

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Comportamento de solo expansivo estabilizado por ligante  
álcali-ativado oriundo de resíduos: sustentabilidade,  
propriedades mecânicas e microestruturais

MARIANA TONINI DE ARAÚJO

Porto Alegre  
2022

MARIANA TONINI DE ARAÚJO

**COMPORTAMENTO DE SOLO EXPANSIVO  
ESTABILIZADO POR LIGANTE ÁLCALI-AATIVADO  
ORIUNDO DE RESÍDUOS: SUSTENTABILIDADE,  
PROPRIEDADES MECÂNICAS E  
MICROESTRUTURAIS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como requisito para a obtenção do título de Doutora em Engenharia

Orientação: Prof. Dr. Nilo César Consoli  
Coorientação: Prof. Dra. Cecília Gravina da Rocha

Porto Alegre  
2022

MARIANA TONINI DE ARAÚJO

**COMPORTAMENTO DE SOLO EXPANSIVO  
ESTABILIZADO POR LIGANTE ÁLCALI-AATIVADO  
ORIUNDO DE RESÍDUOS: SUSTENTABILIDADE,  
PROPRIEDADES MECÂNICAS E  
MICROESTRUTURAS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para obtenção do título de  
Doutora em Engenharia.

Porto Alegre, 25 de novembro de 2022

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Ph.D. Concordia University, Canada  
Orientador

Prof. Cecília Gravina da Rocha  
Dra. Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Coorientador

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Guilherme Jorge Brigolini Silva**  
Dr. Universidade Federal de Minas Gerais

**Prof. Rodrigo Beck Saldanha**  
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do  
Sul

**Prof. Pedro Domingos Marques Prietto**  
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do  
Sul

**Prof. Karla Salvagni Heineck**  
Dra. Universidade Federal do Rio Grande do  
Sul

### CIP - Catalogação na Publicação

Tonini de Araújo, Mariana

Comportamento de solo expansivo estabilizado por  
ligante álcali-ativado oriundo de resíduos:  
sustentabilidade, propriedades mecânicas e  
microestruturais / Mariana Tonini de Araújo. -- 2022.  
323 f.

Orientador: Nilo César Consoli.

Coorientador: Cecília Gravina da Rocha.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,  
BR-RS, 2022.

1. Engenharia geotécnica. 2. Estabilização química.  
3. Material álcali-ativado. 4. Reutilização de  
resíduos industriais. 5. Sustentabilidade. I. César  
Consoli, Nilo, orient. II. Gravina da Rocha, Cecília,  
coorient. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

À CAPES e ao CNPq, pelo fomento à pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Nilo Cesar Consoli, e à minha coorientadora, Prof. Cecília Gravina da Rocha, pelo apoio, orientação e amizade.

Aos meus pais, Beline e Adriana, aos meus irmãos, Laura e Gabriel, e à minha madrastra Karina pelo apoio incondicional, atenção, amor e incentivo.

À minha família por se fazer sempre presente mesmo estando tão distante, em especial aos meus Avôs Orlandina e Benedito, às minhas tias Ana e Janete, e às minhas primas Juliana, Luiza e Lorena.

Às amigas do Colégio Santo Agostinho, Amanda, Carol, Maíra, Natália, Malu, Lorena, Iara e Laura pela amizade sólida de tantos anos. Aos amigos da UFMG Thaianne, Vanessa, Nábila, Bia, Elisa, Luiza Lauro, Luiza Clara, Possidônio, Camila, Davidson, Emília e Pedro por toda troca e por sempre torcerem por mim e me incentivarem nos momentos difíceis.

Aos amigos que fiz na UFRGS, agradeço primeiramente à Suéllen, minha grande companheira de doutorado e umas das pessoas mais carinhosas e gentis que já conheci. À Bruna Hoch, minha querida companheira de intercâmbio, agradeço por todo apoio, carinho, alegrias partilhadas e acolhimento em terras estrangeiras. Ao Giovani, meu amigo para todos os momentos, agradeço pelo acolhimento em terras gaúchas e pelas trocas tão construtivas. À Camila Martinatto, minha companheira de cafés, agradeço pelo apoio e por me mostrar a importância de ser vulnerável. À Carol, minha amiga disposta a tudo para ajudar, agradeço pelas risadas partilhadas e momentos de afeto. Ao Gustavo Dias Macedo, meu amigo mineiro no Sul, obrigada pelos encontrinhos regados a risadas, filmes e comilança. À Luana, minha amiga alto-astral, agradeço pelas conversas e por me mostrar um lado mais bonito da vida. Agradeço também aos amigos Mariana Carretta, Mariana Chrusciak, Brenda, Hélder, Laís, Andressa, Gledsa e Flávio.

À Kaora por ter compartilhado morada comigo ao longo de três anos. Obrigada pelo carinho, pela escuta amiga, por entender meus momentos difíceis, me incentivar e acolher.

## RESUMO

ARAUJO, M. T. Comportamento de solo expansivo estabilizado por ligante álcali-ativado oriundo de resíduos: sustentabilidade, propriedades mecânicas e microestruturais. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Materiais usuais em processos de estabilizações química, a cal e o cimento possuem elevado consumo energético e alta emissão de gases de efeito estufa. Materiais álcali-ativados são uma alternativa mais sustentável para a estabilização de solos. Há uma lacuna científica relacionada a inclusão de uma avaliação de sustentabilidade envolvendo os pilares ambiental, econômico e social em estudos acerca de solos expansivos estabilizados por processos de álcali-ativação. Para preencher esta lacuna, este trabalho visa estudar o comportamento mecânico e microestrutural e a sustentabilidade de um solo expansivo estabilizado por meio da ativação alcalina de uma mistura de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (resíduo da indústria de produção de açúcar) e cal de casca de ovo hidratada (oriunda de resíduo de casca de ovo). Uma comparação da ativação alcalina com as propriedades mecânicas e avaliação de sustentabilidade do mesmo solo estabilizado por cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) foi realizada. Para se alcançar os objetivos citados, testes de resistência à compressão simples e diametral, ensaio de pulso ultrassônico, sucção matricial, durabilidade por molhagem-secagem e escovação e expansão livre foram realizados em misturas solo-ligante álcali-ativado e solo-cimento Portland. Os resultados mecânicos foram relacionados ao índice porosidade/teor volumétrico do agente cimentante ( $\eta/B_{iv}^a$ ). Misturas álcali-ativadas foram avaliadas por meio de análises de microscopia, espectrometria no infravermelho por transformada de Fourier, difração e fluorescência de raios x. Uma avaliação do ciclo de vida ambiental, econômico e social foi realizada para analisar a sustentabilidade do ligante álcali-ativado frente ao cimento Portland. Para ambos ligantes uma correlação significativa foi obtida entre o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  e a resistência à compressão simples e diametral, módulo cisalhante inicial e durabilidade. As misturas apresentaram resultados mecânicos similares quando curadas a temperatura de 23°C: resistência à compressão simples próxima a 5 MPa para amostras de alta densidade/alto teor de ligante com 30% de teor de umidade, e resistência à tração por compressão diametral de 0,6 MPa para amostras de alta densidade/alto teor de ligante com 28% de teor de umidade. Análises de DRX e MEV-EDS para o solo-ligante álcali-ativado identificaram, respectivamente, a presença de fase amorfa atribuída a estruturas desordenadas (géis C-S-H e (C,N)-A-S-H) e de partículas de solo embebidas em uma matriz cimentícia. Dosagens de baixa densidade/alto teor de ligante apresentaram maiores impactos ambientais negativos por consumirem maiores quantidades de matéria-prima e diesel para o transporte de materiais. O custo total das dosagens do ligante álcali-ativado foi superior à das dosagens de cimento Portland, principalmente devido ao alto custo de aquisição do hidróxido de sódio. Entretanto, dosagens de cimento Portland apresentaram maior emissão de CO<sub>2</sub> e assim maior custo indireto (custo social do CO<sub>2</sub>). O ligante álcali-ativado apresentou maior impacto social positivo. A dosagem álcali-ativada alta densidade/baixo teor de ligante obteve maior índice de sustentabilidade final. Dosagens de maior densidade e menor teor de ligante resultaram em maiores índices de sustentabilidade por apresentarem menores custos e impactos ambientais.

**Palavras-chave:** engenharia geotécnica, estabilização química, material álcali-ativado, reutilização de resíduos industriais, sustentabilidade

## ABSTRACT

ARAUJO, M. T. Behavior of an expansive soil stabilized by alkali-activated wastes-based binder: sustainability, mechanical and microstructural properties. Doctoral dissertation – Graduate Program of Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

Common materials in chemical stabilizations, lime and cement are energy and emission intensive materials. Alkali-activated materials are a more sustainable option for soil stabilization. There is a research gap related to the inclusion of sustainability assessments encompassing the environmental, economical and social pillars in studies of expansive soils stabilized by alkali-activation processes. To fulfil this gap, this work aims to study the mechanical and microstructural behavior and the sustainability of an expansive soil established by the alkali activation of sugar cane bagasse ash (waste from sugar production industry) and hydrated eggshell lime (waste from eggshells). Comparison with the mechanical properties and sustainability assessment of the same soil stabilized by an early strength Portland cement (type III) was performed. To achieve the aforementioned objectives, unconfined compressive strength, split tensile strength, pulse velocity, matric suction, wetting and drying durability and free swelling tests were performed in soil-alkali-activated binder and soil-Portland cement mixtures. Mechanical results were correlated to the porosity/volumetric binder content index ( $\eta/B_{iv}^a$ ). Alkali-activated mixtures were analyzed by means of microscopy, Fourier transform infrared spectroscopy, X-ray diffraction and fluorescence analysis. An environmental, economical and social life cycle assessment evaluated the sustainability of the alkali activated binder in relation to the Portland cement. For both binders a significant correlation was obtained between the  $\eta/B_{iv}^a$  index and strength, initial shear modulus and durability. The mixtures presented similar mechanical results when cured at 23°C: unconfined compressive strength around 5 MPa for high density/high binder content samples with 30% moisture content, and split tensile strength around 0.6 MPa for high density/high binder content samples with 28% moisture content. XRD and SEM-EDS analysis of soil-alkali-activated samples identified, respectively, an amorphous phase attributed to disordered structures (C-S-H and (C,N)-A-S-H gels) and soil particles embedded in a cementitious matrix. Low density/high binder dosages were found to have higher negative environmental impacts as they required higher quantities of raw materials and diesel for materials transportation. The total cost of alkali-activated binder dosages was higher than that of Portland cement dosages, mainly due to the high cost of sodium hydroxide acquisition. However, the Portland cement dosages entailed higher CO<sub>2</sub> emissions and thus higher indirect cost (social cost of carbon). The alkali-activated binder presented higher positive social impact. The alkali-activated high density/low binder dosage presented higher sustainability index. High density and low binder dosages resulted in higher sustainability index due to lower costs and environmental impacts.

**Keywords:** geotechnical engineering, chemical stabilization, alkali-activated material, reuse of industrial residues, sustainability

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mecanismo de reação para uma escória álcali-ativada .....	33
Figura 2: Estrutura generalizada do gel C-(N)-A-S-H .....	33
Figura 3: $^{29}\text{Si}$ chemical shift para blocos $\text{Q}_n(\text{mAl})$ em silicatos e aluminossilicatos.....	34
Figura 4: Modelo de Glukhovsky para ativação alcalina: (a) precursor em contato com álcalis; (b) dissolução; (c) coagulação; (d) condensação .....	36
Figura 5: Modelo conceitual para álcali-ativação.....	38
Figura 6: Estrutura 3D do gel N-A-S-H .....	38
Figura 7: Modelo estrutural de formação dos géis resultantes de um cimento híbrido.....	41
Figura 8: Solubilidade da sílica contida em escórias e aluminossilicatos versus pH .....	42
Figura 9: Solubilidade do hidróxido de alumínio, considerando somente espécimes mononucleares, versus pH.....	43
Figura 10: Composição de precursores utilizados na álcali-ativação.....	45
Figura 11: MEV de uma partícula de cinza volante .....	47
Figura 12: Síntese de minerais argilosos .....	58
Figura 13: Representação atômica do caulim.....	59
Figura 14: MEV de um Caulim .....	59
Figura 15: Representação atômica da montmorillonita.....	60
Figura 16: MEV da Montmorillonita.....	61
Figura 17: Fases da ACV .....	75
Figura 18: Processo multifuncional teórico dividido em dois subprocessos e com expansão para incluir uma produção alternativa .....	78

Figura 19: Mecanismo ambiental .....	79
Figura 20: Midpoints e Endpoints .....	80
Figura 21: Características dos três tipos da ACCV .....	86
Figura 22: Custos dos tipos de ACCV .....	86
Figura 23: Curva granulométrica da Bentonita e do Caulim.....	102
Figura 24: Curvas de compactação.....	103
Figura 25: Difratoograma da Bentonita.....	105
Figura 26: Difratoograma do Caulim .....	105
Figura 27: Difratoograma do Cimento Portland CPV-ARI.....	106
Figura 28: Disposição da CBCA em seu local de origem .....	107
Figura 29: Curva granulométrica da CBCA.....	109
Figura 30: Difratoograma da CBCA .....	110
Figura 31: Produção em laboratório da COH.....	111
Figura 32: Curva granulométrica da COH .....	112
Figura 33: Difratoograma da COH.....	113
Figura 34: Moldagem e cura dos corpos de prova.....	116
Figura 35: Tanque para cura térmica a $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (destaque para a aferição de temperatura). 117	
Figura 36: Célula odométrica modificada .....	121
Figura 37: Espécime preparado para medições de sucção matricial .....	122
Figura 38: Limites do sistema da ACV de misturas (a) solo-ligante álcali-ativado e (b) solo-cimento Portland.....	125
Figura 39: Resistência à compressão simples das pastas álcali-ativadas .....	146

Figura 40: Efeitos dos fatores principais – pastas álcali-ativadas .....	148
Figura 41: DRX da CBCA, COH e pasta álcali-ativada .....	152
Figura 42: Imagens de MEV da pasta álcali-ativada (0,8 A/L, 1 M, 4 CBCA/COH): (a) magnificação de 1500x, (b) imagem EDS e (c) distribuição de elementos, e (d) mapa química .....	153
Figura 43: Imagens de MEV: (a) pasta álcali-ativada (0,8 A/L, 1 M, 4 CBCA/COH), e (b) pasta não álcali-ativada (0,8 A/L, 0 M, 4 CBCA/COH) a uma magnificação de 500x.....	154
Figura 44: FTIR para a pasta álcali-ativada.....	155
Figura 45: Resistência à compressão simples: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland .....	157
Figura 46: Gráfico de Pareto da RCS para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland..	158
Figura 47: Efeitos principais sobre $q_u$ : (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland .....	158
Figura 48: Gráficos de interações entre dois fatores: (a) BC para o ligante álcali-ativado (b) CD para o cimento Portland .....	161
Figura 49: Relação entre $\eta/B_{iv}^{0,28}$ e RCS para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland .....	162
Figura 50: Relação normalizada de RCS para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland .....	164
Figura 51: Resistência à tração por compressão diametral: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland.....	165
Figura 52: Gráfico de Pareto da RTCD para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland .....	166
Figura 53: Efeitos principais sobre $q_t$ : (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland.....	166
Figura 54: Relação entre $\eta/B_{iv}^{0,28}$ e RTCD para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland .....	168

Figura 55: Relação normalizada de RTCD para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland .....	170
Figura 56: Relação entre $q_u$ e $q_t$ para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland.....	171
Figura 57: Módulo cisalhante inicial: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland.....	172
Figura 58: Gráfico de Pareto de $G_0$ para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland .....	172
Figura 59: Efeitos principais sobre $G_0$ : (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland .....	173
Figura 60: Gráfico da interação entre dois fatores AE para o cimento Portland.....	175
Figura 61: Relação entre $\eta/B_{iv}^{0,28}$ e $G_0$ para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland	175
Figura 62: Relação normalizada de $G_0$ para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland	177
Figura 63: Relação entre sucção matricial e $q_u$ para o ligante álcali-ativado .....	179
Figura 64: Perda de massa acumulada (PMA) para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland.....	180
Figura 65: Perda de massa para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland.....	182
Figura 66: Relação entre $\eta/B_{iv}^{0,28}$ e PMA para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland .....	183
Figura 67: Expansão livre para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (CONSOLI <i>et al.</i> , 2021b).....	187
Figura 68: Gráfico de Pareto de $\varepsilon_s$ para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (CONSOLI <i>et al.</i> , 2021b) .....	188
Figura 69: Efeitos principais sobre $\varepsilon_s$ para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (CONSOLI <i>et al.</i> , 2021b) .....	188
Figura 70: Expansão livre para amostras contendo somente: (a) solo e água (b) solo e hidróxido de sódio (c) cinza, solo e água e (d) cinza .....	191
Figura 71: Difratoograma para amostras do ligante álcali-ativado .....	194

Figura 72: Amostras álcali-ativadas curadas por 7 dias a 23°C: (a) magnificação de 500x, (b) imagem EDS e (c) mapa químico, e (d) distribuição elementar.....	195
Figura 73: Amostras álcali-ativadas curadas por 28 dias a 23°C: (a) magnificação de 500x, (b) imagem EDS e (c) mapa químico, e (d) distribuição elementar.....	195
Figura 74: Amostras álcali-ativadas curadas por 7 dias a 40°C: (a) magnificação de 500x, (b) imagem EDS e (c) mapa químico, e (d) distribuição elementar.....	196
Figura 75: Amostras álcali-ativadas curadas por 28 dias a 40°C: (a) magnificação de 500x, (b) imagem EDS e (c) mapa químico, e (d) distribuição elementar.....	196
Figura 76: Impactos ambientais para dois métodos de estabilização utilizando duas dosagens .....	198
Figura 77: Processos do ciclo de vida de dosagens AA-BDAL e CP-BDAL .....	199
Figura 78: Impactos da distância de transporte da CBCA na categoria acidificação para: (a) AA-BDAL e (b) AA-ADBL.....	201
Figura 79: Componente e custo total (\$/m <sup>3</sup> ) para dois métodos de estabilização e dois cenários de dosagens.....	202
Figura 80: Diagrama visual cimento Portland.....	206
Figura 81: Diagrama visual ligante álcali-ativado.....	207
Figura 82: Índice de sustentabilidade final para cada dosagem conforme MIVES.....	208

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química típica de escórias de alto forno .....	46
Tabela 2: Composição química típica de cinzas volantes .....	48
Tabela 3: Mudanças de coordenação do Al durante a desidroxilação da caulinita .....	49
Tabela 4: Componentes químicos da cinza do bagaço de cana-de-açúcar .....	50
Tabela 5: Resumo de etapas do projeto experimental .....	92
Tabela 6: Fatores controláveis e constantes do projeto experimental para pastas álcali-ativadas .....	94
Tabela 7: Número de ensaios realizados a partir do planejamento experimental para pastas álcali-ativadas .....	94
Tabela 8: Fatores controláveis e constantes do projeto experimental para misturas de solo e ligante .....	99
Tabela 9: Número de ensaios realizados a partir do planejamento experimental para misturas de solo e ligante .....	100
Tabela 10: Propriedades físicas da Bentonita e do Caulim .....	101
Tabela 11: Condições ótimas das curvas de compactação .....	103
Tabela 12: Composição química para a Bentonita e o Caulim.....	104
Tabela 13: Propriedades físicas da Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar .....	108
Tabela 14: Composição química da CBCA.....	109
Tabela 15: Propriedades físicas da Cal de Ovo Hidratada .....	111
Tabela 16: Composição química da COH .....	112
Tabela 17: Dosagens para a ACV dos ligantes estudados.....	124
Tabela 18: Quantitativo de materiais para 1m <sup>3</sup> de solo estabilizado.....	125

Tabela 19: Consumo de diesel para o transporte de materiais .....	129
Tabela 20: Consumo de diesel pelo maquinário utilizado na mistura, homogeneização e compactação e por operações para o preparo de misturas solo-ligante.....	129
Tabela 21: Dados para a análise de inventário .....	130
Tabela 22: Dados para composição de custos .....	133
Tabela 23: Stakeholders e indicadores sociais da ASCV .....	136
Tabela 24: Processos relacionados a cada ligante estudado .....	136
Tabela 25: Profissão e cargo dos entrevistados por processo analisado.....	138
Tabela 26: Escala de avaliação dos indicadores sociais .....	139
Tabela 27: Escala de importância dos indicadores sociais .....	139
Tabela 28: Requerimentos, critérios e indicadores.....	142
Tabela 29: Valores de P, K e C .....	143
Tabela 30: Teor de álcalis das pastas álcali-ativadas .....	145
Tabela 31: ANOVA para pastas álcali-ativadas .....	148
Tabela 32: Comparação Múltipla de Médias, Método de Tukey para interação CBCA/COH*A/L .....	150
Tabela 33: Comparação Múltipla de Médias, Método de Tukey para interação CBCA/COH*Molaridade .....	150
Tabela 34: Comparação Múltipla de Médias, Método de Tukey para a interação de três fatores .....	150
Tabela 35: Composição química da pasta álcali-ativada.....	151
Tabela 36: Composição elementar da pasta álcali-ativada determinada por EDS, considerando os pontos da Figura 42.....	154

Tabela 37: Tratamentos relativos aos ensaios de resistência, módulo cisalhante inicial e sucção matricial .....	156
Tabela 38: Tratamentos relativos ao ensaio de durabilidade.....	179
Tabela 39: Resultados preliminares de expansão livre (ligante álcali-ativado) .....	186
Tabela 40: Tratamentos relativos ao novo projeto experimental para ensaios de expansão livre (ligante álcali-ativado).....	186
Tabela 41: Tratamentos relativos ao projeto experimental para ensaios de expansão livre (cimento Portland, 10/90 B/K) .....	187
Tabela 42: Análise de sensibilidade por metodologia de avaliação de impacto (ligante álcali-ativado).....	200
Tabela 43: Análise de sensibilidade por metodologia de avaliação de impacto (cimento Portland) .....	200
Tabela 44: Coeficiente $\alpha$ de Croanbach para processos avaliados .....	204
Tabela 45: Stakeholders, indicadores e score total para os ligantes estudados .....	206

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AA: Ligante álcali-ativado

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV: Avaliação do ciclo de vida

ACCV: Avaliação do custo do ciclo de vida

ADBL: Alta densidade/baixo teor de ligante

ALM: Perda de massa acumulada

ANOVA: Análise de Variância

ASCV: Avaliação social do ciclo de vida

ASTM: American Society for Testing and Materials

BDAL: Baixa densidade/alto teor de ligante

BET: Análise de área de superfície por isotermas Brunauer, Emmett e Teller

CBCA: Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar

COH: Cal de casca de Ovo Hidratada

CP: Cimento Portland

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DOE: Design Of Experiments

DRX: Difração de Raios X

EDS: Espectroscopia de Raios X por Dispersão em energia

FRX: Fluorescência de Raios X

FTIR: Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

IP: Índice de Plasticidade

ISO: International Organization for Standardization

LCC: Life Cycle Cost

LEGG: Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental

LL: Limite de Liquidez

LOI: Loss on Ignition

LP: Limite de Plasticidade

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura

MIVES: Spanish Integrated Value Model for Sustainability

NBR: Norma Brasileira

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

RCS: Resistência à Compressão Simples

RTCD: Resistência à Tração por Compressão Diametral

SCC: Social cost of carbon

SLCA: Social Life Cycle Analysis

UFG: Universidade Federal de Goiás

UFOP: Universidade Federal de Ouro Preto

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSM: Universidade Federal de Santa Maria

USCS: Unified Soil Classification System

## LISTA DE SÍMBOLOS

- A: Peso específico aparente seco (estatística)
- $A_e$ : Escalar
- $\alpha$ : Alfa de Cronbach
- A/L: Relação água-ligante
- (A,F)H<sub>3</sub>: Hidróxido de alumínio férrico
- Al: Alumínio
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Óxido de alumínio
- Al<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>: Octaedro de alumínio ou gibbsita
- Al<sub>4</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub>: Caulinita
- B: Teor de ligante (estatística)
- $B_{vi}$ : Fator que garante o valor de  $V_i$  entre 0 e 1
- $B_{iv}$ : Teor volumétrico de ligante
- C: Teor de umidade (estatística)
- $C_p$ : Parâmetro que define o x-valor do ponto de inflexão para curvas com  $P > 1$
- $C_e$ : Expoente
- Ca: Cálcio
- CaCO<sub>3</sub>: Calcário ou calcita
- CaO: Óxido de cálcio
- Ca(OH)<sub>2</sub>: Hidróxido de cálcio ou Portlandita
- Ca<sub>5</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>16</sub>(OH)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O: Tobermorita
- C3S: Silicato tricálcico ou alita
- C<sub>2</sub>S: Silicato dicálcico ou belita
- C<sub>3</sub>A: Aluminato tricálcico
- C<sub>4</sub>AF: Ferrita
- $\bar{C}\bar{S}H_2$ : Gesso
- $C_6\bar{A}\bar{S}_3H_{32}$ : Etringita
- C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>8</sub>: Silicato de cálcio hidratado
- 3C<sub>4</sub> $\bar{A}\bar{S}H_{12}$ : Monosulfoaluminato
- C<sub>4</sub>(A,F)H<sub>13</sub>: Aluminato tetracálcico hidratado
- $C_{iv}$ : Teor volumétrico de cimento
- CO<sub>2</sub>: Gás carbônico
- D: Temperatura de cura (estatística)
- $D_m$ : Diâmetro médio

$D_{10}$ : Diâmetro efetivo dos grãos  
 $D_{50}$ : Diâmetro médio dos grãos  
E: Tempo de cura (estatística)  
e: Índice de vazios  
 $\varepsilon_s$ : Expansão livre  
 $Fe_3O_4$ : Magnetita  
 $Fe_2O_3$ : Óxido de ferro ou hematita  
 $G_0$ : Módulo cisalhante inicial  
 $H_0$ : Hipótese nula  
 $H_1$ : Hipótese inicial  
 $H_{inicial}$ : Altura inicial da amostra  
 $I_{ji}$ : Valor do indicador “i” para o entrevistado “j”  
j: Ordem do entrevistado  
k: Ordem do processo  
 $k_i$ : Número de itens (questões)  
K: Potássio  
 $K_c$ : Parâmetro que define aproximadamente o y-valor no ponto C  
KOH: Hidróxido de potássio  
L: Teor de ligante  
 $L_m$ : Comprimento médio  
m: Número de indicadores do stakeholder “i”  
 $(M_y^{+} \cdot H_2O)(Al_{2-3y}Mg_y^{2+})Si_4^{4+}O_{10}(OH)_2$ : Montmorillonita  
Me: Cátion proveniente do ativador  
MgO: Óxido de magnésio  
 $Mg_3(OH)_6$ : Octaedro de magnésio ou brucita  
n: Número de entrevistados  
 $\eta$ : Porosidade  
 $\eta/B_{iv}$ : Índice porosidade/teor volumétrico de ligante  
 $\eta/L_{iv}$ : Índice porosidade/teor volumétrico de cal  
 $\eta/C_{iv}$ : Índice porosidade/teor volumétrico de cimento  
Na: Sódio  
 $Na_2O$ : Concentração de álcalis  
NaOH: Hidróxido de sódio  
 $Na_2SO_3$ : Sulfato de sódio  
 $Na_2SiO_3$ : Silicato de sódio

$(\text{Na}, \text{Ca})\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ : Beidelita

O: Oxigênio

OH<sup>-</sup>: hidroxila

p: Número de processos

$\rho$ : Massa específica

P: Formato da curva da função

$P_{cr}$ : Peso do critério

$P_{ind}$ : Peso do indicador

$P_{req}$ : Peso do requerimento (pilar)

Q: carregamento aplicado

$q_t$ : Resistência à tração por compressão diametral

$q_u$ : Resistência à compressão simples

r: Número de stakeholders

$S_{Fi}$ : Score final do indicador “i”

$S_i$ : Score do indicador “i”

$S_{ik}$ : Score do indicador “i” para o processo “k”

$SS_i$ : Score do stakeholder “i”

$SS_{social}$ : Score social total

Si: Silício

-Si-O<sup>-</sup>: Sialato

-Si-OH: Silanol

SiO<sub>2</sub>: óxido de silício

Si(OH)<sub>4</sub>: Ácido Silícico

$(\text{Si}_4\text{O}_{10})^{4-}$ : Tetraedro de sílica

$s_i^2$ : Variância de cada item

$S_{m\acute{a}x}$ : Ponto de máxima satisfação

$S_{m\acute{i}n}$ : Ponto de mínima satisfação

$s_T^2$ : Variância do score total resultante da soma dos itens

$\tau_j$ : Efeito da população j

t: Número de indicadores

T: Temperatura de cura

$t_p$ : Onda de compressão

$t_s$ : Onda cisalhante

u: Número de critérios

v: Número de pilares (requerimentos)

$V_c$ : Teor volumétrico de cimento  
 $V_{cr}$ : Valor do critério  
 $V_{final}$ : Índice de sustentabilidade  
 $V_i$ : Função valor  
 $V_{Li}$ : Teor volumétrico de cal  
 $V_P$ : Teor volumétrico de pozolana  
 $V_{req}$ : Valor do requerimento  
 $V_s$ : Velocidade de cisalhamento  
 $V_{Total}$ : Volume total da amostra  
 $V_v$ : Volume de vazios  
 $W_{ji}$ : Peso do indicador “i” para o entrevistado “j”  
 $\omega$ : Teor de umidade  
 $\omega_{ótimo}$ : Teor de umidade ótimo  
 $X$ : Abscissa que gera um valor igual a  $V_i$   
 $\gamma_d$ : Peso específico aparente seco  
 $\gamma_{dmáx}$ : Peso específico aparente seco máximo  
 $\gamma_s$ : Peso específico dos grãos

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>25</b>
1.1 LACUNA CIENTÍFICA .....	27
1.2 OBJETIVOS.....	28
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE .....	29
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>30</b>
2.1. ÁLCALI-ATIVACÃO .....	30
2.1.1. Terminologia e contextualização histórica .....	30
2.1.2. Mecanismos de reação.....	31
2.1.2.1. <i>Sistemas com alto teor de cálcio [(Na, K)<sub>2</sub>O-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O]</i> .....	32
2.1.2.2. <i>Sistemas com baixo teor de cálcio [(Na, K)<sub>2</sub>O -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O]</i> .....	34
2.1.3. Cimentos alcalinos híbridos .....	39
2.1.4. Ativadores alcalinos .....	42
2.1.4.1. <i>Soluções de hidróxidos</i> .....	43
2.1.4.2. <i>Soluções de silicatos</i> .....	44
2.1.5. Precursores .....	45
2.1.5.1. <i>Precursores tradicionais na álcali-ativação</i> .....	45
2.1.5.2. <i>Cinza do bagaço de cana-de-açúcar</i> .....	49
2.1.6. Efeitos das razões SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e CaO/SiO <sub>2</sub> reativas.....	51
2.1.7. Condições de cura: tempo, temperatura e umidade.....	53
2.1.8. Barreiras na comercialização de geopolímeros .....	54
2.2. SOLOS EXPANSIVOS .....	55
2.2.1. Minerais argilosos .....	56
2.2.1.1. <i>Caulinita</i> .....	58
2.2.1.2. <i>Montmorillonita</i> .....	60
2.3. ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA.....	61
2.3.1. Introdução .....	61
2.3.2. Cimento Portland.....	62
2.3.3. Cal.....	64
2.3.4. Mecanismos da estabilização química em solos argilosos .....	64
2.3.4.1 <i>Troca catiônica e floculação</i> .....	64
2.3.4.2. <i>Hidratação</i> .....	65
2.3.4.3. <i>Reações pozolânicas</i> .....	66
2.3.4.4. <i>Carbonatação potencial</i> .....	66
2.3.5. Solos expansivos estabilizados por álcali-ativação .....	66
2.3.6. Índice $\eta/B_{IV}^a$ .....	70
2.4. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	72
2.4.1. Sustentabilidade e Avaliação do Ciclo de Vida.....	72

2.4.2. Fases da ACV .....	75
2.4.2.1 <i>Definição do objetivo e escopo</i> .....	75
2.4.2.2. <i>Análise de Inventário</i> .....	76
2.4.2.3. <i>Avaliação de Impacto</i> .....	78
2.4.2.4. <i>Interpretação</i> .....	80
2.4.3. Álcali-ativação e ACV .....	81
<b>2.5. AVALIAÇÃO DO CUSTO DO CICLO DE VIDA</b> .....	<b>84</b>
2.5.1. Tipos de ACCV .....	85
2.5.2. ACCV ambiental e ACV .....	87
<b>2.6. AVALIAÇÃO SOCIAL DO CICLO DE VIDA</b> .....	<b>87</b>
2.6.1. ASCV e ACV .....	88
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>90</b>
<b>3.1. PASTAS ÁLCALI-ATIVADAS</b> .....	<b>93</b>
3.1.1. Fatores controláveis .....	93
3.1.2. Fatores constantes .....	94
3.1.3. Variável de resposta .....	94
<b>3.2. SOLO E LIGANTE</b> .....	<b>95</b>
3.2.1. Fatores controláveis .....	95
3.2.2. Fatores constantes .....	97
3.2.3. Variáveis de resposta .....	98
<b>3.3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>100</b>
3.3.1. Materiais .....	100
3.3.1.1. <i>Bentonita e caulim</i> .....	100
3.3.1.2. <i>Cimento Portland</i> .....	105
3.3.1.3. <i>Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA)</i> .....	106
3.3.1.4. <i>Hidróxido de sódio</i> .....	110
3.3.1.5. <i>Cal de casca de ovo hidratada (COH)</i> .....	110
3.3.1.6. <i>Pasta álcali-ativada</i> .....	113
3.3.1.7. <i>Solo-ligante álcali-ativado</i> .....	114
3.3.2. Métodos .....	115
3.3.2.1. <i>Moldagem e cura dos corpos de prova: pastas álcali-ativadas</i> .....	115
3.3.2.2. <i>Moldagem e cura dos corpos de prova: resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, durabilidade e sucção matricial</i> .....	115
3.3.2.3. <i>Moldagem e cura dos corpos de prova: expansão livre</i> .....	117
3.3.2.4. <i>Resistência à compressão simples (RCS)</i> .....	118
3.3.2.5. <i>Módulo cisalhante inicial (<math>G_0</math>) ou ensaio de pulso ultrassônico</i> .....	118
3.3.2.6. <i>Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)</i> .....	119
3.3.2.7. <i>Durabilidade por molhagem-secagem e escovação</i> .....	119
3.3.2.8. <i>Ensaio de expansão livre (<math>\epsilon_s</math>)</i> .....	120
3.3.2.9. <i>Sucção matricial</i> .....	121
3.3.2.10. <i>Medição do pH de misturas CBCA-COH-água destilada e CBCA-COH-NaOH</i> .....	123
<b>3.4. METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA</b> .....	<b>123</b>
3.4.1. Avaliação ambiental do ciclo de vida (ACV) .....	123

3.4.1.1. <i>Objetivo e escopo</i> .....	124
3.4.1.2. <i>Análise de inventário</i> .....	126
3.4.1.3. <i>Avaliação de impacto e análise de sensibilidade</i> .....	128
3.4.2. <i>Avaliação do custo do ciclo de vida (ACCV)</i> .....	130
3.4.2.1. <i>Custos diretos</i> .....	130
3.4.2.2. <i>Custos indiretos</i> .....	134
3.4.3. <i>Avaliação social do ciclo de vida (ASCV)</i> .....	134
3.4.3.1. <i>Estruturação e coleta de dados</i> .....	134
3.4.3.2. <i>Caracterização e peso dos indicadores sociais</i> .....	138
3.4.3.3. <i>Cálculo do score dos indicadores sociais e respectivos stakeholders</i> .....	140
3.4.4. <i>MIVES</i> .....	141
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>145</b>
4.1. <b>PASTAS ÁLCALI-ATIVADAS .....</b>	<b>145</b>
4.1.1. <i>Efeito dos fatores controláveis sobre a RCS</i> .....	145
4.1.2. <i>Composição química e mineralógica e microestrutura da pasta álcali-ativada</i> .....	150
4.2 <b>MISTURA SOLO-LIGANTE: LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO E CIMENTO PORTLAND .....</b>	<b>155</b>
4.2.1. <i>Resistência à compressão simples e tração por compressão diametral, módulo cisalhante inicial e sucção matricial</i> .....	155
4.2.1.1. <i>Resistência à compressão simples</i> .....	156
4.2.1.2. <i>Resistência à tração por compressão diametral</i> .....	165
4.2.1.3. <i>Módulo cisalhante inicial</i> .....	171
4.2.1.4. <i>Sucção matricial</i> .....	178
4.2.2. <i>Durabilidade por ciclos de molhagem-secagem e escovação</i> .....	179
4.2.3. <i>Equação geral para o índice porosidade/teor volumétrico de ligante (<math>\eta/B_{iv}^{0,28}</math>)</i> .....	184
4.2.4. <i>Expansão livre</i> .....	185
4.2.5. <i>Análise microestrutural – álcali-ativação</i> .....	191
4.3 <b>AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA .....</b>	<b>197</b>
4.3.1. <i>Avaliação ambiental do ciclo de vida</i> .....	197
4.3.2. <i>Avaliação do custo do ciclo de vida</i> .....	201
4.3.3. <i>Discussão: Análise ambiental de ciclo de vida e análise de custo do ciclo de vida</i> .	202
4.3.4. <i>Avaliação social do ciclo de vida</i> .....	204
4.3.4.1. <i>Coefficiente alfa de Cronbach</i> .....	204
4.3.4.2. <i>Impactos sociais</i> .....	204
4.3.5. <i>Índice de sustentabilidade final</i> .....	207
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>209</b>
5.1 <b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>209</b>
5.2 <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>216</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>218</b>

<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>246</b>
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>306</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>307</b>
<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>315</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>319</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em vista da crescente necessidade de utilização de materiais regionais, da piora nas condições *in situ* dos locais de construção devido ao excesso de ocupação humana e devido ao fato de que muitos tipos de solo ao sofrerem alguma espécie de tratamento tornam-se materiais úteis para a construção civil, a estabilização de solos é uma importante parte dos projetos atuais de engenharia. Dentre as várias técnicas de tratamento de solos há o uso da estabilização química, a qual funciona por meio da mistura de aditivos químicos ao solo com o objetivo de melhorar sua consistência, resistência, deformabilidade e permeabilidade (MITCHELL, J.K., 1981; TERASHI; JURAN, 2000). Tradicionalmente, dois materiais possuem larga utilização neste tipo de estabilização, a cal e o cimento Portland, devido principalmente ao seu custo e disponibilidade.

