



UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL

CAMPUS ERECHIM

CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

MAYCON OTAVIO SKIBINSKI

**ESTABILIZAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO COM UM LIGANTE
ALTERNATIVO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL DE CASCA DE OVO
HIDRATADA**

ERECHIM

2023

MAYCON OTAVIO SKIBINSKI

**ESTABILIZAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO COM UM LIGANTE
ALTERNATIVO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL DE CASCA DE OVO
HIDRATADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Profº. Dr. Eduardo Pavan Korf

Coorientadora: Me. Suéllen Tonatto Ferrazzo

**ERECHIM
2023**

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Skibinski, Maycon Otavio

ESTABILIZAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO COM UM LIGANTE ALTERNATIVO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL DE CASCA DE OVO HIDRATADA / Maycon Otavio Skibinski. -- 2023.

40 f.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Pavan Korf

Co-orientadora: Me. Suéllen Tonatto Ferrazzo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária, Erechim, RS, 2023.

1. ligante alternativo. 2. Resíduos agroindustrial. 3. Estabilização. I. Korf, Eduardo Pavan, orient. II. Ferrazzo, Suéllen Tonatto, co-orient. III. Universidade Federal da Fronteira Sul. IV. Título.

MAYCON OTAVIO SKIBINSKI

**ESTABILIZAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO COM UM LIGANTE
ALTERNATIVO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL DE CASCA DE OVO
HIDRATADA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção de grau de
Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal da Fronteira Sul.

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em: 16/02/23

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Pavan Korf
Orientador

Me. Suéllen Tonatto Ferrazzo
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, coorientadora

Prof. Dra. Helen Treichel
Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS

William Mateus Kubiaki Levandoski
Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a minha esposa Francielle por todo esforço e incentivo durante toda nossa trajetória, a minha filha Clara pelo amor incondicional e ser meu porto seguro, aos meus pais Dircelia e Marlon por todo apoio e suporte, aos meus avós que sempre me apoiaram.

Ao meu professor orientador Eduardo Korf pelas oportunidades, atenção e confiança ao longo desta pesquisa. A coorientadora Suéllen por toda dedicação, ensinamentos e auxílio prestado durante a pesquisa.

Aos colegas, técnicos e professores pesquisadores do Grupo de Resíduos e Geotecnia Ambiental, por todo apoio e ensinamento compartilhados. Em especial ao Jonas por me auxiliar incontáveis vezes, tornando possível a realização deste trabalho.

Quero agradecer aos amigos que estiveram comigo durante esta jornada, sempre apoiando a seguir em frente e não desistir. Em especial aos amigos Roberto, Leonardo, Hevelin, Paulo Pereira, Natália, Andressa, Leticia, Paulo Levorato e Felipe.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma torceram para que eu conseguisse chegar até aqui.

RESUMO

A areia descartada de fundição (ADF) é um subproduto gerado em grandes quantidades pelo processo de fundição de metais. A destinação deste material exige disposição em aterro industrial, tornando oneroso para as indústrias e prejudicial ao meio ambiente. A reutilização da ADF ocorre comumente por meio de agentes cimentantes, como o cimento Portland. Entretanto, a cadeia produtiva do ligante tradicional requer alta demanda energética, elevado consumo de recursos naturais e gera gases de efeito estufa, o que conduz a busca por ligantes alternativos. Os resíduos agroindustriais cinza de casca de arroz (CCA) e casca de ovos reciclada como cal de casca de ovo hidratada (CCOH) têm grande potencial para a estabilização da ADF por meio das reações pozolânicas. Posto isto, o objetivo deste trabalho é avaliar a aplicação do ligante alternativo de cinza de casca de arroz como fonte de silicatos amorfos e cal de casca de ovo hidratada como fonte de carbonato de cálcio em ADF, estudando o comportamento mecânico, e lixiviação e solubilização de metais. A partir de testes iniciais e do planejamento experimental foram escolhidos os fatores controláveis para analisar sua influência na resistência mecânica. Verificou-se que maiores valores de RCS são obtidos com aumento do teor de ligante e maior o peso específico aparente seco da mistura, atingindo uma resistência de 1,69 e 2,41 MPa em 28 e 90 dias de cura respectivamente. Os fatores que exerceram influência significativa sob a RCS das misturas RAF-ligante (da maior a menor magnitude) são: teor de CCA; peso específico aparente seco; e tempo de cura. Os resultados de lixiviação e solubilização de metais mostraram que a mistura ADF-ligante com 28 dias de cura e melhor comportamento mecânico (30% de CCA e 15 kN/m³) não apresentou toxicidade e solubilidade por metais. Desta forma, encapsulou Al, Fe e Zn presentes nos resíduos (ADF e CCA).

Palavras-chave: Resíduos agroindustrial. Ligante alternativo. Estabilização.

ABSTRACT

Waste foundry sand (WFS) is a by-product generated in large quantities by the metal foundry process. This material requires disposal in an industrial landfill, it makes costly for industries and can be cause impacts to environment. The ADF reuse commonly occurs through cementing agents, such as Portland cement. However, the conventional cement production requires high energy demand, high consumption of natural resources and generates greenhouse gases, which justifies searching for alternative binders. Industrial wastes as Rice husk ash (RHA) and eggshells recycled as hydrated eggshell lime (HEL) have great potential for WFS stabilization through pozzolanic reactions. The objective of this work is to applicate of the alternative binder from rice husk ash (source of amorphous silicates) and hydrated eggshell lime (source of calcium) for ADF stabilization, with the aim to study the mechanical behavior and leaching and solubilization of metals. From initial tests and experimental planning, controllable factors were chosen to analyze their influence on unconfined compressive strength (USC). It was found that higher USC values are obtained with an increase in the binder content and a higher dry specific weight of the mixture, with a strength of 1.69 and 2.41 MPa for 28 and 90 days of curing, respectively. The factors that had highest influence on the USC of the WFS-binder mixtures are, in this order: CCA content; dry specific weight and curing time. The results of leaching and solubilization of metals showed that the ADF-binder mixture with 28 days of curing and better mechanical behavior (30% of RHA and 15 kN/m³) did not present toxicity and solubility by metals. In this way, it encapsulated Al, Fe and Zn present in the residues (WFS and RHA).

Key-words: Agroindustrial wastes; Alternative Binder; Stabilization

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	4
2 OBJETIVOS	5
2.1 OBJETIVO GERAL.....	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3 REFERENCIAL TEÓRICO	6
3.1 AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO	6
3.1.2 Reaproveitamento da ADF	7
3.2 LIGANTES ALTERNATIVOS	8
3.3 CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	10
3.4 CAL DE CASCA DE OVO	11
4 MATERIAIS E MÉTODOS	12
4.1 MATERIAIS.....	12
4.1.1 Caracterização	12
4.2 MÉTODOS.....	14
4.2.1 Planejamento experimental	14
4.2.3 Ensaio de compactação	16
4.2.4 Resistência à compressão simples	18
4.2.5 Avaliação do desempenho ambiental	18
5 RESULTADOS	19
5.1 Resistência à compressão simples	19
5.2 Lixiviação e solubilização de metais	23
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	25
REFERÊNCIAS	26

1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente população global, ao consumismo e ao desenvolvimento das indústrias para atender essa demanda, o gerenciamento dos resíduos tornou-se uma questão cada vez mais séria no século XXI (STOEVA; ALRIKSSON, 2017; D'AMATO et al., 2016; FEO et al., 2019). Assim, métodos de reuso e reciclagem dos resíduos se tornam cada vez mais indispensáveis e vem despertando crescente interesse do setor privado e científico (DYER et al., 2021).

Dentre os processos industriais geradores de resíduos sólidos no mundo se destacam o de produção de peças metálicas fundidas (FERREIRA et al., 2014). Neste processo utiliza-se a chamada areia de fundição para confecção dos moldes das peças, os quais acondicionam o metal fundido até o resfriamento. Ao longo do tempo, a areia de fundição sofre deterioração e deixa de ser reincorporada no processo produtivo, necessitando de uma destinação final (VARGAS, 2015). Segundo os dados da Associação Brasileira de Fundição (ABIFA, 2021) no Brasil são gerados aproximadamente 3 milhões de toneladas de areia descartada de fundição (ADF), sendo destinada principalmente a aterros industriais. Em países como Estados Unidos estima-se que 15% da geração de ADF é reaproveitada, segundo a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA, 2017).

Várias pesquisas têm sido voltadas ao uso de ADF com cimento Portland para produção do concreto, principalmente com substituição parcial ou total da areia fina (ANDRADE; CARNIN; PINTO, 2018; COPPIO et al., 2019; SIDDIQUE; SCHUTTER; NOUMOWE, 2009; SINGHT; SIDDIQUE, 2012; THAMARAISELVI; SAKTHIESWARAN; BABU, 2021; TORRES; BARTLETT; PILGRIM, 2017). No entanto, a produção de cimento Portland consome em torno de 2500 milhões de toneladas de calcário anualmente e gera elevada carga de poluentes. Como são produzidas grandes quantidades, a fabricação de cimento Portland consome de 10 a 11 EJ de energia anualmente, aproximadamente 2-3% do uso global de energia primária (DAMTOFT et al., 2008). Além disso, resulta em aproximadamente 7% da produção global de dióxido de carbono (CO₂) (SRIVIDYA et al., 2022). Visando buscar aglutinantes de baixa energia e baixa geração de CO₂, ligantes alternativos provenientes de resíduos agroindustriais vêm sendo explorados (COFFETTI et al., 2022). Dentre os materiais que podem ser usados como ligantes alternativos, tem-se pó de mármore (SHUKLA et al., 2020), cal de carbureto (SANTOS et al., 2022), cinza volante (DAWOOD et al., 2022), pó de vidro (ASHIQ

et al., 2022), cinza da casca de arroz (CCA) (PELISSER, 2021) e a cal da casca de ovo hidratada (CCOH) (REIS, 2021), entre outros.

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021), o Brasil produziu 11,75 milhões de toneladas de arroz em 2020/2021, sendo o Rio Grande do Sul responsável por 70% da safra, o que equivale a 8,23 milhões de toneladas. A casca de arroz, que é separada dos grãos durante a moagem, é responsável por cerca de 20% do peso da cultura do arroz (ZOU; YANG, 2019). Devido a grandes volumes desse resíduo, que possui baixa atratividade para o mercado, a combustão direta é a destinação mais comum da casca, sendo o calor gerado utilizado na secagem do grão ou para a geração termelétrica (CAPELETTO; MOURA, 2014). Supondo que toda casca de arroz seja queimada, a cada 1 milhão de toneladas de arroz gera-se cerca de 40 mil toneladas de CCA, assim, 11,75 milhões de toneladas de arroz resultam em 470 mil toneladas de CCA gerados no ano de 2020/2021 no Brasil.

Ainda no contexto de reaproveitamento de resíduos, a casca de ovo surge como uma opção para ser utilizada como matéria-prima na produção de cal (AMARAL et al., 2013). A cal de casca de ovo (CCO) é uma pasta alternativa gerada a partir da calcinação da casca de ovo a uma temperatura em torno de 1000°C (ARAÚJO et al., 2021). Mundialmente são geradas 4,91 milhões de toneladas de cascas de ovos, sendo 278,25 t no Brasil (ARAÚJO et al., 2021). Devido à grande disponibilidade de resíduos de casca de ovo se torna viável sua utilização para produção industrial de cal (SALDANHA et al., 2021).

