

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**

SIMONE DE FÁTIMA AFONSO PEREIRA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE CONCRETOS COM CINZA DE CASCA DE
ARROZ, AREIA DE DESCARTE DE FUNDIÇÃO E EFLUENTE TRATADO DE
ATERRO SANITÁRIO**

Alegrete

2022

SIMONE DE FÁTIMA AFONSO PEREIRA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE CONCRETOS COM CINZA DE CASCA DE
ARROZ, AREIA DE DESCARTE DE FUNDIÇÃO E EFLUENTE TRATADO DE
ATERRO SANITÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia – PPEng da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestra em Engenharia, na área de concentração de Tecnologia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes

Coorientador: Prof. Dr. Bóris Casanova Sokolovicz

Alegrete

2022

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

P436a Pereira, Simone de Fátima Afonso
ANÁLISE DO DESEMPENHO DE CONCRETOS COM CINZA DE CASCA DE
ARROZ, AREIA DE DESCARTE DE FUNDIÇÃO E EFLUENTE TRATADO DE
ATERRO SANITÁRIO / Simone de Fátima Afonso Pereira.
109 p.

Dissertação (Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2022.
"Orientação: Jacson Weber de Menezes".

1. Concreto armado. 2. Resíduos industriais. 3.
Sustentabilidade. 4. Efluente tratado. I. Título.

SIMONE DE FÁTIMA AFONSO PEREIRA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE CONCRETOS COM CINZA DE CASCA DE
ARROZ, AREIA DE DESCARTE DE FUNDIÇÃO E EFLUENTE TRATADO DE
ATERRO SANITÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharias da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestra em Engenharia, na área de concentração de Tecnologia dos Materiais

Banca examinadora:

Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes
UNIPAMPA

Prof. Dr. Bóris Casanova Sokolovicz
URI

Prof^a. Dr^a Chiara Valsecchi
UNIPAMPA

Prof^a. Dr^a Simone Dornelles Venquiaruto
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **JACSON WEBER DE MENEZES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/12/2022, às 12:07, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CHIARA VALSECCHI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/12/2022, às 14:55, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/12/2022, às 15:31, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1012508** e o código CRC **9091A6FB**.

AGRADECIMENTOS



À Deus, pela oportunidade de minha existência, pela minha saúde, força e amparo em momentos difíceis durante a construção dessa dissertação.

Aos meus pais, Valter e Teresinha, e minha irmã Roberta, por sempre me incentivarem a estudar e acreditarem em mim, fazendo o máximo para que esse momento fosse possível. Sempre meus profundos agradecimentos.

Ao professor Dr. Jacson Weber de Menezes, meu orientador, pela disponibilidade para me auxiliar em todos os momentos do trabalho.

Ao professor Dr. Bóris Casanova Sokolovicz, meu coorientador, por ser além de coorientador, um incentivador que sempre me apoiou e auxiliou mesmo quando parecia que nada iria dar certo. Seu apoio foi fundamental.

À Universidade Federal do Pampa – Campus de Alegrete, por todo o suporte durante esses dois anos e ao corpo docente excelente desta universidade que tive a oportunidade de conviver por alguns semestres, mesmo que de forma online.

À Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI Santo Ângelo por disponibilizar o Laboratório Tecnológico de Construção Civil para a realização da parte experimental da pesquisa.

RESUMO

Ancorada nos impactos ambientais causados pelo setor da construção civil na produção de concretos, com alta demanda por materiais, elevado custo e grande geração de resíduos, a necessidade de implantação de sistemas sustentáveis torna-se clara e necessária para que seja possível viver com qualidade de vida nos próximos anos. Nesse contexto, a presente pesquisa teve como intuito a utilização de areia de fundição contaminada por resina fenólica ou também denominada como areia de descarte de fundição, cinza de casca de arroz (CCA) e efluente tratado de aterro sanitário, como insumos para a mistura do concreto. Foram realizados traços com diferentes teores de substituição e os mesmos foram comparados ao concreto convencional. Como forma de avaliação do produto gerado a partir da utilização dos resíduos, o concreto foi submetido à ensaios de resistência à compressão axial, difração de raio X e CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada). Concluiu-se que é possível realizar o reaproveitamento dos resíduos estudados na pesquisa, com substituições em teores de até 75% de areia natural pela areia de fundição fenólica, 25% do cimento pela cinza de casca de arroz e utilizar efluente tratado como água de amassamento, considerando as particularidades de cada um destes componentes. A mistura que apresentou a melhor alternativa quanto à resistência à compressão axial foi a do traço com substituição de 50% de areia de fundição, seguida pelo traço com substituição de 100% da água de amassamento por efluente tratado. Na difração de raio X, observou-se que houve uma tendência do quartzo ficar em níveis aproximados em todas as misturas, visto que o mesmo é proveniente do agregado miúdo. Quando se avaliou a alita, que reage antes da belita, observou-se que as amostras com CCA apresentaram teores de alita muito inferiores. Se o ensaio de DRX tivesse sido realizado aos 91 dias, a tendência era o aumento dos níveis de alita, visto que houve um consumo de CH pela reação pozolânica. Com relação ao ensaio de corrosão das armaduras, a mistura com CCA apresentou o melhor resultado, podendo esta ser utilizada em concretos com presença de aço enquanto as demais misturas devam ser utilizadas para fins que não apresentem interação com o aço.

Palavras-Chave: Concreto armado. Resíduos industriais. Sustentabilidade. Efluente tratado.

ABSTRACT

Anchored in the environmental impacts caused by the civil construction sector in the production of concrete, with high demand for materials, high cost and large generation of waste, the need to implement sustainable systems becomes clear and necessary so that it is possible to live with quality of life. life in the coming years. In this context, this research aimed to use foundry sand contaminated by phenolic resin or also known as foundry waste sand, rice husk ash (RHA) and treated landfill effluent, as inputs for the concrete mix. Traces with different substitution contents were made and they were compared to conventional concrete. As a way of evaluating the product generated from the use of waste, the concrete was subjected to axial compression strength tests, X-ray diffraction and ACMI (Accelerated Corrosion by Modified Immersion). It was concluded that it is possible to reuse the waste studied in the research, with substitutions of up to 75% of natural sand by phenolic foundry sand, 25% of cement by rice husk ash and using treated effluent as mixing water, considering the particularities of each of these components. The mix that presented the best alternative in terms of resistance to axial compression was the mix with 50% replacement of foundry sand, followed by the mix with 100% replacement of mixing water by treated effluent. In X-ray diffraction, it was observed that there was a tendency for quartz to remain at approximate levels in all mixtures, since it comes from the fine aggregate. When alite was evaluated, which reacts before belite, it was observed that the samples with RHA had much lower levels of alite. If the XRD test had been carried out at 91 days, the tendency would have been for an increase in alite levels, since there was consumption of CH by the pozzolanic reaction. With regard to the reinforcement corrosion test, the mixture with RHA showed the best result, which can be used in concrete with the presence of steel, while the other mixtures must be used for purposes that do not show interaction with steel.

Keywords: Reinforced concrete. Industrial waste. Sustainability. Treated effluent.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Indicadores brasileiros para os ODS.....	20
Figura 2 – Curva granulométrica CCA.	29
Figura 3 – Resultados de MEV de amostra de CCA queimada a 950°C e 1100°C. ...	30
Figura 4 – Resultados de resistência a compressão axial	32
Figura 5 – Esquema de fundição em molde de areia	34
Figura 6 – Destinação final de areias residuais geradas por empresas do RS.	37
Figura 7 – Aspectos da textura e cor da amostra de areia de fundição fenólica	38
Figura 8 – MEV areia de fundição fenólica.....	38
Figura 9 – Microscopia da areia de fundição fenólica	39
Figura 10 – Curva granulométrica da areia de fundição fenólica	40
Figura 11 – Destinação final dos RSU no Brasil.....	44
Figura 12 – Modelo esquemático de aterro sanitário	46
Figura 13 – Utilização da água no Brasil em 2019.....	52
Figura 14 – Influência de efluente tratado na resistência à compressão comparado com concreto convencional.....	54
Figura 15 – Influência de efluentes de tratamento primários e secundários na resistência à compressão da argamassa em várias idades de cura úmida	55
Figura 16 - Evolução esquemática da deterioração de estruturas de concreto por corrosão de armaduras	58
Figura 17 – Modelo de Tuutti.....	59
Figura 18 - Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão de armaduras.....	60
Figura 19 – Curva granulométrica do CPV-ARI.....	63
Figura 20 - Curva granulométrica dos agregados miúdos.....	65
Figura 21 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	66
Figura 22 – Corpos de prova moldados nas formas metálicas.....	71
Figura 23 – Prensa para ensaio de resistência à compressão axial	72
Figura 24 – Posicionamento das barras de aço para moldagem	73
Figura 25 – Barras de aço para ensaio de corrosão CAIM	74
Figura 26 – Corpos de prova submersos em solução salina.....	75
Figura 27 - Corpo de prova do ensaio de corrosão na prensa hidráulica.	75
Figura 28 – Barras de aço do traço REF após ensaio.....	76
Figura 29 – Barras de aço do traço CCA25-AF75-AA após ensaio.....	77
Figura 30 – Resultados médios do ensaio de resistência à compressão axial	79
Figura 31 – Resultados médios da perda de massa das armaduras após ensaio	85
Figura 32 – Tela do Software Match!	88

Figura 33 – Difração de raio X do traço REF.....	88
Figura 34 – Difração de raio X do traço REF-AA.....	89
Figura 35 – Difração de raio X do traço CCA25	89
Figura 36 – Difração de raio X do traço CCA25-AA	90
Figura 37 – Difração de raio X do traço CCA25-AF50	90
Figura 38 – Difração de raio X do traço CCA25-AF50-AA	91
Figura 39 – Difração de raio X do traço CCA25-AF75	91
Figura 40 – Difração de raio X do traço CCA25-AF75-AA	92
Figura 41 – Difração de raio X do traço AF50	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais países produtores de arroz (Base beneficiado). Ano comercial local (1.000 toneladas métricas).....	24
Tabela 2 – Comparativo de área e produção nas regiões do Brasil. Estimativa de setembro de 2022.	25
Tabela 3 – Resultados da lavoura de arroz safra 2021/22 no RS	26
Tabela 4 - Composição física da CCA	28
Tabela 5 – Composição química da CCA	28
Tabela 6 – Produção de fundidos em fevereiro de 2022.....	34
Tabela 7 – Produção mundial de fundidos segundo ranking da revista <i>Modern Casting</i> , ano base 2018	35
Tabela 8 – Características físicas da areia de fundição	39
Tabela 9 – Disposição dos RSU.....	44
Tabela 10 – Padrões que o efluente deve atender para o lançamento no corpo receptor	48
Tabela 11 – Parâmetros inorgânicos que representam risco a saúde de água para consumo humano.....	51
Tabela 12 – Comparação dos parâmetros e limites da legislação e normatização...	56
Tabela 13 – Composição química do cimento CPV-ARI	62
Tabela 14 – Composição física do cimento CPV-ARI	63
Tabela 15 – Características físicas dos agregados.....	65
Tabela 16 – Características do superplastificante AdvaFlow	66
Tabela 17 – Características do efluente tratado de aterro sanitário	67
Tabela 18 – Mistura e composição dos traços	68
Tabela 19 – Traço unitário em massa	70
Tabela 20 – Quantitativos de materiais por m ³ dos traços ensaiados.....	70
Tabela 21 – Ranking dos melhores desempenhos das misturas investigadas	80
Tabela 22 – ANOVA Resistência à compressão axial aos 7, 28 e 91 dias	82
Tabela 23 – Resultado do Teste de Tukey para resistência à compressão axial na idade de 28 dias das misturas investigadas.....	83
Tabela 24 – Resultado Teste de Tukey para resistência à compressão axial na idade de 91 dias das misturas investigadas.....	83
Tabela 25 – Ranking das maiores perdas de massa entre as misturas investigadas	84
Tabela 26 – Ranking dos melhores desempenhos de resistência à compressão com suas respectivas perdas de massa	84
Tabela 27 – ANOVA Massa das amostras antes e após ensaio CAIM.....	87
Tabela 28 – Quantitativos dos compostos identificados no DRX aos 28 dias	94

Tabela 29 – Ranking dos resultados da pesquisa.....	96
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABIFA - Associação Brasileira de Fundição

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

AC - Água quimicamente combinada

ADF – Areia Descartada de Fundição

Al₂O₃ – Óxido de alumínio

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

CA – Casca de arroz

CaO – Óxido de Cálcio

CCA – Cinzas da casca de arroz

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP – Corpo de prova

CRVR – Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos

CV – Cinza Volante

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EAPC – Penetração Acelerada de Cloretos

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

Fe₂O₃ – Óxido de Ferro (III)

FeCr₂O₅ ou FeCr₂O₄ – Cromita

g/l – Grama por litro

IRGA – Instituto Rio Grandense do Arroz

IFSM – Método de Esferoidização por chama

m³ - Metro cúbico

mg/L – Miligrama por litro

(MgFe)₂SiO₄ – Olivina

MgO – Óxido de Magnésio

mi ton. – Milhões de toneladas

mL/L – Mililitro por litro

MPa – Megapascal

MnO – Manganês

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

P₂O₅ – Pentóxido de Difósforo

PIM – Porosimetria por intrusão de mercúrio

pH - Potencial Hidrogeniônico

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

RCC – Resíduos da Construção Civil

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SiO₂ – Dióxido de Silício

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

USDA – Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

UV/Vis – Espectrofotometria na região do Ultravioleta/Visível

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

UFSM – Universidade Federal de Santa Maria

URI – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

K₂O – Óxido de Potássio

Na₂O – Óxido de Sódio

ZrSiO₄ – Zirconita

°C – Graus Celsius

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivos.....	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos	17
1.2 Estrutura do trabalho	18
2 CONCRETOS COM ADIÇÕES MINERAIS E EFLUENTE TRATADO DE ATERRO SANITÁRIO	19
2.1 Sustentabilidade	19
2.2 Propriedades mecânicas, microestrutura e durabilidade de concretos com adições minerais e resíduos.....	22
2.3 Adições minerais e resíduos.....	23
2.3.1 Cinza de casca de arroz	24
2.3.1.1 Influência da cinza de casca de arroz no concreto	31
2.3.2 Areia de fundição.....	33
2.3.2.1 Influência da areia de fundição no concreto	40
2.3.3 Efluente tratado de aterro sanitário.....	43
2.3.3.1 Influência do efluente tratado de aterro sanitário no concreto	52
2.4 Corrosão das armaduras	57
2.5 Difração de raio X no concreto	60
3 METODOLOGIA	62
3.1 Caracterização dos materiais	62
3.1.1 Material cimentício	62
3.1.1.1 Cimento Portland CPV-ARI.....	62
3.1.2 Cinza de casca de arroz	63
3.1.3 Agregados	64
3.1.4 Aditivo	66
3.1.5 Água de amassamento	66
3.2 Método de dosagem	68
3.3 Moldagem dos protótipos	71
3.4 Ensaio realizados.....	72
3.4.1 Resistência à compressão axial dos testemunhos	72
3.4.2 Ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM)	73
3.4.3 Difração de Raios-X (DRX)	77
4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	79
4.1 Análise dos resultados de resistência à compressão axial.....	79
4.1.1 Análise estatística da resistência à compressão axial	81

4.2 Análise dos resultados do ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM)	84
4.2.1 Análise estatística do ensaio CAIM	87
4.3 Difração de Raio X.....	87
5 CONCLUSÕES.....	95
5.1 Resumo dos resultados	96
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	97
REFERÊNCIAS.....	98

1 INTRODUÇÃO

Para o ano de 2050 a previsão é que a população mundial alcance a faixa de 9,7 bilhões de indivíduos. Para atingir esse valor, estima-se que em 30 anos ocorrerá um aumento de 2 bilhões de pessoas (NAÇÕES UNIDAS, 2019). Considerando o grande número de pessoas já existentes no mundo e ainda o aumento que ocorrerá na população, pode-se prever a grande mudança que ocorrerá, principalmente no meio ambiente.

O crescimento populacional traz diversas alterações que causam não somente danos ambientais, mas também, problemas relacionados à qualidade de vida da população, no que diz respeito à própria saúde. Ao optar por um veículo utilitário ao invés de uma caminhada, conviver em ambientes fechados na presença de iluminação e climatização artificiais, são alguns exemplos de como o ser humano está alterando o modo de vida adequando-a às tecnologias. As edificações estão cada vez mais distantes do contato com sistemas naturais sem pensar em responsabilidade ecológica. Dessa forma, é importante salientar que o crescimento desorganizado da população não afeta apenas o meio ambiente, mas também, afeta diretamente no bem-estar físico e mental das pessoas.

Como consequência do aumento populacional, também, é a expansão das cidades. Nesse sentido a presença da construção civil é percebida facilmente pois encontra-se presente em todas as regiões do mundo e observa-se o seu envolvimento com praticamente todas as atividades humanas.

A mesma possui finalidade em disponibilizar serviços que possam proporcionar qualidade de vida e satisfação de necessidades humanas, como por exemplo, projetar e executar uma residência para habitação, pontes que conectam e possibilitam estar em diferentes locais (MEHTA, 2014).

Nesse sentido, quando se trata da questão do ambiente construído também pode-se notar a evolução que se obteve, ao comparar os sistemas construtivos utilizados no início das construções civis e o conjunto de técnicas de gerenciamento de projetos, materiais e fornecedores que hoje se tem disponível no mercado.

Apesar de toda a evolução, um ponto que deve ser considerado em ambos os períodos é a falta da incorporação da sustentabilidade de forma eficaz, e o recorrente uso demasiado dos recursos provenientes da natureza. De acordo com Sattler (2003),

a indústria da construção civil provoca impactos negativos na natureza pela utilização de recursos não renováveis, como também, o consumo de energia que é ocasionado para a construção de edificações além dos produtos químicos utilizados, que são nocivos à saúde humana.

O impacto ambiental causado pela indústria da construção, a qual abrange o elevado consumo de recursos naturais, energia e geração de resíduos e poluição, mostra o quão este setor é agressivo ao meio ambiente, se comparado aos demais setores da economia (ISAIA, 2017).

Conforme Rees (2020), a sociedade humana encontra-se em uma fase potencialmente desastrosa, devido a exploração da ecoesfera além da capacidade regenerativa dos ecossistemas. Tornando-se desta forma, parasitária na ecosfera. O autor afirma ainda, que uma economia que cresce e se mantém esgotando a base biofísica de sua própria existência, é inerentemente insustentável. E traz como inspiração para refletir, que o mundo precisa de uma economia mais ecologicamente informada.

Na construção de uma edificação, desde o início da obra, são utilizadas grandes quantidades de materiais dos mais variados tipos: Areia de rio, madeira, etc, todos explorados em forma primária para serem utilizados e transformados para uma específica finalidade. Além do grande consumo de cimento. Com isso é possível observar que não é apenas somente após a edificação atingir o estado disfuncional que ela afeta o meio ambiente e sim, desde o seu princípio.

O concreto e seus derivados cimentícios, são considerados como os materiais mais consumido pelo homem, depois da água (ISAIA, 2017). De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), somente no mês de março do ano de 2021 o consumo de cimento no Brasil foi de aproximadamente 5.526 toneladas.

Atualmente a indústria do concreto é a maior consumidora de recursos naturais como água, areia e agregado graúdo. E por ano a indústria do concreto consome aproximadamente 8 bilhões de toneladas de agregados naturais (ISAIA, 2017 *apud* MEHTA, 1998).

Além da grande demanda por materiais disponíveis, ocorre também a questão do espaço de tempo, relativamente pequeno, que essas construções disponibilizam utilidade. Alguns dos materiais utilizados são considerados muito agressivos ao meio, mesmo após a sua vida útil. Conforme a ABNT NBR 6118:2014, corresponde à vida

útil de estruturas o intervalo de tempo no qual se mantêm as características da estrutura, sem manifestações significativas.

De acordo com a norma ABNT NBR 15575-1:2013, é recomendado adotar o prazo mínimo de 50 anos para a vida útil de projeto (VUP) da estrutura do edifício. Helene (1993), após comparar referências internacionais relacionadas a vida útil, afirma que o tempo de a vida útil de projeto equivale no mínimo a 50 anos.

Uma edificação com 50 anos, já não possui mais a sua funcionalidade inicial, e com isso inicia-se um ciclo de manifestações patológicas. Se não tiver sido realizado nenhum tipo de manutenção neste período, não há muitas escolhas a serem feitas. Os moradores com maiores condições financeiras simplesmente abandonam o prédio e passam a residir em outro local.

A edificação, uma vez abandonada e se não for demolida, é invadida por pessoas de baixa renda, que a utilizam como moradia, até que ocorra o colapso total da estrutura. Sendo demolida de forma artificial ou sofrendo o colapso natural, de qualquer forma, haverá toneladas de resíduos e entulhos de construção civil resultantes desta edificação, que podem impactar negativamente na natureza.

A maneira de empregar e prever desde o projeto medidas que assegurem a durabilidade é vista como mais conveniente, segura e barata. Quando essas medidas são aplicadas somente mais tarde, mediante intervenção em uma estrutura, os custos crescem. O custo tem uma relação com o momento em que é realizado a intervenção, quanto mais tarde for a intervenção, maior será o custo. No Brasil, na maioria das obras já existentes e em andamento, dificilmente utiliza-se o concreto recomendável de acordo com a classe de agressividade, entretanto, medidas extras, consideradas algumas vezes como bastante dispendiosas de manutenção e proteção, podem assegurar uma vida útil de acordo com a necessidade dos usuários (HELENE, 1997).

Ancorado na alta demanda por materiais para a construção civil e considerando a quantidade de resíduos descartados por indústrias dos mais variados setores, são realizados estudos que visam validar a utilização de concreto com substituições, mesmo que sendo na forma parcial, dos materiais convencionais por estes resíduos. Consideradas como formas de soluções sustentáveis que podem contribuir na redução da utilização de recurso naturais. Buscando incorporar dessa forma, o desenvolvimento sustentável na construção civil e, implantar um gerenciamento eficiente dos resíduos em empresas. Gerando impactos positivos no setor da

economia, reutilização e comprometimento com a proteção ambiental e bem-estar para as futuras gerações.

Diante da preocupação com as questões ambientais, países e empresas estão repensando em formas de redução da geração e o reaproveitamento de resíduos. Dessa forma, atualmente com o auxílio da tecnologia, está se tornando comum a reciclagem e reuso de resíduos da própria construção e de diversas outras indústrias, para aproveitamento nas obras (ISAIA, 2017).

Assim como na área da construção, as indústrias utilizam a matéria prima necessária para a produção e o material ou resíduo que não lhe for útil, é simplesmente descartado.

Na indústria de fundição, por exemplo, a sua produção gera um resíduo denominado como areia de fundição contaminada por resina fenólica ou areia a de fundição (AF). A AF juntamente com outros materiais gerados pela fundição que não podem ser aproveitados, são levados a um aterro industrial, e estes resíduos correspondem cerca de 66 a 88% do total gerado pelo processo (MARTINI, 2017).

Esse resíduo ao lado do resíduo gerado pela produção de arroz, a cinza de casca de arroz (CCA) são materiais estudados como forma de substituição parcial da areia natural e do cimento, respectivamente. Leva-se em consideração que esses resíduos são dispostos em grande quantidade, a partir de processos industriais e os custos para manter locais para correto descarte é alto.

Estratégias como esta, impactaria de forma positiva não apenas no meio ambiente, mas consequentemente também, na saúde e na redução de gastos com aterros industriais. Nos quais são dispensados os resíduos e na geração de nova economia quando o recurso for empregado e corresponder às expectativas de durabilidade e resistência, por exemplo.

Tendo em vista a grande quantidade de resíduos disponíveis provenientes de indústrias, como a CCA e a AF, a presente pesquisa busca investigar concretos com substituições de até 75% de AF pela areia natural e 25% de CCA como substituição do concreto. Além, da substituição da água de amassamento por efluente tratado de aterro sanitário (AA), em porcentagens de até 100%.

Copetti (2019), apresenta em seu estudo, resultados positivos com a utilização de AF como substituição da areia natural na mistura do concreto. O concreto apresentou resultados satisfatórios na idade de 91 dias. Dessa forma a pesquisa

indicou que a AF pode ser utilizada na fabricação de concretos, pois os mesmos apresentam boa qualidade, custo compatível, além de principalmente, promover a sustentabilidade.

Como relação a concretos com utilização de CCA, Sokolovicz (2013) obteve em seu estudo resultados positivos quanto a utilização de CCA moída como forma de substituição parcial do cimento. As porcentagens de substituição utilizadas foram de 15 e 25%, baseadas nos estudos de Isaia (1995). E a partir desses teores foi possível observar o aumento da resistência à compressão axial do concreto aos 540 dias. Já para as misturas com CCA natural, houve uma redução na resistência sendo menor do que os resultados do traço referência, sem adições.

O presente estudo visa promover a incorporação da sustentabilidade na produção do concreto a partir da utilização da cinza de casca de arroz (CCA), a areia de fundição (AF) e o efluente tratado de aterro sanitário (AA) como substituição em forma parcial do cimento, areia natural e água de amassamento, respectivamente. E como forma de validar a utilização dessas substituições na mistura do concreto, foram avaliadas as propriedades como resistência à compressão axial do concreto e resistência à corrosão das armaduras.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como intuito avaliar as propriedades mecânicas e durabilidade de concretos com substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz, substituição parcial da areia natural por areia de fundição fenólica e a utilização de efluente tratado de aterro sanitário como água de amassamento.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a resistência à compressão axial aos 7, 28 e 91 dias do concreto conforme a ABNT NBR 5738: 2016 e ABNT NBR 5739: 2018.
- Realizar o ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM) nos corpos de prova.

- Realizar o ensaio de Difração de raio X com refinamento pelo método de Rietveld das amostras coletadas dos traços utilizados no estudo, aos 28 dias.
- Utilizar o teor de 25% de substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz para avaliar as propriedades mecânicas de compressão axial do concreto e o comportamento em relação a corrosão de concretos com essa substituição.
- Utilizar os teores de 50% e 75% de substituição de areia natural por areia de fundição fenólica para avaliar as propriedades mecânicas de compressão axial do concreto e o comportamento em relação a corrosão de concretos com essa substituição.
- Verificar a diferença de desempenho dos concretos com a utilização de água da rede pública e do efluente tratado do aterro sanitário Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR), localizada na cidade de Giruá - RS.

1.2 Estrutura do trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos:

Capítulo 1: Neste capítulo é abordado a importância em utilizar adições minerais e efluente tratado como material alternativo para a produção de concretos bem como os objetivos gerais e específicos desta dissertação.

Capítulo 2: Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica que aborda os temas da pesquisa, conceituando-os, como o arroz, a casca do arroz (CA), a cinza proveniente da queima da casca do arroz (CCA), areia de fundição fenólica (AF) e efluente tratado de aterro sanitário (AA).

Capítulo 3: Apresenta a metodologia experimental utilizada no trabalho, bem como os materiais e procedimentos de ensaios que foram utilizados.

Capítulo 4: Aborda os resultados obtidos dos ensaios experimentais, bem como análise e discussões e comparativo com trabalhos referentes ao tema de estudo.

Capítulo 5: Neste capítulo é apresentado a conclusão do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 CONCRETOS COM ADIÇÕES MINERAIS E EFLUENTE TRATADO DE ATERRO SANITÁRIO

Neste capítulo é apresentado e conceituado os principais elementos utilizados neste trabalho tais como: a cinza proveniente da queima da casca do arroz (CCA), a areia de fundição fenólica (AF), o efluente tratado de aterro sanitário (AA) e a utilização destes materiais na produção de concretos de acordo com a literatura.

