



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL**  
**CAMPUS ERECHIM**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**JÚLIA KLIPEL PAIXÃO**

**LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL DE  
CASCA DE OVO APLICADO NO MELHORAMENTO DE SOLO RESIDUAL DE  
BASALTO**

**ERECHIM**

**2022**

**JÚLIA KLIPEL PAIXÃO**

**LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL DE  
CASCA DE OVO APLICADO NO MELHORAMENTO DE SOLO RESIDUAL DE  
BASALTO**

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.

Orientador(a): Prof. Dr. Eduardo Pavan Korf.  
Coorientador(a): Me. Giovani Jordi Bruschi

**ERECHIM**

**2022**

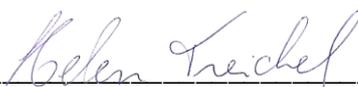
**JÚLIA KLIPEL PAIXÃO**

**LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL DE  
CASCA DE OVO APLICADO NO MELHORAMENTO DE SOLO RESIDUAL DE  
BASALTO**

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.

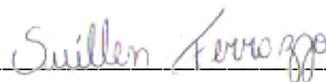
Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em: 07/04/2022.

BANCA EXAMINADORA



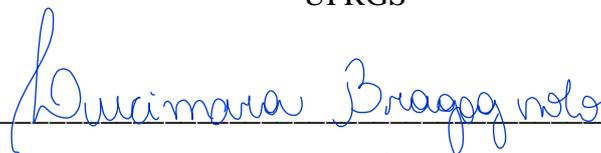
Prof. Dr. Helen Treichel

UFFS



Me. Suéllen Tonatto Ferrazzo

UFRGS



Me. Lucimara Bragagnolo

UPF

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha família por sempre me incentivar a seguir em frente, por todo zelo e dedicação em me manter estudando. Agradeço ao meu professor orientador Eduardo Pavan Korf pela orientação, oportunidades e confiança depositada em mim durante esse período de trabalho junto ao grupo de pesquisa. Agradeço a todos os professores do curso por toda dedicação e conhecimento repassado ao longo dos cinco anos dessa jornada acadêmica.

Ao Giovani, à Suéllen e principalmente ao Jonas e ao William, por todo o conhecimento experimental e técnico repassado, por me auxiliarem em incontáveis dias e noites de ensaios, tornando a realização deste trabalho possível. À Inete, à Maria Alice, à Carolina, ao Paulo, ao Maycon e aos técnicos de laboratório, que me ajudaram em alguns experimentos.

Por fim, quero agradecer a todos os amigos que me aturaram e ajudaram a superar cada obstáculo, seguir a diante e não desistir, em especial aos amigos que fiz durante a graduação, Inete, Drika, Rafaela, Diana, Aline e Mateus, que passaram por isso ao meu lado. Quero também demonstrar minha gratidão a todos os envolvidos na minha formação acadêmica e pessoal que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

## LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL DE CASCA DE OVO APLICADO NO MELHORAMENTO DE SOLO RESIDUAL DE BASALTO

Júlia Klipel Paixão<sup>1</sup>, Giovani Jordi Bruschi<sup>2</sup>, Eduardo Pavan Korf<sup>3</sup>

### RESUMO

Solos residuais são caracterizados pela alta presença de parcela argilosa, entretanto apresentam propriedades geotécnicas particulares, como um comportamento altamente drenante, índices de vazios elevados e uma leve cimentação natural entre as partículas. A técnica de compactação é difundida para o melhoramento de solos finos; contudo, para solos residuais a ação da compactação leva à quebra da cimentação das partículas. Com isso, um tratamento indicado para este tipo de solo consiste na aplicação orientada de agentes cimentantes, aliados a um ativador alcalino. Neste contexto, o estudo desenvolveu um ligante álcali-ativado (LAA) de cinza de casca de arroz (CCA) e cal de casca de ovo hidratada (CCOH), e avaliou melhoramento de solo residual de basalto (SRB) compactado. Um planejamento experimental foi realizado a fim de analisar a resistência à compressão simples (RCS) do ligante considerando distintos teores de cinza/cal e molaridade da solução. A RCS das misturas SRB-LAA também foi investigada, adotando diferentes pesos específicos aparente secos e teores de LAA e umidade inicial. Uma resistência de 857 kPa foi atingida em 7 dias de cura à 23 °C. Os resultados de RCS foram correlacionados com o índice porosidade/teor volumétrico de ligante ( $\eta/B_{iv}$ ), em que se obteve o índice  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$  como parâmetro mais adequado para avaliar a estabilização do SRB. Os resultados mostraram que maiores teores de ligante LAA, teores de umidade inicial e peso específico resultaram em maiores resultados de RCS.

Palavras-chave: Solo residual de basalto; Ativação alcalina; Resíduos agroindustriais; Resistência à compressão simples; Índice porosidade/teor de ligante.