O uso de CCOH vêm sendo aplicado na estabilização de solos (REIS, 2021; SALDANHA et al., 2021), não possuindo estudos da CCOH na estabilização de ADF, no entanto, há estudos de ligantes produzidos a partir de fonte de aluminossilicatos e CCOH para estabilização de solos. O conjunto das misturas CCA e CCOH para estabilizar ADF nunca foi estudado, o que justifica a relevância e caráter inovador desta pesquisa.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho mecânico e ambiental de areia descartada de fundição a ser estabilizada com um ligante alternativo oriundo de cinza de casca de arroz e cal de casca de ovo hidratada.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a influência de diferentes teores de cinza de casca de arroz (CCA), pesos específicos e tempos de cura na resistência à compressão simples de misturas areia descartada de fundição com o ligante alternativo;
- Avaliar a lixiviação e solubilização de metais de areia descartada de fundição-ligante alternativo.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO

As indústrias de fundição de peças metálicas possuem papel importante no mercado econômico no Brasil e no mundo (ABIFA, 2021). Estas siderúrgicas são responsáveis pela produção de peças metálicas de diferentes geometrias e tamanhos que são incorporadas em inúmeras cadeias industriais, sendo a automotiva de maior destaque (DYER et al., 2021). No processo de fundição são utilizadas grandes quantidades de areias como molde para as peças metálicas. As areias utilizadas são misturadas com um ligante, podendo ser orgânico ou inorgânico, aditivos e água, conforme o método empregado. Desse modo, as areias de fundição podem ser classificadas em areia verde quando utilizado aglutinante natural (bentonita) ou areia quimicamente ligada quando o aglutinante é um produto industrial (resinas epóxis, fenólica) (COPPIO et al., 2019).

A areia de fundição de interesse do presente trabalho é areia verde. Esta é composta por misturas de materiais naturais, sendo 85-95% de areia de sílica de alta qualidade, 4-10% de argila bentonítica como aglutinante, 2-10% de aditivo carbonáceo (com objetivo de melhorar o acabamento da superfície) e 2-5% de água (SIDDIQUE et al., 2009). Durante o processo de fundição a areia sofre deformação, podendo ser recuperada por meio de peneiramento mecânico para retirar as partículas aglutinadas e por tratamento térmico para remover resinas e óleos (DYER et al., 2021). Após determinado ciclo a areia não pode mais ser reutilizada na fundição, sendo removida do processo e passa a ser um subproduto denominado areia descartada de fundição (ADF) (ANDRADE; CARNIN; PINTO, 2018; SITHOLE et al., 2022).

A geração de ADF no mundo em 2020 é próximo de 108 milhões de toneladas, com a China sendo a maior responsável produzindo 48,75 milhões de tonelada, Índia em segundo

produzindo 11,49 milhões de toneladas, EUA em terceiro com produção de 11,30 milhões de toneladas (GLOBAL CASTING, 2021). Sendo ADF o maior problema, correspondendo a 70% do total de resíduos gerados no processo de fundição, o seu descarte necessita de aterros especiais desencadeando altos custos para sua destinação (SINGH; SIDDIQUE, 2012; ALONSO-SANTURDE et al., 2012). No Brasil são gerados cerca de 3 milhões de toneladas de ADF segundo a Associação Brasileira de Fundição (ABIFA, 2021), sendo os estados de São Paulo, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Minas Gerais os principais geradores (FERRAZZO, 2021). Apesar destas elevadas quantidades geradas, mundialmente apenas uma pequena parcela de ADF é reciclada anualmente (SABOUR; DERHAMJANI; AKBARI, 2021; DOMINGUES; FERREIRA; PIRES, 2021; GONG et al., 2021). Nos EUA estima-se que apenas 15% da ADF gerada é reaproveitada em outros processos (EPA, 2017; TORRES; BARTLETT; PILGRIM, 2017).

3.1.2 Reaproveitamento da ADF

No Brasil, há leis e normativas que visam estabelecer critérios para o uso de ADF. Em abrangência nacional se encontra a NBR 15.702 que estabelece diretrizes para aplicação em aterro sanitário (ABNT, 2009), NBR 15.984 sobre central de processamento, armazenamento e destinação (ABNT, 2011) e o projeto de Lei 4.869 que dispõe sobre uso de ADF (CONGRESSO NACIONAL, 2020). Em âmbito estadual, São Paulo possui a 152/2007/C/E que define procedimentos para gerenciamento de areia de fundição (CETESB, 2007). Em Minas Gerais tem-se a deliberação normativa nº 196 que define regras para o uso de ADF (COPAM, 2014). Em Santa Catarina possui a resolução nº 26 que estabelece as diretrizes sobre a utilização das ADF (CONSEMA, 2008) e a Lei nº 17.479 que dispõe sobre a utilização das ADF (SANTA CATARINA, 2018). Os estados de Paraná e Rio Grande do Sul não possuem normas ou leis estaduais para estabelecer diretrizes para o uso de ADF.

A tentativa de reutilizar a ADF em outros processos é um tema amplamente discutido (DYER et al., 2021). As áreas de construção civil e geotecnia são as que possibilitam empregar maiores quantidades do resíduo mencionado. Nelas, pesquisadores vêm investigando o uso da ADF em: camadas intermediárias em aterros sanitários (DOMINGUES; FERREIRA; PIRES, 2021; IQBAL; LIU; AZIM, 2019; DOMINGUES; FERREIRA, 2015); produção de materiais cerâmicos (SILVA et al., 2020; QUARANTA; CALIGARIS; PELOZO, 2011); substituição parcial ou completa de agregados finos em concreto (COPPIO et al., 2019; SIDDIQUE; SINGH, 2011; AGGARWAL; SIDDIQUE, 2014; SINGH; SIDDIQUE, 2012; BAKIS;

KOYUNCU, DEMIRBAS, 2006; TIWARI; SINGH; NAGAR, 2016; SELVAKUMAR et al., 2022; GUPTA; SIDDIQUE; BELARBI, 2021); na construção de bases e sub-bases de pavimentos (KANG et al., 2011; GUNNEY; AYDILEK; DEMIRKAN, 2006); estabilização de solos argilosos (GUNARTI; RAHARJA, 2020; BHARDWAJ; SHARMA, 2020); asfalto de mistura quente (DYER et al.; 2021; DYER et al., 2018; BRAHAM, 2002), entre outros.

Estudos que visam o aproveitamento da ADF como um material estabilizado quimicamente, utilizam o cimento Portland como ligante, promovendo melhorias nas estruturas mecânicas da areia (AL-AGHBARI; MOHAMEDZEIN; TAHA, 2009). No entanto, a produção de cimento Portland consome em torno de 2500 milhões de toneladas de calcário anualmente e gera elevada carga de poluentes. A fabricação de cimento Portland consome de 10 a 11 EJ de energia anualmente, aproximadamente 2-3% do uso global de energia primária (DAMTOFT et al., 2008). Além disso, resulta em aproximadamente 7% da produção global de dióxido de carbono (CO₂) (SRIVIDYA et al., 2022).

Estabilização da ADF com ligantes alternativos vem sendo explorada com objetivo de minimizar os impactos (ambientais, econômicos e sociais) associados à destinação final de resíduos em aterro e à exploração de recursos naturais, bem como diminuir a emissão de carbono (COFFETTI et al., 2022). Segundo Consoli (2019), os ligantes alternativos são possíveis soluções sustentáveis para estabilização de solos arenosos (como a ADF), diminuindo a utilização do cimento Portland.

3.2 LIGANTES ALTERNATIVOS

Atualmente os estudos de ligantes alternativos para estabilização do solo arenoso ocorrem com uma fonte de cálcio e uma fonte de silicatos amorfs (e alumina amorfa) para que possam ocorrer reações cimentícias conhecidas como reações pozolânicas (CONSOLI et al., 2018). Por exemplo, reações pozolânicas podem ocorrer quando a cinza volante (fonte sílica amorfa) reage com a cal hidratada (hidróxido de cálcio), gerando os géis silicato de cálcio hidratado (CSH) e aluminato de cálcio hidratado (CAH), promovendo o enrijecimento da matriz solo-cimento (AYDIN; AREL, 2017; BUALUANG; JITSANGIAM; TANCHAISAWAT, 2021).

Produtos cimentícios produzidos a partir de reações pozolânicas dependem de diversos fatores, tais como: pH elevado (>10,5) para que ocorra a solubilização de sílica e alumina

(MALLELA; QUINTUS; SMITH, 2004; SARGENT et al., 2013); tempo de cura para ocorrer o desenvolvimento dos géis cimentantes e consequentemente melhoria das propriedades mecânicas (BUALUANG; JITSANGIAM; TANCHAISAWAT, 2021); carbonatação (indesejável), onde cal reage com o dióxido de carbono formando carbonato de cálcio, ao invés de CSH ou CAH (MALLELA; QUINTUS; SMITH, 2004); temperatura da cura acima da ambiente (23°C) pode acelerar as reações químicas (PUSHPAKUMARA; MENDIS, 2022), dentre outros.

Segundo Higgins (2007), estudos de ligantes alternativos com resíduos agroindustriais estão se tornando um foco de pesquisa em resposta à necessidade de aproveitar resíduos e minimizar as emissões de carbono. No Quadro 1 estão expostos alguns estudos pioneiros e outros mais atuais referente a ligantes alternativos aplicados na estabilização de solos arenosos. Nota-se que a fonte de cálcio mais explorada é a cal de carbureto, e como pozolana, a cinza volante e a cinza de casca de arroz. Além disso, a cal de casca de ovo mostra-se como um material promissor ainda a ser explorado na estabilização de solos.

Quadro 1 - Pesquisas referentes a ligantes alternativos

Fonte de cálcio	Fonte de sílica/alumina	Material estabilizado	Referência
Calcário Calcítico hidratada	Cinza volante	Solo arenoso do Kansas	Viskochil; Handy; Davidson (1958)
Hidróxido de cálcio	Cinza volante	Solo arenoso de Ottawa	Davidson; Mateos; Katti (1959)
Hidróxido de cálcio	Cinza volante	Areia Siltosa	Rios; Da Fonseca; Bangaru (2016)
Cal hidratada seca	Cinza de carvão	Areia Osório	Silvani (2016)
Cal de Carbureto	Cinza de carvão Pó de vidro	Areia Osório Areia argilosa	Consoli et al (2018)
Cal de Carbureto	Cinza de casca de arroz	Areia Osório	Leon et al (2019)
Cal de Carbureto	Pó de vidro	Areia Osório Areia de Rio Pardo	Consoli (2020)
Cal de Carbureto	Cinza de carvão Cinza de casca de arroz Tijolo de barro moído	Areia Osório	Consoli et al (2021)

Cal de Carbureto	Cinza de casca de arroz	Areia descartada de fundição	Pelisser et al. (2023)
Cal de casca de ovo hidratada	Cinza de casca de arroz	Solo residual argiloso	Reis (2021)

Fonte: Elaborado pelo autor.

O estudo de Consoli (2020) utilizou pó de vidro e cal de carbureto como ligante alternativo para estabilização de areia de Osório. Os resultados mostraram um aumento da resistência à compressão simples quando as misturas areia-ligante possuíam menor porosidade (ou maior peso específico), visto que, quanto menor a porosidade da mistura mais contato entre as partículas, e conseqüentemente maior intertravamento.

Em Reis (2021), os resultados com o ligante de CCO+CCA em solo residual argiloso mostraram que com maiores tempos de cura ocorre um aumento da resistência, pois maior quantidade de gel cimentante forma-se com o passar do tempo. Além disso, observou-se que maiores resistências à compressão simples podem ser alcançadas utilizando CCA com partículas menores (ou seja, CCA peneirada), pois quanto menor o tamanho das partículas maior a reatividade química, favorecendo as reações pozolânicas para formação de gel cimentante.

3.3 CINZA DE CASCA DE ARROZ

O Brasil produziu 11,75 milhões de toneladas de arroz em 2020/2021, sendo o Rio Grande do Sul responsável por 70% da safra, o que equivale a 8,23 milhões de toneladas (CONAB, 2021). No processo de moagem, ocorre a separação da casca de arroz que representa 20% do peso do grão de arroz. A casca do arroz tem pouco nutriente e baixo valor comercial, porém, possui alta quantidade de carbono, sendo adequada para a geração de energia através da combustão, que após a queima gera grande quantidade de CCA (FLORES et al., 2021). A cada 1 milhão de toneladas de arroz gera-se cerca de 40 mil toneladas de CCA, supondo que toda casca de arroz seja queimada, 11,75 milhões de toneladas de arroz resultam em 470 mil toneladas de CCA gerados no ano de 2020/2021 no Brasil.

