		
		75%	1,1	3,2	4,1	5,4	6,4	7	9,9	-	-	-	-		
	B	0%	19,4	26,8	30,4	30,9	33,7	37	38,4	-	-	-	-	1,3	0,55
		15%	12,5	24,3	27,9	29,8	30,2	32,4	35,7	-	-	-	-		
		30%	10,6	18,7	20,7	22,8	24	25,4	27	-	-	-	-		
		45%	5,7	11,4	12,9	18	19	19,6	21,5	-	-	-	-		
		60%	3,8	5,9	7,8	9,5	11,6	13,1	14	-	-	-	-		
	C	75%	-	2,6	3,4	4,3	5,5	6	7,9	-	-	-	-	0,6	0,6
		0%	16,1	22,5	26,3	31,9	29	32,1	34,5	-	-	-	-		
		15%	8,8	17,4	19,8	24,9	26,9	27,5	29,3	-	-	-	-		
		30%	7,5	11,6	16,7	18,5	20,1	21,3	24,5	-	-	-	-		
45%		3,1	6,9	9,1	10,7	12,1	13,4	16,6	-	-	-	-			
60%		-	4,6	6,7	7,9	9,4	9,8	12,6	-	-	-	-			
L24F00	0%	5,3	14,6	20,9	-	-	25	27,6	-	29	32,4	36,5	0	0,72	

Li et. al. (2022)	L24F20	20%	5	12,9	18,9	-	-	25,4	28,5	-	32,1	35,9	43,2	0,5	0,83
	L24F40	40%	3,9	10,4	16,8	-	-	25,6	30	-	35,2	39,8	39,4	2,1	0,93
	L24F60	60%	2,6	9,7	14,5	-	-	23,5	25,6	-	30,6	37,3	41,2	3,9	1,11
	L24F80	80%	2,3	8,5	14,1	-	-	20,9	24,3	-	28,5	33,6	38,7	3,7	1,34
	L35F00	0%	7,6	20,4	27,2	-	-	34,5	37,2	-	40,3	41,8	44,6	0,4	0,6
	L35F20	20%	7,6	17,6	23,9	-	-	36,5	40,8	-	45,8	49,4	54,7	0,8	0,69
	L35F40	40%	5,8	17,8	24,7	-	-	40,3	42,5	-	51,3	56,1	62,4	1,7	0,8
	L35F60	60%	3,5	13,3	18,9	-	-	34,5	38,8	-	47,8	55,6	65,3	3,3	0,91
	L35F80	80%	3,3	9,8	16,5	-	-	30	34,3	-	40,4	48,6	61,6	4,9	1,2
	H35F00	0%	7,6	20,4	27,2	-	-	34,5	37,2	-	40,3	41,8	44,6	0,4	0,6
	H35F20	20%	6,9	16,4	22,4	-	-	34,9	36,1	-	39,6	43,2	46,2	1,5	0,69
	H35F40	40%	6	11,3	21,5	-	-	34,1	37,4	-	40,8	51,5	54,3	2,7	0,8
	H35F60	60%	2,5	12,1	17,8	-	-	30,5	33,9	-	39	47,3	55,8	5	0,91
	H35F80	80%	1	5,2	11,6	-	-	25,2	28,3	-	34,1	39,6	43,4	8,7	1,32

APÊNDICE 2 – TABELA RESUMO: CINZAS DA CASCA DE ARROZ

Referências	Misturas	Substituição do cimento (%)	Resistência à Compressão (MPa)						Aditivos	Água/cimento
			Idade (dias)							
			3	7	28	56	60	90		
Medeiros et. al. (2022)	REF CAA	0%	-	-	55,9	-	-	-	0,423	0,44
	PCA20MK20	20%	-	-	66,4	-	-	-	1,03	0,44
	PCA30MK20	30%	-	-	63,5	-	-	-	1,5	0,44
Amin et. al. (2019)	M1	0%	12,4	23,3	31,1	-	32,9	34,5	0	0,55
	M2	10%	15,2	28,2	37,5	-	39,8	41,7	0	0,55
	M3	20%	14,4	26,9	35,7	-	37,9	39,7	0	0,55
	M4	30%	12,9	24,2	32,1	-	34,2	35,8	0	0,55
	M5	0%	37,1	55,2	73,5	-	78,6	82,3	3	0,25
	M6	10%	46,3	67,5	89,3	-	95,7	100,1	3	0,25
	M7	20%	45,3	66	87,1	-	93,4	97,6	3	0,25
	M8	30%	41,1	59,8	78,9	-	84,6	88,5	3	0,25
	M9	0%	43	61,1	80,8	-	87,2	91,2	3	0,25
	M10	10%	52,1	72,7	94,7	-	102,4	107	3	0,25
	M11	20%	50,8	70,6	92,2	-	99,6	104,2	3	0,25
	M12	30%	48,1	66,8	87,2	-	94,3	98,6	3	0,25
Camilo (2018)	Ref	0%	29,5	31,85	42,14	-	-	-	0,5	0,53
	CCA 10% moida	10%	24,76	28	39,99	-	-	-	0,6	0,57
	CCA 20% moida	20%	23,24	26,94	38,91	-	-	-	0,6	0,57
	CCA 30% moida	30%	17,16	19,88	27,44	-	-	-	0,6	0,59
	CCA 10% britada	10%	17,2	20,66	26,84	-	-	-	0,6	0,59
	CCA 20% britada	20%	13,7	16,6	21,03	-	-	-	0,7	0,61
	CCA 30% britada	30%	10,92	12,85	13,14	-	-	-	0,7	0,61
Chopra et. al. (2015)	1	0%	-	29	36,7	39,6	-	-	1	0,41
	2	15%	-	36,2	48,8	53,7	-	-	1	0,41
	3	10%	-	32,6	41,2	46,4	-	-	1	0,41
	4	20%	-	30,4	40,2	53	-	-	1	0,41
	1	0%	-	32,8	48,5	-	-	-	1,8	0,38