---

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

<sup>2</sup> Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS 90035-190, Brasil. E-mail: gio.bruschi@gmail.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

## 1 INTRODUÇÃO

Solos residuais constituem cerca de 38% da superfície terrestre e, por isso, inúmeras obras de engenharia são executadas sobre estes solos (OLIVEIRA, 2011). Estes solos possuem ampla relevância no campo da engenharia, apresentando aplicações como o suporte de cargas geradas por edificações ou, até mesmo, como material de construção em estradas, aterros sanitários e barragens de terra (DIEMER et al., 2008). No entanto, para sua utilização, se faz necessária a caracterização adequada de suas propriedades geotécnicas, tendo em vista que o desconhecimento das propriedades do solo pode comprometer o empreendimento (DIEMER et al., 2008). Solos residuais são caracterizados por apresentar um comportamento altamente drenante, índices de vazios elevados e uma leve cimentação natural entre as partículas (MARQUES; CONSOLI; SOUSA, 2014).

Para o melhoramento de solos finos, a técnica de compactação é amplamente difundida; contudo, para solos residuais a ação da compactação leva à quebra da cimentação das partículas. Neste sentido, a estabilização desse tipo de solo, quando utilizado em condição compactada, pode ser realizada através da aplicação orientada de uma variedade de aditivos químicos, resultando em materiais com melhores propriedades mecânicas (BASHA et al., 2005). Técnicas bem estabelecidas de estabilização de solo são frequentemente utilizadas para obter materiais geotécnicos melhorados através da adição de agentes cimentantes ao solo, como cimento Portland e cal (BASHA et al., 2005). Entretanto, o processo produtivo de ligantes tradicionais está diretamente atrelado à impactos ambientais causados pela exploração de recursos naturais não renováveis, alto consumo energético e emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (OBENAU-EMLER; FALAH; ILLIKAINEN, 2020).

Como alternativa sustentável para substituir agentes estabilizadores convencionais como o Cimento Portland e cal, destaca-se o processo de álcali-ativação, em que resíduos podem ser utilizados como precursores para a produção de ligantes alternativos (MILLER; CUNNINGHAM; HARVEY, 2019). A cinza de casca de arroz é um exemplo de resíduo industrial com elevado nível de pozolanicidade e reatividade química (MILLER; CUNNINGHAM; HARVEY, 2019). Por sua vez, a casca de ovo é outro resíduo de origem agroindustrial que quando reciclado corresponde a uma rica fonte de carbonado de cálcio ao sistema, além de ser constituída por elevadas quantidades de óxido de cálcio, podendo variar de 85 a 92% (BENSAIFI et al., 2019).

Sabendo que a aplicação destas pozolanas naturais como ligantes alternativos em solos, não somente minimiza a quantidade de resíduos depositados em aterros, como também

reduz a extração de recursos naturais e melhora o comportamento de solos residuais, esta pesquisa avaliará a estabilização do solo residual de basalto quando adicionado um sistema ligante álcali-ativado (LAA) de precursores alternativos, cinza de casca de arroz e cal de casca de ovo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa foram utilizados: solo residual de basalto, como material a ser estabilizado; cal de casca de ovo, como fonte de cálcio; cinza de casca de arroz, como fonte de silicato; e NaOH, como ativador alcalino. O solo residual foi coletado em talude de uma empresa da área de britagem localizada no município de Erechim, Rio Grande do Sul (RS). Por sua vez, a cal foi produzida, em laboratórios da UFFS campus Erechim, a partir de cascas de ovos obtidas em uma padaria, no mesmo município. O processo de produção da cal compreendeu: lavagem, secagem e trituração das cascas de ovo em moinho de facas, calcinação em forno mufla (6 horas, 1050 °C), hidratação por 48 horas, secagem em estufa ventilada por 48 horas e posterior passagem do material por peneira de 75 µm. A cinza de casca de arroz foi obtida de uma termelétrica, localizada no interior do RS. A CCA e o solo residual de basalto foram secos em estufa ventilada à 50 °C durante 48 horas e estufa não-ventilada à 105 °C durante 48 horas, respectivamente.

A CCA foi submetida à uma avaliação ambiental para determinar a classificação do resíduo quanto a sua periculosidade. Além disso, foi realizada a caracterização física de todos os materiais de acordo com as informações apresentadas no Quadro 1.