A CCA possui alta concentração de sílica (SiO_2), tendo grande potencial de utilização como adição de pozolânica (LEON et al., 2019). A CCA é usada principalmente na melhoria de solos e na produção de cimentos (FLORES et al., 2021). Estudos sobre a aplicação da cinza de casca de arroz foram realizadas em: remediação de solos (YIN; et al., 2022; BEHAK, 2017);

produção de concreto (WANG; et al., 2022; RUMMAN et al., 2020; SENSALÉ, 2006); tratamento de efluentes (AHMARUZZAMAN; GUPTA, 2011); absorção (BHATTACHARYA et al., 2007; SONG et al., 2019); argamassa de gesso (SRIKANTH et al., 2022).

3.4 CAL DE CASCA DE OVO

Casca de ovo é um subproduto alimentício com aproximadamente 11% do peso total do ovo, sendo gerado em quantidades cada vez maiores devido ao aumento populacional (MURAKAMI, 2007). Só a China produziu 478 bilhões de ovos em 2018, sendo a maior produtora do mundo. O Brasil ficou em quinto em produção com 53 bilhões de ovos no mesmo ano (FAOSTAT, 2020). A casca do ovo é o principal resíduo gerado, com cerca de 110 bilhões de toneladas anualmente (WAHEED et al., 2019). Estes resíduos passam a ser destinados a aterros sanitários sem qualquer tratamento, gerando um desafio ambiental devido aos poluentes emitidos (gás metano) (OLIVEIRA; BENELLI; AMANTE, 2013).

Uma forma de reciclagem da casca de ovo é por meio da calcinação, transformando-a em cal. A casca ovo consiste em 94% de carbonato de cálcio (CaCO_3), que no processo de calcinação (cerca de 1000°C), é transformada em óxido de cálcio (CaO) (ARAÚJO et al., 2021). A cal resultante (CaO) necessita de muita água no processo de hidratação durante as reações pozolânicas, por esse motivo é feito esse processo antes de formar o aglutinante, sendo gerado a cal hidratada (Ca(OH)_2) (HILAL; AL SAFFAR; ALI, 2021). Com base na literatura observa-se grande potencial da casca de ovo como fonte de cálcio, resultando em matéria prima para produção de novos ligantes alternativos (AMARAL et al., 2013).

Além disso, técnicas de melhoramento de solos com cal são mundialmente conhecidas devido aos benefícios para o solo e ao baixo custo (JAFFAR et al., 2022). Com avanços das pesquisas nos últimos anos, tem-se explorado a casca de ovo como fonte de cal na estabilização de solos (ARAÚJO et al., 2021; SALDANHA et al., 2021; CONSOLI et al., 2020; ZAINI et al., 2021).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

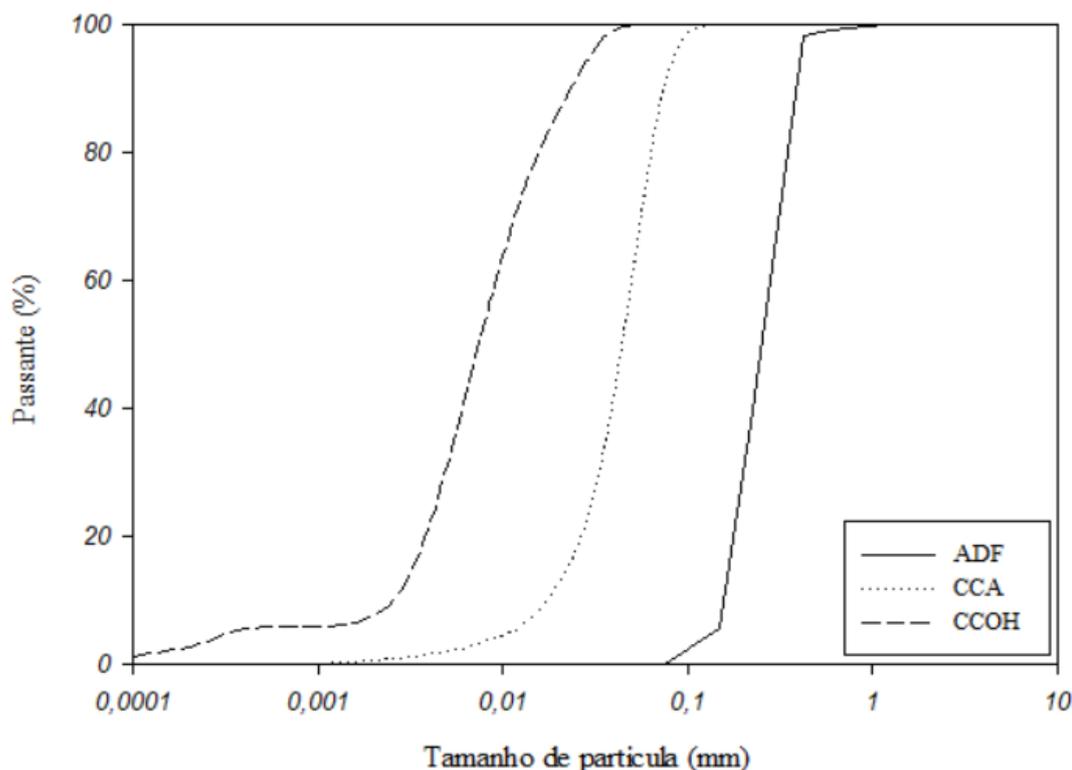
Os materiais utilizados nesta pesquisa e respectivas denominações e funções são: areia descartada de fundição (ADF) como material a ser estabilizado; cinza de casca de arroz (CCA) como fonte de aluminossilicatos, e cal de casca de ovo hidratada (CCOH) como fonte de cálcio. A ADF é proveniente de uma indústria metalúrgica que produz peças fundidas de ferro, localizada no município de Erechim (RS). A CCA é oriunda de uma indústria termelétrica que gera energia elétrica através da queima da casca do arroz, situada na cidade de São Sepé, Rio Grande do Sul (RS). A casca de ovo será cedida por uma padaria, no município Erechim (RS).

4.1.1 Caracterização

A ADF utilizada na pesquisa passou por processo de peneiramento em peneira nº10 (2mm), visando retirar apenas o material que se fundiu no processo, formando pequenos grumos de maior tamanho. A CCA foi seca a 50°C por 48h e posteriormente peneirada na peneira de malha nº200 (0,075mm). A CCOH foi preparada conforme a metodologia de Araújo et al. (2021), seguindo as etapas de: lavagem, secagem, trituração das cascas, calcinação em forno mufla a 1050°C por 6h, hidratação (em água destilada por 48h) e peneiramento da cal na malha nº200 (0,075mm).

A análise granulométrica da ADF foi executada conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016), apresentando um material uniforme com coeficiente de uniformidade (Cu) de 1,27. A análise granulométrica da CCOH e CCA foram elaboradas em pesquisas anteriores por Levandoski (2021) e Reis (2021) respectivamente. A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas da ADF, CCOH e CCA.

Figura 1 - Curva de distribuição granulométrica da ADF, CCOH e CCA.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os dados da Tabela 1 apresentam a caracterização desenvolvida amplamente por autores próximos em estudos anteriores, como da ADF (BRAGAGNOLO et al., 2018; PELISSER et al., 2023), CCA (REIS, 2021; PELISSER et al., 2023) e da CCOH (LEVANDOSKI, 2021). A determinação do diâmetro mediano de cada material utilizado nesta pesquisa foi elaborada pelos autores citados, excluindo da ADF no qual foi desenvolvido com base na distribuição granulometria da Figura 1.

Conforme Pelisser et al. (2023) a sílica existente na CCA está presente em forma de sílica amorfa. O teor de sílica amorfo é uma característica importante das pozolanas, na CCA ela é influenciada pela temperatura do processo de combustão das cascas de arroz. Essa sílica amorfa reage facilmente com a CCOH gerando um ligante alternativo complementar (MARTINS, 2018).

Tabela 1 - Caracterização dos materiais.

Caracterização	Características	Areia descartada de fundição	Cinza de casca de arroz	Cal de casca de ovo hidratada
Física	Massa específica (g/cm ³)	2,3	2,2	2,2
	Diâmetro mediano das partículas – D ₅₀ (µm)	250,0	45,0	10,3
	Argila (%)	3,3	0,86	7,0
	Silte (%)	3,8	67,80	93,0
	Areia fina (%)	91,4	31,34	0,0
	Areia média (%)	1,5	0,0	0,0
	Química	SiO ₂ (%)	90,4	87,6
Al ₂ O ₃ (%)		2,9	0,1	0,1
Fe ₂ O ₃ (%)		2,1	0,6	0,2
CaO (%)		0,2	0,9	72,9
MgO (%)		0,4	0,3	1,2
K ₂ O (%)		0,1	2,9	0,0
Mineralógica	Minerais	Quartzo (SiO ₂)	Cristobalita (SiO ₂) e Quartzo (SiO ₂)	Portlandita (Ca(OH) ₂) e Calcita (CaCO ₃)
Ambiental	Classificação de resíduo	Resíduo não perigoso e não inerte Classe II-A	Resíduo não perigoso e não inerte Classe II-A	-
Autor		Bragagno et al. (2018) Pelisser et al. (2023)	Reis (2021) Pelisser et al. (2023)	Levandoski (2021)

Fonte: elaborado pelo autor.

4.2 MÉTODOS

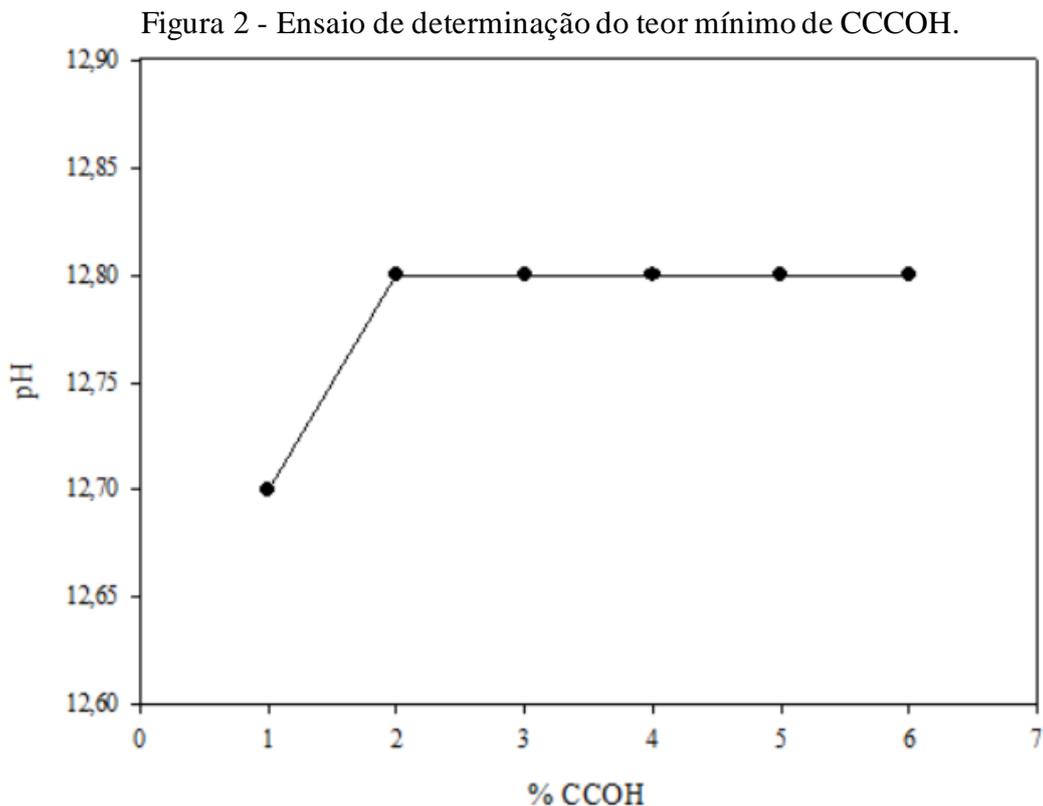
4.2.1 Planejamento experimental

Para avaliação da Resistência à compressão simples (RCS - variável resposta) das misturas de ADF-ligante foi utilizado um planejamento fatorial composto central com 3 fatores e pontos axiais face centrados ($\alpha=1$) utilizando o software Minitab 19®. As combinações foram

realizadas em duplicata, com pontos fatoriais (16), axiais (14) e centrais (8), resultando em 36 experimentos. Este planejamento permite avaliar a influência de fatores controláveis sob a variável resposta, bem como modelar matematicamente uma superfície de resposta e identificar a existência de não-linearidade (MONTGOMERY, 2017). Após a obtenção dos resultados de RCS, foi aplicada a ANOVA para determinar a influência dos fatores sobre essa variável resposta.

