



UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL

CAMPUS ERECHIM

ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

JOICE BATISTA REIS

**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**

ERECHIM

2021

JOICE BATISTA REIS

**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**

Trabalho de conclusão de curso apresentado na
Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Pavan Korf
Coorientadora: Prof. Dra. Adriana Augustin
Silveira.

ERECHIM

2021

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

, Joice Batista Reis
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 / Joice Batista Reis . -- 2021.
42 f.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Pavan Korf
Co-orientadora: Prof. Dra. Adriana A. Silveira
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária,
Erechim, RS, 2021.

1. Resíduos domésticos e industriais. 2.
Caracterização tecnológica e ambiental. 3. Ligante
alternativo. 4. Valorização. I. Korf, Eduardo Pavan,
orient. II. Silveira, Adriana A., co-orient. III.
Universidade Federal da Fronteira Sul. IV. Título.

Elaborada pelo sistema de Geração Automática de Ficha de Identificação da Obra pela UFFS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

JOICE BATISTA REIS

**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**

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: 20/05/2021.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Eduardo Pavan Korf
Orientador

Prof. Dra. Adriana A. Silveira
Universidade de Passo Fundo - UPF, coorientadora.

Prof. Dr. Paulo A. Hartmann
Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Ma. Suéllen Tonatto Ferrazzo
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Ma. Deise Trevizan Pelissaro
Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, pela presença constante ao meu lado que me proporcionou forças para continuar. Aos meus pais por todo apoio, educação e carinho de sempre, sem os quais eu não teria prosseguido. Ao meu marido, Samuel, por sempre estar ao meu lado e me incentivar a conquistar todos os meus sonhos. Agradeço também a minha irmã Juliana Reis que sempre esteve comigo me motivando, assim como minha amiga Aline pela companhia e força de todos os momentos. Aos meus familiares, meus tios e primos por sempre estarem presentes ao meu lado. Ao meu professor e orientador Eduardo Korf por todas as oportunidades, confiança e conhecimentos compartilhados durante todos os anos de trabalho junto ao grupo de pesquisa. A minha coorientadora professora Adriana por toda dedicação e ajuda nessa pesquisa. Aos meus amigos, Josiane, Wesller, Érisa, Tainá, Tatiana, Jordana, Wilson, Gabriel e muitos outros tão especiais que estiveram ao meu lado. Ao William e Jonas que tornaram a realização desse trabalho possível e pela companhia diária de laboratório. Ao grupo de pesquisa em Grupo de Pesquisa em Resíduos e Geotecnia Ambiental - REGEOAMB, por todo conhecimento compartilhado e apoio. Aos técnicos de laboratório, especialmente a Suzana, por toda atenção, paciência e ensinamentos. A todos os meus professores por todo aprendizado passado que tornaram possível a minha formação e elaboração deste trabalho. E a todos os envolvidos na minha formação acadêmica e pessoal que contribuíram de forma direta e indireta para a realização dessa conquista.

RESUMO

A crescente produção de resíduos e sua respectiva destinação é um sério problema existente no contexto atual. Dentre os setores responsáveis, destaca-se o alimentício responsável pela geração de grandes volumes residuais, comumente destinados a aterros sanitários. A produção de arroz gera anualmente toneladas de um resíduo denominado casca de arroz. Esse material por muitas vezes é destinado a processos de combustão, originando um novo material, a cinza de casca de arroz (CCA). Outro resíduo do setor alimentício altamente produzido é a casca de ovo, rica em carbonato de cálcio, apresentando alto potencial para aplicação na produção de cal. Diante disso o objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicação de misturas de CCA e cal a base de casca de ovo (CCO) em solo argiloso compactado, avaliando seu comportamento mediante ataque ácido. A CCA foi caracterizada por ensaios químicos, físicos, mineralógicos, geomorfológicos e de classificação ambiental. A mistura solo-cinza-cal, contendo 30% de CCA e 6% de CCO, foi avaliada quanto a comportamento reativo e mecânico. De forma comparativa, uma mistura contendo cal comercial foi avaliada sob as mesmas condições. A reatividade foi estudada por meio da execução de planejamento experimental compósito central de três variáveis (% cinza, %cal e pH de ataque ácido), utilizando-se metodologia de ataque ácido por ensaios de batelada com solução de ácido sulfúrico. O comportamento físico e mecânico foi avaliado por meio de ensaios de compactação e RCS, para ambas as misturas. O resíduo apresenta alto teor de óxido de sílica (87,6%), contendo minerais de quartzo e cristobalita na forma cristalina, se enquadrando como uma pozolana de baixa reatividade. Os ensaios de reatividade demonstraram melhor neutralização de acidez do contaminante para as misturas com CCO. A incorporação de até 30% de CCA no solo, unida a 6% de cal de casca de ovo, elevou o pH sem a solubilização de elementos tóxicos. Quanto ao comportamento físico verificou-se a redução do peso específico seco máximo e aumento do teor de umidade ótimo do solo. A CCO se mostrou um ligante mais eficiente para a resistência mecânica e reatividade das misturas após 28 dias de cura. Diante disso conclui-se que a aplicação de CCA e CCO em solos submetidos a ataque ácido possui viabilidade ambiental, contudo indica-se a análise de processos de moagem do resíduo aliada ao estudo da resistência da mistura ao longo do tempo e ensaios de aplicação em barreiras impermeáveis de aterros.

Palavras-chave: Resíduos domésticos e industriais. Caracterização tecnológica e ambiental. Ligante alternativo. Valorização.

ABSTRACT

The growing production of waste and its respective destination is a serious problem in the current context. Among the responsible sectors, the foodstuff responsible for the generation of large residual volumes, commonly destined to landfills, stands out. The production of rice generates annually tons of a residue called rice husk. This material is often destined for combustion processes, giving rise to a new material, rice husk ash (RHA). Another residue from the highly produced food sector is eggshell, which is rich in calcium carbonate, with high potential for application in the production of lime. Therefore, the objective of this work was to evaluate the application of mixtures of RHA and lime based on eggshell (EL) in compacted clay soil, evaluating its behavior through acid attack. RHA was characterized by chemical, physical, mineralogical, geomorphological and environmental classification tests. The soil-ash-lime mixture, containing 30% RHA and 6% EL, was evaluated for reactive and mechanical behavior. Comparatively, a mixture containing commercial lime was evaluated under the same conditions. Reactivity was studied through the execution of central composite experimental design of three variables (% RHA, % lime and acid attack pH), using acid attack methodology by batch tests with sulfuric acid solution. The physical and mechanical behavior was evaluated by means of compaction tests and unconfined compression strength (UCS), for both mixtures. The residue has a high content of silica oxide (87.6%), containing quartz minerals and cristobalite in crystalline form, fitting as a low reactivity pozzolan. Reactivity tests demonstrated better neutralization of contaminant acidity for mixtures with EL. The incorporation of up to 30% of RHA in the soil, together with 6% of eggshell lime, raised the pH without the solubilization of toxic elements. As for the physical behavior, there was a reduction in the maximum dry specific weight and an increase in the optimum moisture content of the soil. EL proved to be a more efficient binder for the mechanical resistance and reactivity of the mixtures after 28 days of curing. Therefore, it is concluded that the application of RHA and EL in soils subjected to acid attack has environmental viability, however, it is recommended to analyze the processes of grinding the waste together with the study of the resistance of the mixture over time and application tests on impermeable landfill barriers.

Keywords: Domestic and industrial waste. Technological and environmental characterization. Alternative ligand. Recovery.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3. METODOLOGIA	13
3.1 MATERIAIS	13
3.1.1 Caracterização dos Materiais	14
3.2 COMPORTAMENTO REATIVO DAS MISTURAS EM CONDIÇÃO NÃO-ESTRUTURADA	15
3.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO E REATIVO DAS MISTURAS EM CONDIÇÃO ESTRUTURADA	17
3.3.1 Determinação dos mínimo de cal utilizado na mistura (ICL)	17
3.3.2 Caracterização e compactação das misturas.	17
3.3.3 Resistência à compressão simples das misturas	18
3.3.4 Caracterização química, mineralógica e microestrutural das misturas	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA FÍSICA, QUÍMICA, MINERALÓGICA E MICROESTRUTURAL DA CCA	20
4.2 CARACTERIZAÇÃO E COMPORTAMENTO DAS MISTURAS	26
5. CONCLUSÃO	34
REFERÊNCIAS	35

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos têm se apresentado como um problema em crescente intensificação em escala global, devido principalmente ao aumento populacional e do consumismo (MINELGAIË, LIObIKIENË, 2019; D'AMATO et al., 2016).

Um dos setores econômicos responsáveis por um alto volume de geração de resíduo é o alimentício, destacando-se a produção de arroz. Estima-se que mundialmente sejam produzidas cerca de 750 milhões de toneladas do grão, o que confere a produção de 160 milhões de toneladas de um resíduo composto pela casca de arroz que é destinado a aterros sanitários (MOSABERPANA, UMAR, 2019).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (CAMPOS, 2016), em escala nacional, no ano de 2015, o estado do Rio Grande do Sul foi considerado o maior produtor brasileiro de arroz, possuindo parcela de 68,8% na economia nacional o que equivale a cerca de 8,6 milhões de toneladas produzidas, gerando aproximadamente gerando 1,5 milhões de toneladas de resíduos.

Devido ao alto volume de resíduo produzido neste setor e seu baixo prestígio no mercado, a sua destinação mais comum é a combustão (CAMPOS, 2016), podendo ser aplicada para a geração termelétrica (CAPELETTO; ZANCHI DE MOURA, 2014). Neste caso, a combustão se apresente como uma alternativa viável para a diminuição do volume residual. Contudo existe um problema relacionado que é a geração de um novo resíduo, a cinza da casca de arroz (CCA), além de problemas ambientais relacionados à emissão de poluentes (QU et al., 2014).

A CCA apresenta característica semelhante à uma pozolana natural devido ao alto teor de sílica, o que pode proporcionar elevada contribuição para propriedades mecânicas e reativas de materiais, como a durabilidade, sendo de grande interesse para a construção civil e novos materiais (MOSABERPANA, UMAR, 2019; MOAYEDI et al., 2019).