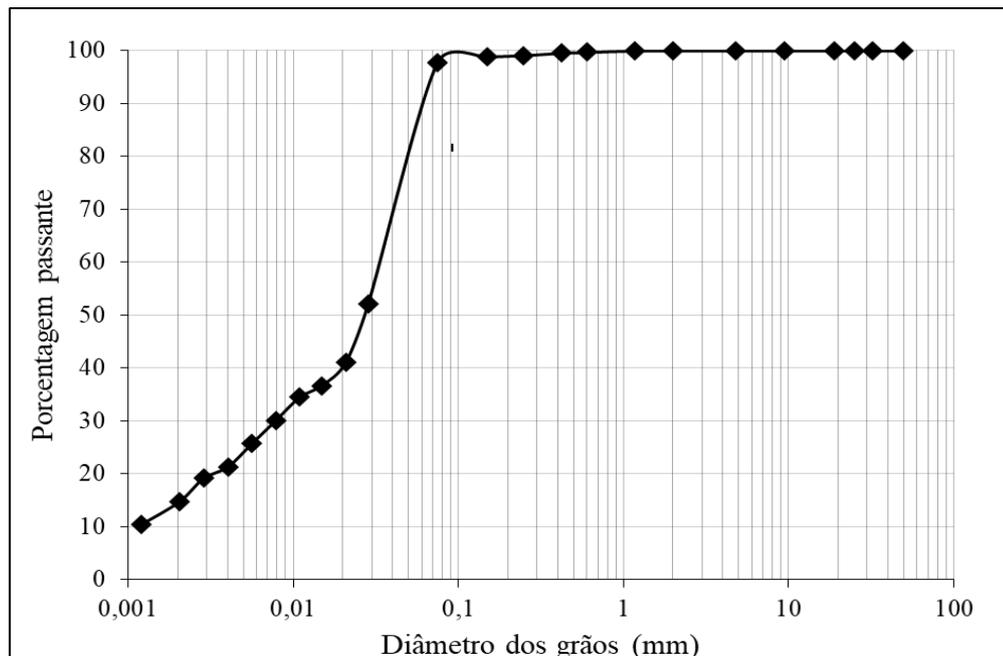
O ensaio de granulometria por sedimentação foi realizado, obtendo a curva granulométrica do solo residual de basalto com o uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio), como apresentado na Figura 1. Os resultados da análise granulométrica evidenciam a predominância de fração siltosa (48,28%), seguido de 40,48% de areia fina e 10,37% de argila. As frações de areia média grossa foram de 0,59 e 0,29%, respectivamente.

Quadro 1 – Caracterização dos materiais que serão utilizados

Análise	Resposta	Material		
		Cal de casca de ovo hidratada (CCOH)	Cinza de casca de arroz (CCA)	Solo residual de basalto (SRB)
Física	Distribuição granulométrica	-	-	NBR 7181: Solo – Análise granulométrica (ABNT, 2018)
	Massa específica das partículas	NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica (ABNT, 2017)	NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica (ABNT, 2017)	NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente (ABNT, 2009)
	Limite de liquidez	-	-	NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez (ABNT, 2017)
	Limite de plasticidade	-	-	NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade (ABNT, 2017)
Ambiental	Classificação do resíduo	-	NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação (ABNT, 2004)	-

Fonte: Autora (2022)

Figura 1 – Curva granulométrica solo residual de basalto



Fonte: Autora (2022)

Além disso, a Tabela 1 apresenta uma síntese das demais características físicas dos materiais empregados nesse estudo. Por fim, realizou-se análise da composição química da CCOH, apresentando-se como uma fonte rica em cálcio, equivalente a 72,90 % de CaO e demais porcentagens correspondendo à: 1,17 % de MgO, 0,15 % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,13 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 0,12 % de SiO<sub>2</sub>.

Tabela 1 – Propriedades físicas dos materiais

Propriedade	SRB	CCA	CCOH
Limite de liquidez (%)	44,55	-	-
Limite de plasticidade (%)	39,38	-	-
Índice de plasticidade	5,17	Não plástica	Não plástica
Massa específica real dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,76	2,31	2,24

Fonte: Autora (2022)

A determinação de uma relação de ligante fora realizada através da produção de pastas álcali-ativadas com relação sólido/líquido de 1, determinada através de testes preliminares, e diversas relações cinza/cal e concentrações de solução de NaOH. No Quadro 2 estão apresentadas as variáveis de pesquisa e respectivos valores adotados nos ensaios. A combinação dos níveis das variáveis, em duplicata, resultou em 80 pastas álcali-ativadas.

Quadro 2 – Variáveis de pesquisa para desenvolvimento de LAA

Relação cinza/cal	Concentração de NaOH (M)
	0,5
90/10	1,0
80/20	1,5
70/30	2,0
60/40	2,5
50/50	3,0
	3,5
	4,0

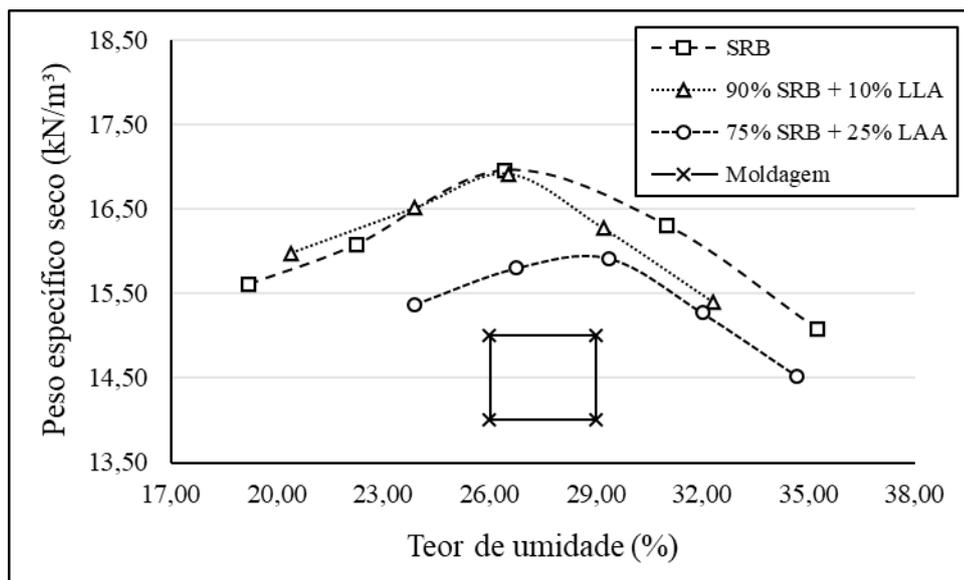
Fonte: Autora (2022)

