



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL**  
**CAMPUS ERECHIM**  
**ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**WILLIAM MATEUS KUBIAKI LEVANDOSKI**

**RESISTÊNCIA E MINERALOGIA DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO  
ESTABILIZADO COM LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO ORIUNDO DE CINZA DE  
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E CAL DE CASCA DE OVO**

**ERECHIM**

**2021**

**WILLIAM MATEUS KUBIAKI LEVANDOSKI**

**RESISTÊNCIA E MINERALOGIA DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO  
ESTABILIZADO COM LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO ORIUNDO DE CINZA DE  
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E CAL DE CASCA DE OVO**

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: Ma. Suéllen Tonatto Ferrazo.

ERECHIM

2021

## **Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS**

Levandoski, William Mateus Kubiaki

RESISTÊNCIA E MINERALOGIA DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO ESTABILIZADO COM LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO ORIUNDO DE CINZA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E CAL DE CASCA DE OVO / William Mateus Kubiaki Levandoski. -- 2021.

25 f.

Orientador: Doutor Eduardo Pavan Korf

Co-orientadora: Mestra Suéllen Tonatto Ferrazo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -  
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de  
Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária,  
Erechim, RS, 2021.

1. Resíduos de mineração e de agroindustrias. 2. Ativação alcalina. 3. Resistência e mineralogia. 4. Índice porosidade/ligante. I. Korf, Eduardo Pavan, orient. II. Ferrazo, Suéllen Tonatto, co-orient. III. Universidade Federal da Fronteira Sul. IV. Título.

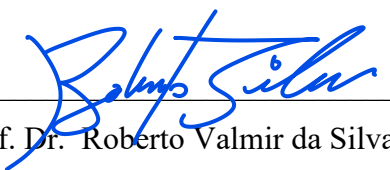
**WILLIAM MATEUS KUBIAKI LEVANDOSKI**

**RESISTÊNCIA E MINERALOGIA DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO  
ESTABILIZADO COM LIGANTE ÁLCALI-AATIVADO ORIUNDO DE CINZA DE  
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E CAL DE CASCA DE OVO**

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: 15/10/2021.

BANCA EXAMINADORA



---

Prof. Dr. Roberto Valmir da Silva

UFFS



EDUARDO PAVAN KORF  
CPF nº 00341745081

---

Prof. Dr. Eduardo Pavan Korf

UFFS

Deise Trevizan  
Pelissaro

Assinado de forma digital  
por Deise Trevizan Pelissaro  
Dados: 2021.10.22 15:06:27  
-03'00'

---

Ma. Deise Trevizan Pelissaro

URI

GIOVANI JORDI  
BRUSCHI:01406551074

Assinado de forma digital por GIOVANI  
JORDI BRUSCHI:01406551074  
Dados: 2021.10.22 18:33:02 -03'00'

---

Me. Giovanni Jordi Bruschi

UFRGS

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a minha família e principalmente a minha mãe, por sempre me apoiar e me incentivar a seguir em frente. Ao meu professor e orientador Eduardo Korf pela dedicação e todas as oportunidades, confiança e conhecimentos compartilhados durante todos os anos de trabalho junto ao grupo de pesquisa. A minha coorientadora Suéllen por toda dedicação, parceria, auxílio, e principalmente por nunca medir esforços para ajudar nessa pesquisa. Aos meus amigos, Rafael, Renan, Lucas, Josiane, ÉriSSa, Tainá, Vilson, Gabriel e muitos outros tão especiais que estiveram ao meu lado. A Joice por se tornar uma pessoa que me ajudou a evoluir me auxiliando, ensinando e me aturando aos longos dos anos na minha caminhada como pesquisador. A Julia por auxiliar incontáveis dias em diversos ensaios, tornando a realização desse trabalho possível. Ao 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 aos longos dos anos. 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 ao pessoal que contribuiu de forma direta e indireta para a realização deste trabalho.

# Resistência e mineralogia de rejeito de mineração de ferro estabilizado com ligante álcali-ativado oriundo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo

William Mateus Kubiaki Levandoski<sup>1</sup>, Suéllen Tonatto Ferrazzo<sup>2</sup>, Eduardo Pavan Korf<sup>3</sup>

**Resumo.** A valorização dos rejeitos da mineração pode ocorrer por meio da sua estabilização com adição de agentes cimentantes, como o cimento Portland, cuja produção demanda elevado consumo de recursos naturais e eletricidade e emite gás de efeito estufa. Neste contexto, ligantes oriundos da ativação alcalina de resíduos industriais mostram-se uma alternativa promissora ao cimento Portland. O presente estudo avaliou a estabilização de rejeito da mineração de ferro (RMF) com um ligante álcali-ativado (LAA) de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo. Um planejamento experimental foi realizado para analisar a resistência à compressão simples (RCS) de misturas RMF-LAA, considerando distintos teores de ligante e umidade inicial, peso específico, temperatura e tempo de cura. Os resultados de RCS foram correlacionados com o índice porosidade/teor volumétrico de ligante ( $\eta/B_{iv}$ ). A mineralogia de misturas de interesse também foi investigada. A RCS de RMF-LAA é influenciada significativamente por todos os fatores avaliados, principalmente por teor de ligante e peso específico. Uma resistência de 6,59 MPa foi atingida em 28 dias de cura a 40°C. O índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  mostrou-se um parâmetro adequado para avaliar a estabilização do RMF, em que, reduzindo a porosidade e aumentando o teor do cimento, aumenta-se a resistência das misturas RMF-LAA. Em relação à mineralogia do material estabilizado apresentou tobermorita, indicando a formação de gel cimentante.

**Palavras-chave:** Resíduos de mineração e de agroindústrias; Ativação alcalina; Resistência e mineralogia; Índice porosidade/ligante.

**Abstract.** *The valorization of mining tailings may be achieved through stabilization with the addition of cementing agents, such as Portland cement, whose production implies high consumption of natural*

---

<sup>1</sup>Estudante de graduação, Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, RS 99700-970, Brasil. E-mail: williankubi@gmail.com

<sup>2</sup>Doutoranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS 90035-190, Brasil. E-mail: suellenferrazzo@hotmail.com

<sup>3</sup>Professor, Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária e Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, RS 99700-970, Brasil. E-mail: eduardo.korf@uffs.edu.br

*resources and electricity and emits greenhouse gases. In this context, alkali-activated binders from alkali-activation of industrial waste are a promising alternative. The present study evaluated the stabilization of iron ore tailing (IOT) with an alkali-activated binder (AAB) from sugar cane bagasse ash and eggshell lime. An experimental design was carried to analyze the unconfined compressive strength (UCS) of IOT-AAB mixtures, considering distinct binder and initial moisture contents, dry unit weight, temperature and curing time. The UCS results were correlated to the porosity/volumetric binder content index ( $\eta/B_{iv}$ ). The mineralogy of selected mixtures was also investigated. The UCS of IOT-AAB is significantly influenced by all evaluated factors, mainly by binder content and dry unit weight. A strength of 6.59 MPa was achieved after 28 days of curing at 40°C. The  $\eta/B_{iv}^{0.28}$  index proved to be an adequate parameter to evaluate the stabilization of RMF, in which, by reducing the porosity and increasing the cement content, the strength of the RMF-LAA mixtures is increased. The mineralogy of the stabilized material showed tobermorite, indicating the formation of cementing gel.*

**Keywords:** Mining and agro-industrial wastes; Alkali-activation; Strength and mineralogy; porosity/binder index.

## 1. INTRODUÇÃO

As reservas mundiais de minério de ferro são da ordem de 170 bilhões de toneladas. Das 2,4 bilhões de toneladas do minério processadas em 2019, 36,7% correspondem ao maior produtor mundial, Austrália, seguido do Brasil com cerca de 18,9% da produção (DE JESUS; JOAQUIM, 2020). Todavia, as atividades do setor de mineração geram inúmeros impactos negativos. Rompimentos de barragens de mineração são eventos de baixa frequência, mas geram impactos de elevada magnitude e de complexa mensuração, como observado em Mariana e Brumadinho (DO CARMO *et al.*, 2017; FREITAS; DA SILVA, 2019). Além disso, o beneficiamento e o transporte dos minerais compreendem atividades que geram gases do efeito estufa (GAN; GRIFFIN, 2018; HAQUE; NORGATE, 2015; KATTA; DAVIS; KUMAR, 2020) e grande volume de rejeitos. Estima-se que 632 milhões de toneladas de rejeitos de mineração de ferro são geradas anualmente na Austrália (KURANCHIE *et al.*, 2015). No Brasil em 2014, cerca de 275,5 milhões de toneladas do rejeito foram utilizadas como material de aterro e armazenadas em barragens (DAUCE *et al.*, 2018).