Na literatura encontram-se diversos estudos de aplicação do resíduo de cinza de casca de arroz em múltiplas destinações como na produção de concreto (RATTANACHU et al., 2020; RUMMAN et al., 2020; MILLER et al., 2019), argamassas (TORRES-CARRASCO et al., 2019; FONT et al., 2019), processos remediação de solos (KIRAN,

PRASAD, 2019), adsorção (SONG et. al, 2019); constituição de geopolímeros (WEN et al., 2019), no tratamento de efluentes (HUZIR et.al, 2019).

Ainda, verifica-se na atualidade um novo segmento de estudos relacionados a valoração de resíduos provindos do setor alimentício, a casca de ovo. Estima-se que são geradas cerca de 5,92 milhões de toneladas deste resíduo ao ano, em escala global (OLIVEIRA, 2009). Nota-se na literatura uma linha de grande potencial de aplicação do resíduo de casca de ovo como fonte de cálcio para diferentes aplicações geotécnicas e da construção civil (ZAMAN et al., 2018; FERRAZ et al., 2018; JAMES et al., 2020). Além disso, Consoli et al. (2020) observaram que a cal de casca de ovo se apresenta como um excelente material para estabilização de solos unido a uma fonte pozolânica. Isso se deve às características da cal produzida, que apresenta cerca de 92,02 % de óxido de cálcio (CaO) em sua composição (BENSAIFI, 2019). Esse valor de CaO corresponde a um aumento de 20,61% de CaO disponível quando comparado com a cal virgem comercial (SOARES, 2007).

Apesar destes estudos explorarem à aplicação isolada de CCA e cal de casca de ovo para o desenvolvimento de novos materiais. Verifica-se à inexistência de estudos com o uso conjunto destes dois materiais em mistura para melhoria do comportamento mecânico e reativo de solos residuais argilosos compactados. Essas misturas podem ser aplicadas a barreiras de impermeabilização de aterros, por exemplo, e sujeitas à contato com contaminantes ácidos oriundos da disposição de resíduos ou rejeitos. Estes podem ter seu comportamento afetado devido à degradação em sua microestrutura e permitir a migração de contaminantes para o subsolo (SOARES e TRINDADE, 2003; KNOP, 2007; JESUS et al., 2008). Neste sentido, pretende-se neste estudo explorar esta lacuna existente na literatura.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o comportamento mecânico e reativo de misturas compactadas de solo argiloso residual de basalto com ligante alternativo de cinza de casca de arroz e cal de casca de ovo, quando sujeitas à ataque ácido.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o resíduo de cinza de casca de arroz.

- Avaliar e otimizar o comportamento reativo e as modificações químicas e físicas das misturas, em condição não estruturada perante o ataque ácido.
- Estudar o comportamento mecânico e reativo das misturas em condição estruturada.
- Realizar a caracterização química, mineralógica e de desempenho ambiental da mistura de melhor comportamento reativo e físico-mecânico.
- Comparar o desempenho da cal de casca de ovo com cal hidratada dolomítica convencional.

3. METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

No presente trabalho foram estudados quatro materiais distintos, sendo eles a cinza de casca de arroz (CCA), cal de casca de ovo (CCO), cal comercial (CC) e solo residual argiloso de basalto. O resíduo é proveniente de uma termoelétrica do interior do Estado do Rio Grande do Sul. A CCA foi utilizada sem o processo de moagem e peneiramento, de forma a potencializar a viabilidade de ampliação de escala da pesquisa. O mesmo procedimento foi adotado para ambas as cales.

A cal de casca de ovo hidratada apresenta 72,90% de óxido de cálcio em sua composição, conforme caracterização realizada por Consoli et al. (2020). O material apresenta alto teor de perda ao fogo (25,14%) e baixos teores óxidos de sílica (0,31%), alumínio (0,36%), ferro (0,13%) e magnésio (1,17%). A CCO hidratada é constituída também por minerais na forma de portlandita (Ca(OH)_2), calcita (CaCO_3) e peróxido de magnésio (MgO_2) (CONSOLI et al., 2020).

A produção da CCO foi realizada de acordo com a metodologia descrita por Ngoya, Aransiola e Oyekola (2017). Para isto, primeiramente as cascas foram lavadas com água destilada e submetidas a um processo de secagem em estufa a uma temperatura de 105°C por um período de 24 horas, posteriormente elas foram moídas em moinho de facas e calcinadas a uma temperatura de 1200°C por um período de 6 hora. Para fins de comparação ainda será utilizada uma cal comercial dolomítica CH III, com 43,56% de óxido de cálcio.

O solo residual de basalto utilizado foi coletado na área experimental do Campus Erechim da Universidade Federal da Fronteira Sul, sendo classificado como um Latossolo Vermelho aluminoférrico, apresentando 38,26 % de argila, 12,83% de silte e 47,33% de areia fina em sua composição (BALDISSARELLI et al., 2019). A classificação geotécnica do solo de acordo com a classificação unificada (SUCS) é MH, portanto o solo residual em estudo possui propriedades de alta plasticidade e finura (SACHETTI, ROJAS, HEINECK, 2014).

3.1.1 Caracterização dos Materiais

O resíduo de cinza de casca de arroz foi coletado na termelétrica, descrita no item anterior, e quarteado de acordo com a norma NBR 10007 (ABNT, 2004). Os parâmetros de teor umidade, matéria orgânica e pH foram determinados.

A caracterização física do material se deu por meio da realização de ensaio de massa específica da amostra, seguindo a D 854- 14 (ASTM, 2014), realizada no Laboratório de Geologia, Geomorfologia, Física e Química dos Solos, da UFFS - Campus Erechim. A determinação da área superficial específica da CCA foi feita pela análise de isotermas Brunauer, Emmett e Teller - BET, utilizando-se nitrogênio, realizada no Instituto de Pesquisas Ambientais Tecnológicas – IPAT.

O tamanho das partículas que constituem a cinza, bem como, a distribuição das mesmas, foi caracterizado através da análise de granulometria a laser e por peneiramento, realizada no Instituto de Pesquisas Ambientais Tecnológicas – IPAT, utilizando-se o equipamento de difração de raios laser e analisador de partículas modelo Cilas - 1064.

A CCA ainda foi caracterizada quimicamente por meio de análise de Espectrofotometria de Fluorescência de Raios-X (FRX), utilizando um espectrômetro de fluorescência de raio-X da marca Malvern Panalytical®, modelo Zetium com calibração do tipo STD-1 (*Standardless*). As amostras foram prensadas para a análise, realizada com exceções de padrões de elementos químicos entre o flúor e urânio. A quantificação do teor de matéria orgânica existente no resíduo foi realizada por meio de determinação quali-quantitativa da perda ao fogo do material (PF). As condições de queima foram de temperatura de 1020° C por 2 horas, com detecção de 0,1% e normalização a 100%.

A composição mineralógica da cinza de casca de arroz foi analisado por meio de análise de Difração de Raios-X (DRX) pelo método do pó. A análise foi realizada

utilizando-se tubo de cobre com parâmetros de tensão de 45-40 kV/mA, variação angular de 2-70 graus, com passo de 0,02° a cada 300 segundos, em recipiente de pulverização planetário de aço-cromo seco. Posteriormente a identificação de fases cristalinas e amorfas se deu com o auxílio do *software X'Pert High Score®*, com o uso do banco de dados PDF-2.

A pozolanicidade da CCA foi avaliada de forma qualitativa, segundo o teste químico de Fratini, de acordo com a norma europeia NP EN 196-5 (1996). O resíduo de CCA ainda foi caracterizado quanto a lixiviação e solubilização de contaminantes, por meio de análises de classificação ambiental segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004a), NBR 10005 (ABNT, 2004b) e NBR 10006 (ABNT, 2004c), respectivamente. Os extratos tiveram sua composição química analisada em equipamento de Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma (ICP), da marca Shimadzu, posteriormente as concentrações de metais foram comparadas com os limites impostos no anexo F para o lixiviado e anexo G para solubilizado, ambos presentes na NBR 10004 (ABNT, 2004a).

O solo em estudo foi caracterizado quanto a sua composição granulométrica, segundo a NBR 7181 (ABNT, 2016), assim como para o ensaio de massa específica dos grãos descrito D 854 - 14 (ASTM, 2014).

3.2 COMPORTAMENTO REATIVO DAS MISTURAS EM CONDIÇÃO NÃO-ESTRUTURADA

A determinação dos teores de cinza e cal a serem incorporados no solo foi realizada por meio de um planejamento experimental fatorial compósito central, com adição de pontos axiais para investigação de não-linearidade do comportamento, se necessário. As variáveis de resposta, controle e ruído do mesmo estão relacionadas na Tabela 1.

Tabela 1: Variáveis de resposta, controle e ruído pertencentes ao estudo do comportamento reativo.

Resposta	Controle	Ruído
Variação de pH da solução (Reatividade)	pH inicial da solução.	Contaminação da água destilada.
	Teor de Cal	Contaminação nas vidrarias utilizadas.
	Teor de CCA	Contaminação no reagente utilizado.

Fonte: Elaborado pela Autora.

Os níveis das variáveis de controle estudadas do planejamento experimental estão demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2: Variáveis de controle utilizadas no planejamento experimental da avaliação do comportamento reativo.

Variáveis de Controle	Níveis	Variação
pH inicial da solução	2	2 e 6
Teor de Cinza de Casca de Arroz	2	2% e 40%
Teor de Cal	2	2% e 10%

Fonte: Elaborado pela Autora.

A faixa de pH foi adotada devido ao fato de que as alterações no solo sob efeito de ataques ácidos inorgânicos geralmente ocorrem no intervalo de pH 3 a 6 (TIMBOLA, FERRAZZO, KORF, 2020). Contudo, para abordar eventos de acidez elevada, visando identificar o comportamento dos materiais diante o mesmo, o extremo de pH 2 foi avaliado.

O programa experimental foi elaborado com o auxílio do software Minitab 15® para os ensaios de batelada, conforme a Tabela 3. A primeira etapa refere-se às combinações fatoriais com adição de pontos centrais e a segunda etapa com adição de pontos axiais.

Tabela 3: Planejamento experimental dos ensaios de comportamento reativo.