Dentre os diferentes tipos de solo, os argilosos possuem uma performance imprevisível, já que uma pequena alteração no teor de umidade leva a uma perda de resistência estrutural ao ocasionar fenômenos de recalque, expansão e surgimento de fissuras. Assim, estabilizações com cal, cimento e resíduos industriais como escória de alto forno e cinza volante têm sido realizadas para este tipo de solo (SINGHI; LASKAR; AHMED, 2016). Com o uso destes aditivos ocorre troca catiônica na superfície dos minerais argilosos e preenchimento de espaços vazios com materiais cimentantes oriundos de processos de hidratação da sílica e do cálcio. Porém, tanto o cimento quanto a cal são materiais conhecidos por terem sua produção vinculada a elevados níveis de consumo energético e alta geração e emissão de gases de efeito estufa. Para a manufatura do cimento esses valores correspondem a um consumo de energia de 1,63 GJ/ton de clínquer (cimento CP I) e emissão de 8 a 10% de de todas emissões antropogênicas mundiais de dióxido de carbono (GARTNER; SUI, 2018; OUELLET-PLAMONDON; HABERT, 2015; SUHENDRO, 2014). Nesse contexto, a sustentabilidade é um tópico de importância relevante à indústria da construção civil, em particular à engenharia geotécnica.

Aspectos geotécnicos da construção civil impactam no padrão de uso do solo e consomem recursos naturais, usualmente compreendendo processos construtivos de alta emissão de gases de efeito estufa e consumo energético (e.g. fundações, estruturas de contenção e barragens). Dessa forma, é primordial abordar a sustentabilidade em construções geotécnicas visto que a

engenharia geotécnica tem uma posição inicial em projetos de engenharia, e engenheiros podem aplicar práticas mais sustentáveis nos estágios iniciais de projetos de infraestrutura. Processos de menor impacto ambiental e que utilizam novos materiais, como resíduos industriais, em substituição a matérias-primas não renováveis e pouco sustentáveis são possibilidades para se ter uma construção mais sustentável a nível de projeto (ABREU *et al.*, 2008; BASU; MISRA; PUPPALA, 2014; GOMES CORREIA; WINTER; PUPPALA, 2016). Nesse sentido, materiais álcali-ativados que incorporam resíduos podem ser utilizados como uma alternativa ao uso de cimento convencional para a estabilização de solos. Segundo Davidovits (2015), a redução nas emissões de gases estufa com uso de geopolímeros pode chegar a 80%, comparativamente ao cimento Portland.

Na ativação alcalina, um material precursor que contém alto teor de aluminossilicatos amorfos em sua composição química é ativado por uma solução alcalina (material ativador, hidróxido e/ou silicato alcalino), produzindo um gel de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados composto por íons de metais alcalinos e alcalinos-terrosos provenientes do ativador. Materiais gerados a partir da álcali-ativação possuem propriedades que incluem resistência ao fogo (ALEHYEN *et al.*, 2017) e ao ataque ácido (SHI, C.; STEGEMANN, 2000), baixa condutividade térmica, pega rápida ou devagar, rápido desenvolvimento de resistências mecânicas, ótima aderência a agregados e estabilidade dimensional (DUXSON *et al.*, 2007) e por isso encontram aplicação em vários campos da indústria, como a aeronáutica, automobilística, metalúrgica e da engenharia civil (DAVIDOVITS, J., 1991). Materiais álcali-ativados é uma nomenclatura abrangente, englobando qualquer produto de reação entre uma fonte de metal e um precursor rico em aluminossilicatos ou silicatos de cálcio. Já geopolímeros são uma subcategoria dos materiais álcali-ativados onde o gel ligante é resultado de precursores com baixo teor de cálcio e ativadores compostos por hidróxidos de metais alcalinos ou silicatos (PROVIS, John L., 2014). Neste estudo, entretanto, os termos materiais álcali-ativados e geopolímeros são utilizados como sinônimos.

Para se avaliar o impacto ambiental do cimento Portland e de materiais álcali-ativados, uma avaliação de ciclo de vida pode ser empregada. Não obstante, enfatiza-se que o modelo sustentável engloba três pilares: ambiental, econômico e social (GIRI; REDDY, 2015; KLOEPFFER, 2008). Assim, avaliações ambientais, sociais e econômicas de ciclo de vida são necessárias para uma análise de sustentabilidade mais completa; entretanto, metodologias sociais e econômicas ainda não estão consolidadas. Essas metodologias avaliam todo o ciclo de

vida dos produtos envolvidos na estabilização química do solo, desde a extração da matéria-prima até sua disposição final. Na última etapa destas análises é possível uma avaliação de impacto, a partir da quantificação das categorias de impacto (ISO, 2006a).

Diversos estudos abrangem avaliações de ciclo de vida no contexto da engenharia geotécnica (DAMIANS *et al.*, 2015; GIRI; REDDY, 2015; JIANG; WU, 2019; LI, X. J.; ZHENG, 2020), em particular, relacionados ao melhoramento de solos (CONSOLI, N.; DA ROCHA; SILVANI, 2014; DA ROCHA *et al.*, 2016). No contexto mais geral da engenharia civil, estudos de avaliação de ciclo de vida envolvem cimentos e concretos álcali-ativados (HABERT; D'ESPINOSE DE LACAILLERIE; ROUSSEL, 2011; OUELLET-PLAMONDON; HABERT, 2015; ROBAYO-SALAZAR *et al.*, 2018; WEIL; DOMBROWSKI; BUCHWALD, 2009). Ainda, o uso de álcali-ativação para a estabilização de solos expansivos também vem sendo estudado (CRISTELO *et al.*, 2012; RIVERA *et al.*, 2020; SINGHI; LASKAR; AHMED, 2017; SYED; GUHARAY; KAR, 2020). Entretanto, há uma lacuna científica relacionada a análise de comportamento mecânico conjuntamente a uma avaliação de sustentabilidade (ambiental, econômica e social) em estudos acerca de solos expansivos estabilizados por ligantes álcali-ativados.

Neste trabalho, realizou-se uma comparação entre as propriedades mecânicas, microestruturais e a avaliação de ciclo de vida ambiental, econômico e social de um solo expansivo estabilizado por um ligante álcali-ativado (composto por cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo hidratada) e por cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), amplamente utilizado na engenharia geotécnica por seus resultados rápidos em campo. Destaca-se ainda que em 2016 no estado americano de Louisiana quase 2,4 milhões de toneladas de cinza do bagaço de cana foram produzidas (ARCE *et al.*, 2019), e no Brasil esse valor alcançou quase 95 milhões de toneladas em 2010 (SALES; LIMA, 2010). Em 2000, empresas americanas de quebra de ovo produziram 13 mil toneladas de casca de ovo (MACNEIL, 2005) e anualmente o Brasil produz cerca de 16 mil toneladas deste resíduo (SOUZA *et al.*, 2019). Ambos resíduos explicitados têm sua disposição final associada a aterros e/ou lixões a céu aberto, o que, em conjunto com características químicas destes (alto teor de sílica e alumínio e de cálcio, na cinza e na cal, respectivamente), justifica seu uso em estudos de álcali-ativação.

## 1.1 LACUNA CIENTÍFICA

O presente trabalho trará contribuições ao estado da arte por se tratar do primeiro estudo que associa a avaliação de comportamento mecânico e dos três pilares da sustentabilidade para a estabilização de solos com ligantes álcali-ativados.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é o estudo do comportamento mecânico e microestrutural e do ciclo de vida ambiental, econômico e social de um solo expansivo estabilizado por ligante álcali-ativado oriundo de resíduos, visando demonstrar a viabilidade técnica e avaliar a sustentabilidade do uso deste ligante em obras reais de Engenharia voltadas a estabilização de solos.

Para que o objetivo geral possa ser alcançado foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar estatisticamente a influência de dosagens distintas de cinza do bagaço de cana-de-açúcar, cal de casca de ovo hidratada e hidróxido de sódio na resistência à compressão simples de pastas álcali-ativadas;
- Avaliar a composição química, mineralogia e morfologia da pasta álcali-ativada para compreensão dos produtos de reação advindos do processo de ativação alcalina;
- Estudar a resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo cisalhante inicial, durabilidade e expansão livre das misturas solo-ligante álcali-ativado, comparativamente a misturas solo-cimento Portland;
- Avaliar estatisticamente quais fatores controláveis do processo de estabilização do solo expansivo tem maior influência nas variáveis de saída estudadas;
- Relacionar o índice porosidade/teor volumétrico de ligante ( $\eta/B_{iv}^a$ ) à resposta mecânica das misturas solo-ligante álcali-ativado e solo-cimento Portland;
- Estudar a mineralogia e morfologia de misturas solo-ligante álcali-ativado para identificação do gel formado e sua distribuição nas matrizes cimentadas;
- Avaliar a sustentabilidade (pilares ambiental, econômico e social) de dosagens distintas das misturas solo-ligante álcali-ativado e solo-cimento Portland.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A presente tese está estruturada em cinco capítulos. O primeiro capítulo compreende a introdução do trabalho, onde está explicitada a lacuna científica a ser preenchida e os objetivos gerais e específicos.

No segundo capítulo a revisão bibliográfica é apresentada, sendo composta por oito tópicos principais que descrevem (i) os processos de álcali-ativação; (ii) as características dos solos expansivos; (iii) os processos envolvidos na estabilização química; (iv) a avaliação do ciclo de vida; (v) a avaliação do custo do ciclo de vida; e (vi) a avaliação social do ciclo de vida.

No terceiro capítulo o programa experimental da tese é apresentado. Assim, o projeto de experimentos utilizado para as pastas álcali-ativadas e a mistura solo-ligante é delineado, bem como os materiais e métodos utilizados são descritos. As metodologias para avaliação do ciclo de vida, avaliação do custo do ciclo de vida, avaliação social do ciclo de vida e do método MIVES das amostras também são apresentadas.

O quarto capítulo compreende os resultados e discussões para amostras de pastas álcali-ativadas e misturas solo-ligante (álcali-ativado e cimento Portland). O quinto capítulo apresenta as considerações finais deste estudo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica tem como objetivo fornecer embasamento teórico para a compreensão de conceitos vinculados a álcali-ativação, estabilização química e sustentabilidade.

### 2.1. ÁLCALI-ATIVAÇÃO

#### 2.1.1. Terminologia e contextualização histórica

Pesquisas envolvendo álcali-ativação remontam ao início do século passado. Na década de 30 H. Kuhl, químico e engenheiro alemão, estudou o endurecimento de misturas contendo escória de alto forno e soluções de KOH. Em 1940, o belga A. Purdon testou a ativação de diferentes tipos de escórias de alto forno por soluções de NaOH, sendo estes os primeiros extensos estudos em laboratório relacionados a cimentos sem o uso de clínquer (KRIVENKO, 2017). Na década seguinte, na União Soviética, o ucraniano Glukhovsky propôs um modelo conceitual para a álcali-ativação de materiais envolvendo aluminossilicatos reativos ativados por resíduos industriais ricos em álcalis. Os produtos resultantes destas reações foram denominados cimentos de solo, visto que possuíam capacidade ligante e eram originários de materiais naturais, e divididos em dois grupos: alcalinos ( $\text{Me}_2\text{O}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ) e alcalinos-alcalinos terrosos ( $\text{Me}_2\text{O}-\text{MeO}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ), sendo Me o cátion proveniente do ativador (DUXSON *et al.*, 2007; KRIVENKO, 2017; SEVERO *et al.*, 2013).

Nos anos 70, o cientista e engenheiro francês Prof. Joseph Davidovits fundou uma companhia privada de pesquisa (atualmente denominada CORDI-GÉOPOLYMÈRE) com o objetivo de desenvolver materiais inorgânicos resistentes ao fogo, devido a ocorrência de incêndios na França entre 1970-73 relacionados a plásticos orgânicos inflamáveis (DAVIDOVITS, P. J., 2002; SEVERO *et al.*, 2013). Como resultado dessa pesquisa Davidovits cunhou o termo “geopolímero” para uma classe de materiais sólidos resultantes da reação entre álcalis e misturas calcinadas de caulinita, calcário e dolomita. Esses polímeros minerais são constituídos por cadeias tridimensionais de aluminossilicatos amorfos ou semicristalinos, e uma nomenclatura química para os mesmos sugerida por Davidovits seria poli(sialatos), ou seja, cadeias de polímeros onde  $\text{Si}^{4+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  estão em uma coordenação IV com o oxigênio (DAVIDOVITS, P. J., 2002; KRIVENKO, 2017; PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, 2009).

Mais recentemente, em 1986, Pavel Krivenko estudou as propriedades físicas e mecânicas de concretos preparados com escórias álcali-ativadas e, em 1999, A. Palomo publicou o primeiro artigo sobre a possibilidade de se utilizar cinzas volantes para a produção de cimentos alternativos competitivos (PALOMO, A *et al.*, 2014).

Embora a designação geopolímero seja utilizada genericamente para descrever os materiais aluminossilicatos resultantes de reações entre precursores, usualmente sólidos, e hidróxidos/silicatos alcalinos, vários outros termos se referem aos mesmos produtos de ativação, tais como: “polímeros minerais”, “polímeros inorgânicos”, “cerâmicas ligadas alcalinamente”, “hidrocerâmicas”, “cimento álcali-ativado” (PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, 2009). Usualmente, essas designações referem-se essencialmente ao mesmo material, no entanto, vale a pena ressaltar o que diferencia as terminologias “geopolímero” e “material álcali-ativado”. Materiais álcali-ativados é uma nomenclatura mais abrangente, englobando qualquer produto de reação entre uma fonte de metal alcalino (hidróxidos, silicatos, carbonatos, sulfatos) e um precursor rico em aluminossilicatos ou silicatos de cálcio. O ativador deve ser capaz de elevar o pH do meio e acelerar a dissolução do precursor sólido. Já geopolímeros são uma subcategoria dos materiais álcali-ativados onde o gel ligante é quase exclusivamente composto por aluminossilicatos altamente coordenados e é resultado de precursores com baixo teor de cálcio (cinzas volantes e argilas calcinadas são mais usuais) e ativadores compostos por hidróxidos de metais alcalinos ou silicatos (PROVIS, John L., 2014). Neste estudo, entretanto, os termos materiais álcali-ativados e geopolímeros são utilizados como sinônimos, da mesma forma como ocorre em diversos artigos e estudos relacionados ao tema.

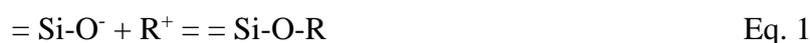
### 2.1.2. Mecanismos de reação

Mecanismos de reação referem-se aos processos químicos de dissolução alcalina e precipitação de um precursor, sendo responsáveis pelo endurecimento e pelas propriedades dos cimentos álcali-ativados (SEVERO *et al.*, 2013). Em virtude da natureza dos seus compostos, cimentos álcali-ativados podem ser divididos em três categorias principais: (i) cimentos com alto teor de cálcio [(Na, K)<sub>2</sub>O-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O]; (ii) cimentos com baixo teor de cálcio [(Na, K)<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O] e (iii) cimentos híbridos. Para cada uma destas categorias, a ativação ocorre de forma distinta (PALOMO, A *et al.*, 2014).

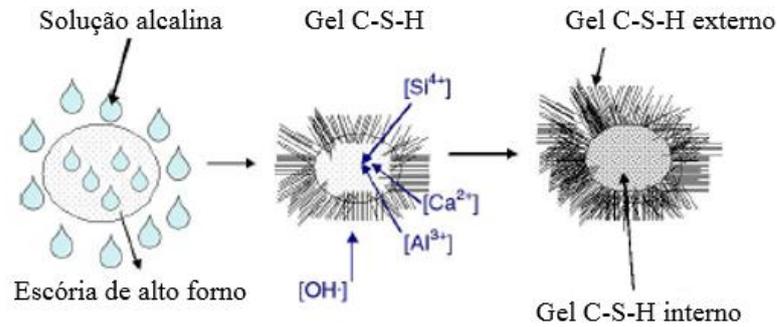
Para sistemas com alto teor de cálcio (e.g. escória de alto forno) o principal produto de reação é um gel C-S-H (silicato de cálcio hidratado) com uma porcentagem menor de Al em sua estrutura (gel C-A-S-H). Tal gel se assemelha ao produto da hidratação do cimento Portland. A ativação de materiais com baixo teor de CaO (e.g. cinza volante tipo F e metacaulim) requer elevadas temperaturas para que o processo se inicie (60-200°C) e o principal produto é um gel tridimensional denominado N-A-S-H, que pode ser entendido como um precursor de zeolita. Os mecanismos de reação de ambos sistemas são descritos a seguir.

#### 2.1.2.1. Sistemas com alto teor de cálcio [(Na, K)<sub>2</sub>O-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O]

Segundo Palomo *et al.* (2014), o mecanismo de ativação proposto por Glukhovski e Krivenko para sistemas alto cálcio, ricos em cálcio e sílica, é descrito pelas Equações 1 a 3. Onde R<sup>+</sup> designa o cátion de metal alcalino que, por meio de troca catiônica com os íons Ca<sup>2+</sup>, atua como catalisador nas fases iniciais de reação. Esse cátion é posteriormente reincorporado a estrutura do gel.

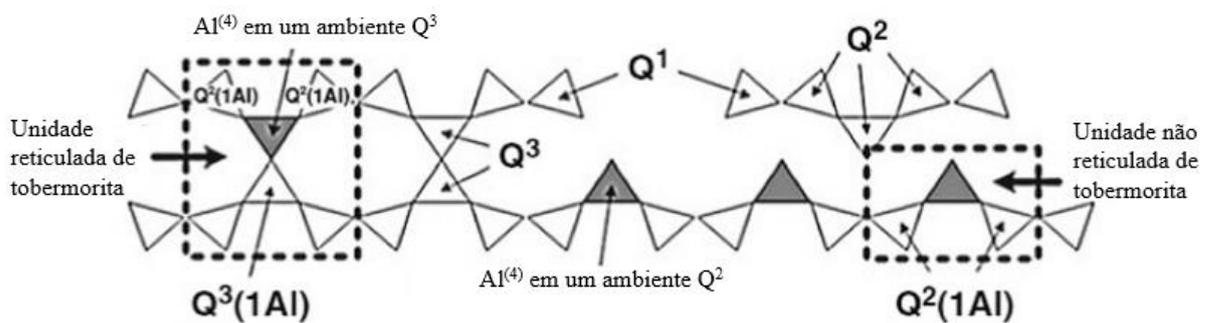


Fernández-Jiménez (2000) descreve um mecanismo de reação para escórias de alto forno baseado em um modelo de 1990 proposto por Glasser. Segundo a autora, devido ao elevado pH do meio, em um momento inicial os grãos de escória sofrem ataque químico e produtos de reação amorfos insolúveis ficam na superfície dos grãos, criando uma barreira para a progressão das reações a uma dada velocidade. Esse produto de reação é um gel tipo C-S-H, porém com razões Ca/Si inferiores ao cimento Portland. Tanto a natureza do ativador quanto o tamanho do grão influenciam na composição do gel. A Figura 1 ilustra esse mecanismo.

**Figura 1:** Mecanismo de reação para uma escória álcali-ativada

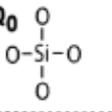
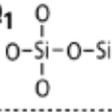
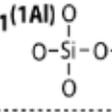
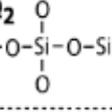
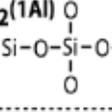
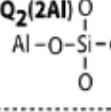
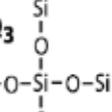
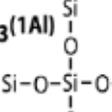
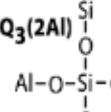
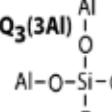
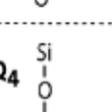
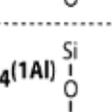
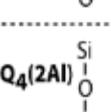
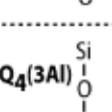
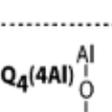
Fonte: Palomo *et al.*, 2014. Modificado.

Os produtos de reação dos sistemas alto CaO se parecem com os originados na hidratação do cimento, sendo o principal produto o gel C-A-S-H (Ca/Si entre 1 e 1,2) e produtos secundários minerais como hidrotalcita ( $\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e AFm (monosulfoaluminato de cálcio) (PALOMO, A *et al.*, 2014). É possível também a formação de um gel C-(N)-A-S-H devido a substituição do  $\text{Ca}^{+2}$  nos polímeros por  $\text{Na}^+$ ; um modelo estrutural para esse gel é mostrado na Figura 2 (KRIVENKO, 2017). Ressalta-se que  $\text{Q}^n$  representa a estrutura molecular dos aluminossilicatos e pode ser visualizada na Figura 3 (KLINOWSKI, 1984). Estes produtos de reação variam conforme a concentração e tipo de ativador, a composição do precursor e o pH do meio (LI, C.; SUN; LI, 2010; PALOMO, A *et al.*, 2014).

**Figura 2:** Estrutura generalizada do gel C-(N)-A-S-H

Fonte: Krivenko, 2017. Modificado.

**Figura 3:**  $^{29}\text{Si}$  chemical shift para blocos  $\text{Q}_n(\text{mAl})$  em silicatos e aluminossilicatos

$\text{Q}_n$	$-\delta$ (ppm)	$\text{Q}_n(\text{1Al})$	$-\delta$ (ppm)	$\text{Q}_n(\text{2Al})$	$-\delta$ (ppm)	$\text{Q}_n(\text{3Al})$	$-\delta$ (ppm)	$\text{Q}_n(\text{4Al})$	$-\delta$ (ppm)
$\text{Q}_0$ 	66 to 73								
$\text{Q}_1$ 	76 to 83	$\text{Q}_1(\text{1Al})$ 	75						
$\text{Q}_2$ 	86 to 91	$\text{Q}_2(\text{1Al})$ 	85	$\text{Q}_2(\text{2Al})$ 	80				
$\text{Q}_3$ 	95 to 101	$\text{Q}_3(\text{1Al})$ 	95	$\text{Q}_3(\text{2Al})$ 	90	$\text{Q}_3(\text{3Al})$ 	85		
$\text{Q}_4$ 	103 to 120	$\text{Q}_4(\text{1Al})$ 	97 to 105	$\text{Q}_4(\text{2Al})$ 	92 to 99	$\text{Q}_4(\text{3Al})$ 	88 to 94	$\text{Q}_4(\text{4Al})$ 	83 to 87

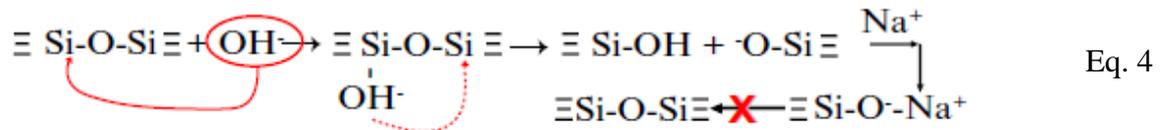
Fonte: Davidovits, 2008.

Puertas *et al.* (2011) encontraram diferenças estruturais entre os géis C-S-H e C-A-S-H formados devido a hidratação de pastas de cimento e de escória ativada, respectivamente. O gel C-S-H possui uma estrutura em forma de corrente, com menor quantidade de Al e menor razão  $\sum \text{Q}^2/\text{Q}^1$ . Pastas de escória ativadas com NaOH possuem como produto de reação um gel C-A-S-H com Al em sua composição (em posições de ponte na estrutura), elevado conteúdo de  $\text{Q}^2(\text{1Al})$  e poucas unidades  $\text{Q}^3(\text{nAl})$ . Já em pastas de escória ativadas com *waterglass* (silicato de sódio líquido) o gel formado possui altas porcentagens de Al em formação tetraédrica, elevada razão  $\sum \text{Q}^2/\text{Q}^1$  e maior conteúdo de unidades  $\text{Q}^3(\text{nAl})$ . A presença de unidades  $\text{Q}^3(\text{nAl})$  é um indicativo da presença de cadeias reticuladas de silicato no gel formado após a ativação da escória.

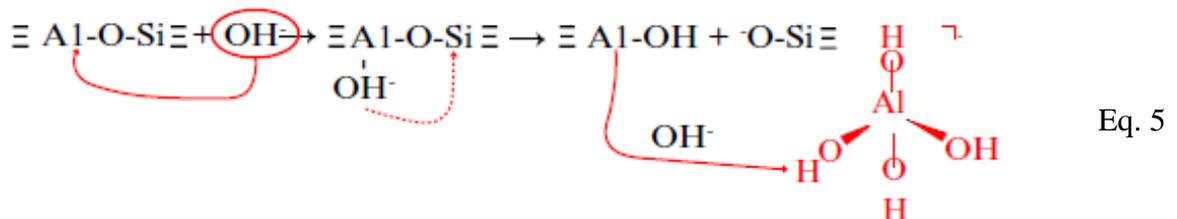
#### 2.1.2.2. Sistemas com baixo teor de cálcio $[(\text{Na}, \text{K})_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}]$

Glukhovskiy propôs um mecanismo geral para a ativação alcalina de materiais compostos basicamente por sílica e alumina. Esse modelo divide o processo em três estágios: (i) destruição-coagulação; (ii) coagulação-condensação e (iii) condensação-cristalização

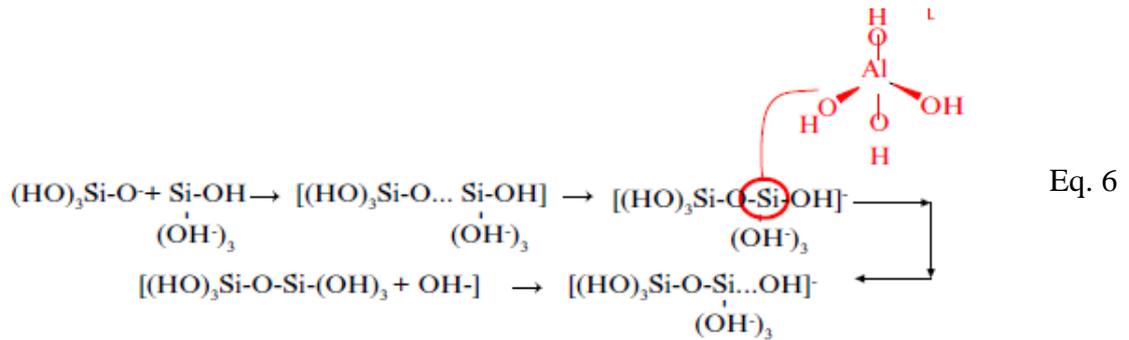
(DUXSON *et al.*, 2007). Segundo Fernández-Jiménez e Palomo (2009a), o primeiro estágio (i) inicia-se com a ruptura das ligações Si-O-Si, Al-O-Al e Al-O-Si no material de origem. Isso é possível com a elevação do pH do meio devido aos íons  $\text{OH}^-$ , conforme Equação 4 (PALOMO, A *et al.*, 2014):



O íon  $\text{OH}^-$  redistribui sua densidade eletrônica ao redor dos átomos de sílica deixando as ligações Si-O-Si mais propensas a ruptura. Compostos intermediários são formados, como ácido silícico ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) e espécimes aniônicas contendo grupos sialato  $\equiv\text{Si-O}^-$ , as quais são neutralizadas pelo cátion de metal alcalino, formando ligações  $\equiv\text{Si-O}^- \text{Na}^+$ . Estas últimas dificultam a reversão para ligações siloxano ( $\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$ ) e criam condições para a formação de uma estrutura coagulada. O grupo hidroxila afeta as ligações Al-O-Si da mesma maneira e predominantemente  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  é formado (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2009). A Equação 5 (PALOMO, A *et al.*, 2014) descreve este último processo:

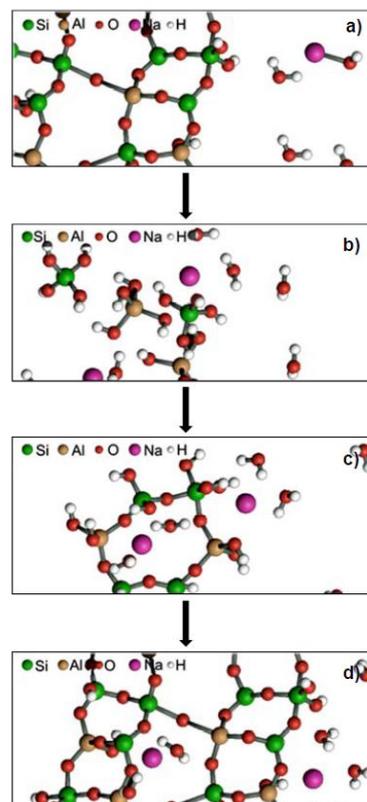


No segundo estágio (ii) a acumulação resulta em uma estrutura coagulada onde a policondensação ocorre. Assim, a um  $\text{pH} > 7$  a desagregação do Si-O-Si da origem ao complexo  $\text{Si}(\text{OH})_4$  (primeiro estágio do processo), que condensa para formar uma nova ligação Si-O-Si e gerar o dímero da Equação 6; dímeros reagem com outros monômeros formando, por fim, polímeros (PALOMO, A *et al.*, 2014). A reação é catalisada pelo íon  $\text{OH}^-$ , enquanto o cátion de metal alcalino é um componente estrutural desta etapa e da próxima. Os aglomerados formados pela polimerização do ácido silícico geram partículas coloidais ao crescer em todas as direções. O Al participa das reações poliméricas substituindo isomorficamente o tetraedro de silício (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2009).