2.1 Sustentabilidade

Atualmente, a população existente é de 7,6 bilhões de pessoas e anualmente, este número aumenta em aproximadamente em 75 milhões de pessoas (GERALDO E PINTO, 2019). Devido ao grande crescimento em inovações e melhorias englobadas em diversos setores, em escala mundial, destaca-se a necessidade da implantação de políticas que promovam soluções sustentáveis em defesa ao meio ambiente.

Tendo em vista a questão do crescimento econômico avançado, a sustentabilidade, em defesa ao meio ambiente, possui a função de trazer soluções para a incessante interação do ser humano com os recursos naturais utilizados como forma de exploração.

Em 1987, o trabalho nomeado como Relatório *Brundtland* ou também conhecido como Nosso Futuro Comum, desenvolvido pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) e liderado por *Gro Harlem Brundtland*, deu ênfase para a visão ao desenvolvimento sustentável e a sustentabilidade. O documento abordou sobre estes temas e definiu-os, sendo estes termos passados a serem utilizados de forma global após o lançamento do documento.

De acordo com o mesmo, desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem a suas próprias necessidades. Além de abordar sobre a preocupação da interação do ser humano com o ambiente e os efeitos dessa relação, também são apresentadas metas e soluções que visam o conceito de desenvolvimento sustentável.

Como forma também de abordar sobre questões de desenvolvimento sustentável, a Organização das Nações Unidas (ONU), promoveu os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) no Brasil, o qual trata de dezessete objetivos direcionados principalmente para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima. Os objetivos deste plano estão representados na figura 1.

Figura 1 – Indicadores brasileiros para os ODS



Fonte: Organização das Nações Unidas (ONU). 2022.

Previstos para serem atingidos até o ano de 2030, os ODS possuem como foco principal resolver problemas globais para garantir qualidade de vida para as próximas gerações. Para isso é importante que o conhecimento e a aplicação do desenvolvimento sustentável estejam presentes na atual geração.

Dentre os problemas globais, é possível notar na questão climática o desequilíbrio sofrido pelo meio ambiente devido a exploração. O aquecimento global que muito se tem discutido, ocorre devido ao aumento da temperatura média superficial global que pode ser provocado por fatores internos ou externos. Os primeiros, são associados a atividade solar, composição físico-química atmosférica, o tectonismo e o vulcanismo. Já os fatores externos que causam o aquecimento global

estão relacionados a emissões de gases-estufa por queima de combustíveis fósseis (SILVA E PAULA, 2009).

Os resíduos sólidos gerados diariamente também contribuem para a degradação ambiental caso forem descartados de maneira incorreta. Tendo em vista essa questão, em 2010 no Brasil foi sancionada a Lei nº 12.305 e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi instituída, regulamentada pelo decreto 7.404. A PNRS estabelece diretrizes associadas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, como forma de educação e incentivo ao correto descarte tornando clara a necessidade da realização de tratamento adequado dos resíduos para evitar danos ao meio ambiente e a saúde humana (BRASIL, 2010).

Referente aos detritos que são gerados no setor da construção civil, a resolução nº 307 do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, estabelece critérios, diretrizes e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil (RCC). A mesma busca, por meio de ações necessárias, reduzir os impactos ambientais causados pelo descarte incorreto de RCC. A resolução destaca que os geradores deverão primeiro objetivar não produzir resíduos e de forma secundária, estabelece como prioridade a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

A construção civil ao mesmo tempo que demanda por recursos naturais no início de um empreendimento, comprometendo então de forma inicial no equilíbrio da natureza, posteriormente ainda, no decorrer do processo de construção e fase final da vida útil da edificação, gera resíduos que mais uma vez, afetam a natureza. Devido a esse fato, a sustentabilidade na construção civil é uma questão muito importante.

De acordo com Mccaffrey (2002), somente a indústria global de cimento contribui com aproximadamente 6% de todas as emissões de CO₂ geradas, sendo dessa forma, responsável por cerca de 4% do aquecimento global.

No entanto, existem alternativas para a redução das emissões geradas pela construção civil. O reaproveitamento de resíduos, como substituição parcial dos componentes necessários a mistura do concreto, é um exemplo. Pois além de reduzir o consumo de cimento também promove melhor finalidade para resíduos industriais, como é o caso da substituição parcial do cimento pela cinza de casca de arroz. Esse caso de reutilização também é aplicado para a areia, a qual pode ser substituída por areia de descarte de fundição. Além da substituição da água de amassamento por

alternativas disponíveis como o chorume tratado proveniente de aterros sanitários ou efluente tratado de estações de tratamento de esgoto sanitário como é o caso do presente estudo.

2.2 Propriedades mecânicas, microestrutura e durabilidade de concretos com adições minerais e resíduos

O concreto é o resultado que se obtém de uma mistura composta por cimento, água, agregados miúdos e graúdos e aditivos. O material cimentício para a produção do concreto pode variar entre tipos diferentes de cimento e conter pozolanas, tais como a cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa, adições minerais, agregados de concreto reciclado, aditivos, polímeros e fibras (NEVILLE, 2016).

As propriedades do concreto são fatores muito importantes pois caracterizam o mesmo. Normalmente refere-se primeiro às propriedades mecânicas, representadas pelas resistências que o material apresenta de acordo com os esforços em que é submetido. A durabilidade e a microestrutura, ao lado das propriedades mecânicas, podem ser definidas como três grandes variáveis no estudo do concreto (SOKOLOVICZ, 2013).

Segundo Medeiros, Andrade e Helene (2013), no início das construções em concreto, mais precisamente em meados do século XX, a propriedade da durabilidade era regida pelo bom senso e a experiência do profissional. Foi somente após a evolução de estudos em matérias como transporte de líquidos e gases agressivos nos meios porosos, que a propriedade da durabilidade pôde ser expressa de forma mais eficiente. E com isto também, a avaliação da vida útil.

Ainda conforme os autores, a durabilidade está relacionada com o meio onde a construção está inserida e à sua finalidade. Dessa forma, o local da edificação corresponde como um fator externo e o tipo de ocupação como fator interno, e ambos apresentam influencia na durabilidade. Além disso, esses fatores influenciam também na resistência do concreto, da armadura e da própria estrutura.

No sentido de promover a sustentabilidade na área da construção civil, concretos sustentáveis surgem como alternativas. Como forma de embasamento nos estudos busca-se responder questões como a viabilidade em se obter os

componentes que serão incorporados no mesmo e também, se as propriedades deste se apresentam compatíveis com as do concreto convencional.

2.3 Adições minerais e resíduos

Conforme Mehta e Monteiro (2014), as adições minerais são materiais silicosos finamente divididos. Esses materiais são adicionados ao concreto, como material cimentício, em proporções de 20 a 70% aproximadamente, por massa do material cimentício total. Os materiais podem apresentar característica pozolânica no estado bruto ou após ativação térmica.

Materiais pozolânicos são aqueles silicosos ou sílico-aluminosos que na forma finamente dividida e em presença de água reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, para formar os mesmos compostos que são produzidos pela hidratação do cimento Portland (ISAIA, 2017).

O uso de pozolanas como material cimentício pode ser considerada como uma técnica muito antiga. Conforme Gobbo (2009) nas construções romanas, há cerca de 2000 anos, era utilizado um material denominado como “*pulvis puteolonis*”, o qual era uma cinza de origem vulcânica proveniente da localidade de Pozzuoli, situada na Baía de Nápoles (Itália).

Conforme o autor, as pozolanas são divididas em naturais sendo estas de origem vulcânica ou sedimentar com atividade pozolânica; e pozolanas artificiais sendo aquelas que correspondem a materiais resultantes de processos industriais ou provenientes de tratamento térmico, que apresentem atividade pozolânica.

A utilização de pozolana no concreto, seja em forma de adição mineral ou como componente de um cimento Portland composto, apresenta resultados satisfatórios nas propriedades do concreto. A sílica amorfa, principal constituinte dos materiais pozolânicos, reage principalmente com o hidróxido de cálcio formado na hidratação dos silicatos de cálcio do clínquer (ISAIA, 2017).

Como resultado é possível observar o aumento da resistência final e da durabilidade do concreto. O fato do aumento da durabilidade é devido a capacidade do concreto com utilização de pozolana em suportar o ataque por sulfato e à expansão pela reação álcali-agregado. Além disso, ocorre melhor a resistência à fissuração térmica devido ao baixo calor de hidratação.

Entre tantos fatores positivos na engenharia relacionados a utilização de pozolana em concretos, vale ressaltar o benefício ao meio ambiente também que se pode obter quando utilizado esse material. A pozolana encontra-se presente em alguns subprodutos como a cinza volante, sílica ativa e a cinza de casca de arroz (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

2.3.1 Cinza de casca de arroz

De acordo com dados do Ministério da Agricultura, o arroz é um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo.

O país que mais produz, consome e importa arroz no mundo é a China, seguido pela Índia (CONAB, 2020). O Brasil destaca-se como maior mercado consumidor em relação aos outros integrantes do Mercosul, além disso, é responsável por 75,83% da produção do bloco (CONAB, 2020). A Tabela 1 representa os principais países produtores de arroz no mundo em 2020, segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA).

Tabela 1 – Principais países produtores de arroz (Base beneficiado). Ano comercial local (1.000 toneladas métricas)

	Países	2020	% produção
1	China	211,860	29,5%
2	Índia	178,305	22,7%
3	Bangladesh	54,905	7,6%
4	Indonésia	54,649	7,1%
5	Vietnã	42,758	5,7%
6	Tailândia	30,231	4,1%
7	Myanmar	25,100	2,7%
8	Filipinas	19,294	2,5%
9	Brasil	11,091	1,6%
10	Camboja	10,960	1,5%

Fonte: Adaptado de Foreign Agricultural Services/USDA, 2022.

Conforme a Tabela 1, é possível observar que o Brasil se encontra entre os 10 maiores produtores mundiais de arroz.

Conforme o IRGA, o Brasil participa com 1,4% do total da produção mundial de arroz. A produção nacional de arroz tem sua maior concentração na região sul, que inclui os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, responsáveis por aproximadamente 80% da oferta nacional (CONAB, 2019).

Segundo a CONAB, o estado do Rio Grande do Sul se destaca pela alta contribuição para a indústria orizícola, sendo responsável por aproximadamente 68% da produção nacional. A Tabela 2 apresenta uma relação entre área de terra e a produção do arroz em regiões do Brasil, onde é possível observar que a região do Centro-Sul se destaca como maior produtor. Além disso, é possível observar a redução da produção de 8,4% em relação à safra 2020/21.

A redução da produção, conforme a CONAB, se explica principalmente por dois fatores. O primeiro foi a diminuição da área de cultivo, motivada pelo fato de que o arroz é menos rentável do que outras culturas e também devido ao incremento no preço dos insumos. Como um segundo fator destaca-se a estiagem que ocorreu durante a safra.

Tabela 2 – Comparativo de área e produção nas regiões do Brasil. Estimativa de setembro de 2022.

REGIÃO/UF	ÁREA (Em mil ha)		PRODUÇÃO (Em mil t)	
	Safra 20/21	Safra 21/22	Safra 20/21	Safra 21/22
Norte	227,9	188,0	1.043,0	879,4
Nordeste	168,0	167,5	366,2	371,4
Centro-oeste	157,4	124,0	622,5	494,1
Sudeste	10,3	11,7	47,6	44,1
Sul	1.115,6	1.126,8	9.687,1	8.992,4
Norte/Nordeste	395,9	355,5	1.409,2	1.250,8
Centro-Sul	1.283,3	1.262,5	10.357,2	9.530,6
BRASIL	1.679,2	1.618,0	11.766,4	10.781,4

Fonte: Adaptado de CONAB, 2022.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados da safra de 2021/22 no estado do Rio Grande do Sul, de acordo com cada região. A maior produção de arroz do estado do RS está concentrada na região da fronteira oeste, a qual abrange os municípios Alegrete, Itaqui, Quaraí, Santo Antônio das Missões, São Borja e Uruguaiana.

Tabela 3 – Resultados da lavoura de arroz safra 2021/22 no RS

Safra RS 2021/22	
Regiões	Produção (t)
Fronteira Oeste	2.228.968
Campanha	1.135.048
Central	955.144
Planície Costeira Interna	1.131.213
Planície Costeira Externa	825.944
Zona Sul	1.432.200
Total geral	7.708.517

Fonte: Adaptado de IRGA, 2022.

A casca do arroz (CA) é um subproduto resultante do beneficiamento do grão de arroz e compõe, em média, 20% do peso do grão. Somente por ano são produzidos mais de 2 milhões de toneladas deste resíduo no Brasil. Uma vez que o mesmo normalmente não tem valor comercial, o seu descarte é considerado um problema ambiental.

Uma das características apresentadas desse resíduo é a baixa densidade e o alto volume de forma que, quando armazenada, este ocupa grandes espaços. O incorreto descarte deste resíduo agroindustrial, como por exemplo, lançamento em aterros ou simplesmente descartado, promove problemas ambientais como poluição da água, ar e do solo (POUEY, 2006). Além disso, devido a sua lenta biodegradação, a CA se mantém sem alterações por longos períodos de tempo.

De acordo com dados do IRGA, a produção de arroz no estado do Rio Grande do Sul na safra 2021/2022 foi de aproximadamente 7.708.229,84 toneladas. A partir desse dado é possível prever a grande quantidade de CA resultante da safra, tendo em vista que a mesma está diretamente relacionada com a quantidade de arroz com casca produzido.

Conforme projeções de técnicos do instituto, uma amostra de arroz de 100g é composta em sua maior parte por uma quantidade de grãos, em teor de 70g aproximadamente, 8g de farelo, o restante seria casca, ou seja, 22g.

A composição da casca de arroz é formada em sua maior parte por celulose, lignina e resíduo orgânico. Conforme Angel *et al.* (2009), a celulose e hemicelulose compõem cerca de 50% da CA, juntamente com 26% de lignina e 4% de componentes orgânicos. Sendo os restantes 20% compostos por materiais inorgânicos como SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, MgO, CaO, Fe₂O₃, MnO, P₂O₅. O resíduo inorgânico contém, em média, 95 a 98%, em peso, de sílica, na forma amorfa hidratada, perfazendo 13 a 29% do total da casca (HOUSTON, 1972).

Comparado com outros cereais, a CA, quando queimada, gera uma maior quantidade de cinzas (DELLA *et al.*, 2005). A cinza da casca de arroz (CCA) proveniente da queima da CA pode ser obtida através de combustão em locais em que pode ser realizado o controle de temperatura ou em ambiente aberto sem controle algum (HOPPE, 2008). No momento da queima da casca a lignina e a celulose são removidas (POUEY, 2006).

Conforme Pouey (2006), para alterar as características da CCA com intuito de melhorar suas propriedades, normalmente são aplicados tratamentos térmicos, físicos e químicos. O tratamento térmico visa contribuir de forma a alterar a cor da cinza e modificar sua estrutura.

Devido ao alto percentual de sílica presente na CCA, esta pode ser utilizada para diversas finalidades, como por exemplo, na construção civil como pozolana agregada em cimentos, concretos e argamassas. Existem diversas aplicações com a CCA, tais como na indústria cerâmica, na produção de refratários, porcelanas e isolantes térmicos (POUEY, 2006).

No Brasil são produzidos aproximadamente 12 milhões de toneladas por ano de arroz gerando em torno de 2,5 milhões de toneladas de casca (Sobrosa (2014)); logo, se toda esta casca fosse queimada, seria gerado em torno de 500 mil toneladas de cinza, ou seja, 450 mil toneladas de sílica que poderiam ser utilizadas nos mais diversos setores.

O trabalho de Sokolovicz (2020) contribuiu grandemente para esta pesquisa, através da realização da caracterização da composição química e física da CCA, bem como a curva granulométrica. A tabela 4 apresenta a composição física da CCA e a tabela 5 apresenta a composição química da CCA.

Tabela 4 - Composição física da CCA

	Grandeza física	CCA
	Massa específica (Kg/dm ³)	2,09
	Área específica BET (m ² /g)	49,25
	Resíduo na # 0,075mm (%)	4,97
	Diâmetro médio (µm)	7,97
Dimensões características	Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas (µm)	1,19
	Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas (µm)	18,17

Fonte: Sokolovicz (2020).

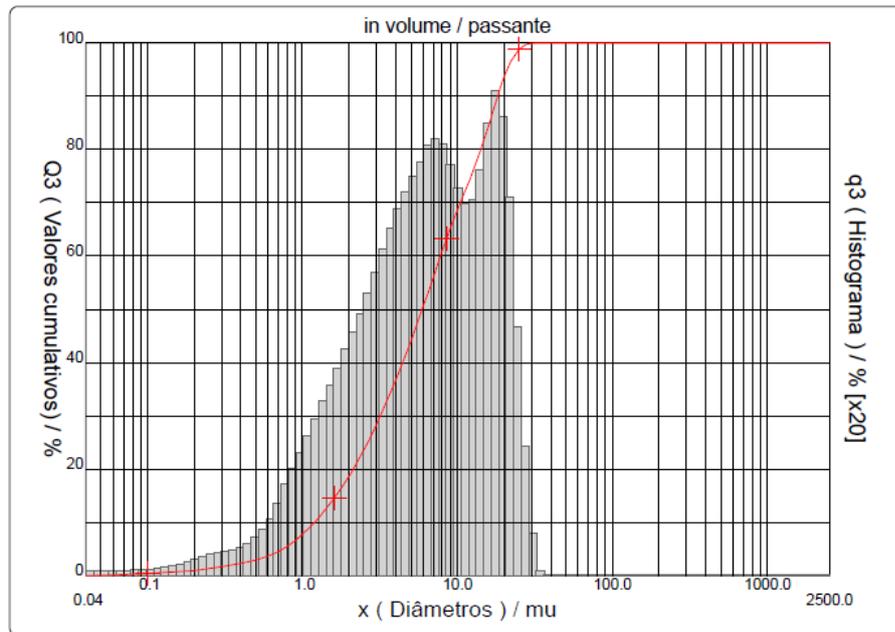
Tabela 5 – Composição química da CCA

Composição	(%)
SiO ₂	94,84
Al ₂ O ₃	0,39
Fe ₂ O ₃	0,54
CaO	1,32
MgO	0,40
SO ₃	0,01
Na ₂ O	0,11
K ₂ O	1,45
Perda ao fogo - PF	0,25

Fonte: Sokolovicz (2020).

Como é possível observar a CCA apresenta alto teor de sílica em sua composição, em quantidade de 94,84%. A figura 2 apresenta a curva granulométrica da CCA.

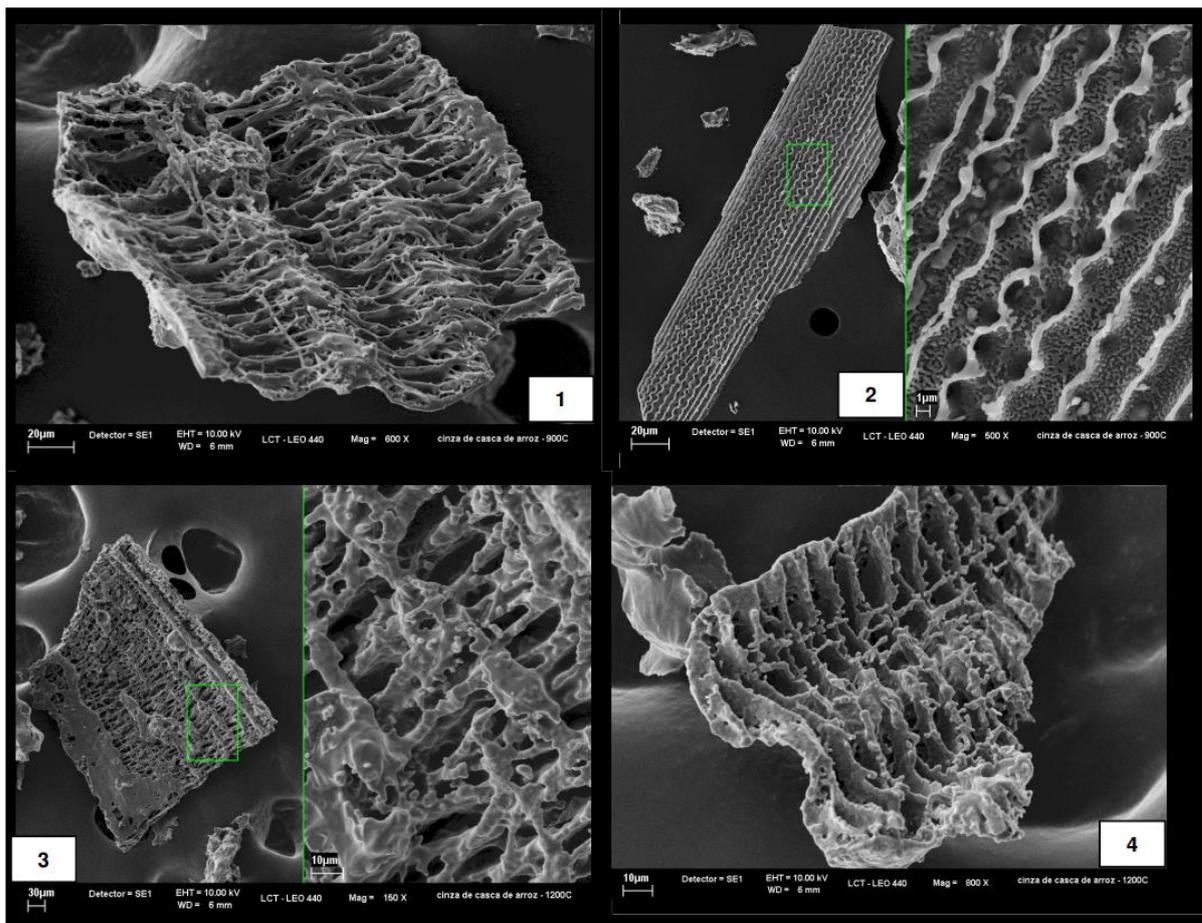
Figura 2 – Curva granulométrica CCA.



Fonte: Sokolovicz (2020).

Gobbo (2009) realizou a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para caracterizar diferentes tipos de pozolanas naturais e artificiais. Entre estas avaliou a morfologia de amostras de CCA para diferentes temperaturas de queima, conforme representa a figura 3, sendo as cascas de arroz provenientes da região de Viamão – RS.

Figura 3 – Resultados de MEV de amostra de CCA queimada a 950°C e 1100°C.



Fonte: Gobbo (2009).

De acordo com a figura 3 que contém o resultado de MEV para CCA é possível visualizar as formas esqueléticas que a mesma apresenta, com elevada área específica, caracterizando-a dessa forma como material de elevada reatividade.

Ao longo dos anos foram realizados diversos estudos focados na questão da influência da temperatura de queima e condições de tempo de exposição às quais a CA está submetida durante o processo para a obtenção da CCA.

No estudo de Della *et al.* (2005) observou-se que a sílica presente na cinza de casca de arroz manteve-se predominantemente no estado amorfo, de acordo com os ciclos de queima estabelecidos pelo estudo e ainda, os autores obtiveram sílica com 95% de pureza após queima a 700 °C por 6 horas.

De acordo com Isaia (1995), quando a temperatura de queima varia entre 400°C e 600°C, a sílica obtida é em sua maioria considerada na forma amorfa e devido a essa característica, a mesma é mais reativa.

Para Gobbo (2009) as CCA apresentam teores de sílica crescente com o aumento de temperatura, de 90 a 93%.

Geralmente a cor da CCA apresenta uma variação do cinza ao preto, isso pode ser explicado devido ao fato de possuir impurezas inorgânicas junto ao carbono não queimado. A forma em que a queima é realizada é um parâmetro que decisivo na cor. A queima feita em altas temperaturas e grande intervalo de tempo tende a produzir cinzas na coloração branco-rosadas, formando uma sílica com a estrutura cristalina (BOATENG e SKEETE, 1990 *apud* POUHEY, 2006, p. 24).

Para Houston (1972) a cor da cinza pode ser definida a partir da quantidade de carbono encontrado na CCA. A faixa de grau de intensidade das cores, do mais claro ao mais escuro, corresponde ao teor de carbono presente na cinza. Nesse aspecto, a cor preta indica que o material possui alto teor de carbono, enquanto que a cor cinza represente um material com pouco teor de carbono. Uma CCA de cor branca ou ligeiramente rosada, determina que o material não possui teor de carbono.

A moagem é um tratamento físico que também influencia nas propriedades da CCA. De acordo com Isaia *et al.* (2017) o processo de moagem se faz necessário pois aumenta a finura da CCA e conseqüentemente, aumenta também a reatividade com o cimento.

Segundo Santos (1997) a condição de queima em que é produzida a CCA determina o tempo de moagem necessário para que seja possível alcançar maior pozolanicidade. Além disso, diferentes intervalos de tempo de moagem resultam em um material com diversas áreas superficiais.

Os tratamentos químicos influenciam também nas propriedades da CCA. A utilização de ácidos para lavagem química na casca seguido do tratamento térmico, têm como finalidade remover a sílica com menor teor de impurezas (GONÇALVES, 2019).

2.3.1.1 Influência da cinza de casca de arroz no concreto

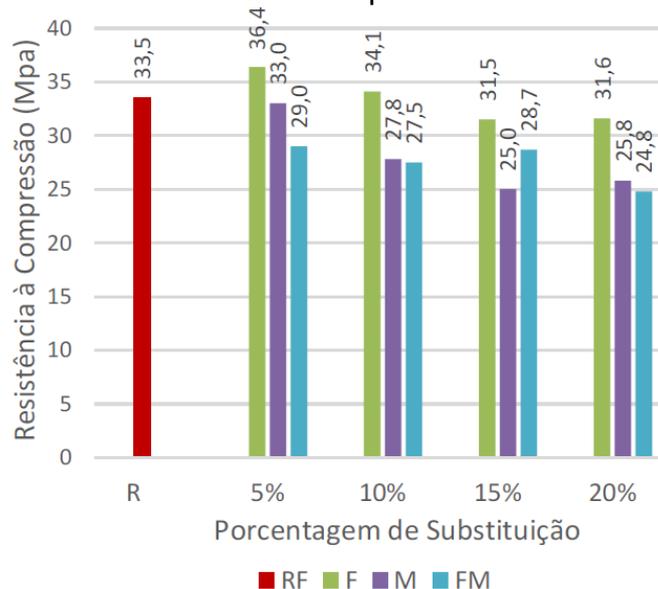
Devido a grande quantidade de cinza de casca de arroz disponível, a problemática de custos quanto à sua destinação e motivados pela sustentabilidade, vários estudos foram e continuam sendo realizados visando a utilização da cinza de casca de arroz como substituição parcial do cimento. Com o intuito da preservação

ambiental e a redução de impactos causados por estes resíduos, estudos apresentam formas eficientes de finalidade para os mesmos.

De acordo com estudos realizados por Isaia (1995) altos teores de pozolanas, em níveis de substituição de cimento em até 50%, apresentam condições de proteção em ambientes com cloretos. O autor destaca ainda que com o aumento da quantidade de adições pozolânicas, cinza de casca de arroz e cinza volante, ocorre maior resistência à corrosão. Mesmo que esta pozolana tenha sido parcialmente queimada sem controle de temperatura.