Entre os meios de valorizar os rejeitos de mineração e reduzir os riscos associados ao seu armazenamento, tem-se a estabilização química destes resíduos pela adição de agentes cimentantes (OBENAU-EMLER; FALAH; ILLIKAINEN, 2020). O cimento Portland já foi aplicado em rejeitos

de mineração ricos em sulfetos e de ouro, onde promoveu melhorias das propriedades mecânicas (CONSOLI *et al.*, 2018; GORAKHKI; BAREITHER, 2017; OUELLET *et al.*, 2007), imobilização de metais pesados (MISRA; YANG; MEHTA, 1996) e neutralização ácida (KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017). Contudo, a produção do cimento tradicional demanda intenso consumo energético e recursos naturais, emitindo expressiva carga de poluente atmosférico (OBENAU-EMLER; FALAH; ILLIKAINEN, 2020). Estima-se que a produção de 1 t de cimento Portland demanda 1,5 t de matérias primas (70% calcário) e gera 0,94 t de CO<sub>2</sub>, o que corresponde a 7% das emissões de gás de efeito estufa (STAFFORD *et al.*, 2016).

Como alternativa ao cimento Portland, resíduos ricos em aluminossilicatos estão sendo utilizados como precursores para produção de ligantes álcali-ativados (ou cimentos alcalinos) (KRIVENKO, 2017). A técnica de ativação alcalina corresponde a reação entre uma fonte de aluminossilicatos em condições alcalinas (presença de ativador alcalino) (PROVIS, 2018), resultando na formação de géis C-A-S-H (aluminossilicato de cálcio hidratado) ou N-A-S-H (aluminossilicato de sódio hidratado) (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015). Os subprodutos industriais mais explorados são metacaulim, escória de alto forno, escória de aço e cinzas volantes (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015; MANJUNATH *et al.*, 2019; MOBILI *et al.*, 2020; SARGENT, 2015). Outras fontes de aluminossilicatos como, por exemplo, rejeitos de mineração (OBENAU-EMLER; FALAH; ILLIKAINEN, 2020), pó cerâmico (CAICEDO, 2020) e resíduo de vidro (ACOSTA, 2021; CONSOLI *et al.*, 2021; CRISTELO *et al.*, 2021) também vêm sendo utilizados para produção de cimentos alcalinos.

Outros potenciais materiais para álcali-ativação são a cinza do bagaço de cana-de-açúcar e a cal de casca de ovo. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com produção estimada de 654 milhões de toneladas em 2020 (CONAB, 2020). Considerando que 1 t de cana-de-açúcar processada (produção de açúcar e etanol) gera 300 kg de bagaço (LYRA *et al.*, 2021), e que a queima (geração de energia elétrica) de 1 t desse subproduto resulte em 24kg de cinza (MORETTI *et al.*, 2016; CONAB, 2020), pode-se inferir uma geração de 4,7 milhões de toneladas do resíduo no país. Essa cinza é considerada um material pozolânico, apresentando teores de óxidos de sílica, alumínio e ferro superiores a 70% (SULTANA; RAHMAN, 2013; BERENQUER *et al.*, 2020).

A casca de ovo é um resíduo oriundo do consumo doméstico e industrial de ovos de galinha. Cerca de 65,5 milhões de toneladas de ovos são produzidos anualmente no mundo, sendo 45% produzido pela China, enquanto que, o Brasil é responsável por 3,4% da produção mundial (VANDEGINSTE, 2021). Considerando que a casca de ovo representa 11% da massa total do ovo (FENG *et al.*, 2014), pode-se inferir uma produção mundial na ordem de 7,2 milhões de toneladas desse resíduo anualmente. A casca de ovo corresponde a uma rica fonte de carbonato de cálcio

(CaCO<sub>3</sub>) e sua reciclagem, por meio da calcinação, resulta em uma cal de casca de ovo (CaOH<sub>2</sub>) (SALDANHA *et al.*, 2021). Esta cal foi utilizada recentemente em ligante álcali-ativado para melhoria do comportamento mecânico de um solo arenoso (ACOSTA, 2021).

Dentre os distintos campos de aplicação, a ativação alcalina vem sendo explorada como uma metodologia promissora para estabilização de rejeitos e fixação de metais pesados. Estudos na literatura demonstram que o uso da técnica em rejeito de mineração de ouro resultou em imobilização eficiente de metais pesados sob períodos de cura prolongada, em temperatura ambiente (KIVENTERÄ *et al.*, 2018). O trabalho de Obenaus-Emler, Falah e Illikainen (2020) avaliou rejeitos da mineração de cobre, níquel, zinco, platina e ferro como materiais precursores, tendo evidenciado a influência positiva de maiores períodos de cura e temperatura na resistência dos materiais produzidos. Ainda, um ligante álcali-ativado de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de carbureto demonstrou-se eficiente para estabilizar rejeito de bauxita e de mineração de ouro, em termos de comportamento mecânico (BRUSCHI *et al.*, 2021; DOS SANTOS, 2021) e imobilização de metais (DOS SANTOS, 2021).

De fato, há estudo acerca do rejeito de mineração de ferro como material precursor para ativação alcalina e aplicação *in situ*. Contudo, identifica-se que a estabilização desse rejeito com cimentos alcalinos representa um campo de pesquisa ainda a ser explorado. A literatura demonstra que ainda existem muitas questões a serem investigadas, sendo que a principal delas é a necessidade de explorar como pode-se potencializar esta estabilização, identificando os fatores que influenciam o desempenho mecânico do material produzido, aliada a utilização de distintos cimentos alcalinos. Contribuindo para o avanço nessa lacuna do conhecimento, esta pesquisa avaliou a estabilização de rejeito de mineração de ferro com um ligante álcali-ativado oriundo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 MATERIAIS**

Os materiais utilizados nesta pesquisa e respectivas abreviações foram: rejeito de mineração de ferro (RMF); cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA); cal de casca de ovo hidratada (CCOH) e hidróxido de sódio (NaOH). O RMF foi fornecido por uma indústria da mineração de ferro, localizada no estado de Minas Gerais (MG) - Brasil. A CBCA foi fornecida por uma indústria de processamento de subprodutos de cana-de-açúcar, localizada no noroeste do estado do Rio Grande do Sul (RS) Brasil. O RMF foi submetido a secagem (50°C por 48h) e CBCA, a secagem e (50°C por 48h) peneiramento (peneira de malha 200, abertura 75µm).

A CCOH foi produzida em laboratório, a partir de cascas de ovos coletadas em uma padaria, no município de Erechim (RS) - Brasil. A produção da cal compreendeu os processos de: lavagem (i), secagem (50°C por 12h) (ii), trituração em moinho (iii) e calcinação das cascas em forno mufla (1050°C por 6h) (iv); hidratação da cal em água destilada por 48h (v), e peneiramento da CCOH (peneira de malha 200, abertura 75µm) (vi). NaOH foi adquirido de uma empresa comercial de reagentes químicos, localizada no município de Chapecó, estado de Santa Catarina (SC) - Brasil.

Desenvolvido em estudo do grupo de pesquisa, o ligante álcali-ativado (LAA) é composto por uma relação CBCA/CCOH de 80/20, com concentração molar de solução ativadora (NaOH) de 1M e respectiva concentração de álcalis (Na<sub>2</sub>O) de 2,61%. Esta dosagem foi utilizada na estabilização do RMF, avaliada mediante ensaio de resistência à compressão simples e avaliação mineralógica de misturas RMF-LAA.

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO

As características dos materiais (Tabelas 1-3, e Figuras 1-2) foram avaliadas pela determinação de: massa específica das partículas [NBR 6458 (ABNT, 2017); NBR 16605 (ABNT, 2017)]; área superficial específica (método Brunauer-Emmett-Teller - BET); limites de Atterberg [NBR 6459 (ABNT, 2017); NBR 7180 (ABNT, 2016)]; distribuição granulométrica [NBR 7181 (ABNT, 2018); granulometria a laser], e composição química (espectrometria de fluorescência de raios-X, FRX) e mineralógica (difração de raios-X, DRX). O RMF e a CBCA foram avaliados quanto a classificação de resíduo, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004) e determinação de metais pela técnica de espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-AES).

A distribuição granulométrica da CBCA e da CCOH foi determinada por meio da técnica de difração de raios laser, em um analisador de tamanho de partículas (marca *Cilas*, modelo 1064). A área superficial específica da CBCA e da CCOH foram mensuradas pelo método de BET, usando o equipamento *QuantaChrome* (modelo NOVA 1200e).

A FRX foi usada em amostras fundidas (para elementos maiores) e amostras prensadas (para elementos menores), na calibração de padrões de rochas tabelados, utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios-X equipado com tubo de Rh (marca *Malvern Panalytical*, modelo *Zetium*). A perda ao fogo (PF) foi realizada a 1020 °C por 2h. As análises de DRX foram realizadas em um difratômetro de raios-X [marca *Siemens - BRUKER AXS*, modelo D-5000 ( $\theta$ -2 $\theta$ )] equipado com tubo de ânodo fixo de Cu ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ), operando a 40 kV e 25 mA. As amostras em pó foram analisadas no intervalo angular de 2 a 72° 2 $\theta$  em passo de 0.05°/1s.