Foram avaliados os seguintes fatores controláveis: teor de CCA (A); peso específico seco (B) e tempo de cura (C). A adição de CCA de 10-30% foi adotada em função de ser um teor médio empregado em pesquisas anteriores de estabilização de solos arenosos de característica semelhante à ADF com esta cinza (CONSOLI et al., 2018; PELISSER et al., 2021).

O teor de CCOH em 5% foi estabelecido conforme revisão da literatura e confirmado com base no acréscimo da cal até a estabilização do pH na solução da mistura ADF-CCA pelo método *Initial consumption of lime* (ICL) conforme estabelecido pela norma D6279 (ASTM, 2019). Para a realização do teste ICL, adotou-se um teor de CCA de 30% e 70% de ADF a fim de verificar a quantidade mínima de CCOH para reagir com a CCA disponível.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores de estudo de peso específico seco e teor de umidade foram definidos a partir dos resultados obtidos no ensaio de compactação Proctor de energia modificada (visando maiores resistências), conforme D1557 (ASTM, 2012). A temperatura de cura foi fixada como sendo a temperatura ambiente, ou seja, 23°C. Para definição do tempo de cura, foram consultados estudos na literatura para estabilização de areias com ligantes alternativos (PELISSER, 2021; CONSOLI; ROSA; SALDANHA, 2011), a fim de avaliar-se o desenvolvimento da resistência da ADF estabilizada ao longo do tempo. Os fatores e respectivos níveis codificados estão representados na Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores e respectivos níveis do planejamento experimental.

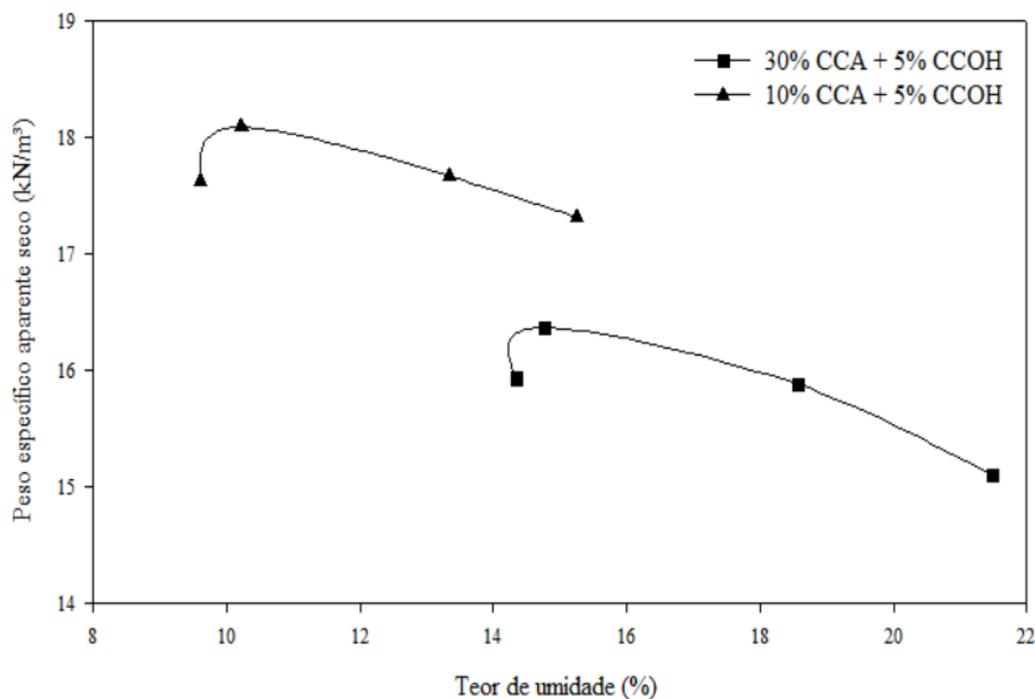
Fatores	Níveis
Tempo de cura	28; 60 e 90 dias
Teor de CCOH	5%
Teor de CCA	10; 20 e 30%
Peso específico seco	13; 14 e 15 kN/m ³
Teor de umidade	14,5 %
Temperatura de cura	23°C

Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.3 Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação Proctor foram realizados para avaliar o teor ótimo de umidade e o peso específico seco máximo (kN/m³) para as duas misturas estudadas. A mistura 1 foi composta por ADF com 30% de CCA e 5% de CCOH. A mistura 2 foi composta por ADF com 10% de CCA e 5% de CCOH. A Figura 3 apresenta os resultados dos 2 ensaios de Proctor realizados nesta pesquisa.

Figura 3 - Curvas de compactação das misturas.



Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 3, observa-se que com o aumento do teor de CCA ocorre um aumento na umidade ótima e uma diminuição do peso específico aparente seco máximo, semelhante ao observado em pesquisas que utilizam CCA em ADF e solo argiloso (REIS, 2021; PELISSER et al., 2023). A partir dos ensaios de compactação, foram obtidos os valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima nas duas misturas, expresso na Tabela 2.

Tabela 3 - Resultado do ensaio de compactação.

Mistura	Peso específico aparente seco máximo (kN.m ⁻³)	Teor de umidade ótima (%)
30% CCA+5% CCOH	16,27	14,78
10% CCA + 5% CCOH	18,09	10,22

Fonte: elaborado pelo autor.

Para determinar o valor do peso específico aparente seco máximo (γ_{Dmax}) neste estudo foi analisada as curvas da Figura 2, a capacidade do macaco hidráulico e do molde cilíndrico. Após serem elaborados 4 testes preparatórios, observou-se que 15 kN.m⁻³ era o limite máximo para esta mistura. Posto isto, foi considerado então 15 kN.m⁻³ sendo o γ_{Dmax} e mais 2 pontos abaixo (14 e 13 kN.m⁻³). A umidade alvo foi estabelecida em 14,5%, devido a ser um valor

central e passante pelas duas curvas de compactação. Este teor está próximo ao ótimo da mistura de 30% de CCA e está dentro do ramo úmido da curva com 10% de CCA.

4.2.4 Resistência à compressão simples

Inicialmente a CCA e CCOH foram misturadas e adicionadas a ADF, após adicionou-se água para atingir o teor de umidade alvo, e fez-se a completa homogeneização da mistura. O procedimento de moldagem dos corpos de prova (CP) nos ensaios ocorreu condicionando a mistura em três camadas uniformes compactadas, de maneira a atingir o γ_D alvo. A parte superior das camadas foi levemente escarificada, excluindo a última camada. O molde utilizado possui formato cilíndrico com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Após o processo de moldagem, os corpos de prova tiveram seu peso, altura e diâmetro medidos e inseridos em saco hermético. Em seguida, foram armazenados em sala com temperatura controlada de 23°C e umidade próxima a 95% (ASTM, 2019), durante o período de cura.

Faltando 24 horas para romper os corpos de prova, estes foram submersos em água para saturação, assim minimizando o efeito da sucção (CONSOLI; DALLA ROSA; SALDANHA; 2011). O rompimento seguiu a metodologia da NBR 12025 (ABNT, 2012) para ensaio de resistência à compressão simples (RCS). Os corpos de provas que apresentaram melhores resultados no ensaio RCS foram separados para ensaios ambientais posteriores.

4.2.5 Avaliação do desempenho ambiental

A amostra que apresentou o melhor comportamento mecânico no ensaio de resistência à compressão simples após 28 dias de cura foi submetida a testes de lixiviação e solubilização de metais conforme as normativas NBR 10004, NBR 10005 e NBR 10006 (ABNT, 2004). As misturas com 60 e 90 dias de tempo de cura foram rompidas próximo da entrega deste estudo, inviabilizando os ensaios de lixiviação e solubilização. A quantificação de metais (Ag, Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Na, Pb, Se e Zn) foi realizada pela técnica de Espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), em um espectrômetro ICPE (marca Shimadzu, modelo ICPE-9800), utilizando solução padrão multi elemento ICP Certipur (marca Merck), na central analítica da UFFS. As concentrações de metais nos extratos lixiviados e solubilizados foram comparadas com os anexos F e G da NBR 10004, bem como com limites de qualidade de águas estabelecidos pela CONAMA 460 (CONAMA, 2013), Lista Holandesa (VROM, 2000) e EPA (USEPA, 2020).

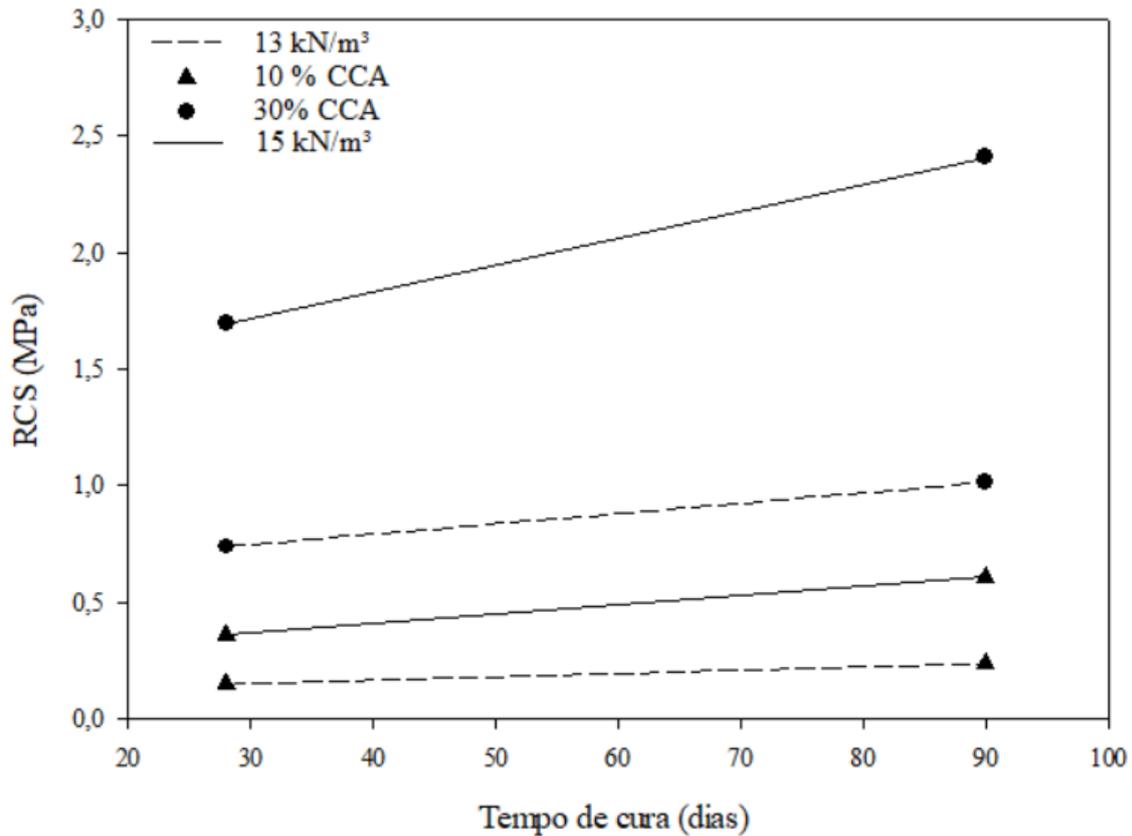
5 RESULTADOS

5.1 Resistência à compressão simples

Na Figura 4 estão expostos os resultados médios de RCS, onde pode-se observar que maiores valores de resistência foram encontrados para as amostras com maiores teores de CCA (30%) peso específico aparente seco (15 kN/m^3) e tempo de cura (90 dias). A melhor mistura (30% CCA e 15 kN/m^3) atingiu valores médios de RCS de 1,69 e 2,41 MPa em 28 e 90 dias, respectivamente. Já a mistura que obteve menor resistência (10% CCA e 13 kN/m^3), atingiu 0,23 MPa com 90 dias de cura. Assim, a relação da mistura com maior resistência (30% CCA e 15 kN/m^3) obteve um resultado de 10 vezes a mais na RCS em relação à mistura com menor resistência (10% CCA e 13 kN/m^3), ambas com 90 dias de cura.