Santos e Lopes (2017) realizou um estudo para avaliar a resistência em concretos, no qual foi utilizado cinza de casca de arroz e areia de fundição. Os teores utilizados para substituição parcial do cimento e da areia de fundição pelos subprodutos foram de 5%, 10%, 15% e 20% e foi realizado também, um traço sem nenhum tipo de substituição (referência). O cimento utilizado foi o CP II-E-32. As idades do concreto consideradas neste estudo foram 7, 14, 21 e 28 dias. Foram determinadas a resistência à compressão axial e a resistência à tração por compressão diametral do concreto. A figura 4 representa a resistência à compressão do concreto aos 28 dias, no qual RF se refere ao traço referência, M aos traços com cinza de casca de arroz, F traços com areia de fundição e FM traço com os dois resíduos na mesma mistura.

Figura 4 – Resultados de resistência a compressão axial



Fonte: Santos e Lopes (2017).

Os resultados desta pesquisa apresentaram que nos traços que foram somente substituídos a areia de fundição pela areia natural, a resistência à compressão axial foi superior aos traços nos quais foram substituídos a CCA pelo cimento. Este resultado se explica devido a composição granulométrica da areia de fundição, por possuir módulo de finura menor do que o da areia natural, ela preenche melhor os vazios do concreto, ocorrendo melhor hidratação do cimento e conseqüentemente, houve um aumento da resistência.

Os traços que utilizaram CCA e a areia de fundição apresentaram resistências menores do que nos traços que utilizaram apenas um tipo de resíduo como substituição parcial. Para os resultados de resistência à compressão diametral do concreto, os traços com substituição dos resíduos apresentaram valores superiores ao traço referência (sem substituição).

Sokolovicz (2013) em seu trabalho investiga a microestrutura e durabilidade da cinza de casca de arroz residual e natural, sem beneficiamento prévio, na produção de concreto estrutural. Utilizando teores de 0%, 15% e 25% de cinza de casca de arroz como substituição parcial de cimento. O cimento utilizado na pesquisa foi o CII F – 32. Foram realizados ensaios como resistência à compressão axial, água quimicamente combinada (AC), porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM), penetração acelerada de cloretos (EAPC) pelo método da ASTM C 1202:2005 e cloretos totais retidos.

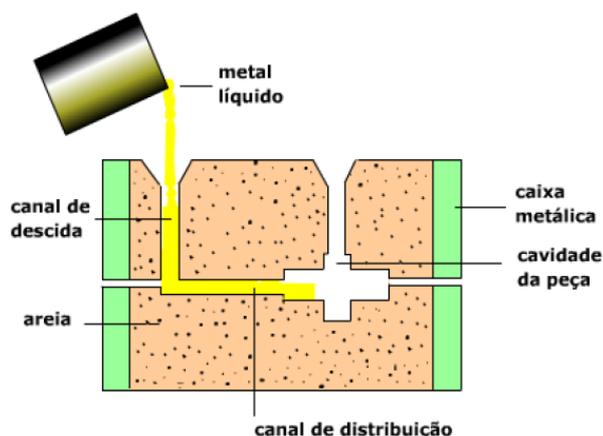
No ensaio de resistência à compressão axial, aos 540 dias os testemunhos atingiram os maiores valores para as misturas com CCA moída, enquanto as misturas contendo CCA natural apresentaram as menores resistências, sendo inferior à mistura referência. Observa-se que as misturas que contém CCA natural apresentam valores próximos à mistura referência. Os resultados obtidos mostram a viabilidade técnica da CCA natural nos teores de 15% de substituição parcial de cimento.

2.3.2 Areia de fundição

Através do processo de fundição são geradas peças metálicas. Ocorre a fundição de metais e estes são inseridos aos moldes, de acordo com a peça que se busca produzir, sendo estes moldes fabricados à base de areia. No processo de fundição, apesar da reutilização de sucatas metálicas como forma de matéria prima,

são geradas quantidades consideráveis de resíduos sólidos. Dentre estes resíduos estão as escórias, areia de moldagem e poeiras diversas (PENKAITIS, 2012 *apud* DANTAS, 2003). A figura 5 representa o esquema de fundição em molde de areia.

Figura 5 – Esquema de fundição em molde de areia



Fonte: PENKAITIS (2012).

Em nível nacional, a produção de fundidos somente no mês de fevereiro/2022, de acordo com a Associação Brasileira de Fundição (ABIFA), foi de aproximadamente 228.029 toneladas. Por dia a produção alcança em torno de 11.049 toneladas. Ainda conforme dados disponibilizados pela ABIFA, somente na região sul do país a produção de fundidos chegou a 95.924 toneladas.

A tabela 6 representa o desempenho em toneladas do setor de fundição no Brasil no período de fevereiro de 2022.

Tabela 6 – Produção de fundidos em fevereiro de 2022

Produção de fundidos – FEV/22	
Metal	Produção (t)
1 – Ferro Total	187.570
2 – Aço Total	23.596
3 – Não ferrosos	16.863
3.1 - Cobre	2.764
3.2 - Zinco	98
3.3 - Alumínio	13.581
3.4 - Magnésio	420
Total geral	228.029

Fonte: Adaptado de ABIFA, 2022.

Em nível mundial, conforme a revista *Modern Casting*, no ano de 2018, o Brasil encontrava-se na 9ª posição entre os produtores de fundidos. A tabela 7 representa a produção mundial de fundidos.

Tabela 7 – Produção mundial de fundidos segundo ranking da revista *Modern Casting*, ano base 2018

	Países	Produção em 2018 (milhões t)
1	China	49,35
2	Índia	13,39
3	Estados Unidos	10,76
4	Japão	5,76
5	Alemanha	5,43
6	Rússia	4,20
7	México	2,91
8	Coréia	2,57
9	Brasil	2,28
10	Itália	2,26

Fonte: Adaptado de ABIFA, 2018.

Cientes da dimensão do problema que pode causar o incorreto descarte deste e demais resíduos sólidos, órgãos ambientais como o Ministério do Meio Ambiente (MMA), juntamente com os Governos Municipais, Estaduais e Federal, implementaram diretrizes, estratégias e metas a partir da Lei Federal Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, uma política que visa a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos, definida como Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

A norma brasileira ABNT NBR 10004:2004 “Resíduos sólidos – Classificação”, criada a partir da preocupação com o desenvolvimento sustentável diante de tamanha geração de resíduos sólidos.

De acordo com a norma, os resíduos são classificados em:

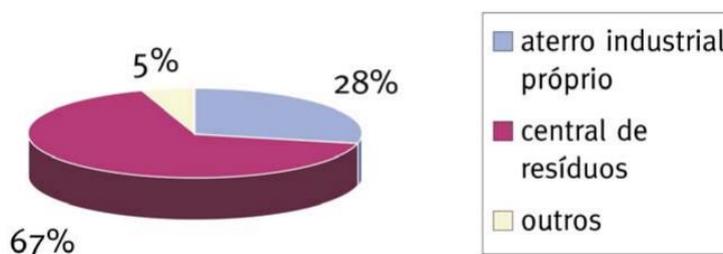
- a) Resíduos classe I – Perigosos;
- b) Resíduos classe II – Não perigosos;
 - Resíduos classe II A – Não inertes.
 - Resíduos classe II B – Inertes.

Conforme a norma, os resíduos considerados no item a) são aqueles que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas pode apresentar risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices e/ou riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada. Ou ainda, que apresentem inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Já a classificação descrita no item b) são os resíduos que não se enquadram no item a) e ainda se divide em não inertes: Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B - Inertes, nos termos desta Norma. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. E inertes: Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007:2004, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006:2004, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

A figura 6 representa um levantamento feito pelo estudo de Adegas e Bernardes (2008) referente ao gerenciamento que é realizado com as areias geradas no processo de fundição no RS. Os autores destacam que a utilização de areias em pavimentação asfáltica e/ou na fabricação de tijolos, nem foram mencionadas nos formulários respondidos na pesquisa. Já na porcentagem representada em “outros”, a mesma corresponde à quantidade de areia armazenada em locais não licenciados. Na porcentagem representada em empresas que destinam em “aterro industrial próprio”, somente 50% dos mesmos são licenciados, concluindo que os restantes 50% de aterros próprios não são licenciados, ocorrendo disposição inadequada de areias geradas.

Figura 6 – Destinação final de areias residuais geradas por empresas do RS.



Fonte: ADEGAS e BERNARDES (2008).

As areias residuais geradas a partir do processo de fundição se enquadram, conforme a norma, como um resíduo não perigoso. Porém, foi verificada alteração na qualidade das águas subterrâneas na área onde é realizado o depósito deste material (PENKAITIS, 2012). Devido à presença de fenóis na areia de fundição, levanta-se a preocupação de descargas dos mesmos na superfície ou no lençol freático.

Por se apresentar em grande quantidade e possuir custo elevado para transporte e depósito em aterros licenciados, aponta-se como uma forma de reduzir danos ecológicos e custos com a construção de aterros e manutenção, a reutilização do resíduo em outros setores.

A areia-base é definida como componente principal para a fabricação dos moldes e é caracterizada como agregado fino e puro, e granulometria variando entre 0,05 a 2,00 mm de diâmetro (SCHEUNEMANN, 2005).

Casali *et al.* (2018) em seu trabalho, categoriza a areia base que é utilizada em fundições como um material que pode ter mais de uma composição. Isso se dá pelo fato de que a composição varia de acordo com o tipo de matéria-prima que é utilizada para a moldagem de peças. Com isso, podem ser gerados diversos tipos de resíduos de areia de fundição.

As areias-base mais utilizadas são as de quartzo ou sílica (SiO_2), cromita (FeCr_2O_5 ou FeCr_2O_4), as de zirconita (ZrSiO_4) e as de olivina ($(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$) (CASTRO, 2001). As areias de fundição que possuem maior quantidade de ligantes sintéticos em sua composição como ligantes fenólicos, por exemplo, geram um rejeito que se apresenta de forma prejudicial ao meio ambiente (ADEGAS, 2008). A figura 7 mostra as características da areia de fundição fenólica.

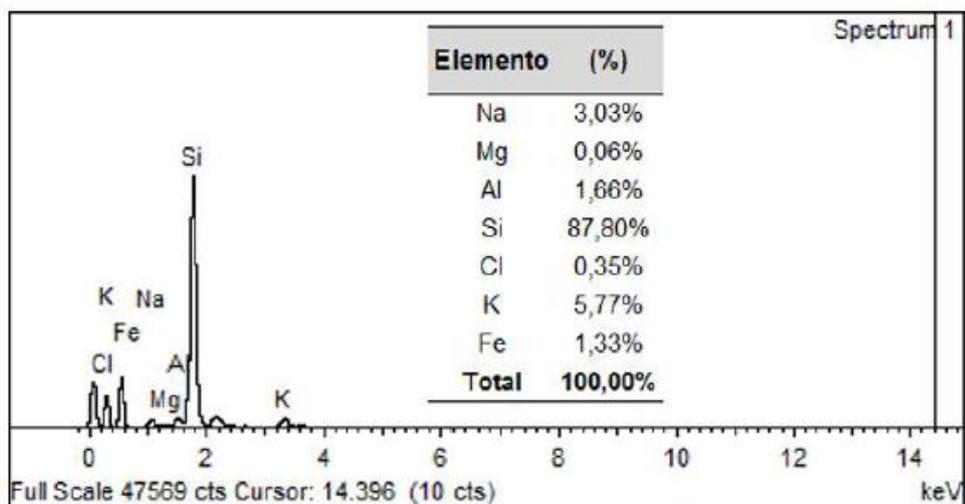
Figura 7 – Aspectos da textura e cor da amostra de areia de fundição fenólica



Fonte: Sokolovicz (2020).

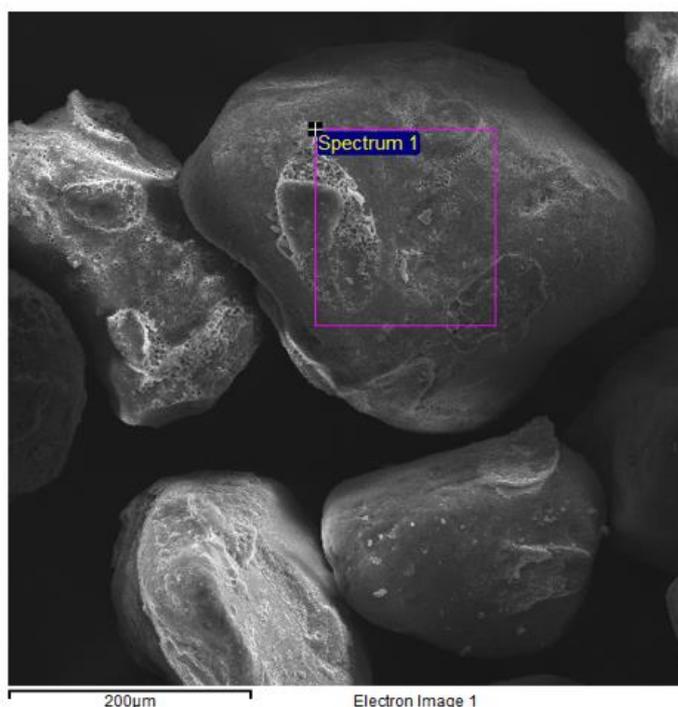
De acordo com Sokolovicz (2020), como forma de aprimorar o processo de fundição, ocorre a incorporação de materiais aglomerantes na areia de fundição. A areia que recebe aglomerantes como resina fenólica, gera após o processo da fundição o resíduo que é denominado areia de fundição fenólica. O autor realizou em seu trabalho a caracterização da areia de fundição fenólica através da análise de Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS. As figuras 8 e 9 mostram os resultados do ensaio elaborado na pesquisa.

Figura 8 – MEV areia de fundição fenólica



Fonte: Sokolovicz (2020).

Figura 9 – Microscopia da areia de fundição fenólica



Fonte: Sokolovicz (2020).

Conforme os resultados é possível observar que a areia de fundição fenólica, que é também utilizada no presente estudo, possui formato arredondado. Além disso, a mesma possui a maior parte da sua composição representada por sílica, em uma quantidade de 87,80%. A tabela 8 apresenta as características físicas da areia de fundição e a figura 10 apresenta a curva granulométrica.

Tabela 8 – Características físicas da areia de fundição

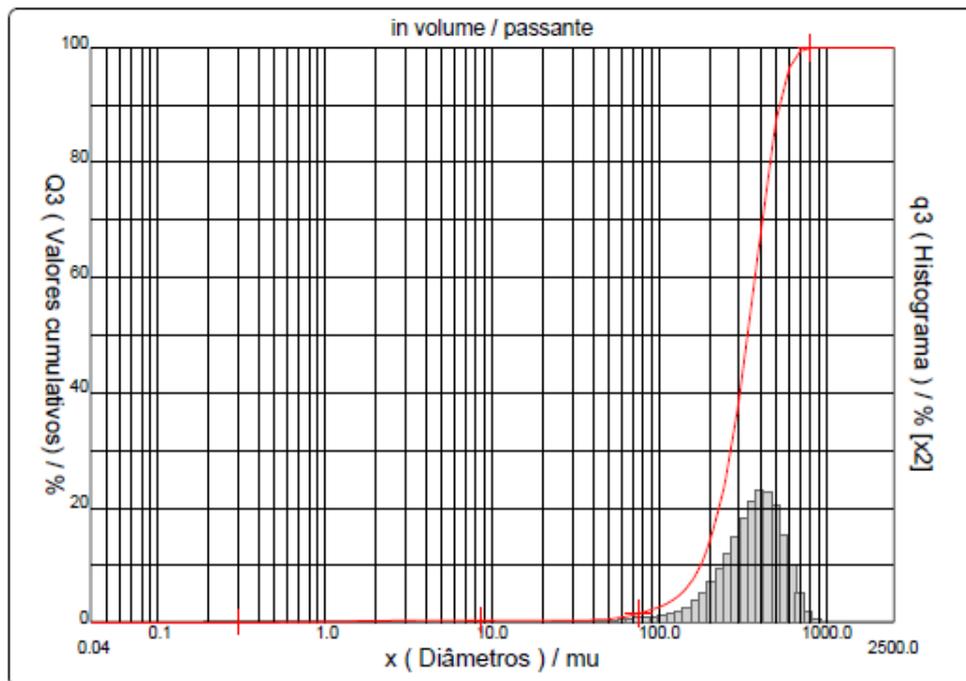
Descrição	Resultado
Massa específica	2,60 kg/dm ³
Massa unitária	1,46 kg/dm ³
Absorção (%)	0,43%
Diâmetro médio:	346,26 µm
Diâmetro a 10% (µm)	175,89 µm
Diâmetro a 50% (µm)	336,76 µm
Diâmetro a 90% (µm)	526,51 µm

Fonte: Sokolovicz (2020).

Quanto ao módulo de finura, fator este que possui influência nos resultados de concretos com utilização de areia de fundição, no estudo de Santos e Lopes (2017) a areia de fundição utilizada quando caracterizada apresentou módulo de finura de 1,16

a mesma foi doada pela empresa FUNDIMISA, localizada na cidade de Santo Ângelo. Já no estudo de Siddique *et al.* (2011) realizado na Índia, a areia de fundição utilizada apresenta módulo de finura de 1,78. De acordo com a ABNT NBR 7211:2022 o agregado miúdo com módulo de finura de 1,55 a 2,20 é considerado como zona utilizável inferior, ou seja, muito fino.

Figura 10 – Curva granulométrica da areia de fundição fenólica



Fonte: Sokolovicz (2020).

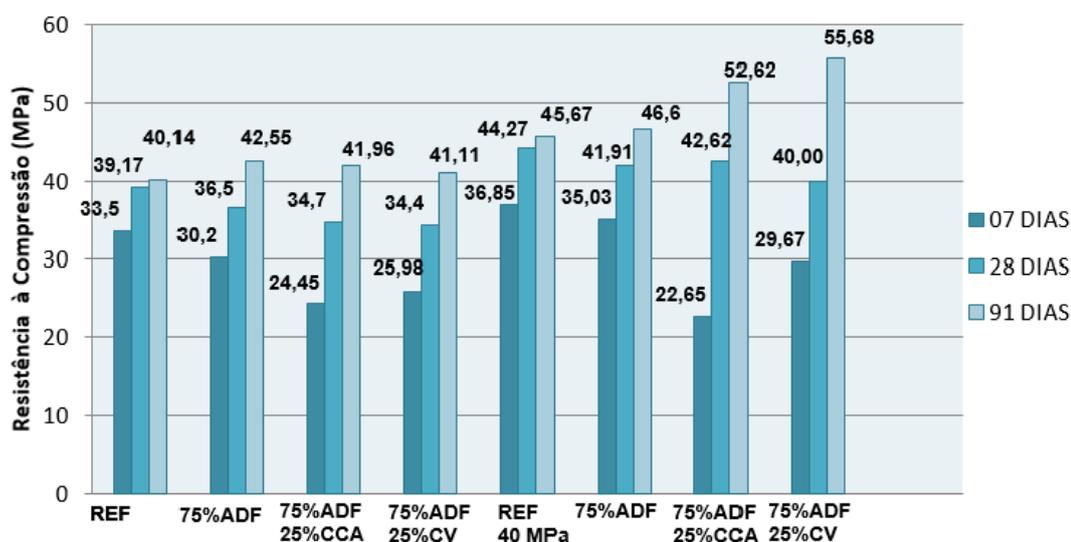
Tendo em vista a problemática que envolve o gerenciamento por empresas quanto à areia de fundição, a implementação do reuso deste resíduo, que é simplesmente descartado, contribui no desenvolvimento da sustentabilidade em construções.

2.3.2.1 Influência da areia de fundição no concreto

Copetti (2019) em seu estudo analisou as propriedades mecânicas e ciclo de vida para o dimensionamento de um pilar com diferentes traços de concreto. Os traços foram divididos em oito, sendo dois destes denominados como traço referência, com resistências de 30 e 40MPa, sem adições e os demais traços compostos com porcentagem de 75% de areia de fundição e 25% de cinza volante e cinza de casca

de arroz, dependendo do traço. O cimento utilizado foi o CP V – ARI. Neste estudo, a determinação da resistência à compressão foi realizada aos 7, 28 e 91 dias. Os resultados obtidos estão representados na figura 11.

Figura 11 – Resultados de resistência à compressão axial



Fonte: Copetti (2019).

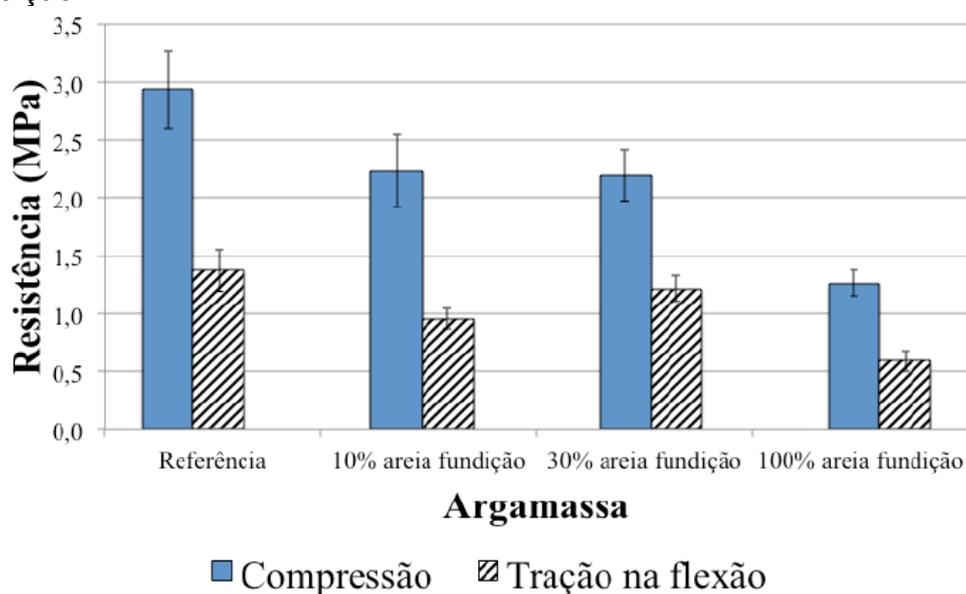
Conforme os resultados apresentados na figura 8, observa-se que quanto maior o tempo de cura, maior é a resistência, principalmente para o traço que contém cinza volante. Quando foi realizada a substituição da areia natural pela areia de fundição houve pouco crescimento em relação aos traços com adições minerais, significando dessa forma, que as pozolanas contribuíram para o aumento da resistência no concreto. Conforme a autora, ao levar em consideração todos os parâmetros analisados no estudo: Resistência à compressão axial, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e retração total, o traço que melhor correspondeu foi o composto por 75% de areia de fundição e 25% de cinza de casca de arroz para resistência de 40 MPa. E ainda, a redução de 24% no custo e impacto ambiental dos traços quando o *fck* aumentou de 30 para 40 MPa.

Casali *et al.* (2018), por exemplo, aplicou a areia de fundição fenólica em argamassas de revestimento. Nesse estudo os autores elaboraram um planejamento onde substituíram em diferentes teores, a areia natural de rio pela areia de fundição fenólica. Os autores observaram que a adição de areia de fundição fenólica influenciou tanto no estado fresco como no endurecido do concreto. No estado fresco foi possível

observar que o traço que utilizou a porcentagem de 100% de areia de fundição obteve maior demanda de água para corresponder ao índice de consistência.

No estado endurecido, foi possível observar que a argamassa com substituição de areia natural por areia de fundição apresentou redução na resistência. Todos os traços do estudo com a substituição da areia natural pelo resíduo, em porcentagens de 10, 20 e 30%, tiveram valores de resistência menores do que o traço referência (sem substituição), conforme é possível verificar na figura 12.

Figura 12 – Resistência a compressão e à tração na flexão de argamassa com areia de fundição



Fonte: Casali et al. (2018).

Com a mesma finalidade em buscar um adequado uso para aplicar a areia de fundição, Santos *et al.* (2016), produziu blocos estruturais de concreto utilizando a areia de fundição que é descartada como substituição da areia natural. Assim como Casali *et al.* (2018), Santos et al. (2016) em seu trabalho utilizou a areia de fundição em diferentes teores (5%, 10%, 30%, 35%, 40%, 45% e 50%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90% e 95%), para obtenção de maiores resultados. Após as análises os autores destacaram que o reaproveitamento para essa finalidade é tecnicamente viável, por sua resistência a compressão e aspecto visual estarem de acordo a norma específica para esse tipo de material, ABNT NBR 6136:2016. Além de proporcionar economia para a indústria, pois desta forma, reduz gastos destinados ao descarte do resíduo.

2.3.3 Efluente tratado de aterro sanitário

Devido ao grande crescimento populacional, pode-se citar como uma consequência que este fato produz é o aumento da produção de lixo em grande escala. Esse aumento é dado de forma contínua e cada vez maior. De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) somente no ano de 2020 foram geradas 82,5 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Ou seja, 225,965 toneladas diárias. Sendo que o previsto para o ano de 2050 é que ocorra um aumento de 50% na produção de RSU.

Gera-se grande quantidade de resíduo urbano diariamente e quando destinado corretamente, realiza-se a coleta seletiva e então esse resíduo é encaminhado a um local apropriado. No local destinado a receber toneladas de lixo, há um tratamento adequado para o resíduo, para que este não cause maiores danos ao meio ambiente, e assim, o mesmo recebe sua destinação final (Secretaria Nacional de Saneamento, 2021).

A questão do lixo é um tópico muito comentado por ser um assunto de preocupação mundial. Pois quando o mesmo recebe a finalidade incorreta, como por exemplo, despejo em locais de risco, há probabilidade de contaminação do solo, dos lençóis freáticos e posteriormente à saúde humana.

No ano de 2020 a destinação dada aos RSU foi principalmente em aterros sanitários, aproximadamente 46 milhões de toneladas, atingido 60% dos resíduos coletados que tiveram destinação adequada no país. Por outro lado, áreas de disposição inadequada, incluindo lixões e aterros controlados, ainda estão em operação e receberam quase 40% do total de resíduos coletados. (ABRELPE, 2022).

A tabela 9 traz um comparativo dos anos 2010 e 2019 referente à disposição final dos RSU de acordo com cada região e por tipo de destinação (toneladas/ano).