As misturas dos materiais foram acondicionadas em tubos de PVC e, posteriormente, curados por 7 dias, com temperatura controlada de 23 °C e umidade relativa de 95% (ASTM, 2013). Após a remoção dos corpos de prova dos recipientes de acondicionamento, os mesmos foram submetidos à avaliação de resistência à compressão não-confinada, conforme C39 (ASTM, 2010). As respostas obtidas foram submetidas à análise de variância e ao teste de

Tukey com confiabilidade de 95% e significância de 5%, resultando na determinação da concentração molar e na melhor relação CCA/CCOH a ser utilizada.

O SRB foi submetido ao ensaio de compactação Proctor de energia modificada, conforme D1557 (ASTM, 2012), onde obteve-se o valor de umidade ótima e determinou-se uma faixa de peso específico seco a ser estudada. Para a estabilização do SRB, foram avaliadas relações SRB/LAA de 90/10 e 75/25, com resultados do ensaio de compactação Proctor com energia modificada apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Ensaio de compactação e pontos de moldagem



Fonte: Autora (2022)

Visando explorar uma faixa de porosidades e considerando as limitações associadas a moldagem, foram definidos os valores de pesos específicos secos. A avaliação da influência do teor de umidade nas misturas e do teor de ligante foram determinadas por meio de testes preliminares.

Afim de avaliar a RCS das misturas, utilizou-se um planejamento fatorial completo, com 3 fatores e pontos axiais face centrados ( $\alpha = 1$ ). As combinações foram realizadas em duplicata, com 16 pontos fatoriais, 12 pontos axiais e 8 pontos centrais, resultando em 36 corpos de prova, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Fatores controláveis e nível do planejamento experimental

Fatores controláveis	Nível inferior	Ponto central	Nível superior
	-1	0	+1
Teor de ligante (%)	10	17,5	25
Peso específico (kN.m <sup>-3</sup> )	14	14,5	15
Teor de umidade inicial (%)	26	27,5	29

Fonte: Autora (2022)

A moldagem dos corpos de prova seguiu os procedimentos de subcompactação de Ladd (1978): material compactado estaticamente em três camadas em um corpo de prova cilíndrico (50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento), para os valores de peso específicos seco, teor de umidade e de LAA alvo. Após a medição de seus pesos, diâmetros e alturas, com precisão de 0,01 g e 0,1 mm, cada amostra foi inserida em uma embalagem hermética para curar por 7 dias à temperatura controlada de 23 °C e umidade relativa de 95% (ASTM, 2013).

De acordo com o proposto por Consoli, Rosa e Saldanha (2011), 24 horas antes de completar o tempo de cura, os corpos de prova foram imersos em água durante a fim de reduzir sua sucção e, após, foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão simples (RCS) com prensa automática com capacidade de carga de 100 t, seguindo a NBR 12025 (ABNT, 2012).

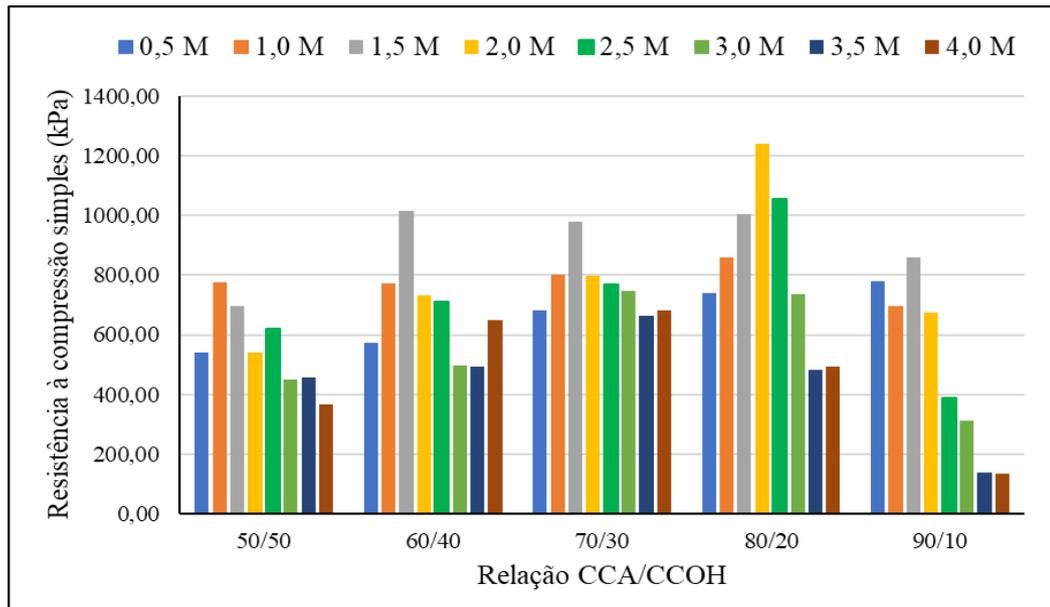
Por fim, os resultados de RCS foram expressos em função do índice de porosidade/teor volumétrico de ligante proposto por Consoli (2018).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO