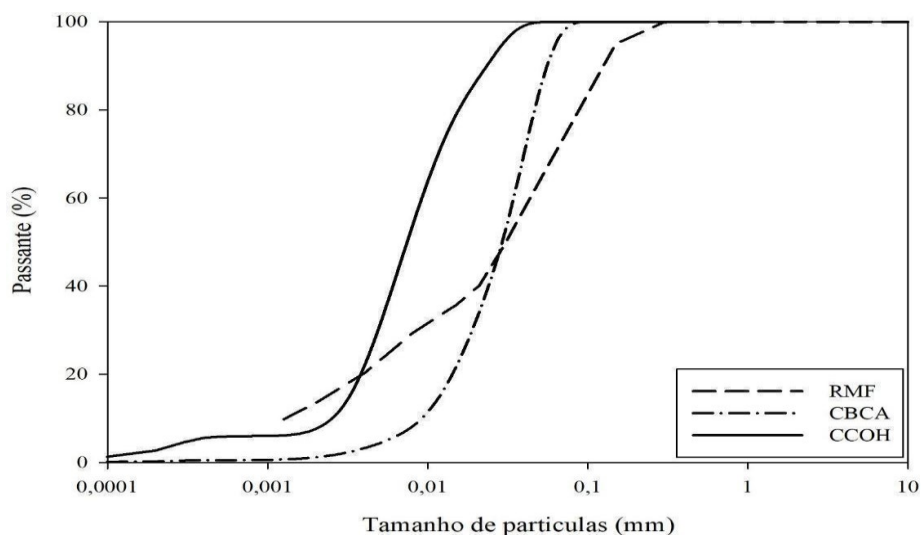
A quantificação de metais dos extratos lixiviados e solubilizados do RMF e da CBCA, por ICP-AES, foram realizadas no espectrômetro de emissão atômica com plasma indutivamente

acoplado (ICPE - marca *Shimadzu*, modelo ICPE-9800), utilizando solução padrão multi elemento *ICP Certipur* (marca *Merck*).

**Tabela 1.** Propriedades físicas dos materiais.

| Propriedade   | RMF   | CBCA         | CCOH         |
|---|-------|--------------|--------------|
| Limite de liquidez (%)  | 26    | -            | -            |
| Limite de plasticidade (%)  | *     | -            | -            |
| Índice de plasticidade  | *     | Não plástica | Não plástica |
| Massa específica real dos grãos ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | 3,13  | 2,08         | 2,24         |
| Área superficial específica ( $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ )    | -     | 125,15       | 4,18         |
| Areia grossa (%) – $0,6 \leq d < 2$ mm                            | 0     | 0            | 0            |
| Areia média (%) – $0,2 \leq d < 0,6$ mm                           | 0     | 0            | 0            |
| Areia fina (%) – $0,06 \leq d < 0,2$ mm                           | 48,95 | 8,88         | 0            |
| Silte (%) – $0,002 \leq d < 0,06$ mm                              | 30,72 | 90,13        | 93,01        |
| Argila (%) – $d < 0,002$ mm                                       | 20,33 | 0,99         | 6,99         |

**Fig. 1.** Curvas de distribuição granulométrica do RMF, CBCA e CCOH.



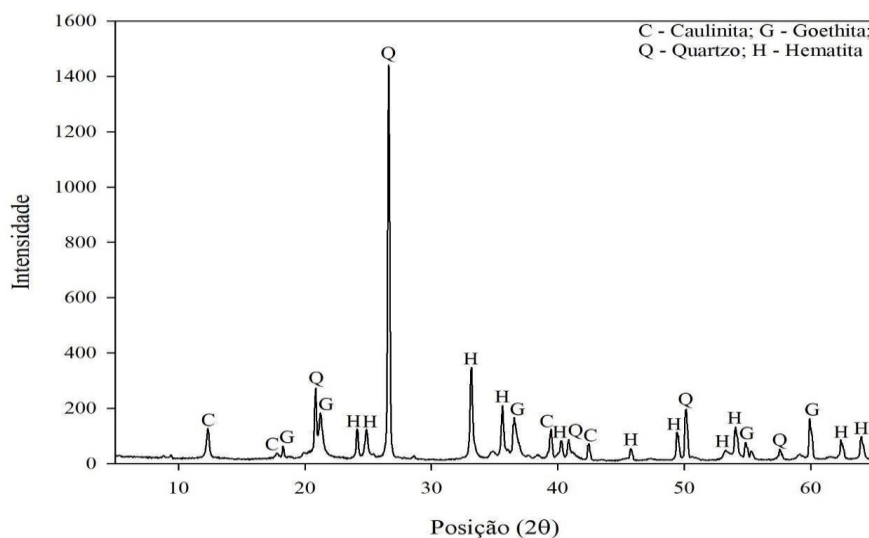
O RMF é composto principalmente por óxidos de ferro (49,3%), silício (35,1%) e alumínio (8,48%) (Tabela 2). A CBCA é composta principalmente por óxidos de silício (60,65%), ferro (13,83%) e alumínio (5,76%) (BRUSCHI *et al.*, 2021), mostrando-se boas fontes de aluminossilicatos. A CCOH corresponde a uma rica fonte de cálcio, equivalente a 72,9% de CaO (CONSOLI *et al.*, 2020). A mineralogia do RMF é composta por caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), goethita ( $\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$ ), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (Figura 2). Já a CBCA apresenta fases cristalinas e amorfas, com presença de quartzo e hematita (BRUSCHI *et al.*, 2021). A composição mineralógica da CCOH compreende portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) (CONSOLI *et al.*, 2020).

**Tabela 2.** Composição química dos materiais (%).

| Óxidos | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | MnO  | MgO  | CaO  | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{K}_2\text{O}$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{P}_2\text{O}_5$ | Perda ao fogo |
|--------|----------------|-------------------------|-------------------------|------|------|------|-----------------------|----------------------|----------------|------------------------|---------------|
| RMF    | 35,1           | 8,48                    | 49,3                    | 1,29 | 0,20 | 0,07 | -                     | 0,06                 | 0,32           | 0,31                   | 4,61          |
| CBCA   | 60,65          | 5,76                    | 13,87                   | 0,45 | 1,97 | 1,40 | 0,22                  | 2,90                 | 4,14           | 1,26                   | 7,38          |

|      |      |      |      |   |      |      |   |   |   |   |       |
|------|------|------|------|---|------|------|---|---|---|---|-------|
| CCOH | 0,12 | 0,13 | 0,15 | - | 1,17 | 72,9 | - | - | - | - | 25,14 |
|------|------|------|------|---|------|------|---|---|---|---|-------|

Fig. 2. Difratoograma do RMF.



A Tabela 3 apresenta os resultados da caracterização ambiental de RMF e CBCA. O RMF não apresentou lixiviação de metais, e solubilizou alumínio, ferro e sódio em concentrações inferiores ao limite máximo estabelecido pelo anexo G da NBR 10004 (ABNT,2004), classificando-se assim, como um Resíduo não perigoso – inerte classe IIA. Já o extrato lixiviado oriundo da CBCA apresentou mercúrio (Hg) em concentração acima do limite estabelecido pelo anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004), classificando-o como um Resíduo perigoso – classe I (DOS SANTOS, 2021).

Tabela 3. Composição química dos extratos lixiviados e solubilizados de RMF e CBCA.