Rodríguez (2006)	2	20%	-	37,2	42,9	-	-	-	3,5	0,5
	3	30%	-	35,1	40,9	-	-	-	3,5	0,5
	4	40%	-	28,1	33,5	-	-	-	3,5	0,5
Makul e Sua-iam (2018)	1	0%	-	55,9	65	-	-	82,8	2	0,22
	2	10%	-	48,4	54,8	-	-	72,6	2	0,31
	3	20%	-	21,2	28	-	-	39,6	2	0,46
	4	40%	-	13,8	19,1	-	-	26,4	2	0,75
	5	60%	-	8,3	10,4	-	-	14,8	2	1,17
	6	80%	-	2,8	4,1	-	-	5,7	2	1,8
Isaia et. al. (2010)		0%	-	-	28,9	-	-	-	0,1	0,45
	REF	0%	-	-	33,2	-	-	-	0,3	0,55
		0%	-	-	41,8	-	-	-	0,1	0,65
		15%	-	-	33,1	-	-	-	1,3	0,45
	M15	15%	-	-	36,8	-	-	-	1,4	0,55
		15%	-	-	48,6	-	-	-	1,2	0,65
		25%	-	-	32,1	-	-	-	1,8	0,45
	M25	25%	-	-	37,5	-	-	-	1,8	0,55
		25%	-	-	47,4	-	-	-	1,3	0,65
		15%	-	-	32,1	-	-	-	2,2	0,45
	N15	15%	-	-	39,3	-	-	-	2,1	0,55
		15%	-	-	55,1	-	-	-	2,2	0,65
		25%	-	-	32,7	-	-	-	3,6	0,45

APÊNDICE 3 – TABELA RESUMO: PÓ DE VIDRO

Referências	Misturas	Substituição do cimento (%)	Resistência à Compressão (MPa)								Aditivos	Água/cimento
			Idade (dias)									
			3	7	14	28	56	90	180	365		
Pitarch et. al. (2021)	REF	0%	42,5	47,8	-	52,4	-	57,7	63,4	64,5	-	0,5
	Man15	15%	32,4	41,3	-	49,8	-	62,4	67,7	71,2	-	0,5
	Man25	25%	29,5	36,2	-	47,4	-	57,5	64,3	68,4	-	0,5
	Man35	35%	24,6	29,9	-	42,5	-	54,7	62,1	64,8	-	0,5
	Man50	50%	14,9	21,7	-	34,7	-	53,2	58,9	55,4	-	0,5
	Mec15	15%	34,6	37,3	-	47,6	-	45,3	49,8	65,7	-	0,5
	Mec25	25%	28,5	34,7	-	45,3	-	56,8	65,3	62,3	-	0,5
	Mec35	35%	23,6	30,2	-	40,8	-	55,7	58,9	61,8	-	0,5
	Mec50	50%	16,2	21,9	-	33,8	-	52,4	49,8	54,8	-	0,5
Islam e Rahman (2017)	Control Sample (0%)	0%	-	23,2	26,4	30,1	35,5	36,4	37,5	38,9	-	0,485
	5% pó de vidro	5%	-	22,1	26,7	29,8	34,8	36,6	38,4	39,4	-	Do
	10% pó de vidro	10%	-	21,4	25,4	29,5	34,2	37,8	38,5	39,5	-	Do
	15% pó de vidro	15%	-	19,5	25,3	29,7	33,5	37,2	39,3	40,5	-	Do
	20% pó de vidro	20%	-	18,6	22,9	29,3	32,6	37,6	38,6	42,8	-	Do
	25% pó de vidro	25%	-	16,5	20,6	27,6	31,4	33,5	37,3	38,7	-	-
Paul et. al. (2018)	1	0%	-	39,5	-	43,3	46,8	49,7	51,3	53,8	-	-
	2	10%	-	37,3	-	40,2	43,8	52,5	52,2	57,5	-	-
	3	15%	-	35,7	-	39,7	40,3	51,3	56,7	58,8	-	-
	4	20%	-	32,4	-	35,6	37,2	47,3	58,6	61,4	-	-
	5	25%	-	27,4	-	32,5	38,9	59,9	51,4	53,3	-	-
Anwar (2016)	1	0%	-	-	-	47,52	-	-	-	-	-	-
	2	5%	-	-	-	52,26	-	-	-	-	-	-
	3	10%	-	-	-	55,39	-	-	-	-	-	-
	4	15%	-	-	-	50,2	-	-	-	-	-	-
	5	20%	-	-	-	46,54	-	-	-	-	-	-
	6	25%	-	-	-	37,1	-	-	-	-	-	-
	7	30%	-	-	-	35,37	-	-	-	-	-	-