No último estágio (iii) a presença de partículas na fase inicial sólida leva a precipitação de produtos com composições que variam com os aspectos mineralógicos e químicos da fase inicial, condições de cura e natureza do ativador. A depender da temperatura e tempo de cura esses produtos podem chegar à cristalização da zeolita formada (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2009; SEVERO *et al.*, 2013). Zeolitas podem ser definidas como aluminossilicatos hidratados que ocorrem naturalmente, como argilas, e possuem uma estrutura tridimensional aberta, com grandes áreas superficiais e alta capacidade de troca catiônica (JEGANDAN *et al.*, 2010). A Figura 4 ilustra as três etapas propostas por Glukhovsky.

**Figura 4:** Modelo de Glukhovsky para ativação alcalina: (a) precursor em contato com álcalis; (b) dissolução; (c) coagulação; (d) condensação



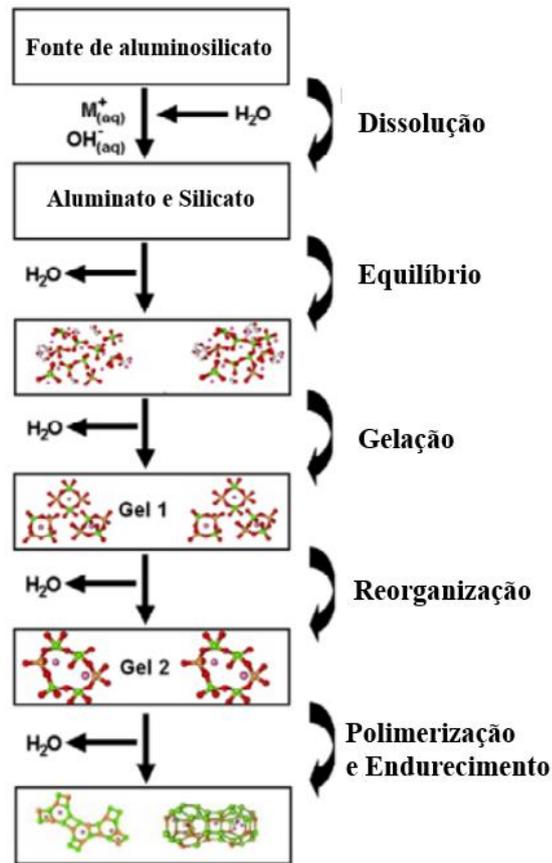
Fonte: Severo *et al.*, 2013.

Criado, Palomo e Fernández-Jiménez (2005) trazem uma interpretação mais recente do modelo proposto por Glukhovsky. Segundo os autores dois estágios ocorrem para a síntese de zeolitas após o ataque alcalino aos aluminossilicatos: (a) uma nucleação inicial com dissolução dos aluminossilicatos no meio alcalino e formação de precursores de zeolitas (engloba os dois primeiros estágios do modelo de Glukhovsky) e (b) um segundo estágio onde os núcleos reativos crescem até um tamanho crítico e começam a cristalizar. Entretanto, a formação de uma zeolita bem cristalizada requer um longo período de tempo, sendo o produto final de reação uma matriz amorfa cujo principal componente é o gel N-A-S-H ou precursor de zeolita (PALOMO, A *et al.*, 2014).

Palomo e Fernández-Jiménez (2009, 2011) simplificam o mecanismo de ativação em um diagrama representado na Figura 5. Inicialmente ocorre a dissolução dos precursores e liberação de sílica e alumina em solução, provavelmente na forma de monômeros. Uma mistura em solução de aluminatos, silicatos e aluminossilicatos é formada, gerando uma solução supersaturada. Isso leva a precipitação de um gel rico em alumínio (gel 1) conforme os oligômeros em solução condensam em redes maiores e liberam a água que havia sido consumida durante a dissolução. Assim a água atua na ocorrência da reação e está ao mesmo tempo incorporada nos poros do gel, gerando uma estrutura bifásica. O alumínio reativo dissolve mais rapidamente que a sílica (cadeias Al-O são mais fracas que as cadeias Si-O), explicando o maior teor de  $Al^{3+}$  no gel intermediário 1. Após a formação do gel 1, rearranjos e reorganizações continuam a ocorrer no sistema com o aumento da conectividade interna do gel, resultando em uma cadeia tridimensional de aluminossilicatos denominada N-A-S-H (gel 2).

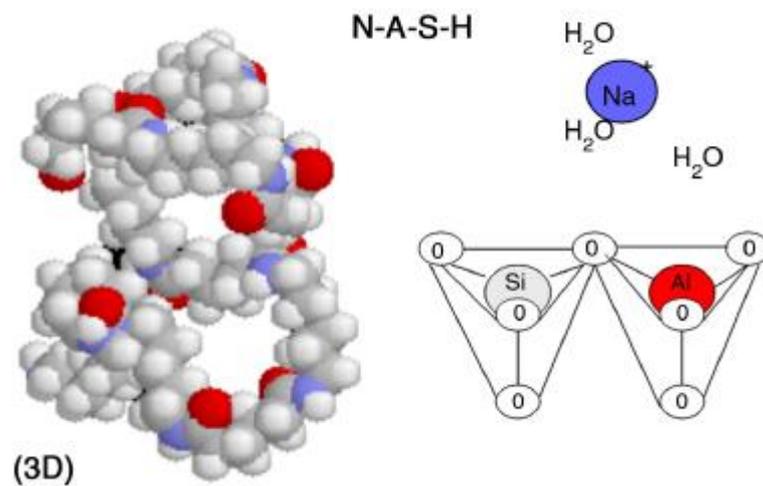
Segundo Davidovits essa estrutura tridimensional do gel N-A-S-H (representada na Figura 6) pode ser designada por uma terminologia denominada poli(sialato), sendo sialato uma abreviação de sílica-óxido-aluminato. Assim, polisialatos são cadeias de polímeros  $Si^{+4}$  e  $Al^{+3}$  em coordenação tetraédrica com o oxigênio e a estrutura resultante é dividida em três tipos: poli(sialato), (-Si-O-Al-O-); poli(sialato-siloxo), (-Si-O-Al-O-Si-O-) e poli(sialato-disiloxo), (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-); a composição típica do geopolímero pode ser expressa por  $nM_2O.Al_2O_3.xSiO_2.yH_2O$ , sendo M o cátion de metal alcalino (DAVIDOVITS, P. J., 2002; SILVA; SAGOE-CRENSTIL; SIRIVIVATNANON, 2007). Produtos secundários do sistema baixo cálcio incluem zeolitas como hidrosodalitas, zeolita P, chabazita-Na, zeolita Y e faujasita (PALOMO, A *et al.*, 2014).

**Figura 5:** Modelo conceitual para álcali-ativação



**Fonte:** Ferández-Jiménez e Palomo, 2011. Modificado.

**Figura 6:** Estrutura 3D do gel N-A-S-H



**Fonte:** Palomo *et al.*, 2014.

### 2.1.3. Cimentos alcalinos híbridos

O cimento álcali-ativado híbrido é composto por  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (com teor próximo a 20%) e pode ser formado por uma mistura de pequenas quantidades de clínquer de cimento Portland e adições minerais superiores a 70% da mistura (e.g. cimento + cinza volante); ou somente por adições minerais (e.g. escória + cinza volante). O gel resultante da ativação destes cimentos é uma mistura complexa, incluindo formações  $\text{N-(C)-A-S-H}$  e  $(\text{N,C)-A-S-H}$  (GARCÍA-LODEIRO, Inés *et al.*, 2012).

Yip, Lukey e Van Deventer (2005) utilizaram microscopia eletrônica de varredura para avaliar uma mistura de metacaulim e escória álcali-ativada por hidróxido e silicato de sódio. Os autores descobriram ser possível uma coexistência entre os géis  $\text{C-S-H}$  e  $\text{N-A-S-H}$  no material ligante, em virtude da existência de uma fonte substancial de cálcio reativo representada pela escória. Entretanto, a formação do gel  $\text{C-S-H}$  se deu somente em sistemas de baixa alcalinidade; para concentrações molares de  $\text{NaOH}$  superiores a 7,5 o gel  $\text{N-A-S-H}$  é predominante, com poucas precipitações de cálcio no ligante. Isso se deve a baixa solubilidade do  $\text{Ca}$  em meios altamente alcalinos, devido a precipitação de hidróxido de cálcio. A existência do gel  $\text{C-S-H}$  preencheu espaços vazios, resultando em pastas mais densas com maior resistência mecânica.

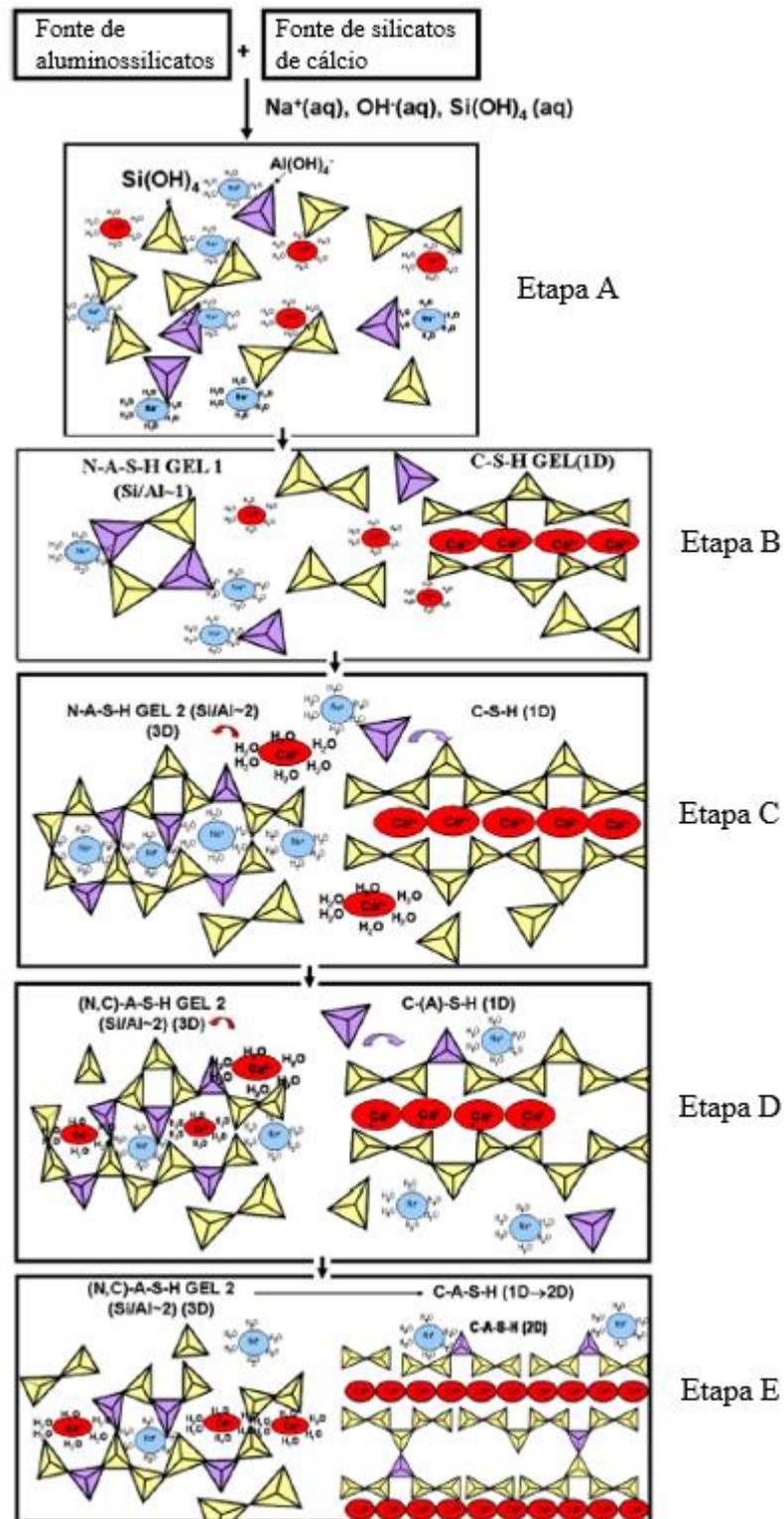
Palomo *et al.* (2007) analisaram cimentos híbridos de clínquer de cimento Portland (30%) e cinza volante (70%) ativados por duas soluções alcalinas ( $\text{NaOH}$  e *waterglass* +  $\text{NaOH}$ ). Estudos de caracterização envolvendo DRX, FTIR e  $^{29}\text{Si}$  MAS-NMR foram realizados para avaliar a matriz endurecida formada após a reação precursor-ativador; para todos os ativadores estudados a matriz era constituída por uma mistura de géis amorfos,  $\text{C-S-H}$  +  $\text{N-A-S-H}$ . Os autores concluíram que o cimento Portland segue caminhos de reação diferentes a depender da concentração de  $\text{OH}^-$  (maior concentração de  $\text{OH}^-$  menor solubilidade do cálcio) e da presença de sílica solúvel no meio. Ainda, à temperatura ambiente, a presença de cimento Portland acelera a ativação da cinza devido ao calor de hidratação do cimento, o qual catalisa as reações químicas da cinza volante.

Em um estudo mais recente, García-lodeiro, Fernández-Jiménez e Palomo (2013) avaliaram o efeito do tempo (365 dias) sobre os géis formados na álcali-ativação de cimentos híbridos (70% de cinza volante + 30% de cimento Portland) por  $\text{NaOH}$  12,5 M +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Concluiu-se que, nos períodos iniciais, os géis  $\text{C-S-H/N-A-S-H}$  não precipitam em um estado puro e tem sua composição influenciada pela presença de espécimes dissolvidas. Ao longo do tempo e em

presença de Al, o gel C-S-H se torna C-A-S-H, o qual uma vez formado retém sua estabilidade; este resultado confirma pesquisas anteriores a respeito da maior estabilidade termodinâmica deste gel em misturas de géis resultantes da ativação de aluminossilicatos e silicatos de cálcio. Já o gel N-A-S-H tem a seguinte evolução ao longo do tempo e em presença de Ca: C-A-S-H => (N,C)-A-S-H => C-A-S-H; entretanto, a conversão final em gel C-A-S-H depende de uma concentração suficiente de cálcio. Observou-se também que as mudanças estruturais do gel N-A-S-H não afetaram a estabilidade estrutural dos materiais, e a resistência continuou a se desenvolver durante o período de tempo analisado. Por fim, os autores propuseram um modelo estrutural em 5 etapas para análise da evolução temporal dos produtos de reação formados no cimento híbrido. O modelo é descrito a seguir e ilustrado pela Figura 7.

Em uma etapa inicial “A” há a dissolução das fontes de aluminossilicatos (cinza) e silicatos de cálcio (cimento), tornando o meio saturado de íons silicato, aluminato e íons cálcio. Na etapa “B”, monômeros de sílica (e.g.  $\text{Si}(\text{OH})_3\text{O}^-$ ,  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) se unem para formar dímeros ou reagem com espécimes  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ , culminando na precipitação do gel N-A-S-H; ao mesmo tempo, íons  $\text{Ca}^{2+}$  e espécimes de silicato provenientes do cimento reagem para formar o gel C-S-H. Na etapa “C”, grupos Si-O dissolvidos dos precursores aumentam a concentração de Si do meio, ocasionando a transformação do gel N-A-S-H tipo 1 ( $\text{Si}/\text{Al} \approx 1$ ) para o gel N-A-S-H tipo 2 ( $\text{Si}/\text{Al} \approx 2$ ) e aumentando o grau de polimerização do gel C-S-H (i.e. ocorre aumento de unidades  $\text{Q}^2$  neste gel). Conforme as reações avançam, na etapa “D” íons de  $\text{Ca}^{2+}$  presentes na solução aquosa começam a se difundir na matriz já endurecida, substituindo íons  $\text{Na}^+$  no gel N-A-S-H e originando o gel (N,C)-A-S-H (3D); enquanto isso, íons  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  interagem com o gel C-S-H assumindo posições de ponte na estrutura para formar o gel C-A-S-H (o alumínio tetraédrico em posição ponte pode favorecer a reticulação estrutural, gerando estruturas 2D). Na etapa final “E” íons cálcio continuam a se difundir pelos poros da estrutura, interagem com o gel (N,C)-A-S-H e ocasionam a liberação de Al pelo mesmo, transformando-o no gel C-A-S-H; já o gel C-A-S-H resultante do C-S-H na etapa anterior passa então a receber mais íons de sílica e alumínio em posições ponte. Assim se encontrava o cimento híbrido um ano após o início das reações (GARCÍA-LODEIRO, I.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2013b).

**Figura 7:** Modelo estrutural de formação dos géis resultantes de um cimento híbrido

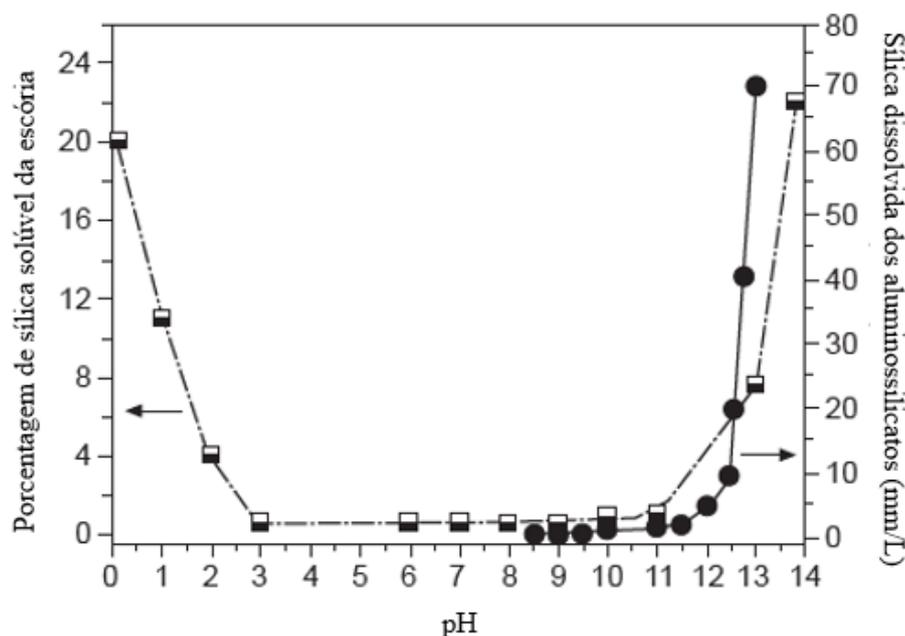


Fonte: García-Lodeiro, Fernández-Jiménez e Palomo, 2013. Modificado.

#### 2.1.4. Ativadores alcalinos

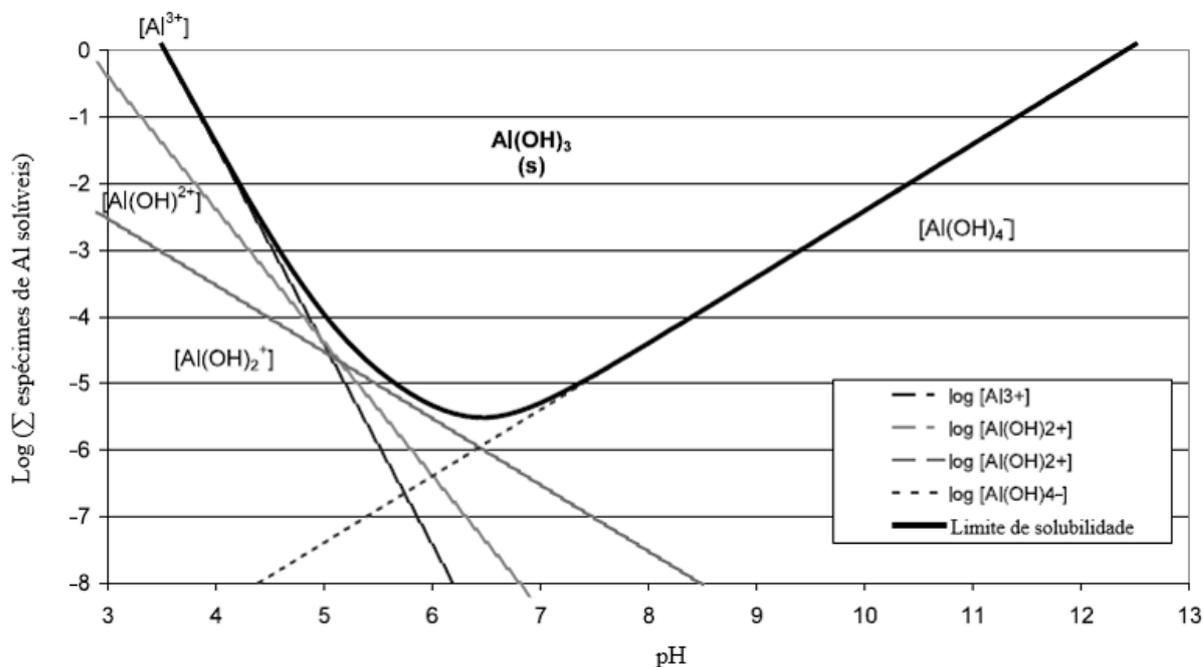
Ativadores alcalinos são necessários para que os mecanismos de reação se iniciem. Através da ativação as superfícies das partículas das matérias primas sofrem hidrólise e elementos Al, Si e Ca são liberados dos precursores. Assim, o ativador fornece cátions necessários para balancear as cargas negativas do alumínio em coordenação tetraédrica, ao mesmo tempo que os íons  $\text{OH}^-$  aumentam o pH e atuam como catalizadores da reação (SEVERO *et al.*, 2013). A Figura 8 mostra a solubilidade da sílica contida em escórias e aluminossilicatos com o aumento de pH da solução; percebe-se que a solubilidade é máxima para um pH inferior a 3 e superior a 11 (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015). Quanto a solubilização do hidróxido de alumínio, Figura 9, percebe-se uma tendência similar, onde a solubilidade aumenta conforme a solução se torna mais ácida ou alcalina (HOLT *et al.*, 2002).

**Figura 8:** Solubilidade da sílica contida em escórias e aluminossilicatos versus pH



**Fonte:** Garcia-Lodeiro, Palomo e Ferández-Jiménez, 2015. Modificado.

**Figura 9:** Solubilidade do hidróxido de alumínio, considerando somente espécimes mononucleares, versus pH



Fonte: Holt *et al.*, 2002. Modificado.

Glukhovskiy classificou os ativadores em seis categorias, de acordo com a sua composição química (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015):

1. Soluções cáusticas: MOH
2. Sais não siliciosos (pouco ácidos):  $M_2CO_3$ ,  $M_2SO_3$ ,  $M_3PO_4$ , MF;
3. Silicatos:  $M_2O.nSiO_2$ ;
4. Aluminatos:  $M_2O.nAl_2O_3$ ;
5. Aluminossilicatos:  $M_2O.Al_2O.SiO_2$ ;
6. Sais não siliciosos (muito ácidos):  $M_2SO_4$ .

#### 2.1.4.1. Soluções de hidróxidos

Os hidróxidos mais comumente utilizados na álcali-ativação são soluções de NaOH e KOH, sendo a viscosidade e calor de dissolução importantes propriedades destas soluções. O hidróxido de sódio é produzido através da hidrólise do cloreto de sódio, em paralelo a produção de cloro. A manufatura da soda cáustica traz impactos ambientais relacionados a emissões de gases estufa (devido ao alto consumo de eletricidade na etapa de produção) e de outros componentes como o mercúrio (PROVIS, John L. *et al.*, 2014).

NaOH é o hidróxido de mais amplo uso na síntese de materiais álcali-ativados devido ao seu baixo custo, ampla disponibilidade e baixa viscosidade. Entretanto, a natureza corrosiva deste e outros hidróxidos faz com que muitas vezes soluções de silicatos sejam mais utilizadas. Outro problema relaciona-se ao uso de altas concentrações do hidróxido, onde os álcalis em excesso reagem com o CO<sub>2</sub> atmosférico causando eflorescência devido a formação de carbonato de sódio ou cristais de bicarbonato (PROVIS, John L., 2009).

Soluções ativadoras com altas concentrações de NaOH aumentam o grau de formação de materiais cristalinos, ao contrário de soluções contendo silicato. A liberação de altos níveis de Al(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup> do precursor em uma solução com alta concentração de silicatos induz a uma rápida e próxima nucleação de fases sólidas. A rápida nucleação leva a produtos menos cristalinos, entretanto, a proximidade dos produtos aumenta a resistência mecânica de cimentos produzidos com uso de silicatos alcalinos no lugar de soluções de hidróxidos (PROVIS, John L.; LUKEY; VAN DEVENTER, 2005).

O hidróxido de potássio é produzido pela hidrólise de soluções de KCl e promove, tal como o NaOH, a formação de zeolitas (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2009; PROVIS, John L. *et al.*, 2014). A capacidade do NaOH de liberar monômeros de alumina e sílica é superior ao KOH, visto que este último possui um cátion de maior tamanho, o que favorece a formação de maiores oligômeros e altera a cinética da reação. Da mesma forma, o cátion Na<sup>+</sup>, de menor tamanho que o K<sup>+</sup>, tem maior capacidade de formar zeolitas por ser capaz de migrar através da rede úmida de gel ou possivelmente por ter maior densidade de carga (DUXSON *et al.*, 2007).

#### 2.1.4.2. Soluções de silicatos

Silicato de sódio (*waterglass* – xSiO<sub>3</sub>.yNa<sub>2</sub>O.nH<sub>2</sub>O) é o ativador mais utilizado na álcali-ativação. A disponibilidade de sílica solúvel, representada pela formulação xSiO<sub>2</sub>/Me<sub>2</sub>O (onde Me = Na, L ou Li e x = razão molar), é de grande importância nestes sistemas por afetar a trabalhabilidade, resistência mecânica e modificar a composição do gel formado (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015b).

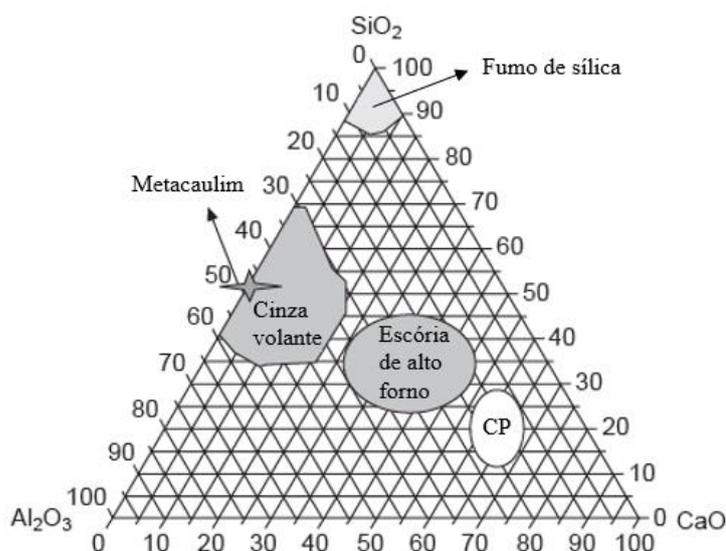
Na ativação de escórias de alto forno (sistema alto cálcio) o silicato de sódio atua como ativador alcalino e indutor de um gel primário com alto teor de sílica (C-S-H/C-A-S-H), que contribui para o desenvolvimento de resistência mecânica. Ao ativar sistemas baixo cálcio, a sílica em solução induz o desenvolvimento de uma microestrutura similar a um vidro, ou seja, uma estrutura compacta, uniforme e sem poros. A presença de sílica em forma de monômeros, e em

menor extensão de dímeros, reduz o tempo necessário para a precipitação do gel (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

### 2.1.5. Precursores

Os precursores mais utilizados na produção de materiais álcali-ativados são a escória de alto forno, cinzas volantes advindas da combustão do carvão e argilas calcinadas (em especial o metacaulim), matérias primas amplamente estudadas para substituição de parte do cimento Portland (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015). A composição destes materiais é mostrada na Figura 10.

**Figura 10:** Composição de precursores utilizados na álcali-ativação



**Fonte:** Garcia-Lodeiro, Palomo e Fernández-Jiménez, 2015. Modificado.

Precursores são materiais com atividade pozolânica, ou seja, materiais silicoaluminosos que finamente moídos reagem com o hidróxido de cálcio em presença de água para formar compostos com propriedades cimentantes (ABNT, 2014). A norma brasileira NBR 12653 (ABNT, 2014) divide essas pozolanas em cinco tipos: naturais, de origem vulcânica (geralmente com mais de 65% de SiO<sub>2</sub>) ou sedimentar; artificiais, provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais; argilas calcinadas; cinzas volantes; e outros materiais, não contemplados pelas descrições anteriores.

#### 2.1.5.1. Precursores tradicionais na álcali-ativação

A escória de alto forno é formada por um conjunto de fases pouco cristalinas com composições que se parecem a dos minerais gehlenita ( $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ ), âkermanita ( $2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$ ) e vidros despolimerizados de silicato de cálcio (DUXSON, 2009). O material é um subproduto de processos como a produção de ferro gusa a partir de minério de ferro ou resíduo de combustão de coque que ao ser resfriado rapidamente resulta em um grão fino vítreo. Ao ser utilizada para a produção de geopolímeros, a escória resulta em um produto de alta resistência ao fogo (CHENG; CHIU, 2003).

Os constituintes da escória, uma combinação de óxidos ácidos ( $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e básicos ( $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ ), resultam de uma fusão a temperaturas em torno de  $1600^\circ\text{C}$  e resfriamento até temperatura ambiente. Quando a escória líquida é resfriada rapidamente até temperaturas inferiores a  $800^\circ\text{C}$  os cristais não se formam e uma estrutura vítrea é adquirida (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2000). A Tabela 1 mostra a composição química da escória.

**Tabela 1:** Composição química típica de escórias de alto forno

$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	S	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	$\text{MnO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$
27-40%	30-50%	5-33%	1-2,1%	<1%	<3%	0,003-0,007%	1-3%	<2%	0,02-0,09%	<3%

Também podem conter  $\text{Cl}_2$  (0,19-0,26%) e  $\text{F}_2$  (0,09-0,23%)

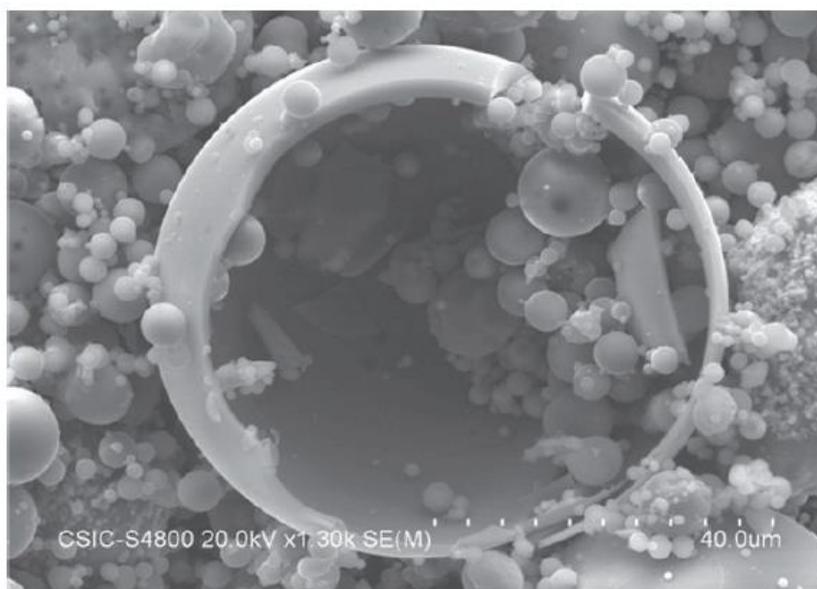
**Fonte:** Fernández-Jiménez, 2000

Os principais requerimentos para que uma escória possa ser utilizada como material cimentante são: possuir uma fase vítrea entre 85-95%; ter uma estrutura altamente desorganizada, ou seja, com maior hidraulicidade (i.e. capacidade do material finamente moído de endurecer em presença de água gerando um produto parecido ao produto de hidratação do cimento Portland); ser básica [ $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2 > 1$ ], já que o  $\text{CaO}$  aparentemente controla a ativação da escória; e ter uma superfície específica de 400-600  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Como resultado da ativação da escória tem-se como produto principal um gel C-A-S-H e como produto secundário, em geral, o mineral hidrotalcita (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

Cinza volante é um subproduto da combustão do carvão constituído por remanescentes de argilas, areias e matéria orgânica. Essas partículas estão presentes no gás de combustão emitido pelos fornos das usinas e são recolhidas por precipitação eletrostática ou captura mecânica. Caracteristicamente, partículas de cinza volante são esféricas, podem ser ocas ou conter

partículas menores e consistem principalmente de fases vítreas e fases minoritárias cristalinas. A Figura 11 ilustra uma partícula de cinza volante (DUXSON, 2009; PALOMO, A *et al.*, 2014).

**Figura 11:** MEV de uma partícula de cinza volante



**Fonte:** Garcia-Lodeiro, Palomo, Fernández-Jiménez, 2015.

Segundo a norma ASTM C618 (ASTM, 2019a) a cinza volante divide-se em duas classes: Classe F, para a cinza resultante da queima de carvão betuminoso ou antracito com no mínimo 50% da sua composição química sendo  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e teor de  $\text{CaO}$  inferior a 18%; e Classe C para cinzas resultantes da queima do carvão sub-betuminoso e linhito com no mínimo 50% da sua composição química sendo  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e teor de  $\text{CaO}$  podendo ser superior a 18%. Ambas classes de cinza possuem propriedades pozolânicas, entretanto, a Classe C também apresenta propriedades cimentantes.