1ª Etapa					
Ordem de Execução	Tipo de Ponto (*)	pH	% CC	% CCA	
1	1	6	10	40	
2	1	6	2	2	
3	1	6	10	2	
4	1	2	2	40	
5	1	2	2	2	
6	1	2	10	2	
7	0	4	6	21	
8	0	4	6	21	
9	1	2	10	40	
10	0	4	6	21	
11	1	6	2	40	
12	0	4	6	21	
2ª Etapa					
13	-1	6	6	21	
14	-1	4	6	40	
15	-1	4	6	2	

16	-1	4	10	21
17	-1	4	2	21
18	0	4	6	21
19	0	4	6	21
20	-1	2	6	21

(*) Ponto fatorial (1), ponto central (0) e ponto axial (-1).

Fonte: Elaborado pela Autora.

A execução do planejamento baseou-se na metodologia de batelada, de acordo com a norma D 4646-03 (ASTM, 2008). A relação de massa/solução utilizada em cada ponto experimental foi de 1:20.

As amostras foram submetidas a agitação em mesa agitadora orbital, sob 150 rpm, em temperatura constante de aproximadamente 25°C, por um período de 24 h, de forma a simular o ataque ácido às misturas. A variável de resposta (reatividade) foi calculada através da variação do pH inicial e após contato com a solução ácida.

3.3 COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO E REATIVO DAS MISTURAS EM CONDIÇÃO ESTRUTURADA

3.3.1 Determinação dos mínimo de cal utilizado na mistura (ICL)

O teor de cinza adotado foi de 30% em relação à massa de solo, de forma a maximizar o uso do resíduo, com base nos resultados do planejamento executado dos ensaios de avaliação do comportamento reativo.

Dessa forma realizou-se o ensaio para determinação do teor de cal mínimo para que ocorram as reações com a quantidade de cinza utilizada. O método ICL – *Initial Consumption of Lime* permite avaliar a relação de incremento de cal até a estabilização do pH da solução composta por solo, CCA e água destilada (SALDANHA, 2014).

3.3.2 Caracterização e compactação das misturas.

A distribuição granulométrica de partículas das misturas e do solo foi realizada por meio de ensaios de granulometria a laser e por sedimentação, NBR 7181 (ABNT, 2016), respectivamente.

Os ensaios de compactação foram realizados para duas misturas e uma amostra de solo sem incremento de cinza e cal. A Mistura 1 foi composta por solo, CCA (30%) e CCO (6 %). O mesmo foi realizado para a Mistura 2, contudo a cal de casca de ovo foi substituída por cal comercial.

As amostras foram preparadas segundo a NBR 6457 (ABNT, 1986) para execução do ensaio de compactação, que se deu de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 1986), adotando a energia de Proctor normal. As amostras foram secas em estufa por um período de 24 horas a 105°C, e posteriormente o ensaio foi realizado (Figura 1).

Figura 1: Ensaio de Compactação.



Fonte: Acervo da Autora.

Com base nos resultados foram plotadas curvas relacionando peso específico seco (kN/m^3) por teor de umidade (%), para determinação do peso específico aparente seco máximo e teor de umidade ótima de cada mistura.

3.3.3 Resistência à compressão simples das misturas (RCS).

Considerando o teor de umidade ótima e peso específico seco máximo das misturas compactadas, foram moldados os corpos de prova, imprimindo a energia de compactação normal, conforme as combinações estipuladas no planejamento experimental.

O comportamento mecânico das misturas 1 e 2 foi avaliado por meio de ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS). A moldagem dos corpos de prova para a realização do ensaio se deu diretamente nos cilindros de compactação com 10 cm de diâmetro. Os corpos de prova foram rompidos em prensa hidráulica, conforme a NBR 5739 (ABNT, 1994) após o tempo de cura, conforme a Figura 2. Os tempos de cura

estudados foram de 7, 14 e 28 dias, sendo que o processo ocorreu em câmara úmida com temperatura constante de aproximadamente 23°C.

Figura 2: Ensaio de RCS.



Fonte: Acervo da Autora.

Os corpos de provas submetidos ao ensaio de RCS foram moldados sob as condições apresentadas com peso específico seco máximo e teor de umidade ótimo sendo eles em torno de 12,5 KN/m³ e 36,1% para a mistura contendo cal dolomítica e 12,1 KN/m³ e 39,1% para a mistura com cal de casca de ovo.

3.3.4 Caracterização química, mineralógica e ambiental da mistura de melhor desempenho mecânico.

A mistura 1, composta por solo, CCA (30%) e CCO (6 %), foi submetida à caracterização química, mineralógica e microestrutural, após submetida ruptura com 28 dias de cura. A escolha da amostra para caracterização se deu pelos melhores resultados de comportamento mecânico.

As concentrações de elementos químicos e a composição mineralógica das misturas foram determinadas pelas técnicas de FRX e DRX respectivamente, conforme especificações supracitadas na seção 3.1.1.

O desempenho ambiental da mistura foi avaliado por meio da análise do contaminante ácido (solução de ácido sulfúrico, pH 4) após contato com a mistura em ensaio de batelada, de acordo com uma adaptação da norma D 4646-03 (ASTM, 2008). Após 24 h de ensaio, a amostra foi filtrada e a composição química do extrato foi analisada em equipamento de Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma (ICP), e posteriormente comparada com a resolução CONAMA n°460 (BRASIL, 2013), que dispõe sobre os limites e padrões para a qualidade do solo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA FÍSICA, QUÍMICA, MINERALÓGICA E MICROESTRUTURAL DA CCA.

A Tabela 4 apresenta parâmetros de composição física e propriedades da CCA, pode-se observar que o resíduo é composto por baixa umidade e matéria orgânica e pH alcalino.

Tabela 4: Síntese de caracterização físico química da CCA.

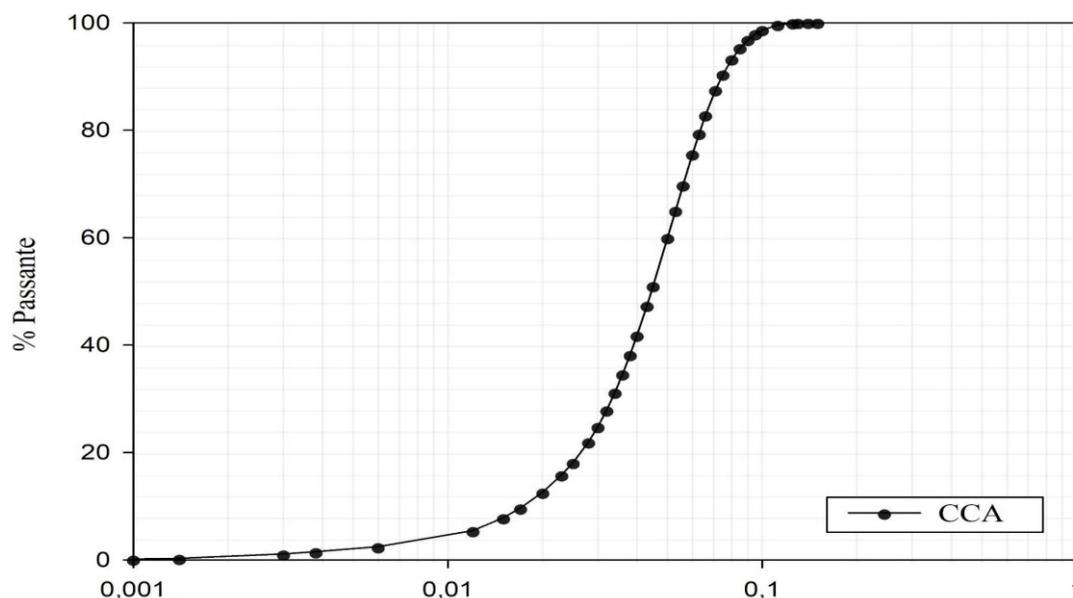
Propriedade	Valores
Teor de matéria orgânica (%)	7,14
pH	9,50
Teor de umidade (%)	< 1
Massa específica (g/cm ³)	2,17
Área superficial específica (m ² /g)	11,02

Fonte: Elaborado pela Autora.

O resíduo de cinza de casca de arroz apresenta baixa massa específica (Tabela 4) quando comparada ao solo de estudo (2,58 g/cm³). Resultado semelhante ao comportamento da CCA estudado por Kumar e Gupta (2016), com peso específico de 1,98 g/cm³. A incorporação da CCA no solo confere na diminuição de sua densidade, como observado por Qu *et al.* (2014), contudo, com base nos seus resultados nota-se que a cinza de casca de arroz possui capacidade de aumento na qualidade, nos quesitos de estabilidade e resistência.

A composição granulométrica da CCA está apresentada no Figura 3. Nota-se que o material possui característica granulométrica com diâmetro médio de 45 µm, com distribuição de granulométrica de partículas uniforme.

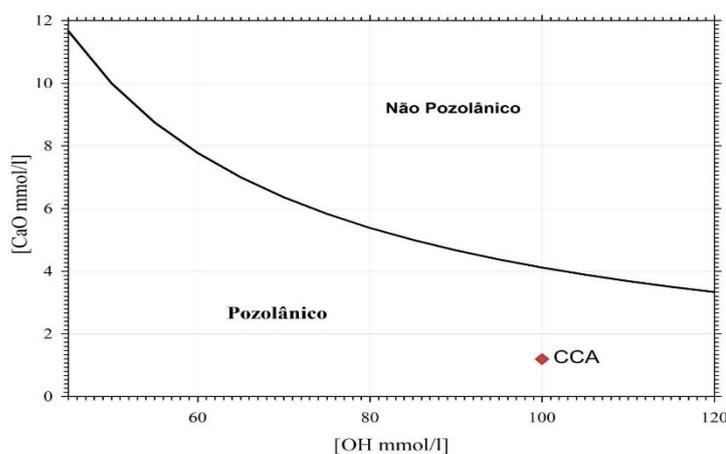
Figura 3: Curva de distribuição granulométrica da CCA.



Fonte: Elaborado pela Autora.