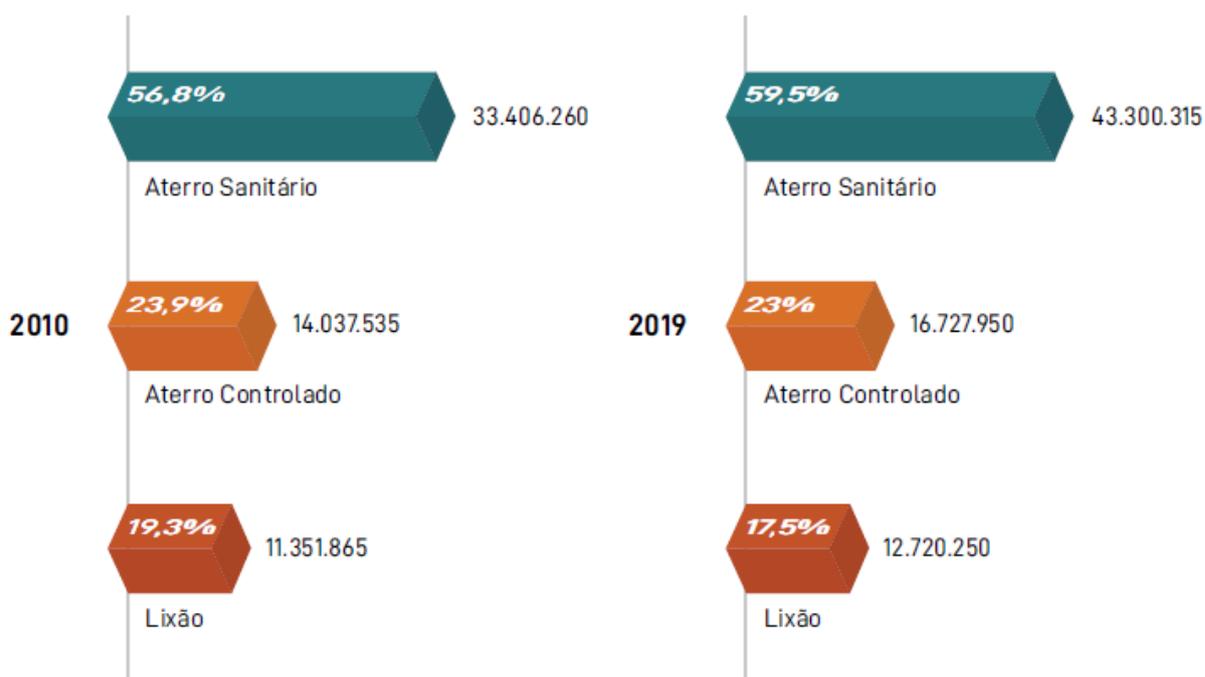
Tabela 9 – Disposição dos RSU

Região	2010			2019		
	Aterro Sanitário	Aterro Controlado	Lixão	Aterro Sanitário	Aterro Controlado	Lixão
Norte	1.165.810	1.015.795	1.348.675	1.683.745	1.421.675	1.664.765
Nordeste	4.314.300	4.312.110	4.486.215	5.686.700	5.255.270	5.031.525
Centro-oeste	1.272.025	2.217.010	1.036.235	2.252.415	1.957.860	1.243.190
Sudeste	22.166.085	5.322.065	3.639.780	28.121.425	6.653.220	3.906.960
Sul	4.488.040	1.170.555	840.960	5.556.030	1.440.290	873.445
Brasil	33.406.260	14.037.535	11.351.865	43.300.315	16.727.950	12.720.250

Fonte: Adaptado de ABRELPE (2021).

Na Figura 11 é representado em forma de gráfico, um comparativo entre o ano de 2010 e 2019 da destinação final, em toneladas, que é dada no Brasil para os RSU.

Figura 11 – Destinação final dos RSU no Brasil



Fonte: ABRELPE (2021).

Conforme Silva *et al.* (2020) no Brasil os aterros sanitários classificam-se como o método de disposição final de RSU mais utilizado, porém, de forma desigual de acordo com cada região. Sendo a região sudeste mais avançada quanto a este tipo de destinação.

Tendo em vista a grande geração de resíduos, é possível observar que se faz necessário ter grande quantidade de aterros sanitários para atender toda a demanda. Os aterros sanitários devem ser projetados conforme as normas técnicas ABNT NBR 8419:1992 e NBR 15849:2010, que constam diretrizes para elaboração e implantação de aterros tendo como referência a redução de impactos ambientais que este tipo de atividade pode causar. Considera-se todos os fatores que englobam um aterro sanitário: sistema de operação, drenagem das águas pluviais, impermeabilização da base do aterro, cobertura final, sistemas de coleta de percolados e gases gerados e sistema de monitoramento e fechamento do aterro. Além da responsabilidade quanto aos poluentes gerados no local e distanciamento de corpos hídricos (PERTILE, 2013).

O tratamento realizado nos resíduos sólidos em aterros sanitários é considerado como a forma mais apropriada. Nesse tipo de destinação ocorre a degradação da matéria orgânica dos resíduos sólidos, originando dessa forma, um líquido de coloração escura que possui alta capacidade de contaminação de solos e lençol freático, além de problemas para a saúde da população. Esse efluente é denominado como chorume, podendo ser denominado também como lixiviado ou percolado. Além do chorume, também é gerado o biogás (SOARES *et al.*, 2017; GOUVEIA 2012; KURNIAWAN *et al.*, 2006).

De acordo com a ABNT NBR 8419:1992, pode-se definir o chorume como líquido, produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, que tem como características a cor escura, o mau cheiro e a elevada DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio).

Uma avaliação dos dados para o lixiviado de mais de 150 aterros na Alemanha e alguns localizados na Espanha, mostra que a quantidade de componentes dissolvidos no lixiviado de diferentes tipos de aterros cobre a faixa de 2 a 15 g/l. A partir disso, considera-se que a fração de componentes orgânicos cobre uma faixa entre 0,1 e 3 g/l. Isso é muito menor que a parte inorgânica, indicada para ter uma faixa de 1,6 a 14,3 g/l, incluindo amônia com valores entre 0,3 a 2 g/l. Isso entre 80 e

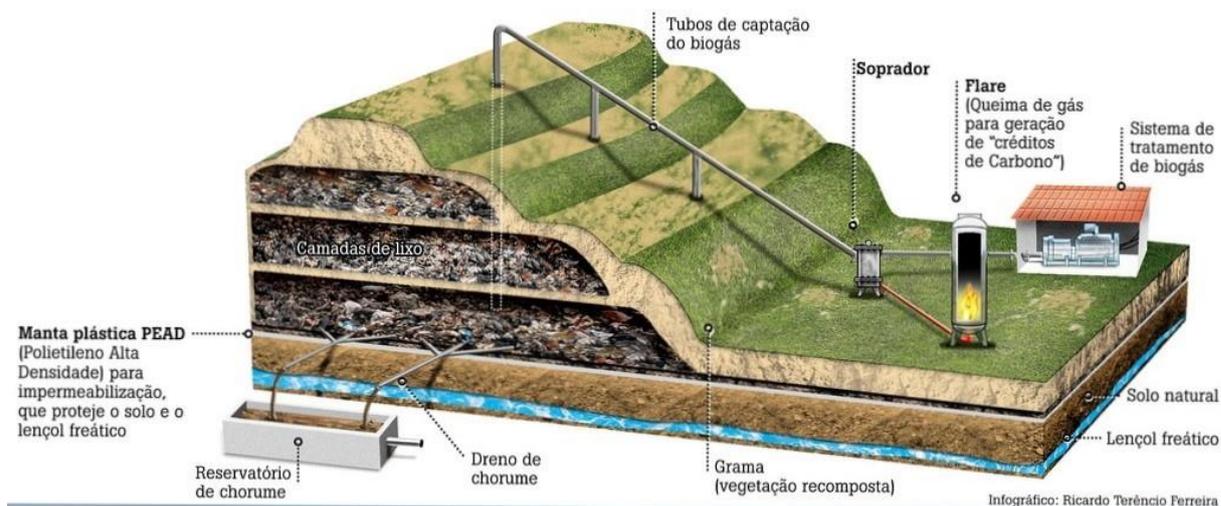
95% dos componentes dissolvidos no lixiviado terrestre correspondem a material inorgânico e apenas entre 5 e 20% são de origem orgânica.

Conforme Silva (2016 *apud* ALVES *et al.*, 2008), em termos de denominação, o chorume é diferente de lixiviado ou percolado. O primeiro, seria o material originado pela decomposição da matéria orgânica e da própria água dos resíduos. Já o lixiviado ou percolado, é a combinação do chorume com a água da chuva que infiltra no aterro sanitário.

Apesar de possuir uma camada que serve de impermeabilizante entre o resíduo sólido e o solo, técnicas de tratamento do lixiviados são necessárias, pois pode ocorrer alguma falha se a camada que impermeabiliza não foi executada da forma correta ou houver possíveis problemas que levem a poluição do solo e posteriormente em corpos hídricos (VIEIRA *et al.*, 2020 *apud* SIZIRICI *et al.*, 2015).

A figura 12 apresenta um modelo de aterro sanitário, com suas características e implementações.

Figura 12 – Modelo esquemático de aterro sanitário



Fonte: Adaptado de VGR Gestão de Resíduos Online. 2020.

Conforme Serafim *et al.* (2003) o chorume é muito mais agressivo que o esgoto. Tendo em vista o risco que o chorume pode oferecer ao meio ambiente, por ser altamente poluente, o seu tratamento antes do lançamento ao meio ambiente é indispensável, sendo também exigência destacada na norma ABNT NBR 8419:1992.

A norma representa diretrizes para o sistema de tratamento de percolado, para que este seja tratado antes da sua destinação final em corpos hídricos.

São estabelecidos na Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), Nº 430/201, as condições e padrões que o lixiviado gerado em fonte poluidora deve atender para ser possível o seu lançamento diretamente no corpo receptor.

De acordo com a Resolução CONAMA Nº 430/201, os efluentes para lançamento devem atender as seguintes condições:

Art. 16. Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente no corpo receptor desde que obedeçam às condições e padrões previstos neste artigo, resguardadas outras exigências cabíveis:

I - Condições de lançamento de efluentes:

a) pH entre 5 a 9;

b) temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura;

c) materiais sedimentáveis: até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;

d) regime de lançamento com vazão máxima de até 1,5 vez a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor, exceto nos casos permitidos pela autoridade competente;

e) óleos e graxas:

1. óleos minerais: até 20 mg/L;

2. óleos vegetais e gorduras animais: até 50 mg/L;

f) ausência de materiais flutuantes; e

g) Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5 dias a 20°C): remoção mínima de 60% de DBO sendo que este limite só poderá ser reduzido no caso de existência de estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor;

Os padrões do efluente para receber o lançamento, conforme a Resolução CONAMA Nº 430/201 são apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Padrões que o efluente deve atender para o lançamento no corpo receptor

Parâmetros inorgânicos	Valores máximos
Arsênio total	0,5 mg/L As
Bário total	5,0 mg/L Ba
Boro total (Não se aplica para o lançamento em águas salinas)	5,0 mg/L B
Cádmio total	0,2 mg/L Cd
Chumbo total	0,5 mg/L Pb
Cianeto total	1,0 mg/L CN
Cianeto livre (destilável por ácidos fracos)	0,2 mg/L CN
Cobre dissolvido	1,0 mg/L Cu
Cromo hexavalente	0,1 mg/L Cr+6
Cromo trivalente	1,0 mg/L Cr+3
Estanho total	4,0 mg/L Sn
Ferro dissolvido	15,0 mg/L Fe
Fluoreto total	10,0 mg/L F
Manganês dissolvido	1,0 mg/L Mn
Mercúrio total	0,01 mg/L Hg
Níquel total	2,0 mg/L Ni
Nitrogênio amoniacal total	20,0 mg/L N
Prata total	0,1 mg/L Ag
Selênio total	0,30 mg/L Se
Sulfeto	1,0 mg/L S
Zinco total	5,0 mg/L Zn
Parâmetros Orgânicos	Valores máximos
Benzeno	1,2 mg/L
Clorofórmio	1,0 mg/L
Dicloroeteno (somatório de 1,1 + 1,2cis + 1,2 trans)	1,0 mg/L
Estireno	0,07 mg/L
Etilbenzeno	0,84 mg/L
fenóis totais (substâncias que reagem com 4-aminoantipirina)	0,5 mg/L C ₆ H ₅ OH
Tetracloroeto de carbono	1,0 mg/L
Tricloroeteno	1,0 mg/L
Tolueno	1,2 mg/L
Xileno	1,6 mg/L

Fonte: Adaptado de Resolução CONAMA N° 430/201

Conforme o estudo de Serafim *et al.* (2003), a técnica de tratamento de percolado a ser adotada se apresenta como um desafio devido a variabilidade de técnicas existentes e, a técnica adotada para determinado aterro não pode ser necessariamente utilizada para demais aterros. Em função da idade do aterro e grau de estabilização do resíduo sólido (PERTILE, 2013 *apud* KHERADMAND *et al.*, 2010).

Nos aterros localizados na região nordeste do Brasil, por exemplo, técnicas como lagoas de estabilização e os processos biológicos são os mais utilizados por aterros para o tratamento do lixiviado (SILVA *et al.*, 2020).

Esse efluente apresenta em sua composição materiais compósitos recalcitrantes, e devido a esse fato, a sua remoção apresenta um grau maior de dificuldade. São estudadas diversas técnicas para o tratamento do lixiviado em aterros sanitários, podendo ser divididos em tratamentos biológicos (reatores anaeróbios, sistemas de lagoas, lodos ativados, filtros biológicos), físico-químicos (coagulação, filtração adsortiva, precipitação química) e eletrolíticos (eletrocoagulação, eletroflotação, eletrooxidação, eletroredução). Apesar da grande quantidade de técnicas, na literatura ainda não se encontra qual é a metodologia mais eficiente para esse tratamento (GALVÃO *et al.*, 2020).

Mesmo quando é utilizado o tratamento biológico combinado com a adsorção por carvão ativo ou com a oxidação de parte da matéria orgânica dissolvida com ozônio ou outros agentes oxidantes, somente a destruição parcial dos contaminantes é alcançada. Devido a este fato, formas mais eficazes de tratamento deste material tiveram que ser desenvolvidas para que o fosse reduzido o impacto negativo do lixiviado produz ao meio quando não é purificado de forma completa (PETERS, 1998).

Tendo em vista o desafio em se determinar uma técnica em específico para o tratamento do lixiviado, a alternativa mais viável e que predomina, é àquela que apresenta bom desempenho no tratamento e custo compatível (PERTILE, 2013).

O tratamento do chorume deve garantir a remoção de contaminantes como DQO, DBO, amônia e metais pesados. A respeito das técnicas de tratamento, ele afirma que todas possuem contras e prós, não existindo uma técnica perfeita (FORNIELES, 2012).

De acordo Fornieles (2012), os processos físico-químicos funcionam como um pré-tratamento, tendo em vista que nesse método não garante que o efluente atenda conforme a legislação parâmetros de DQO (Demanda Química de Oxigênio), DBO₅ e

amônia. Os processos biológicos, assim como os processos físico-químicos apresentam limitações e por isso, são incompletos para um correto tratamento do chorume. No tratamento biológico a fração biodegradável do chorume não é eliminada e por isso, há necessidade de o chorume passar pelo processo físico-químico para os metais antes. Portanto, o tratamento que apresenta o melhor resultado frente à eliminação de poluentes, é o processo físico através de separação por membranas.

Entretanto, o autor destaca que a osmose reversa é a única tecnologia que consegue cumprir parâmetros mais restritivos dos contaminantes. O resultado desse processo possibilita que do permeado, 70% podem ser destinados em corpos hídricos ou reutilizado. Enquanto 30% concentram contaminantes e podem ser injetados novamente no aterro de forma controlada.

De acordo com Peters (1998), em muitos aterros, a maneira mais ecológica e econômica de tratar o lixiviado do aterro é reduzir seu volume em 75 a 80% usando osmose reversa e, em seguida, devolver o concentrado ao aterro por reinjeção controlada. O autor destaca ainda em seu estudo uma análise em aterros em países como a Alemanha e Espanha, referente a concentração de componentes dissolvidos no lixiviado, o qual corresponde a uma quantidade de 2 a 15 g/l. Deste valor, considera-se que a fração de componentes orgânicos cobre uma faixa entre 0,1 e 3 g/l. Isso é muito menor que a parte inorgânica, indicada para ter uma faixa de 1,6 a 14,3 g/l, incluindo amônia com valores entre 0,3 a 2 g/l. Isso entre 80 e 95% dos componentes dissolvidos no lixiviado do aterro correspondem a material inorgânico e apenas entre 5 e 20% são de origem orgânica.

A técnica de tratamento utilizada e denominada com osmose reversa, de forma única ou aliada a demais técnicas para tratamento de lixiviado, representa a forma mais eficaz para alcançar a purificação total. Esse resultado se dá devido à capacidade das membranas modernas de osmose reversa de alta rejeição em reter contaminantes orgânicos e inorgânicos dissolvidos em água a taxas de rejeição de 98 a 99%, a osmose reversa também é útil para purificar resíduos líquidos, como lixiviados de aterros sanitários e para ajudar a resolver o problema crescente problema da poluição da água. A membrana de osmose reversa tem a função de se comportar como uma barreira, então é possível que o próprio processo de purificação seja controlado continuamente e com alto grau de segurança pela medição simples e precisa da condutividade elétrica. Para que esse resultado satisfatório seja alcançado,

além de exigir membranas de alta resistência, o tratamento de lixiviados de aterros sanitários com osmose reversa exige o uso de sistemas de módulos de canal aberto que possam ser limpos com alta eficiência no que diz respeito à incrustação, incrustação e principalmente bioincrustação (PETERS, 1998).

O resultado do tratamento, é o permeado e ele contém apenas níveis muito baixos de contaminantes inorgânicos e orgânicos. Estes atendem aos padrões de água potável e a descarga dessa água para rio ou aquífero contribui para a manutenção do equilíbrio natural.

A tabela 11 representa os parâmetros de potabilidade para substâncias químicas inorgânicas que representam risco à saúde, com seus valores máximos permitidos que podem apresentar na água utilizada para consumo humano.

Tabela 11 – Parâmetros inorgânicos que representam risco a saúde de água para consumo humano.

Parâmetro	Valor máximo
Antimônio	0,006 mg/L
Arsênio	0,01 mg/L
Bário	0,7 mg/L
Cádmio	0,003 mg/L
Chumbo	0,01 mg/L
Cobre	2 mg/L
Cromo	0,05 mg/L
Fluoreto	1,5 mg/L
Mercúrio Total	0,001 mg/L
Níquel	0,07 mg/L
Nitrato	10 mg/L
Nitrito	1 mg/L
Selênio	0,04 mg/L
Urânio	0,03 mg/L

Fonte: Adaptado de Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021.

Sá *et al.* (2012) em seu estudo, afirma que o lixiviado tratado apresenta boa qualidade e pode ser reutilizado tendo sua aplicação por exemplo, no setor da agricultura na irrigação de lavouras.

Nesse sentido, se houver a destinação correta do lixo em locais com gerenciamento e implementação capaz de tratar o chorume e também os gases produzidos, poderá haver grandes mudanças em relação a sustentabilidade. Os

resíduos sólidos podem ser reciclados, gerando o chorume, o qual recebe o correto tratamento e assim gera um efluente que pode ser empregado em diversas áreas em substituição a água que é disponibilizada pela concessionária que possui um custo alto e é um recurso que deve ser preservado.

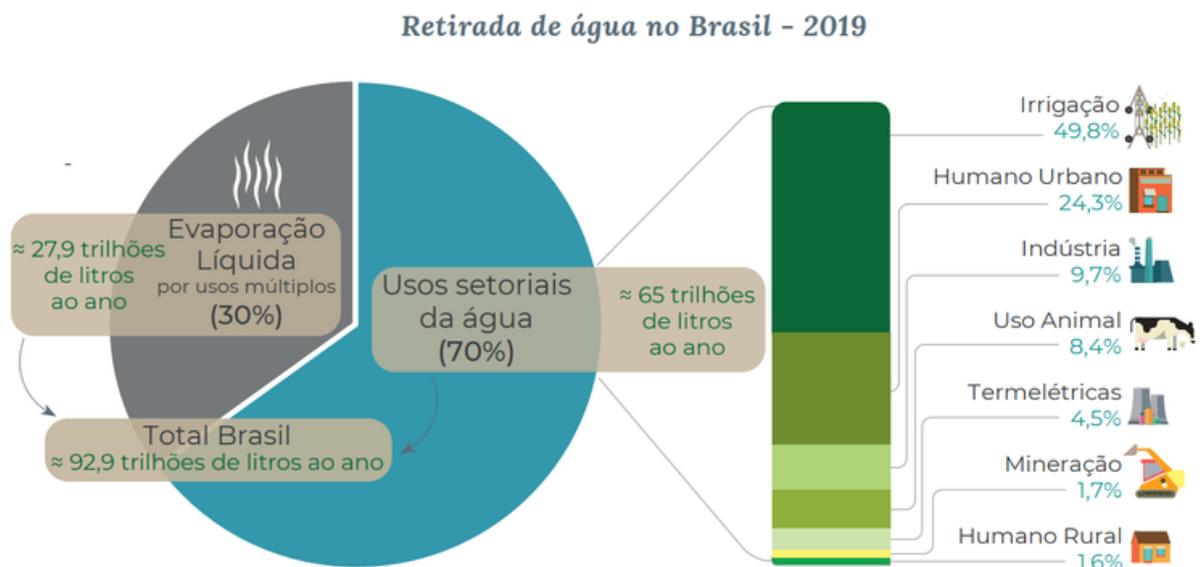
Uma das propostas do presente estudo é a utilização deste efluente tratado como substituição da água de amassamento na construção civil.

2.3.3.1 Influência do efluente tratado de aterro sanitário no concreto

A água é um recurso natural fundamental à vida. De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2022), no Brasil o uso da água é direcionado principalmente para irrigação de lavouras, abastecimento público, atividades industriais, geração de energia, extração mineral, aquicultura, navegação, turismo e lazer. A forma de utilização é classificada como uso consuntivo e não consuntivo da água. No primeiro, a água é simplesmente captada e consumida, já no segundo, a água não é consumida diretamente.

Conforme ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico), (2022), cerca de 93 trilhões de litros de água são captados anualmente para atender demandas dos usos consuntivos. A figura 13 representa esquematicamente o uso da água no Brasil no ano de 2019.

Figura 13 – Utilização da água no Brasil em 2019



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). (2022).

No setor da construção civil o consumo de água, conforme Meyer (2004) em nível mundial, a indústria de concreto demanda mais de um trilhão de galões de água por ano, sendo que neste valor ainda não é considerado o consumo de água que é gerado para lavagem e cura.

Conforme Da Silva e Violin (2013) para a produção de 1m³ de concreto dosado em central há uma demanda de aproximadamente 211 litros de água. Tendo em vista a crise hídrica que assolou o Brasil em 2021 e a grande demanda de água que é consumida diariamente, o estudo de novas alternativas que visem minimizar, ou substituir o consumo de água potável é de grande importância. A água de amassamento é um dos componentes necessários à mistura do concreto, juntamente com o cimento, areia e brita.

No sentido de empregar água residual como substituição da água potável utilizada para amassamento, Petrucci (1998) afirma que água que contém baixo teor de impurezas não comprometerá o concreto. Entretanto, Neville (2013) afirma que se a água de amassamento apresentar grau de impurezas elevado, implica problemas na resistência do concreto, no tempo de pega, corrosão da armadura e gera eflorescência. Mas o autor certifica que a água imprópria para consumo não é necessariamente inadequada para a mistura de concreto, inicialmente deve-se fazer uma análise da mesma. Afirma ainda que águas que contém excesso de alga, óleo, sal ou açúcar, é considerado um risco para a resistência do concreto.

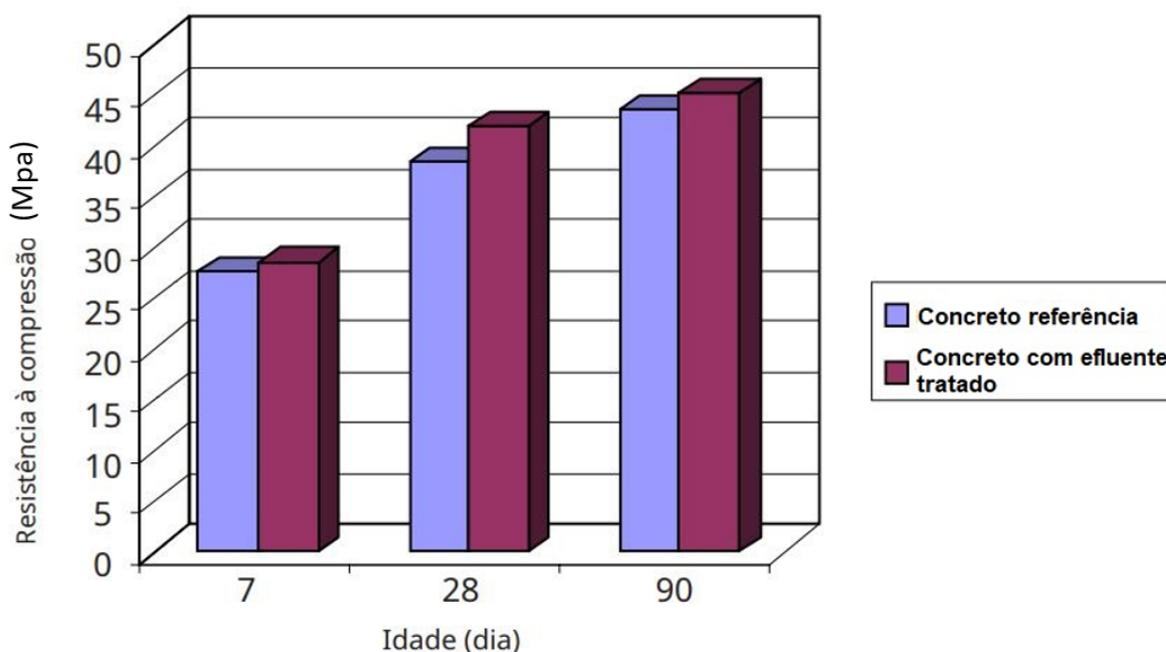
Embasado na questão de preservação da água e considerando a demanda deste recurso natural para a produção de concreto, ocorre a possibilidade de reaproveitamento de efluentes. Na construção civil ocorre grande demanda de água potável, tendo em vista que a mesma é utilizada nos processos de produção, cura úmida e limpeza. A utilização de efluente como substituição da água é uma área pouco explorada, mas com resultados significativos quanto à sustentabilidade.

A literatura apresenta diversos estudos de investigação quanto a aplicação de efluentes na produção do concreto.

Um estudo realizado na Malásia, realizado por Lee *et. al* (2001) comparou as propriedades do concreto convencional para resistência de 35 MPa com concreto produzido com efluente tratado de estação de tratamento de esgoto. O mesmo avaliou a resistência a compressão para idades de 7, 28 e 90 dias. Aos 28 dias o concreto com efluente tratado apresentou um aumento da resistência a compressão de 9%

maior em relação ao concreto convencional. A figura 14 mostra os resultados de resistência a compressão obtidos no trabalho.

Figura 14 – Influência de efluente tratado na resistência à compressão comparado com concreto convencional



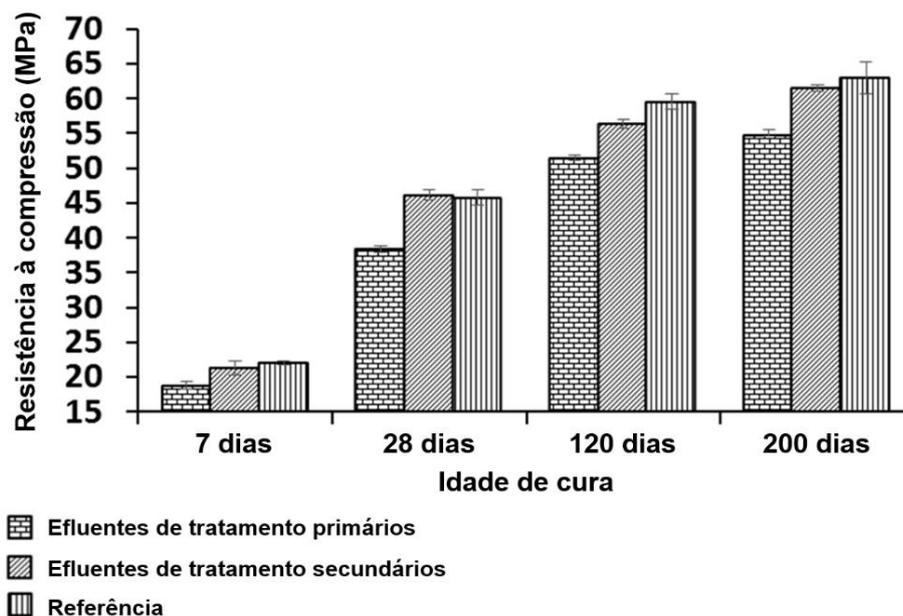
Fonte: Adaptado de Lee *et al.* 2001.