No estudo de Pelisser et al. (2023), em que foi utilizado 10% cal hidratada (CH) e 30% de CCA para estabilização de ADF, no seu melhor resultado de RCS os autores obtiveram 2,35 MPa, com 90 dias de cura. No presente estudo, a ADF estabilizada com CCA-CCOH atingiu uma resistência superior (2,41 MPa) a obtida por Pelisser et al. (2023) (2,35 MPa), utilizando metade do teor de cal (5%). Isto pode ser explicado em função da maior disponibilidade de Ca na CCOH comparativamente a CH para atuar na formação de gel cimentante: a CCOH apresenta 72,9 % de CaO, enquanto que a CH é constituída por 52,50% CaO. Empregar menor quantidade de cal para atingir uma resistência alvo (ou um comportamento mecânico desejável) é um fator benéfico, pois diminui os custos do processo de estabilização, principalmente em aplicações de grande escala. Além disso, o uso de CCOH como alternativa a CH e a redução da quantidade de cal empregada são fatores que contribuem para minimizar os impactos ambientais associados ao uso de cal na estabilização de solos (Araújo et al., 2021), neste caso, a ADF pode ser comparada a um solo arenoso.

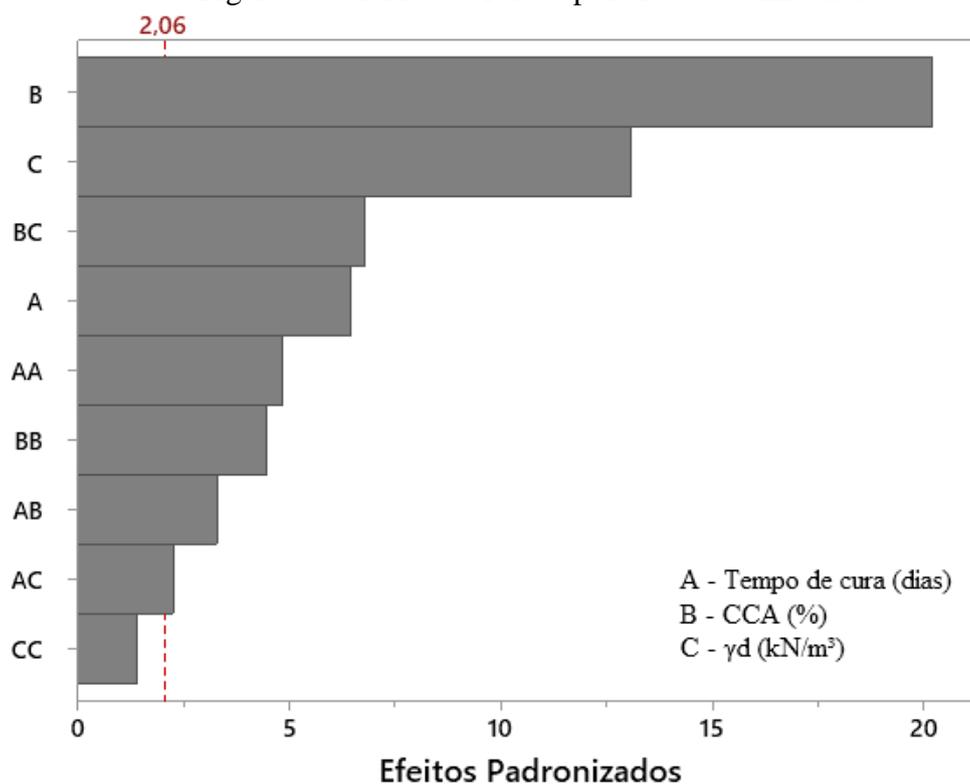
Figura 4 - Resultado médio de RCS.



Fonte: elaborado pelo autor.

Com base nos resultados encontrados foi realizada análise estatística, exposta na Figura 5 por meio do gráfico de Pareto. Nela é possível averiguar que todos os fatores controláveis têm influência significativa (valor $P < 0,05$) sobre a RCS das misturas. Os fatores que apresentam maiores influências respectivamente são: teor de CCA (B), peso específico seco (C) e tempo de cura (A), seguido de interações que demonstram principalmente o comportamento não-linear para o teor de CCA (B) e tempo de cura (A).

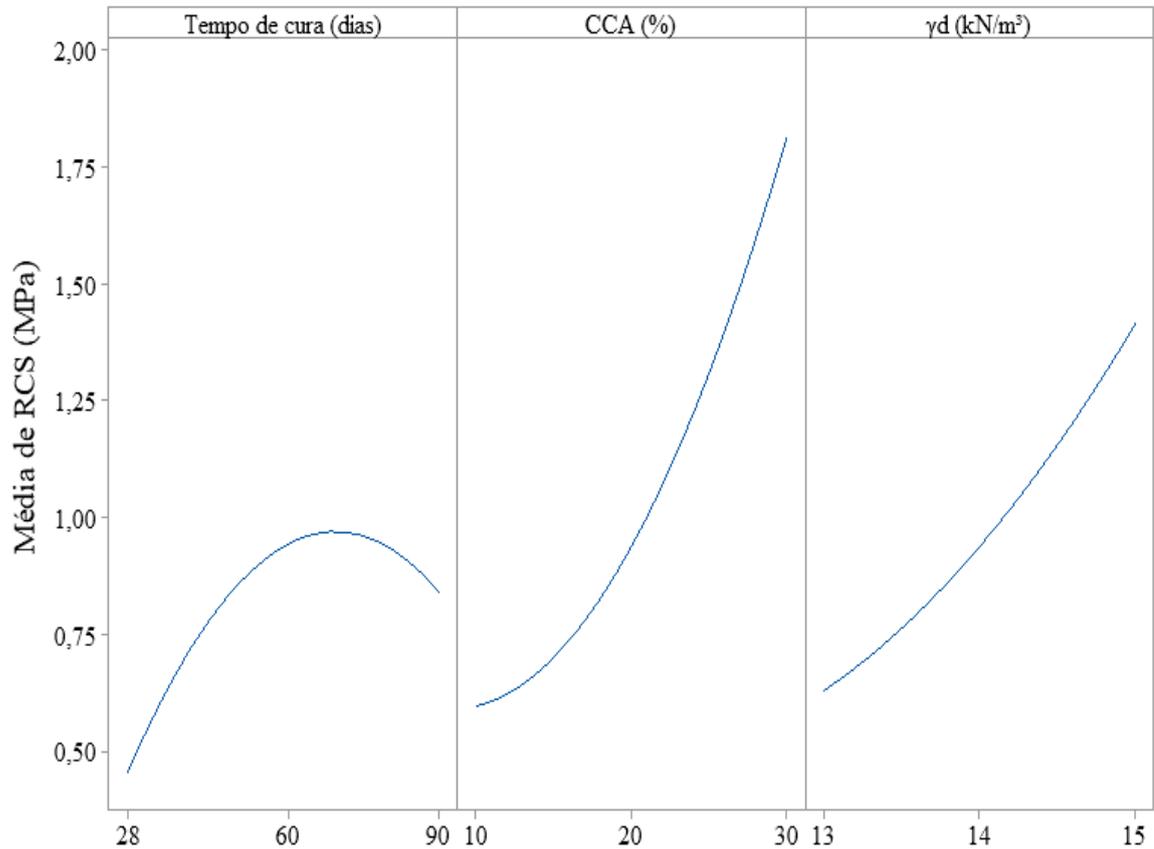
Figura 5 - Gráfico de Pareto para RCS das misturas.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os gráficos de efeitos principais (Figura 6) e superfície de contorno (Figura 7), reforçam a influência positiva dos fatores controláveis sobre a RCS, ou seja, o aumento do nível dos fatores resulta na maximização da resposta mecânica. Analisando a Figura 6, observa-se que o tempo de cura tem comportamento não-linear e com menor influência sobre a RCS depois de 60 dias de cura. Esta última observação é indicada pelo decaimento da curva devido a taxa de ganho de resistência entre 60 e 90 dias ser inferior àquela entre 28 e 60 dias. Isto ocorreu em função dos aluminossilicatos amorfos e do cálcio (inicialmente presentes em grandes quantidades) irem sendo consumidos nas reações pozolânicas para formação de gel cimentante, assim diminuindo sua disponibilidade nas misturas e os incrementos de resistência ao longo do tempo.

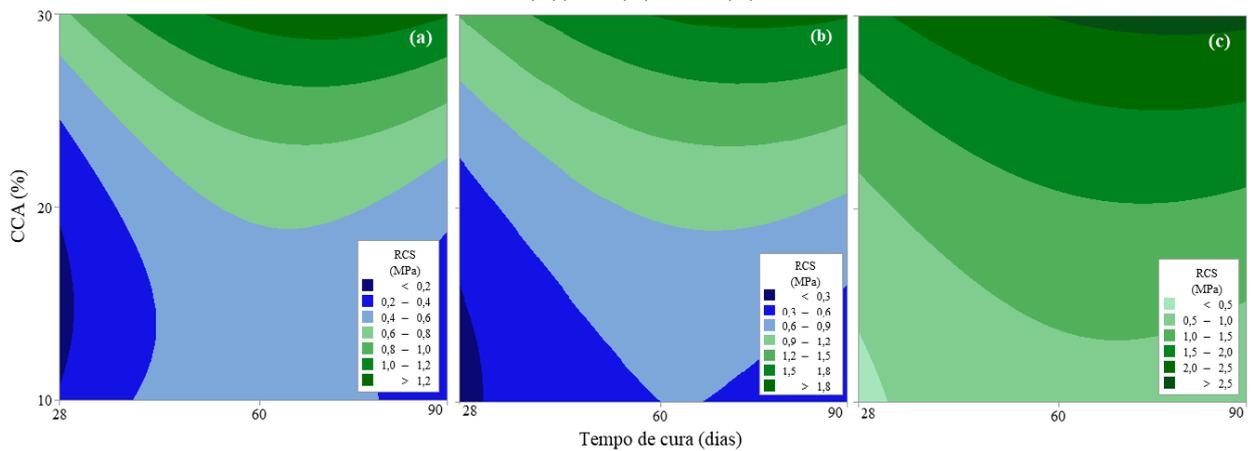
Figura 6 - Gráfico de efeitos principais da RCS das misturas.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 7 apresenta a superfície de contorno da RCS para cada um dos três pesos específicos avaliados, onde a cor verde escura representa a região de maiores valores de resistência. Nota-se um comportamento similar nas três superfícies de contorno (Figura 7a-c): a região ótima de RCS concentra-se em maiores teor de CCA e tempo de cura.