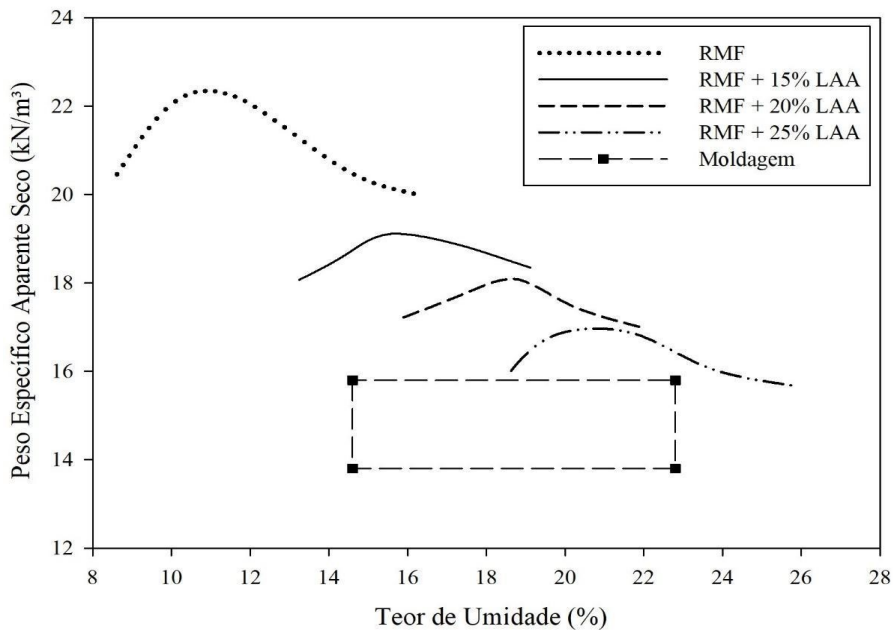
| Elemento | Extrato lixiviado                  |      |                                      | Elemento     | Extrato solubilizado               |       |                                      |
|----------|------------------------------------|------|--------------------------------------|--------------|------------------------------------|-------|--------------------------------------|
|          | Concentração (mg.L <sup>-1</sup> ) |      | Limite (mg.L <sup>-1</sup> ) Anexo F |              | Concentração (mg.L <sup>-1</sup> ) |       | Limite (mg.L <sup>-1</sup> ) Anexo G |
|          | RMF                                | CBCA |                                      |              | RMF                                | CBCA  |                                      |
| Ag       | *                                  | 0,12 | 5                                    | Ag           | *                                  | 0,12  | 0,05                                 |
| As       | *                                  | 0,13 | 1                                    | Al           | 0,05                               | 4,22  | 0,2                                  |
| Ba       | *                                  | 0,66 | 70                                   | As           | *                                  | 0,09  | 0,01                                 |
| Cd       | *                                  | 0,03 | 0,5                                  | Ba           | *                                  | *     | 0,7                                  |
| Cr       | *                                  | 0,13 | 5                                    | Cd           | *                                  | 0,023 | 0,005                                |
| Hg       | *                                  | 0,14 | 0,1                                  | Cr           | *                                  | 0,09  | 0,05                                 |
| Pb       | *                                  | 0,22 | 1                                    | Cu           | *                                  | 0,12  | 2                                    |
| Se       | *                                  | 0,67 | 1                                    | Fe           | 0,28                               | 0,71  | 0,3                                  |
|          |                                    |      |                                      | Hg           | *                                  | 0,10  | 0,001                                |
|          |                                    |      |                                      | Mn           | *                                  | *     | 0,1                                  |
|          |                                    |      |                                      | Na           | 2,62                               | 11,85 | 200                                  |
|          |                                    |      |                                      | Pb           | *                                  | 0,17  | 0,01                                 |
|          |                                    |      |                                      | Se           | *                                  | 0,39  | 0,01                                 |
|          |                                    |      |                                      | Zn           | *                                  | 0,02  | 5                                    |
|          |                                    |      |                                      | Cl           | *                                  | 6,29  | 250                                  |
|          |                                    |      |                                      | Surfactantes | *                                  | *     | 0,5                                  |

\* Não detectado.

### 2.3 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Para estabilização do RMF, foram avaliadas as razões RMF/LAA de 85/15 e 75/25, com base em estudos anteriores referente a estabilização de solos argilosos e arenosos com ligantes álcali-ativados (ABDELJOUAD *et al.*, 2019; BRUSCHI *et al.*, 2021; CONSOLI *et al.*, 2021; GHADIR; RANJBAR, 2018; POURAKBAR *et al.*, 2017; RIOS *et al.*, 2017; SAMUEL; PUPPALA; RADOVIC, 2020). Os resultados do ensaio de compactação de Proctor, com energia modificada (ASTM, 2012) estão apresentados na Figura 3 para RMF e para as misturas RMF-LAA.

Fig. 3. Ensaio de compactação das misturas RMF + LAA e pontos de moldagem.



Visando explorar uma faixa de porosidades e considerando as limitações associadas aos resultados de Proctor da mistura com 25% de LAA, ou seja, o peso específico aparente seco máximo alcançado nesta mistura, os pesos específicos secos ( $\gamma_D$ ) foram definidos como 13,3 kN.m<sup>-3</sup> e 15,3 kN.m<sup>-3</sup>, como mostrado na Figura 3. Da mesma forma, para explorar a influência do teor de umidade inicial das misturas ( $w$ ), foram definidos pontos no ramo seco e ramo úmido (Figura 3): 14,6% (correspondente a um ponto abaixo do teor de umidade ótimo da mistura com 15% de LAA) e 22,8% (correspondente a um ponto acima do teor de umidade ótimo da mistura com 25% de LAA).

A moldagem dos corpos de provas seguiu os procedimentos de subcompactação: material compactado estaticamente em três camadas em um corpo de prova cilíndrico (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura) para cada peso específico seco alvo. Após a moldagem, os corpos de provas foram

removidos dos moldes cilíndricos e tiveram seus pesos, diâmetros e alturas medidos com precisão de 0,01g e 0,1 mm, correspondentemente. Na sequência, foram inseridos em saco hermético, e mantidos em temperatura ( $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) e umidade relativa ( $95\%\pm 2\%$ ) controladas (ASTM, 2019), durante o período de cura. Restando 24h para o término da cura, os corpos de provas foram imersos em água para reduzir os efeitos de sucção, conforme proposto por Consoli, Dalla Rosa e Saldanha (2011). O ensaio de resistência à compressão simples (RCS) seguiu a metodologia da NBR 12025 (ABNT, 2012) e foi realizado em uma prensa automática de capacidade de 100 t (marca Engetotus).

## 2.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para avaliação da RCS (variável resposta) das misturas RMF-LAA, utilizou-se um planejamento fatorial compósito central com 5 fatores e pontos axiais face centrados ( $\alpha=1$ ). As combinações foram realizadas em duplicata, com pontos fatoriais (64), axiais (20) e centrais (10), resultando em 94 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).

Foram avaliados os seguintes fatores controláveis: tempo de cura (A); teor de ligante (B); peso específico (C); teor de umidade inicial (D) e temperatura de cura (E). Os períodos de cura de 7 e 28 dias foram adotados a fim de se avaliar o comportamento mecânico ao longo do tempo. Os teores de LAA, bem como os valores de estudo para teor de umidade inicial e peso específico foram escolhidos a partir dos ensaios de compactação. As temperaturas de cura de  $23^{\circ}\text{C}$  e  $40^{\circ}\text{C}$  foram adotadas considerando: a primeira como a temperatura ambiente, e a segunda, como sendo a temperatura média máxima atingida no Rio Grande do Sul (SEPLAG, 2021). Os fatores e respectivos níveis codificados estão representados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Fatores controláveis e níveis do planejamento experimental.

| Fatores controláveis                       | Símbolo | Nível inferior | Ponto central | Nível superior |
|--|---------|----------------|---------------|----------------|
|  |         | -1             | 0             | +1             |
| Tempo de cura (dias)                       | A       | 7              | 17,5          | 28             |
| Teor de ligante (%)                        | B       | 15             | 20            | 25             |
| Peso específico ( $\text{kN.m}^{-3}$ )     | C       | 13,3           | 14,3          | 15,3           |
| Teor de umidade inicial (%)                | D       | 14,6           | 18,7          | 22,8           |
| Temperatura de cura ( $^{\circ}\text{C}$ ) | E       | 23             | 31,5          | 40             |

## 2.5 ÍNDICE POROSIDADE/TEOR DE LIGANTE ( $\eta/B_{iv}$ )

Os resultados de RCS foram expressos em função do índice de porosidade/teor volumétrico de ligante proposto por Consoli (2018) e definido pelas Equações 1 e 2. A porosidade ( $\eta$ ) é uma função do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) e dos conteúdos de rejeito de minério de ferro (RMF),

cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) e cal de casca de ovo hidratada (CCOH). Cada um desses materiais tem uma massa específica ( $\gamma_{RMF}$ ,  $\gamma_{CBCA}$ ,  $\gamma_{CCOH}$ , respectivamente), necessária para determinação da porosidade (Equação 1). O teor volumétrico de ligante ( $B_{iv}$ ) é resultante da divisão entre o volume ocupado pela CBCA e CCOH e o volume total da amostra (Equação 2).

$$\eta = 100 - 100 \left\{ \left[ \frac{\gamma_d}{\frac{RMF}{100} + \frac{CBCA}{100} + \frac{CCOH}{100}} \right] \left[ \frac{RMF}{\gamma_{RMF}} + \frac{CBCA}{\gamma_{CBCA}} + \frac{CCOH}{\gamma_{CCOH}} \right] \right\} \quad (1)$$

$$B_{iv} = \frac{V_{CBCA} + V_{CCOH}}{V} = \frac{\frac{m_{CBCA}}{\gamma_{CBCA}} + \frac{m_{CCOH}}{\gamma_{CCOH}}}{V} \quad (2)$$

## 2.6 AVALIAÇÃO MINERALÓGICA

A composição mineralógica das misturas com melhor comportamento mecânico, para as diferentes temperaturas e tempos de cura, foi avaliada por meio da técnica de DRX. Após o ensaio de RCS, realizou-se a extração de amostras dos corpos de prova e subsequente processo de paralisação das reações químicas, conforme metodologia proposta por Caicedo (2020). Amostras de dimensões 1 cm por 1 cm foram imersas em acetona (48h) e secas em estufa (40°C, 24h) e posteriormente acondicionadas em saco hermético até o momento da análise.