A Figura 4 apresenta o ensaio de pozolanicidade para a CCA. Observa-se que a amostra é um material pozolânico. Esse fato se mostra em concordância com a literatura, onde a CCA é aplicada como material pozolânico para adição em misturas cimentícias (MILLER, CUNNINGHAM, HARVEY, 2019). Entretanto, devido a cristalinidade do resíduo observada em sua composição mineralógica (Figura 5), a CCA se enquadra como uma pozolana de pouca reatividade. Segundo Pouey (2006), esses materiais apresentam altos teores de sílica cristalina, podendo se utilizar a moagem como ferramenta para aumento da reatividade .

Figura 4: Ensaio de Fratini da CCA.



Fonte: Elaborado pela Autora.

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2012), os materiais pozolânicos apresentam composição química com altos teores de sílica ou ainda alumínio, se enquadrando em pozolanas sílico-aluminosas, sendo que estes em contato com água podem reagir para a formação de compostos cimentícios.

Esses materiais podem ser enquadrados em três classes distintas, a Tabela 5 apresenta alguns requisitos e propriedades da CCA. A CCA em estudo enquadra-se como uma pozolana de classe N.

Tabela 5: Classes de pozolanas, NBR 12653 (ABNT, 2012).

Propriedade	(%)			
	Classe N	Classe C	Classe E	CCA
Óxidos de Sílica+Alumínio+Ferro.	≥ 70	≥ 70	≥ 50	88,30
Óxido de Enxofre	≤ 4	≤ 5	≤ 5	0,22
Teor de Umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	<1
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	6,41

Fonte: Adaptado da NBR 12.653 (ABNT, 2012).

A CCA, conforme análise de FRX apresentada na Tabela 6, é constituída por altos teores de óxido de sílica (87,6%). Ainda, em menores teores, a CCA apresenta em sua constituição, óxidos de cálcio (0,88%), magnésio (0,33%), potássio (2,87%) e ferro (0,61%), os quais são importantes para utilização do resíduo como aditivo em materiais pozolânicos e que podem variar dependendo do processo de combustão (MOAYEDI et al., 2019).

Outros estudos apontam o mesmo comportamento para o resíduo de cinza de casca de arroz, com teores de óxido de sílica superiores a 80% e outros óxidos em menores concentrações (NAZARI, BAGHERI, RIAHI, 2011; KUSBIANTORO et al., 2012; KUMAR, GUPTA, 2016; MOSABERPANAH, UMAR, 2019).

Tabela 6: Composição química da CCA

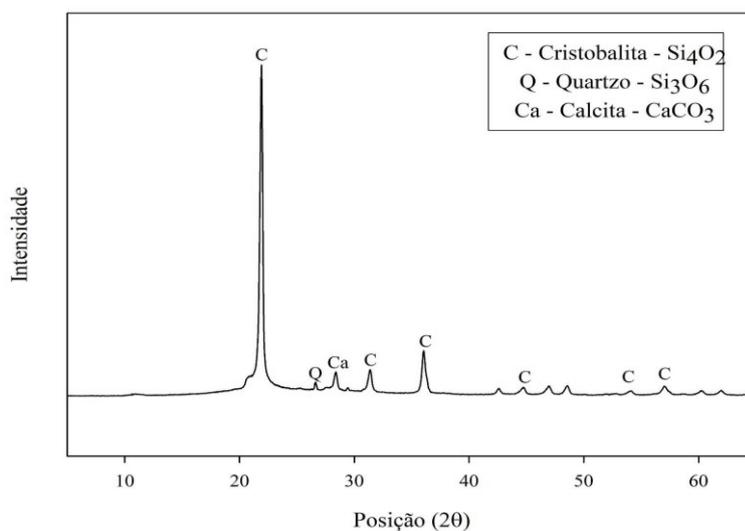
Óxidos	Teor (%)
MgO	0,33
Al_2O_3	0,09
SiO_2	87,6
P_2O_5	0,48
SO_3	0,22
Cl	0,09

K_2O	2,87
CaO	0,88
TiO_2	0,01
MnO	0,36
Fe_2O_3	0,61
Outros	0,05
PF	6,41

Fonte: Elaborado pela Autora.

A Figura 5 apresenta a composição mineralógica da CCA. Nota-se que em concordância com a composição química apresentada na Tabela 6, há predominância de picos cristalinos de sílica na forma mineral de cristobalita (Si_4O_2) e quartzo (Si_3O_6). A CCA em estudo, portanto, é um resíduo cristalino, apresentando difratograma com picos cristalinos bem definidos, semelhante a outros estudos (BAHRAMI et al., 2015, MARTINS, 2018).

Figura 5: Composição Mineralógica da CCA.



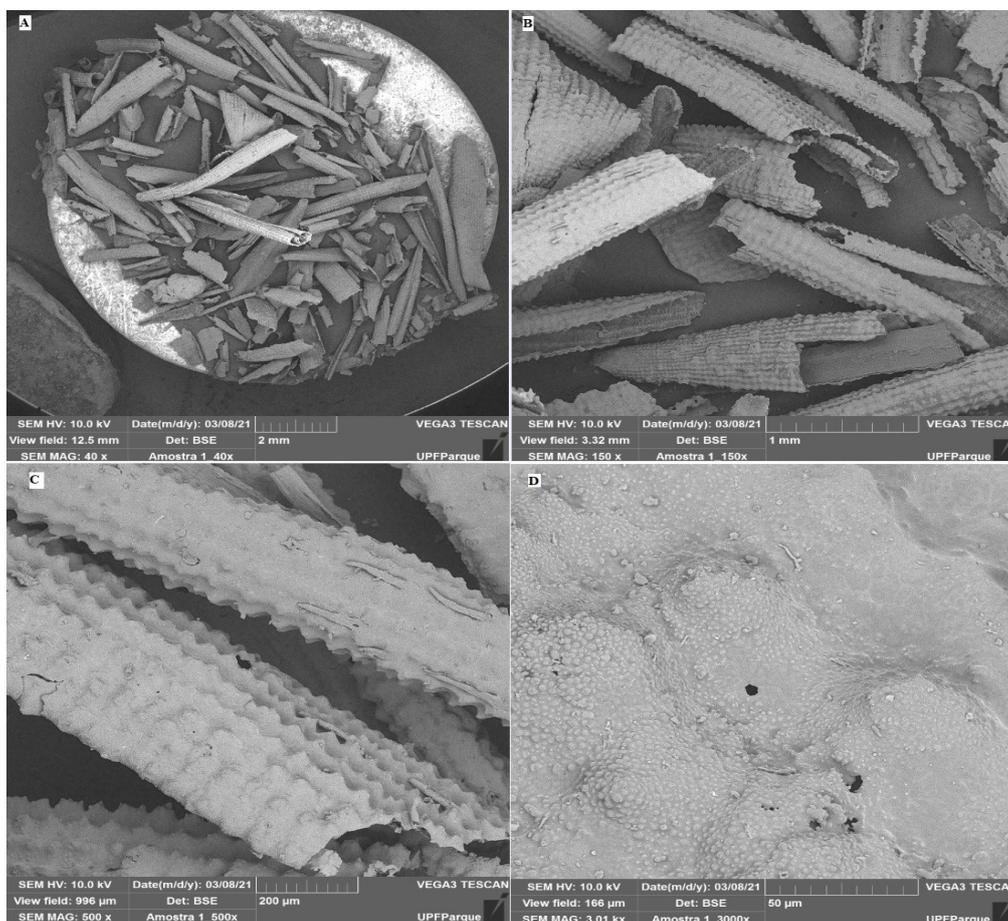
Fonte: Elaborado pela Autora.

A presença de sílica amorfa nas pozolanas apresenta influência direta na atividade pozolânica e reatividade das mesmas em reações estruturais. Nesse sentido, a moagem se apresenta como uma alternativa para o aumento da fase amorfa em resíduos com sílica ativa cristalina, como a CCA em estudo (MARTINS, 2018). Essa característica também está associada a baixa área de superfície apresentada pelo resíduo em estudo (Tabela 4), visto que materiais amorfos tendem a apresentar maiores áreas de superfície, o que

também se intensifica com a moagem (MARTINS, 2018). A cristalinidade da CCA também pode estar relacionada à presença de impurezas, como o potássio, presente na amostra (Tabela 6), visto que esse elemento é responsável pela potencialização da conversão de sílica amorfa em cristalina na forma de cristobalita como observado por Pouey (2006). Outro fator associado pode ser a temperatura de queima para produção do resíduo, visto que a CCA é oriunda de processos de altas temperaturas e sabe-se que a sílica amorfa é obtida em condições de temperaturas moderadas (até 700°C) e baixos períodos de queima (POUEY, 2006).

O comportamento geomorfológico do resíduo de cinza de casca de arroz, por meio de análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), está ilustrado na Figura 6. Além disso, verifica-se a presença de partículas no formato de espiga de milho (Figura 6B), relacionado à organização de moléculas do resíduo na estrutura da espinha dorsal, como observado por Bahrami et al. (2015b).

Figura 6: Morfologia da CCA com ampliação de 40x (A), 150x (B), 500x (C) e 3000x (D).



Fonte: Elaborado pela Autora.

De acordo com os resultados de análise de lixiviação (Tabela 7), a CCA não apresenta toxicidade visto que, nenhum elemento químico do extrato lixiviado ultrapassou os limites impostos pela legislação (ABNT, 2004a). Entretanto, o resíduo apresentou solubilização dos compostos manganês, fluoreto e fenol em concentrações superiores ao indicado no anexo G da NBR 10004 (ABNT, 2004a), como apresentado na Tabela 8. Diante dessas verificações, a CCA classifica-se como um resíduo não perigoso e não inerte, pertencente a classe II-A (ABNT, 2004a).

Tabela 7: Composição química do extrato lixiviado e limite de especificação técnica

Elemento	Extrato lixiviado (mg/L)	Limite (mg/L) (ABNT, 2004a)
As	0,00	1,00
Ag	0,00	5,00
Ba	0,55	70,00
Cd	0,00	0,50
Cr	0,00	5,00
Hg	0,00	0,10
Pb	0,00	1,00
Se	0,00	1,00
Fluoreto	1,84	150,00

Fonte: Elaborado pela Autora.