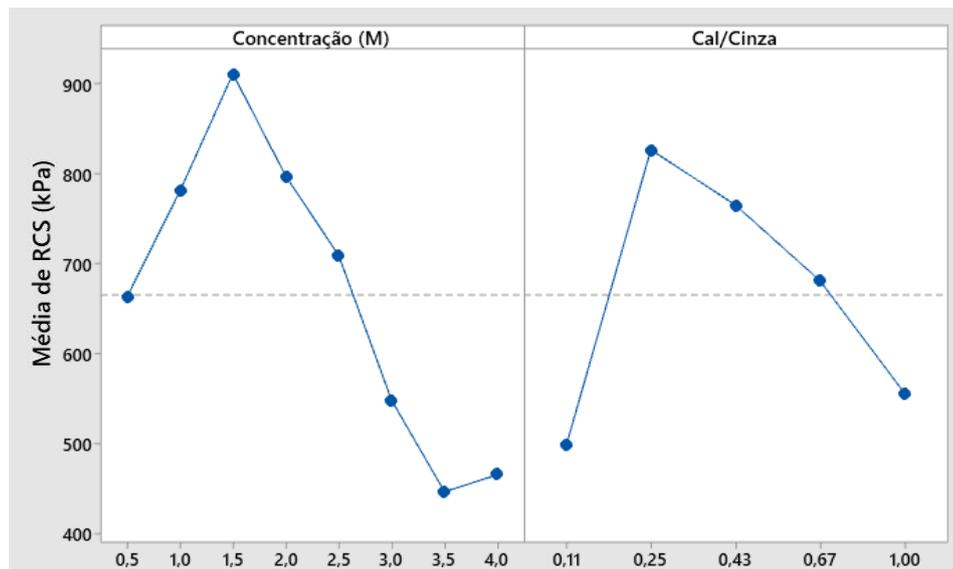
Inicialmente, realizou-se a avaliação da composição do LAA, examinando uma ampla gama de razões de CCA/CCOH e concentrações molares de ativador alcalino variando conforme Quadro 2. Os resultados estão apresentados no gráfico da Figura 3 e os efeitos dos fatores sobre a RCS, na Figura 4.

Figura 3 – Resistência à compressão simples das amostras de LAA



Fonte: Autora (2022)

Figura 4 – Efeitos sobre a RCS das amostras de LAA



Fonte: Autora (2022)

Como observado, a relação entre os fatores e a resistência à compressão simples não é linear, mas a concentração molar é o fator com maior influência sobre as respostas. De modo geral, maiores resultados foram obtidos na relação CCA/CCOH de 80/20 e concentrações de solução de 1,5 M. Os resultados foram submetidos a uma avaliação estatística, através de análise de variância e teste de Tukey com 95 % de confiança. A Tabela 3 apresenta os resultados da comparação múltipla de médias de RCS das amostras analisadas. Após análise e

considerando o fator ambiental em amostras que não diferem entre si, optou-se por utilizar o conjunto de dados de concentração de NaOH de 1 M e relação CCA/CCOH de 80/20.

Tabela 3 – Comparação múltipla de médias pelo Teste de Tukey

Interação Molaridade*Cal/cinza	Repetições	Média	Agrupamento <sup>1</sup>							
2,00,25	2	1239,04	A							
2,50,25	2	1055,59	A	B						
1,50,67	2	1016,16	A	B	C					
1,50,25	2	1005,68	A	B	C	D				
1,50,43	2	978,03	A	B	C	D				
1,00,25	2	859,66	A	B	C	D	E			
1,50,11	2	858,81	A	B	C	D	E			
1,00,43	2	801,53		B	C	D	E	F		
2,00,43	2	796,68		B	C	D	E	F		
0,50,11	2	779,98		B	C	D	E	F	G	
1,01,00	2	774,10		B	C	D	E	F	G	
1,00,67	2	770,53		B	C	D	E	F	G	
2,50,43	2	769,05		B	C	D	E	F	G	
3,00,43	2	747,45		B	C	D	E	F	G	H
0,50,25	2	739,02		B	C	D	E	F	G	H
3,00,25	2	735,18		B	C	D	E	F	G	H
2,00,67	2	732,81		B	C	D	E	F	G	H
2,50,67	2	711,59		B	C	D	E	F	G	H
1,00,11	2	697,66		B	C	D	E	F	G	H I
1,5 1,00	2	695,07		B	C	D	E	F	G	H I
4,00,43	2	682,80		B	C	D	E	F	G	H I
0,50,43	2	682,56		B	C	D	E	F	G	H I
2,00,11	2	675,20		B	C	D	E	F	G	H I
3,50,43	2	661,96		B	C	D	E	F	G	H I
4,00,67	2	650,08			C	D	E	F	G	H I
2,5 1,00	2	619,14				D	E	F	G	H I
0,50,67	2	574,17					E	F	G	H I
2,01,00	2	541,49					E	F	G	H I
0,5 1,00	2	540,25					E	F	G	H I
3,00,67	2	496,51					E	F	G	H I J
4,00,25	2	494,96					E	F	G	H I J
3,50,67	2	494,70					E	F	G	H I J
3,50,25	2	482,06					E	F	G	H I J
3,5 1,00	2	457,99						F	G	H I J
3,01,00	2	449,83						F	G	H I J
2,50,11	2	389,89							G	H I J
4,0 1,00	2	368,19								H I J
3,00,11	2	312,55								I J
3,50,11	2	136,92								J
4,00,11	2	131,83								J