A Tabela 2 lista a composição química das duas classes de cinza volante, sendo a Classe F mais utilizada na síntese de materiais álcali-ativados. A superfície específica da cinza varia de 2500 a 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$  e sua densidade de 2,2 a 2,8  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Vale ressaltar que a qualidade da cinza varia conforme o tipo de forno de combustão utilizado e o tipo de carvão queimado (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

**Tabela 2:** Composição química típica de cinzas volantes

Componente	Cinza Volante Classe C (%)	Cinza Volante Classe F (%)
SiO <sub>2</sub>	34,1	42,6-59,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,2	21,8-34,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,2	6,3-18,1
CaO	38,0	2,8-7,0
SO <sub>3</sub>	4,2	0,19-1,9
MgO	1,5	1,2-2,6
K <sub>2</sub> O	1,4	0,38-6,0
Na <sub>2</sub> O	0,44	0,15-0,94
Sílica Reativa	30,9	0,94
CaO	17,1	0,74

**Fonte:** Garcia-Lodeiro, Palomo, Fernández-Jiménez, 2015.

As principais características da cinza para obtenção de boas propriedades ligantes são: materiais não queimados < 5%; teor máximo de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em 10%; baixo teor de CaO; sílica reativa entre 40-50%; entre 80 e 90% das partículas com tamanho inferior a 45µm e, por fim, grande quantidade de fase vítrea (FERNANDEZ-JIMENEZ; PALOMO, 2003). O principal produto da ativação da cinza volante é o gel N-A-S-H, e produtos secundários são zeolitas do tipo hidrosodalitas, zeolita P, Na-chabazita, zeolita Y e faujasita (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

Metacaulim é um aluminossilicato termicamente ativado com alta atividade pozolânica e tamanho de partícula inferior a 5µm, produzido por meio da calcinação da argila caulínica a temperaturas entre 650 e 800°C. A estrutura do material resultante é desordenada (amorfa), porém, algum nível de ordenação permanece, visto que o metacaulim é gerado por meio da remoção dos grupos hidroxila (OH<sup>-</sup>) das camadas estruturais do caulim. O alumínio na estrutura encontra-se em coordenação IV, V e VI; a porcentagem de Al em coordenação VI reduz com o aumento da temperatura de calcinação, enquanto a porcentagem de Al em coordenação IV e V aumenta, conforme Tabela 3 (WHITE *et al.*, 2011). Destaca-se que a reatividade do metacaulim deve-se ao Al em coordenação V (DAVIDOVITS, Joseph, 2017). A Equação 7 descreve a reação de desidroxilação da caulinita na síntese do metacaulim (LI, C.; SUN; LI, 2010).



**Tabela 3:** Mudanças de coordenação do Al durante a desidroxilação da caulinita

Temperatura de calcinação	% OH remanescente	Coordenação do Al (%)			
		III	IV	V	VI
450 °C	100				100
	97			6	94
	94			13	88
	91		6	13	81
	88		13	13	75
	81		13	28	59
	75		19	22	59
	69	3	16	28	53
	59	3	22	41	34
	500 °C	47		38	47
38			56	38	6
25			72	22	6
550 °C	16		81	19	
750 °C	13	3	66	31	

Fonte: White *et al.*, 2011.

Em geral, o metacaulim é constituído por SiO<sub>2</sub> (40-70%) e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (20-35%), e menores proporções de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiO<sub>2</sub> (< 1%) e outros óxidos alcalinos (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O). O material gerado a partir da álcali-ativação do metacaulim possui como principal produto de reação o gel N-A-S-H e como produtos secundários zeolitas. Ainda, foi observado na ativação alcalina que o Al da estrutura do caulim em coordenação V e VI é convertido para coordenações tetraédricas, Al(IV), com um cátion associado de forma a manter a eletroneutralidade (DUXSON *et al.*, 2007; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

#### 2.1.5.2. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo da produção de açúcar e etanol. Após extração do suco da cana é gerado o bagaço (cerca de 50% em massa da cana-de-açúcar), sendo este usado como combustível na cogeração de vapor e eletricidade e tendo como resíduo de queima a cinza. Para cada tonelada do bagaço queimado entre 25-40 kg de cinza é produzida. O Brasil é o país com maior produção de açúcar do mundo, correspondendo a 20,57% da produção mundial de 2016. Em 2010, 92 milhões de toneladas de cinza do bagaço de cana-de-açúcar foram geradas no país (SALES; LIMA, 2010; XU *et al.*, 2018).

Investigações iniciais indicam potencial de uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como pozolana por a mesma possuir altos teores de sílica. A sílica ou óxido de silício (SiO<sub>2</sub>) é o principal componente da cinza e encontra-se em forma amorfa ou em uma variedade de cristais

polimorfos. A fase cristalina do material é originada a partir da cristalização da sílica hidratada original ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) em formas cristalinas (em geral cristobalita) durante o processo de incineração não controlado e/ou advém da contaminação da cinza com quartzo do solo (CORDEIRO, Guilherme C.; KURTIS, 2017; CORDEIRO, Guilherme Chagas *et al.*, 2009).

Alguns fatores alteram a composição da cinza do bagaço de cana-de-açúcar: condições em que a cana foi cultivada, forma como a queima do bagaço ocorreu e se a cinza foi coletada do fundo da caldeira (partículas maiores e irregulares) ou do sistema filtrante (ARIF; CLARK; LAKE, 2016). A Tabela 4 mostra a composição química de algumas cinzas do bagaço de cana-de-açúcar estudadas pela literatura nos últimos anos. Observa-se em todas as fontes que a cinza é classificada como pozolana de Classe F segundo a ASTM C618 (ASTM, 2019a) ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 50\%$ ).

**Tabela 4:** Componentes químicos da cinza do bagaço de cana-de-açúcar

Fonte	Componentes								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Cordeiro <i>et al.</i> (2009)	78,34	8,55	3,61	2,15	-	1,65	3,46	0,12	1,07
Arif, Clark e Lake (2016)	78,50	7,27	3,85	1,28	1,55	1,28	1,41	0,70	-
Soares <i>et al.</i> (2016)	72,30	5,52	10,8	1,57	-	1,13	-	-	1,11
Cordeiro e Kurtis (2017)	80,80	5,10	1,60	3,10	1,50	-	6,30	-	0,80
Lima Figueiredo e Pavía (2020)	93,40	1,69	2,69	0,36	0,03	0,27	0,71	0	0,16
Bruschi <i>et al.</i> (2021) e Pereira dos Santos <i>et al.</i> (2022)	60,65	5,76	13,87	1,4	-	1,97	2,90	0,22	1,26

Estudos recentes envolvendo a estabilização de rejeitos de mineração utilizaram a cinza do bagaço de cana-de-açúcar em sua forma bruta como precursor em processos de álcali-ativação. Bruschi *et al.* (2021) e Pereira dos Santos *et al.* (2022) estabilizaram, respectivamente, rejeitos de bauxita e de mineração de ouro utilizando um ligante álcali-ativado composto por cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cal de carbureto. A caracterização da cinza por DRX evidenciou a presença de halos amorfos, i.e., há sílica em forma amorfa na cinza justificando sua escolha como material precursor. Valores consideráveis de resistência à compressão simples, rigidez e durabilidade foram obtidos para amostras com o cimento álcali-ativado, demonstrando que a cinza é um precursor viável para a estabilização química de rejeitos.

Entretanto, a cinza tem em geral baixo teor de sílica amorfa (tipicamente, inferior a 50%) e dessa forma menor atividade pozolânica do que outros materiais. A presença de sílica cristalina está relacionada a contaminação do bagaço com quartzo do solo de plantio. Assim, métodos

para aumentar a capacidade pozolânica da cinza vem sendo estudados, tais como: controle da temperatura de calcinação ou recalcinação da cinza, controle da finura dos seus grãos e redução das perdas por ignição (FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011; XU *et al.*, 2018).

Nesse sentido, Cordeiro *et al.* (2009) realizaram uma moagem ultrafina de uma cinza do bagaço de cana-de-açúcar com 49% de atividade pozolânica, alcançando uma atividade pozolânica mínima de 75% (requisito mínimo da norma ASTM C618 para classificar um material como pozolana) em todas moagens que atingiram uma área superficial específica superior a 300 m<sup>2</sup>/kg e D<sub>80</sub> inferior a 60 µm. Frías, Villar e Savastano (2011) conseguiram maior reatividade pozolânica ao calcinar uma cinza do bagaço de cana-de-açúcar em laboratório a temperaturas da ordem de 800°C. Os autores encontraram para a taxa de fixação do Ca(OH)<sub>2</sub> em solução, em 24 horas, o valor de 42% para a cinza calcinada e 19% para a cinza em estado bruto. Cordeiro, Andreão e Tavares (2019) calcinaram a cinza do bagaço (temperaturas da ordem de 600°C) e em seguida moeram-na para reduzir o diâmetro dos grãos. O resultado foi um aumento da atividade pozolânica, mensurada por uma redução de 43% do Ca(OH)<sub>2</sub> (após 28 dias) nas pastas de cimento contendo a cinza modificada em relação a pastas de cimento com a cinza de referência.

Figueiredo e Pavía (2020) estudaram a reatividade pozolânica de quatro cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, provenientes de diferentes fornecedores, moídas previamente à realização de ensaios mecânicos para aumentar sua finura. Os autores concluíram que, apesar da presença significativa de fases cristalinas, as amostras de cinza apresentaram atividade pozolânica. Além disso, cinzas com maior conteúdo de carbono e área superficial específica apresentaram maior reatividade, i.e., maior resistência à compressão simples em relação as outras amostras. Os resultados demonstraram que a finura não é vital para a reatividade visto que cinzas de maior diâmetro médio dos grãos (D<sub>50</sub> = 9,88 µm) apresentaram resistência à compressão simples similar a cinzas de menor diâmetro médio dos grãos (D<sub>50</sub> = 8,14 µm).

Este trabalho pretende aprofundar o conhecimento acerca dos mecanismos de reação e produtos obtidos a partir da álcali-ativação da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

#### 2.1.6. Efeitos das razões SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CaO/SiO<sub>2</sub> reativas

Nos precursores, fases amorfas dos aluminossilicatos coexistem com fases cristalinas. Essa composição química tem influencia direta na formação dos géis C-A-S-H (sistemas com alto

teor de CaO e sílica) e N-A-S-H (sistemas com baixo teor de CaO e alto teor de aluminossilicatos) e dá origem a dois parâmetros que podem ser usados para prever as características do gel formado: CaO/SiO<sub>2</sub> reativa e SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reativa (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

Nesse sentido, a razão SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reativa (fase amorfa) relaciona-se à composição e estrutura do gel N-A-S-H formado e à resistência e durabilidade do produto final. A razão Si/Al reativa pode ser determinada por meio de um ataque ácido ao precursor utilizando-se uma solução de ácido fluorídrico 1% (v/v). Assim, 1,0 g do aluminossilicato é submetido a 100 ml de ácido fluorídrico durante 5 h de agitação. O resíduo sólido resultante do ataque químico e a solução são separados por um papel filtro para retenção de partículas inferiores a 2µm; o resíduo seco é calcinado em conjunto com o papel filtro (1000°C/1 h) para encontrar a % de fase reativa (massa inicial do aluminossilicato subtraída da massa final resultante). Já a porcentagem de sílica e alumina reativa presente na solução é determinada com o uso de espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-AES) (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015; RUIZ-SANTAQUITERIA *et al.*, 2013).

A literatura indica que ligantes obtidos através de precursores com relação molar reativa Si/Al entre 2 e 4 possuem maior resistência mecânica (SILVA; SAGOE-CRENTIL; SIRIVIVATNANON, 2007; GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015; SEVERO *et al.*, 2013). Estudos realizados com metacaulim e adições de alumina e sílica concluíram que precursores com maior conteúdo de alumina reativa (Si/Al < 2) não apresentavam características típicas de geopolímero além de menores resistências mecânicas. Por outro lado, amostras com razão Si/Al superior a 24 apresentaram propriedades mecânicas crescentemente elásticas (FLETCHER *et al.*, 2005).

Entretanto, a presença de Al tem um papel importante na cinética de formação do gel de aluminossilicato, seu ganho de resistência, tempo de pega e microestrutura. No início da ativação alcalina, ligações Al-O são mais rapidamente rompidas que ligações Si-O, originando alta concentração de Al em solução. O Al então se conecta a sílica liberada do precursor formando ligações Al-Si-O nos estágios iniciais da ativação e levando a precipitação de um gel metaestável (Gel 1), rico em Al e com menor porcentagem de Si. Com o tempo o Gel 1 é transformado em Gel 2, rico em sílica e responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica. Em resumo, o alumínio fornece o gatilho que inicia o endurecimento químico da

reação e a sílica é responsável pela resistência em idades mais avançadas do gel (DUXSON, 2009; DUXSON *et al.*, 2007; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 2006).

Silva, Sagoe-Crenstil e Sirivivatnanon (2007) afirmam que produtos de reação cristalinos estão associados a um maior teor de alumínio ( $\text{Si/Al} < 2$ ), enquanto maiores razões  $\text{Si/Al}$  resultam em um polímero amorfo. Com o aumento de alumínio o gel formado possui uma microestrutura N-A-S-H granular, menos resistente e com maior tempo de pega. Em conformidade com este estudo, Khalifa *et al.* (2020) afirmam que razões  $\text{Si/Al} > 1,5$  favorecem a formação de géis em detrimento da formação de zeolitas. Buchwald, Zellmann e Kaps (2011) sintetizaram géis de aluminossilicatos por meio de soluções puras de silicatos e aluminatos alcalinos; ao mesmo tempo, a influência da concentração de NaOH foi avaliada. Para uma razão  $\text{Si/Al} = 1$  e distintas concentrações de NaOH os autores observaram ser possível a coexistência de zeolitas e do gel N-A-S-H.

A razão reativa  $\text{CaO/SiO}_2$  está relacionada a sistemas com alto teor de cálcio e ao produto de reação C-S-A-H, similar ao produto C-S-H da hidratação do cimento. Segundo Shi e Lothenbach (2019) razões  $\text{Ca/Si}$  menores (0,1-0,2) favorecem a formação de produtos cristalinos e a razões maiores (0,5) o produto de reação tende ao C-S-H.

#### 2.1.7. Condições de cura: tempo, temperatura e umidade

As condições em que um material álcali-ativado é curado tem grande influência nas suas propriedades químicas e físicas. Um aumento da temperatura de cura de materiais álcali-ativados pode, por exemplo, conduzir a melhorias nas suas propriedades mecânicas em períodos menores de tempo. Estudos utilizando diferentes temperaturas de cura (40-85°C) para a ativação de cinzas volantes com NaOH e silicato de sódio mostram que o calor é necessário para que se acelere a taxa de ganho de resistência mecânica, visto que pastas de cinza álcali-ativadas ganham resistência lentamente a menores temperaturas (próximas a 23°C). Amostras curadas a maiores temperaturas apresentam uma estrutura mais densa, no entanto, para reações mais lentas (a menores temperaturas) há maior a quantidade de alumínio incorporada no produto de reação (MUSTAFA AL BAKRIA *et al.*, 2011; PALOMO, Angel *et al.*, 2004).

Entretanto, um elevado tempo de cura aliado a elevadas temperaturas ocasiona perdas de umidade, afetando o desenvolvimento das reações e ocasionando redução nos ganhos de resistência ao enfraquecer a estrutura do gel. Pequenas quantidades de água estrutural são

necessárias para reduzir a fissuração e manter a integridade da estrutura, evitando a desidratação e retração do gel (HEAH *et al.*, 2011; MUSTAFA AL BAKRIA *et al.*, 2011). Essas observações evidenciam a importância do papel da umidade durante a cura.

Em estudos envolvendo cinzas volantes ativadas por NaOH e *waterglass* observou-se que nos estágios iniciais do processo de ativação, quando o material está em contato com a atmosfera, a carbonatação ocorre muito rapidamente e diminui conforme as reações se desenvolvem e o material se torna mais compacto dificultando a penetração do CO<sub>2</sub> na matriz. Se a umidade relativa do ar durante a cura é alta (80%) ou baixa (25%) o gás carbônico tem dificuldade em adentrar a estrutura, contudo, para umidades entre 45-75% o CO<sub>2</sub> penetra rapidamente na matriz. A presença de CO<sub>2</sub> no material resulta na formação de bicarbonato de sódio, o qual reduz o pH do meio e em consequência a taxa de formação do gel aluminossilicato e o ganho de resistência. Assim, é preciso controlar a umidade relativa do ar durante a cura para se evitar carbonatação (CRIADO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2005; KOVALCHUK; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2007).

Kani e Allahverdi (2009) testaram a aplicação de uma pré-cura, por 7 dias e a temperatura ambiente, de 95% de umidade relativa em uma pozolana natural ativada por hidróxido e silicato de sódio, posteriormente ocorrendo a aplicação de calor (85°C durante 20h) nas amostras. Os autores concluíram que esse procedimento é benéfico para um maior desenvolvimento de resistência mecânica. Por outro lado, outros pesquisadores notaram que a cura de metacaulim ativado por silicato de sódio a temperatura ambiente e umidade relativa controlada (30-70%) mas sem vedação rigorosa não oferece vantagens em relação a amostras vedadas, curadas a temperatura ambiente e em sequência levadas a containers com temperaturas controladas entre 40-60°C (PERERA *et al.*, 2007).

Dessa forma, a influência das condições de cura varia conforme o precursor e o ativador utilizados utilizadas. Mais pesquisas acerca da influência do tempo de cura, da umidade e da temperatura na formação dos produtos da álcali-ativação são necessárias.

#### 2.1.8. Barreiras na comercialização de geopolímeros

Apesar da álcali-ativação ser conhecida pela indústria cimenteira há aproximadamente 50 anos e de inúmeras pesquisas terem mostrado que as propriedades físicas e químicas dos materiais álcali-ativados são suficientes para seu uso em diversos ambientes e indústrias, barreiras

permanecem para a comercialização desse produto. Dois empecilhos principais são: a necessidade de normas em cada jurisdição governamental e a falta de dados atestando a estabilidade a longo prazo dos materiais álcali-ativados (DUXSON; VAN DEVENTER, 2009).

Na antiga União Soviética cimentos alcalinos podiam ser comercializados devido a normas existentes acerca do uso destes materiais. Atualmente, indústrias na Rússia e Ucrânia se beneficiam desse legado, e a última norma reguladora para diferentes tipos de cimento álcali-ativados foi aprovada na Ucrânia em 2009 (DSTU B V.2.7-181:2009). Essa norma classifica os cimentos de acordo com sua composição química e resistência à compressão com 28 dias de cura, e regula o uso em larga escala de cimentos alcalinos na indústria de construção Ucraniana. Nos Estados Unidos, a norma ASTM C1157 (ASTM, 2020b) não especifica a composição química dos cimentos hidráulicos que normatiza, e pode ser uma alternativa para o uso de cimentos alcalinos. Essas diretrizes podem ser tomadas como exemplo em países que pretendem auxiliar o comércio em larga escala de cimentos derivados da álcali-ativação (PALOMO, A *et al.*, 2014). Em relação a durabilidade dos materiais produzidos com cimentos alcalinos, concretos fabricados com uso dos mesmos podem ser monitorados ao longo do tempo no seu local de construção e usados como base (com o auxílio de *experts*) para formular recomendações a futuras normas (DUXSON; VAN DEVENTER, 2009).

Devido a atual necessidade de se mitigar as mudanças climáticas e impactos ambientais causados pelos meios de produção, alternativas sustentáveis ao uso do cimento Portland têm sido estudadas. Dessa forma, solucionando-se os principais entraves a ampla comercialização de materiais álcali-ativados, os mesmos podem vir a ser reais alternativas ao amplo uso de cimento Portland.

## 2.2. SOLOS EXPANSIVOS

Solos expansivos caracterizam-se por apresentar grandes variações de volume (expansão/contração) quando submetidos a flutuações no seu teor de umidade decorrentes de variações climáticas sazonais (ZHAO *et al.*, 2014). Ainda, a densidade seca inicial desses solos tem grande influência na sua expansão (solos de maior densidade tem maior potencial expansivo), bem como a fração de argila (maior fração de argila, maior expansão) e sua mineralogia (EMARAH; SELEEM, 2018). Segundo Emerah e Seleem (2018) o grau de

expansão relaciona-se ao índice de plasticidade IP solo: grau baixo (IP = 0-15%), grau médio (IP = 15-30%) e grau alto (IP = 30-60%).

Danos severos em infraestruturas são decorrentes do comportamento deste tipo de solo, o qual pode causar pressão suficiente para fissurar calçadas, pavimentos, dutos, fundações e pisos de subsolo (COKCA; YAZICI; OZAYDIN, 2009; PUPPALA; PEDARLA, 2017). Nos Estados Unidos anualmente o dano estimado a construções devido a fenômenos de expansão é da ordem de 15 bilhões de dólares, enquanto a Associação de Seguradoras Britânicas estima em 400 milhões de libras o gasto de seguradoras para cobrir danos decorrentes de variações volumétricas do solo (JONES; JEFFERSON, 2015).

Em determinadas ocasiões, o comportamento expansivo de um solo é consequência de mudanças quimicamente induzidas. Como exemplo, cita-se solos sulfatados cujo tratamento com cal leva a formação de etringita, um mineral expansivo. Entretanto, solos expansivos possuem em sua maioria minerais argilosos expansivos (JONES; JEFFERSON, 2015). Assim, exemplos deste tipo de solo incluem argilas de alta plasticidade ou alto IP e argilas sobreadensadas ricas em minerais argilosos do tipo montmorilonita – esmectita (PUPPALA; PEDARLA, 2017).

### 2.2.1. Minerais argilosos

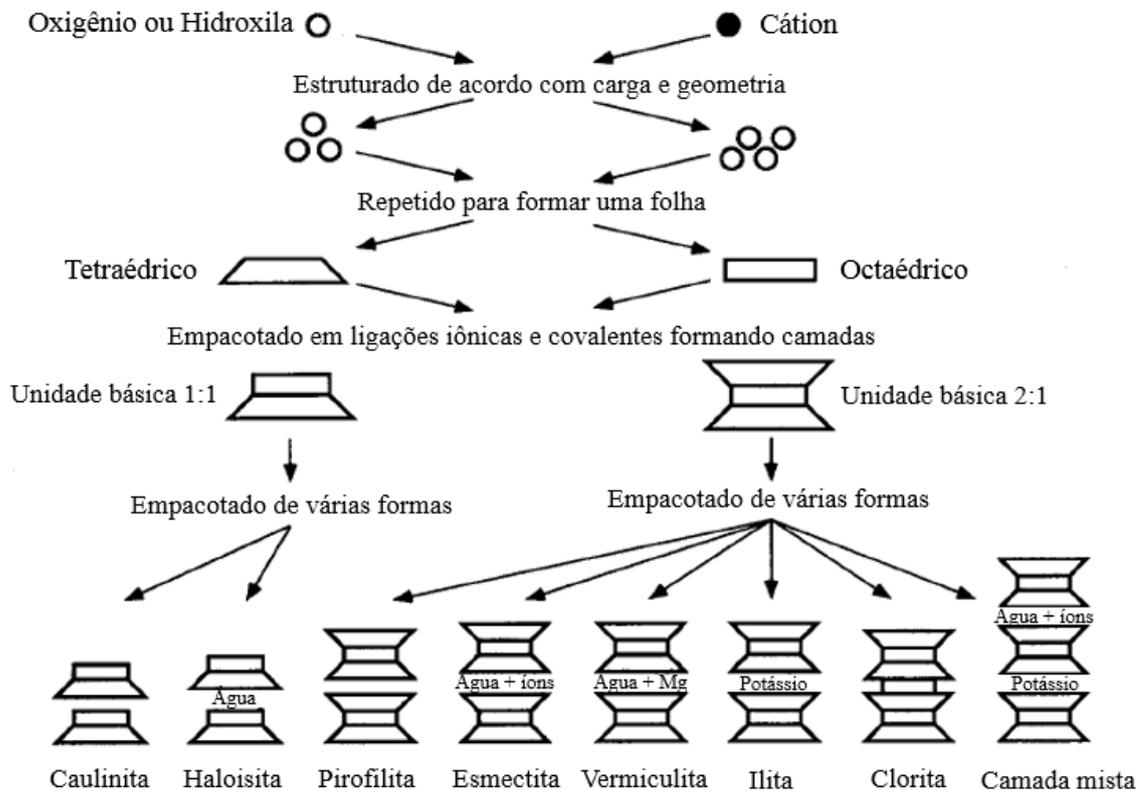
Minerais argilosos pertencem a família de minerais filossilicatos, a qual também contém outros minerais como talco, mica, cloreto e serpentina. Por meio de combinações entre duas unidades estruturais, tetraedro de sílica ( $\text{Si}_4\text{O}_{10}^{4-}$ ) e octaedro de alumínio ( $\text{Al}_2(\text{OH})_6$  – gibbsita) ou magnésio ( $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$  – brucita), são formados diferentes grupos de minerais argilosos. A presença de cátions em substituição a outros normalmente encontrados na estrutura cristalina é denominada substituição isomórfica e gera uma carga negativa nas partículas de argila. Grande parte das vezes a célula unitária possui uma carga negativa devido a substituição da sílica ( $\text{Si}^{+4}$ ) por alumínio ( $\text{Al}^{+3}$ ) na coordenação tetraédrica, a qual é então balanceada pela adsorção de cátions, denominados cátions intercambiáveis, como potássio ( $\text{K}^+$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), sódio ( $\text{Na}^+$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e bário ( $\text{Ba}^{2+}$ ) (MITCHELL, James K.; SOGA, 2005). Dessa forma, diversos fatores afetam as propriedades físico-químicas das argilas, tais como: a mineralogia das camadas, cátions intercambiáveis entre as camadas, tipo e quantidade de mineral associado, presença de sais solúveis e matéria orgânica e granulometria (KHALIFA *et al.*, 2020)

Os minerais têm células unitárias distribuídas em duas, três ou quatro folhas. Assim, folhas da mesma unidade estrutural são agrupadas formando uma camada. Conforme Figura 12, há minerais formados por uma folha de sílica em coordenação tetraédrica e uma folha em coordenação octaédrica (1:1); e uma folha em coordenação octaédrica entre duas folhas de sílica em coordenação tetraédrica (2:1). O mineral clorita destaca-se por possuir duas camadas 2:1 e uma folha de hidróxido como camada intermediária, totalizando quatro folhas estruturais (MITCHELL, James K.; SOGA, 2005).

Diferentes tipos de ligação entre camadas dos minerais de argila são descritas na literatura, a saber, camadas paralelas neutras ligam-se por forças de Van der Waals, uma ligação fraca que ocasiona ruptura paralela às camadas; camadas opostas de oxigênio e hidroxilas ou hidroxilas e hidroxilas unem-se por ligações de hidrogênio, estáveis em presença de água; e camadas de silicato neutras separadas por moléculas de água de elevada polaridade são unidas por ligações de hidrogênio. Ainda, a presença de cátions para garantir a neutralidade elétrica também controla a ligação entre camadas. Quando a densidade superficial é moderada em minerais, como na esmectita e vermiculita, moléculas polares são adsorvidas pelas camadas de silicato e cátions entre camadas hidratam resultando em expansão, visto que a energia de hidratação é superior às ligações de atração entre camadas (MITCHELL, James K.; SOGA, 2005).

No próximo tópico são descritos os dois minerais argilosos estudados neste trabalho, caulim e bentonita, sendo o último o nome comercial dado a uma variedade de minerais do grupo esmectita.

**Figura 12:** Síntese de minerais argilosos

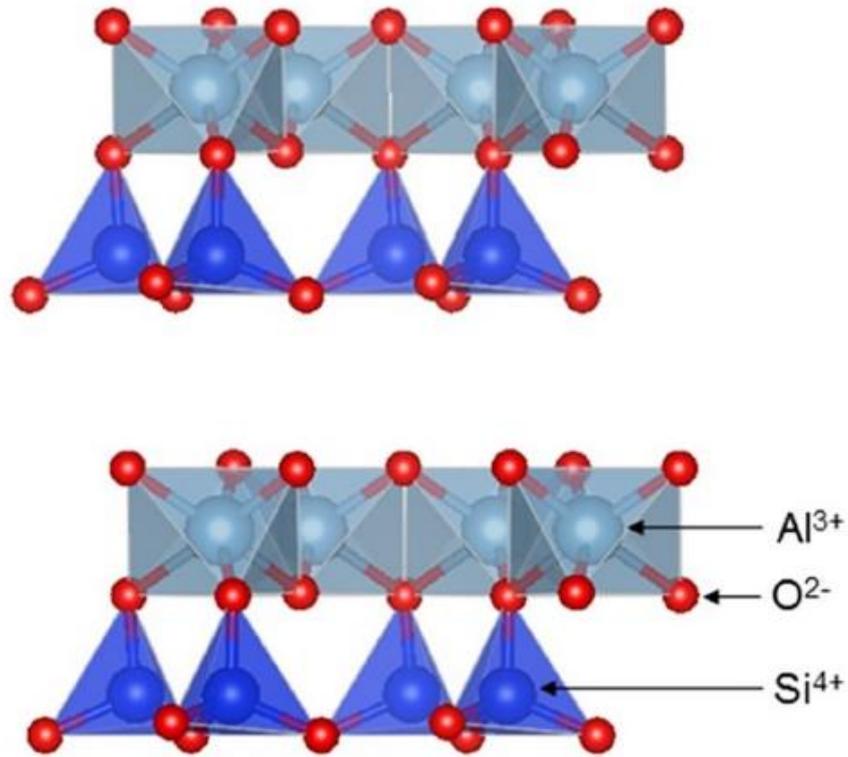


Fonte: Mitchell e Soga, 2005.

### 2.2.1.1. Caulinita

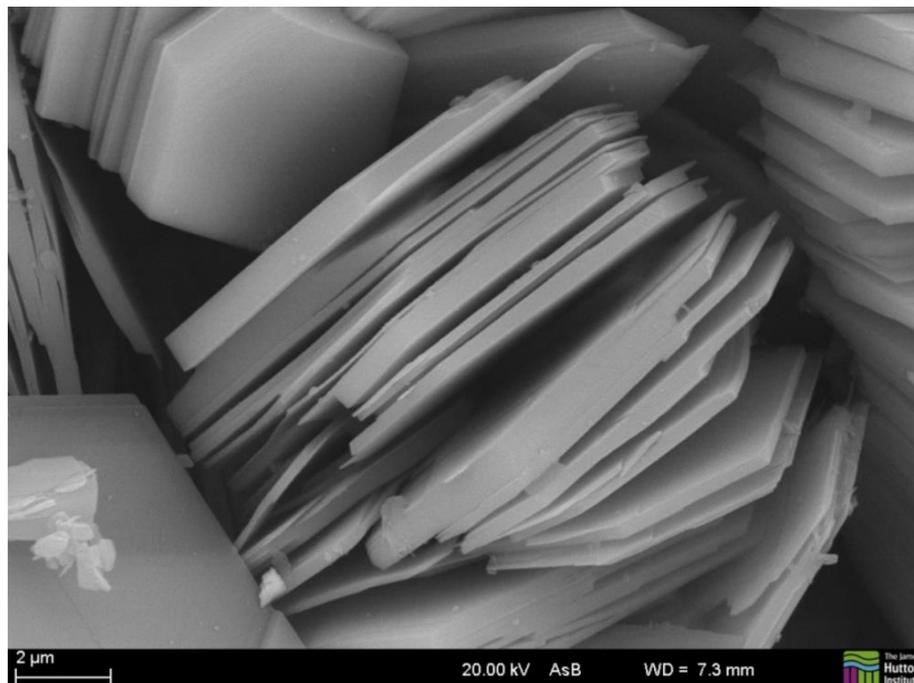
Caulim ou caulinita,  $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ , é o mais comum dos minerais argilosos 1:1. Pouca substituição atômica ocorre neste mineral levando-o a não ter uma carga permanente de camada; dessa forma, o caulim não possui cátions entre camadas e portanto apresenta um comportamento não expansivo (KHALIFA *et al.*, 2020). A Figura 13 representa atômica duas camadas de um caulim e a Figura 14 é uma imagem obtida por MEV reproduzida da *Mineralogical Society of Great Britain & Ireland and The Clay Minerals Society*, a partir do projeto “Images of Clay Archive” (MINERALOGICAL SOCIETY OF GREAT BRITAIN & IRELAND; THE CLAY MINERALS SOCIETY, 2020).

**Figura 13:** Representação atômica do caulim



Fonte: Khalifa *et al.*, 2020.

**Figura 14:** MEV de um Caulim

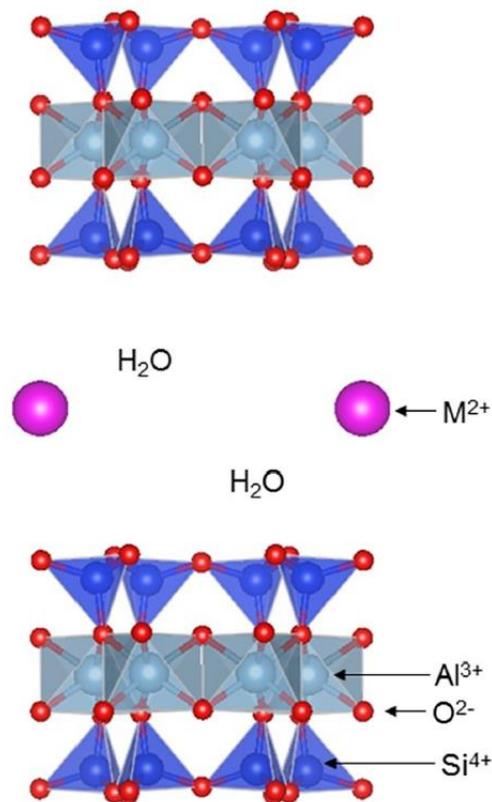


Fonte: Mineralogical society of great britain & ireland e The clay minerals society, 2020.