Tabela 8: Composição físico-química do extrato solubilizado e limite de especificação técnica

Elemento	Extrato solubilizado (mg/L)	Limite (mg/L) (ABNT, 2004a)
Ag	0,00	0,05
Al	0,13	0,20
Ba	0,00	0,70
Cd	0,000	0,005
Cr	0,00	0,05
Cu	0,00	2,00
Fe	<0,05	0,30
Hg	0,000	0,001
Mn	1,51	0,10
Pb	0,00	0,01

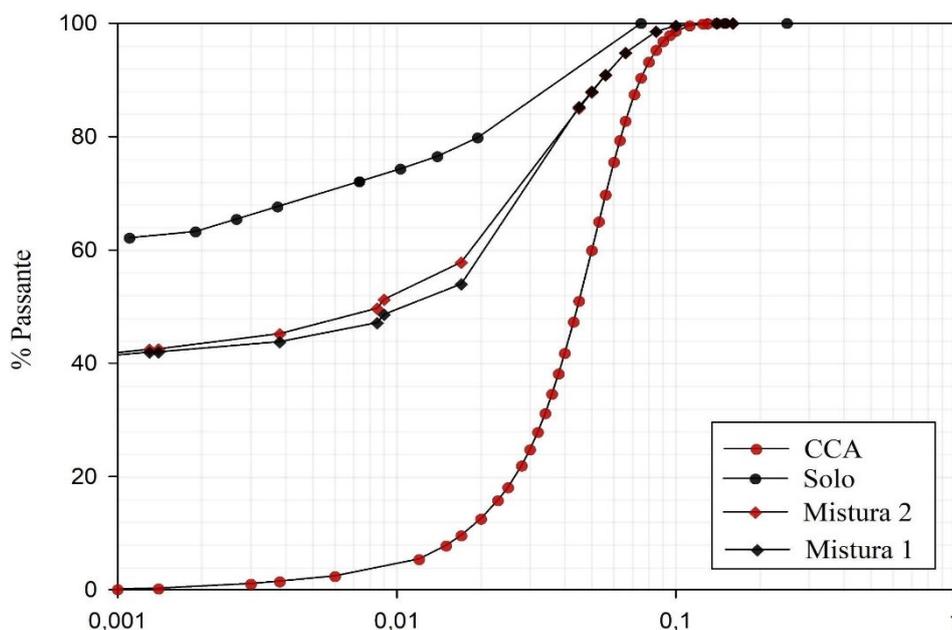
Se	0,00	0,01
Zn	0,06	5,00
As	0,00	0,01
Na	9,65	200
Surfactante	<0,20	0,50
Nitrato	2,16	10
Fluoreto	1,54	1,50
Cloreto	95,55	250
Fenol	<0,04	0,01

Fonte: Elaborado pela Autora.

4.2 CARACTERIZAÇÃO E COMPORTAMENTO DAS MISTURAS

A distribuição e tamanho de partículas das Misturas 1 e 2 estão relacionadas na Figura 7, assim como a granulometria do solo e CCA que as compõem. Pode-se observar que o solo em estudo é constituído em grande parte por partículas de silte e argila, se enquadrando como um material mais fino, em contrapartida a CCA se enquadra semelhante à um material arenoso. Nesse sentido, as misturas dos dois materiais com cal possibilitaram a formação de um solo com partículas bem distribuídas de silte, argila e areia, com comportamento semelhante para a CC e CCO estudadas.

Figura 7: Distribuição granulométrica das misturas.

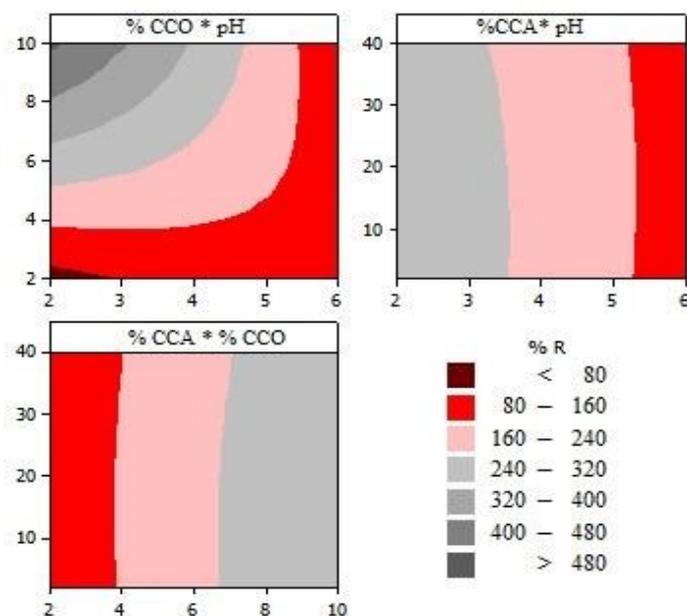


Fonte: Elaborado pela Autora.

A reatividade das misturas foi avaliada para os teores de 6% e 30 % de cal e CCA respectivamente. A cal comercial foi estudada para fins de comparação com os resultados da cal residual de casca de ovo. As Figuras 8 e 9 apresentam, por meio de superfícies de contorno obtidas após análise estatística e modelagem do comportamento das variáveis de resposta, as relações dos fatores e variáveis de resposta combinados. Nota-se que as melhores reatividades são obtidas para menores teores de cinza, maiores teores de cal e uma faixa de pH mais ácida. A adição da cal no solo é responsável por aumento da alcalinidade das misturas e estabilização do mesmo, por meio da combinação e troca de íons de cálcio (FERREIRA, FALEIRO, FREIRE, 2005), o que explica a relação diretamente proporcional entre o aumento do teor de adição de cal e a elevação do pH.

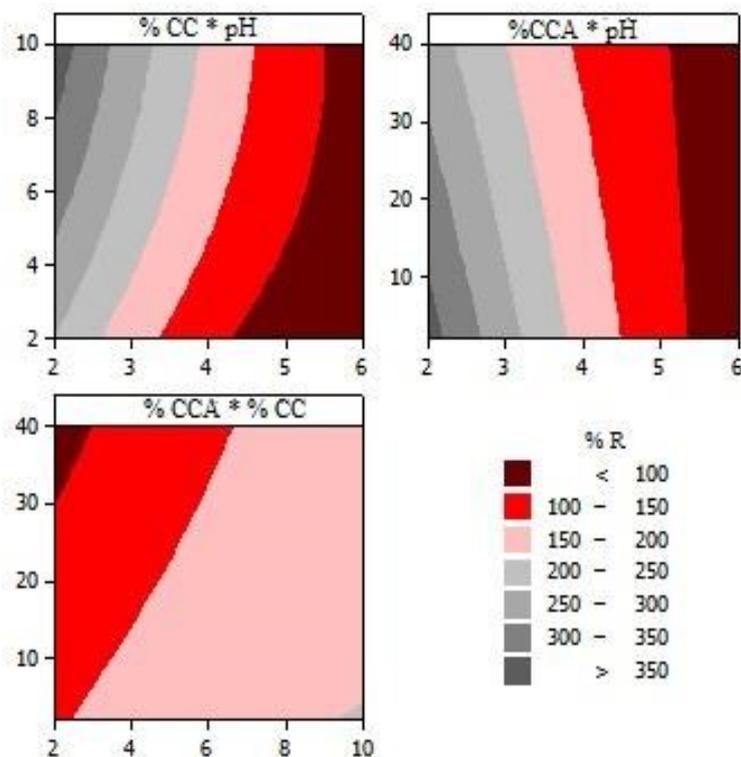
A combinação de teores de 4 a 8 % de cal comercial com maiores teores de cinza, chegando a 40%, apresentam reatividades de 150 a 200%. Esses resultados, quando aplicados a lixiviados com uma faixa de pH de 3,5 a 4,5 correspondem a elevação do pH para 5 a 9 respectivamente. Segundo a resolução Conama n°430 (BRASIL,2011), efluentes com pH na faixa de 5 a 9 podem ser lançados a corpos d'água sem riscos. Diante disso, o contato do contaminante ácido com a mistura de solo resulta na diminuição de passivos ambientais oriundos da percolação de lixiviados de alta acidez para águas subterrâneas e superficiais.

Figura 8: Superfície de contorno do planejamento experimental da Mistura 1.



Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 9: Superfície de contorno do planejamento experimental da Mistura 2.

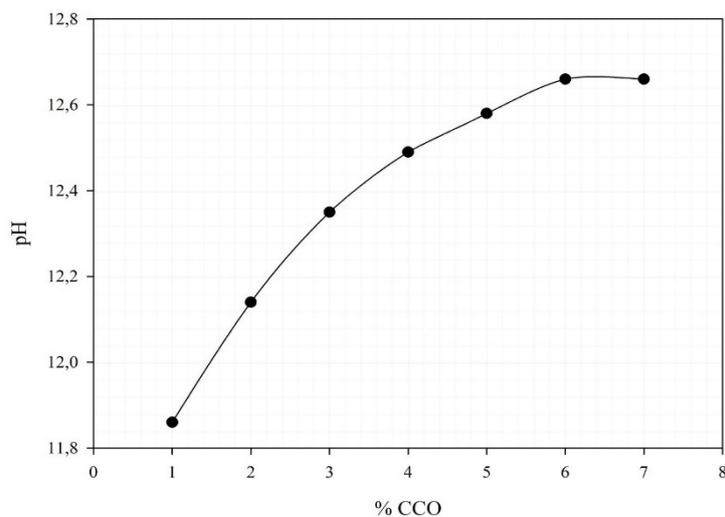


Fonte: Elaborado pela Autora.

Com base nos resultados, evidencia-se que a CCO apresentou melhor capacidade de neutralização da acidez do contaminante, resultando em maior reatividade. Resultados que conferem a uma redução de uso de cal significativo pois o uso de apenas 6% de CCO correspondem a reatividades superiores as misturas com 8% de cal dolomítica. Isso pode ser explicado devido a cal de casca de ovo apresentar altas concentrações de cálcio, chegando a mais de 90% de óxido de cálcio disponível para reação (BENSAIFI *et al.*, 2019). Enquanto a cal virgem produzida a partir rochas carbonatadas apresenta menor quantidade, com cerca de 71,41% deste óxido (SOARES, 2007).