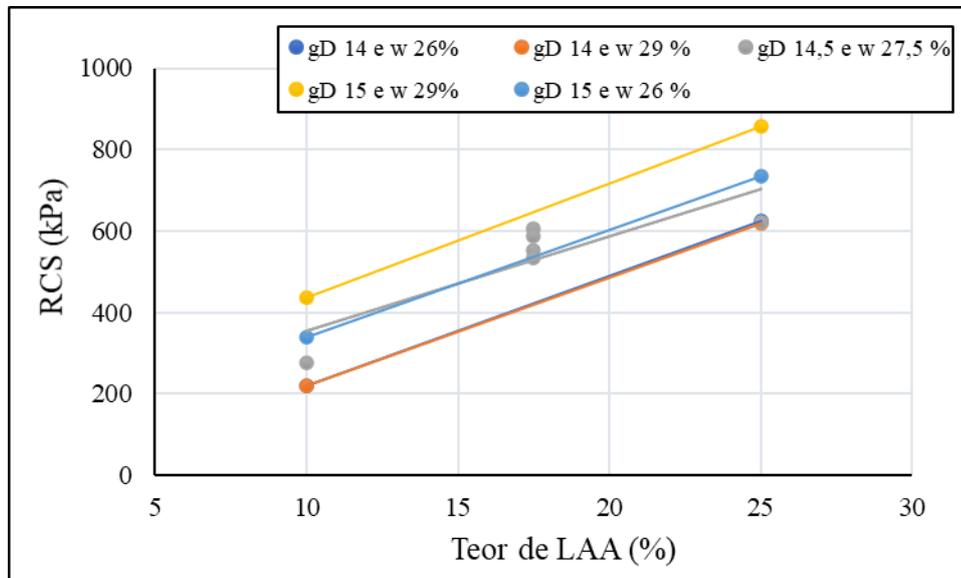
<sup>1</sup>Médias que não compartilham uma letra são estatisticamente diferentes

Fonte: Autora (2022)

### 3.2 MISTURAS SRB-LAA

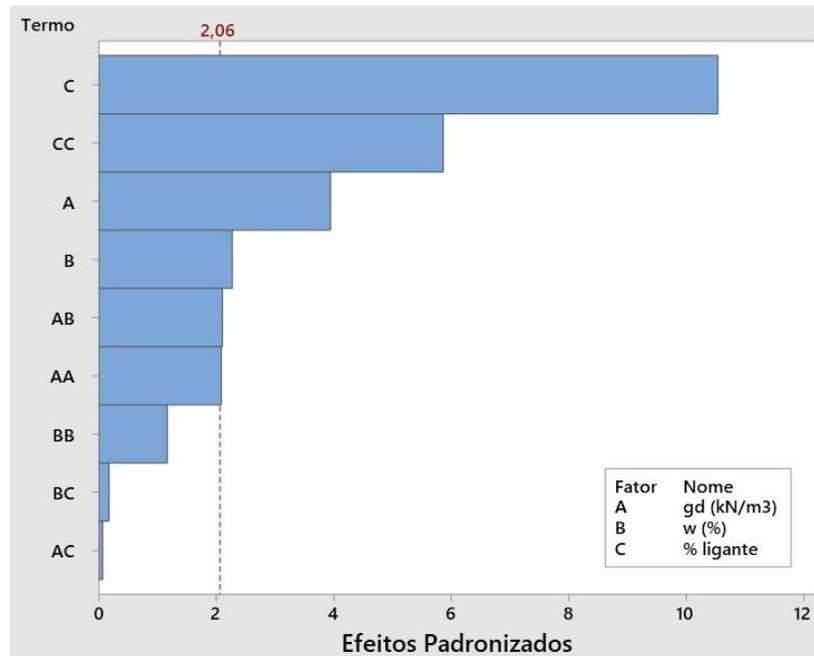
Nos resultados médios de RCS para as misturas de SRB-LAA (Figura 5), nota-se que maiores valores de peso específico, teor de umidade e teor de ligante resultaram em maiores resistências. De modo geral, o melhor tratamento SRB-LAA (25% LAA, 29%  $w$  e  $15 \text{ kN/m}^3 \gamma_d$ ) atingiu uma RCS média de 857 kPa em 7 dias de cura à  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Na Figura 6 é apresentado o resultado da análise estatística em que é possível avaliar a influência das variáveis controláveis e suas interações. O teor de ligante foi o fator com maior influência sobre a RCS, apresentando um comportamento não linear (valor  $p < 0,05$ ), seguido da umidade e peso específico.