	8	35%	-	-	-	28,18	-	-	-	-	-	-
	9	40%	-	-	-	25,49	-	-	-	-	-	-
	10	45%	-	-	-	23,33	-	-	-	-	-	-
	11	50%	-	-	-	21,69	-	-	-	-	-	-
Khan et. al. (2020)	1	0%	9,5	14,5	17,3	20,2	24,3	-	-	-	-	0,55
	2	10%	5,2	9,5	13,5	14,9	18,6	-	-	-	-	0,55
	3	15%	9,3	13,9	14,9	16,3	23,5	-	-	-	-	0,55
	4	20%	6,5	7,6	12,6	15,1	16,8	-	-	-	-	0,55
	5	25%	5,1	8,4	11,7	15,3	19,7	-	-	-	-	0,55
	6	30%	4,6	6,3	9,8	11,5	14,7	-	-	-	-	0,55
	7	35%	4,4	5,3	7,9	9,2	12,4	-	-	-	-	0,55
Al-Zubaidi et. al. (2017)	0 Brown glass	0%	-	26,35	26,4	27,85	-	-	-	-	-	-
	1 Brown glass	11%	-	23,95	24,89	26,35	-	-	-	-	-	-
	2 Brown glass	13%	-	20	23	29	-	-	-	-	-	-
	3 Brown glass	15%	-	14	14,76	18	-	-	-	-	-	-
	0 Green Glass	0%	-	26,35	26,4	27,85	-	-	-	-	-	-
	1 Green Glass	11%	-	9,4	12,95	24,65	-	-	-	-	-	-
	2 Green Glass	13%	-	7	17,35	26,7	-	-	-	-	-	-
	3 Green Glass	15%	-	5,2	16,4	22	-	-	-	-	-	-
	0 Neon Glass	0%	-	26,35	26,4	27,85	-	-	-	-	-	-
	1 Neon Glass	11%	-	23,45	25	28,15	-	-	-	-	-	-
	2 Neon Glass	13%	-	27	30,11	31,75	-	-	-	-	-	-
	3 Neon Glass	15%	-	11	11,14	11,2	-	-	-	-	-	-

APÊNDICE 4 – TABELA RESUMO: ESCÓRIAS DE ALTO FORNO

Referências	Mix	Substituição do cimento (%)	Resistência à Compressão (MPa)									Aditivos	Água/cimento
			Idade (dias)										
			2	3	7	14	28	56	60	90	120		
Cahyani e Rusdianto (2021)	1	0%	-	28,3	-	-	52,6	-	-	69,4	-		
	2	20%	-	18,6	-	-	57,4	-	-	77,3	-		
	3	40%	-	13,2	-	-	61,9	-	-	79,7	-		
	4	60%	-	8,5	-	-	52,5	-	-	74,2	-		
	5	80%	-	5,9	-	-	43,4	-	-	59,8	-		
Soares (2020)	CPV	0%	-	-	-	-	49	-	-	50,6	54,3	1,75	-
	F1	50%	-	-	-	-	51,8	-	-	52,1	53,9	1,75	-
	F3	50%	-	-	-	-	53,8	-	-	54	58,2	1,75	-
	F5	50%	-	-	-	-	47	-	-	44,7	52,4	1,75	-
	C1	50%	-	-	-	-	30	-	-	36,8	38,7	1,75	-
	C3	50%	-	-	-	-	47,8	-	-	49,6	43,2	1,75	-
	C5	50%	-	-	-	-	51,6	-	-	55,2	54,6	1,75	-
	M1	50%	-	-	-	-	15,4	-	-	31,4	33,6	1,75	-
	M3	50%	-	-	-	-	26	-	-	32,2	34,3	1,75	-
	M5	50%	-	-	-	-	30,6	-	-	34,8	35,9	1,75	-
Mavroulidou e Martynková (2018)	Control Mix (CEM-I)	0%	-	-	32,7	-	45,7	47,8	-	-	-	-	-
		0%	-	-	33,6	-	42,8	44,1	-	-	-	-	-
	G_1WG_1N_6M	100%	-	-	29,6	-	53,7	-	-	-	-	-	-
		100%	-	-	43,7	-	44,7	-	-	-	-	-	-
	G_1,5WG_1N_1M	100%	-	-	36,9	-	48,8	-	-	-	-	-	-
		100%	-	-	9,4	-	20,5	-	-	-	-	-	-
		100%	-	-	16,7	-	35,7	38,2	-	-	-	-	