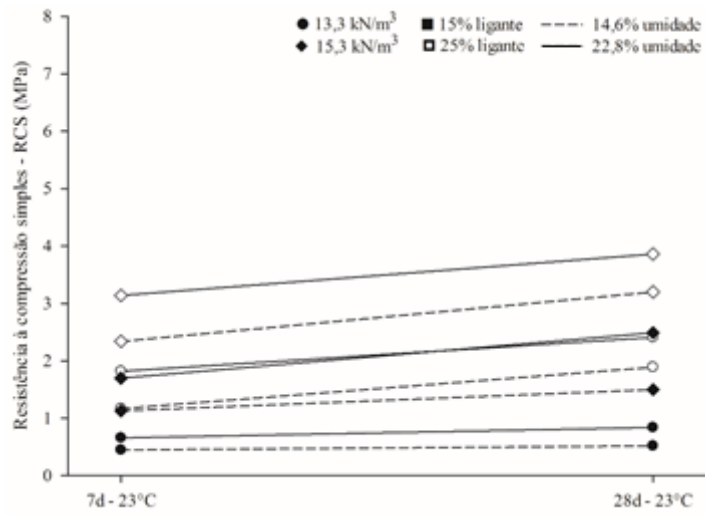
## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

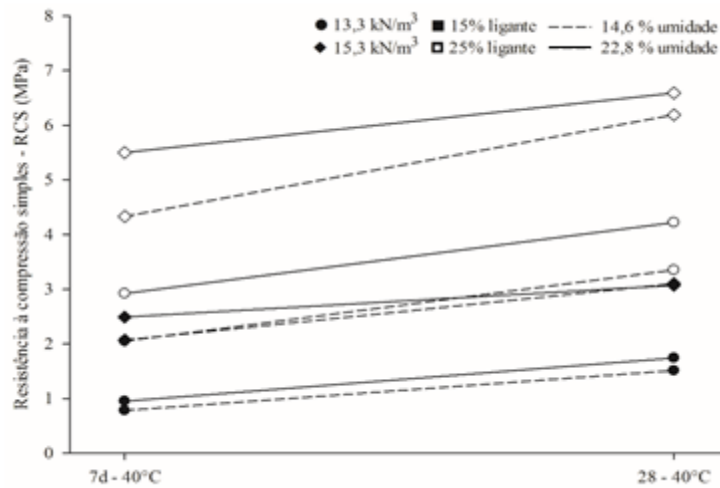
Nos resultados médios de RCS para RMF-LAA (Figura 4) nota-se que, maiores teores de ligante e de umidade inicial, peso específico e, tempo e temperatura de cura resultaram em maiores resistências. De forma geral, os tratamentos RMF-LAA de 7 dias a 40°C apresentaram resistências médias superiores aos 7 dias a 23°C, bem como semelhantes/superiores aos 28 dias a 23°C. O melhor tratamento de RMF-LAA (25% LAA, 22,8%  $w$  e 15,3kN.m<sup>-3</sup>  $\gamma_d$ ) atingiu uma RCS média de 6,59 MPa em 28 dias a 40°C, representando um acréscimo de 48% comparado a de 7 dias a 23°C (3,14 MPa).

Na Figura 5 são apresentados os resultados da avaliação da significância dos fatores controláveis, e as interações entre eles. Nota-se que a RCS de RMF-LAA é influenciada significativamente por todos os fatores controláveis do sistema e por uma série de interações de segunda ordem (valor  $p < 0,05$ ). Teor de ligante (B) e peso específico aparente seco (C) são os fatores que exercem influência de maior magnitude sob a RCS, seguidos pela temperatura de cura (E), tempo de cura (A) e teor de umidade inicial (D).

Fig. 4. Resultados médios de RCS para misturas RMF-LAA (a) a 23°C e (b) a 40°C.

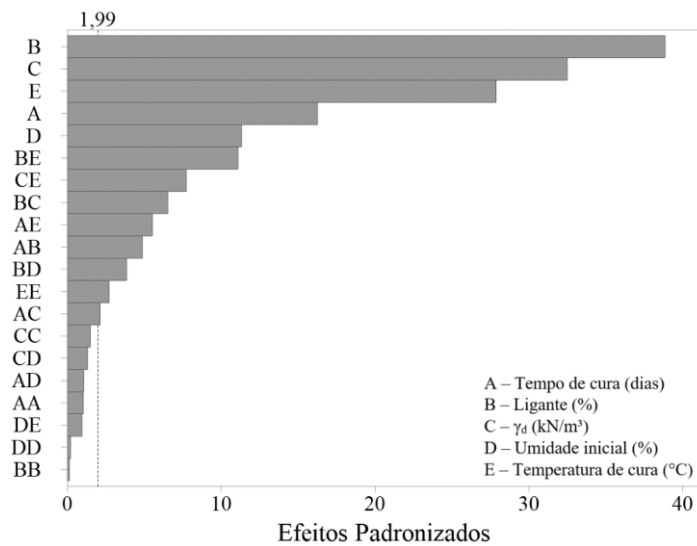


(a)



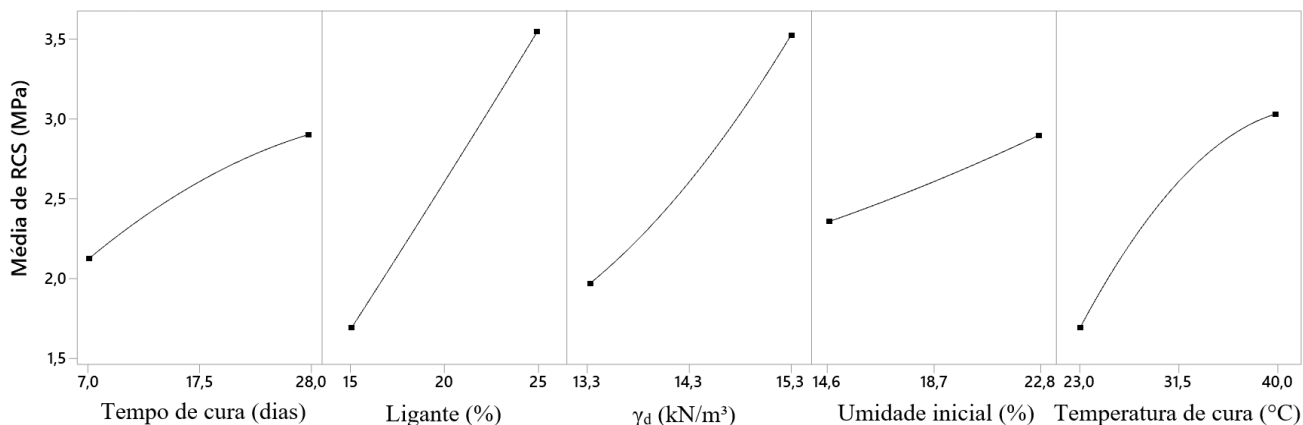
(b)

Fig. 5. Gráfico de Pareto para RCS de misturas RMF-LAA.



No gráfico dos efeitos principais (Figura 6) verifica-se que todos os fatores controláveis influenciam significativamente de forma positiva sobre a RCS das misturas RMF-LAA, ou seja, o aumento do nível do fator resulta na maximização da resistência, corroborando estatisticamente o comportamento observado nas RCS médias (Figura 4). Além disso, considerando a influência dos fatores de segunda ordem (Figura 5) e, conforme Figura 6, nota-se que, com exceção do fator temperatura de cura, todos fatores exercem influência linear sob a RCS.

**Fig. 6.** Efeitos principais sob a RCS de RMF-LAA.



O fator tempo de cura (A) influencia de forma positiva na RCS das misturas RMF-LAA, em que produtos cimentantes continuam a se formar, ao longo do tempo, contribuindo para ganhos de resistência. Para o tratamento de RMF-LAA com melhor comportamento mecânico (25% LAA, 22,8%  $w$  e 15,3  $\text{kN.m}^{-3} \gamma_d$ ), a variação de 7 para 28 dias resultou no incremento de resistência média de 19% a 23°C e 18% a 40°C. Resultados similares foram também observados em trabalhos de estabilização de solos com distintos ligantes álcali-ativados (BRUSCHI *et al.*, 2021; CAICEDO, 2020; DOS SANTOS, 2021).

O aumento do teor de ligante (B) nas misturas RMF-LAA promoveu a precipitação de maior quantidade de produtos cimentantes, contribuindo diretamente para a maximização da RCS. Neste sistema, o desenvolvimento das reações cimentantes são intensificadas, permitindo presumir que devido ao processo de ativação alcalina, o teor de ligante exerce maior influência quando comparado ao peso específico aparente seco (Figura 6). Tal observação é corroborada por resultados de trabalhos em estabilização de rejeitos de mineração com uso de ligantes álcali-ativados (BRUSCHI *et al.*, 2021; DOS SANTOS, 2021).

Maior peso específico aparente seco (C) promoveu maiores pontos de contato entre as partículas das misturas RMF-LAA, em função da menor porosidade, potencializando uma maior mobilização de atrito e intertravamento, contribuindo assim, para o aumento de resistência.