### 2.2.1.2. Montmorillonita

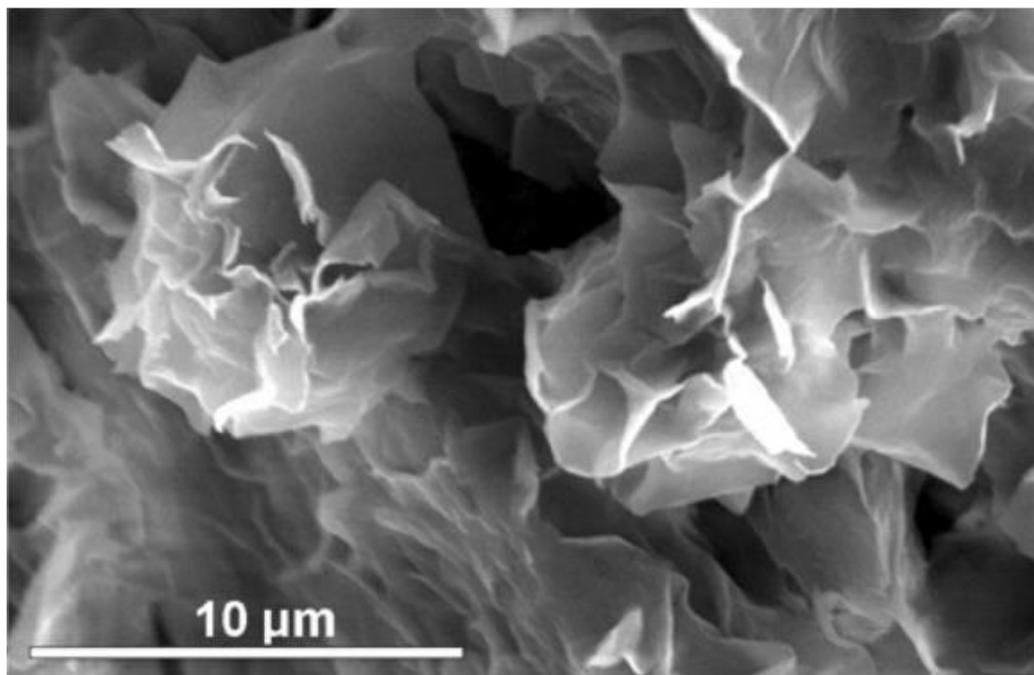
Montmorillonita, comercialmente conhecida como bentonita, é o mineral do grupo esmectita de maior ocorrência natural, sendo sua formulação aproximada  $(M_y^+ \cdot H_2O)(Al_{2-3^+}Mg_y^{2+})Si_4^{4+}O_{10}(OH)_2$ . O mineral, de empacotamento 2:1, possui carga elétrica permanente em suas camadas devido a substituição isomórfica nas suas folhas octaédricas (substituição de  $Al^{3+}$  por  $Mg^{2+}$  e  $Fe^{2+}$ ) e/ou tetraédricas (substituição de  $Si^{4+}$  por  $Al^{3+}$ ). Além disso, diversos cátions podem estar presentes entre as camadas deste mineral, entretanto,  $Ca^{2+}$  e  $Na^+$  são mais comuns, dando origem a bentonita calcítica e sódica, respectivamente. Estes cátions podem se hidratar levando a formação de uma dupla camada difusa por osmose, o que resulta em expansão deste mineral em presença de água (KHALIFA *et al.*, 2020). A Figura 15 representa atômica duas camadas de uma montmorillonita e a Figura 16 é uma imagem obtida por MEV reproduzida da *Mineralogical Society of Great Britain & Ireland and The Clay Minerals Society*, a partir do projeto “Images of Clay Archive” (MINERALOGICAL SOCIETY OF GREAT BRITAIN & IRELAND; THE CLAY MINERALS SOCIETY, 2020).

**Figura 15:** Representação atômica da montmorillonita



**Fonte:** Khalifa *et al.*, 2020.

**Figura 16:** MEV da Montmorillonita



**Fonte:** Mineralogical society of great britain & ireland e The clay minerals society, 2020.

## 2.3. ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA

### 2.3.1. Introdução

A estabilização química possibilita a melhoria de propriedades do solo como estabilidade volumétrica, resistência, permeabilidade e durabilidade, por meio da troca iônica na superfície dos minerais argilosos, onde cátions de alta hidratação (e.g.  $\text{Na}^+$ ) são substituídos por cátions de baixa hidratação (e.g.  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{+3}$ ), união entre partículas e preenchimento de espaços vazios pelos produtos da reação química (MITCHELL, J.K., 1981; TERASHI; JURAN, 2000).

Para a estabilização de solos finos plásticos e expansivos tipicamente faz-se uso de 3 a 8% de cal por peso de solo seco, enquanto o cimento é usado tipicamente para estabilização de solos arenosos e de baixa plasticidade em porcentagens de 2 a 16% por peso de solo seco (ACI, 2009; MITCHELL, J.K., 1981). Entretanto, solos arenosos cujo teor de matéria orgânica é superior a 2% ou cujo pH é inferior a 5,3 não irão reagir apropriadamente com o cimento (ACI, 2009).

A estabilização química de solos é utilizada largamente em diversas aplicações de engenharia, como sub-base de pavimentos e rodovias, fundações, aterros e estruturas de contenção. Dois tipos de estabilizantes podem ser utilizados, os orgânicos e inorgânicos. Estabilizantes orgânicos como resinas e poliuretanos são caracterizados por rápidos ganhos de resistência e propriedades constantes ao longo do tempo, enquanto estabilizantes inorgânicos como o cimento apresentam ganhos de resistência com o passar do tempo (MITCHELL, J.K., 1981). Entretanto, efeitos adversos podem ocorrer ao se utilizar cal e cimento para estabilização do solo, por exemplo, na presença de sulfatos esses aditivos levam a formação de etringita e/ou taumasita ( $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{OH})_6(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), acarretando uma expansão não prevista (BEHNOOD, 2018).

Características do solo (composição química e mineralogia, tamanho das partículas, teor de sal, superfície específica, capacidade de troca catiônica) e do agente estabilizante (tipo e quantidade) irão ditar as propriedades do solo estabilizado, além do tempo e condições de cura, e da qualidade da construção. Ainda, uma boa mistura estabilizante-solo afeta significativamente a qualidade dos resultados, levando-se em conta a subdivisão do solo e a distribuição do aditivo (BEHNOOD, 2018; MITCHELL, J.K., 1981). Consoli *et al.* (2007) estudaram a resistência de solos arenosos artificialmente cimentados com uso de cimento Portland de alta resistência inicial (tipo III). Concluiu-se que o cimento possui maior eficiência em misturas mais compactadas e, portanto, de menores porosidades; para uma dada massa específica seca a umidade influencia a resistência à compressão simples do solo tratado até um valor máximo limite, suficiente para hidratar as partículas de cimento.

### 2.3.2. Cimento Portland

Os componentes do cimento Portland são formados a partir da calcinação, a temperaturas aproximadas de  $1450^\circ\text{C}$ , de misturas previamente trituradas de calcário ( $\text{CaCO}_3$ ), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e argila ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). A partir da queima das matérias-primas forma-se o clínquer, material granular que é moído em conjunto com 5% de gesso até a obtenção de um fino pó com tamanho médio das partículas da ordem de  $10\mu\text{m}$ , o cimento. Quatro fases principais compõem o cimento Portland, as quais reagem com a água formando diferentes produtos de hidratação: silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) ou alita, silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ) ou belita, aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ), ferrita ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) e gesso ( $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$ ) (YOUNG *et al.*, 1998).

Os silicatos de cálcio são os componentes do cimento Portland responsáveis por sua resistência e constituem de 75% a 80% do cimento. As Equações 8 e 9 representam sua hidratação:



Sendo C = CaO, S = SiO, H a água, CH o hidróxido de cálcio e C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>8</sub> o silicato de cálcio hidratado, C-S-H, um material amorfo que é responsável pela resistência mecânica do cimento endurecido e cuja estrutura é similar a do mineral tobermorita (RICHARDSON, 2004).

O aluminato tricálcico sem a presença de gesso reage rapidamente com a água e produz uma grande quantidade de produtos de hidratação, causando endurecimento da pasta em poucos minutos, o que é indesejável para a produção de concreto. Nesse sentido, o gesso é adicionado na produção de cimento e reage com o C<sub>3</sub>A produzindo etringita, a qual recobre a partícula de aluminato e previne sua hidratação rápida. A Equação 10 descreve a formação da etringita:



Sendo A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e  $\bar{S}$  = SO<sub>3</sub>. Quando a quantidade de gesso disponível está em pequenas quantidades a etringita e o C<sub>3</sub>A reagem produzindo monosulfoaluminato, conforme Equação 11.



Finalmente, a hidratação da ferrita ocorre por meio da Equação 12.

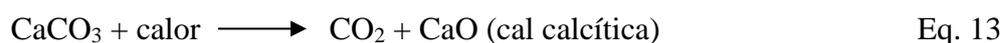


Sendo F = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>(A,F)H<sub>13</sub> aluminato tetracálcico hidratado e (A,F)H<sub>3</sub> hidróxido de alumínio férrico.

As reações químicas descritas ocorrem a diferentes taxas e a resistência resultante dos produtos de hidratação varia, sendo as fases alumina e ferrita pouco representativas para a resistência final (YOUNG *et al.*, 1998). Em relação ao uso de cimento para estabilização a norma ASTM C150/C150M (ASTM, 2020b) especifica cinco tipos de cimento Portland com respectivas indicações de uso. A escolha do cimento dependerá do tipo de solo e de propriedades requeridas, sendo os mais utilizados os tipos I e II (ACI, 2009).

### 2.3.3. Cal

A cal é produzida a partir da calcinação do calcário, rocha contendo no mínimo 50% de carbonato de cálcio. Os processos de produção da cal viva ou cal virgem (CaO) são: extração do calcário, trituração e moagem do calcário e calcinação do calcário beneficiado. Posteriormente, a cal virgem pode ser hidratada para produção de cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>) (EPA, 1998). As Equações 13 e 14 descrevem a calcinação da cal.



Em geral, a cal utilizada para estabilização de solos é a calcítica, com alto teor de cálcio e óxido de magnésio em proporção inferior a 5%; a cal dolomítica, cujo conteúdo de MgO se encontra entre 35 e 46%, pode ser utilizada em algumas ocasiões para tratamento de solos, mas seu uso retarda o tempo de reação (NATIONAL LIME ASSOCIATION, 2004). Independente do tipo, a cal viva ou hidratada deve possuir no mínimo 90% de cálcio e óxido de magnésio em sua composição química de acordo com a norma ASTM C977 (ASTM, 2018).

### 2.3.4. Mecanismos da estabilização química em solos argilosos

Cinco reações principais ocorrem entre o solo a ser estabilizado e o estabilizante: troca catiônica, floculação, hidratação, reações pozolânicas e carbonatação potencial. Enquanto as reações de troca catiônica e floculação ocorrem nas primeiras horas da estabilização, as reações pozolânicas e a carbonatação podem se estender por meses ou anos (SARGENT, 2015). Dessa forma, essas reações se dividem em dois processos, modificação e estabilização, sendo a modificação os processos que ocorrem até 72 horas após as adições e estabilização o processo lento de ganho de resistência pela cristalização do gel criado após as partículas de argila sofrerem dissolução alcalina e reagirem com o cálcio presente no meio (ROGERS; GLENDINNING, 1996).

#### 2.3.4.1 Troca catiônica e floculação

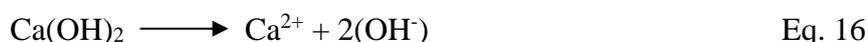
Logo após a mistura, íons cálcio presentes no estabilizante são liberados e substituem os íons metálicos (Na<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>, dentre outros) presentes na estrutura da argila, ocasionando uma redução da camada de água adsorvida (dupla camada elétrica) que reveste as partículas e da

susceptibilidade da argila a adição de água. Em seguida, ocorre floculação envolvendo a reestruturação de partículas de argila carregadas negativamente, mas rodeadas de uma camada de cátions positivamente carregados. A princípio, as partículas estão dispersas e em um arranjo paralelo devido a repulsão mútua entre superfícies carregadas positivamente e negativamente. Entretanto, forças de van der Waals superam a repulsão entre as partículas causando maior atração entre estas e levando a uma orientação floculada (borda-face). Íons de maior valência são melhores floculantes, como o  $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Mg}^{2+}$  em comparação ao  $\text{K}^+$  ou  $\text{Na}^+$  (ROGERS; GLENDINNING, 1996; SARGENT, 2015).

Como consequência dessas mudanças observa-se um aumento do ângulo de fricção interna do solo e maior resistência ao cisalhamento sob condições normais de tensão, uma mudança textural da argila de plástica para um material granular e a redução da plasticidade do solo devido ao aumento do seu limite de plasticidade (SARGENT, 2015).

#### 2.3.4.2. Hidratação

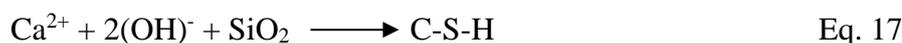
A água presente no solo é consumida durante o processo de hidratação da cal virgem (Equação 15), processo exotérmico que culmina na evaporação da água. A umidade restante deve ser suficiente para permitir que a cal hidratada dissocie (Equação 16), aumentando o pH do meio (devido a liberação de hidroxila) e permitindo a dissolução de sílica e alumina das partículas de argila do solo. Assim, a dissociação da cal hidratada permite a ocorrência da troca catiônica, floculação e reações pozolânicas (SARGENT, 2015).



No caso do cimento, o qual já possui sílica em sua constituição, logo após a mistura com o solo ocorre rápida hidratação dos seus grãos e formação dos principais produtos de hidratação: silicatos e aluminatos de cálcio hidratado (C-S-H e C-A-H, respectivamente) e hidróxido de cálcio. Os silicatos hidratados enrijecem conectando os grãos do solo e do cimento em uma rígida estrutura, sendo que o tempo de início e fim de pega varia conforme o tipo de cimento utilizado. O hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento dissocia-se conforme explicado anteriormente levando a ocorrência de reações pozolânicas com o tempo (SARGENT, 2015).

### 2.3.4.3. Reações pozolânicas

As reações pozolânicas ocorrem ao longo de meses, podendo chegar a anos. Íons  $\text{Ca}^{2+}$  dissolvidos no solo reagem com o  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  provenientes das partículas de argila produzindo os géis C-S-H e C-A-H, conforme Equações 17 e 18 (SARGENT, 2015).



Os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) cristalizam conectando os grãos de solo e preenchendo os espaços vazios e, conseqüentemente, aumentando a resistência do conjunto.

### 2.3.4.4. Carbonatação potencial

Carbonatação é a formação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) a partir da reação entre a cal hidratada presente no solo tratado com cimento ou cal e o  $\text{CO}_2$  proveniente da atmosfera. A carbonatação, tal como as reações pozolânicas, ocorre durante longo períodos de tempo e tem como resultado um produto que pode se dissolver em água e precipitar longe dos locais de formação (BRADFORD, 1976; JUNG; BOBET, 2008).

### 2.3.5. Solos expansivos estabilizados por álcali-ativação

Estudos anteriores analisaram o desempenho mecânico, a durabilidade e os aspectos microestruturais de solos expansivos estabilizados ou tratados, quando maiores resistências mecânicas não são necessárias, com uso de uma mistura álcali-ativada, composta muitas vezes por resíduos da construção civil. Estes trabalhos atestam o bom desempenho destes estabilizadores alternativos em relação ao uso de cal e cimento Portland.

James *et al.* (2008) estudaram o comportamento mecânico e microestrutural de um solo argiloso preparado em laboratório com caulim e bentonita (85% e 15% respectivamente). O solo foi tratado com escória granulada de alto forno e cal hidratada, usada para ativar a escória. Análises por difração de raio x (DRX) mostraram floculação e presença dos géis C-S-H e C-A-S-H além de hidrotalcita nas misturas solo-cal-escória, evidenciando a existência de reações pozolânicas. Ocorreram mais reações pozolânicas após uma elevação do teor de escória no solo (5 para 10%)

mas não necessariamente após um aumento da quantidade de cal (mantendo-se a porcentagem de escória constante). Na mistura cal-solo foi observada presença do gel C-S-H e floculação. Devido a formação dos géis supracitados a resistência à compressão simples do solo estabilizado com escória ativada foi maior do que para o solo tratado com cal (por exemplo, a 28 dias de cura a resistência à compressão simples da mistura com 5% de cal e 5% de escória foi de 248 kPa e da mistura com 10% de cal e 0% de escória foi 19 kPa).

Wilkinson, Haque e Kodikara (2010) investigaram a estabilização de quatro tipos de solo argiloso, dois solos de alta plasticidade, um de baixa plasticidade e um solo produzido a partir de um mineral de argila disponível comercialmente (caulim). Agentes estabilizadores incluíram escória granulada de alto forno, cinza volante e cal hidratada, adicionados em quantidades equivalentes a 10% de massa do solo seco; a escória e a cinza foram ativadas por um adicional de 10% de cal hidratada. Os solos foram preparados com umidade acima do limite de liquidez dos solos de alta plasticidade para que houvesse água suficiente para as reações de cimentação, as quais ocorrem ao longo de grandes períodos de cura. Concluiu-se que as amostras continuaram a ganhar resistência ao cisalhamento não drenado por um ano (período da investigação). Ainda, amostras com escória ativada apresentaram melhor performance que amostras de cinza ativada (388 kPa atingidos após 28 dias) e estas últimas, em termos práticos, comportaram-se de forma similar às amostras de solo de alta plasticidade tratadas somente com cal; mas apresentaram melhor desempenho que somente cal e solo contendo caulim.

Cristelo *et al.* (2012) estudaram a estabilização de um solo mole de alta plasticidade com cinza volante tipo C (maior teor de cálcio) e tipo F (menor teor de cálcio), 7 a 14% em peso, ativada por hidróxido e silicato de sódio, objetivando analisar o efeito do conteúdo de cálcio dos precursores. A resistência à compressão simples com menor tempo de cura (7 dias) foi maior para a cinza com maior teor de cálcio, mas superior para misturas somente com cal ou cimento. Entretanto, a taxa de ganho de resistência à compressão simples para a cinza com menor teor de cálcio foi significativamente maior do que para a cinza tipo C, e com 4 semanas de cura a cinza tipo F possuía resistência 38% superior à da cinza com mais cálcio, porcentagem que continuou a aumentar até o final do período de cura (12 meses). Assim, a cinza tipo F apresentou melhor resultado a longo prazo para a estabilização do solo mole (com 12 meses de cura a resistência dessa cinza foi quase 4 vezes superior à do cimento). A lenta dissolução dos aluminossilicatos presentes na mistura com cinza F, em comparação a rápida dissolução da cinza C e imediata formação de fases C-S-H e C-A-H, possibilitou que houvesse maior tempo

para a formação mais consolidada de estruturas tridimensionais Si-O-Al e Si-O-Si e maiores ganhos de resistência ao longo do tempo.

Outros pesquisadores examinaram a evolução físico-química do uso de cinza volante com alto teor de cálcio ativada por uma solução de silicato de sódio na estabilização de um solo composto por caulim (COUDERT *et al.*, 2019). Ao contrário da estabilização do solo somente com cal onde a fonte de íons  $\text{Ca}^{2+}$  provem do CaO, na estabilização com álcali-ativação esse íons advém de minerais da cinza volante como  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$  e  $\text{Ca(OH)}_2$  e são liberados simultaneamente a íons  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{OH}^-$ . Esses ânions afetam a sequência das reações químicas e podem trazer efeitos negativos para a durabilidade, já que minerais sulfato tem alta solubilidade em água. Análises por espectroscopia Si/Al MAS-NMR evidenciaram a ocorrência de atividades pozolânicas no solo estabilizado com álcali-ativação, resultando na formação do mineral tenardita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) e de cadeias tridimensionais de silicatos de cálcio incorporando Al (IV), mas o caulim se mostrou não reativo, atuando somente como *filler*. Para a mistura solo-cal ocorreu formação de gel C-A-H, mas a dissolução do caulim é lenta, começando pela dissolução do Al, e não houve no prazo analisado (28 dias de cura) liberação de Si para compor os produtos de reação. Conforme análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) os componentes formados encontravam-se ao redor de partículas ricas em Ca.

Rivera *et al.* (2020) estudaram a estabilização de um solo argiloso (classificação A-7-5 pela ASTM D3282) utilizando materiais álcali-ativados (80% cinza volante + 20% cal comercial, e 80% cinza volante + 20% escória granulada de alto forno) adicionados ao solo em proporção de 20 e 30%. A solução ativadora foi uma combinação de NaOH e  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Observou-se que a cal usada em conjunto com a escória, para 30% de material cimentante, promoveu aglomeração de partículas e nucleação, permitindo a interação solo-material álcali-ativado e levando a estabilização da estrutura. Ainda, a adição de 30% de material cimentante ocasionou resultados similares aos do solo estabilizado por cimento Portland em testes de perda de massa, e a resistência à compressão simples após 7 dias de cura foi de 1.36 MPa em condições saturadas.

O precursor metacaulim também foi estudado para a estabilização de solos moles. Zhang *et al.* (2013) examinou a estabilização de uma argila de baixa plasticidade com metacaulim (precursores) em diferentes concentrações (3 a 15% em peso) e NaOH +  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  (ativador). Amostras com concentração de metacaulim superior a 11% apresentaram resistência à compressão simples, tanto para 7 dias de cura quanto para 28 dias, superior a amostras de solo

estabilizado com 5% de cimento Portland tipo II. Esta resistência aumentou proporcionalmente a porcentagem de metacaulim no solo. As reações do precursor com o ativador foram rápidas, de forma que não ocorreu aumento significativo de resistência quando o tempo de cura variou de 7 para 28 dias. Para medições de deformações por retração atingiu-se um desempenho superior em amostras de metacaulim com concentração acima de 8% em relação ao solo estabilizado com 5% de cimento. O desempenho melhorou com o aumento da concentração do precursor visto que uma microestrutura mais compacta dificulta a evaporação da água nos poros. Análises de MEV-EDS atestaram a presença de géis como produtos da álcali-ativação responsáveis pela melhoria das propriedades mecânicas das misturas com o solo.

Outros estudos analisaram a estabilização química de solos moles por meio de precursores pouco usuais, como resíduos de processos agrícolas, mas com quantidades suficientes de aluminossilicatos amorfos em sua composição para serem ativados por soluções alcalinas gerando produtos que melhoram a performance do solo.

Nesse sentido, Abdeldjouad *et al.* (2019) analisaram a influência de minerais de argila em três solos (o primeiro contendo 49% de caulim, o segundo 27% de caulim e o terceiro 54% de ilita), estabilizados por 20% em peso de cinza da queima de óleo de palma ativada por meio de KOH. Antes de ser utilizada a cinza foi calcinada e passou por moagem para aumentar sua reatividade. Os resultados mostraram maior resistência à compressão simples a 7 e 28 dias de cura para amostras contendo a cinza ativada e alto teor de caulim. Amostras com maior porcentagem de caulim também apresentaram maior resistência inicial na presença do ativador, mesmo sem cinza. Entretanto, apesar dos bons resultados sem presença de cinza ativada esta teve papel significativo na resistência do solo tratado (aos 28 dias de cura a presença de cinza aumentou em 107% a resistência da mistura solo-KOH), e análises de MEV mostraram partículas dessas amostras mais conectadas, especialmente em solos com mais caulim, com os poros do solo preenchidos por produtos da reação. A DRX evidenciou geopolimerização indicando formação de brucita e mulita em solos tratados com a cinza, além de formação de hematita em solos com mais caulinita, e ocorrência de ativação alcalina das partículas de argila do solo.

Ikeagwuani, Obeta e Agunwamba (2019) estudaram a estabilização de um solo contendo 67% de partículas de argila, com maior porcentagem do mineral montmorillonita (89%), por meio de cinzas de serragem ativadas com cal virgem (2, 4, 6, 8, 10%), para uso como material de sub-base de pavimentos. Após testes de compactação e CBR com misturas de solo e porcentagens até 20% de cinza concluiu-se que 16% de cinza ocasionou maior peso específico

e CBR, sendo esse valor então fixado para misturas com a cal. A adição de 4% de cal em misturas solo-cinza aumentou em 50% o valor do CBR em comparação a misturas de solo somente com cinza (16% em peso) e reduziu o índice de plasticidade do solo natural de 53,4% para 7,4% e sua expansão em 69,5%, sendo esses resultados superiores a 6% de cal. Os autores justificaram o menor desempenho de 6% de adição de cal devido a um retardo no início das reações pozolânicas. Análises de MEV atestaram a ocorrência de floculação e aglomeração e consequente redução do número de poros, em especial para a adição de 4% de cal. Análises de DRX na mistura solo-cinza(16%)-cal(4%) evidenciaram a ocorrência de reações pozolânicas a partir de 3 dias de cura, identificando a formação de gel C-S-H, de fases C-S-H contendo magnésio e alumínio e do mineral flogopita. Com 7 dias de cura foi possível visualizar a quebra do mineral montmorillonita, apesar do gel C-A-S-H usualmente se formar aos 28 dias de cura.

Ligantes álcali-ativados contribuem para a redução global de CO<sub>2</sub> somente se utilizarem materiais e resíduos industriais não aplicados como substitutos do clínquer em cimentos híbridos (SCRIVENER, K. L.; JOHN; GARTNER, 2018). Daí a importância de se avaliar a utilização de resíduos como a cinza de casca de arroz, cinza do bagaço de cana-de-açúcar, pó de material cerâmico, pó de vidro, dentre outros, para a estabilização de solos expansivos por processos de álcali-ativação.

### 2.3.6. Índice $\eta/B_{iv}^a$

Diversos estudos envolvendo o tópico estabilização de solos comprovaram a existência de uma relação entre resultados de testes mecânicos, tais como rigidez inicial, resistência à compressão simples e compressão por tração diametral, durabilidade e expansão, e um índice porosidade/teor volumétrico de ligante ou *binder* ( $\eta/B_{iv}^a$ ). O *binder* pode compreender um material largamente utilizado na prática geotécnica, como a cal e o cimento Portland, ou pode representar materiais pozolânicos ou álcali-ativados. O expoente *a* representa uma constante utilizada para ajuste de dados, variando conforme o tipo de solo estudado, o agente estabilizante utilizado, as condições e tempo de cura, dentre outros.

Consoli, Da Silva Lopes e Heineck (2009) demonstraram que a razão volume de vazios (água + ar)/teor volumétrico de cal,  $V_v/V_{Li}$ , é mais apropriada para a análise e o controle da resistência mecânica de solos estabilizados com cal em relação a razão água/cimento. Esta última é um parâmetro adequado para a análise de ganho de resistência em concretos, visto que nestes materiais há saturação e o teor de água reflete o número de vazios do concreto. Entretanto,

usualmente o solo estabilizado com cal encontra-se em um estado não saturado, de forma que o uso do parâmetro  $V_v/V_{Li}$  é mais adequado.

Evoluindo esse conceito, Consoli, Rosa e Saldanha (2011) estabeleceram uma relação única entre resultados de compressão simples para misturas solo-cinza-volante-cal e a razão porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_v^{0,12}$ ), sendo a porosidade a razão entre o volume de vazios e o volume total da amostra ( $V_v/V_{Total}$ ) e o teor de cal a porcentagem de volume de cal em relação ao volume total da mostra ( $V_{Li}/V_{Total}$ ). Consoli *et al.* (2019) encontraram boas relações entre resistência à compressão simples e módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ) de pastas de vidro moído e cal de carbureto e o índice  $\eta/L_v^{0,11}$ . Ainda, em um estudo envolvendo Análise de Ciclo de Vida e o parâmetro  $\eta/L_v^{0,16}$ , Da Rocha *et al.* (2016) analisaram diferentes dosagens (alto teor de cal/alta densidade, médio teor de cal/média densidade, baixo teor de cal/baixa densidade) para uma mesma razão porosidade/teor volumétrico de cal e, conseqüentemente, mesma performance mecânica (i.e. resistência à compressão simples e à tração, e rigidez).

Consoli *et al.* (2011) estudaram misturas de solos argilosos, siltosos e arenosos, e cimento Portland tipo III, estabelecendo um método racional de dosagem baseado na razão porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/C_{iv}^{0,28}$ ), conforme Equação 19. O método possui aplicação prática pois permite a escolha da quantidade de cimento e grau de compactação (porosidade) necessários para atingir a resistência de projeto.

$$\frac{V_v}{V_c} = \frac{\frac{V_v}{V_{Total}}}{\frac{V_{Cimento}}{V_{Total}}} = \frac{\eta}{C_{iv}} \quad \text{Eq. 19}$$

Nesse contexto, Consoli *et al.* (2018) propuseram um novo parâmetro em seu estudo acerca da estabilização de um solo arenoso (areia de Osório e areia argilosa) por cal de carbureto e vidro moído, o índice porosidade/teor volumétrico de ligante ( $\eta/B_{iv}^{0,28}$ ). Este índice permitiu unificar a influência do teor de material pozolânico (vidro) e da cal de carbureto como agentes cimentantes (*binder*) e pode ser definido pelas Equações 20 e 21. Como resultado, uma única curva de resistência à compressão simples em relação ao  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  pôde ser traçada para todos os corpos de prova analisados.

$$\eta = 100 - 100 \left\{ \left[ \frac{\gamma_d}{\frac{S}{100} + \frac{P}{100} + \frac{C}{100}} \right] \left[ \frac{S}{\gamma_{SS}} + \frac{P}{\gamma_{SP}} + \frac{C}{\gamma_{SC}} \right] \right\} \quad \text{Eq. 20}$$

$$B_{iv} = \frac{V_p + V_c}{V_{Total}} = \frac{m_p/\gamma_{Sp} + m_c/\gamma_{Sc}}{V_{Total}} \quad \text{Eq. 21}$$

Na Equação 20 a porosidade ( $\eta$ ) é definida em função do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) e conteúdo (%) de solo (S), pozolana (P) e cal (C). Cada um destes materiais possui um peso específico dos grãos ( $\gamma_{Ss}$ ,  $\gamma_{Sp}$  e  $\gamma_{Sc}$ , respectivamente) também considerado no cálculo da porosidade. Na Equação 21 o parâmetro  $B_{iv}$  foi calculado como a soma entre o volume de pozolana da amostra e o volume de cal ( $V_p + V_c$ ).

## 2.4. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

### 2.4.1. Sustentabilidade e Avaliação do Ciclo de Vida

Uma das definições mais conhecidas acerca da sustentabilidade afirma que a mesma busca atender as necessidades da sociedade atual decorrentes do seu desenvolvimento socioeconômico sem que se comprometa a possibilidade das gerações futuras de atenderem suas próprias necessidades (BRUNDTLAND, 1987). Entretanto, essa visão é frequentemente criticada por ser vista como antropocêntrica (BASU; MISRA; PUPPALA, 2014), de forma que outras definições trazem a sustentabilidade como um desenvolvimento que é ao mesmo tempo centrado nas pessoas e em melhorar a condição humana, mas também conservador, mantendo a variedade e produtividade da natureza (IUCN; UNEP; WWF, 1991). Assim, a sustentabilidade engloba preservação e responsabilidade pela vida em todas as suas formas sem excluir oportunidades econômicas, de maneira a permitir que comunidades se tornem mais saudáveis, fortes e lugares melhores para se viver (THOMAS JEFFERSON PLANNING DISTRICT COMMISSION, 1998).

Em outra definição Basu, Misra e Puppala (2014) afirmam que sustentabilidade de um sistema é sua capacidade de sobreviver ao tempo e manter sua funcionalidade, de forma que enquanto houver maior oferta (capacidade) do que demanda (carga) no sistema, o mesmo é sustentável. O conceito é complexo, visto que demandas e ofertas de um sistema afetam outros sistemas, e essas ofertas e demandas mudam ao longo do tempo. Assim, a sustentabilidade em uma perspectiva global lida com questões relacionadas ao funcionamento do mundo físico e está intrinsecamente conectada a questões sociais, ambientais, econômicas e sistemas de engenharia.

As várias definições de sustentabilidade, em geral, consideram a sustentabilidade em quatro dimensões: (i) medidas de bem estar social; (ii) preocupações com uma equidade de bem estar social entre a geração atual e as próximas; (iii) equidade de bem estar social em escala macro (entre países desenvolvidos e subdesenvolvidos) e micro (dentro de uma dada nação ou comunidade local); e (iv) equidade entre espécies, ou seja, a preocupação com o bem estar de outras espécies de animais além do ser humano. Essa última dimensão, no entanto, muitas vezes não é considerada (MOLTESEN; BJØRN, 2018).

Entretanto, apesar de debatida mundialmente, da importância consolidada por meio da Agenda 21 e demais documentos e conferências, e de ser um conceito com escopo definido, a sustentabilidade é difícil de ser quantificada tanto por falta de métricas quanto pela falta de meios de se conectar impactos locais e efeitos microeconômicos a parâmetros globais e efeitos macroeconômicos (HUNKELER; REBITZER, 2005). As definições apresentadas não delineiam uma forma de se desenvolver práticas sustentáveis ou se resolver problemas de sustentabilidade na engenharia (BASU; MISRA; PUPPALA, 2014).

Para auxiliar na quantificação de impactos ambientais resultantes de se prover bens e serviços (produtos) à sociedade metodologias e ferramentas são necessárias. Esses produtos são criados para preencher uma necessidade e possuem uma “vida”, que se inicia com o design desse produto, a extração de recursos, sua manufatura, uso/consumo e termina com seu despejo final (reuso, reciclagem, deposição em lixões, dentre outros). Todos os processos envolvidos no ciclo de vida do produto ou serviço envolvem emissões de substâncias para o meio ambiente e consumo de recursos naturais, e a metodologia de Avaliação ambiental do ciclo de vida (*Life Cycle Analysis*) permite estimar e quantificar estes impactos ambientais (REBITZER *et al.*, 2004).

Avaliação ambiental do ciclo de vida (ACV) é uma metodologia que quantifica os impactos ambientais associados aos inputs e outputs relevantes de um sistema de produto ao longo de todo seu ciclo de vida, desde a aquisição de matéria-prima, sua produção, uso, até sua disposição final (ISO, 2006a, 2006b). Produtos físicos são usualmente estudados pela ACV e o termo sistema de produto evidencia que todos processos necessários a entrega da função do produto são contabilizados, isto é, a perspectiva do produto é total (BJØRN *et al.*, 2018c). Assim, as principais características da ACV incluem uma perspectiva em termos de ciclo de vida, a cobertura de uma ampla gama de impactos ambientais (sem focar em um impacto específico),

a quantificação dos resultados e um embasamento científico (fluxos são baseados em medições e impactos baseados em causalidades comprovadas) (BJØRN *et al.*, 2018c).