		100%	-	-	19,9	-	29,7	33,7	-	-	-	-	-
		100%	-	-	23,1	-	40,1	44,2	-	-	-	-	-
	G_1,5WG_1K_1M	100%	-	-	35,3	-	35,9	37,1	-	-	-	-	-
		100%	-	-	23,2	-	31,4	35	-	-	-	-	-
		100%	-	-	31,3	-	52,1	-	-	-	-	-	-
	G_1,5WG_1K_4M	100%	-	-	43,4	-	61,9	-	-	-	-	-	-
		100%	-	-	52,6	-	55,3	-	-	-	-	-	-
		100%	-	-	54,6	-	72,8	-	-	-	-	-	-
		100%	-	-	16,5	-	24,1	-	-	-	-	-	-
	G_K_6M	100%	-	-	17,8	-	28,4	-	-	-	-	-	-
		100%	-	-	11,8	-	12,5	-	-	-	-	-	-
		100%	-	-	16,9	-	24,4	-	-	-	-	-	-
Lee et. al. (2019)	OPC	0%	-	31,06	37,25	-	39,57	-	-	-	-	0	0,4
	EAF15	15%	-	26,98	31,96	-	37,93	-	-	-	-	0	0,4
	EAF15-G	15%	-	32,67	38,89	-	39,46	-	-	-	-	2,14	0,4
	GBF15	15%	-	27,86	34,66	-	38,58	-	-	-	-	0	0,4
	GBF30	30%	-	24,69	33,6	-	35,24	-	-	-	-	0	0,4
	GBF30-G	30%	-	31,44	42,17	-	47,4	-	-	-	-	2,14	0,4
Alanyali et. al. (2009)	Clinker	0%	24,8	-	45,5	-	59,2	-	-	-	-	-	-
	1,18-9,5mm NM	20%	18,3	-	34,4	-	47,4	-	-	-	-	-	-
	3,35-9,5mm NM	20%	18,2	-	33,9	-	47,5	-	-	-	-	-	-
	1,18-9,5mm NM	30%	15,5	-	29,7	-	43,4	-	-	-	-	-	-
	3,35-9,5mm NM	30%	15,3	-	29,9	-	43,1	-	-	-	-	-	-
	1,18-9,5mm NM	50%	7,7	-	18	-	27,6	-	-	-	-	-	-
3,35-9,5mm NM	50%	7,5	-	17,7	-	28,2	-	-	-	-	-	-	
Peng (2016)	OPC28	0%	-	46,5	53,9	-	69,6	93,7	-	95,6	-	2,72	0,28
	OPC32	0%	-	42,9	50	-	63,2	71	-	82,5	-	2,4	0,32
	OPC40	0%	-	25	32	-	49,6	57,3	-	59,1	-	2	0,4
	CSC28	5%	-	26,5	34,1	-	58,5	69,4	-	78,9	-	2,6	0,28
	CSC32	8%	-	16,3	22,2	-	37,1	45,1	-	45,8	-	2,4	0,34

	CSC40	10%	-	17,6	24,1	-	40,7	50,6	-	55,3	-	2	0,44
Chen et. al. (2019)	1	15%	-	26,9	-	-	45,5	-	-	-	-	1	-
	2	15%	-	27,5	-	-	50,5	-	-	-	-	1	-
	3	15%	-	26,8	-	-	48,1	-	-	-	-	1	-
	4	20%	-	24,2	-	-	45,7	-	-	-	-	1	-
	5	20%	-	25,2	-	-	47,8	-	-	-	-	1	-
	6	20%	-	23,5	-	-	46,2	-	-	-	-	1	-
	7	25%	-	22,1	-	-	42,9	-	-	-	-	1	-
	8	25%	-	24,5	-	-	43,9	-	-	-	-	1	-
	9	25%	-	23,9	-	-	43,4	-	-	-	-		