Em sistemas álcali-ativados, como o RMF-LAA, o teor de umidade inicial (D) atua como um meio para que ocorra as reações de polimerização por condensação, sendo necessária uma quantidade de água mínima para a formação dos produtos cimentantes, variando de acordo com os precursores e ativadores utilizados (DUXSON *et al.*, 2007; PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). Neste trabalho, a cinza de bagaço de cana-açúcar é um material que apresenta elevada área superficial específica (Tabela 1), permitindo inferir que possui elevada capacidade de absorção de água. Assim, a variação do teor de umidade inicial de 14,6% para 22,8% foi um fator importante para o processo de ativação alcalina no sistema RMF-LAA.

O aumento de temperatura de cura (E), de 23°C para 40°C, atuou como um agente catalisador da reação de dissolução dos aluminossilicatos, acelerando a formação de géis cimentantes e possibilitando obter maiores resistências, em um menor período de tempo. Singh e Subramaniam (2018) relatam resultados semelhantes, em que o aumento na taxa do processo de dissolução é verificado com o aumento da temperatura de cura (de 25°C para 40°C), ocasionando o aumento na formação de géis cimentantes, e conseqüentemente em ganho de resistência.

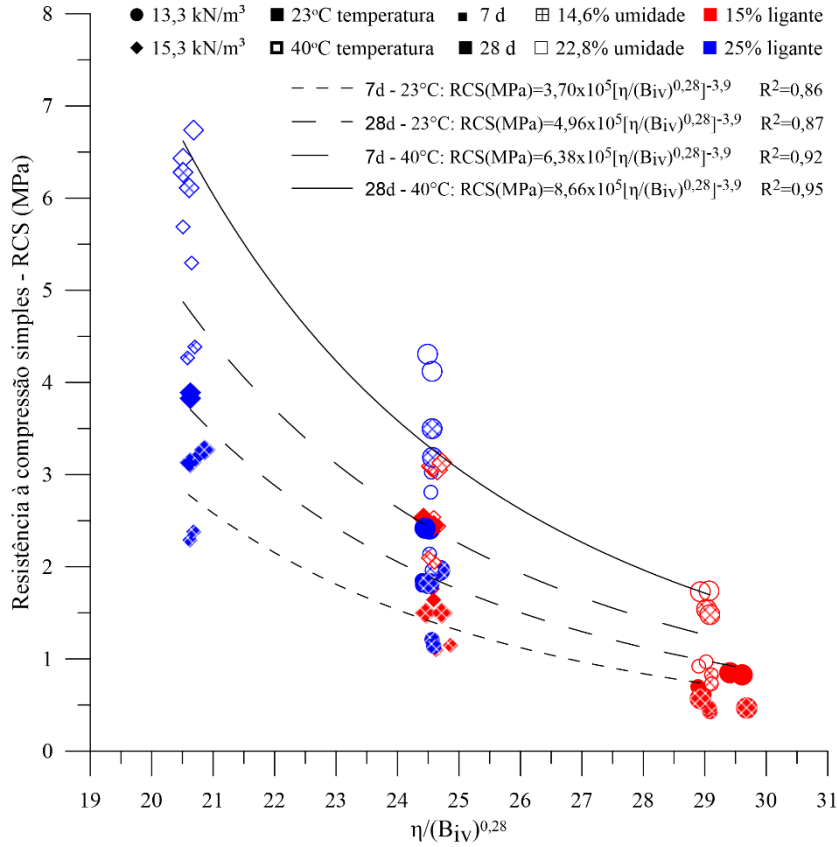
### 3.2 RELAÇÃO COM O ÍNDICE POROSIDADE/TEOR DE LIGANTE ( $\eta/B_{iv}$ )

A metodologia de dosagem racional por meio do índice porosidade/teor volumétrico de ligante ( $\eta/B_{iv}$ ) foi validada para os resultados de RCS das misturas RAF-LAA. Para compatibilizar as taxas de mudança na resistência com a porosidade e inverso do teor de ligante, um expoente de 0,28 foi aplicado ao parâmetro  $B_{iv}$ . Este expoente foi escolhido por possibilitar o melhor ajuste aos resultados de RCS, indo ao encontro de estudos de estabilização de rejeitos de mineração com ligantes álcali-ativados (BRUSCHI *et al.*, 2021; DOS SANTOS, 2021).

Na Figura 7 nota-se que a redução da relação entre a porosidade e o teor de ligante conduz a maiores resistências. Assim, por meio do índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , pode-se optar pela solução mais adequada para atingir resistências de interesse: reduzindo a porosidade (aumento da compactação da mistura) ou aumentando o teor de ligante para estabilização de RMF. Observa-se também, que é possível alcançar RCS aos 7 dias-40°C superiores aos 28 dias-23°C, o que demonstra ser uma alternativa interessante sob ponto de vista prático, pois reduz o período de tempo para atingir uma resistência alvo.

As relações entre os dados experimentais e o índice  $\eta/B_{iv}$  apresentaram bons coeficientes de determinação ( $R^2$ ), variando de 0,86 a 0,95. Estes coeficientes sugerem a viabilidade do índice para a previsão da RCS das misturas RMF-LAA avaliadas. As Equações 3-6 apresentam as relações encontradas para RMF-LAA, em que os expoentes externos são iguais, e as constantes apresentam valores distintos.

**Fig. 7.** Relação entre a RCS e  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para RMF-LAA.



$$RCS (MPa)_{7dias,23^{\circ}C} = 3,70 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-3,9} \quad (3)$$

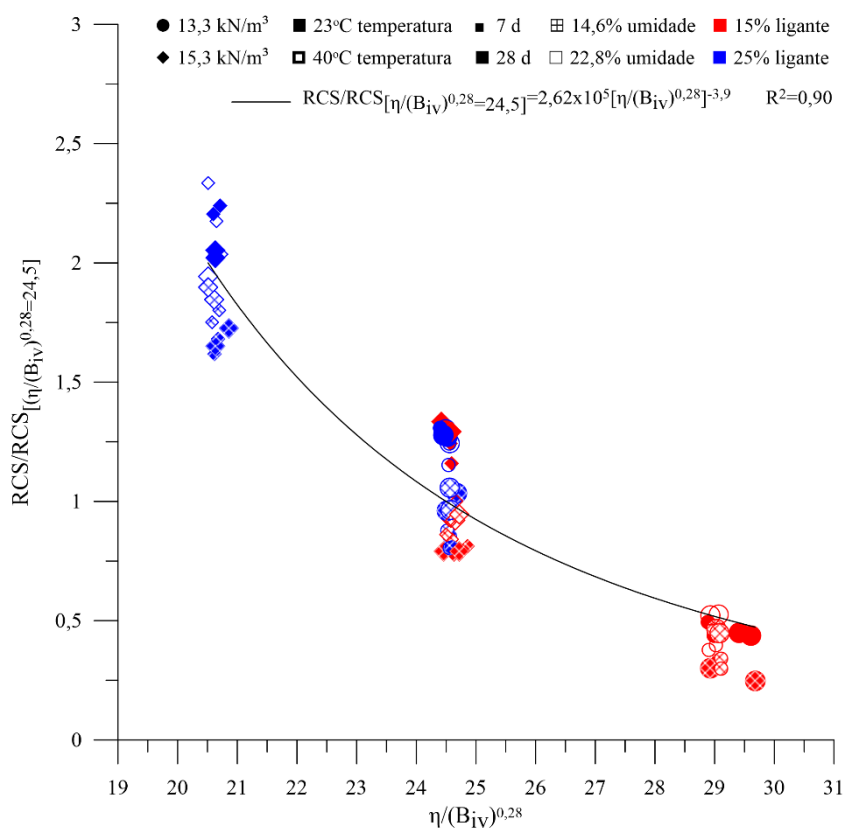
$$RCS (MPa)_{28dias,23^{\circ}C} = 4,96 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-3,9} \quad (4)$$

$$RCS (MPa)_{7dias,40^{\circ}C} = 6,38 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{3,9} \quad (5)$$

$$RCS (MPa)_{28dias,40^{\circ}C} = 8,66 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{3,9} \quad (6)$$

Consoli *et al.* (2019) propuseram que o comportamento mecânico de misturas solo-cimento pode ser normalizado frente à diversos fatores pré-estabelecidos (e.g. temperatura e tempo de cura). Assim, pode-se gerar uma correlação matemática única para previsão da RCS de RMF-LAA. A Figura 8 apresenta a normalização dos valores de RCS, a qual foi concebida por meio da divisão dos resultados por um valor fixo de resistência,  $\eta/B_{iv}^{0,28}=24,5$ , escolhido por ser um valor central comum as quatro curvas (Figura 7). Obteve-se assim, uma relação única entre a RCS normalizada e o  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para misturas RMF-LAA, independentemente da temperatura e do tempo de cura.