Com relação ao tempo de pega, observou-se que os tempos de pega inicial e final são ligeiramente maiores para o concreto com efluente tratado em comparação com o concreto referência. Isso provavelmente se deve às impurezas no efluente tratado, como sais de zinco e cobre, que variam no tempo de presa. Outros sais que reagem ativamente como retardadores incluem iodato de sódio, fosfato de sódio, arsenato de sódio e borato de sódio.

Ghair e Al-Mashaqbeh (2016) salientam em seus estudos que a reutilização de águas residuais domésticas é uma alternativa potencial. Em específico, observaram que a argamassa produzida com efluentes de tratamento secundário, com tempo de cura de até 200 dias, não tem efeito negativo significativo na resistência à compressão. Já a utilização das águas residuais primárias; como água de amassamento para produção de argamassa, levou uma redução na resistência à compressão em até 16,2% com relação ao traço referência (sem efluente). A figura

15 mostra os resultados obtidos pelos autores, referente aos efeitos das águas residuais tratadas nas propriedades da argamassa.

Figura 15 – Influência de efluentes de tratamento primários e secundários na resistência à compressão da argamassa em várias idades de cura úmida



Fonte: Adaptado de Ghair e Al-Mashaqbeh. 2016.

De acordo com os resultados apresentados na figura 15 observa-se que a argamassa feita com efluentes de tratamento primários no tempo de cura (7, 28 e 200 dias) não tem efeito negativo significativo na resistência à compressão da argamassa. No entanto, aos 120 dias há uma ligeira redução na resistência à compressão. O uso de efluentes de tratamento secundários como água de amassamento levou a uma redução na resistência à compressão no tempo de cura (7, 28, 120 e 200 dias). Isso pode ser devido ao efeito dos teores orgânicos, que podem ter contribuído para a redução da resistência da argamassa (GHAIR e AL-MASHAQBEH, 2016).

De acordo com a ABNT NBR 15900-1:2009, a água de amassamento do concreto essencial é a água potável, sem necessidade de ensaios. A normativa salienta que água de esgoto e água proveniente de esgoto tratado não são adequadas para uso no concreto, no entanto, a própria norma estabelece condições específicas para que a água de reuso atenda e então possa ser utilizada. E ainda indica que o uso deste tipo de água está condicionado a aplicações específicas em comum acordo

entre o fornecedor de água e o responsável pela preparação do concreto, devendo ser atendidos todos os requisitos desta norma.

A tabela 12 representa um comparativo dos parâmetros requisitados pela norma ABNT NBR 15900-1:2009 com as normas internacionais: *American Concrete Institute – ACI e American Society for Testing Materials – ASTM; Australian Standards – AS; British Standards European Standard – BS EN; e Indian Standards – IS.*

Tabela 12 – Comparação dos parâmetros e limites da legislação e normatização

Norma	NBR 15900	IS 3025* IS 456**	AS 1379	ASTM C94 *** ASTM 1602M ****	EN 1008
País/Região	Brasil	Índia	Austrália	Estados Unidos	Europa
pH	>5	>6 **	>5	-	>4
Sulfatos	<2.000	400*	< 500	< 3.000****	< 2.000
Fosfatos	<100	-	-	-	-
Nitratos	<500	-	-	-	-
Chumbo	<100	-	-	-	-
Zinco	<100	-	-	-	-
Sólidos em suspensão totais	-	<2.000*	-	< 50.000 ***	< 100
Cloretos	<1.000	< 2.000* < 500**	< 800	< 1.000 ****	< 1.000

Nota 1: Todos os limites foram considerados para confecção de concreto armado

Nota 2: Todos os valores são expressos em mg/l, exceto o pH, que é adimensional.

Fonte: Adaptado de Junior e Obraczka (2020).

Tendo em vista os parâmetros considerados em norma brasileira ou internacionais para condições de água a ser utilizada em concreto e estudos já realizados que incluíram o uso de efluentes tratados como forma de substituição para água de amassamento que corresponderam de forma positiva, observa-se uma fonte pouco explorada, mas com resultados satisfatórios.

Na literatura encontram-se diversas pesquisas com a utilização de efluentes tratados provenientes de estação de tratamento de esgoto. Neste estudo, porém, o efluente tratado a ser utilizado como substituição para água de amassamento é de aterro sanitário. O aterro encontra-se localizado na cidade de Giruá – RS, representado pela Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR).

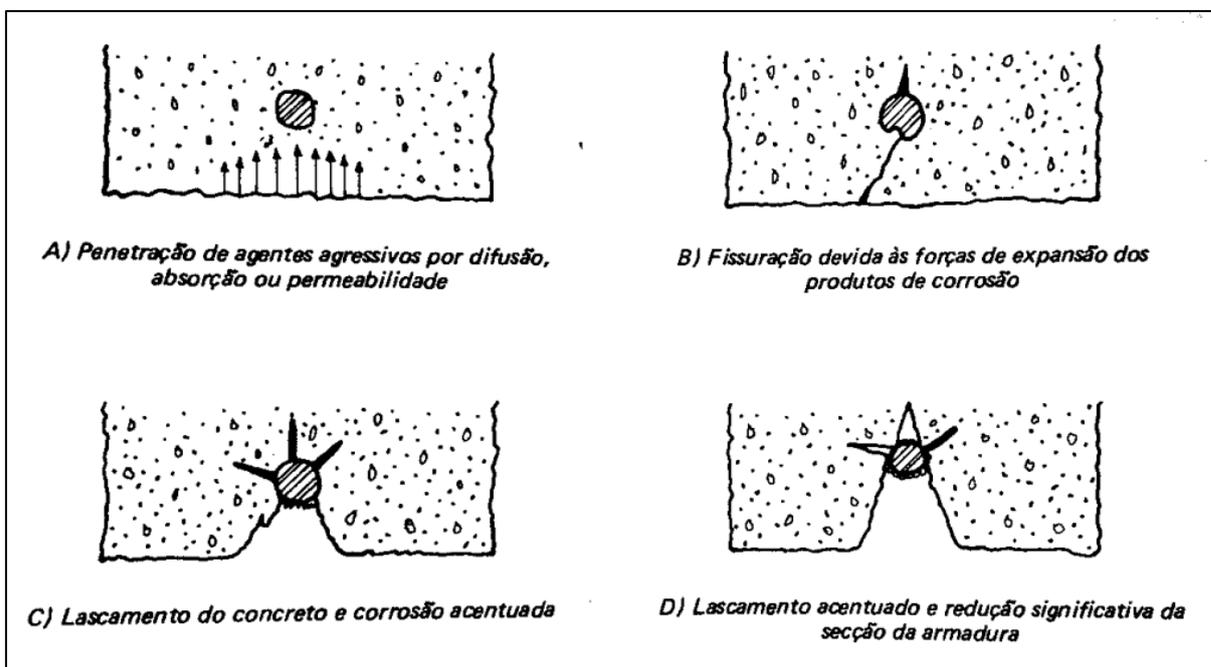
2.4 Corrosão das armaduras

De acordo com Neville (2016), o concreto juntamente com o aço são dois dos materiais estruturais mais utilizados atualmente.

O tipo de corrosão que ocorre em armaduras que estão inseridas no concreto, quando inserido em meio aquoso, é a corrosão eletroquímica (SOKOLOVICZ, 2013). Esse tipo de corrosão ocorre com maior frequência em um meio aquoso, no qual os íons estão presentes na água no solo ou no ar úmido. É considerado como a forma mais comum de ataque químico a metais. O processo da corrosão eletroquímica em metais se dá quando os átomos do metal perdem elétrons e se transformam em íons. Como consequência desse processo, progressivamente o metal é danificado pela corrosão e origina um subproduto (ASKELAND, 2019).

Helene (1993), destaca que os efeitos da corrosão nas armaduras em concreto, apresentam-se na forma de deteriorações. É possível detectar a corrosão de forma visual, através de manchas superficiais causadas pelos produtos de corrosão, fissuras, destacamento do concreto de cobrimento, redução da seção resistente das armaduras com frequente seccionamento de estribos, redução e eventual perda de aderência das armaduras principais, ou seja, deteriorações que levam a um comprometimento da segurança estrutural. A figura 16 representa a evolução da corrosão em estruturas de concreto.

Figura 16 - Evolução esquemática da deterioração de estruturas de concreto por corrosão de armaduras

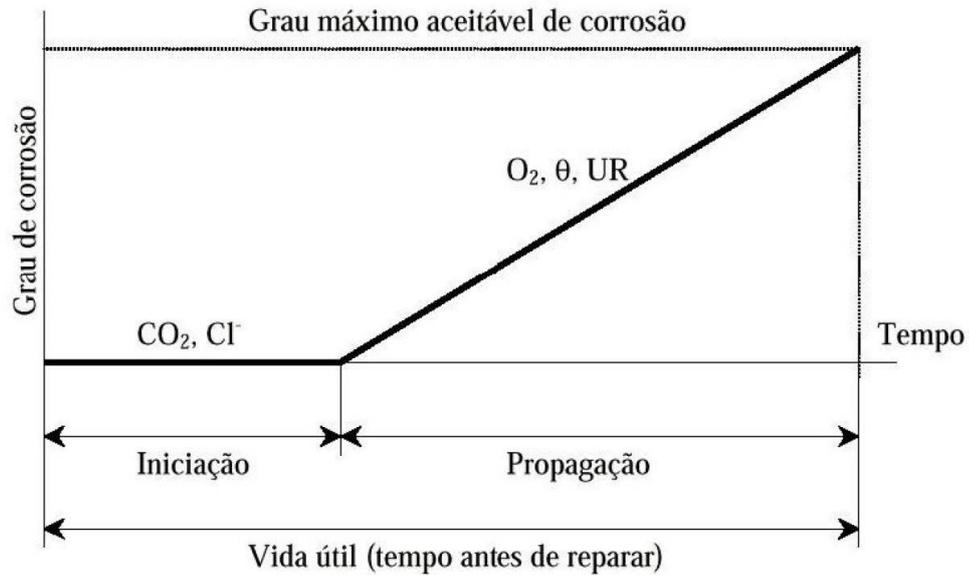


Fonte: HELENE (1986).

Tuutti (1982) indica que é o ambiente e não a abertura da fissura que é o parâmetro decisivo para o processo de corrosão. Entretanto, aponta que o ataque de corrosão começa quase imediatamente em uma zona de rachadura e nesse processo acaba ocorrendo a repassivação pois os produtos da corrosão selam a rachadura. O ataque só inicia quando toda a camada de concreto for destruída, dessa forma, afirma-se que a corrosão pode ser detectada através de zonas de rachaduras. Nesta etapa, o mais importante é determinar o estágio em que o processo se encontra, pois a partir do momento em que a cobertura de concreto tenha sido eliminada, os ataques ocorrem de forma acelerada (TUUTTI, 1982).

O autor estabelece um modelo que relaciona a vida útil e a corrosão, o qual é possível observar na figura 17. O modelo representa dois períodos, o período de iniciação e o período de propagação. O primeiro, trata-se do processo em que o agente agressivo, ou seja, a carbonatação leva para atingir a armadura. No período de propagação, compreendido pelo modelo com o segundo período, já atingido a armadura, a corrosão aumenta gradativamente causando a decomposição da mesma (SOKOLOVICZ, 2013).

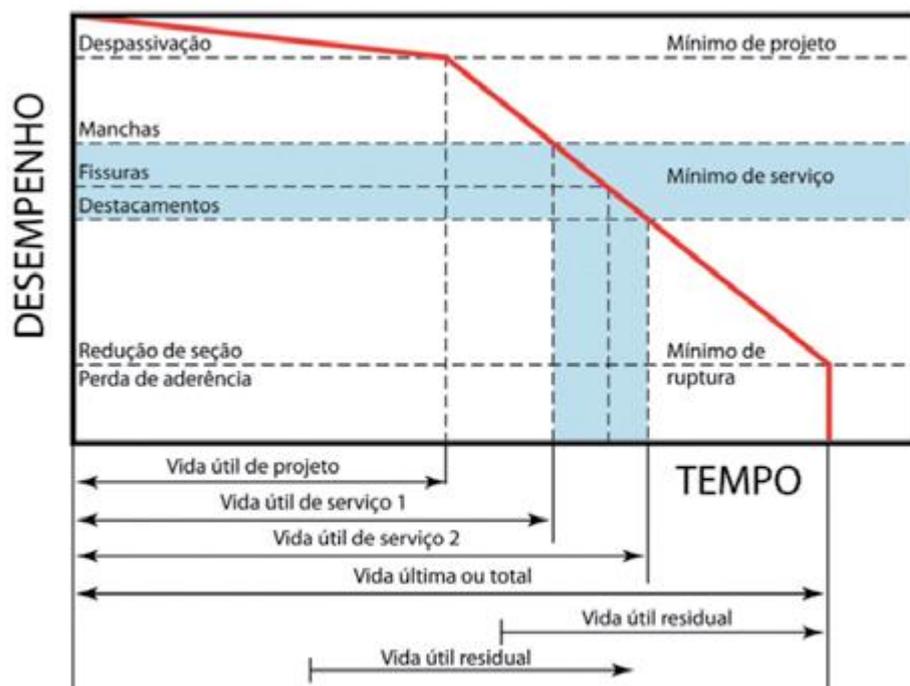
Figura 17 – Modelo de Tuutti



Fonte: Tuutti (1982).

A presença da corrosão em armaduras pode comprometer a estrutura, e reparos são necessários, para manter a segurança estrutural das edificações. A corrosão está diretamente relacionada com a vida útil das edificações, por ser um dos fatores que estruturam a definição de durabilidade. De acordo com Medeiros, Andrade e Helene (2013 *apud* Helene, 1993) no Brasil a definição de vida útil de projeto possui uma relação com fenômenos que são apresentados na corrosão de armaduras. Essa relação pode ser representada na figura 18.

Figura 18 - Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão de armaduras



Fonte: HELENE (1997).

O ensaio de corrosão CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada) proposto por Lima (1990) a partir de estudos realizados por Varela e Espinosa (1988), tem por objetivo avaliar a perda de massa que ocorre na armadura quando a mesma é submetida a um ambiente agressivo, como o ambiente marinho, por exemplo. A técnica consiste basicamente em estimular a corrosão nos corpos de prova, inseridos dentro de recipiente rico em cloretos, através de indução eletroquímica, seja esta por meio da aplicação de uma diferença de potencial ou por corrente elétrica (REGINATO, 2020).

2.5 Difração de raio X no concreto

A difração de raio x, através dos arranjos dos átomos, permite avaliar as propriedades. O método usa uma emissão de feixes de raio x, e através de uma rede cristalina do material que está em estudo, identifica a composição química. A presente técnica foi utilizada na pesquisa como forma de caracterização das misturas realizadas.

Lothenbach *et al.* (2016), destaca que o composto mais detectável é o CH pois

é 100% cristalino. Já o C-S-H é um material nano cristalino ou amorfo, ou seja, para encontrá-lo na difração de raio X é necessário fazer o ensaio de um material análogo ao C-S-H que seja cristalino, sendo a bibliografia recomenda a tobermorita, por ser um mineral natural com formato cristalino.

Para avaliação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) o método que deve ser utilizado é o método do padrão interno associado com o refinamento pelo método de Rietveld. O método do padrão interno é utilizar uma amostra já conhecida, com 100% de cristalinidade, sendo que um bom mineral para isso é o coríndon, que é um mineral a base de óxido de alumínio. Dessa maneira, utiliza-se o pó do material a ser ensaiado e adiciona junto ao elemento com 100% de cristalinidade uma fração conhecida em relação a massa. Quando for avaliar o material, deve-se colocar o método do padrão interno, onde deve-se marcar os picos de identificação. Assim, baseado no padrão interno o software calcula a porcentagem de materiais amorfos existentes. Dessa maneira, o método do padrão interno permite calcular o grau de amorfismo através do ensaio de difração de raio X. Para identificar esse material amorfo, deve ser utilizado juntamente com algum outro ensaio, como a termogravimetria. (SOKOLOVICZ, 2020).

Devido a complexibilidade do ensaio, desde a aquisição do mineral padrão até execução do mesmo, a autora realizou apenas o refinamento pelo método de Rietveld, não realizando o ensaio do padrão interno.

Os difratogramas são qualitativos e quantitativos. A análise qualitativa é realizada em conjunto com uma base de dados apropriada, onde cada material catalogado tem seu perfil de difração analisado em conjunto com a amostra em questão, de modo que os picos sejam coincidentes. Em associação aos resultados de TG-DTG, servem para detalhar as fases mineralógicas encontradas nas amostras (SOKOLOVICZ, 2020).

Segundo Sokolovicz (2020 *apud* MEHTA e MONTEIRO, 2014) quando a concentração de íons aluminato aumenta na mistura, devido à plena hidratação de C_3A e C_4AF , a etringita se torna instável, sendo convertida para monossulfato de cálcio hidratado, considerado como a fase final de hidratação dos compostos aluminatos. Como o teor de C_3A presente é reduzido no cimento utilizado, a concentração de íons aluminato para atingir o valor crítico para a dissolução da etringita é pequena, e tende a reduzir ao logo do tempo.

3 METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados de forma detalhada os materiais e técnicas utilizadas para a produção dos protótipos de concreto com utilização de resíduos e efluente tratado de aterro sanitário, investigados na pesquisa.

3.1 Caracterização dos materiais

3.1.1 Material cimentício

3.1.1.1 Cimento Portland CPV-ARI

O cimento utilizado no estudo foi o cimento Portland CPV-ARI. Conforme a ABNT NBR 16697:2018, o cimento CPV-ARI é caracterizado por atender às exigências de alta resistência inicial. A sua composição é na maior parte constituída em teor de 100 a 95% de clínquer e sulfatos de cálcio, sendo o restante do material, de 0 a 5% material carbonático. A tabela 13 apresenta de forma detalhada a composição química do CPV-ARI e a Tabela 14 apresenta a caracterização física do CPV-ARI. A curva granulométrica deste tipo de cimento, é apresentada na Figura 19.

Tabela 13 – Composição química do cimento CPV-ARI

Óxidos (%)	CP V ARI
SiO ₂	18,57
Al ₂ O ₃	4,37
Fe ₂ O ₃	2,84
CaO	62,68
MgO	3,16
SO ₃	2,81
Perda ao fogo - PF	3,60

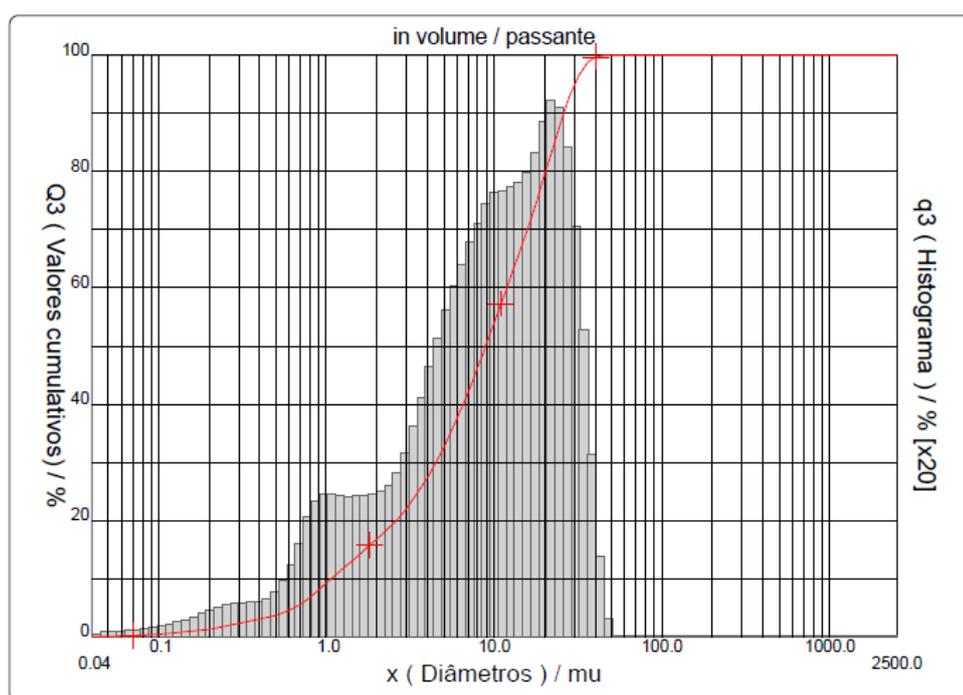
Fonte: Itambé (2022).

Tabela 14 – Composição física do cimento CPV-ARI

Aglomerantes	CP-V	
Massa específica média (g/cm ³)	3,09	
Blaine (g/cm ³)	4,393	
Finura na peneira #200 de malha 0,075mm	0,09	
Finura na peneira #325 de malha 0,044mm	0,49	
Expansibilidade a quente (mm)	0,26	
Início de pega (min)	03:00	
Fim de pega (min)	04:00	
Consistência normal (%)	29,70	
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	37,90
	7 dias	44,50
	28 dias	52,80

Fonte: Itambé (2022).

Figura 19 – Curva granulométrica do CPV-ARI



Fonte: Sokolovicz (2020).

3.1.2 Cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz utilizada nesta pesquisa é proveniente da região de Santa Maria – RS. O material foi coletado e submetido a 105°C em estufa, no período de 48 horas para que ocorresse a retirada da umidade e possibilitasse a utilização do

mesmo no estudo. Após, foi devidamente armazenado em recipientes e acondicionado em local seco e arejado.

3.1.3 Agregados

3.1.3.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado para a produção dos corpos de prova é proveniente do município de Santa Maria – RS, sendo a mesma areia natural de origem quartzosa. A areia passou por peneiramento e após foi inserida para secar na estufa a uma temperatura de 105°C e finalmente, armazenada em recipientes adequados para posterior uso.

3.1.3.2 Areia de fundição fenólica

Nesta pesquisa a areia de fundição fenólica utilizada advém da empresa metalúrgica Candeia, situada na cidade de Santa Rosa – RS. A empresa é direcionada à produção de peças por meio de fundição, para implementos agrícolas em geral, tratores, colheitadeiras e plantadeiras. Na empresa a areia é utilizada como parte do processo para a confecção de moldes com resina epóxi.

A areia de fundição utilizada na presente pesquisa foi a mesma utilizada por Sokolovicz (2020), a caracterização da mesma apresenta-se na revisão bibliográfica deste trabalho.

3.1.3.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado na pesquisa é proveniente do município de Santo Ângelo – RS, o mesmo é brita basáltica. A tabela 15 apresenta a caracterização dos agregados utilizados na pesquisa com seus respectivos valores médios resultantes de 2 ensaios.

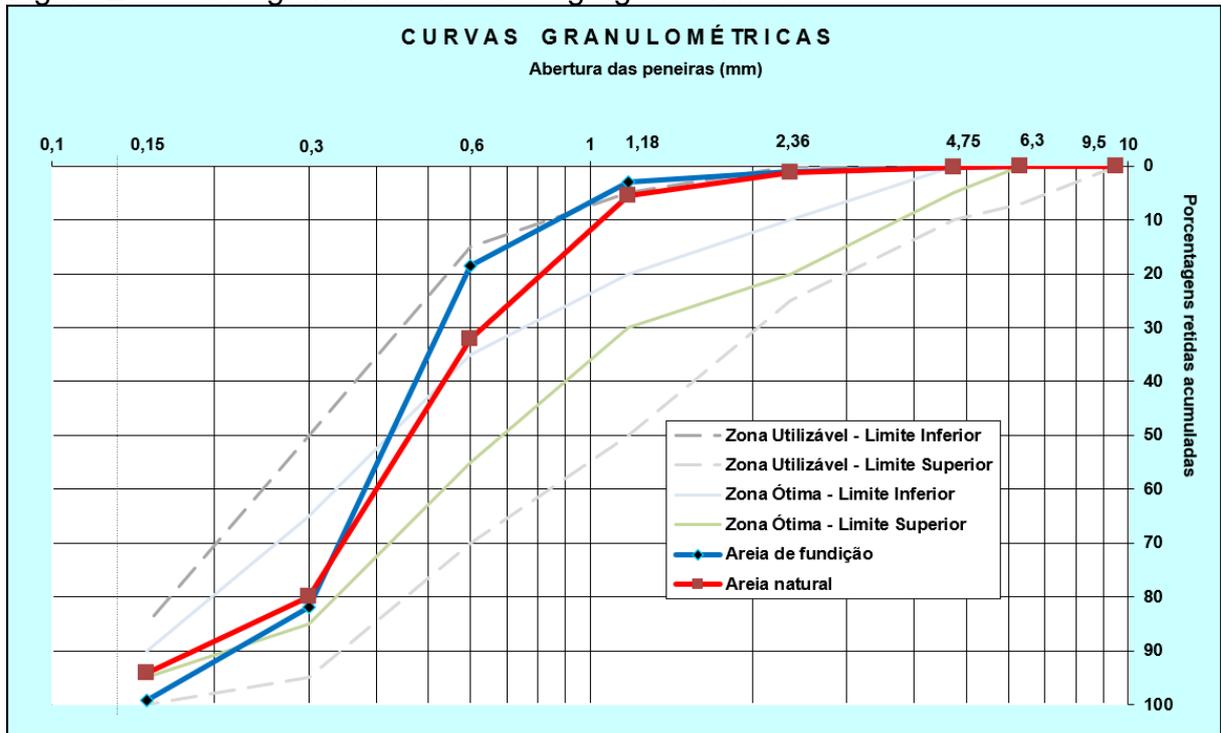
Tabela 15 – Características físicas dos agregados

Grandeza física	Agregados graúdos	Agregados miúdos
	Pedra	Areia
Massa específica	2,53 kg/dm ³	2,62 kg/dm ³
Massa unitária no estado solto	1,49 kg/dm ³	1,54 kg/dm ³
Módulo de finura	6,82	2,05
Dimensão máxima característica	19 mm	2,4 mm

Fonte: Autora (2022).

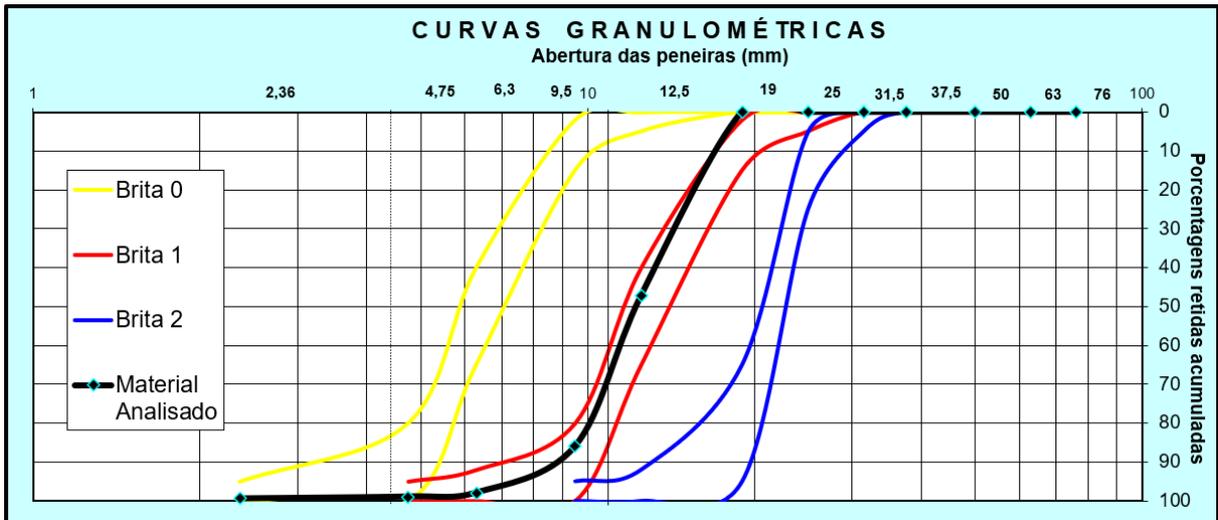
As figuras 20 e 21 representam as curvas granulométricas dos agregados utilizados na pesquisa.