Um ponto forte da ACV é a possibilidade de comparação entre (i) sistemas de produto compostos de centenas de processos, (ii) uso de recursos, e (iii) emissões ocorrendo em diferentes períodos de tempo e lugar, entretanto, generalizações e suposições são inerentes a modelagem. Outro ponto positivo é a aplicação do princípio da melhor estimativa, ou seja, o mesmo nível de precaução é aplicado a avaliação de impacto e o modelo é baseado na performance média dos processos, mas eventos raros e não usuais como acidentes industriais são desconsiderados (BJØRN *et al.*, 2018c). Algumas das principais aplicações da ACV incluem seu uso para comparação entre produtos fabricados por uma companhia, como base para certificações ambientais destes produtos, identificação de possíveis melhorias pela identificação de pontos ambientais críticos ao longo da cadeia de produção e como base para a tomada de decisão (GOEDKOOOP *et al.*, 2016a).

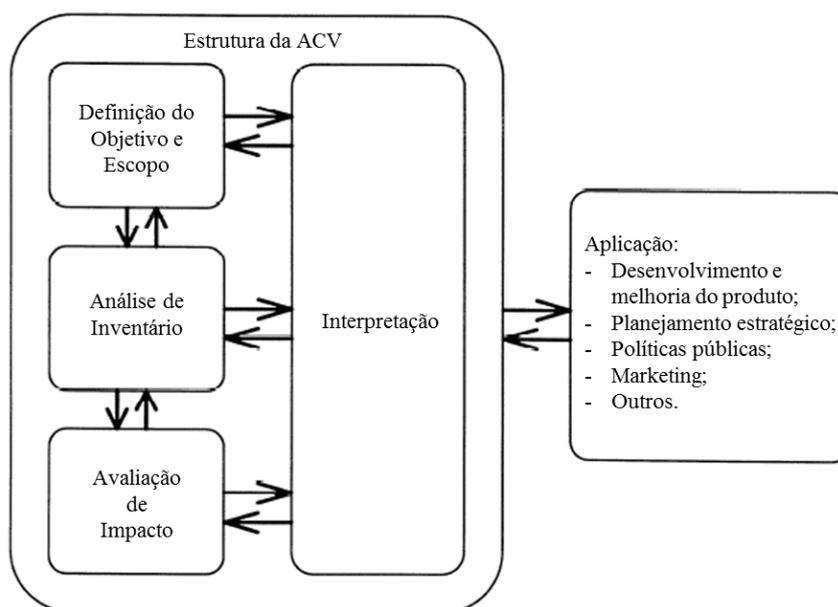
Métodos que deram origem a ACV como conhecida atualmente foram desenvolvidos na década de 60, inicialmente nos Estados Unidos e no norte da Europa, a partir de colaborações entre indústrias e universidades. Um dos primeiros trabalhos envolvendo ACV foi um estudo apresentando os requerimentos energéticos para a produção de intermediários e produtos químicos na *World Energy Conference*, em 1963, por Harold Smith. Nos anos 90 bases de dados para a análise de inventário surgiram, cobrindo um amplo leque de segmentos industriais e culminando em 2003 no lançamento do primeiro *Ecoinvent database* (v. 1.0.1), com dados de todos setores de indústria (BJØRN *et al.*, 2018a). Com o aumento da complexidade dos sistemas de produto e de metodologias relacionadas a análise de inventário e avaliação de impacto surge a necessidade de *softwares* dedicados a ACV, sendo os programas SimaPro e GaBi lançados nos anos 90 (BJØRN *et al.*, 2018a; PRÉ CONSULTANTS, 2020; SPHERA, 2020).

Três pilares podem ser delineados para a sustentabilidade: meio ambiente, economia e aspectos sociais. A ACV, que diz respeito ao pilar ambiental, é uma metodologia padronizada pela norma internacional ISO 14040/44, enquanto os outros dois outros pilares, ainda não normatizados, possuem metodologias que vêm sendo desenvolvidas por diversos trabalhos e agências: Avaliação do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) e Avaliação Social do Ciclo de Vida (ASCV). Estes três pilares do desenvolvimento sustentável devem ser apropriadamente balanceados para o design de um novo produto ou serviço ou melhorias em produtos e serviços já existentes (GIDDINGS; HOPWOOD; O'BRIEN, 2002; KLOEPFFER, 2008).

### 2.4.2. Fases da ACV

Conforme definido pelas principais normas internacionais da ACV, *ISO 14040 - Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework* e *ISO 14044 - Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines* (ISO, 2006a, 2006b), a ACV é composta por quatro fases: (1) Definição do objetivo e escopo; (2) Análise de Inventário; (3) Avaliação de Impacto e (4) Interpretação. A Figura 17 exemplifica as fases e aplicações de uma ACV.

**Figura 17:** Fases da ACV



**Fonte:** ISO, 2006. Modificado.

#### 2.4.2.1 Definição do objetivo e escopo

O objetivo e escopo da ACV descrevem os limites do sistema e definem sua unidade funcional. Nessa etapa, deve ficar claro qual é a aplicação pretendida, a audiência a ser alcançada e as razões para se desenvolver o estudo (ISO, 2006b). A unidade funcional é uma medida quantitativa das funções que o sistema em análise fornece, e comparações entre sistemas devem ser realizadas com base na mesma unidade funcional. Os limites do sistema definem quais unidades de processo devem ser incluídas em uma ACV, e decisões devem ser tomadas a respeito do nível de detalhamento e de quais *inputs* e *outputs* devem ser inclusos (ISO, 2006b).

A ISO 14044 (ISO, 2006b) recomenda critérios para estabelecer o limite do sistema, fora do qual *inputs* e *outputs* deixam de ser contabilizados, como critérios por massa, energia e significância ambiental. O uso do critério por massa ou energia inclui todos *inputs* e *outputs* que contribuem acumuladamente mais do que uma definida porcentagem para o *input* de massa ou energia do sistema de produto. O critério por significância ambiental exclui *inputs* e *outputs* cuja contribuição para a carga ambiental está abaixo de uma porcentagem limite.

Dois modelos de ACV são propostos, cuja escolha depende do objetivo e escopo delimitados: modelo consequencial e modelo atribucional. O modelo consequencial é aplicado quando procura-se investigar as consequências de uma escolha comparada a uma situação base; pode-se investigar por exemplo, mudanças nos impactos ambientais quando da escolha de um produto em detrimento do outro (GOEDKOOOP *et al.*, 2016a). Já o modelo atribucional analisa os impactos de um sistema de produto isolado do resto da tecnosfera ou economia e os pontos críticos do seu ciclo de vida, dessa forma, contabiliza-se todos os fluxos ambientais do produto e de seus subsistemas, em um análise do berço ao portão ou do berço ao túmulo (BJØRN *et al.*, 2018d; GOEDKOOOP *et al.*, 2016a).

#### 2.4.2.2. Análise de Inventário

A análise de inventário é um processo iterativo de aquisição e quantificação dos dados de entrada e saída de um sistema de produto, os quais incluem o uso de recursos e emissões na água, ar e terra. A coleta de dados qualitativos e quantitativos deve ser realizada para cada unidade de processo incluída nos limites da ACV. Após essa aquisição, interpretações podem ser realizadas em conformidade com o objetivo e escopo do trabalho (ISO, 2006a).

Pode-se fazer a distinção entre dois tipos de dados: diretos (*foreground*) e indiretos (*background*). Dados diretos relacionam-se diretamente ao sistema e às fronteiras do estudo, descrevendo um sistema de produto particular ou um sistema de produto especializado. Dados indiretos são aqueles necessários para a produção de materiais genéricos, energia, transporte e manejo de resíduos, e não se relacionam diretamente aos limites iniciais do produto (GOEDKOOOP *et al.*, 2016a).

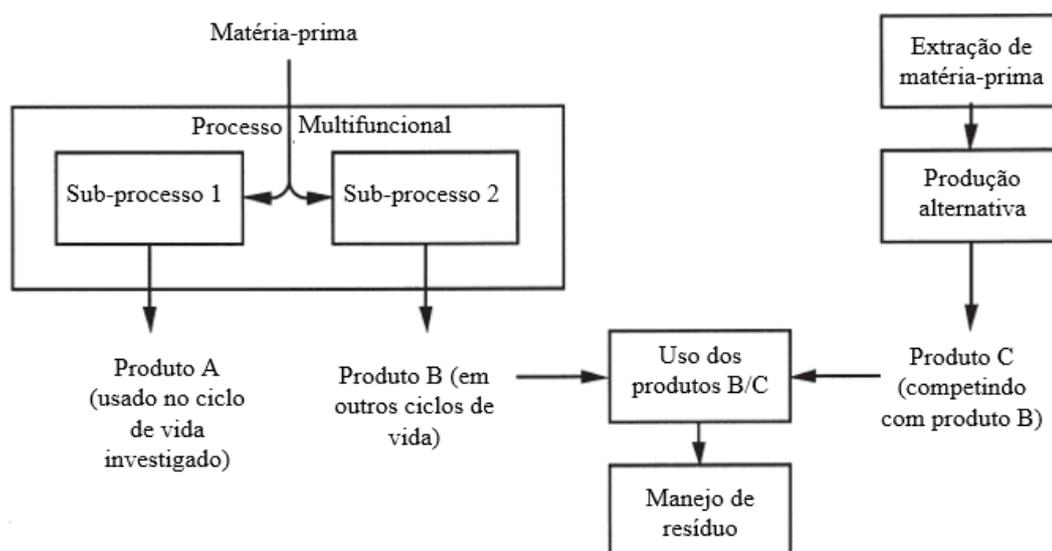
Muitos processos, denominados multifuncionais por proverem mais de uma função (tem como *output* mais de um produto ou serviço), são compartilhados entre vários sistemas de produto e fica pouco claro como deve ser feita a alocação de impactos ambientais entre os produtos

(BJØRN *et al.*, 2018d; FINNVEDEN *et al.*, 2009). Processos multifuncionais podem envolver: processos que produzem mais de um produto (*multi-output*); processos de manejo de resíduos que recebem diferentes tipos de entradas de resíduos (*multi-input*); processos de reciclagem onde um resíduo é transformado em um novo produto (*open-loop recycling*) (EKVALL; FINNVEDEN, 2001).

Para lidar com modelos multifuncionais a ISO 14044 (ISO, 2006b) propõem, para evitar procedimentos de alocação, a divisão dos processos unitários em dois ou mais subprocessos ou a expansão do sistema do produto para incluir funções adicionais relacionadas aos coprodutos. Caso não seja possível evitar a alocação, os *inputs* e *outputs* do sistema devem ser repartidos entre os produtos de forma a refletir as relações físicas entre os mesmos (por exemplo, massa, volume); se essas relações não puderem ser usadas para a alocação, outras como o valor econômico do produto para a empresa podem ser utilizadas. A alocação por valor econômico, apesar de ser a última opção de alocação definida pela ISO 14044, é frequentemente utilizada por indústrias, visto que permite diferenciar um resíduo de um subproduto, expressando a importância relativa de um *output* do sistema em estudo (GOEDKOOOP *et al.*, 2016a).

Uma das vantagens da expansão do sistema, evitando a alocação, é a possibilidade de se visualizar a influência nos impactos ambientais advindos de atividades externas ao ciclo de vida investigado (EKVALL; FINNVEDEN, 2001). A consequência ambiental de uma mudança no ciclo de vida do produto ou processo é uma prerrogativa do modelo consequencial, dessa forma, esse modelo frequentemente evita a alocação (FINNVEDEN *et al.*, 2009). A Figura 18 ilustra a subdivisão e expansão do sistema para um processo multifuncional teórico.

**Figura 18:** Processo multifuncional teórico dividido em dois subprocessos e com expansão para incluir uma produção alternativa



**Fonte:** Ekvall e Finnveden, 2001. Modificado.

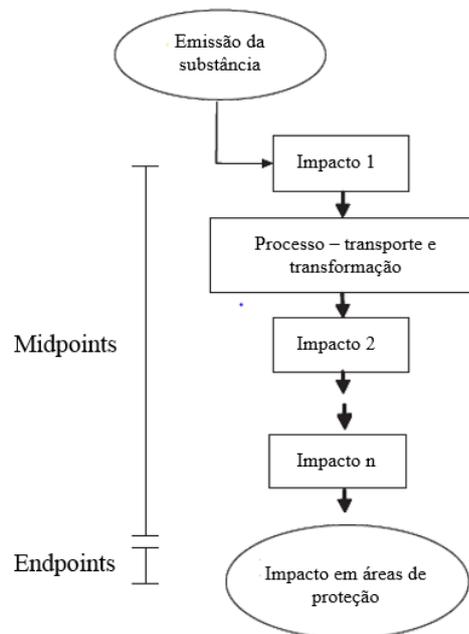
#### 2.4.2.3. Avaliação de Impacto

A avaliação de impacto visa entender e avaliar a magnitude e significância de impactos ambientais de um sistema de produto usando para isso os resultados obtidos na análise de inventário (GOEDKOOOP *et al.*, 2016a; ISO, 2006a). Nessa fase, categorias de impacto (por exemplo, acidificação, aquecimento global, ecotoxicidade e destruição da camada de ozônio) são selecionadas e indicadores de categorias são usados para quantificar o uso de recursos em cada categoria (ISO, 1999).

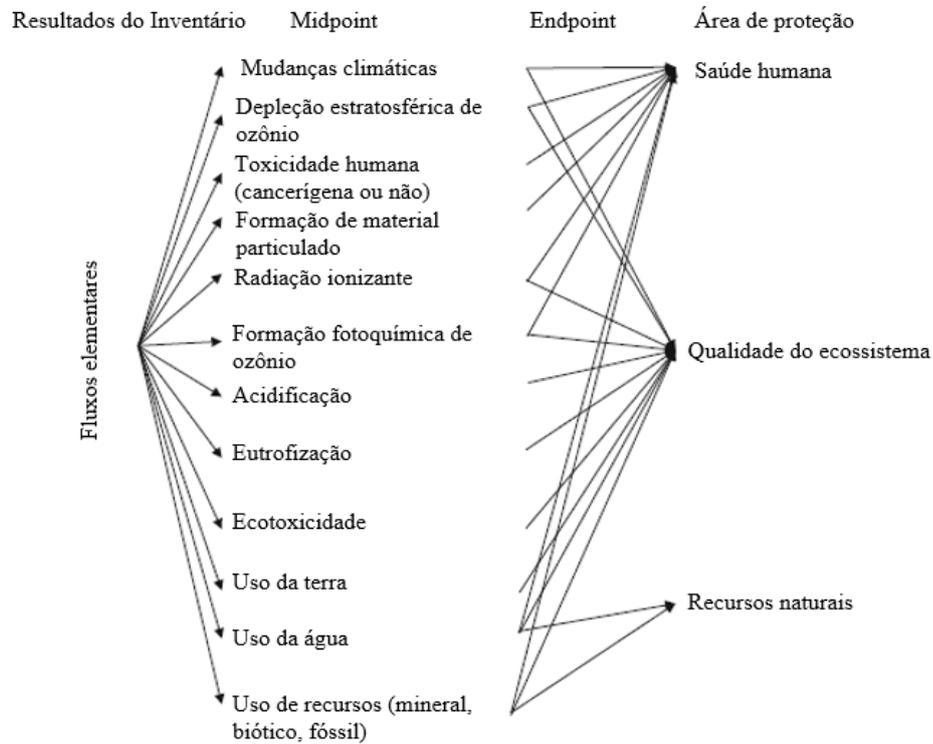
Dois são os elementos obrigatórios para esta fase: classificação (atribuição de categorias de impacto aos resultados da análise de inventário) e caracterização (fator aplicado para converter resultados da análise de inventário para a unidade dos indicadores de categoria); e opcionais: normalização (expressa a magnitude relativa dos scores de impacto em uma escala comum a todas categorias de impacto), agregação (categorias de impacto distintas podem ser agrupadas em um único indicador), ponderação (expressa a significância relativa de cada categoria de impacto de acordo com o objetivo do estudo, aplicando pesos para cada indicador) e análise de qualidade dos dados para os resultados de indicadores (FINNVEDEN *et al.*, 2009; ISO, 2006b).

As metodologias de avaliação de impacto podem se localizar no fim da cadeia (*endpoints*) ou ao longo dela (*midpoints*). *Endpoint* ou área de proteção é o resultado último de um mecanismo ambiental, como por exemplo, o aumento do nível do mar, resultado final de mudanças climáticas; tipicamente categorias *endpoint* são saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos naturais e serviços de ecossistema (GOEDKOOOP *et al.*, 2016a; ROSENBAUM *et al.*, 2018). *Midpoints* são indicadores ao longo do mecanismo ambiental, entre as emissões e os *endpoints*, que podem representar o impacto dos *endpoints* (GOEDKOOOP *et al.*, 2016a). A Figura 19 ilustra um mecanismo ambiental e os conceitos de *midpoint* e *endpoint* e a Figura 20 traz exemplos de *midpoints* e *endpoints*.

**Figura 19:** Mecanismo ambiental



**Fonte:** Finnveden *et al.*, 2009. Modificado.

**Figura 20:** Midpoints e Endpoints

**Fonte:** Rosenbaum *et al.*, 2018. Modificado.

#### 2.4.2.4. Interpretação

A fase de interpretação baseia-se na combinação das fases de análise de inventário e avaliação de impacto para identificar os principais impactos ambientais do estudo, trazendo recomendações para os tomadores de decisão e identificando limitações do sistema, em acordo com o objetivo e escopo (ISO, 1999, 2006b).

Análises de sensibilidade e de incertezas são necessárias para interpretar quão robustas as conclusões da ACV são e como futuros estudos podem melhorar ainda mais essa robustez. Análises de incerteza permitem quantificar, a partir da incerteza de cada parâmetro da avaliação de impacto, a incerteza do resultado final. Para isso, parâmetros estatísticos e distribuições estatísticas são realizadas para os parâmetros da avaliação de impacto (BJØRN *et al.*, 2018b). Análises de sensibilidade avaliam o impacto de suposições nos resultados, para isso, alteram o modelo e recalculam o ciclo de vida, por exemplo, mudando a forma como a alocação foi realizada (GOEDKOOOP *et al.*, 2016a).

Algumas dessas incertezas incluem incertezas de dados, incertezas do modelo e incompletude do modelo (FINNVEDEN *et al.*, 2009; GOEDKOOOP *et al.*, 2016a). Incertezas relacionadas aos dados podem ser devido a falta de dados, falta de dados representativos ou dados imprecisos (estimações não precisas de experts, metodologias de medições falhas, dentre outros), e podem ser analisadas por métodos estatísticos, como simulações de Monte Carlo. Já incertezas relacionadas ao design do modelo (unidade funcional escolhida, se houve alocação e como ela foi realizada, dentre outros) requerem análises de sensibilidade (GOEDKOOOP *et al.*, 2016a; HUIJBREGTS *et al.*, 2001).

#### 2.4.3. Álcali-ativação e ACV

O cimento Portland possui alta emissão de gases de efeito estufa (8 a 10% de toda emissão de CO<sub>2</sub> gerada mundialmente) (SUHENDRO, 2014). Por outro lado, materiais álcali-ativados por utilizarem resíduos e subprodutos industriais são vistos como uma alternativa ao uso do cimento Portland e uma opção mais ambientalmente sustentável. Nesse contexto, uma ACV é a melhor ferramenta disponível para se avaliar e mensurar os impactos ambientais dos materiais álcali-ativados.

Em uma das primeiras análises englobando geopolímeros e ACV, Weil, Dombrowski e Buchwald (2009) estudaram os impactos ambientais decorrentes do uso de álcali-ativação e de cimento na produção do concreto. Assim, comparou-se um concreto resistente a ciclos de secagem e molhagem (classe XF2- XF4 de acordo com a norma dinamarquesa DIN EM 206-1/DIN 1045-2) e composto por cimento tipo CEM I a um concreto composto por um material álcali-ativado a base de escória/cinza volante, em uma razão 80/20, curado a temperatura ambiente. A unidade funcional utilizada foi 1 m<sup>3</sup> e os impactos foram apresentados em termos dos indicadores GWP (*global warming potential*), ADP (*abiotic resource depletion potential*) e CED (*cumulative energy demand*). Como resultado obteve-se uma redução em torno de 70% para o GWP no geopolímero em relação ao concreto de cimento Portland, enquanto os outros dois indicadores apresentaram resultados próximos para os dois concretos.

Habert, D'espinoze de Lacaillerie e Roussel (2011) compararam os impactos ambientais de concretos compostos por geopolímeros (cinza volante, escória de alto forno e metacaulim ativados por silicato de sódio ou NaOH) e por cimento Portland, com equivalente resistência mecânica, considerando como unidade funcional 1 m<sup>3</sup> de concreto a uma dada resistência no

estado endurecido. Como resultado, concretos a base de materiais álcali-ativados apresentaram maiores impactos ambientais nas categorias acidificação, depleção abiótica e ecotoxicidade marinha, independentemente da forma de alocação, devido a alta poluição gerada na produção de silicato de sódio. Ainda, em termos da categoria de impacto GWP geopolímeros a base de cinza volante possuíam melhor desempenho em relação ao concreto de cimento somente se a cinza fosse considerada resíduo e não subproduto. Já concretos contendo escória ativada apresentaram menores valores de GWP quando nenhuma alocação ou alocação econômica foi realizada; para uma alocação em termos de massa, a escória apresentou pior desempenho que o concreto de cimento Portland.

Outra análise, considerando-se 1 m<sup>3</sup> de concreto com resistência à compressão de 24, 40 e 70 MPa como unidade funcional, comparou os impactos ambientais entre concretos compostos por cimento Portland; cimento Portland + escória granulada de alto forno; escória ativada por Ca(OH)<sub>2</sub> e Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>; e cinza volante + metacaulim ativados por NaOH (YANG; SONG; SONG, 2013). Os autores concluíram que a contribuição do ligante para a emissão de CO<sub>2</sub> foi maior no concreto de cimento Portland, enquanto nos concretos contendo materiais álcali-ativados a maior contribuição para a emissão do gás de efeito estufa decorreu do transporte de agregados. Ainda, a redução na taxa de emissão de CO<sub>2</sub> de um concreto contendo geopolímeros em relação ao concreto de cimento Portland ficou entre 55 e 75%. Para concretos a base de materiais álcali-ativados contendo hidróxido de sódio a intensidade de CO<sub>2</sub> gerado foi aproximadamente 2.4 vezes inferior ao concreto de cimento Portland. Por fim, a intensidade de emissão de gás carbônico tende a decrescer com o aumento da resistência à compressão.

Turner e Collins (2013) quantificaram emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> (kg CO<sub>2</sub>-e/kg) para um concreto constituído por cimento Portland e um concreto composto por cinza volante álcali-ativada por NaOH e silicato de sódio (na razão SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O < 2,4), sendo a unidade funcional 1 m<sup>3</sup> de concreto (com resistência à compressão de 40 MPa). Como resultado, observou-se que o *footprint* de CO<sub>2</sub> para o concreto cujo ligante era um material álcali-ativado foi 9% menor que valores encontrados para o concreto contendo 100% de cimento Portland como material ligante. Essa menor diferença em termos de emissão de gás carbônico em relação a outros estudos deveu-se: à consideração da extração, tratamento e transporte de matérias primas necessárias a manufatura dos ativadores alcalinos; ao consumo de energia na etapa de manufatura em si dos ativadores e, por fim, à necessidade de se elevar a temperatura durante a cura do concreto contendo geopolímero para alcançar a resistência necessária (12,4% da emissão de CO<sub>2</sub> desse

concreto deveu-se a elevação de temperatura durante a cura). Os constituintes do ligante álcali-ativado com maior impacto ambiental em termos de CO<sub>2</sub> foram, do maior para o menor: silicato de sódio, hidróxido de sódio e cinza volante.

Robayo-salazar *et al.* (2018) avaliaram em termos da unidade funcional 1 m<sup>3</sup> de concreto duas categorias de impacto, GWP e GTP (*global temperature change potential*), comparando dois tipos de concreto: (i) concreto álcali-ativado com precursores pozolana natural vulcânica (70%) e escória de alto forno granulada (30%) e ativador uma solução NaOH + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>; e (ii) concreto composto por cimento Portland. Os resultados obtidos evidenciaram que o concreto álcali-ativado, além de possuir maior ou igual resistência à compressão, apresentou um GWP 44,7% e um GTP 46,9% inferior ao concreto de cimento Portland. Além disso, para o concreto contendo geopolímero a matéria prima com maior contribuição para o indicador GWP foi o silicato de sódio (66,35%), seguido pelo hidróxido de sódio (18,89%). Destacou-se que o transporte de matérias primas deve englobar menores distâncias, visto que o impacto no indicador GWP devido a uma maior distância envolvida no transporte de matérias primas para a álcali-ativação é de 8,19% frente ao valor total de 0,87% para o concreto de cimento, devido a menores distâncias envolvidas neste último.

Ghadir *et al.*, (2021) avaliou os impactos ambientais da produção de dois ligantes para estabilização de 1 m<sup>3</sup> de solo argiloso com semelhante resistência ao cisalhamento: (i) ligante a base de cinza vulcânica ativada e hidróxido de sódio, e (ii) cimento Portland. Os resultados da ACV mostraram que o ligante a base de cinza possuía impactos ambientais inferiores ao cimento Portland em 4 das 11 categorias de impacto avaliadas: ecotoxicidade terrestre, aquática marinha e aquática em água doce, e depleção de metais. Para o geopolímero o maior contribuinte para os impactos ambientais foi a solução ativadora (hidróxido de sódio).

Zahmak *et al.*, (2021) analisou os impactos ambientais e os custos de ligantes álcali-ativados comparados a ligantes tradicionais (cimento Portland) para estabilização de um solo. O estudo investigou dois precursores, cinza volante e escória granulada de alto forno, e dois ativadores, silicato de sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) e hidróxido de sódio (NaOH). A unidade funcional foi definida como a quantidade de ligante necessária para obtenção de uma resistência à compressão simples entre 4 MPa ± 15%. O ligante álcali-ativado composto por cinza volante e hidróxido de sódio teve performance superior à do cimento em 4 das 11 categorias estudadas: aquecimento global, formação de ozônio troposférico, formação de partículas finas, e acidificação terrestre. Ainda,

o solo estabilizado por cimento resultou em menores custos individuais com materiais, transporte e processos construtivos.

Nota-se que pesquisas envolvendo uma ACV comparativa entre concretos de cimento Portland e concretos compostos por geopolímeros e também solos estabilizados por ligantes álcali-ativados e cimento podem chegar a resultados bastante distintos, a depender dos limites do sistema considerado, dos materiais utilizados, das categorias de impacto estudadas, dentre outros. Observa-se uma necessidade de mais estudos neste tópico, além de haver poucas pesquisas envolvendo ACV, álcali-ativação e estabilização de solos.

## 2.5. AVALIAÇÃO DO CUSTO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) é uma técnica aplicada em um período específico de tempo para comparar o custo de alternativas que satisfazem a mesma função levando em conta todos fatores econômicos relevantes de um ativo, como custo inicial, operacional e de disposição final ou reposição. Por meio da melhor combinação custo/benefício escolhas de investidores ou clientes podem ser realizadas (LANGDON, 2006). Em resumo, a ACCV representa a soma do valor agregado de um produto ou sistema ao longo do seu ciclo de vida (MOREAU; WEIDEMA, 2015). Valor agregado é a diferença entre a venda e a compra de produtos, cobrindo custos de trabalho e os custos capitais bem como o lucro (RÖDGER; KJÆR; PAGOROPOULOS, 2018).

O uso da metodologia ACCV convencional data de 1933, nos Estados Unidos, quando a ACCV foi incluída na compra de tratores pelo escritório geral de contabilidade do governo. Nos anos 70, também nos EUA, a ACCV era legalmente obrigatória para sistemas de aquisição de armas e para programas de edificações públicas; na mesma década na Europa, a ACCV começa a ser estudada. Destaca-se que o custo do ciclo de vida de tem sido usualmente aplicado em produtos e setores industriais específicos e nunca foi explicitamente desenvolvido para uma aplicação mais ampla e geral (LICHTENVORT *et al.*, 2008).

A ACCV pode ser utilizada com diversos propósitos, como uma ferramenta para planejamento, otimização e identificação de pontos críticos (*hotspots*), em conjunto com uma avaliação de ciclo de vida de um produto específico e ainda para a tomada de decisão de futuros investimentos (RÖDGER; KJÆR; PAGOROPOULOS, 2018).

### 2.5.1. Tipos de ACCV

Três tipos de ACCV são praticados: (i) ACCV convencional, (ii) ACCV ambiental (alinhado a LCA, com mesmos limites de sistema, unidade funcional e metodologia desta) e (iii) ACCV social (monetariza ambos impactos ambiental e social). A ACCV convencional possui normatizes próprias, como a ISO 15663 – *Petroleum and natural gas industries – Life cycle costing* e a IEC 60300-3-3 – *Dependability management – Part 3-3: Application guide – Life cycle costing*, a ACCV ambiental segue as normas ISO 14040/14044 e a ACCV social ainda está no início do seu desenvolvimento e não possui atualmente normas relacionadas (RÖDGER; KJÆR; PAGOROPOULOS, 2018).

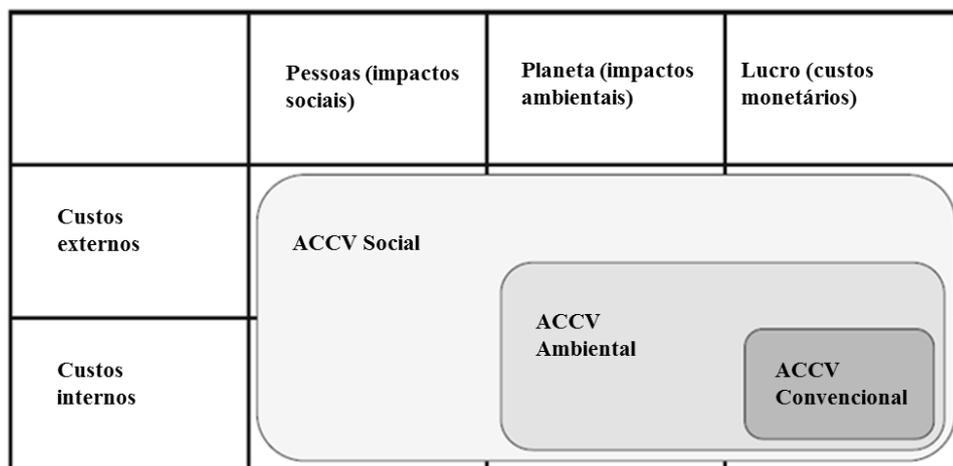
A descrição mais detalhada de cada tipo de ACCV envolve primeiramente a explanação de dois conceitos: custos internos e custos externos. Custos internos relacionam-se a autores diretamente envolvidos na análise do ciclo de vida do produto (produtor, consumidor, transportador, dentre outros), os quais financiam a produção, uso e outras despesas; dessa forma, esses custos são ligados a custos do negócio e incluem todos gastos e lucros dentro do sistema econômico. Já custos externos são suportados por atores indiretamente influenciados pelo ciclo de vida do produto em estudo, incluindo custos com impactos ambientais e sociais não ocasionados pelas partes envolvidas no ciclo de vida do produto. Esses custos são também denominados externalidades e cotados em unidades monetárias visto que em um futuro próximo de decisão serão internalizados (LICHTENVORT *et al.*, 2008). Como exemplo de custo externo cita-se o custo social da poluição gerada por maquinários de combustão interna, que traz como consequência doenças respiratórias; outro exemplo são benefícios para a biodiversidade ao se melhorar um sistema de tratamento de esgoto (RÖDGER; KJÆR; PAGOROPOULOS, 2018).

A ACCV convencional, historicamente mais praticada por governos e empresas, é baseada em uma avaliação puramente econômica e sob a perspectiva de um único autor, produtor ou consumidor. Usualmente custos externos são negligenciados, já custos internos são contabilizados (HUNKELER, David; LICHTENVORT; REBITZER, 2008). A ACCV ambiental, cuja metodologia foi desenvolvida pela SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*), é realizada sob a mesma base da LCA, com mesma unidade funcional e limites do sistema, incluindo custos associados a fluxos monetários reais e contabilizados ao longo de todo ciclo de vida do produto por um ou mais atores do processo, como fornecedor, produtor e consumidor. Custos externos, os quais espera-se que sejam internalizados em um futuro próximo (como o custo para a disposição de resíduos), são

considerados (HUNKELER, David; LICHTENVORT; REBITZER, 2008). Por fim, a ACCV social monetariza impactos sociais, como qualidade do trabalho, bem-estar social, dentre outros, e fornece suporte para a tomada de decisões em nível social por governos e autoridades públicas. Custos considerados nessa ACCV são dispendidos pela sociedade em geral, no presente ou futuro próximo, assim, custos externos também são contabilizados (RÖDGER; KJÆR; PAGOROPOULOS, 2018).

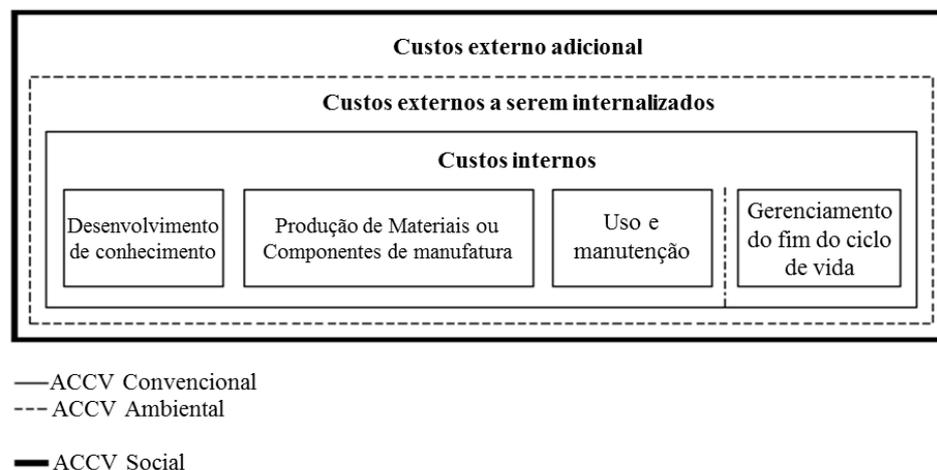
A Figura 21 resume as características dos tipos de ACCV e a Figura 22 descrimina os custos internos e externos para cada ACCV.