A Figura 10 demonstra a relação de teor de cal e incremento de pH para o ensaio, considerando o teor fixado em 30 % de CCA. Nota-se que o pH da mistura com incremento de CCO possui uma estabilização de pH rápida, apresentando teor mínimo de 6% de cal. Com base no ICL (Figura 10) e no teor máximo de CCA estabilizado no ensaio de pozolanicidade, as duas misturas utilizadas na pesquisa foram compostas por 30% de CCA e 6% de cal, com relação à massa de solo, sendo adotado o mesmo teor para ambas as cales para fins de comparação.

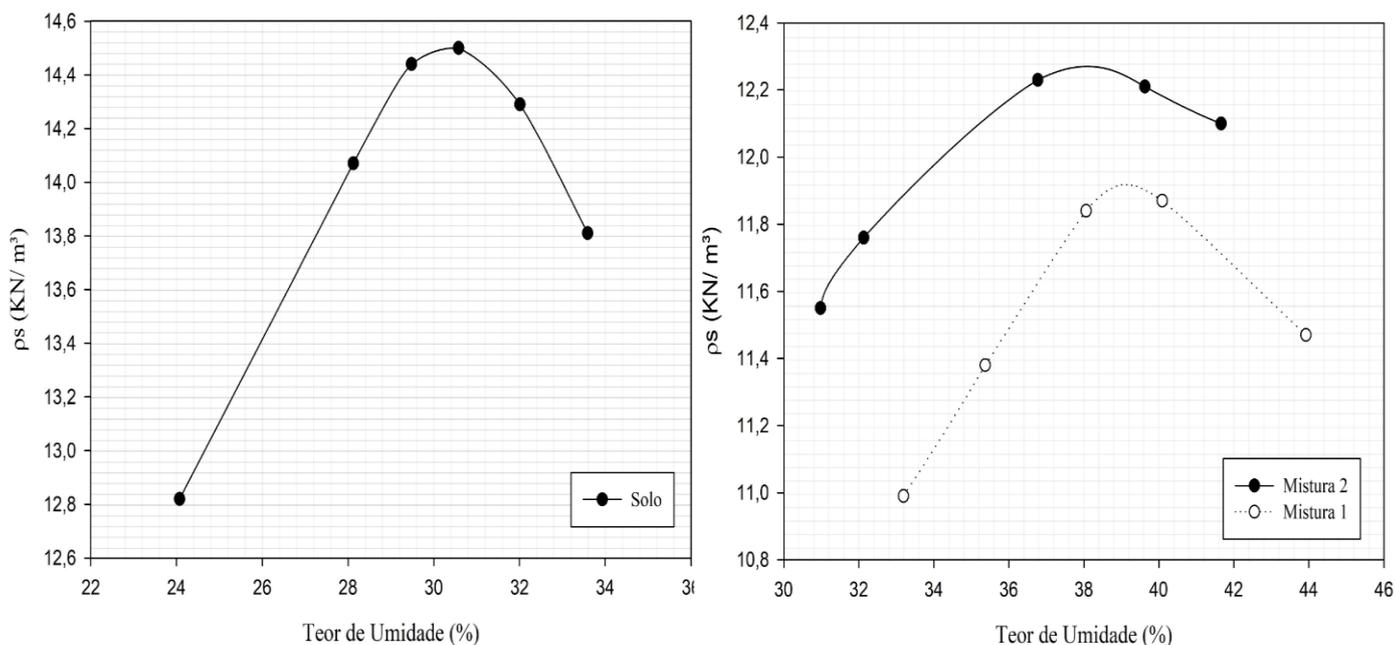
Figura 10: Ensaio de determinação do teor mínimo de CCO (ICL).



Fonte: Elaborado pela Autora.

A Figura 11 apresenta as curvas de compactação do solo e das misturas em estudo. Pode-se observar que a incorporação de CCA aumenta de forma relevante a umidade do solo, anteriormente com peso específico seco máximo de $14,5 \text{ kN/m}^3$ e teor de umidade ótima de 30%. As misturas com adição de CC e CCO se comportaram de forma semelhante, contudo as misturas com cal residual obtiveram menores densidades e maior umidade, quando comparado as misturas com adição de cal comercial.

Figura 11: Curvas de compactação da mistura 1 (CCO), mistura 2 (CC) e solo.

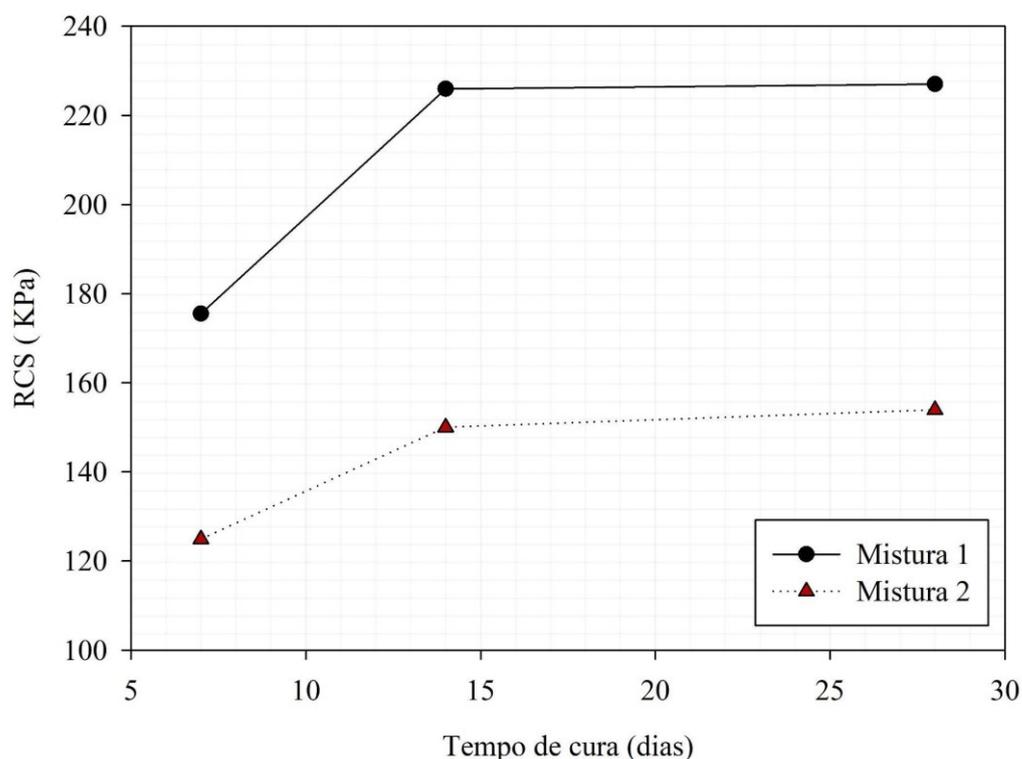


Fonte: Elaborado pela Autora.

A adição de CCA ao solo atua significativamente nos parâmetros de teor de umidade e massa específica seca, sendo muito benéfica para solos finos, pois apresenta comportamento de aumento na faixa de trabalho do solo sem compactação, diminuindo a massa específica e aumentando o teor de umidade ótimo (QU *et al.*, 2014). Além disso, como observado por Karatai *et al.* (2017), a aplicação de CCA e uma fonte de cálcio é benéfica e indicada para a estabilização de solos argilosos expansivos.

Na Figura 12, estão relacionadas as resistências à compressão simples de ambas as misturas para os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias. Pode-se observar que os melhores resultados de resistência foram obtidos para a Mistura 1. Isso se deve ao fato da COO ter apresentado maiores quantidades de óxido de cálcio (92,02%) disponíveis para as reações pozolânicas (BENSAIFI *et al.*, 2019), conferindo as melhores reações.

Figura 12: Resistência à compressão simples de 7,14 e 28 dias de cura das misturas.



Fonte: Elaborado pela Autora.

As misturas mesmo com 28 dias de cura não conferiram resistências elevadas. Entretanto os valores obtidos possibilitam a aplicação das misturas por exemplo em barreiras impermeáveis de aterros, onde a resistência mínima é de 200 kPa (LUKJANTCHUKI, 2007), o que demonstra possibilidade de aplicação para as misturas contendo CCO com 28 dias de cura (226 kPa).

As resistências observadas neste trabalho podem ser explicadas pela predominância de sílica cristalina da CCA. Melhores valores de resistência à compressão simples são obtidos para misturas de CCA com partículas finas, pois as mesmas ocupam os vazios, auxiliando a formação de corpos de prova mais densos e conseqüentemente mais resistentes (NAZARI, BAGHERI, RIAHI, 2011).

Outro fato associado aos valores de RCS obtidos é com relação à concentração de óxido de sílica presente na CCA. Nota-se que o resíduo é composto majoritariamente por sílica, o que proporciona a formação reduzida de aluminossilicatos, devido ao baixo teor de alumínio presente no material, prejudicando as reações e conseqüentemente diminuindo a resistência das misturas (NAZARI, BAGHERI, RIAHI, 2011).

A Tabela 9 apresenta os resultados do ensaio de desempenho ambiental da Mistura 1, que conferiu melhor comportamento estrutural, em contato com o contaminante ácido. Também relaciona os limites impostos pelas normativas pertinentes, sendo elas a Resolução CONAMA n°460 (BRASIL, 2013), que dispõe sobre os limites e padrões para a qualidade do solo, assim como o anexo G da NBR 10004 (ABNT, 2004b) que trata sobre a classificação de resíduos. Ainda retoma a caracterização do resíduo bruto de CCA quanto a sua solubilização de contaminantes, demonstrada anteriormente (Tabela 8).

Pode-se observar que apenas dois elementos químicos foram detectados no extrato de contaminante ácido ensaiado, sendo eles o alumínio e o sódio. Contudo a ocorrência de Na e Al foram observadas em concentrações bem menores aos limites estabelecidos pelas normativas (Tabela 9).

Tabela 9: Caracterização ambiental das misturas em contato com o contaminante ácido.