Figura 5 – Resultados médios de RCS para misturas SRB-LAA



Fonte: Autora (2022)

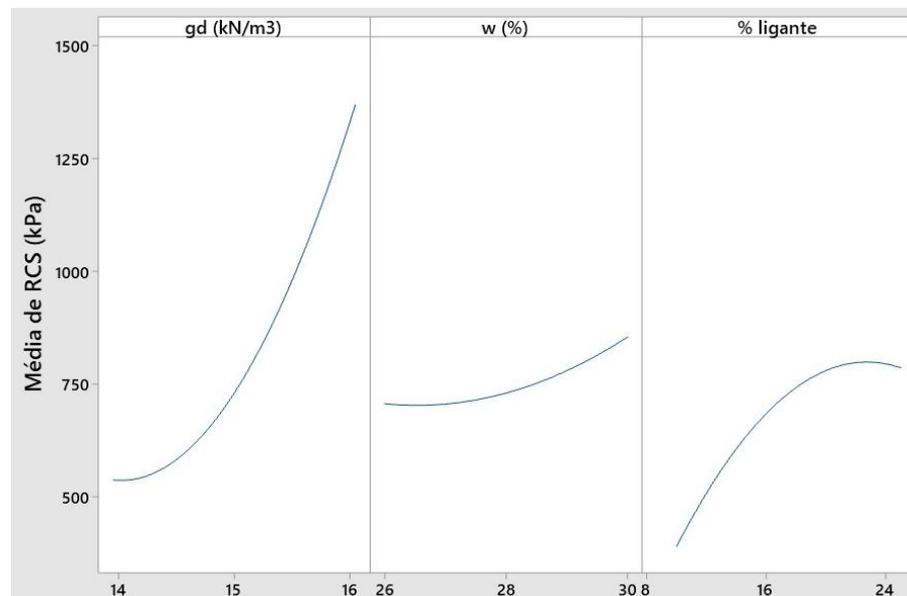
Figura 6 – Gráfico de Pareto para RCS de misturas SRB-LAA



Fonte: Autora (2022)

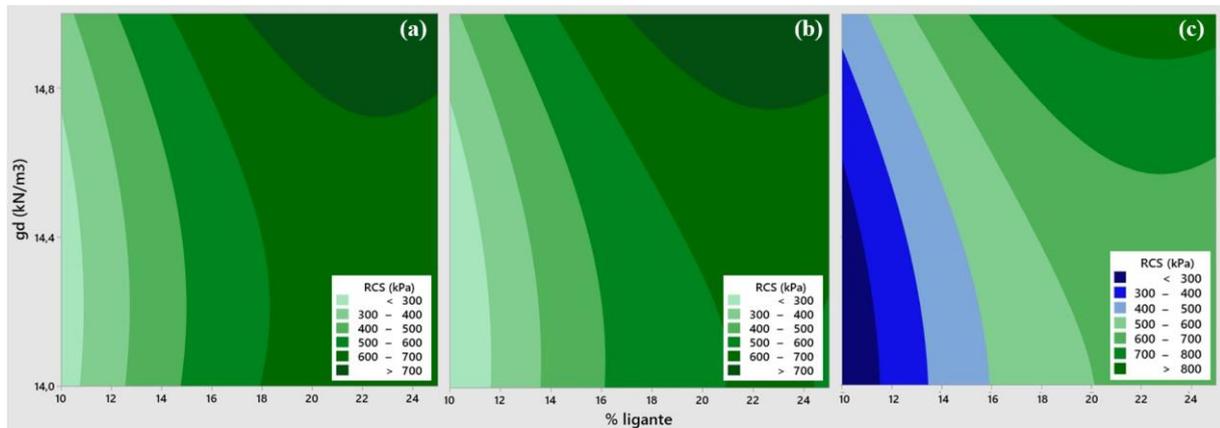
No gráfico apresentado na Figura 7, nota-se que os fatores controláveis influenciam de forma positiva sobre os valores de RCS, ou seja, o aumento desses fatores resulta em maiores resultados de RCS. Entretanto, como apresentado anteriormente (Figura 6), a variável umidade possui menor influência nos resultados. Sendo assim, na Figura 8, é possível visualizar a superfície de resposta para valores fixados de umidade em 26, 27,5 e 29 %.

Figura 7 – Principais efeitos sob a RCS de misturas SRB-LAA



Fonte: Autora (2022)

Figura 8 – Superfície de contorno de RCS para umidades fixadas em (a) 26 %, (b) 27,5 % e (c) 29 %