**Figura 21:** Características dos três tipos da ACCV



Fonte: Rödger, Kjær e Pagoropoulos, 2018. Modificado.

**Figura 22:** Custos dos tipos de ACCV



Fonte: Lichtenwort *et al.*, 2008. Modificado.

### 2.5.2. ACCV ambiental e ACV

Segundo Rödger, Kjær e Pagoropoulos (2018), a metodologia ACCV ambiental é a única alinhada a LCA e às normas ISO 14040/14044. Algumas diferenças, entretanto, existem entre as duas avaliações de ciclo de vida: a ACCV ambiental não necessita de caracterização e ponderação dos resultados da análise de inventário visto que o impacto financeiro pode ser avaliado pelo custo agregado sem necessidade de processamento; e na LCA o fator tempo não é tão impactante como na ACCV ambiental, devido ao fator de desconto aplicado às análises deste último. Ainda, destaca-se que os resultados da ACCV são expressos financeiramente, enquanto a LCA expressa suas análises por meio de *scores* de performance ambiental (LANGDON, 2006).

Algumas observações são importantes para a aplicação da ACCV ambiental em paralelo às etapas de uma LCA. Na etapa de objetivo e escopo, destaca-se que ambas metodologias devem possuir mesma unidade funcional, quanto ao limite do sistema, a ACCV não demanda que todos os processos a montante (*upstream*) sejam considerados e da mesma forma não tem necessidade de critérios *cut-off*, já que custos incorridos na cadeia de fornecimento são representados no peço do produto ou sistema. Na análise de inventário, alocações na ACCV são realizadas por meio dos custos ou lucros dos produtos, e não há como evitar a alocação por meio da expansão do sistema já que a ACCV ambiental somente descreve custos e não é capaz de trazer as consequências de uma decisão. Na fase de interpretação, análises de sensibilidade são similares em ambas metodologias, entretanto, no ACCV preços de commodities são muito mais voláteis, devido a dinâmica do mercado, do que impactos ambientais e emissões, e devem ser submetidos a checagens de sensibilidade (RÖDGER; KJÆR; PAGOROPOULOS, 2018).

## 2.6. AVALIAÇÃO SOCIAL DO CICLO DE VIDA

A Avaliação Social do Ciclo de Vida (ASCV) pode ser descrita como uma metodologia de avaliação que visa analisar o impacto social e socioeconômico de produtos e sistemas ao longo de todo seu ciclo de vida; esse impacto pode afetar diretamente diversos seres humanos (*stakeholders*), positivamente ou negativamente, e pode ser relacionado ao comportamento de empresas, a processos socioeconômicos ou impactos ao capital social. Assim, a ASCV complementa a ACV por meio de aspectos sociais da cadeia do produto e pode ser feita em conjunto ou separadamente a ACV (UNEP/SETAC, 2009, 2011).

Os anos 80 e 90 marcaram o início de debates envolvendo aspectos sociais dos produtos, sendo uma das primeiras iniciativas as realizadas pelo grupo Alemão *Project Group on Ecological Economics within Oko-Institute* em 1987 e, na sequência, o relatório gerado após um *workshop* da SETAC em 1993 compreendendo conceitos relativos à fase de avaliação de impacto de uma ACV. Ambas iniciativas enfatizaram a necessidade de inclusão de um pilar social à avaliação do ciclo de vida ambiental (UNEP/SETAC, 2011). Em 2009, a UNEP/SETAC publicou um guia para realização de uma ASCV (*Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*), com o objetivo de auxiliar os acionistas das corporações na condução da avaliação de impactos socioeconômicos do ciclo de vida dos produtos (UNEP/SETAC, 2009). Para complementar o guia lançado em 2009, em 2013 a UNEP/SETAC publicou folhas metodológicas descrevendo as subcategorias de uma ASCV e formas de medi-las por meio de indicadores (*Methodological Sheets for Subcategories in Social Life Cycle Assessment - S-LCA*) (UNEP/SETAC, 2013). Em 2020 é lançado o *Handbook for Product Social Impact Assessment* (UNEP/SETAC, 2020) com o objetivo de auxiliar organizações a terem maior transparência acerca dos impactos sociais dos seus produtos.

Entretanto, a ASCV ainda está em sua fase inicial de desenvolvimento, não possui normas relacionadas a mesma, e estudos publicados sobre esta avaliação apresentam ampla variedade na condução da metodologia. Dessa maneira, não há ainda padronização e consenso na aplicação de uma avaliação social do ciclo de produtos e sistemas (MOLTESEN *et al.*, 2018).

### 2.6.1. ASCV e ACV

A UNEP/SETAC propõe que uma ASCV se alinhe às fases de uma ACV, em conformidade com a ISO 14040 (UNEP/SETAC, 2011). Nesse sentido, peculiaridades da metodologia ASCV trazem diferenças de aplicação em relação à ACV.

Na fase de objetivo e escopo a aplicação de um modelo consequencial se distingue na ASCV. Assim, quando impactos sociais ocorrem em decorrência de uma mudança na cadeia do produto ou processo, analisa-se em uma ASCV as consequências diretas e indiretas dessa mudança, incluindo o que ocorreria se não houvesse mudança alguma. Durante a fase de análise de inventário a alocação de impactos sociais difere-se da alocação realizada em uma LCA, visto que na ASCV a forma como uma companhia é gerenciada, e não a operação dos processos, é responsável pelos impactos. Algumas formas de realizar a alocação na ASCV baseiam-se no tempo necessário para se realizar o processo ou através da criação de valor. Dois problemas

resultam dessa alocação: a subjetividade das escolhas e a falta de acesso a informações da empresa. Ainda em relação a análise de inventário, em uma ASCV é indispensável a coleta de dados diretamente na empresa envolvida, enquanto uma ACV permite o uso de base de dados genéricas com acurácia aceitável (MOLTESEN *et al.*, 2018).

A fase de avaliação de impacto em uma ASCV traz muitas vezes uma relação um para um entre categorias de impacto e indicadores de impacto, o que acarreta, nesses casos, na não necessidade de se realizar a caracterização dos resultados da análise de inventário. Quanto a escolha dos indicadores de impacto, debate-se se em uma ASCV os indicadores devem se relacionar à qualidade do gerenciamento da empresa (indicadores de processo) ou a performance social da empresa em relação a outras companhias ao longo do ciclo de vida do produto (indicadores de resultado) (MOLTESEN *et al.*, 2018).

Dessa forma, existem duas principais diferenças entre uma ASCV e uma ACV. A primeira relaciona-se a relação de causa entre processo e impacto: uma ACV depende da natureza do processo e uma ASCV varia conforme a cultura da empresa em estudo e a cultura do meio analisado. Uma segunda diferença diz respeito ao uso das metodologias para a tomada de decisão, onde a aplicação de uma ASCV traz incertezas e complexidades por requerer a análise conjunta dos impactos sociais decorrentes da produção, uso e descarte de um produto e da não produção, uso e descarte do mesmo (MOLTESEN *et al.*, 2018).

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Na **primeira etapa** do programa experimental foram determinadas as propriedades físicas e a composição química e mineralógica dos materiais estudados (cinza do bagaço de cana-de-açúcar, cal de casca de ovo hidratada, bentonita e caulim). O solo, composto por uma mistura de caulim e bentonita, o cimento Portland, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar e a cal de ovo hidratada foram caracterizados determinando-se a massa específica dos grãos [ASTM D854 (ASTM, 2014)], massa específica dos materiais em pó [NBR 16605 (ABNT, 2017a)], limites de liquidez e plasticidade [NBR 6459 (ABNT, 2017b) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente], distribuição granulométrica [NBR 7181 (ABNT, 2018)], assim como composições químicas e mineralógicas por FRX e DRX. O Método Chappelle Modificado [NBR 15895 (ABNT, 2010)] foi aplicado para determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado pela cinza do bagaço de cana, sendo um indicativo da sua atividade pozolânica.

Na **segunda etapa**, a resposta mecânica, em termos de resistência à compressão simples ( $q_u$ ) [ASTM D2166 (ASTM, 2016)], de pastas álcali-ativadas com diferentes teores de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo hidratada, concentrações de NaOH e relações água/ligante, foi analisada para definir a dosagem que maximizava a resistência. Por meio de uma análise estatística do tipo ANOVA foi avaliada a influência da relação água/ligante e de dosagens distintas de cinza, cal e hidróxido na resistência à compressão simples das pastas álcali-ativadas (isto é, qual dos fatores controláveis tinha maior influência na resistência das pastas).

Definida a dosagem a ser aplicada na estabilização do solo, a **terceira etapa** iniciou-se com o delineamento de um *design* de experimentos do tipo  $2^k$  fatorial para definição das combinações entre as variáveis estudadas (porcentagem de ligante álcali-ativado ou cimento Portland, peso específico aparente seco, temperatura de cura, tempo de cura e teor de umidade) em cada espécime a ser testado. Testes de compactação por Proctor Modificado foram realizados para a mistura solo-ligante álcali-ativado [ASTM D1557 (ASTM, 2012)] com a finalidade de se determinar os valores de peso específico seco e umidade ótima utilizados no trabalho. Após a moldagem das amostras, testes mecânicos foram realizados e compreenderam resistência à compressão simples, ensaio de pulso ultrassônico, resistência à tração por compressão diametral, durabilidade em relação a ciclos de molhagem e secagem e expansão livre [ASTM

D2166 (ASTM, 2016), ASTM D8295 (ASTM, 2019b), NBR 7222 (ABNT,2011), ASTM D559 (ASTM, 2015) e D4546 (ASTM, 2014a), respectivamente].

A **quarta etapa** correspondeu à análise estatística da influência das variáveis estudadas sobre os resultados dos testes mecânicos e à associação entre os resultados dos testes mecânicos e o índice porosidade/teor volumétrico de ligante ( $\eta/B_{iv}^{0,28}$ ). Assim, foi possível analisar a viabilidade do índice na descrição do comportamento mecânico das misturas.

Na **quinta etapa**, misturas representativas da álcali-ativação (pastas álcali-ativadas e solo-ligante álcali-ativado) foram submetidas a análises microestruturais para caracterizar os produtos de reação e identificar compostos hidratados, minerais e géis gerados no tratamento químico. Estas análises compreenderam análises químicas (FRX, FTIR), difração de raios X (DRX), e microscopia (MEV-EDS).

A **sexta etapa** compreendeu a avaliação ambiental, econômica, social, e de sustentabilidade das duas técnicas de estabilização em termos de ACV, ACCV, ASCV e MIVES segundo as normas ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO 14044 (ISO, 2006b). A Tabela 5 detalha todas as etapas do projeto experimental.

**Tabela 5:** Resumo de etapas do projeto experimental

Etapas		Objetivo específico	Material	Ensaios / Procedimentos	ABNT/ASTM
1a etapa	Preparação e caracterização dos materiais	-	Bentonita Caulim Cinza do bagaço de cana-de-açúcar Cal de casca de ovo hidratada Cimento Portland	Massa específica real dos grãos	ASTM D854 (ASTM, 2014)
				Limites de Atterberg	NBR 6459 (ABNT, 2017) NBR 7180 (ABNT, 2016)
				Distribuição granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 2018)
				Teste de Chapelle modificado	NBR 15895 (ABNT, 2010)
				Massa específica dos materiais em pó	NBR 16605 (ABNT, 2017)
				Mineralogia (DRX)	-
				Análise química (FRX)	-
2a etapa	Resposta mecânica de pastas álcali-ativadas (sem solo)	Avaliar estatisticamente a influência de dosagens distintas de cinza do bagaço de cana-de-açúcar, cal de casca de ovo hidratada e hidróxido de sódio na resistência à compressão simples de pastas álcali-ativadas	Misturas: * PR (cinza +cal) + NaOH	Resistência à compressão simples	ASTM D2166 (ASTM, 2016)
				Análises ANOVA no Minitab	-
3a etapa	Estudo de misturas álcali-ativadas e misturas de cimento Portland	Estudar a resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo cisalhante inicial, durabilidade e expansão livre das misturas solo-ligante álcali-ativado, comparativamente a misturas solo-cimento Portland	Misturas: * PR (cinza +cal) + solo + NaOH * Cimento Portland + solo + água	Compactação - Proctor	ASTM D1557 (ASTM, 2012)
				Resistência à compressão simples	ASTM D2166 (ASTM, 2016)
				Ensaio de pulso ultrassônico	ASTM D8295 (ASTM, 2019b)
				Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222 (ABNT, 2011)
				Durabilidade, ciclos secagem e molhagem	ASTM D559 (ASTM, 2015)
				Expansão livre	ASTM D4546 (ASTM, 2014)
4a etapa	Verificação do índice porosidade/teor volumétrico de binder ( $\eta/B_{iv}^{0,28}$ )	Avaliar estatisticamente quais fatores controláveis do processo de estabilização do solo expansivo tem maior influência nas variáveis de saída estudadas; Relacionar o índice porosidade/teor volumétrico de ligante ( $\eta/B_{iv}^3$ ) à resposta mecânica das misturas solo-ligante álcali-ativado e solo-cimento Portland	Mistura: * PR (cinza +cal) + solo + NaOH * Cimento Portland + solo + água	Relacionar resultados de testes mecânicos com o parâmetro $\eta/B_{iv}^{0,28}$	-
				Análises 2 <sup>k</sup> no Minitab	-
5a etapa	Caracterização microestrutural de misturas álcali-ativadas	Avaliar a composição química, mineralogia e morfologia da pasta álcali-ativada para compreensão dos produtos de reação advindos do processo de ativação alcalina; Estudar a mineralogia e morfologia de misturas solo-ligante álcali-ativado para identificação do gel formado e sua distribuição nas matrizes cimentadas	Misturas: * PR (cinza +cal) + NaOH * PR (cinza +cal) + solo + NaOH	Mineralogia (DRX)	-
				Microscopia eletrônica (MEV-EDS)	-
				Análise química (FRX)	-
				Espetrometria de infravermelho (FTIR)	-
6a etapa	Avaliação de ciclo de vida (ambiental + econômico + social = sustentabilidade) dos ligantes	Avaliar a sustentabilidade (pilares ambiental, econômico e social) de dosagens distintas das misturas solo-ligante álcali-ativado e solo-cimento Portland	Misturas: * PR (cinza +cal) + solo + NaOH * Cimento Portland + solo + água	Análises no SimaPro, composição de custos por meio do SINAPI, entrevistas com empresas e profissionais e metodologia MIVES	-

Nota: PR = Precursor.

### 3.1. PASTAS ÁLCALI-ATIVADAS

#### 3.1.1. Fatores controláveis

Os fatores controláveis utilizados nas pastas álcali-ativadas foram: (i) relação entre os precursores – cinza do bagaço de cana-de-açúcar/cal de casca de ovo hidratada (*CBCA/COH*); (ii) molaridade – *M*; e (iii) relação água/ligante – *A/L*. O design de experimentos utilizado foi um projeto fatorial completo com repetição, o qual emprega diferentes níveis para cada um dos fatores controláveis. A repetição foi realizada por restrições experimentais (i.e., havia quantidade limitada de material para a realização de maior número de repetições). Em um projeto fatorial completo no mínimo deve haver repetição dos ensaios para se calcular a soma dos quadrados devido ao erro. A partir do último, a otimização do sistema por meio da Análise de Variância (ANOVA) é possível.

As **relações entre os precursores (*CBCA/COH*)** utilizadas foram 90/10 (9), 80/20 (4), 70/30 (2,33) e 60/40 (1,5). Estas relações foram selecionadas de forma a haver maior porcentagem de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em relação a cal de casca de ovo hidratada, visto que a última é de difícil aquisição e gera maior impacto ambiental por englobar um processo de calcinação em sua fabricação.

As **molaridades (*M*)** utilizadas foram 0, 0,5, 1, 2 e 3 Mol. Estes valores foram selecionados devido a baixa solubilidade do cálcio (i.e., da cal de ovo) em meios fortemente alcalinos, ou seja, com forte presença de álcalis (GARCÍA-LODEIRO, I.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2013b, 2013a). Ressalta-se que a presença de álcalis se deve ao Na<sub>2</sub>O contido no hidróxido de sódio, e quanto maior a molaridade utilizada mais Na<sub>2</sub>O estará presente na solução.

Por fim, as relações **água/ligante (*A/L*)** foram 0,7, 0,8, 0,9, 1,0 e 1,2. Sendo *A* a massa de água do ligante, e *L* a soma da massa dos precursores e do Na<sub>2</sub>O em peso contido na solução de hidróxido de sódio. Em geral, menores quantidades de água (i.e., menor relação água/ligante) resultam em maiores resistências mecânicas e menor porosidade. Entretanto, a água está relacionada a trabalhabilidade da pasta e menores quantidades de água resultam em menor trabalhabilidade. Assim, as relações *A/L* foram escolhidas de maneira a equilibrar resistência e trabalhabilidade. Sendo a cinza um material de elevada área superficial (125,154 m<sup>2</sup>/g), esta demanda elevadas relações *A/L* para que haja trabalhabilidade da pasta.

### 3.1.2. Fatores constantes

Alguns fatores foram mantidos constantes nos ensaios com as pastas álcali-ativadas: (i) precursores; (ii) ativador alcalino; (iii) temperatura de cura; e (iv) tempo de cura.

Os **precursores** utilizados foram a cinza do bagaço de cana-de-açúcar e a cal de casca de ovo hidratada. O **ativador alcalino**, escolhido em função do seu preço e disponibilidade, foi o hidróxido de sódio (98% de pureza). A **temperatura** e o **tempo de cura** foram fixados em  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e 7 dias, respectivamente. A temperatura adotada reflete a temperatura em câmara úmida e a partir de 7 dias de cura já é possível analisar a influência dos fatores controláveis sobre a variável de resposta. Ainda, a adição de componentes contendo cálcio permitiu a cura a temperaturas menores ao melhorar as propriedades mecânicas da pasta (TEMUJIN; VAN RIESSEN; WILLIAMS, 2009; TEMUJIN; WILLIAMS; VAN RIESSEN, 2009).

### 3.1.3. Variável de resposta

A variável de resposta analisada para as pastas álcali-ativadas foi a resistência à compressão simples ( $q_u$ ).

A Tabela 6 resume os fatores controláveis e constantes, com respectivos níveis, do projeto experimental das pastas álcali-ativadas. A Tabela 7 apresenta o número de ensaios realizados a partir do planejamento experimental e das variáveis controláveis descritas no item 3.2.1.

**Tabela 6:** Fatores controláveis e constantes do projeto experimental para pastas álcali-ativadas

Fatores controláveis	Níveis
Relação entre precursores (CBCA/COH)	90/10 (9); 80/20 (4); 70/30 (2,33); 60/40 (1,5)
Molaridade (M)	0; 0,5; 1; 2; 3
Relação água/ligante (A/L)	0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,2
Fatores constantes	Nível
Precursores (CBCA e COH)	-
Ativador alcalino (NaOH)	-
Temperatura de cura	23°C
Tempo de cura	7 dias

**Tabela 7:** Número de ensaios realizados a partir do planejamento experimental para pastas álcali-ativadas

Material	Ensaio	Nº de ensaios realizados
Pastas álcali-ativadas	Resistência à compressão simples ( $q_u$ )	4 x 5 x 5 x 2 (repetição) = 200

## 3.2. SOLO E LIGANTE

### 3.2.1. Fatores controláveis

Os fatores controláveis utilizados para misturas solo-ligante álcali-ativado e solo-cimento Portland foram: (i) peso específico aparente seco -  $\gamma_d$ ; (ii) tempo de cura -  $D$ ; (iii) temperatura de cura -  $T$ ; (iv) teor de umidade -  $w$ ; e (v) teor de ligante -  $L$ . Três design de experimentos distintos foram delineados para estas misturas: (i) projeto fatorial  $2^5$  com repetição e pontos centrais para os ensaios de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral, módulo cisalhante inicial e sucção matricial; (ii) projeto fatorial  $2^4$  com repetição e pontos centrais para o ensaio de expansão livre (ligante álcali-ativado); e (iii) projeto fatorial  $2^2$  para o ensaio de durabilidade. Os cinco fatores controláveis supracitados foram avaliados nos ensaios de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral, módulo cisalhante inicial e sucção. Para o ensaio de expansão livre os fatores controláveis peso específico aparente seco, tempo de cura, teor de umidade e teor de ligante foram analisados. Já para o ensaio de durabilidade somente dois fatores controláveis foram avaliados (peso específico aparente seco e teor de ligante), devido a elevada demanda de material por parte deste ensaio e uma limitação relacionada à aquisição do solo estudado.

Uma repetição foi realizada por restrições experimentais (i.e., havia quantidade limitada de material para a realização de maior número de repetições). Em um projeto fatorial  $2^k$  no mínimo deve haver repetição dos ensaios para se calcular a soma dos quadrados devido ao erro na Análise de Variância (ANOVA).

Os valores de **peso específico aparente seco** ( $\gamma_d$ ) foram definidos a partir da curva de compactação com energia modificada apresentada na Figura 24 (item 3.4.1.1). Os valores de  $\gamma_d$  máximo e mínimo,  $13 \text{ kN/m}^3$  e  $11 \text{ kN/m}^3$ , respectivamente, foram utilizados para todos ensaios com exceção do ensaio de expansão (ligante álcali-ativado). O peso específico aparente seco máximo igual a  $13 \text{ kN/m}^3$  corresponde à curva com 30% de ligante, já que este é o maior  $\gamma_d$  possível de ser moldado para esse teor de ligante. Para o ensaio de expansão do ligante álcali-ativado, após uma avaliação dos resultados preliminares, os valores de  $\gamma_d$  utilizados foram  $14,5 \text{ kN/m}^3$  e  $12,5 \text{ kN/m}^3$ . O peso específico aparente seco máximo igual a  $14,5 \text{ kN/m}^3$  corresponde à curva com 10% de ligante. Destaca-se que o ensaio de Proctor foi realizado com energia modificada para permitir um maior grau de compactação e conseqüentemente maior resistência mecânica visto que há maior empacotamento dos grãos de solo e mobilização de atrito.

Os **tempos de cura (*D*)** foram definidos em 7 e 28 dias para os ensaios de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral, módulo cisalhante inicial e sucção matricial. Ambos tempos de cura são usuais no cálculo da resistência à compressão simples de argamassas de cimento hidráulico (ASTM, 2020c) e muito utilizados em estudos envolvendo materiais álcali-ativados (ABDELJOUAD *et al.*, 2019; IKEAGWUANI; OBETA; AGUNWAMBA, 2019; WILKINSON; HAQUE; KODIKARA, 2010; ZHANG *et al.*, 2013). Para o ensaio de expansão (ligante álcali-ativado), após uma avaliação dos resultados preliminares, os tempos de cura foram 0 e 7 dias. Diferentes tempos de cura permitem a avaliação do ganho de resistência, dos produtos de reação formados e da microestrutura do corpo de prova (e.g., estrutura porosa) com o passar do tempo. Destaca-se que reações pozolânicas ocorrem ao longo de meses, podendo chegar a anos. Já processos de álcali-ativação, a depender das condições de cura e dos materiais utilizados, podem atingir grandes resistências em poucos dias (7 dias de cura).

A **temperatura de cura (*T*)** teve como valor mínimo  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ , temperatura da câmara úmida onde os corpos de prova foram curados, e como valor máximo  $40\pm 2^{\circ}\text{C}$ , temperatura investigada em diversos estudos com álcali-ativação (CHITHIRAPUTHIRAN; NEITHALATH, 2013; FRARE; LUZ, 2020; KAR, 2013; MUÑIZ-VILLARREAL *et al.*, 2011; PERERA *et al.*, 2007). O aumento de temperatura ocasiona mudanças na cinética das reações, além de influenciar a distribuição e o tamanho de poros (KHALIFA *et al.*, 2020). Assim, apesar da temperatura de cura ser inferior a  $40^{\circ}\text{C}$  em campo, esta pode ser utilizada para previsão da resistência mecânica de misturas solo-ligante ao longo do tempo.

Os **teores de umidade (*w*)** foram determinados a partir do teor de umidade ótimo da curva de compactação com energia modificada, sendo 28% e 30% para os ensaios de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral, módulo cisalhante inicial e sucção matricial. A umidade de 28% corresponde a umidade ótima da mistura solo + 20% de ligante, enquanto a umidade de 30% corresponde ao máximo teor em que a moldagem foi viável, ou seja, ocorria sem exsudação para o maior teor de ligante e maior peso específico. Assim, limitações do macaco hidráulico e dos moldes metálicos utilizados para a moldagem dos corpos de prova ocasionaram uma redução no valor de umidade utilizado, visto que a umidade ótima para a mistura solo + 30% de ligante era de 32,18%. Para o ensaio de expansão (ligante álcali-ativado) os teores de umidade utilizados foram 19,7% e 24,7%. A umidade de 24,7%

corresponde a umidade ótima da mistura solo + 10% de ligante e foi definida após análise dos resultados preliminares de expansão.

Por fim, os **teores de ligante (L)** para os ensaios de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral, módulo cisalhante inicial, durabilidade e sucção matricial foram definidos em 20 e 30%, em acordo com pesquisas que estabilizaram solos moles (argilosos e siltosos) por meio de precursores álcali-ativados (ABDELDJOUAD *et al.*, 2019; IKEAGWUANI; OBETA; AGUNWAMBA, 2019; RIVERA *et al.*, 2020; WILKINSON; HAQUE; KODIKARA, 2010; ZHANG *et al.*, 2013). Testes preliminares foram realizados com teores de ligante de 10, 20 e 30%, entretanto, concluiu-se que o valor de 10% não apresentava resultados de resistência satisfatórios, i.e., o corpo de prova se desintegrou ao ser imerso em água. Para o ensaio de expansão (ligante álcali-ativado), os teores de ligante (4% e 10%) foram definidos após análise de testes de expansão preliminares e conforme Consoli *et al.* (2021b).

### 3.2.2. Fatores constantes

Fatores mantidos constantes para todas misturas de solo e ligante álcali-ativado foram: (i) solo; (ii) agente cimentante; (iii) ativador alcalino; (iv) relação entre os precursores -  $CBCA/COH$ ; e (v) concentração de álcalis -  $\%Na_2O$ . Para as misturas de solo e cimento Portland os seguintes fatores foram mantidos constantes: (i) solo e (ii) agente cimentante. Ainda, a temperatura de cura foi mantida constante para o ensaio de expansão com o ligante álcali-ativado. Para o ensaio de durabilidade, a umidade ótima, tempo de cura e temperatura de cura foram mantidos constantes nos experimentos com ambos ligantes.

O **solo** utilizado foi uma mistura de caulim (90%) e bentonita (10%). O objetivo desta escolha foi avaliar a estabilização de um solo argilo-siltoso expansivo. A bentonita é expansiva por ser um mineral do grupo esmectita. Assim, a mistura resulta em um solo com grau alto de expansão (IP=40%, item 3.4.1.1), conforme Emerah e Seleem (2018). Solos expansivos são encontrados no Brasil e estabilizações químicas são frequentemente realizadas para redução de danos estruturais decorrentes da expansão. Exemplos deste tipo de solo incluem o solo Massapê, de Nossa Senhora do Socorro, Sergipe (SE) [expansão livre em torno de 20% (LEITE *et al.*, 2016)], e o solo do município de Paulista, Pernambuco (PE) [expansão livre em torno de 11% (FERREIRA *et al.*, 2018)].

Os **agentes cimentantes utilizados** foram a cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo hidratada (ensaios com o ligante álcali-ativado) e o cimento CP V-ARI (estabilizações com cimento Portland). O **ativador alcalino**, escolhido em função do seu preço e disponibilidade, foi o hidróxido de sódio (98% de pureza).

A **relação entre os precursores (CBCA/COH)** foi fixada em 80/20 (4), por ser o valor que acarretou a maior resistência à compressão simples com menor consumo de cal dentre os testes realizados nas pastas álcali-ativadas.

A **concentração de álcalis (%Na<sub>2</sub>O)** foi fixada em 2,61%. Esta porcentagem corresponde a porcentagem em peso entre o teor de álcalis (Na<sub>2</sub>O) da solução ativadora e o teor de material precursor utilizado (CBCA + COH). A porcentagem de 2,61 relaciona-se aos testes realizados na pasta álcali-ativada com molaridade de 1 Mol e relação A/L de 0,8. Estes valores representam a condição que ocasiona maior impacto na variável de resposta (resistência à compressão simples das pastas álcali-ativadas).

### 3.2.3. Variáveis de resposta

As variáveis de resposta analisadas para misturas de solo-ligante álcali-ativado e solo-cimento Portland foram: (i) resistência à compressão simples -  $q_u$ ; (ii) resistência à tração por compressão diametral -  $q_t$ ; (iii) módulo cisalhante inicial -  $G_0$ ; (iv) sucção matricial; (v) durabilidade e (vi) expansão livre -  $\varepsilon_s$ .

A Tabela 8 resume os fatores controláveis e constantes do projeto experimental para a mistura solo-ligante. A Tabela 9 apresenta o número de ensaios realizados a partir do planejamento experimental e das variáveis controláveis descritas no item 3.3.1.

**Tabela 8:** Fatores controláveis e constantes do projeto experimental para misturas de solo e ligante

Fatores controláveis ( $q_u$ , $q_t$ , $G_0$ , sucção)	Níveis
Peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ )	11 e 13 kN/m <sup>3</sup>
Tempo de cura (D)	7 e 28 dias
Temperatura de cura (T)	23 e 40°C
Teor de umidade (w)	28 e 30%
Teor de ligante (L)	20 e 30%
Fatores controláveis (durabilidade)	Níveis
Peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ )	11 e 13 kN/m <sup>3</sup>
Teor de ligante (L)	20 e 30%
Fatores controláveis ( $\epsilon_s$ )	Níveis
Peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ )	12,5 e 14,5 kN/m <sup>3</sup>
Tempo de cura (D)	0 e 7 dias
Teor de umidade (w)	19,7 e 24,7%
Teor de ligante (L)	4 e 10%
Fatores constantes (todos ensaios)	Nível
Solo (Bentonita/Caulim)	10/90
Agente cimentante (cinza+cal; cimento Portland)	-
Ativador alcalino (NaOH)	-
Relação entre precursores (CBCA/COH)	80/20 (4)
Concentração de álcalis (%Na <sub>2</sub> O)	2,61%
Fatores constantes (durabilidade)	Nível
Tempo de cura (D)	7 dias
Temperatura de cura (T)	23°C
Teor de umidade (w)	28%
Fatores constantes ( $\epsilon_s$ )	Nível
Temperatura de cura (T)	23°C

**Tabela 9:** Número de ensaios realizados a partir do planejamento experimental para misturas de solo e ligante

Material	Ensaio	Nº de ensaios realizados
Solo - ligante álcali-ativado	Resistência à compressão simples ( $q_u$ )	$2^5 \times 2$ (repetição) + 5 PC = 69
	Resistência à tração por compressão diametral ( $q_t$ )	$2^5 \times 2$ (repetição) + 5 PC = 69
	Módulo cisalhante inicial ( $G_0$ )	$2^5 \times 2$ (repetição) + 5 PC = 69
	Durabilidade	$2^2 = 4$
	Sucção matricial	$2^5 \times 2$ (repetição) = 64
	Expansão livre ( $\epsilon_s$ )	$2^4 \times 2$ (repetição) + 4 PC = 36
Solo - cimento Portland	Resistência à compressão simples ( $q_u$ )	$2^5 \times 2$ (repetição) + 5 PC = 69
	Resistência à tração por compressão diametral ( $q_t$ )	$2^5 \times 2$ (repetição) + 5 PC = 69
	Módulo cisalhante inicial ( $G_0$ )	$2^5 \times 2$ (repetição) + 5 PC = 69
	Durabilidade	$2^2 = 4$
	Sucção matricial	$2^5 \times 2$ (repetição) = 64
	Expansão livre ( $\epsilon_s$ )	Consoli <i>et al.</i> (2021b)

PC = pontos centrais

### 3.3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.3.1. Materiais

Neste tópico são caracterizadas as propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos materiais estudados: bentonita e caulim, cimento Portland, cinza do bagaço de cana-de-açúcar, cal de casca de ovo hidratada e hidróxido de sódio. Os equipamentos e procedimentos utilizados também são descritos.