Elemento	Concentração (mg/L)	CONAMA n°460 (mg/L) (BRASIL, 2013)	Anexo G - NBR 10004 (mg/L) (ABNT, 2004b)	Extrato solubilizado CCA (mg/L)
Ag	*	0,05	0,05	*
Al	0,0200	3,50	0,200	0,132
As	*	0,01	0,01	*
Ba	*	0,70	0,70	*
Cd	*	0,005	0,005	*
Cr	*	0,05	0,05	*
Cu	*	2	2	*
Fe	*	2,45	0,3	<0,006
Hg	*	0,001	0,001	*

Mn	*	0,4	0,1	1,506
Na	1,320	-	200	9,646
Pb	*	0,01	0,01	*
Se	*	0,01	0,01	*
Zn	*	1,05	5	0,064

(*) Não detectado

Fonte: Elaborado pela autora.

Como verificado na Tabela 9, a mistura da CCA com o solo e a CCO proporcionou a redução de aproximadamente 7 vezes a concentração de alumínio e zinco das amostras, em relação ao resíduo bruto. Além disso, observa-se a adequação em relação às normativas CONAMA nº460 (BRASIL, 2013), e anexo G da NBR 10004 (ABNT, 2004b).

A adição de cal de casca de ovo no solo proporciona além da elevação do pH, como visto anteriormente, a redução da toxicidade, colaborando para a inertização da CCA na mistura. Fato também observado por Soares, Quina e Quinta-Ferreira (2015) que estudaram a incorporação de CCO em solo e observaram a imobilização de metais pesados como chumbo e zinco, sendo as condições ácidas favoráveis a retenção de Zn, como também observado no presente estudo com ataque ácido sob pH 4.

A Tabela 10 apresenta a composição química da Mistura 1, nota-se que diferentemente da CCA, a mistura é composta majoritariamente de óxido de alumínio, sílica e ferro. Observa-se uma composição química distribuída principalmente entre os óxidos de ferro, alumínio e sílica, resultado divergente ao encontrado para a CCA (Tabela 6).

Tabela 10: Composição química da Mistura 1.

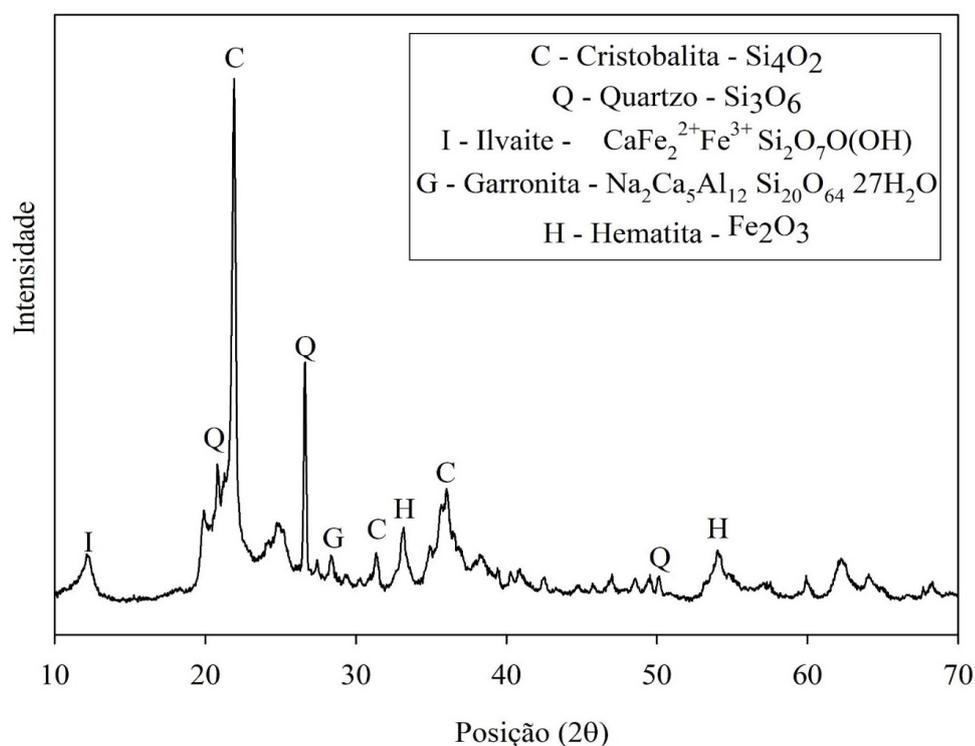
Óxidos	Mistura 1 (%)	CCA (%)
MgO	0,27	0,33
Al_2O_3	18,00	0,09
SiO_2	40,30	87,6
P_2O_5	0,20	0,48
SO_3	0,24	0,22
Cl	0,03	0,09
K_2O	0,67	2,87
CaO	3,72	0,88
TiO_2	2,95	0,01

MnO	0,22	0,36
Fe_2O_3	21,90	0,61
Outros	0,20	0,05
PF	11,30	6,41

Fonte: Elaborado pela Autora.

O comportamento mineralógico da Mistura 1 está ilustrado na Figura 13, verifica-se a existência de picos de cristobalita, como também observado na CCA (Figura 5). Assim como outros minerais, sendo eles a hematita, garronita e o ilvaite, possivelmente provenientes do solo.

Figura 13: Composição Mineralógica da Mistura 1.



Fonte: Elaborado pela Autora.

Nota-se no Figura 13 a inexistência de silicato de cálcio hidratado, indicado a sua não formação a partir da mistura com tempo de cura de 28 dias. Sabe-se que as reações pozolânicas são formadas a partir da interação química com o hidróxido de cálcio para a formação de cristais de silicato de cálcio hidratado (RAISDORFER, 2015), o que pode indicar a não ocorrência das reações nas misturas estudadas, contribuindo para as baixas resistências evidenciadas na Figura 11.

5. CONCLUSÃO

A incorporação do ligante de CCA junto a CCO ao solo residual argiloso conferiu a uma mistura satisfatória com relação ao comportamento mecânico e reativo, promovendo o encapsulamento de metais presentes na cinza de casca de arroz. Com base nos resultados pode-se concluir:

- A CCA é um resíduo cristalino, apresentando minerais como a cristobalita e quartzo, com altos teores de sílica e partículas majoritariamente arenosas, se enquadrando como uma pozolana classe N, com pouca reatividade. O material é não perigoso e não inerte, solubilizando manganês, fluoreto e fenol.
- A incorporação de até 30% de CCA no solo, unida a 6% de cal de casca de ovo representou a mistura com melhor comportamento reativo para a neutralização de contaminantes ácidos no solo, elevando o pH sem a solubilização de elementos tóxicos.
- As misturas apresentaram menor massa específica e maiores umidades quando comparadas ao solo.
- A adição de cal de casca de ovo à mistura propiciou a inertização dos compostos presentes na CCA, apresentando desempenho ambiental de acordo com as normativas aplicáveis.
- A incorporação da CCA na mistura com CCO e solo proporcionou mudanças químicas e mineralógicas, com relação ao resíduo in natura. Observou-se a ocorrência de minerais como hematita, ilvaite e garronita, provenientes do solo. Também verificou-se o desaparecimento dos picos cristalinos de calcita presente no resíduo e CCO brutos. Além disso, a composição química das misturas se mostrou mais distribuída com relação à concentração de óxidos de sílica, alumina e ferro, anteriormente composta majoritariamente por sílica.
- A cal de casca de ovo se mostra como um aglomerante mais eficiente que a cal comercial em relação à resistência mecânica e reatividade das misturas.

O presente estudo possibilitou a comprovação da viabilidade ambiental da utilização de CCA e cal para a correção de solos submetidos a ataque ácido, contudo indica-se para estudos futuros a análise de processos de moagem do resíduo para melhores resultados de resistência com o consequente aumento dos teores de fase amorfa. Ainda se propõe a avaliação de maiores tempos de cura, visto que reação pozolânica com adição

de cal é lenta. Além disso sugere-se o estudo de aplicação das misturas para utilização em barreiras impermeáveis de aterros, com avaliação da condutividade hidráulica e ensaios de percolação ácida.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira no.12653.

Materiais pozolânicos - Requisitos, 2014.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira no. 10007.

Amostragem de resíduos sólidos, 2004.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira no. 10004.

Resíduos sólidos - Classificação, 2004a.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira no. 10005.

Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, 2004b.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira no. 10006.

Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, 2004c.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira no. 6457.

Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, 1986.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira no. 7181. **Solo - Análise granulométrica**, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira no. 5739.

Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, 1994.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira no. 7182. **Solo - Ensaio de compactação**, 1986.

American Society for Testing and Materials. D4646-03. Standard Test Method for 24-h Batch-Type Measurement of Contaminant Sorption by Soils and Sediments.

Pennsylvania, 2008.

American Society for Testing and Materials. D854-14: **Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer**. Pennsylvania, 2014.

BAHRAMI, A.; PECH-CANUL, M. I.; GUTIÉRREZ, C. A., SOLTANI, N. *Effect of rice-husk ash on properties of laminated and functionally graded Al/SiC composites by one-step pressureless infiltration*. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 644, p. 256-266, 2015b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.04.194>. Acesso em: 10 de abril. 2021.

BAHRAMI, A.; PECH-CANUL, M. I.; GUTIÉRREZ, C. A., SOLTANI, N. *Wetting and reaction characteristics of crystalline and amorphous SiO₂ derived rice-husk ash and SiO₂/SiC substrates with Al–Si–Mg alloys*. **Applied Surface Science**, v. 357, p. 1104-1113, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.09.137>. Acesso em: 10 de abril. 2021.

BALDISSARELLI, D. P.; SIQUEIRA, D. P.; DERVANOSKI, A.; DE MORAIS, M.; GALON, L., KORF; E. P., & VARGAS; G. D. L. P. *Evaluating the Adsorptive Capacity of Aluminoferric Red Oxisol in Reducing the Availability of 2,4-Dichlorofenoxiacetic Acid*. **Soils and Rocks**. São Paulo, p. 301-309. 42. set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.28927/sr.423301>. Acesso em: 04 mar. 2020.

BENSAIFI, E.; BOUTELDJA, F.; NOUAOURIA, M. S.; BREUL, P. *Influence of crushed granulated blast furnace slag and calcined eggshell waste on mechanical properties of a compacted marl*. **Transportation Geotechnics**, [s.i.], v. 100244, n. 20, p. 1-9, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100244>. Acesso em: 05 mar. 2020.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº430**, de 13 de maio de 2013. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº460**, de 30 de dezembro de 2013. Altera a Resolução no 420, de 28 de dezembro de 2009, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.