Figura 20 - Curva granulométrica dos agregados miúdos



Fonte: Autora (2022).

Figura 21 - Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autora (2022).

De acordo com os limites granulométricos de diferentes agregados graúdos apresentados na figura 21, tais como brita 0, brita 1 e brita 2, é possível observar que o agregado graúdo utilizado na pesquisa se enquadrou na categoria de brita 1.

3.1.4 Aditivo

O aditivo utilizado na pesquisa foi o AdvaFlow 8000, ele trata-se de um aditivo superplastificante para concreto. Isso foi utilizado para manter a trabalhabilidade do concreto em alguns dos traços do presente estudo. A Tabela 16 apresenta as características do AdvaFlow 8000.

Tabela 16 – Características do superplastificante AdvaFlow

Teste	Especificação	Unidade
Aparência	Líquido alaranjado	Visual
Densidade	1,080 - 1,120	g/cm ³
Sólidos	49,00	%

Fonte: Sokolovicz (2020) adaptado de GCP Applied Technologies (2016).

3.1.5 Água de amassamento

Para a moldagem dos protótipos foi utilizada em alguns dos traços a água proveniente da rede de abastecimento da Universidade Regional Integrada do Alto

Uruguai e das Missões – URI Santo Ângelo e nos demais traços foi utilizado o efluente tratado de aterro sanitário como forma total de substituição da água de amassamento comumente utilizada.

O efluente tratado utilizado na pesquisa, como substituição total da água de amassamento distribuída por rede de abastecimento, é proveniente do aterro sanitário localizado na cidade de Giruá – RS. O líquido foi coletado e depositado em recipiente adequado e armazenado em local seco e arejado.

A tabela 17 apresenta os resultados do ensaio de caracterização do efluente tratado, realizado pelo laboratório de análises de alimentos e análises ambientais Química Pura, localizado na cidade de Porto Alegre – RS.

Tabela 17 – Características do efluente tratado de aterro sanitário

Parâmetro	Resultado analítico
pH	7,91
Temperatura da amostra	31,40°C
Sólidos sedimentáveis	< 0,10 mL/L
Óleos Minerais	< 5,0 mg/L
Óleos Vegetais e Gorduras Animais	< 5,0 mg/L
Materiais Flutuantes	Ausente
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	< 2,0 mg/L
Arsênio (As)	< 0,010 mg/L
Bário (Ba)	< 0,010 mg/L
Boro (B)	< 0,010 mg/L
Cádmio (Cd)	< 0,001 mg/L
Chumbo (Pb)	< 0,001 mg/L
Cianeto Total	< 0,020 mg/L
Cianeto Livre	< 0,020 mg/L
Cobre Dissolvido (Cu)	< 0,009 mg/L
Cromo (Cr)	< 0,010 mg/L
Cromo Hexavalente	< 0,050 mg/L
Cromo Trivalente	< 0,050 mg/L
Estanho (Sn)	< 0,010 mg/L
Ferro Dissolvido (Fe)	< 0,010 mg/L
Fluoreto	< 0,20 mg/L
Manganês Dissolvido (Mn)	< 0,010 mg/L
Mercúrio (Hg)	< 0,00020 mg/L

Continua...

Continuação da tabela 17.

Parâmetro	Resultado analítico
Níquel (N)	< 0,010 mg/L
Nitrogênio Amonical Total	14,0 mg/L
Prata (Ag)	< 0,010 mg/L
Selênio (Se)	< 0,010 mg/L
Sulfeto	< 0,050 mg/L
Zinco (Zn)	< 0,009 mg/L

Fonte: Laboratório Química Pura (2021).

3.2 Método de dosagem

O método de dosagem utilizado na pesquisa foi de acordo com a metodologia defendida por Helene e Terzian (1992). A resistência característica do concreto para o estudo foi fixada em 30 MPa e a relação água/cimento em 0,54. Como forma de controle padronizado do concreto no estado fresco, foi estabelecido que o abatimento de tronco de cone deveria corresponder em 100 ± 20 mm e o teor de argamassa em 53%. O traço unitário em massa utilizado na pesquisa foi de 1:5,94, sendo que 5,94 equivale ao agregado miúdo e agregado graúdo. A pesquisa englobou a moldagem de nove misturas, conforme apresentado na tabela 18.

Tabela 18 – Mistura e composição dos traços

Mistura	Composição da mistura
REF	Traço referência
REF-AA	Referência + Efluente tratado
CCA25	25% Cinza de casca de arroz
CCA25-AA	25% Cinza de casca de arroz + Efluente tratado
CCA25-AF50	25% Cinza de casca de arroz + 50% Areia de fundição
CCA25-AF50-AA	25% Cinza de casca de arroz + 50% Areia de fundição + Efluente tratado
CCA25-AF75	25% Cinza de casca de arroz + 75% Areia de fundição
CCA25-AF75-AA	25% Cinza de casca de arroz + 75% Areia de fundição + Efluente tratado
AF50	50% Areia de fundição

Fonte: Autora (2022).

O traço REF consiste em uma mistura referência, com cimento, areia, água e brita, sem adições.

O segundo traço, denominado como REF-AA é o traço referência com adição de efluente tratado de aterro sanitário. Neste caso, a água de amassamento disponibilizada por rede de abastecimento foi substituída completamente (100%) por efluente tratado de aterro sanitário.

No traço CCA25, houve apenas uma substituição de 25% do total do cimento por cinza de casca de arroz. O teor de 25% foi adotado conforme a bibliografia existente, que define os teores entre 15% e 25% como ideais, conforme Isaia (1995) e Sokolovicz (2013).

No traço CCA25-AA, houve a substituição de 25% do total do cimento por cinza de casca de arroz e a água de amassamento foi totalmente substituída por efluente de aterro sanitário.

No traço CCA25-AF50, foi substituído uma quantidade de 25% do total da quantidade de cimento por cinza de casca de arroz e a porcentagem de areia natural foi substituída em 50% por areia fenólica de fundição.

No traço CCA25-AF50-AA, como no traço anterior, o cimento foi substituído em uma quantidade de 25% por cinza de casca de arroz e a areia substituída em 50% por areia de fundição, e ainda, a água de amassamento foi substituída completamente por efluente tratado de aterro sanitário.

No traço CCA25-AF75, houve, a substituição do cimento por uma porcentagem de 25% de cinza de casca de arroz e a porcentagem de areia natural foi substituída em 75% por areia fenólica de fundição.

No traço CCA25-AF75-AA ocorreu a mesma substituição do traço anterior para o cimento e areia, e ainda, a água de amassamento utilizada foi o efluente tratado de aterro sanitário.

No último traço, AF50, em relação ao traço referência, foi substituído apenas a areia natural por quantidade de 50% de areia de fundição.

Os teores de 50% e 75% de areia de areia de fundição foi com base em Sokolovicz (2020).

A tabela 19 apresenta o traço unitário em massa utilizado para a moldagem dos protótipos do estudo.

Tabela 19 – Traço unitário em massa

Nº	Traço	Cim. (Kg)	CCA (Kg)	Areia (Kg)	AF (Kg)	Brita 1 (Kg)	Água (Kg)	AA (Kg)	Aditivo (Kg)
1	REF	1	-	2,71	-	3,23	0,54	-	-
2	REF-AA	1	-	2,71	-	3,23	-	0,54	-
3	CCA25	0,75	0,25	2,71	-	3,23	0,54	-	0,02
4	CCA25-AA	0,75	0,25	2,71	-	3,23	-	0,54	0,02
5	CCA25-AF50	0,75	0,25	1,36	1,36	3,23	0,54	-	0,025
6	CCA25-AF50-AA	0,75	0,25	1,36	1,36	3,23	-	0,54	0,025
7	CCA25-AF75	0,75	0,25	0,68	2,03	3,23	0,54	-	0,035
8	CCA25-AF75-AA	0,75	0,25	0,68	2,03	3,23	-	0,54	0,025
9	AF50	1	-	1,36	1,36	3,23	-	0,54	0,027

Fonte: Autora (2022).

A tabela 20 apresenta os quantitativos de materiais, por metro cúbico, dos concretos estudados.

Tabela 20 – Quantitativos de materiais por m³ dos traços ensaiados

Traço	Cim. (Kg)	CCA (Kg)	Areia (Kg)	AF (Kg)	Brita 1 (Kg)	Água (Kg)	AA (Kg)	Aditivo (Kg)
REF	315	-	853,65	-	1017,45	170,10	-	-
REF-AA	315	-	853,65	-	1017,45	-	170,10	-
CCA25	231,96	77,32	838,14	-	998,96	167,01	-	6,19
CCA25-AA	231,96	77,32	838,14	-	998,96	-	167,01	6,19
CCA25-AF50	231,04	77,01	418,95	418,95	995,02	166,35	-	7,70
CCA25-AF50-AA	231,04	77,01	418,95	418,95	995,02	-	166,35	7,70
CCA25-AF75	230,46	76,82	208,95	623,78	992,52	165,93	-	10,75
CCA25-AF75-AA	231,17	77,06	209,60	625,71	995,58	-	166,44	7,71
AF50	311,58	-	423,75	423,75	1006,40	-	168,25	8,41

Fonte: Autora (2022).

3.3 Moldagem dos protótipos

A moldagem dos protótipos foi realizada no Laboratório Tecnológico de Construção Civil da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Santo Ângelo. De acordo com os ensaios que foram realizados posteriormente, a moldagem dos corpos-de-prova seguiu dois padrões de dimensões, um no formato cilíndrico de 10 x 20 cm para o ensaio de compressão axial e outro no formato de 10 x 10 x 20 cm para o ensaio de corrosão das armaduras.

A mistura dos materiais foi realizada com o auxílio de uma betoneira e após, a mistura foi lançada nas formas metálicas já devidamente untadas nas quais foram moldados os corpos de prova, conforme a ABNT NBR 5738:2016. Para obter o adensamento foi utilizado como auxílio, o vibrador de agulha. Nos traços que não corresponderam ao abatimento de tronco inicialmente estabelecido no estudo, foi utilizado o aditivo AdvaFlow 8000 em diferentes proporções de acordo com a necessidade de cada mistura, conforme indicado na tabela 17. Realizada a moldagem, os protótipos foram armazenados em local seco para a realizar a cura. Após o período de 24 horas, eles foram desmoldados e levados para a sala de câmara úmida, onde permaneceram por 7, 28 e 91.

Em cada uma dessas respectivas idades foi realizada o ensaio de resistência à compressão e em especial na segunda idade, aos 28 dias, além do ensaio da resistência à compressão também foi realizado o ensaio de corrosão das armaduras. A figura 22 apresenta os corpos de prova de traços diferentes, os mesmos se encontram no período de 24 horas após a moldagem.

Figura 22 – Corpos de prova moldados nas formas metálicas



Fonte: Autora (2022).

3.4 Ensaios realizados

Para analisar a influência que os materiais utilizados na pesquisa projetam na mistura foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial, corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM), além da análise de difração de Raios-X de amostras das misturas.

3.4.1 Resistência à compressão axial dos testemunhos

O ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 5739:2018. O ensaio foi realizado aos 7, 28 e 91 dias de idade de cada traço. Para cada traço foram moldados nove corpos de prova cilíndricos, sendo que para cada idade foram rompidos três corpos de prova e realizada a média das resistências.

A prensa utilizada para o rompimento dos corpos de prova é da marca EMIC, modelo PC 200 CS, que possui capacidade de 200 toneladas, do Laboratório Tecnológico de Construção Civil da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Santo Ângelo. A figura 23 retrata a prensa utilizada.

Figura 23 – Prensa para ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Autora (2022).

3.4.2 Ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM)

Como forma de avaliar a corrosão causada nas armaduras presentes em concretos com a utilização, mesmo que de forma parcial, de cinza de casca de arroz, areia de fundição e efluente tratado de aterro sanitário na mistura, foi utilizado o ensaio de corrosão CAIM.

Para que fosse possível seguir o programa experimental proposto na pesquisa, algumas modificações no procedimento de ensaio foram adotadas. As variáveis adotadas foram o período do ensaio de 72 horas com corrente contínua de 70V. Baseado no estudo de Torres (2006) que utilizou correntes de 15, 45 e 70 V e tempos de ensaio de 8, 24 e 40 horas. A autora recomenda tempo de ensaio maior conforme a relação a/c.

Foram moldados dois corpos de prova para cada traço, no formato prismático, com dimensões de 10x10x20cm. Em cada corpo-de-prova foi imersa uma barra de aço de diâmetro de 12,5mm e 14,5cm de comprimento, devidamente espaçada com o auxílio de espaçadores de plástico para garantir o cobrimento do concreto, conforme imagem mostrada na Figura 24.

Figura 24 – Posicionamento das barras de aço para moldagem



Fonte: Autora (2021).

Antes das barras de aço serem posicionadas nos moldes, elas foram limpas com escova de aço para garantir a remoção de quaisquer substâncias que pudessem interferir no peso ou na reação das mesmas com o concreto. Além disso, cada barra

foi pesada e identificada, conforme pode ser observado na Figura 25 que contém barras de aço de alguns dos traços da pesquisa.

Figura 25 – Barras de aço para ensaio de corrosão CAIM

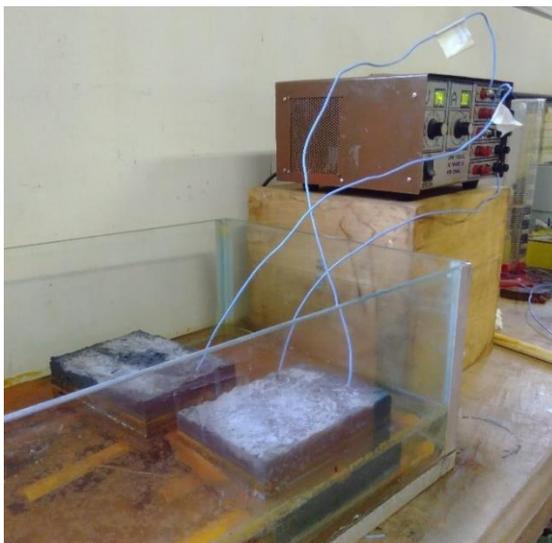


Fonte: Autora (2021).

Após, as barras foram presas a um fio elétrico que durante o ensaio foi conectado ao aparelho que produz a voltagem necessária conforme estabelecida para o estudo. Na presente pesquisa, a voltagem utilizada foi de 70 Volts.

A técnica para a realização do ensaio de corrosão CAIM consiste em submeter os corpos-de-prova em recipiente de vidro com solução salina conforme a figura 26. A proporção de 35g NaCl/l de água, que simula um ambiente de agressividade como o ambiente marinho.

Figura 26 – Corpos de prova submersos em solução salina



Fonte: Autora (2021).

Os fios que foram ligados às barras na etapa inicial, são conectados à uma fonte de voltagem constante, a qual atinge tanto a armadura como também à solução salina do recipiente.

O tempo de ensaio utilizado no trabalho foi de 72 horas. Após a realização do ensaio, os corpos de prova foram rompidos com o auxílio de uma prensa hidráulica, conforme mostrado na figura 27, para que fosse possível retirar as barras de aço que estavam dentro do corpo de prova.

Figura 27 - Corpo de prova do ensaio de corrosão na prensa hidráulica.



Fonte: Autora (2021).

Dessa forma, as barras de aço que anteriormente haviam sido imersas no concreto, foram retiradas, limpas com a solução química recomendada pela norma ASTM G1 – 03:2017, e então lavadas.

Após, as barras foram levadas à estufa a uma temperatura de 20°C e permaneceram por um período de 45 minutos, para a devida secagem, para então, serem finalmente pesadas e o peso final ser comparado com o peso inicial. As figuras 28 e 29 representam as barras de aço do traço 2 e 8, respectivamente, após o ensaio de corrosão e do processo de limpeza e secagem.

Figura 28 – Barras de aço do traço REF após ensaio.



Fonte: Autora (2021).

Figura 29 – Barras de aço do traço CCA25-AF75-AA após ensaio.



Fonte: Autora (2021).

3.4.3 Difração de Raios-X (DRX)

O ensaio foi realizado na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no equipamento denominado como difratômetro de raios x de pó da marca Rigaku, modelo Miniflex® 300, modo Step, com Scan speed de 0,5 s e Scan step de 0,03°, em ângulos de 5 a 100°.

Para que fosse possível realizar a análise, foram preparadas amostras de todos os traços nas idades de 28 e 91 dias, conforme proposto por Lothenbach e Durdzinski (2016).

Aos 28 e 91 dias, foram coletadas amostras dos corpos de prova e as mesmas foram inseridas em recipiente com isopropanol pelo período de 30 minutos a fim de suspender as reações de hidratação do concreto. Após, as amostras foram depositadas em estufa a 40°C por 30 minutos, para que fossem secas.

Com as reações paralisadas, as amostras foram peneiradas em peneira # 75µm e então, todas as amostras foram identificadas e acondicionadas em potes

hermeticamente fechados e selados. Após, as mesmas foram enviadas ao laboratório para análise.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

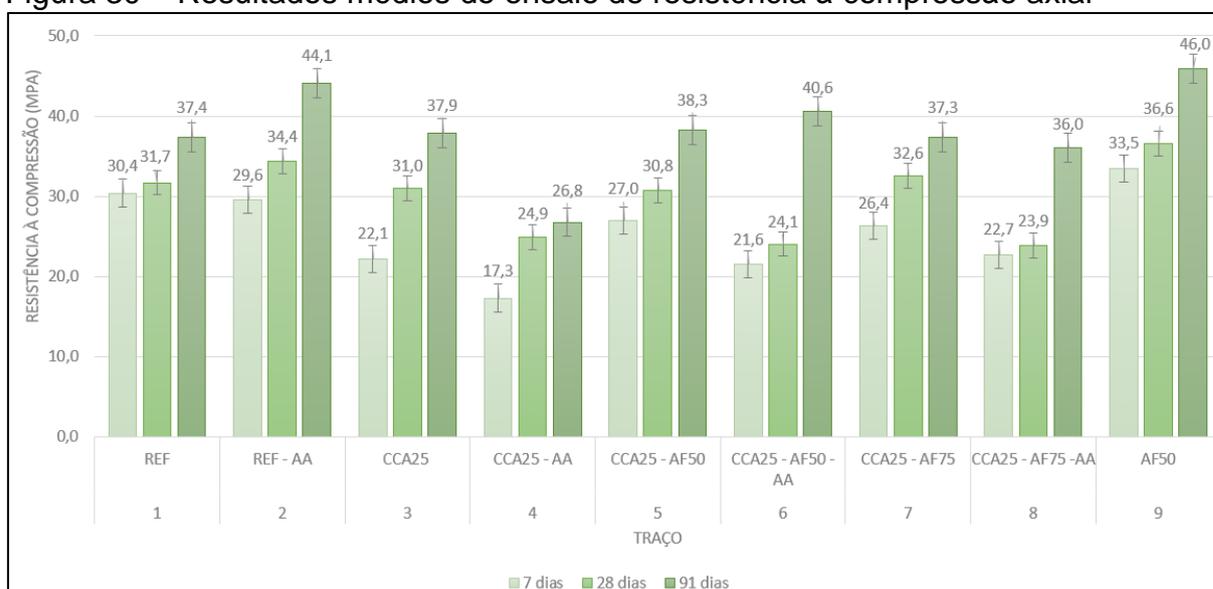
Neste capítulo estão apresentados os resultados e análises obtidos na pesquisa, como forma de avaliar algumas propriedades do concreto com substituições de resíduos e efluente tratado de aterro sanitário e sua aplicação.

4.1 Análise dos resultados de resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial dos corpos de prova foi determinada nas idades de 7, 28 e 91 dias. Para cada traço, foram moldados três corpos de prova para serem rompidos em cada idade.

A figura 30 apresenta os resultados obtidos através do ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova, esquematizando-os conforme o traço e idade, e ainda, indica a resistência de cada um dos CP.

Figura 30 – Resultados médios do ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Autora (2022).

Na tabela 21 é possível observar os resultados aos 28 dias que apresentaram melhores desempenhos das misturas investigadas no trabalho.

Tabela 21 – Ranking dos melhores desempenhos das misturas investigadas

Traços	Resistência (MPa)
AF50	36,6
REF – AA	34,4
CCA25 – AF75	32,6
REF	31,7
CCA25	31,0

Fonte: Autora (2022).

De acordo com os resultados apresentados na figura 30, pode-se observar que quando o AA é investigado de forma individual na mistura do concreto, através de substituição da água de amassamento, como no traço REF-AA, observa-se que o mesmo não somente corresponde às resistências estabelecidas como também, apresenta boa resistência aos 91 dias, atingindo 44,1 MPa. Resistência maior inclusive, do que a resistência do traço referência, nas idades de 28 e 91 dias e menor apenas do valor atingido pelo traço AF50 que chegou à 46 MPa aos 91 dias e apresentou boa resistência já nas idades iniciais.

No traço REF-AA foi possível observar também, na etapa do preparo da mistura de concreto, que o AA proporcionou melhor trabalhabilidade à mistura, com abatimento de 11,6 centímetros.

No trabalho de Torres e Dantas (2019) o concreto produzido com efluente tratado proveniente de estação de tratamento de esgoto obteve um excelente ganho em relação a resistência à compressão quando comparado com o concreto convencional, com água potável. Os autores sugerem a hipótese de que a matéria orgânica do efluente age como um agente de dispersão, melhorando a dispersão das partículas de cimento e reduzindo a aglutinação.

Oliveira *et al.* (2016) também confirma o aumento na resistência a compressão na utilização de efluente tratado por lagoa de estabilização na produção de blocos de concreto. As autoras sugerem que como há presença de algas na lagoa de estabilização é possível que após o processo de tratamento do efluente por osmose reversa, o efluente tratado possa liberar substâncias orgânicas que auxiliem no processo de coesão das partículas fortalecendo a microestrutura interna dos blocos, funcionando como aditivo aglutinador natural para aumento da resistência. Concluindo que possivelmente, a matéria orgânica presente na água promoveu uma interação

interfacial entre os aglomerados resultando em maiores valores de resistência de compressão. Fato este que pode ser claramente observado na presente pesquisa.

No caso do presente estudo é possível também relacionar o aumento da resistência do traço que contém AA, como resultado da interação de materiais dissolvidos no efluente com os compostos do cimento.

Os traços CCA25-AA, CCA25-AF50-AA e CCA25-AF75-AA, com a combinação na mistura de adições minerais e efluente tratado, apresentaram resistências menores do que esperado na idade de 28 dias, sem corresponder à resistência estabelecida de 30MPa. Na idade de 91 dias ocorreu o aumento da resistência e eles corresponderam ao traço referência, exceto o traço CCA25-AA que mesmo nessa idade não atingiu os 30MPa. Conforme o Huang *et al.* (2016) a CCA tem uma microestrutura interna bastante porosa, que devido à alta superfície específica, que atua como um reservatório interno, promovendo a liberação de água mais lentamente possa ter reduzido o fornecimento de água nas reações de hidratação em idades menores.

Os traços CCA25-AF50 e CCA25-AF75, apresentaram os resultados esperados aos 28 dias. De modo geral é possível observar a partir da investigação realizada, que o concreto com adições minerais atinge boa resistência, correspondente à do traço referência. Principalmente o traço que contém apenas AF, o qual foi o melhor resultado, que já era esperado pois a adição de pozolanas concreto aumenta de forma representativa a resistência à compressão em todas as idades e esse fato pode ser explicado devido ao refinamento de poros e de grãos e pela melhoria de zona de transição (SILVA *et al.* 2017).

4.1.1 Análise estatística da resistência à compressão axial

Com intuito de investigar com mais precisão todos os resultados obtidos de resistência à compressão do concreto, considerando as misturas e as idades estudadas, efetuou-se um estudo através da Análise de Variância (ANOVA). De forma a identificar o efeito significativo das adições minerais e efluente tratado na mistura bem como a idade dos corpos de prova.

Foi utilizado um nível de significância de 0,05 que corresponde a um grau de confiança superior a 95% e testes para dois fatores com repetição. A tabela 22 apresenta os resultados da análise.

Tabela 22 – ANOVA Resistência à compressão axial aos 7, 28 e 91 dias

ANOVA Fator Duplo com Repetição						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Idade	2100,8	2	1050,4	154,692694	4,4128E-23	3,168245967
Misturas	1524,48	8	190,561	28,0639449	1,2671E-16	2,115223279
Interações	256,295	16	16,0184	2,35903906	0,00977267	1,834629446
Dentro	366,672	54	6,79023			
Total	4248,25	80				

Fonte: Autora (2022).

Sendo (SQ) a soma dos quadrados, (gl) o número de graus de liberdade e (MQ) a média dos quadrados que equivale a razão entre a soma de quadrados e os graus de liberdade. O valor representativo de Fisher (F) representa a razão entre a variação entre as médias da amostra (traços) e a variação dentro das amostras (idades) (NETO, 2002).

De acordo com os resultados da análise de variância apresentados na tabela 22 é possível observar que o valor de F foi superior ao valor de F crítico. Esse resultado confirma a influência significativa que o fator idade possui na resistência à compressão do concreto. Os resultados menores que 0,05 do valor-P indicam que há diferença significativa entre os traços e as idades.

Dessa forma, realiza-se o Teste de Tukey que possui como finalidade cruzar as misturas e verificar em quais delas existem diferenças. Quando os resultados do teste forem menores que 0,05 existe diferença. O teste foi realizado com auxílio do software Past.

A tabela 23 apresenta os resultados que apresentaram diferença significativa do Teste de Tukey realizado para a idade de 28 dias do concreto do estudo.

Tabela 23 – Resultado do Teste de Tukey para resistência à compressão axial na idade de 28 dias das misturas investigadas

MISTURA	MISTURA								
	REF	REF - AA	CCA25	CCA25 - AA	CCA25 - AF50	CCA25 - AF50 - AA	CCA25 - AF75	CCA25 - AF75 -AA	AF50
REF		0,9753	0,9213	0,1415	1	0,03485	1	0,007459	0,9023
REF - AA	1,478		0,3715	0,01883	0,8691	0,004086	0,9168	0,0008632	1
CCA25	1,827	3,305		0,7643	0,9901	0,3425	0,9773	0,0981	0,2361
CCA25 - AA	4,167	5,645	2,34		0,2705	0,9973	0,2201	0,844	0,0101
CCA25 - AF50	0,554	2,032	1,273	3,613		0,07478	1	0,01673	0,7157
CCA25 - AF50 - AA	5,214	6,692	3,387	1,047	4,66		0,05823	0,9969	0,0022
CCA25 - AF75	0,37	1,847	1,457	3,797	0,1847	4,844		0,01279	0,7874
CCA25 - AF75 -AA	6,281	7,759	4,454	2,114	5,727	1,067	5,912		0,0005
AF50	1,909	0,4311	3,736	6,076	2,463	7,123	2,278	8,19	

Fonte: Autora (2022).