Figura 7 - Superfície de contorno da RCS para peso específico aparente seco (kN/m³) de 13(a), 14 (a) e 15 (c).



Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme observado nas Figuras 4-7, percebe-se que um maior peso específico aparente seco promove ganhos de resistência, independente da mistura. Com um peso específico maior tem-se uma mistura com menor porosidade e maior resistência em função do maior intertravamento entre as partículas, atrito entre os grãos e também enrijecimento da microestrutura.

Observou-se também a influência positiva do maior teor de CCA na resistência, isto ocorre devido ao aumento na disponibilidade de sílica e alumínio amorfos na mistura ADF-ligante, que interage com o cálcio na presença de umidade, promovendo reações pozolânicas com maior intensidade e, conseqüente formação de gel cimentante.

Em todas as misturas estudadas é possível notar a influência positiva do tempo de cura na RCS. Na mistura com melhor comportamento mecânico (30% CCA e 15 kN/m³) ocorreu um aumento de resistência entre 28 a 90 dias de 42%. Este aumento indica que os produtos cimentantes continuam se formando ao longo do tempo, principalmente pelo fato das reações pozolânicas se desenvolverem lentamente, quando comparada ao cimento Portland.

5.2 Lixiviação e solubilização de metais

Os resultados do extrato de lixiviado e extrato de solubilizado estão apresentados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente, para a mistura com 28 dias de cura e melhor comportamento mecânico (com 30 % de CCA e 15 kN/m³), a escolha da mistura para os ensaios ocorreu devido a limitação no tempo para realização dos ensaios. As concentrações de metais da mistura ADF-ligante foram comparadas com as concentrações presentes na ADF (PELISSER et al., 2023) e na CCA (REIS, 2021), bem como com os limites da NBR 10004 (ABNT, 2004), CONAMA 460 (CONAMA, 2013), com padrões internacionais de qualidade de água Lista Holandesa (VROM, 2000) e EPA (2022), onde os valores em **negrito** correspondem às concentrações que ultrapassaram ao menos um limite.

Na Tabela 3, o extrato lixiviado na mistura ADF-ligante apresentou concentrações de metais inferiores ao anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004), indicando que este material não apresenta toxicidade por metais. Além disso, todas as concentrações de metais no extrato lixiviado de ADF-ligante atenderam integralmente aos limites da normativa americana de qualidade de águas (EPA, 2022). Em comparação com a resolução CONAMA 460 (CONAMA, 2013), somente a concentração de Mn ultrapassa o limite máximo estabelecido. Presente na composição química da CCA (REIS, 2021), o Mn apresenta comportamento de lixiviação catiônico, ou seja, a taxa de lixiviação reduz à medida que aumenta o pH, já em ambientes

ácidos, íons Mn^{2+} estão presentes em maiores concentrações no meio aquoso (KOMONWEERAKET et al., 2015). A concentração de Mn no extrato lixiviado da mistura ADF-ligante pode ser explicada em função do pH baixo (4,98) verificado no extrato líquido, o que favoreceu a lixiviação deste metal. Os elementos Ba, Cd e Cr lixiviaram em concentrações superiores somente aos limites da norma mais restritiva de qualidade de águas, a Lista Holandesa (VROM, 2000)

Tabela 4 – Composição química dos extratos lixiviados de misturas ADF-ligante ($mg.L^{-1}$).

Metal	ADF-ligante	Resíduos		Normativas			
		ADF	CCA	NBR 10004 – Anexo F	CONAMA 460 ¹	Lista Holandesa ²	EPA ³
Ag	0,03	0,00	0,00	5	0,05	-	-
Al	3,06	0,00	0,00	-	3,5	-	-
As	0,00	0,00	0,00	1	0,01	0,01	0,01
Ba	0,37	0,22	0,55	70	0,7	0,05	2
Cd	0,003	0,00	0,00	0,5	0,005	0,0004	0,005
Cr	0,004	0,00	0,00	5	0,05	0,001	0,1
Cu	0,00	0,00	0,00	-	2	0,015	1,3
Fe	0,00	0,00	0,00	-	2,45	-	-
Hg	0,00	0,00	0,00	0,1	0,001	0,00005	0,002
Mn	6,48	0,00	0,00	-	0,4	-	-
Pb	0,00	0,00	0,00	1	0,01	0,015	0,015
Se	0,00	0,00	0,00	1	0,01	-	0,05
Zn	0,00	0,00	0,00	-	1,05	0,065	-

¹Valores orientadores para água subterrânea; ²Valores referenciais para água subterrânea;

³Regulamentos nacionais de água potável.

Na Tabela 4 observa-se que as concentrações de metais no extrato solubilizado da mistura ADF-ligante são inferiores aos limites do anexo G da NBR 10004 (ABNT, 2004). Além disso, os metais presentes no extrato solubilizado atenderam integralmente aos limites de qualidade de águas da CONAMA 460 (CONAMA, 2013) e da EPA (EPA, 2022). Somente a concentração de Ba no extrato solubilizado da mistura ultrapassou o limite mais restritivo de qualidade de águas estabelecido pela Lista Holandesa (VROM, 2000). Ainda na Tabela 4, nota-se que Al, Fe e Zn presentes nos extratos solubilizados dos resíduos (ADF e CCA) não foram observados no extrato solubilizado da mistura ADF-ligante. Isto indica que ADF-ligante (CCA+CCOH) foi capaz de encapsular Al, Fe e Zn na sua matriz cimentada.

Tabela 5 – Composição química dos extratos solubilizados de misturas ADF-ligante (mg.L⁻¹).

Metal	ADF-ligante	Resíduos		Normativas			
		ADF	CCA	NBR 10004 – Anexo G	CONAMA 460 ¹	Lista Holandesa ²	EPA ³
Ag	0,02	0,00	0,00	0,05	0,05	-	-
Al	0,14	1,62	0,13	0,2	3,5	-	-
As	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
Ba	0,25	0,00	0,00	0,7	0,7	0,05	2
Cd	0,001	0,00	0,00	0,005	0,005	0,0004	0,005
Cr	0,007	0,00	0,00	0,05	0,05	0,001	0,1
Cu	0,00	0,00	0,00	2	2	0,015	1,3
Fe	0,00	0,48	<0,05	0,3	2,45	-	-
Hg	0,00	0,00	0,00	0,001	0,001	0,00005	0,002
Mn	0,00	0,00	1,51	0,1	0,4	-	-
Pb	0,00	0,00	0,00	200	0,01	0,015	0,015
Se	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	-	0,05
Zn	0,00	0,00	0,06	0,01	1,05	0,065	-

¹Valores orientadores para água subterrânea; ²Valores referenciais para água subterrânea;

³Regulamentos nacionais de água potável.

Cabe destacar que a lixiviação e solubilização de metais foi realizada com a mistura ADF-ligante com 28 dias de cura. Acredita-se que a mistura ADF-ligante curada por 90 dias irá apresentar resultados de lixiviação e solubilização de metais ainda mais satisfatórios em função do desenvolvimento de géis cimentantes (ao longo do tempo) capazes de encapsular metais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados encontrados, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- Os maiores valores de RCS foram obtidos com 30% CCA, peso específico aparente seco de 15kN/m³, atingindo uma resistência de 1,69 e 2,41 MPa em 28 e 90 dias de cura respectivamente;
- Os fatores que mais influenciam em ganho de resistência mecânica na mistura ADF-ligante (da maior a menor magnitude) são: nessa ordem, o teor de CCA, peso específico aparente seco e tempo de cura;
- À mistura ADF-Ligante com 28 dias de cura e melhor comportamento mecânico (30 % de CCA e 15 kN/m³) não apresentou toxicidade e solubilidade por metais. Desta forma, encapsulou Al, Fe e Zn presentes nos resíduos (ADF e CCA).

Para trabalhos futuros, sugere-se investigar diferentes aumentos de teores de CCA e CCOH a fim de aumentar a resistência da mistura ADF-ligante. Além disso, sugere-se o estudo da mistura ADF-ligante em aplicações de obras de engenharia, como em subleito de rodovias de baixo volume de tráfego e barreiras impermeáveis de aterros.

REFERÊNCIAS

ABIFA, **Anuário ABIFA** - Guia ABIFA de Fundação, (2021) 12-14.

ABNT. NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 1–71, 2004.

ABNT. NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 1–16, 2004.

ABNT. NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 1–3, 2004.

ABNT. NBR 12025: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método do ensaio. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–2, 2012.

ABNT. NBR 15702: Areia descartada de fundição — Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 1–8, 2009.

ABNT. NBR 15984: Areia descartada de fundição — Central de processamento, armazenamento e destinação (CPAD). Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 1–17, 2011.

AGGARWAL, Yogesh; SIDDIQUE, Rafat. **Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates.** *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 54, p. 210-223, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.051>.

AHMARUZZAMAN, M.; GUPTA, Vinod K.. **Rice Husk and Its Ash as Low-Cost Adsorbents in Water and Wastewater Treatment.** *Industrial & Engineering Chemistry Research*, [S.L.], v. 50, n. 24, p. 13589-13613, 23 nov. 2011. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/ie201477c>.

AL-AGHBARI, M. Y.; MOHAMEDZEIN, Y. E.-A. .; TAHA, R. **Stabilisation of desert sands using cement and cement dust.** *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, v. 162, n. 3, p. 145–151, ago. 2009.

ALONSO-SANTURDE, R.; COZ, A.; VIGURI, J.R.; ANDRÉS, A.. **Recycling of foundry by-products in the ceramic industry: green and core sand in clay bricks.** *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 97-106, fev. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.022>.

AMARAL, M. C.; SIQUEIRA, F. B.; DESTEFANI, A. Z.; HOLANDA, J. N. **Soil – cement bricks incorporated with eggshell waste**. *Waste and Resource Management*, v. 166, p. 137–141, 2013.

ANDRADE, Leonardo de Brito; CARNIN, Raquel Luiza Pereira; PINTO, Roberto Caldas de Andrade. **Areia descartada de fundição para uso em concreto de cimento Portland: análise do agregado**. *Matéria (Rio de Janeiro)*, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 12-22, 18 out. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0494>.

ARAÚJO, Mariana Tonini de; FERRAZZO, Suéllen Tonatto; BRUSCHI, Giovanni Jordi Jordi; CONSOLI, Nilo Cesar. **Mechanical and Environmental Performance of Eggshell Lime for Expansive Soils Improvement**. *Transportation Geotechnics*, [S.L.], v. 31, p. 100681, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100681>.

Arroz: órgão do G-20 eleva estimativa para produção mundial em 2021/22. Disponível em: <<https://www.canalrural.com.br/radar/arroz-orgao-do-g-20-eleva-estimativa-para-producao-mundial-em-2021-22/>>. Acesso em: 12 mar. 2022.

ASHIQ, Syed Zishan; AKBAR, Aziz; FAROOQ, Khalid; MUJTABA, Hassan. **Sustainable improvement in engineering behavior of Siwalik Clay using industrial waste glass powder as additive**. *Case Studies In Construction Materials*, [S.L.], v. 16, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00883>.

Associação Brasileira de Fundição. **ÍNDICES SETORIAIS DE 2021**, <<http://www.abifa.org.br/indicessetoriais>>. Acessado em março de 2022.

ASTM D1557-12e1 - American Society for Testing and Materials. C39: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. Pennsylvania, 2010.

ASTM D6276 - Standard test method for using pH to Estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

AYDIN, E.; AREL, H. Ş. **Characterization of high-volume fly-ash cement pastes for sustainable construction applications**. *Construction and Building Materials*, v. 157, p. 96–107, dez. 2017.