CAMPOS, G. S. **Avaliação do aproveitamento energético da casca de arroz: um estudo de caso no município de Santo Antônio Da Patrulha.** 57 f. Engenharia Agroindustrial Agroquímica - Universidade Federal do Rio Grande, Santo Antônio da Patrulha, 2016.

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

CONSOLI, N. C.; CAICEDO, A. M. L.; SALDANHA, R. B.; FILHO, H. C. S.; ACOSTA, C. J. M. *Eggshell Produced Limes: Innovative Materials for Soil Stabilization.* **Journal Material Civil Engineering**, v. 32 , n. 11, 2020. Disponível em: [https://10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003418](https://10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003418). Acesso em: 29 de abril. 2021.

D'AMATO, A.; MANCINELLI, S.; ZOLI, M. *Complementarity vs substitutability in waste management behaviors.* **Ecological Economis**. v. 123, p. 84–94, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.12.005>. Acesso em: 05 mar. 2020.

FERRAZ, E.; GAMELAS, J. A. F.; COROADO, J. MONTEIRO, C.; ROCHA, F. *Eggshell waste to produce building lime: calcium oxide reactivity, industrial, environmental and economic implications.* **Materials and Structures**, v. 115, p. 1-14, 2018. Disponível em: [https://doi.org/10.1617/s11527-018-1243-7\(0123456789\(\).,-volV\)0123456789\(\).,-volV](https://doi.org/10.1617/s11527-018-1243-7(0123456789().,-volV)0123456789().,-volV). Acesso em: 24 de abril. 2021.

FERREIRA, R. C.; FALEIRO, H. T.; FREIRE, W. J. *Desempenho físico-mecânico de solo argiloso estabilizado com cal e silicato de sódio visando aplicação em construções rurais.* **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 35, n.3, p. 191-198, 2005.

FONT, A.; SORIANO, L.; DE MORAES PINHEIRO, S. M.; TASHIMA, M. M.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; PAYÁ, J. *Design and properties of 100% waste-based ternary alkali-activated mortars: Blast furnace slag, olive-stone biomass ash and rice husk ash.* **Journal of Cleaner Production**. v. 243, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118568>. Acesso em 15 mar. 2020.

HUZIR, N. M., AZIZ, M. M. A., ISMAIL, S. B., MAHMOOD, N. A. N., UMOR, N. A., & Faua'ad Syed Muhammad, S. A. *Optimization of coagulation-flocculation process for the palm oil mill effluent treatment by using rice husk ash.* **Industrial Crops**

and Products. Malásia, p. 01-09. 139. jun. 2019. 111482. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111482>. Acesso em: 02 abr. 2020.

JAMES, J.; PRIYA, K. J.; KARTHIKA, P.; KOKILA, P.; VIDYASGAR, V. *Valorisation of egg shell ash as a potential replacement for lime in stabilization of expansive soils*. **Building materials and structures**, v. 63, p. 13-20, 2020. Disponível em: <https://doi:10.5937/GRMK2003013J>. Acesso em: 19 de abril. 2021.

JESUS, S. C., ALVES, G. M., GUIMARÃES, L., AZEVEDO, I. *Determinação de parâmetros de transporte de metais em solo residual compactado considerando calagem*. In: **Congresso Brasileiro De Geotecnia Ambiental**, 6., 2008, Recife. Anais. Recife: ABMS, 2008.

KATARAI, T. R.; KALULI, J. W.; KABUBO, C.; THIONG, G. *Soil Stabilization Using Rice Husk Ash and Natural Lime as an Alternative to Cutting and Filling in Road Construction*. **Journal Construction Engineering Management**, v. 143, n. 5, 2017.

KIRAN, B. R.; PRASAD, M. N. V. *Biochar and rice husk ash assisted phytoremediation potentials of Ricinus communis L. for lead-spiked soils*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. v. 183, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109574>. Acesso em 01 mar. 2020.

KNOP, A. **Estudo do comportamento de lyners atacados por ácido sulfúrico**. 2007. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

KUMAR, A.; GUPTA, D. *Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash-soil mixtures*. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 44, p. 466-474, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.07.010>. Acesso em: 24 de abril. 2021.

KUSBIANTORO, A.; NURUDDIN M. F.; SHAFIQ, N. QAZI, S. A. *The effect of microwave incinerated rice husk ash on the compressive and bond strength of fly ash based geopolymer concrete*. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 695-703, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.064>. Acesso em: 30 de abril. 2021.

LUKIANANTCHUKI, J. A. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante.** 150 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo, 2007.

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.

MILLER, S. A.; CUNNINGHAM, P. R.; HARVEY; J. T. *Rice-based ash in concrete: A review of past work and potential environmental sustainability.* **Resources Conservation and Recycling**, p. 416–430, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.041>. Acesso em 05 mar. 2020.

MINELGAITĖ, A.; LIOBIKIENĖ, G. *Waste problem in European Union and its influence on waste management behaviours.* **Science of the Total Environment**, v.667, p. 86–93, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.313>. Acesso em: 27 fev. 2020.

MOAYEDI, H., AGHEL, B., ABDULLAHI, M. M., NGUYEN, H., SAFUAN A RASHID, A. *Applications of rice husk ash as green and sustainable biomass.* **Journal of Cleaner Production**, 237, 2019.

MOSABERPANAH, M. A., & UMAR, S. A. *Utilizing Rice Husk Ash as Supplement to Cementitious Materials on Performance of Ultra High Performance Concrete: – A review.* **Materials Today Sustainability**, p. 7–8, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100030>. Acesso em: 01 mar. 2020.

NAZARI, A.; BAGHERI, A.; RIAHI, S. *Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash.* **Materials Science and Engineering A**, v.528, p. 7395-7401, 2011. Disponível em: <http://doi:10.1016/j.msea.2011.06.027>. Acesso em: 30 de abril. 2021.

NGOYA, Tshizanga; ARANSIOLA, Elizabeth Funmilayo; OYEKOLA, *Oluwaseun.* *Optimisation of Biodiesel Production from Waste Vegetable Oil and Eggshell Ash.* **South**

African Journal of Chemical Engineering, [s.i.], v. 23, n. 1, p. 1-156, jun. 2017.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2017.05.003>. Acesso em: 01 abr. 2020.

NP EN 196-5:1996 — **Métodos de ensaio de cimentos**. Parte 5 — Ensaio de pozolanicidade dos cimentos pozolânicos, 1996.

OLIVEIRA, F. J. S.; JUCÁ, J. F. T. *Acúmulo de metais pesados e capacidade de impermeabilização do solo imediatamente abaixo de uma célula de um aterro de resíduos sólidos*. **Engenharia sanitária e ambiental**, v.9, n.3, p. 211-217, jul/set. 2004.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas á produção de cimento composto e /ou pozolânico**. 335 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS, Porto Alegre, 2006.

QU, J.; LI, B.; WEI, T.; LI, C.; LIU, B. *Effects of rice-husk ash on soil consistency and compactibility*. **Catena**, v. 122, p. 54-60, 2014. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.05.016>. Acesso em: 20 abril 2021.

RAISDORFER, J. W. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos**. 151 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná- UFPR, Curitiba, 2015.

RATTANACHU, P.; TOOLKASIKORN, P.; TANGCHIRAPAT, W.;

CHINDAPRASIRT, P.; JATURAPITAKKUL, C. *Performance of Recycled Aggregate Concrete with Rice Husk Ash as Cement Binder*. **Cement and Concrete Composites**,

2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103533>. Acesso em: 04 mar. 2020.

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.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101303>. Acesso em: 03 mar. 2020.

SACHETTI, A. S.; ROJAS, J. W. J.; HEINECK, K. S. *Caracterização Geotécnica dos Solos de Passo Fundo e Erechim, e Geológica da Rocha de Passo Fundo*. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v.1, n. 1, p. 11-17, 2014.

SALDANHA, R. B. **Misturas Cinza Volante e Cal de Carbureto: Comportamento da Resistência à Compressão Simples para Cura Acelerada**. 2014. 170 f.

Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul / UFRGS, 2014.

SOARES, B. D. **Estudo da produção de óxido de cálcio por calcinação do calcário: caracterização dos sólidos, decomposição térmica e otimização paramétrica**. 2007. 121 f. Curso de Engenharia Química, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

SOARES, M. A. R.; QUINA, M. J.; QUINTA-FERREIRA, R. M. *Immobilisation of lead and zinc in contaminated soil using compost derived from industrial eggshell*. **Journal of Environmental Management**, v. 164, p. 137-145, 2015.

SOARES, P. S. M., TRINDADE, R. de B. E. *Sistema passivos abióticos para o tratamento de drenagens ácidas de mina (DAM)*. In: **Seminário Brasil-Canadá de Recuperação Ambiental de Áreas Mineradas**, 1. Anais. Seminário Brasil: Florianópolis – SC, 2003.

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 04 abr. 2020.

TIMBOLA, R. S.; FERRAZZO, S. T.; KORF, E. P. **Compressibilidade de solo siltoso em diferentes estruturas de compactação submetido a contaminação ácida**. In: IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2019) e VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2019), São Carlos, 2020.

TORRES-CARRASCO, M.; REINOSA, J. J.; DE LA RUBIA, M. A.; REYES, E.; ALONSO PERALTA, F.; FERNÁNDEZ, J. F. *Critical aspects in the handling of reactive silica in cementitious materials: Effectiveness of rice husk ash vs nano-silica in mortar dosage*. **Construction and Building Materials**, v. 223. p. 360–367, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.023>. Acesso em 18 mar. 2020.

WEN, N; ZHAO, Y; YU, Z; LIU, M. *A sludge and modified rice husk ash-based geopolymer: synthesis and characterization analysis.: synthesis and characterization analysis.* **Journal of Cleaner Production.** Harbin, p. 805-814, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.045>. Acesso em: 10 mar. 2020.

ZAMAN, T.; MOSTARI, S.; AL MOHMOOD, A.; RAHMAN, S. Evolução e caracterização da casca de ovo como potencial candidata de matéria-prima. **Cerâmica**, v. 64, p. 236-241, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132018643702349>. Acesso em: 21 abril. 2021.