Os resultados da tabela 23 que se encontram hachurados são as misturas que apresentam diferença estatisticamente. O restante não apresenta diferença significativa.

No Teste de Tukey apresentaram diferenças estatísticas as misturas CCA25-AA, CCA25-AF50-AA, CCA25-AF75-AA e AF50. As três primeiras misturas, respectivamente, haviam apresentado resultados médios menores do que a mistura REF. No entanto, estatisticamente, apenas as misturas CCA25-AF50-AA e CCA25-AF75-AA apresentam diferença significativa.

A tabela 24 apresenta os resultados que apresentaram diferença significativa do Teste de Tukey realizado para a idade de 91 dias do concreto do estudo.

Tabela 24 – Resultado Teste de Tukey para resistência à compressão axial na idade de 91 dias das misturas investigadas

MISTURA	MISTURA								
	REF	REF - AA	CCA25	CCA25 - AA	CCA25 - AF50	CCA25 - AF50 - AA	CCA25 - AF75	CCA25 - AF75 -AA	AF50
REF		0,5654	0,9842	0,003675	0,9945	0,9999	0,8498	0,9745	0,2415
REF - AA	2,82		0,1372	6,74E-05	0,1773	0,328	0,05279	0,1188	0,9991
CCA25	1,372	4,192		0,02706	1	0,9997	0,9998	1	0,04162
CCA25 - AA	6,764	9,584	5,392		0,02004	0,008981	0,07393	0,03183	2,06E-05
CCA25 - AF50	1,162	3,982	0,2096	5,602		1	0,9988	1	0,05563
CCA25 - AF50 - AA	0,61	3,43	0,7621	6,154	0,5526		0,9745	0,9992	0,1159
CCA25 - AF75	2,096	4,916	0,724	4,668	0,9336	1,486		0,9999	0,0148
CCA25 - AF75 -AA	1,486	4,306	0,1143	5,278	0,3239	0,8765	0,6097		0,03545
AF50	3,715	0,8955	5,087	10,48	4,878	4,325	5,811	5,202	

Fonte: Autora (2022).

Conforme os resultados apresentados na tabela 24 do Teste de Tukey para as resistências à compressão na idade de 91 dias, pode-se afirmar a sugestão já estabelecida referente ao traço CCA25-AA, que mesmo aos 91 dias não apresentou a resistência esperada aos 28 dias quando comparado ao traço REF, apresentando diferença estatisticamente.

4.2 Análise dos resultados do ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM)

A análise dos resultados foi realizada através do cálculo de perda de massa, que consiste em estabelecer um comparativo do peso das barras antes e após o ensaio, tendo em vista que para cada traço foram confeccionados dois corpos de prova para o ensaio (CP1 e CP2). A Tabela 25 apresenta a relação em porcentagem da perda de massa das barras de aço após o ensaio de corrosão.

Tabela 25 – Ranking das maiores perdas de massa entre as misturas investigadas

Composição	Média da perda de massa (%)
CCA25 - AF75 -AA	24,20%
AF50	22,50%
CCA25 - AF50 - AA	18,23%
CCA25 - AF75	15,72%
REF - AA	14,30%
CCA25 - AF50	13,18%
CCA25 - AA	11,40%
CCA25	8,30%
REF	7,40%

Fonte: Autora (2022).

A tabela 26 apresenta um comparativo dos melhores resultados obtidos para resistência à compressão axial com suas respectivas perdas de massa.

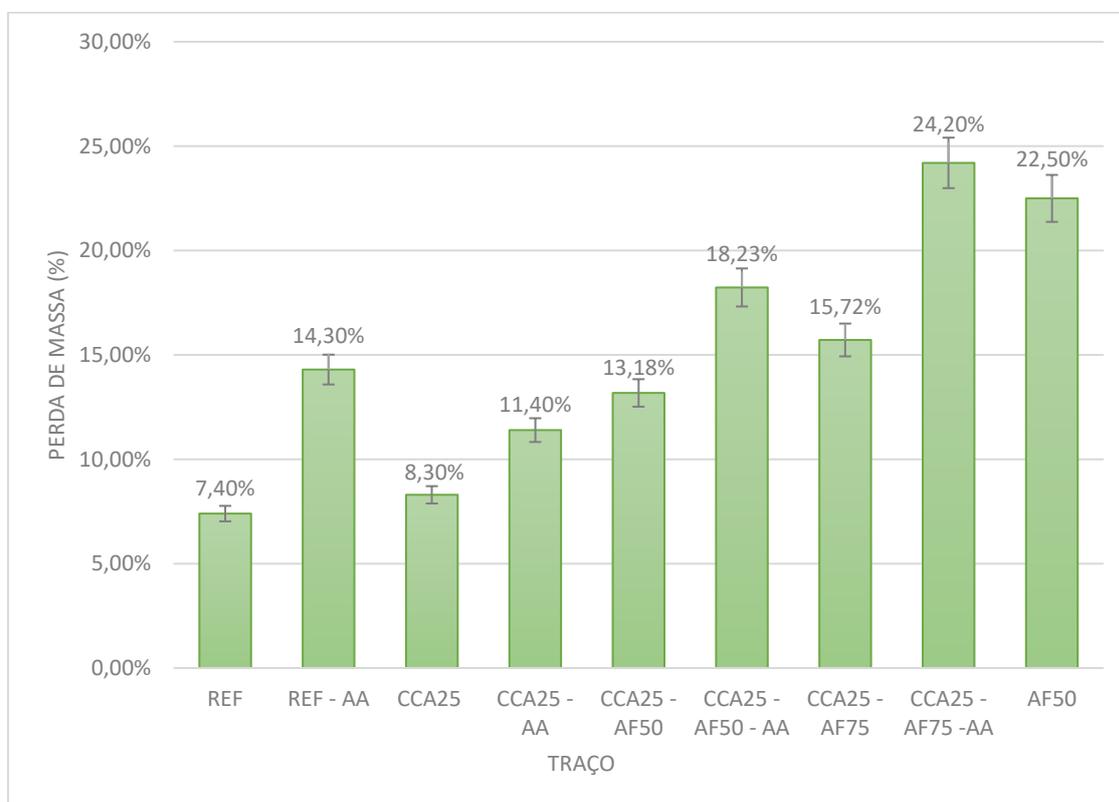
Tabela 26 – Ranking dos melhores desempenhos de resistência à compressão com suas respectivas perdas de massa

Traços	Resistência (MPa)	Média da perda de massa (%)
AF50	36,6	22,50%
REF – AA	34,4	14,30%
CCA25 – AF75	32,6	15,72%
REF	31,7	7,40%
CCA25	31,0	8,30%

Fonte: Autora (2022).

A figura 31 representa os resultados obtidos em forma de gráfico do ensaio de corrosão nas armaduras.

Figura 31 – Resultados médios da perda de massa das armaduras após ensaio



Fonte: Autora (2022).

Através da análise da figura 31 que apresenta os resultados médios do ensaio CAIM. Observa-se que o traço que apresentou maior perda de massa da armadura foi o traço CCA25-AF75-AA (24,20%).

O traço AF50 apresentou a segunda maior perda de massa no ensaio de corrosão da pesquisa. No caso do aumento da perda de massa da armadura em traços com a presença da AF, Souza (2018) explica em seu trabalho que a resina fenólica (presente na areia de fundição), quando utilizada em argamassas, apresenta resistência à ataques oxidantes leves, não sendo indicada para ataques oxidantes e álcalis fortes, o que explica os resultados do presente trabalho.

Ao analisar os resultados do traço CCA25 é possível observar que o mesmo apresenta uma perda de massa muito pequena quando comparada aos demais traços.

Diniz (2018) explica que as adições minerais provocam a redução do hidróxido de cálcio, que é o componente responsável pela a proteção contra a carbonatação do concreto. Entretanto, conforme Silva *et. al* (2017) há estudos que comprovam que as adições minerais reduzem a difusão de cloretos e a entrada de oxigênio e de água no interior do concreto. Dessa forma, o concreto com adições minerais contém maior resistividade elétrica e devido a esse fato, contribuem para a resistência ao ataque de cloretos e sulfatos.

No trabalho de Trindade (2013) é comprovada a diminuição dos valores de perda de massa das armaduras após o ensaio CAIM, em voltagem de 30V e período de ensaio de 8 horas, no qual foi utilizado concreto com adição de CCA e água da mandioca brava como água de amassamento. Porém nos ensaios em períodos de tempo de imersão e tensões maiores, como 70V e 48 horas, o efeito sinérgico não foi detectado.

Quanto ao AA, presente na maioria dos traços desta pesquisa, é possível observar que esse material, assim como os demais utilizados, apresentou perda de massa acentuada. Isso se explica devido a presença de sulfeto, cátion amônio e ferro dissolvido em sua composição. Torres (2006) indica que a presença de agentes agressivos do tipo sulfetos, cloretos, dióxido de carbono, nitritos, gás sulfídrico, cátion amônio, óxidos de enxofre e fuligem, entre outros, pode favorecer o desenvolvimento de processos corrosivos, ao aumentar a eficiência do eletrólito, reduzir o pH ou atacar a camada passivadora de óxidos que normalmente existe em torno da armadura.

Mesmo com a utilização de CCA e AF que contribuem, conforme estudos já realizados, para a redução da porosidade do concreto e conseqüentemente, tornando o mesmo mais resistente a ações como a corrosão, os resultados desta pesquisa quanto à perda de massa das armaduras foram superiores aos do traço referência e também ao limite admissível de 10% estabelecido por Reginato (2020). Exceto o traço CCA25.

Frente aos resultados do ensaio deve-se considerar alguns fatores. Principalmente às condições de ensaio no qual o concreto foi submetido, para um ambiente com grande risco de deterioração em condições fortes de agressividade. Juntamente com outro fator que pode ter influenciado a estes resultados, a utilização do AA, devido a sua composição apresentar elementos desfavoráveis à resistência a corrosão. Além disso, Reginato (2020) afirma que em processos de corrosão, são

frequentes as variações quando comparados valores pretendidos de corrosão (teóricos) e os efetivos (reais). O autor sugere ainda um limite de até 10% de perda de massa como limite de corrosão admissível, em valores menores ou iguais a este não ocorre interferência no desempenho estrutural.

4.2.1 Análise estatística do ensaio CAIM

Foi realizado também o estudo da Análise de Variância (ANOVA) para os valores de massa inicial e final das armaduras, antes e após o ensaio, respectivamente. A tabela 27 apresenta os resultados da ANOVA.

Tabela 27 – ANOVA Massa das amostras antes e após ensaio CAIM

ANOVA Fator Duplo com Repetição						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Idade	2733,007	1	2733,007	165,29281	1,65017E-10	4,413873419
Misturas	500,2559	8	62,53199	3,7819479	0,009087553	2,510157895
Interações	407,4163	8	50,92704	3,0800779	0,02258749	2,510157895
Dentro	297,618	18	16,53433			
Total	3938,297	35				

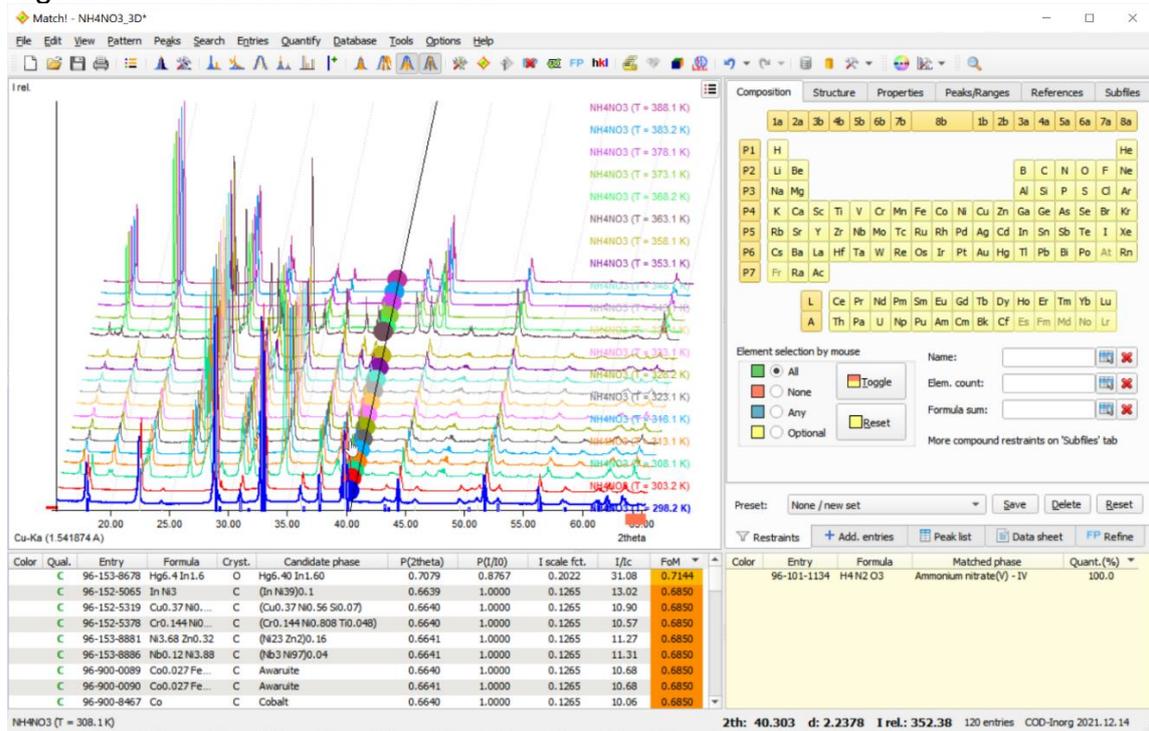
Fonte: Autora (2022).

De acordo com os resultados apresentados na tabela 27 é possível observar que o valor de F foi superior ao F crítico, indicando dessa forma que há diferença significativa no valor da massa das barras após serem submetidas ao ensaio CAIM. Quanto maior o valor de F mais significativa é a diferença. O valor-P apresentou resultados menores do que 0,05 os quais confirmam a diferença dos resultados antes e após ensaio.

4.3 Difração de Raio X

No presente trabalho realizou-se o refinamento pelo Método de Rietveld, cujo objetivo foi caracterizar materiais cristalinos na forma de pó. Como o concreto, e demais elementos a base de cimento não são puramente cristalinos, o método impõe algumas limitações, especialmente nos parâmetros utilizados para refinamento (SOKOLOVICZ, 2020). A autora utilizou o software Match! conforme a Figura 32.

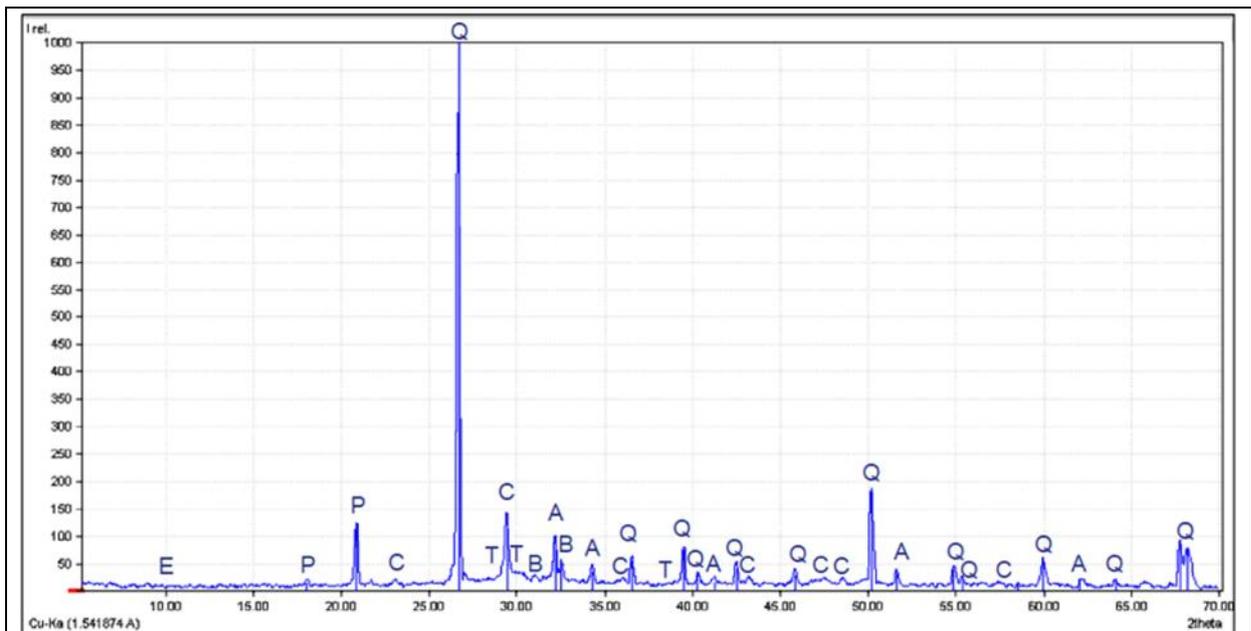
Figura 32 – Tela do Software Match!



Fonte: Crystal impact (2022).

As figuras 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40 e 41 ilustram a difração de raio X das misturas avaliadas refinados por Rietveld.

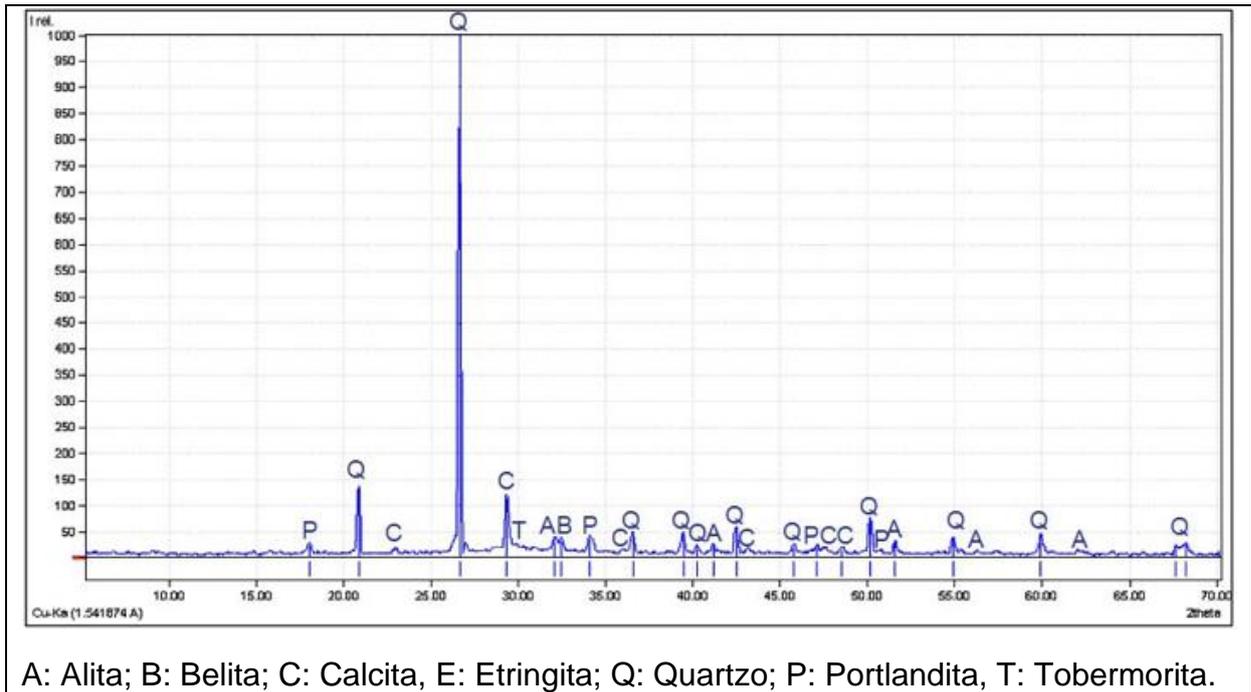
Figura 33 – Difração de raio X do traço REF



A: Alita; B: Belita; C: Calcita, E: Etringita; Q: Quartzo; P: Portlandita, T: Tobermorita.

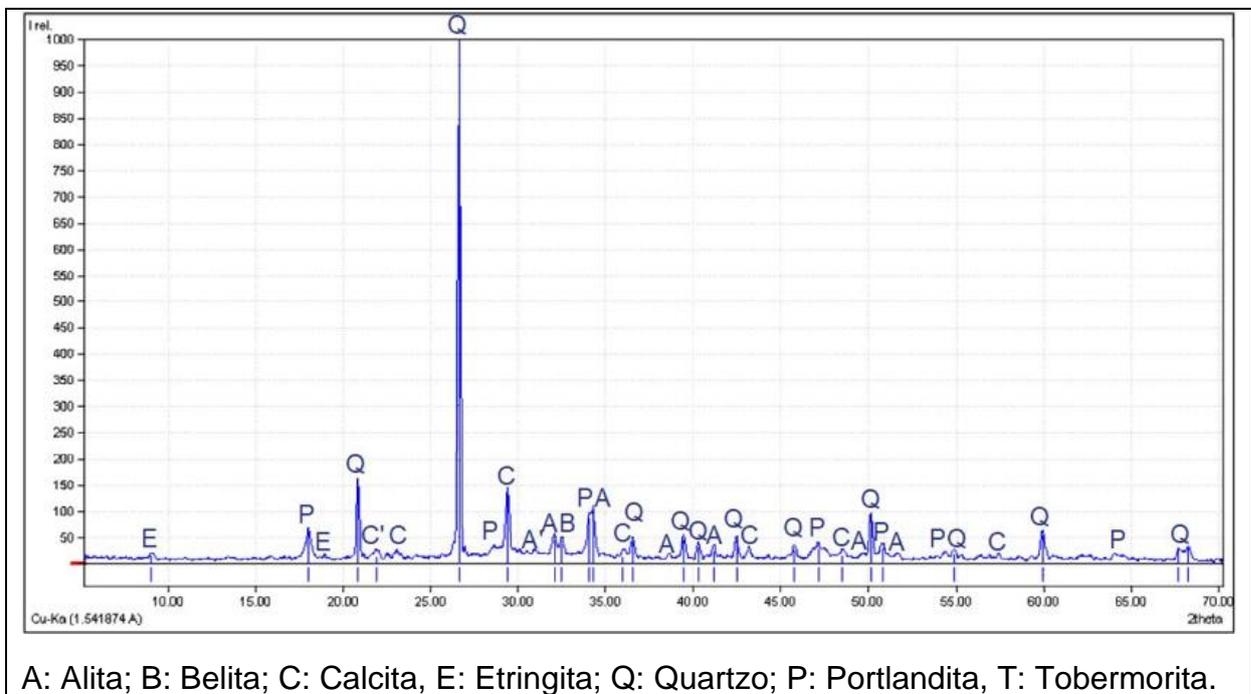
Fonte: Autora (2022)

Figura 34 – Difração de raio X do traço REF-AA



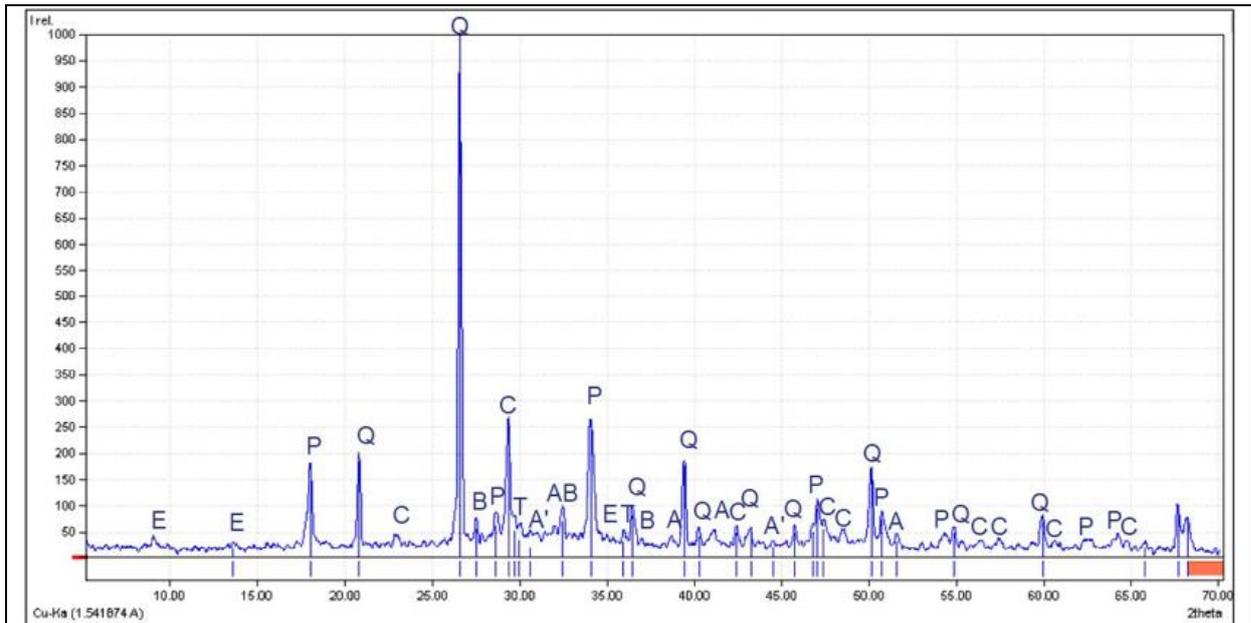
Fonte: Autora (2022)

Figura 35 – Difração de raio X do traço CCA25



Fonte: Autora (2022)

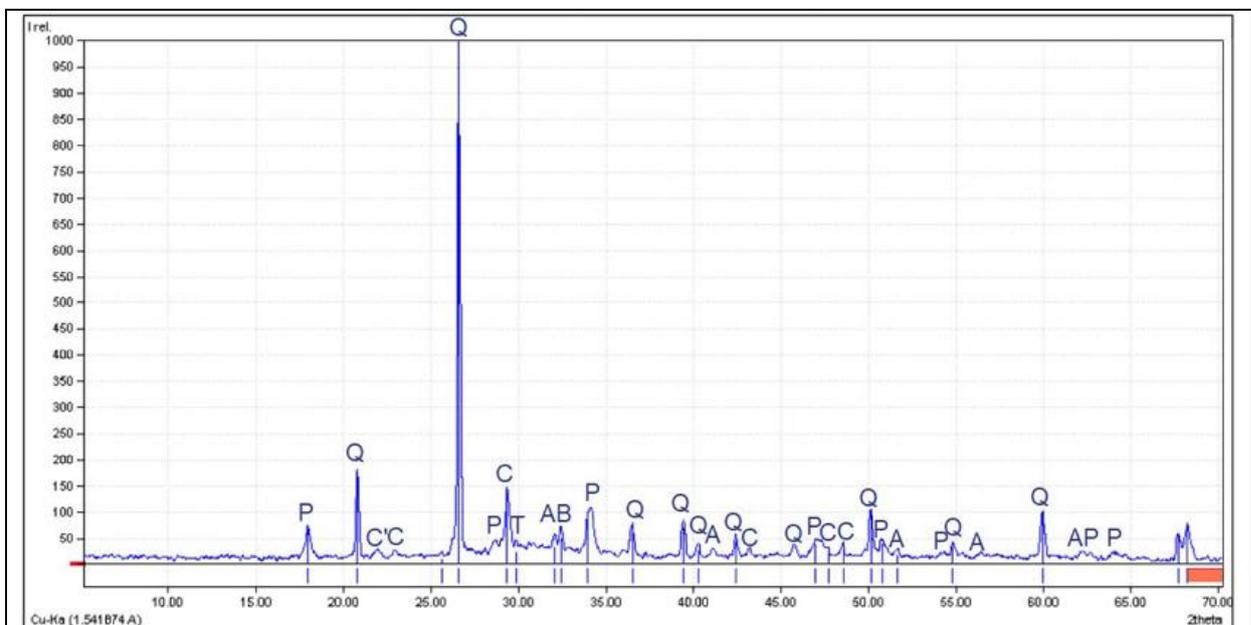
Figura 38 – Difração de raio X do traço CCA25-AF50-AA



A: Alita; B: Belita; C: Calcita, E: Etringita; Q: Quartzo; P: Portlandita, T: Tobermorita.