BAKIS R., KOYYNCU, H. e DEMIRBAS, A. (2006) **Uma investigação da fundição de resíduos em misturas de concreto asfáltico**, *Gestão de Resíduos & Pesquisa*, 24(3), pp. 269-274. doi: 10.1177/0734242X064822.

BEHAK, L. Rice - **Technology and Production**. *Intechopen*, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 12-122, 22 mar. 2017. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/64480>.

BHARDWAJ, Avinash; SHARMA, Ravi Kumar. **Effect of industrial wastes and lime on strength characteristics of clayey soil**. *Journal Of Engineering, Design And Technology*, [S.L.], v. 18, n. 6, p. 1749-1772, 27 mar. 2020. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/jedt-12-2019-0350>.

BHATTACHARYA, A; NAIYA, T; MANDAL, S; DAS, S. Adsorption, kinetics and equilibrium studies on removal of Cr(VI) from aqueous solutions using different low-cost

adsorbents. *Chemical Engineering Journal*, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 12-122, 24 maio 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2007.05.021>

BRAGAGNOLO, L. et al. **Caracterização de resíduos da fundição de ferro e avaliação de possíveis aplicações na construção civil**. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)*, n. 50, p. 61–77, 2018.

BRAHAM, Andrew. (2002). **The use of blended recycled foundry sand in hot mix asphalt** /. Typescript. Thesis (M.S.)--University of Wisconsin--Madison, 2002. Includes bibliographical references (leaves 103-110).

BUALUANG, T.; JITSANGIAM, P.; TANCHAISAWAT, T. **Sustainable flexible pavement base stabilization with pozzolanic materials incorporating sodium hydroxide and asphalt emulsion**. *Transportation Engineering*, v. 6, p. 100094, dez. 2021.

CAPELETTO, G. J; MOURA, G. H Z. **Balanco Energético do Rio Grande do Sul**. 2013. Porto Alegre: Grupo CEEE, 2014.

CETESB. Decisão de Diretoria No 152/2007/C/E, de 08 de agosto de 2007. **Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental**, p. 1–16, 2007.

COFFETTI, D.; CROTTI, E.; GAZZANIGA, G.; CARRARA, M.; PASTORE, T.; COPPOLA, L.. **Pathways towards sustainable concrete**. *Cement And Concrete Research*, [S.L.], v. 154, p. 106718, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106718>.

CONAB. Arroz: Acompanhamento da safra brasileira VIS2020/2021. **Companhia Nacional de Abastecimento**, v. 8, n. 5, 2021.

CONAMA. 2013. “Resolução 460: Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e dá outras providências”. *Official Diary of the Union*, Brasília, Brasil: CONAMA.

CONGRESSO NACIONAL. Brasil. Constituição (2020). Projeto de Lei nº 4869, de 2020. Congresso Nacional: Dispõe sobre uso de Areia Descartada de Fundição – ADF.

CONSEMA-SC. Resolução Consema Nº. 011, de 26 de agosto de 2008. **Conselho Estadual do Meio Ambiente**, p. 1–14, 2008.

CONSOLI N. C, SALDANHA R. B, FILHO H. C. S. (2019) **Short- and long-term effects of sodium chloride on strength and durability of coal fly ash stabilized with carbide lime**. *Canadian Geotechnical Journal*, 56 (12) <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0696>

CONSOLI, N. C.; CARRETTA, M. DA S.; FESTUGATO, L.; LEON, H. B.; TOMASI, L. F.; HEINECK, K. S. **Ground waste glass – carbide lime as a sustainable binder stabilising three different silica sands**. *Géotechnique*, v. 71, n. 6, p. 480–493, 2021.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, A.; SALDANHA, R. B. **Variables Governing Strength of Compacted Soil – Fly Ash – Lime Mixtures**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 23, n. 4, p. 432–440, 2011

CONSOLI, N. C.; MARIN, E. J. B.; SAMANIEGO, R. A. Q.; HEINECK, K. S.; JOHANN, A. D. R. **Use of Sustainable Binders in Soil Stabilization**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 31, n. 2, 2019.

CONSOLI, N. C.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; LEON, H. B.; CARRETTA, M. DA S.; CORTE, M. B.; CORDEIRO, R. E.; CABALLERO, R. D.; LOURENÇO, D. E. **General relationships controlling loss of mass, stiffness and strength of sustainable binders amended sand**. *Transportation Geotechnics*, v. 27, p. 100473, 2021

CONSOLI, N. C.; WINTER, D.; LEON, H. B.; SCHEUERMANN FILHO, H. C. **Durability, Strength, and Stiffness of Green Stabilized Sand**. v. 144, n. 9, p. 1–10, 2018. COPAM-MG. Deliberação Normativa nº 196, de 03 de abril de 2014. **Conselho Estadual de Política Ambiental**. p. 1 - 16, 2014.

COPPIO, Gustavo J.L.; LIMA, Maryangela Geimba de; LENCIONI, Julia W.; CIVIDANES, Luciana S.; DYER, Paulo P.O.L.; SILVA, Silvelene A. **Surface electrical resistivity and compressive strength of concrete with the use of waste foundry sand as aggregate**. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 212, p. 514-521, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.297>.

D'AMATO, Alessio; MANCINELLI, Susanna; ZOLI, Mariangela. **Complementarity vs substitutability in waste management behaviors**. *Ecological Economics*, [S.L.], v. 123, p. 84-94, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.12.005>.

DAMTOFT, J.s.; LUKASIK, J.; HERFORT, D.; SORRENTINO, D.; GARTNER, E.M.. **Sustainable development and climate change initiatives**. *Cement And Concrete Research*, [S.L.], v. 38, n. 2, p. 115-127, fev. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008>.

DAVIDSON, D. T.; MATEOS, Manuel; KATT, R. K.. **Activation of the Lime-Flyash Reaction By Trace Chemicals**. *Asas*, [s. l], mar. 1959.

DAWOOD, Eethar Thanon; MOHAMMED, Waseem Thabit; PLANK, Johann. **Performance of sustainable mortar using calcined clay, fly ash, limestone powder and reinforced with hybrid fibers**. *Case Studies In Construction Materials*, [S.L.], v. 16, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00849>.

DOMINGUES, Luciene Gachet Ferrari; FERREIRA, Gisleiva Cristina dos Santos; PIRES, Marta Siviero Guilherme. **Waste foundry sand used to cover organic waste in landfills**. *Journal Of Material Cycles And Waste Management*, [S.L.], v. 24, n. 1, p. 378-385, 19 nov. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-021-01327-z>.

DOMINGUES, Luciene Gachet Ferrari; FERREIRA, Gisleiva Cristina dos Santos. **Functional and environmental performance of waste foundry sand applied in landfills**. *International Journal Of Environmental Studies*, [S.L.], v. 73, n. 2, p. 196-202, 29 jul. 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00207233.2015.1067467>.

DYER, Paulo P.O.L.; COPPIO, Gustavo J.L.; SILVA, Silvelene A.; CIVIDANES, Luciana S.; KLINSKY, Luis Miguel G.; LIMA, Maryangela Geimba de. **Mechanical and**

microstructural assessments of waste foundry sand in hot mix asphalt. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 311, p. 125329, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021>.

DYER, Paulo P.O.L.; LIMA, Maryangela Geimba de; KLINSKY, Luis Miguel G.; SILVA, Silvelene A.; COPPIO, Gustavo J.L.. **Environmental characterization of Foundry Waste Sand (WFS) in hot mix asphalt (HMA) mixtures.** Construction And Building Materials, [S.L.], v. 171, p. 474-484, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.151>.

EPA (Environmental Protection Agency). 2009. **“Ground water and drinking water: national primary drinking water regulations”**. Disponível em: <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-waterregulations#Inorganic>>. Acesso em: 30 Jan. 2023.

EPA. **Frequent Questions about EPA’s Risk Assessment of Spent Foundry Sands in Soil Related Applications | US EPA.** 2017, US EPA. Disponível em: <https://www.epa.gov/smm/frequent-questions-about-epas-risk-assessment-spent-foundry-sands-soil-related-applications>>. Acesso em: 21 Mar. 2022.

FAOSTAT. **Leading egg producing countries worldwide in 2018.** Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/263971/top-10-countries-worldwide-in-egg-production>>. Acesso em: 10 mar. 2022.

FEO, G. de; FERRARA, C.; IANNONE, V.; PARENTE, P.. **Improving the efficacy of municipal solid waste collection with a communicative approach based on easily understandable indicators.** Science Of The Total Environment, [S.L.], v. 651, p. 2380-2390, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.161>.

FERREIRA, Gisleiva Cristina dos Santos; DOMINGUES, Luciene Gachet Ferrari; TEIXEIRA, Ivonei; PIRES, Marta Guilherme Siviero. Viabilidade técnica e ambiental de misturas de solo com areia descartada de fundição. Transportes, [S.L.], v. 22, n. 2, p. 62, 15 jul. 2014. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v22i2.728>.

FLORES, C. G. et al. **Synthesis of potassium zeolite from rice husk ash as a silicon source.** Cleaner Engineering and Technology, v. 4, p. 100201, out. 2021.

GLOBAL CASTING Magazine. 2021. Disponível em: <https://foundry-planet.com/globalcastingmagazine/>. Acesso em: 05 mar. 2022.

GONG, Xiaolong; JIANG, Wenming; HU, Shengli; YANG, Zhiyuan; LIU, Xinwang; FAN, Zitian. **Comprehensive utilization of foundry dust: coal powder and clay minerals separation by ultrasonic-assisted flotation.** Journal Of Hazardous Materials, [S.L.], v. 402, p. 124124, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124124>.

GUNARTI, Anita Setyowati Srie; RAHARJA, Irwan. **Utilization of Industrial Waste as Soil Stabilizer to Enhance Direct Shear Strength.** Proceedings Of The 2Nd Borobudur International Symposium On Science And Technology (Bis-Ste 2020), [S.L.], ago. 2021. Atlantis Press. <http://dx.doi.org/10.2991/aer.k.210810.034>.

GUNEY, Yucel; AYDILEK, Ahmet H.; DEMIRKAN, M. Melih. **Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases.** Waste Management,

[S.L.], v. 26, n. 9, p. 932-945, jan. 2006. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2005.06.007>.

GUPTA, Nikita; SIDDIQUE, Rafat; BELARBI, Rafik. **Sustainable and Greener Self-Compacting Concrete incorporating Industrial By-Products: a review**. Journal Of Cleaner Production, [S.L.], v. 284, p. 124803, fev. 2021. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124803>.

HIGGINS, D. **Briefing: GGBS and sustainability**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials, v. 160, n. 3, p. 99–101, ago. 2007.

HILAL, N.; AL SAFFAR, D. M.; ALI, T. K. M. **Effect of egg shell ash and strap plastic waste on properties of high strength sustainable self-compacting concrete**. Arabian Journal of Geosciences, v. 14, n. 4, fev. 2021.

IQBAL, M F; LIU, Q F; AZIM, I. **Experimental study on the utilization of waste foundry sand as embankment and structural fill**. Iop Conference Series: Materials Science and Engineering, [S.L.], v. 474, p. 012042, 13 fev. 2019. IOP Publishing.
<http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/474/1/012042>.

JAFFAR, Syed Taseer Abbas; ABID, Malik Muneeb; KHAN, Sikander Zaman; JAFRI, Turab; REHMAN, Zia Ur; TARIQ, Muhammad Atiq Ur Rehman; NG, Anne W. M.. **Evaluation of Conventional and Sustainable Modifiers to Improve the Stiffness Behavior of Weak Sub-Grade Soil**. Sustainability, [S.L.], v. 14, n. 5, p. 2493, 22 fev. 2022. MDPI AG.
<http://dx.doi.org/10.3390/su14052493>.