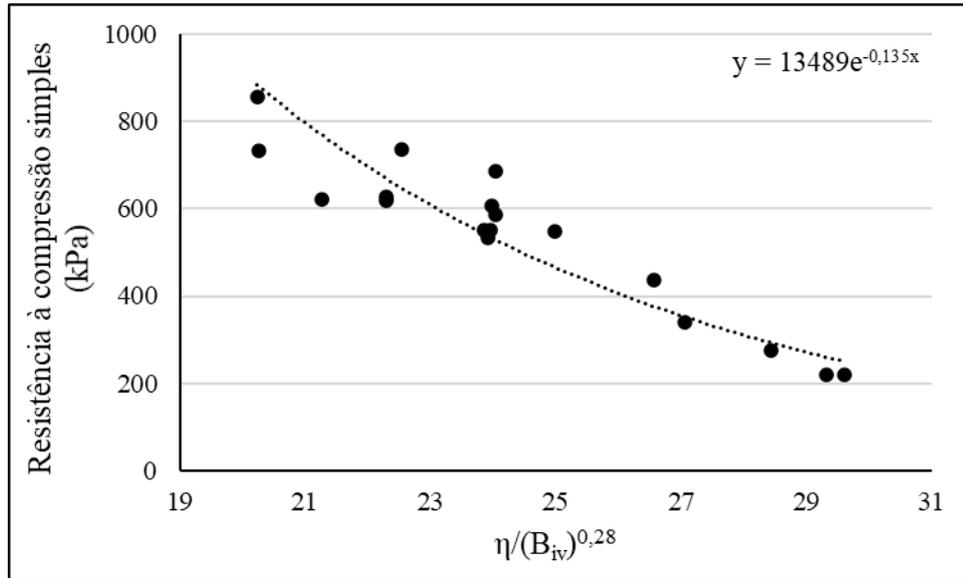
Fonte: Autora (2022)

Na Figura 8, observa-se que ambos fatores (teor de LAA e peso específico) influenciam significativamente de forma positiva nos resultados de RCS das misturas SRB-LAA, de forma significativa. O comportamento é explicado pelo comportamento não linear da interferência teor de LAA. O aumento do teor de LAA nas misturas promove a maior precipitação de agentes cimentantes, contribuindo para a maximização da RCS. Por outro lado, o aumento no peso específico aparente seco diminui a porosidade da mistura, aumentando os pontos de contato entre as partículas, contribuindo positivamente nos valores de resistência.

### 3.3 RELAÇÃO DA RCS COM O ÍNDICE POROSIDADE/TEOR DE LAA ( $\eta/B_{iv}$ )

A fim de analisar as taxas de mudança na RCS com a relação de porosidade/teor de ligante, avaliou-se o comportamento apresentado na Figura 9. O expoente 0,28 foi calculado e aplicado ao parâmetro de teor de LAA, buscando melhorar o ajuste aos resultados de resistência. Na Figura 9 é possível observar que a redução da relação entre porosidade e teor de ligante corresponde a maiores valores de RCS. Tal comportamento é explicado considerando que elevados resultados de resistência estão atrelados à maiores valores de peso específico aparente seco, variável inversamente proporcional à porosidade da mistura SRB-LAA.

Figura 9 – Relação entre RCS e  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$  para misturas de SRB-LAA



Fonte: Autora (2022)

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista os resultados obtidos, apresentam-se as seguintes considerações finais:

- O efeito da concentração molar da solução e da relação CCA/CCOH sobre a RCS das pastas álcali-ativadas não ocorre de forma linear. Considerando análise estatística e avaliação ambiental sobre a molaridade da solução, o LAA desenvolvido e utilizado no trabalho foi de concentração da solução de NaOH de 1 M e relação CCA/CCOH de 80/20;
- Maiores teores de ligante álcali-ativado, teores de umidade inicial e peso específico resultaram em maiores resultados de RCS. A mistura SRB-LAA que apresentou melhor comportamento atingiu 857,00 kPa para 29 % de umidade, 25 % de LAA e peso específico aparente seco de 15 kN/m<sup>3</sup>;
- A resistência das misturas SRB-LAA foi influenciada significativamente por todas as variáveis avaliadas (teor de ligante, peso específico aparente seco e teor de umidade inicial), mas principalmente por teor de ligante;
- O índice  $\eta/(B_{iv})^{0,28}$  se demonstrou um parâmetro adequado para avaliar a estabilização do solo, em que, reduzindo a porosidade e aumentando o teor de ligante, aumenta-se a resistência das misturas.

Por fim, para trabalhos futuros, sugere-se o estudo de outros tempos e temperaturas de cura, afim de obter melhores resultados de RCS.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. **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, 2012.

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

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

\_\_\_\_\_. **C511**: Standard specification for mixing rooms, moist cabinets, moist rooms, and water storage tanks used in the testing of hydraulic cements and concretes. Pennsylvania, 2013.

\_\_\_\_\_. **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.

BASHA, E. A. et al. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 6, p. 448-453, 2005.

BENSAIFI, E. et al. Influence of crushed granulated blast furnace slag and calcined eggshell waste on mechanical properties of a compacted marl. **Transportation Geotechnics**, v. 20, n. May, 2019.

CONSOLI, N. C.; ROSA, A. D.; SALDANHA, R. B. Variables governing strength of compacted soil - fly ash - lime mixtures. **Journal of materials in civil engineering**. v. 23, m. 4, p. 432-440, 2011.

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.

DIEMER, F. et al. Propriedades geotécnicas do solo residual de basalto da região de Ijuí/RS. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.12, p.25-36, 2008.

LADD, R. Preparing test specimens using under compaction. **Geotechnical Testing Journal**, v. 1, p. 16–23, 1978.

MARQUES, S. F. V.; CONSOLI, N. C.; SOUSA, J. A. e. Testing cement improved residual soil layers. **Journal of materials in civil engineering**, v. 26, n. 3, p. 544-550, 2014.

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

OBENAU-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.

OLIVEIRA, C. P. **Comportamento mecânico de um solo residual naturalmente cimentado**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.