Fonte: Autora (2022)

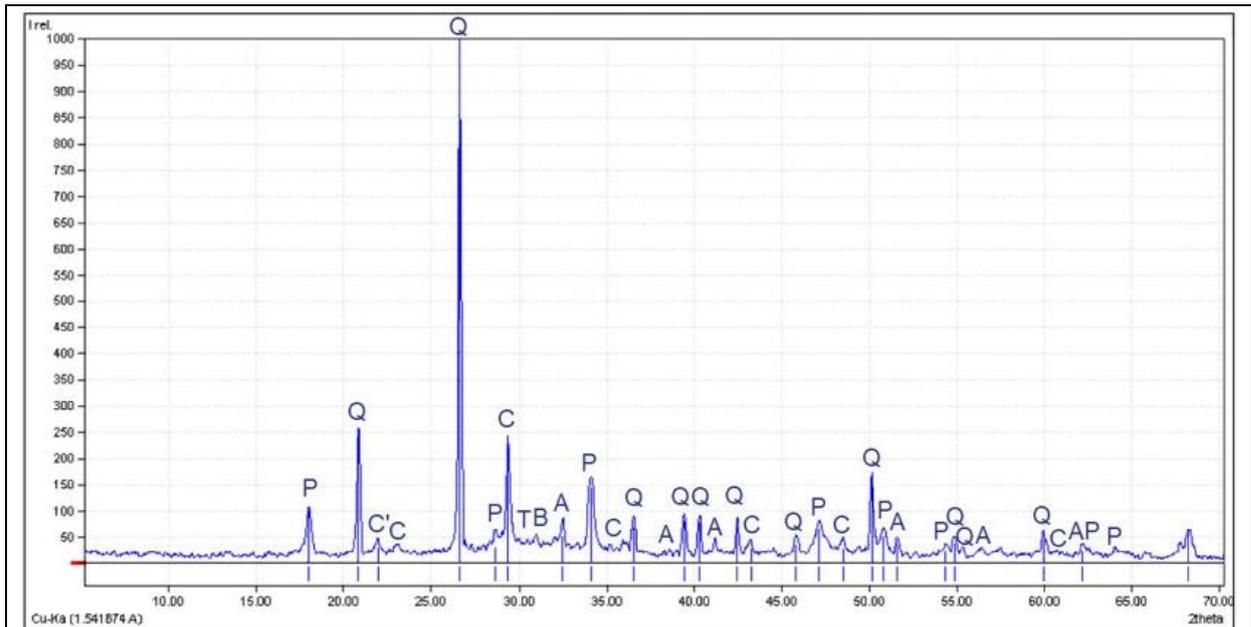
Figura 39 – Difração de raio X do traço CCA25-AF75



A: Alita; B: Belita; C: Calcita, E: Etringita; Q: Quartzo; P: Portlandita, T: Tobermorita.

Fonte: Autora (2022)

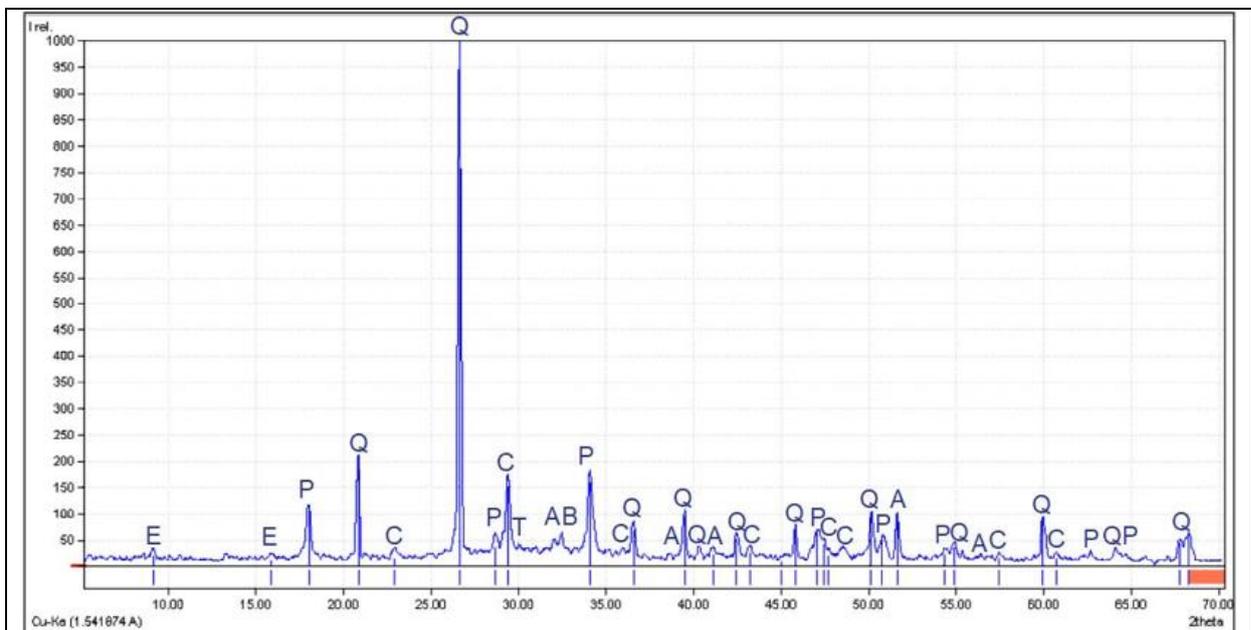
Figura 40 – Difração de raio X do traço CCA25-AF75-AA



A: Alita; B: Belita; C: Calcita, E: Etringita; Q: Quartzo; P: Portlandita, T: Tobermorita.

Fonte: Autora (2022)

Figura 41 – Difração de raio X do traço AF50



A: Alita; B: Belita; C: Calcita, E: Etringita; Q: Quartzo; P: Portlandita, T: Tobermorita.

Fonte: Autora (2022)

A análise qualitativa mostrou que todas as amostras apresentaram níveis elevados de quartzo na mistura, sendo oriundo da areia de fundição.

Quando se avaliou a hidratação do cimento, observou-se que duas principais fases foram encontradas, a Alita, e a Belita.

Os picos mais representativos foram encontrados na angulação de $32,2\ 2\theta$ (Alita) e $32,6\ 2\theta$ (Belita), sendo que houve também uma sobreposição de picos, encontrando também etringita e tobermorita nesses picos, o que caracteriza produtos das reações de hidratação. Os principais picos da portlandita aumentaram de intensidade durante a hidratação e o pico principal da etringita $9,09^\circ\ 2\theta$ (HOPPE FILHO, 2008).

Sokolovicz (2020 *apud* KADRI e DUVAL, 2002) e Hoppe Filho (2008) destacam que após a precipitação inicial de etringita, e em níveis inferiores a precipitação de silicato de cálcio hidratado, ocorre um revestimento nas partículas de cimento, as quais são recobertas através de um gel com alto teor de sílica e alumínio, amorfo. Quando esse gel se forma, ocorre a redução da solubilização das fases anidras, e assim a taxa de calor que é liberado diminui, partindo para um processo de indução. Com a evolução do tempo as reações de solubilização da alita e C_3A se intensificam e esse processo gera uma precipitação de C-S-H e etringita.

Outro ponto relevante foi nos traços com CCA, que houve variação na hidratação do cimento devido ao seu efeito de nucleação, ou seja, a liberação de água devido as partículas pozolânicas, que geram defloculação dos grãos de cimento e faz com que ocorra uma melhor aproveitamento deste nas reações de hidratação, influenciando também nas reações pozolânicas que produzem C-S-H secundário.

A tabela 28 mostra os quantitativos refinados por Rietveld dos compostos encontrados no DRX aos 28 dias.

Tabela 28 – Quantitativos dos compostos identificados no DRX aos 28 dias

Elemento	REF	REF-AA	CCA 25	CCA25 -AA	CCA25 -AF50	CCA25 -AF50-AA	CCA25 -AF75	CCA25 -AF75-AA	AF50
Alita $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	10,10%	13,30%	10,70%	9,40%	8,60%	9,20%	8,80%	8,60%	10,00%
Belita $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	8,50%	7,40%	7,10%	6,30%	6,80%	6,30%	6,40%	6,00%	7,20%
Calcita $\text{Ca}(\text{CO})_3$	5,90%	5,10%	5,30%	4,80%	5,20%	4,70%	5,40%	4,80%	5,20%
Etringita $\text{C}_6\text{ASH}_{32}$	1,90%	2,30%	1,80%	3,80%	3,30%	3,60%	3,40%	3,90%	2,90%
Quartzo SiO_2	64,20%	63,20%	69,10%	69,60%	70,10%	69,70%	69,60%	70,30%	67,50%
Portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$	9,10%	8,50%	4,80%	3,60%	5,10%	4,30%	4,60%	4,10%	5,50%
Tobermorita 11 $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0,30%	0,20%	0,60%	1,30%	0,40%	1,30%	0,80%	1,10%	0,90%
Cristobalita SiO_2	0,00%	0,00%	0,60%	1,20%	0,50%	0,90%	1,00%	1,20%	0,80%

Fonte: Autora (2022).

Conforme a tabela 28 observa-se a presença de cristobalita, a mesma é uma fase cristalina da CCA e não reage com o CH (hidróxido de cálcio). Mostrando dessa forma que no caso das amostras contendo CCA, não houve pleno consumo da pozolana. Esse mesmo comportamento foi encontrado por Sokolovicz (2020).

Nessa pesquisa, os níveis de portlandita da mistura REF foram mais elevados que as misturas com CCA, onde evidenciou-se que a CCA consome o hidróxido de cálcio da reação de hidratação do cimento, formando o C-S-H secundário.

Quando se avaliou a alita, que reage antes da belita, observou-se que as amostras com CCA apresentaram teores de alitas muito inferiores. Se o ensaio de DRX tivesse sido realizado aos 91 dias, a tendência era o aumento dos níveis de alita, visto que houve um consumo de CH pela reação pozolânica. Vale ressaltar que a alita reage antes que a belita, visto que seus grãos são menores e esse composto é o responsável pela resistência nas idades iniciais.

Os traços com CCA apresentaram um comportamento similar entre si.

Observou também que houve uma tendência do quartzo ficar em níveis aproximados em todas as misturas, visto que o mesmo é proveniente do agregado miúdo.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na presente pesquisa confirmam que é possível produzir concretos utilizando a CCA como substituição parcial do cimento, a AF como substituição parcial da areia natural e utilizar AA como água de amassamento. Para embasar essa conclusão, foram utilizados ensaio de compressão axial, ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada e a técnica de difração de raio x.

Concretos com AA como água de amassamento, no estado fresco, apresentam melhor trabalhabilidade e no estado endurecido, apresentam boa resistência à compressão axial. Porém, quando este é misturado com outras as adições minerais, como a CCA e a AF, a resistência à compressão axial é diminuída. Neste caso, para atingir melhor resistência à compressão axial, o indicado é que a mistura possua apenas como substituição o AA.

Com relação ao concreto com utilização de CCA na mistura, o mesmo apresenta boa resistência à compressão axial aos 28 dias. Porém, o concreto com a mistura deste resíduo juntamente com o AA não correspondeu à resistência mínima estabelecida.

Já as misturas apenas com teor de 25% de CCA e teores de 50 e 75% de AF apresentaram boa resistência, o que indica que a substituição do cimento por CCA pode ser realizada, mas que esta seja a única substituição na mistura ou que além de substituir o cimento pela CCA, em baixo teor, a areia natural também pode ser substituída por AF, mas sem substituição da água de amassamento por AA.

A AF apresentou o melhor resultado de resistência à compressão axial, quando foi a única substituição na mistura do concreto, porém, o mesmo apresentou elevada perda de massa no ensaio de corrosão.

Com relação à perda de massa das armaduras, a mesma ocorre em maior valor quando a mistura de concreto apresenta além da CCA, a AF e o AA no mesmo traço. Isso indica que o concreto com as substituições pode ser utilizado, mas em situações em que não apresentem contato direto com aço ou em ambientes que apresentem baixo grau de agressividade ambiental. Para a utilização do concreto da presente pesquisa em elementos estruturais seria recomendado a análise da viabilidade para utilização de inibidores de corrosão.

Concluindo, é possível utilizar os resíduos apresentados na presente pesquisa como componentes da mistura do concreto, levando em consideração suas particularidades e melhores alternativas quanto resistências à compressão e corrosão das armaduras.

5.1 Resumo dos resultados

Como forma de facilitar a compreensão dos resultados obtidos no presente trabalho foi realizada a tabela 29. Na tabela estão apresentados os resultados conforme a colocação que cada traço obteve em relação ao respectivo ensaio e um ranking que classifica as misturas que obtiveram melhores resultados em ambos ensaios. A colocação foi organizada do primeiro ao oitavo lugar, sendo dos maiores valores (melhores resultados) aos menores valores (piores resultados).

Tabela 29 – Ranking dos resultados da pesquisa

Mistura	Propriedades avaliadas		
	Resistência à compressão axial	Ensaio CAIM	Resistência + CAIM
REF-AA	2º (34,4MPa)	4º (14,30%)	2º
CCA25	4º (31,0 MPa)	1º (8,30%)	1º
CCA25-AA	6º (24,9 MPa)	2º (11,40%)	3º
CCA25-AF50	5º (30,8 MPa)	3º (13,18%)	5º
CCA25-AF50-AA	7º (24,1MPa)	6º (18,23%)	7º
CCA25-AF75	3º (32,6 MPa)	5º (15,72%)	4º
CCA25-AF75-AA	8º (23,6 MPa)	8º (24,20%)	8º
AF50	1º (36,6 MPa)	7º (22,50%)	6º

AA = Efluente tratado de aterro sanitário

AF = Areia de fundição fenólica

CCA = Cinza de casca de arroz

REF = Mistura referência sem substituições

Fonte: Autora (2022).

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas da mistura apenas com efluente tratado e areia de fundição fenólica.
- Avaliar a resistência à corrosão dos traços com efluente tratado com idades maiores.
- Avaliar a resistência à corrosão com tempos de ensaio menores.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Anual Book of ASTM Standards. **ASTM C 1202**: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Philadelphia, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G1-03**: Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 2017.

ABIFA. **Associação Brasileira de Fundidos**. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br>>. Acesso em: 25 junho 2021.

ALVES, M. C. M.; BELTRÃO, K.G.Q.B.; JUCÁ, J.F.T. **Resíduos Sólidos**: Projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários: Guia do profissional em treinamento: Nível 2. Salvador, ReCESA:2008.

ANA. **Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br>>. Acesso em: 15 fevereiro 2021.

ABRELPE. **Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais**. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br>>. Acesso em: 02 julho 2021.

ANGEL, J. D. M; VÁSQUEZ, T. G. P; JUNKES, J. A; HOTZA, D. **Caracterização de cinza obtida por combustão de casca de arroz em reator de leito fluidizado**. Química nova, 2009.

ADEGAS, R. G.; BERNARDES, A. M. **Avaliação do gerenciamento das areias geradas nas fundições de ferro do estado do Rio Grande do Sul, Brasil**. Revista da Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler, Rio Grande do Sul, v.2, n.1, 2008.

ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. Cengage Learning Brasil, 2019. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522128129/>. Acesso em: 15 fev. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575 - Partes 1-6**: Desempenho de Edifícios Habitacionais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15849**: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

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

BARBOSA, M. B. **Utilização de Resíduos de cinza de casca de arroz e borracha de pneus em concreto de alto desempenho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, São Paulo, 2006.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. (Safra 2017/18 - N.12). Brasília, p. 25-32., 2018. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/9983-12-levantamento-safra-2017-18>.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Nº 430 de 13 de maio de 2011**. Ministério do Meio Ambiente. Publicada no Diário Oficial da União em 16/05/2011. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/CONAMA/RE0430-130511.PDF>

COPETTI, M. M. **Estudo de viabilidade de concreto estrutural com areia de descarte de fundição e propriedades minerais: mecânica e análise de ciclo de**

vida. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

CLIFTON, J. R. **Predicting the Service Life of Concrete.** ACI Materials Journal, v. 90, n. 6, p. 611-16, 1993.

DELLA, V. P.; KUHN, I.; HOTZA, D. Reciclagem dos resíduos agroindustriais: cinza da casca de arroz como fonte alternativa de sílica. **Cerâmica Industrial**, v 10, nº 2, pag.22-25, 2005.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations.** *Statistical databases*, 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 23 maio 2020.

FERNANDES, A. A. **Síntese de zeólitas e wolastonita a partir da cinza da casca do arroz.** Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

GALVÃO, N.; SOUZA, J. B.; VIDAL, C. M. S. Eletrocoagulação aplicada ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, México, 2020.

GERALDO, G.; PINTO, M.D.S. Percursos da Ciência da Informação e os objetivos do desenvolvimento sustentável da agenda 2030/ONU. **Revista ACB: Biblioteconomia** em Santa Catarina, Florianópolis, v. 24, n. 2, p. 373-389, 2019.

GHRAIR, A. M.; AL-MASHAQBEH, O. Domestic Wastewater Reuse in Concrete Using Bench-Scale Testing and Full-Scale Implementation. **Water**, Jordânia v. 8, n. 9, pág. 366, 2016.

GOBBO, L. A. **Aplicação de difração de raio X e método de Rietveld no estudo do cimento Portland.** 2009. 273 p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

GOLÇALVES, J. L. S. **Fabricação de vidros utilizando sílica proveniente da cinza da casca de arroz.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2019.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & Saúde Coletiva**, 17(6), p. 1503-1510. 2012.

GRAEFF, A. G. **Avaliação Experimental e Modelagem dos Efeitos Estruturais da Propagação da Corrosão em Elementos de Concreto Armado.** 2007. 184 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

HOPPE, A. E. **Carbonatação em concreto com cinza da casca de arroz sem moagem.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto**. 2008. 318 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. 1993. 271 f. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini; Brasília, DF: SENAI, 1992.

HELENE, P. RL. Vida útil das estruturas de concreto. **IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções**. Porto Alegre, RS, 1997.

IRGA. Instituto Rio Grandense do Arroz. **Boletim de Resultados da Lavoura de Arroz - Safra 2018/19**, Porto Alegre, 2020.

ISAIA, G. C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: Um estudo de Durabilidade com Vistas à Corrosão da Armadura**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3^oed. São Paulo, IBRACON, 2017. Volume 1.

ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3^oed. São Paulo, IBRACON, 2017. Volume 2.

ISAIA, G. C.; ZERBINO, R. L.; GASTALDINI, A. L. G.; SENSALÉ, G. R. Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte II): durabilidade. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 233-252, abr./jun. 2017.

KADRI, E. H.; DUVAL, R. Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 3, p. 138-142, march./april. 2002.

KURNIAWAN T.A., LO W.H., CHAN G.Y.S. Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. **Journal of Hazardous Materials**, 129, p. 80-100, 2006.

LEE, O.B. *et al.* Reusing treated effluent in concrete technology. Revista **Jurnal Teknologi**. Universiti Teknologi Malaysia, 2001.

LOTHEMBACH, B.; DURDZIŃSKI, P. Thermogravimetric analysis. In: SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHEMBACH, B. (Eds.). **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. Boca Raton: CRC Press, 2016.

LIMA, M. G. Influência dos componentes do concreto na corrosão de armaduras. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 1990.

MACHADO, D. D. N. **Estudo da Durabilidade da Sinalização Horizontal em Pavimentos Asfálticos Rodoviários**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

MARTINI, N. C. **Reuso de areia descartada de fundição para confecção de blocos de concreto estrutural**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017.

MCCAFFREY, R. Climate change and the cement industry. **Global cement and lime magazine (environmental special issue)**, v. 15, p. 19, 2002.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. IBRACON, Florianópolis, v. 2, cap. 22, p. 1.327-1365., 2011.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. IBRACON, 2014.

MEYER, C. **Sustainable Development and the Concrete Industry**. CIB Bulletin. New York. 21 set. 2004. Disponível em: <<http://www.columbia.edu/cu/civileng/meyer/publications/publications/80%20sustainable%20development.pdf>>. Acesso em: 26 fevereiro 2022.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br>. Acesso em: julho de 2021.

NAÇÕES UNIDAS. População mundial deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas em 2050, diz relatório da ONU. 2019. Disponível em <<https://brasil.un.org/>>. Acesso em: abril de 2021.

NETO, Pedro Luiz de Oliveira Costa. Estatística. Editora Blucher, 2002.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. Bookman Editora, 2016. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582603666/>. Acesso em: 11 fev. 2022.

OLIVEIRA, D. D. Produção de blocos de concreto empregando efluente tratado por lodos ativados e por lagoas de estabilização. **Revista Virtual de Química**. 2016.

PENKAITIS, G. **Impacto ambiental gerado pela disposição de areias de fundição: estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

PERTILE, C. Avaliação de processos de separação por membranas como alternativas no tratamento de lixiviado de aterro sanitário. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

PETERS, Thomas A. Purification of landfill leachate with reverse osmosis and nanofiltration. *Desalination*, v. 119, n. 1-3, pág. 289-293, 1998.

PETRUCCI, E. G. R; PAULON, V. A. **Concreto de cimento Portland**. 13.ed. São Paulo, 1998.

POUEY, M.T.F. **Beneficiamento da cinza da casca de arroz residual com vistas a produção de cimento composto e/ou pozolânico**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

REGINATO, L. A. **Avaliação experimental dos efeitos da corrosão em concreto armado: diagnóstico e reabilitação com UHPFRC e concreto têxtil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

ROSSETTO, T. S. **Caracterização de areias descartadas de fundição com diferentes teores de bentonita**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

RÊGO, J. H. S.; FIGUEIREDO, E. P.; NEPOMUCENO, A. A.. **A utilização da cinza de casca de arroz residual (CCA residual) como adição mineral ao cimento em concretos**. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44, Belo Horizonte, 2002.

RÊGO, J. H. S.; NEPOMUCENO, A. A.; VIEIRA F. L.; LOPES A. N. M.. **Estudo de aglomerantes compostos por cimento portland comum (CP I) e as cinzas de casca de arroz (cca) Amorfa e cristalina**. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46, Florianópolis, 2004.

REES, W. E. *Ecological economics for humanity's plague phase*. **Ecological Economics**, v. 169, p. 106519, Canadá, 2020.

SANTOS, Â. V. *et al*. Reaproveitamento da areia de fundição descartada em substituição da areia natural na fabricação de blocos estruturais de concreto. **VII Internacional Symposium On Technological Innovation**, v. 3, p. 541-546, Aracaju, 2016.

SATTLER, M. A. Edificações e comunidades sustentáveis: Atividades em desenvolvimento no NORIE/UFRGS. **IV Seminário Iberoamericano da Rede CYTED**, v. 2, p.219-232, São Paulo, 2003.

SANTOS, C. C.; LOPES, D. C. Estudo da resistência de concretos com areia de fundição e cinza de casca de arroz. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. 2017.

SÁ, L. F. *et al*. Tratamento do lixiviado de aterro sanitário usando destilador solar. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**: v. 7, n. 1, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

SCHEUNEMANN, R. et al. **Regeneração de areia de fundição através de Tratamento Químico via Processo Fenton**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SIDDIQUE, R.; SINGH, G. **Utilization of waste foundry sand (WFS) in concretemanufacturing. Resources, Conservation and Recycling**, V. 55, Issue 11, September 2011, Pages 885-892, ISSN 0921-3449.

SILVA, M. G.; BATTAGIN, A. F.; GOMES, V. **Cimentos Portland com adições minerais**. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. IBRACON, 3. ed., São Paulo, 2017.

SILVA, A. F. et al. Técnicas utilizadas para o tratamento do lixiviado gerado por aterros sanitários. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 17, p. 1231-1239, 2020.

SILVA, R. W. C.; PAULA, B. L. Causa do aquecimento global: antropogênica versus natural. **Terræ Didática**, São Paulo, v. 5, n. 1, p. 42-49, 2009.

SILVA, K. T. **Projeto de um aterro sanitário de pequeno porte**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SILVA, R.R.; TAKEDA, R. Y. Gestão da água em canteiros de obras de construção civil. **VIII Encontro Internacional de Produção Científica**, Paraná, 2013.

SOUZA, M. H. **Análise de argamassas de reparo de base polimérica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

SNIC. **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento**. Disponível em: < <http://snic.org.br> >. Acesso em: 20 outubro 2021.

SIZIRICI, B.; TANSEL, B.. Parametric fate and transport profiling for selective groundwater monitoring at closed landfills: A case study. **Waste Management**, v.38, n.1, p.263-270, 2015.

SOARES, A. C. P. et al. Análise da Eficácia Técnica e Ambiental do Tratamento de Chorume por Osmose Reversa na Central de Tratamento de Resíduos de São Gonçalo, RJ. **6º Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade**, Rio de Janeiro, 2017.

SOBROSA, F. Z. **Desenvolvimento de materiais cerâmicos refratários com adição da sílica residual proveniente da queima da casca de arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2014.

SOKOLOVICZ, B. C. **Avaliação das propriedades mecânicas e microestrutura de concreto de ultra alto desempenho com adições minerais e resíduos industriais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

SOKOLOVICZ, B. C. **Microestrutura e Durabilidade a Cloretos de Protótipos de Concreto com Cinza de Casca de Arroz com e sem Moagem Prévia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

SOSBAI. Sociedade Sul Brasileira de Arroz Irrigado. Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. **XXX Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado**, Bento Gonçalves, Brasil, 2014.

SNS. **Secretaria Nacional de Saneamento**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento>>. Acesso em: 04 julho 2021.

TORRES, R. Melo; DANTAS, F. C. C. Reuso de efluentes domésticos na fabricação de concreto. **30º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2019.

TRINDADE, E. C. **Corrosão acelerada por imersão modificada (ensaio CAIM) de estruturas de concreto armado contendo cinza da casca do arroz e água na mandioca brava**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2013.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Suecis: Stockholm, 1982.

VARELA, H.; ESPINOZA, L. V. Penetrabilidad de iones cloruros en morteros con y sin revestimiento. **VII Jornadas Chilenas Del Hormigón E I Jornada Lationamericana Del Cimento Y Hormigón**, Curso: Avances Tecnológicos En El Uso De Cementos Y Hormigones, Instituto Profesional De Santiago, Santiago De Chile, P. 82-91, 1988.

VGR Resíduos. **Gerenciamento de resíduos**. 2020. Disponível em: <<https://www.vgresiduos.com.br/blog/tag/aterro-sanitario/>>. Acesso em: dezembro de 2020.

VIEIRA, R. M. et al., Avaliação do desempenho operacional de uma estação de tratamento de lixiviado de aterro sanitário. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.11, n.1, 2020.