KANG, D., GUPTA, S.C., RANAIVOSON, A.Z., SIEKMEIER, J. and ROBERSON, R. (2011), **Recycled Materials as Substitutes for Virgin Aggregates in Road Construction: I**. Hydraulic and Mechanical Characteristics. Soil Science Society of America Journal, 75: 1265-1275. <https://doi-org.ez372.periodicos.capes.gov.br/10.2136/sssaj2010.0295>

KOMONWEERAKET, Kanokwan; CETIN, Bora; AYDILEK, Ahmet H.; BENSON, Craig H.; EDIL, Tuncer B.. **Effects of pH on the leaching mechanisms of elements from fly ash mixed soils**. Fuel, [S.L.], v. 140, p. 788-802, jan. 2015. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.068>.

LEON, H. B. et al. **Statistical Analysis of the Influence of Curing Time and Temperature on Compressive Strength of Sandy Soil Stabilized with Sustainable Binder**. Journal of Testing and Evaluation, v. 48, n. 3, p. 20180763, 26 dez. 2019.

LEVANDOSKI, William Mateus Kubiaki. **Ligante álcali-ativado oriundo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo para estabilização de rejeito da mineração de ferro**. 2021. 26 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, 2021.

MALLELA, J.; QUINTUS, H. VON; SMITH, K. L. **Consideration of Lime-Stabilized Layers in Mechanistic-Empirical Pavement Design**. Journal, v. 61820, 2004.

MARTINS, G. L. O. **Influência do teor de sílica amorfa na atividade pozolânica de adições minerais altamente reativas**. 149 f. Dissertação (Mestrado)- Estruturas e Construção Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília- UnB, Brasília, 2018

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 9. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017.

MURAKAMI, F. S. et al. **Physicochemical study of CaCO₃ from egg shells**. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 27, n. 3, p. 658–662, set. 2007.

OLIVEIRA, D. A.; BENELLI, P.; AMANTE, E. R. **A literature review on adding value to solid residues: egg shells**. *Journal of Cleaner Production*, v. 46, p. 42–47, 1 maio 2013.

PELISSER, Giovana. **Estudo de um ligante alternativo de cinza de casca de arroz e cal de carbureto para estabilização de areia descartada de fundição**. 2021. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, 2021.

PUSHPAKUMARA, B. H. J.; MENDIS, W. S. W. **Suitability of Rice Husk Ash (RHA) with lime as a soil stabilizer in geotechnical applications**. *International Journal of Geo-Engineering*, v. 13, n. 1, 2 fev. 2022.

QUARANTA, N; CALIGARIS, M; PELOZO, G. **Emissions analysis from various industrial wastes to be used as raw material for ceramics**. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 148. 313-323. 10.2495/RAV110291. 2011.

QUEIROZ, Claudio Luiz. **Comportamento de uma mistura de solo, Cal de Carbureto e Cinza da Casca de Aveia com adição de Fibras**. 2020. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Infraestrutura e Meio Ambiente, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2020.

REIS, J. B. **Mistura compactada de solo residual argiloso e ligante de Cinza de casca de arroz e cal de casca de ovo: comportamento Reativo e mecânico mediante ataque ácido**. 2021. 40 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, 2021.

RIOS, S.; DA FONSECA, A. V.; BANGARU, S. S. **Silty Sand Stabilized with Different Binders**. *Procedia Engineering*, v. 143, p. 187–195, 2016.

RUMMAN, R.; BARI, M. S.; MANZUR, T.; KAMAL, M. R.; NOOR, M. A. A. **Durable Concrete Mix Design Approach using Combined Aggregate Gradation Bands and Rice Husk Ash Based Blended Cement**. *Journal of Building Engineering*, 2020.

SABOUR, M.R., DERHAMJANI, G., AKBARI, M. et al. **Tendências globais e status em pesquisa de gestão de estomes de fundição de resíduos durante os anos de 1971 a 2020: uma análise sistemática**. *Environ Sci Polui Res* 28, 37312-37321 (2021). <https://doi-org.ez372.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11356-021-13251-8>

SALDANHA, Rodrigo Beck; ROCHA, Cecília Gravina da; CAICEDO, Andrés Maurício Lotero; CONSOLI, Nilo Cesar. **Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization**. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 298, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123648>.

SANTA CATARINA. Lei N° 17.479, de 15 de janeiro de 2018. **Governo de Santa Catarina**, p. 1–6, 2018.

SANTOS, Carolina Pereira dos; BRUSCHI, Giovani Jordi; MATTOS, João Rodrigo Guerreiro; CONSOLI, Nilo Cesar. **Stabilization of gold mining tailings with alkali-activated carbide lime and sugarcane bagasse ash.** *Transportation Geotechnics*, [S.L.], v. 32, p. 100704, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100704>.

SARGENT, P. et al. **The use of alkali activated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils.** *Engineering Geology*, v. 152, n. 1, p. 96–108, jan. 2013.

SELVAKUMAR M., GEETHA S., AGALIYA B.V., SHINE S., RUPASUDHARSHNEE R.U., SAKTHIVEL M. (2022). **Study on Properties of Polymer Mortar with Foundry Sand.** In: Naganathan S., Mustapha K.N., Palanisamy T. (eds) *Sustainable Practices and Innovations in Civil Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 179. Springer, Singapore. https://doi-org.ez372.periodicos.capes.gov.br/10.1007/978-981-16-5041-3_16

SENSALE, Gemma Rodríguez de. **Strength development of concrete with rice-husk ash.** *Cement And Concrete Composites*, [S.L.], v. 28, n. 2, p. 158-160, fev. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.09.005>.

SHUKLA, Ashish; GUPTA, Nakul; GUPTA, Ankur. **Development of green concrete using waste marble dust.** *Materials Today: Proceedings*, [S.L.], v. 26, p. 2590-2594, 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.548>.

SIDDIQUE, Rafat; SCHUTTER, Geert de; NOUMOWE, Albert. **Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete.** *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 976-980, fev. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.005>.

SIDDIQUE, Rafat; SINGH, Gurpreet. **Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing.** *Resources, Conservation And Recycling*, [S.L.], v. 55, n. 11, p. 885-892, set. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.001>.

SILVA, L. M. S. e et al. **Utilization of discarded foundry sand (DFS) and inorganic waste from cellulose and paper industry for the manufacture of glass-ceramic materials.** *Cerâmica* [online]. 2020, v. 66, n. 380 [Accessed 6 March 2022], pp. 413-420. Available from: <<https://doi.org/10.1590/0366-69132020663802899>>. Epub 30 Oct 2020. ISSN 1678-4553. <https://doi.org/10.1590/0366-69132020663802899>.

SILVANI, Carina; BRAUN, Eduardo; MASUERO, Guilherme Borges; CONSOLI, Nilo Cesar. **Behavior of Soil–Fly Ash–Lime Blends under Different Curing Temperatures.** *Procedia Engineering*, [S.L.], v. 143, p. 220-228, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.028>.

SINGH, Gurpreet; SIDDIQUE, Rafat. **Abrasion resistance and strength properties of concrete containing waste foundry sand (WFS).** *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 421-426, mar. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.087>.

SINGH, Gurpreet; SIDDIQUE, Rafat. **Effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete.** *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 416-422, jan. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.041>.

SITHOLE, N.T.; TSOTETSI, N.T.; MASHIFANA, T.; SILLANPÄÄ, M. **Alternative cleaner production of sustainable concrete from waste foundry sand and slag.** Journal Of Cleaner Production, [S.L.], v. 336, p. 130399, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130399>.

SONG, J. U.; LEE, J. S.; YOON, H. K. **Application of electrical conductivity method for adsorption of lead ions by rice husk ash.** Journal of the International Measurement Confederation. v. 144. p. 126–134, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.094>. Acesso em 20 mar. 2022.

SRIKANTH, Gowsijan; FERNANDO, Ashani; SELVARANJAN, Kajanan; GAMAGE, J.C.P.H.; EKANAYAKE, Lesly. **Development of a plastering mortar using waste bagasse and rice husk ashes with sound mechanical and thermal properties.** Case Studies In Construction Materials, [S.L.], v. 162, n. 1, p. 11-22, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00956>.

SRIVIDYA, T; , KANNAN RAJKUMAR, P. R.; , SIVASAKTHI, M. A; SUJITHA; R., Jeyalakshmi. **A state-of-the-art on development of geopolymer concrete and its field applications.** Case Studies In Construction Materials, [S.L.], v. 16, p. 1-12, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00812>.

STOEVA, Katya; ALRIKSSON, Stina. **Influence of recycling programmes on waste separation behaviour.** Waste Management, [S.L.], v. 68, p. 732-741, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.005>.

THAMARAISELVI, N.; SAKTHIESWARAN, N.; BABU, O. Ganesh. **Improving the performance of mortar containing industrial wastes.** Materials Today: Proceedings, [S.L.], v. 37, p. 1062-1065, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.294>.

TIWARI, Anshuman; SINGH, Sarbjeet; NAGAR, Ravindra. **Feasibility assessment for partial replacement of fine aggregate to attain cleaner production perspective in concrete: a review.** Journal Of Cleaner Production, [S.L.], v. 135, p. 490-507, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.130>.

TORRES, A.; BARTLETT, L.; PILGRIM, C. **Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland Cement Concrete.** Construction and Building Materials, v. 135, p. 674–681, 2017.

VARGAS, A. S. de; SCHNEIDER, E. L. SCHMITZ, G.; AQUIM, P. M. de. **Argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes álcali-ativadas contendo areia de fundição. Cerâmica**, [S.L.], v. 61, n. 359, p. 317-322, set. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613591784>.

VISKOCHIL R.; L., HANDY R.; T., DAVIDSON D. Effect of Density on Strength of Lime-Flyash Stabilized Soil, fev. 1958.

VROM (Ordenamento do Território e Ambiente). 2000. **Meta e intervenção holandesa valores. Ministerie van Volksuisveting Ruimtelijke Ordening em Milieubeheer.** Acessado em Janeiro 27, 2023.

<http://www.esdat.net/environmental%20standards/dutch/annexs_i2000dutch%20environmental%20standards.pdf> (2020).

WAHEED, M.; BUTT, M. S.; SHEHZAD, A.; ADZAHAN, N. M.; SHABBIR, M. A.; RASUL SULERIA, H. A.; AADIL, R. M. **Eggshell calcium**: A cheap alternative to expensive supplements. *Trends in Food Science and Technology*, v. 91, n. January, p. 219–230, 2019.

WANG, Jie; FU, Jianxin; SONG, Weidong; ZHANG, Yongfang. **Effect of rice husk ash (RHA) dosage on pore structural and mechanical properties of cemented paste backfill**. *Journal Of Materials Research And Technology*, [S.L.], v. 17, p. 840-851, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.044>.

YIN, Mengyao; LI, Xuan; LIU, Qian; TANG, Feiyu. **Rice husk ash addition to acid red soil improves the soil property and cotton seedling growth**. *Scientific Reports*, [S.L.], v. 12, n. 1, 1 fev. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-022-05199-7>.

ZAINI, Muhammad Syamsul Imran; HASAN, Muzamir; YIE, Ling Sin; MASRI, Khairil Azman; JAYA, Ramadhansyah Putra; HYODO, Masayuki; WINTER, Michael James. **The Effect Of Utilizing Silica Fume And Eggshell Ash On The Geotechnical Properties Of Soft Kaolin Clay**. *Jurnal Teknologi*, [S.L.], v. 84, n. 1, p. 159-170, 21 nov. 2021. Penerbit UTM Press. <http://dx.doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v84.17115>.

ZAPARTE, T. A. **Análise global da influência da finura da cinza de casca de arroz como substituição parcial ao cimento Portland nas propriedades da argamassa de revestimento**. 2020. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pósgraduação em Engenharia civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020.

ZOU, Yanping; YANG, Tiankui. **Rice Husk, Rice Husk Ash and Their Applications**. *Rice Bran And Rice Bran Oil*, [S.L.], p. 207-246, 2019. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-812828-2>.