**Fig. 8.** RCS normalizada para ambos tempos e temperaturas de cura de RMF-LAA.



A RCS normalizada para RAF-LAA, cuja representação matemática é dada pela Equação 7, apresentou um  $R^2$  de 0,90, o que demonstra a possibilidade de normalização dos resultados de resistência para os fatores temperatura e tempo de cura, bem como indica uma representatividade satisfatória para a previsão da RCS das misturas RMF-LAA avaliadas.

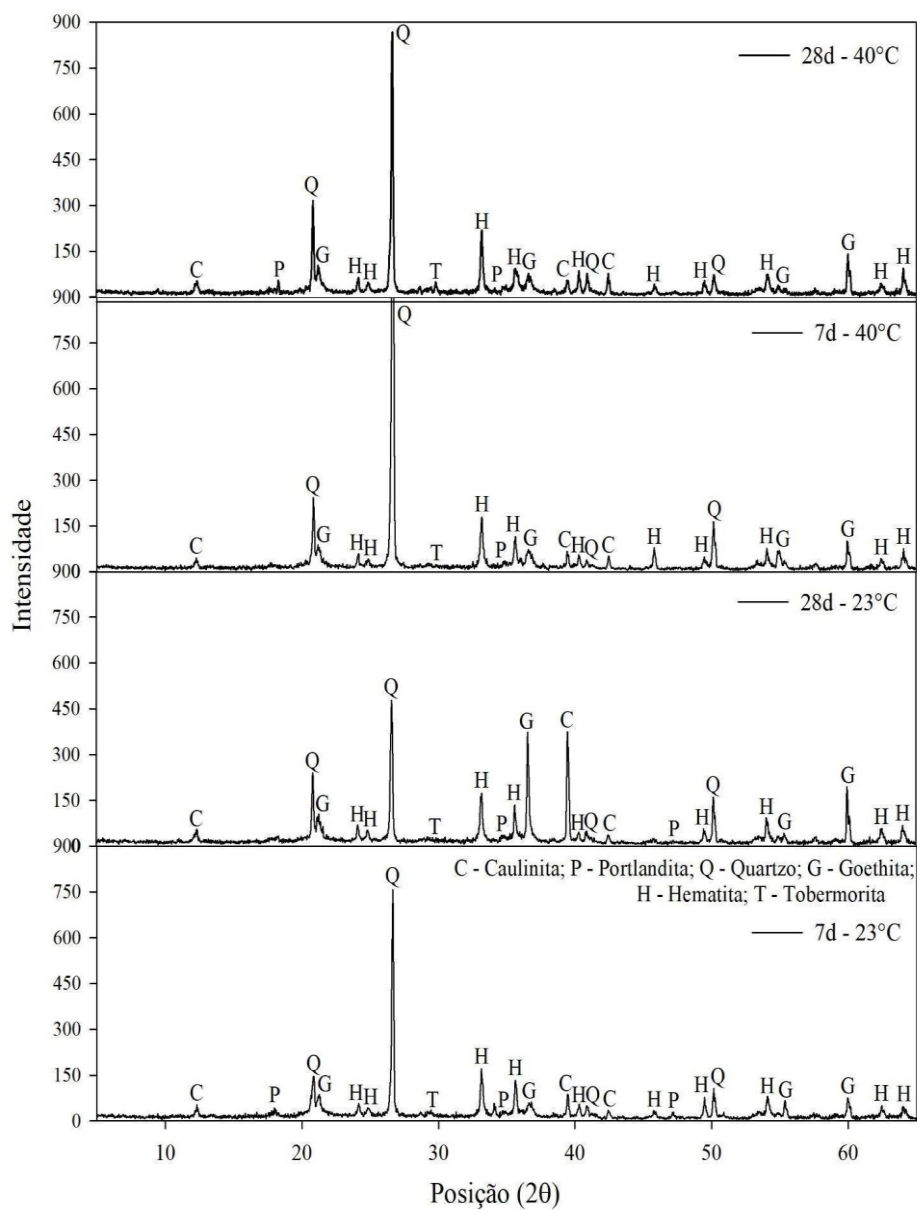
$$RCS/RCS_{\left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}}=24,5\right)} = 2,62 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-3,9} \quad (7)$$

### 3.3 MINERALOGIA

Na Figura 9 são apresentados os difratogramas da mistura RMF-LAA com melhor comportamento mecânico (25% LAA, 22,8% w e 15,3 kN.m<sup>-3</sup>), nos distintos períodos de tempo (7 e 28 dias) e temperaturas de cura (23 e 40°C). As amostras apresentam uma mineralogia composta por fases semicristalinas e cristalinas, que compartilham a presença de caulinita (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>) e goethita (Fe<sup>3+</sup>O(OH)) (presentes no RMF), quartzo (SiO<sub>2</sub>) e hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (oriundos do RMF e CBCA) e portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>) (oriunda da CCOH).

Observa-se também, que a portlandita vai sendo consumida em função das interações com os aluminossilicatos, ao longo do tempo (7 para 28 dias) e da temperatura de cura (23 para 40°C), formando produto cimentante, o que corrobora a influência destes fatores observada no comportamento mecânico das misturas RMF-LAA. Em todas as amostras detectou-se a presença do gel silicato de cálcio hidratado (C-S-H), em fases semicristalinas que tendem a evoluir com o passar do tempo. Este gel condiz com a identificação do mineral tobermorita ( $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), visto que há um entendimento sobre suas estruturas serem semelhantes (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PUERTAS, 2003; GARCÍA-LODEIRO *et al.*, 2009; PALOMO *et al.*, 2007).

**Fig. 9.** Difratogramas de amostras de RMF-25% LAA para 7 e 28 dias, a 23 e 40°C.



#### 4. CONCLUSÕES

A partir dos ensaios e análises realizados, apresentam-se as seguintes considerações finais:

- a) Maiores teores de ligante e de umidade inicial, peso específico e, tempo e temperatura de cura resultaram em maiores RCS. Misturas RMF-LAA de 7 dias a 40°C apresentaram resistências médias superiores aos 7 dias a 23°C e semelhantes/superiores aos 28 dias a 23°C. A mistura com melhor comportamento atingiu 6,59 MPa aos 28 dias a 40°C, o que representa um acréscimo de 48% comparado a de 7 dias a 23°C (3,14 MPa);
- b) A RCS das misturas RMF-LAA foi influenciada significativamente por todos os fatores avaliados (teor de cura, ligante, peso específico aparente seco, teor de umidade inicial, temperatura de cura), principalmente por teor de ligante e peso específico;
- c) O índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  mostrou-se um parâmetro adequado para avaliar a estabilização do RMF, em que, reduzindo a porosidade e aumentando o teor do cimento, aumenta-se a resistência das misturas RMF-LAA;
- d) Ao longo de incremento de temperatura e tempo de cura de RMF-LAA, identificou-se o consumo de portlandita e a formação de gel cimentante, este último indicado pela presença do mineral tobermorita.

## REFERÊNCIAS

ABDELJOUAD, L.; ASADI, A.; NAHAZANAN, H.; HUAT, B. B. K.; DHEYAB, W.; ELKHEBU, A. G. *Effect of Clay Content on Soil Stabilization with Alkaline Activation*. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 5, n. 1, p. 0, 2019.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 12025**: Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ACOSTA, C. J. M. **Melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de vidro e cal de casca de ovo**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **C150/C150M – 19a**: Standard Specification of Portland Cement. American Society for Testing and Materials. Pennsylvania, 2019.

. **D1557-12e1**: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/ m<sup>3</sup>)). Pennsylvania, 2012.

BERENGUER, R. A.; CAPRARO, A. P. B.; DE MEDEIROS, M. H. F.; CARNEIRO, A. M. P.; DE OLIVEIRA, R. A. Sugar cane bagasse ash as a partial substitute of Portland cement: Effect on mechanical properties and emission of carbon dioxide. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 2, p. 103655, 2020.

BRUSCHI, G. J.; DOS SANTOS, C. P.; TONINI DE ARAÚJO, M.; FERRAZZO, S. T.; MARQUES, S. F. V.; CONSOLI, N. C. Green Stabilization of Bauxite Tailings: Mechanical Study on Alkali-Activated Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 11, p. 06021007, 2021.

CAICEDO, M. A. L. **Melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de cerâmica vermelha e cal de carbureto**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

CONAB. Cana-de-açúcar: Acompanhamento da safra brasileira 2019/2020. **Companhia Nacional de Abastecimento**, v. 5, n. 4, p. 75, 2020.

CONSOLI, N. C.; DAASSI-GLI, C. A. P.; RUVER, C. A.; LOTERO, A.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MONCALEANO, C. J.; LOURENÇO, D. E. Lime–Ground Glass–Sodium Hydroxide as an Enhanced Sustainable Binder Stabilizing Silica Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 147, n. 10, p. 06021011, 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. 25, n. 7, p. 864–870, 2011.

CONSOLI, N. C.; CAICEDO, A. M. L.; BECK SALDANHA, R.; FILHO, H. C. S.; ACOSTA, C. J. M. Eggshell Produced Limes: Innovative Materials for Soil Stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 11, p. 06020018, 2020.

CONSOLI, N. C.; LEON, H. B.; DA SILVA CARRETTA, M.; DARONCO, J. V. L.; LOURENÇO, D. E. The effects of curing time and temperature on stiffness, strength and durability of sand-environment friendly binder blends. **Soils and Foundations**, v. 59, n. 5, p. 1428–1439, 2019.

CONSOLI, N. C.; PECCIN, A.; NIERWINSKI, H. P.; SOSNOSKI, J. Durability, strength, and stiffness of compacted gold tailings – cement mixes. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 55, p. 486–494, 2018.

CRISTELO, N.; RIVERA, J.; MIRANDA, T.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Stabilisation of a plastic soil with alkali activated cements developed from industrial wastes. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 8, 2021.

DAUCE, P. D.; CASTRO, G. B. DE; LIMA, M. M. F.; LIMA, R. M. F. Characterisation and magnetic concentration of an iron ore tailings. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 1, p. 1052–1059, 2018.

DE JESUS, C. A. G.; JOAQUIM, L. G. Sumário Brasileiro Mineral 2020: Ferro. **Agência Nacional de Mineração**, p. 1–3, 2020.

DO CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y.; TOBIAS JR, R.; DE CAMPOS, I. C.; DO CARMO, F. F.; SILVINO, G.; DE CASTRO, K. J. DA S. X.; MAURO, M. L.; RODRIGUES, N. U. A.; MIRANDA, M. P. DE S.; PINTO, C. E. F. Fundão tailings dam failures: the environmental tragedy of the largest

technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 15, n. 3, p. 145–151, 2017.

DOS SANTOS, C. P. **Estabilização de rejeito de mineração de ouro por meio da álcali-ativação de cal de carbureto e cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A.; DEVENTER, J. S. J. VAN. Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, p. 2917–2933, 2007.

FENG, Y.; ASHOK, B.; MADHUKAR, K.; ZHANG, J.; ZHANG, J.; REDDY, K. O.; RAJULU, A. V. Preparation and Characterization of Polypropylene Carbonate Bio-Filler (Eggshell Powder) Composite Films. **International Journal of Polymer Analysis and Characterization**, v. 19, n. 7, p. 637–647, 2014.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PUERTAS, F. Structure of calcium silicate hydrates formed in alkaline-activated slag: Influence of the type of alkaline activator. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 86, n. 8, p. 1389–1394, 2003.

FONTES, W. C.; FRANCO DE CARVALHO, J. M.; ANDRADE, L. C. R.; SEGADÃES, A. M.; PEIXOTO, R. A. F. Assessment of the use potential of iron ore tailings in the manufacture of ceramic tiles: From tailings-dams to “brown porcelain”. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 111–121, 2019.

FREITAS, C. M.; DA SILVA, M. A. Work accidents which become disasters: mine tailing dam failures in Brazil. **Revista Brasileira de Medicina do Trabalho**, v. 17, n. 1, p. 21–29, 2019.

GAN, Y.; GRIFFIN, W. M. Analysis of life-cycle GHG emissions for iron ore mining and processing in China — Uncertainty and trends. **Resources Policy**, v. 58, p. 90–96, 2018.

GARCÍA-LODEIRO, I.; MACPHEE, D. E.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Effect of alkalis on fresh C – S – H gels FTIR analysis. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 3, p. 147–153, 2009.

GARCIA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. **An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders**. [s.l.] Woodhead Publishing Limited, 2015.

GHADIR, P.; RANJBAR, N. Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 361–371, 2018.

GORAKHKI, M. H.; BAREITHER, C. A. Unconfined Compressive Strength of Synthetic and Natural Mine Tailings Amended with Fly Ash and Cement. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 143, n. 7, p. 04017017, 2017.

HAQUE, N.; NORGATE, T. Life cycle assessment of iron ore mining and processing. In: **Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability**. Elsevier L ed. [s.l.] Elsevier Ltd., 2015. p. 615–630.

KATTA, A. K.; DAVIS, M.; KUMAR, A. Assessment of greenhouse gas mitigation options for the iron, gold and potash mining sectors. **Journal of Cleaner Production**, v. 245, p. 118718, 2020.

- KEFENI, K. K.; MSAGATI, T. A. M.; MAMBA, B. B. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, n. 473–493, 2017.
- KIVENTERÄ, J.; LANCELLOTTI, I.; CATAURO, M.; POGGETTO, F. D.; LEONELLI, C.; ILLIKAINEN, M. Alkali activation as new option for gold mine tailings inertization. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 76–84, 2018.
- KRIVENKO, P. Why alkaline activation - 60 years of the theory and practice of alkali-activated materials. **Journal of Ceramic Science and Technology**, v. 8, n. 3, p. 323–333, 2017.
- KURANCHIE, F. A.; SHUKLA, S. K.; HABIBI, D.; MOHYEDDIN, A. Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete. **Cogent Engineering**, v. 2, 2015.
- LYRA, G. P.; BORRACHERO, M. V.; SORIANO, L.; PAYÁ, J.; ROSSIGNOLO, J. A. Comparison of original and washed pure sugar cane bagasse ashes as supplementary cementing materials. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 122001, 2021.
- MANJUNATH, R.; NARASIMHAN, M. C.; SHASHANKA, M.; VIJAYANAND, S. D.; VINAYAKA, J. Experimental studies on shear strength characteristics of alkali activated slag concrete mixes. **Materials Today: Proceedings**, n. xxxx, 2019.
- MISRA, M.; YANG, K.; MEHTA, R. K. Application of fly ash in the agglomeration of reactive mine tailings. **Journal of Hazardous Materials**, v. 51, p. 181–192, 1996.
- MOBILI, A.; TELESCA, A.; MARROCCOLI, M.; TITTARELLI, F. Calcium sulfoaluminate and alkali-activated fly ash cements as alternative to Portland cement: study on chemical, physical-mechanical, and durability properties of mortars with the same strength class. **Construction and Building Materials**, v. 246, p. 118436, 2020.
- MONTGOMERY, D. C. **Experrimenta Design**. [s.l: s.n.]. v. 106
- MORETTI, J. P.; SALES, A.; ALMEIDA, F. C. R.; REZENDE, M. A. M.; GROMBONI, P. P. Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 317–323, 2016.
- OBENAUS-EMLER, R.; FALAH, M.; ILLIKAINEN, M. Assessment of mine tailings as precursors for alkali-activated materials for on-site applications. **Construction and Building Materials**, v. 246, p. 118470, 2020.
- OUELLET, S.; BUSSIÈRE, B.; AUBERTIN, M.; BENZAAZOUA, M. Microstructural evolution of cemented paste backfill: Mercury intrusion porosimetry test results. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 1654–1665, 2007.
- PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; KOVALCHUCK, G.; ORDOÑEZ, L. M.; NARANJO, M. C. Opc-fly ash cementitious systems: Study of gel binders produced during alkaline hydration alkaline hydration. **Journal of Materials Science**, v. 42, p. 2958–2966, 2007.
- POURAKBAR, S.; ASADI, A.; HUAT, B. B. K.; CRISTELO, N.; FASIHNKOUTALAB, M. H. Application of Alkali-Activated Agro-Waste Reinforced with Wollastonite Fibers in Soil Stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 2, p. 04016206, 2017.
- PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 40–48, 2018.

- PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report**. New Jersey: Springer, 2014.
- RIOS, S.; CRISTELO, N.; VIANA DA FONSECA, A.; FERREIRA, C. Stiffness Behavior of Soil Stabilized with Alkali-Activated Fly Ash from Small to Large Strains. **International Journal of Geomechanics**, v. 17, n. 3, p. 04016087, 2017.
- SALDANHA, R. B.; DA ROCHA, C. G.; CAICEDO, A. M. L.; CONSOLI, N. C. Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 298, p. 123648, 2021.
- SAMUEL, R.; PUPPALA, A. J.; RADOVIC, M. Sustainability benefits assessment of metakaolin-based geopolymer treatment of high plasticity clay. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 24, p. 1–14, 2020.
- SARGENT, P. The development of alkali-activated mixtures for soil stabilisation. In: **Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes**. [s.l: s.n.]. p. 555–604, 2015.
- SEPLAG. Clima, temperatura e precipitação - Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul. **Secretária de Planejamento, Orçamento e Gestão**, p. 1–5, 2021
- SINGH, G. V. P. B.; SUBRAMANIAM, K. V. L. Influence of processing temperature on the reaction product and strength gain in alkali-activated fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, n. September 2018, p. 10–18, 2019.
- STAFFORD, F. N.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J. A.; HOTZA, D. Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1293–1299, 2016
- SULTANA, M. S.; RAHMAN, A. **Characterization of Calcined Sugarcane Bagasse Sugarcane Waste Ash for Industrial Use**. International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering 2013. **Anais...**Bangladesh: 2013.
- VANDEGINSTE, V. Food waste eggshell valorization through development of new composites: A review. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 29, n. June, p. e00317, 2021.