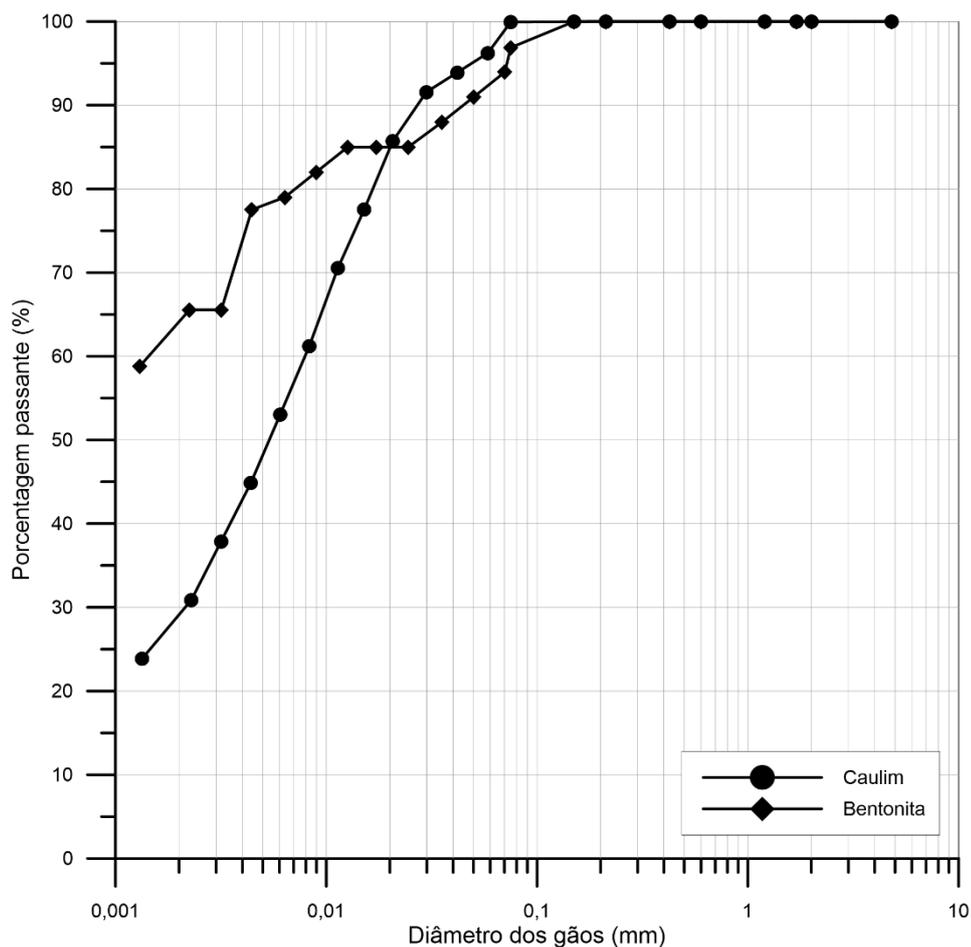
##### 3.3.1.1. Bentonita e caulim

O caulim utilizado nesta pesquisa foi obtido de um fornecedor situado na cidade de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul (RS). Este é conhecido como “caulim rosa” e classificado como CL (argila inorgânica de baixa compressibilidade) pela USCS - *Unified Soil Classification System*

(ASTM, 2020c). A bentonita sódica natural foi obtida de um fornecedor de João pessoa, Paraíba (PB), e é classificada como CH (argila inorgânica de alta compressibilidade) segundo a USCS (ASTM, 2020c). A massa específica dos grãos [NBR 6458 (ABNT, 2017c)], composição granulométrica [NBR 6502 (ABNT, 1995)] e limites de Atterberg [NBR 6459 (ABNT, 2017b) e NBR 7180 (ABNT, 2016)] encontram-se na Tabela 10. A curva de distribuição granulométrica [NBR 7181 (ABNT, 2018)] é delineada na Figura 23. Para a bentonita foi possível realizar o ensaio de granulometria a partir de algumas modificações na norma NBR 7181 (ABNT, 2018), conforme Santos (2008): a bentonita foi mantida três dias na solução de hexametáfosfato de sódio para completa hidratação e foram utilizados 30g de material seco.

**Tabela 10:** Propriedades físicas da Bentonita e do Caulim

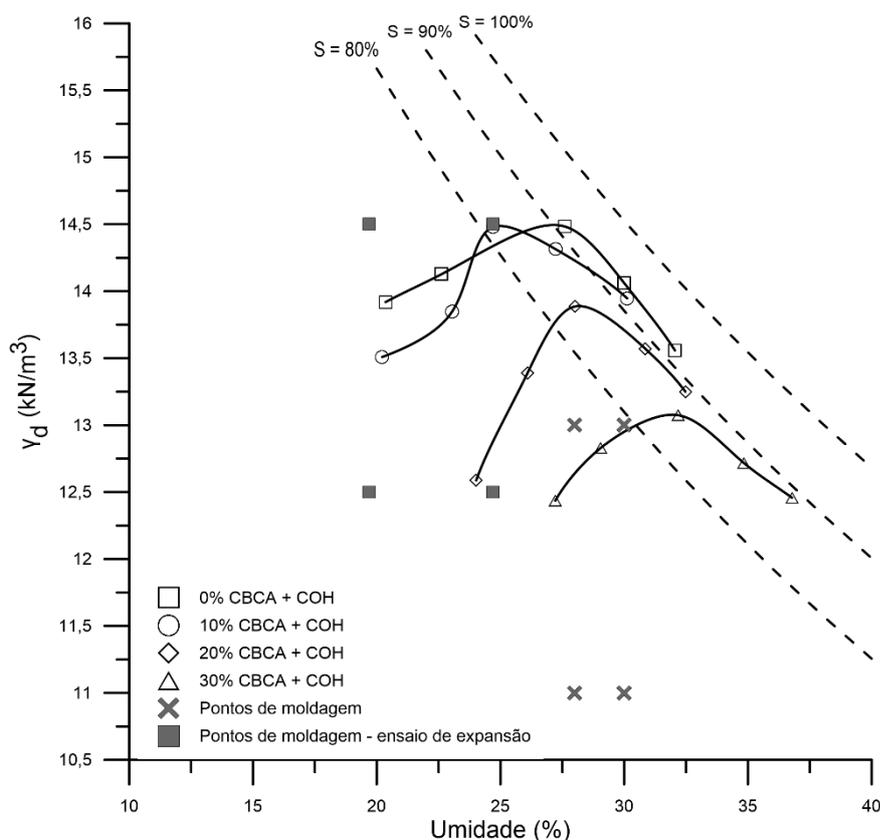
Propriedades físicas	Materiais			Normativa
	Bentonita	Caulim	10/90 B/C	
Massa específica real dos grãos - g/cm <sup>3</sup>	2,75	2,61	-	NBR 6458/2017
Limite de liquidez (LL) - %	501	43	70	NBR 6459/2017
Limite de plasticidade (LP) - %	66	13	30	NBR 7180/2017
Índice de plasticidade (IP) - %	436	30	40	NBR 7180/2017
% de Areia Grossa ( $0,6 < \phi < 2,0$ mm)	0	0	-	
% de Areia Média ( $0,2 < \phi < 0,6$ mm)	0	0	-	
% de Areia Fina ( $0,06 < \phi < 0,2$ mm)	6	4	-	NBR 6502/2022
% de Silte ( $0,002 < \phi < 0,06$ mm)	30	67	-	
% de Argila ( $\phi < 0,002$ mm)	64	29	-	
Classificação USCS	CH	CL	-	ASTM D2487/2017

**Figura 23:** Curva granulométrica da Bentonita e do Caulim

As curvas de compactação do solo (10% de bentonita e 90% de caulim) e do solo com adição de 10, 20 e 30% de ligante (CBCA+COH) são apresentadas na Figura 24. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM D1557 (ASTM, 2012) utilizando energia modificada para se alcançar maiores valores de peso específico ( $\gamma_d$ ) e, conseqüentemente, maiores resistências mecânicas. Observa-se que o aumento do teor de ligante ocasiona uma queda no valor do peso específico seco máximo, devido a mudanças granulométricas no solo decorrentes de processos de floculação e aglomeração de partículas pela adição de hidróxido de cálcio. A Tabela 11 especifica o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e umidade ótima ( $w_{\acute{o}timo}$ ) para cada mistura. Pontos em cruz e quadrado destacados no gráfico descrevem as condições de moldagem dos corpos de prova.

**Tabela 11:** Condições ótimas das curvas de compactação

Mistura	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	W <sub>ótimo</sub> (%)
0% CBCA + COH	14,48	27,59
10% CBCA + COH	14,48	24,70
20% CBCA + COH	13,89	28,01
30% CBCA + COH	13,07	32,18

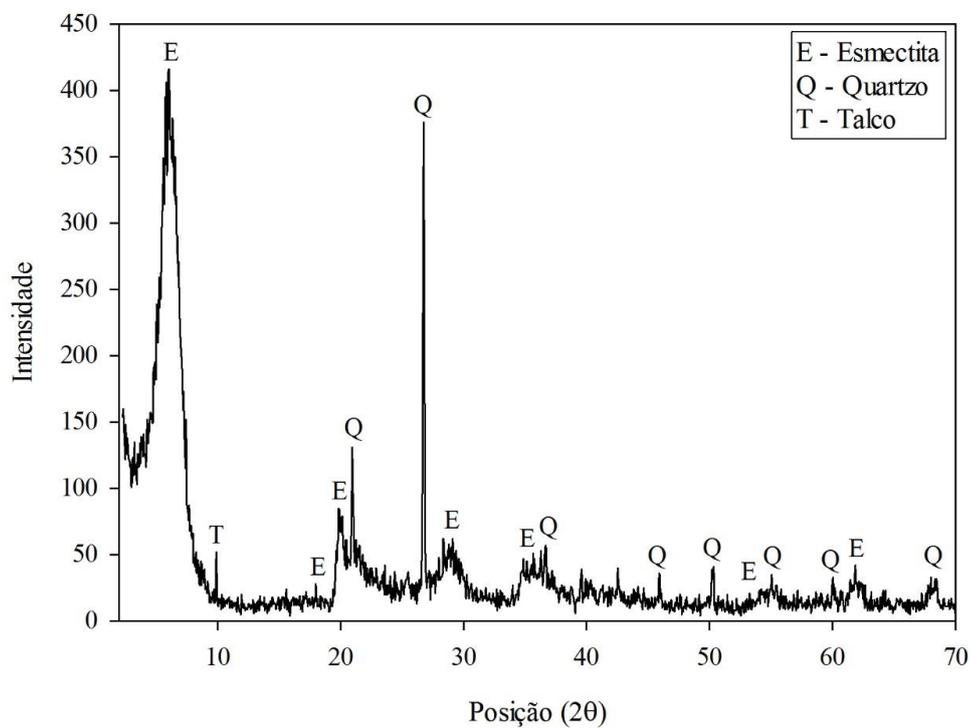
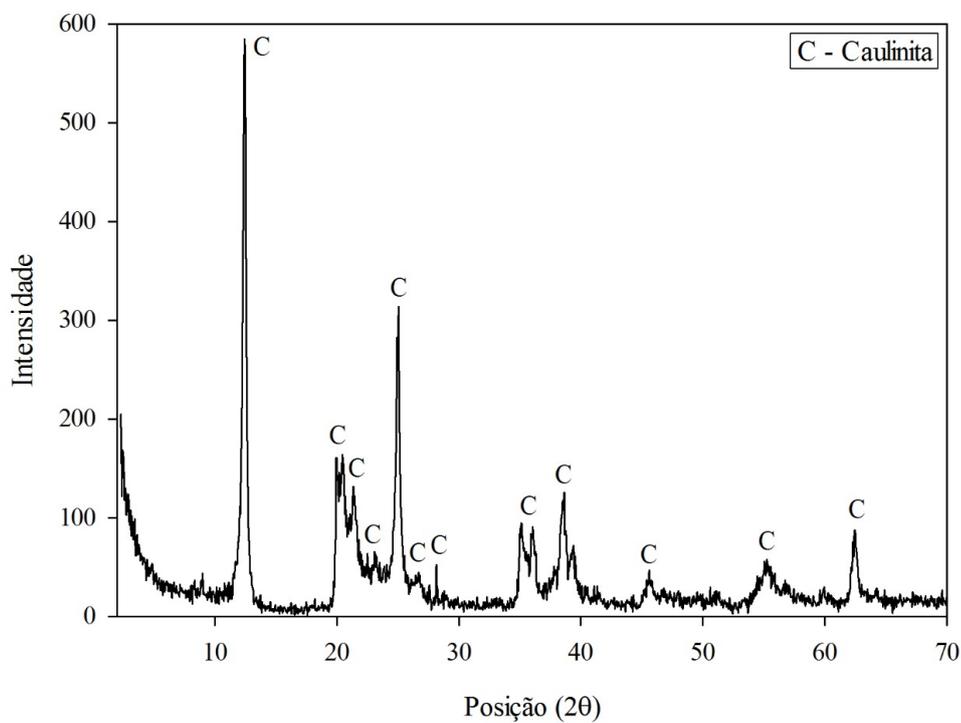
**Figura 24:** Curvas de compactação

A composição química de ambos minerais de argila foi definida pela técnica de fluorescência de raios x (FRX), realizada no Instituto de Geociências da UFRGS (Laboratório de Geoquímica, IE-Multi-LABGEOQ) utilizando-se um espectrômetro da marca Rigaku (modelo RIX 2000) equipado com tubo de raios X de Rh em amostra fundida, para elementos maiores, e pressionada, para elementos menores. Nesta técnica a amostra é irradiada por um feixe de raios x de grande intensidade que causam emissão de fluorescência, sendo os elementos químicos identificados pelo comprimento de onda da fluorescência emitida e suas concentrações pela intensidade da radiação. Conforme Tabela 12 a bentonita e o caulim são em maior parte constituídos por óxido de silício (64,74% e 52,50%, respectivamente) e óxido de alumínio (13,25% e 31,75%, respectivamente).

**Tabela 12:** Composição química para a Bentonita e o Caulim

Óxidos	Bentonita	Caulim	Desvio Padrão
SiO <sub>2</sub>	64,74 %	52,50 %	0,10 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,25 %	31,75 %	0,07 %
TiO <sub>2</sub>	0,81 %	0,14 %	0,00 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,60 %	1,44 %	0,02 %
MnO	0,02 %	0,01 %	0,00 %
MgO	3,26 %	-	0,02 %
CaO	0,81 %	-	0,01 %
Na <sub>2</sub> O	1,98 %	-	0,08 %
K <sub>2</sub> O	0,36 %	0,40 %	0,02 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07 %	-	0,00 %
Perda ao fogo	6,11 %	13,76 %	

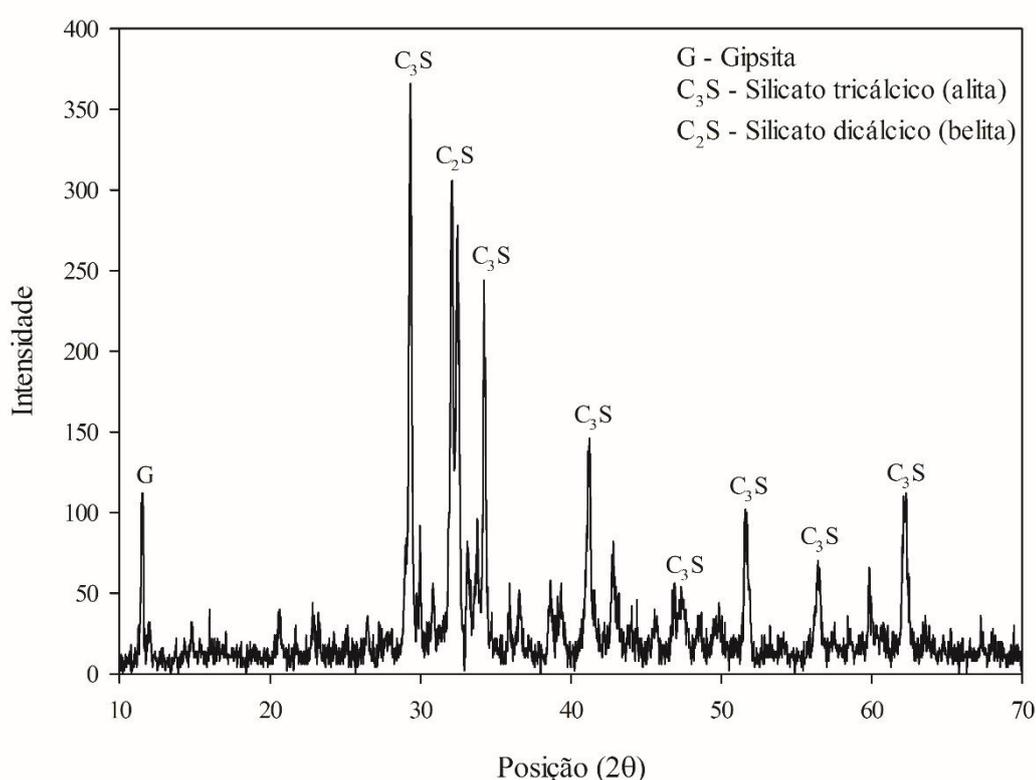
Já a técnica de difração de raios x (DRX) realizada no Instituto de Geociências da UFRGS (Laboratório de Difractometria de Raios X) permitiu analisar as fases cristalinas dos minerais (Figura 25 e Figura 26) por meio de um difratômetro da marca Siemens (modelo D-500) equipado com tubo de ânodo fixo de cobre ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) e operando a 40 kV e 25 mA no feixe primário e monocromador curvado de grafite no feixe secundário. As amostras foram analisadas pelo método em pó, com um intervalo angular de 2 a 72° 2 $\theta$  em passo de 0.05°/s e utilizando-se fendas de divergência e anti-espalhamento de 2 mm e 0,2 mm no detector. A técnica de DRX consiste na incidência de radiação em uma amostra e na detecção dos fótons difratados. Aplicando-se a Lei de Bragg para distâncias interplanares (d) é possível determinar o ângulo de difração por simetria e pelo tamanho da célula unitária, já a natureza dos átomos e sua disposição relacionam-se a intensidade dos picos. Assim, a DRX gera padrões de posição de pico em ângulos de difração característicos e com intensidades relativas que permitem a identificação de fases cristalinas em uma amostra (SNELLINGS, 2016). Segundo as Figura 25 e 26 a bentonita é constituída por minerais smectita e quartzo, enquanto o caulim é essencialmente composto pelo mineral caulinita.

**Figura 25:** Difratoograma da Bentonita**Figura 26:** Difratoograma do Caulim

### 3.3.1.2. Cimento Portland

O cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) possui massa específica real dos grãos de  $3,15 \text{ g/cm}^3$ . A análise de DRX (Figura 27) evidencia a presença de gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), silicato tricálcico (alita) e silicato dicálcico (belita) no cimento Portland CPV-ARI. O CPV-ARI contém até 10% de material carbonático (fíler calcário) em sua composição [NBR 16.697 (ABNT, 2018a)], entretanto, o pico característico da calcita não foi identificado por coincidir com o da alita. Esta análise foi realizada na Central Analítica do Departamento de Engenharia Química (CADEQ) da UFSM pelo método em pó em um difratômetro da marca Rigaku (modelo Miniflex300) equipado com tubo de ânodo fixo de cobre ( $\lambda = 1.54051 \text{ \AA}$ ) e fonte de energia com 30 kV e 10 mA.

**Figura 27:** Difratoograma do Cimento Portland CPV-ARI



### 3.3.1.3. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA)

A cinza é proveniente de uma empresa localizada no município de Porto Xavier, Rio Grande do Sul (RS), sendo um resíduo da queima do bagaço de cana-de-açúcar a temperaturas não controladas. Esta cinza é disposta a céu aberto perto do seu local de origem (Figura 28), sem receber uma adequada destinação final.

**Figura 28:** Disposição da CBCA em seu local de origem

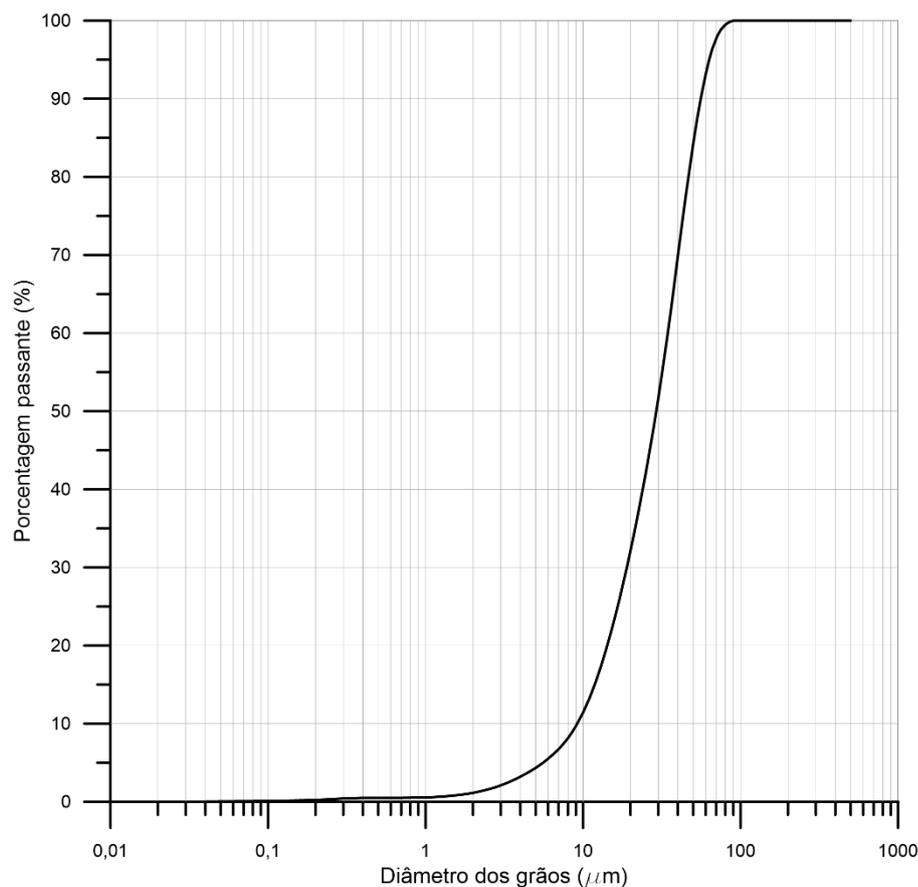


Previamente ao seu uso a cinza foi seca a 50°C durante 48h por apresentar grande umidade. Houve perda de massa em torno de 50% do material úmido. Em seguida, a cinza foi peneirada em uma peneira com malha de aço de 75 µm para aumentar sua área superficial e reatividade. A obtenção da massa específica dos grãos da cinza foi realizada conforme NBR 16605 (ABNT, 2017a), específica para materiais em pó. O índice de atividade pozolânica (IAP) foi calculado conforme NBR 15895 (ABNT, 2010). Esta norma não estabelece um valor de IAP mínimo para que um material seja considerado pozolânico, entretanto, a norma NFP 18-513 (AFNOR, 2012) define um valor mínimo de 700 mg de  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$  pozolana. Assim, a cinza utilizada neste trabalho foi considerada um material pozolânico. Além disso, foi realizada uma análise de área superficial BET e determinação dos tamanhos de partículas por granulometria a laser. As propriedades físicas da cinza encontram-se na Tabela 13 e a curva de distribuição granulométrica é delineada na Figura 29.

Destaca-se que o método de BET permite a realização de análises de área de superfície por isotermas Brunauer, Emmett e Teller (BET) e Langmuir. Estas análises são feitas empregando-se algum tipo de gás, o qual passa sobre uma amostra resfriada à temperatura do nitrogênio líquido (77K) sob pressões de até 2 atm. A partir da adsorção/dessorção do gás pela amostra e utilizando a equação de BET, determina-se o volume de gás necessário para recobrir a superfície adsorvente com uma monocamada. Para este trabalho, o BET foi realizado no Laboratório de Valoração de Resíduos da UNESC utilizando-se gás nitrogênio (N<sub>2</sub>) em um equipamento QuantaChrome, Modelo NOVA 1200e. Já a granulometria das amostras foi determinada por difração de raios laser no mesmo laboratório, em um analisador de tamanho de partículas Cilas, modelo 1064, após diluição das amostras em água e agitação por 30 min.

**Tabela 13:** Propriedades físicas da Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar

Propriedades físicas	Valores	Normativa
Massa específica dos grãos - g/cm <sup>3</sup>	2,08	NBR 16605/2017
Limite de liquidez (LL) - %	Não plástico	NBR 6459/2017
Limite de plasticidade (LP) - %	Não plástico	NBR 7180/2017
Índice de plasticidade (IP) - %	Não plástico	NBR 7180/2017
Índice de atividade pozolânica (mg Ca(OH) <sub>2</sub> /g pozolana)	817,6	NBR 15895/2010
Área de superfície específica BET - m <sup>2</sup> /g	125,154	-
Diâmetro a 10% - μm	9,18	-
Diâmetro a 50% - μm	29,14	-
Diâmetro a 90% - μm	55,85	-
Diâmetro médio - μm	31,01	-

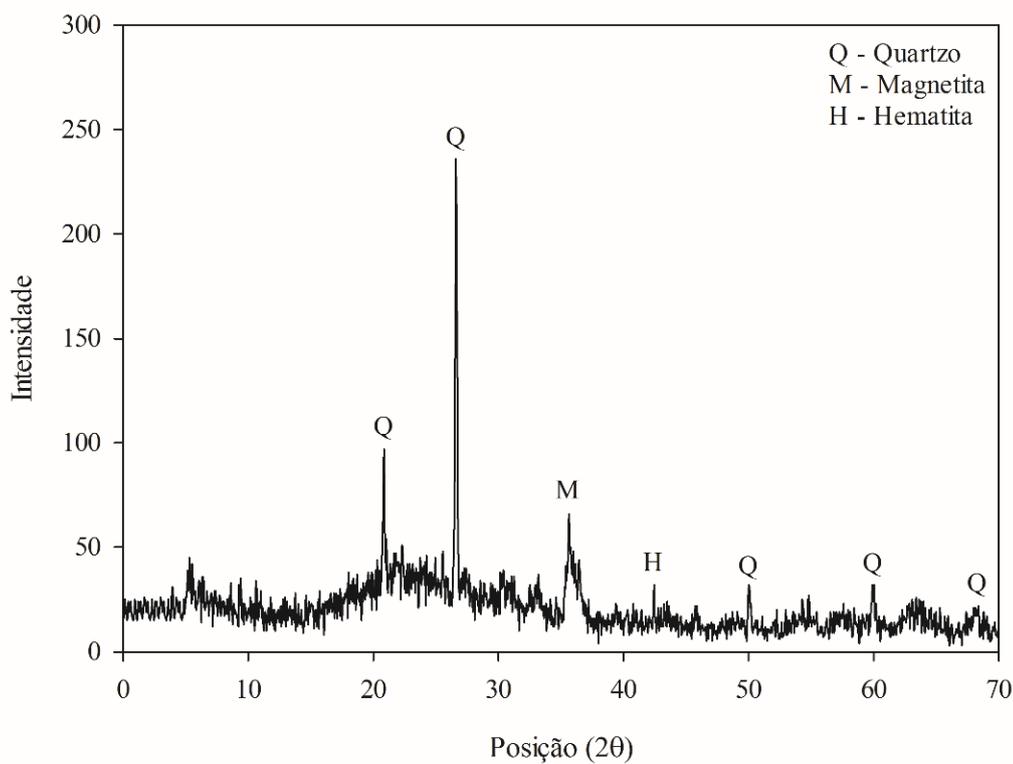
**Figura 29:** Curva granulométrica da CBCA

Conforme resultados de FRX (Tabela 14) a CBCA é majoritariamente composta por óxido de silício (60,65%), óxido de ferro (13,87%) e óxido de alumínio (5,76%). Já o difratograma da cinza (Figura 30) evidencia a sua natureza semicristalina e a presença de minerais de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

**Tabela 14:** Composição química da CBCA

Óxidos	CBCA
$\text{SiO}_2$	60,65 %
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5,76 %
$\text{TiO}_2$	4,14 %
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	13,87 %
$\text{MnO}$	0,45 %
$\text{MgO}$	1,97 %
$\text{CaO}$	1,40 %
$\text{Na}_2\text{O}$	0,22 %
$\text{K}_2\text{O}$	2,90 %
$\text{P}_2\text{O}_5$	1,26 %
Perda ao fogo	-

**Fonte:** Bruschi *et al.*, 2021.

**Figura 30:** Difratoograma da CBCA

**Fonte:** Bruschi *et al.*, 2021. Modificado.

#### 3.3.1.4. Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio é oriundo da empresa RF Química, localizada na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul (RS). Este é constituído por micropérolas com pureza analítica (P.A.) de 98% e densidade de  $2,13 \text{ g/cm}^3$  conforme certificado pelo provedor. O NaOH é composto por 77,45% de  $\text{Na}_2\text{O}$ .

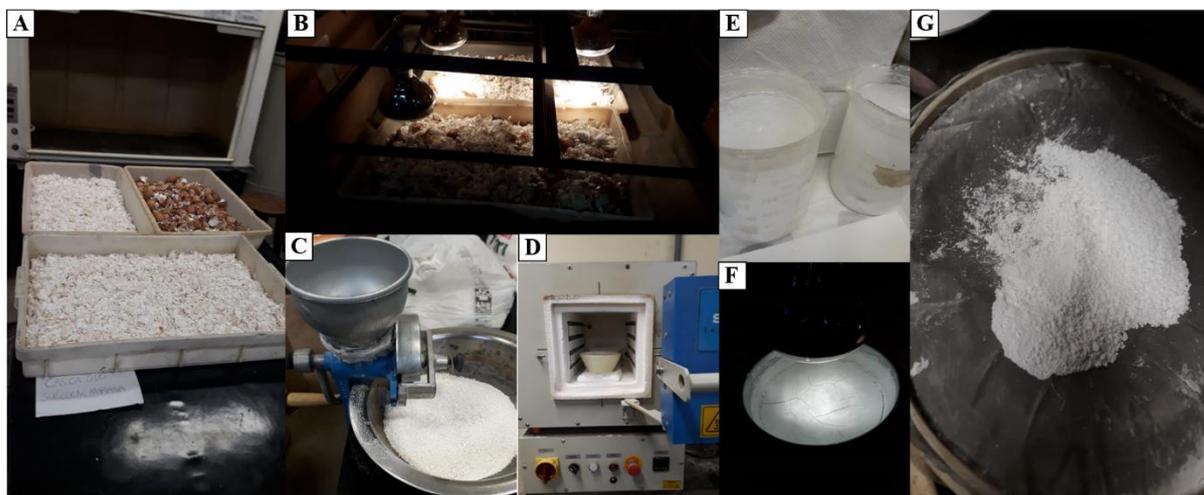
#### 3.3.1.5. Cal de casca de ovo hidratada (COH)

A cal de casca de ovo hidratada foi produzida no laboratório de geotecnia da UFRGS por meio da calcinação de cascas de ovo, recolhidas em padarias da região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul (RS), as quais teriam como destinação final o aterro sanitário. A casca de ovo é um resíduo da industrialização de ovos (ovos em pó, líquidos, dentre outros) em empresas de alimentos.

Os processos envolvidos na produção da COH (Figura 31) foram: (a) lavagem das cascas; (b) secagem das cascas a  $60^\circ\text{C}$ ; (c) moagem manual em equipamento para tal fim; (d) calcinação por 4 horas a  $1050^\circ\text{C}$  em forno do tipo mufla; (e) hidratação em água destilada por 48 horas; (f)

secagem a 50°C por 24 horas; (g) peneiramento na malha de 75  $\mu\text{m}$ . A taxa de aquecimento e resfriamento foi constante e igual a 10°C. A perda de massa durante a calcinação foi de aproximadamente 50%.

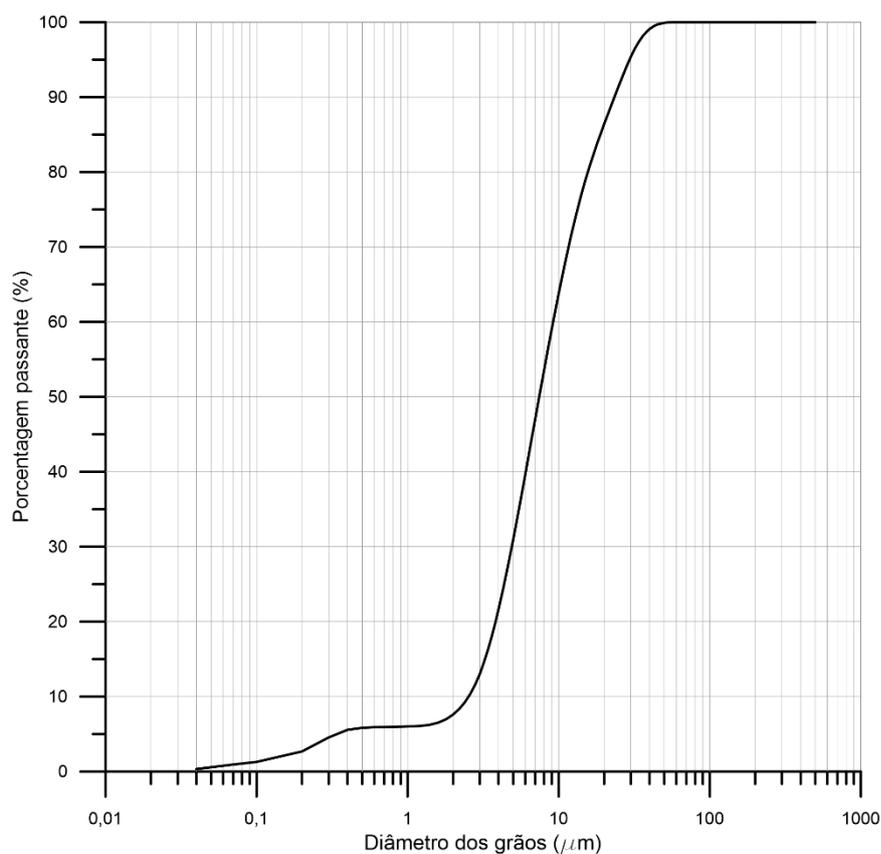
**Figura 31:** Produção em laboratório da COH



A obtenção da massa específica dos grãos da cal foi realizada conforme NBR 16605 (ABNT, 2017a), específica para materiais em pó. No Laboratório de Valoração de Resíduos da UNESC realizou-se a análise de área superficial BET e granulometria a laser. Os equipamentos utilizados na análise BET e de granulometria são os mesmos descritos para a CBCA. As propriedades físicas da cal encontram-se na Tabela 15 e a curva de distribuição granulométrica é delineada na Figura 32. Ressalta-se que a cal foi utilizada por permitir a cura a menores temperaturas, ao melhorar as propriedades mecânicas do ligante, e por demandar menores molaridades do NaOH na álcali-ativação, o que auxilia nos processos de moldagem visto ser perigoso o manuseio de substâncias muito básicas.

**Tabela 15:** Propriedades físicas da Cal de Ovo Hidratada

Propriedades físicas	Valores	Normativa
Massa específica dos grãos - $\text{g}/\text{cm}^3$	2,24	NBR 16605/2017
Limite de liquidez (LL) - %	Não plástico	NBR 6459/2017
Limite de plasticidade (LP) - %	Não plástico	NBR 7180/2016
Índice de plasticidade (IP) - %	Não plástico	NBR 7180/2016
Área de superfície específica BET - $\text{m}^2/\text{g}$	4,185	-
Diâmetro a 10% - $\mu\text{m}$	2,53	-
Diâmetro a 50% - $\mu\text{m}$	7,43	-
Diâmetro a 90% - $\mu\text{m}$	23,37	-
Diâmetro médio - $\mu\text{m}$	10,27	-

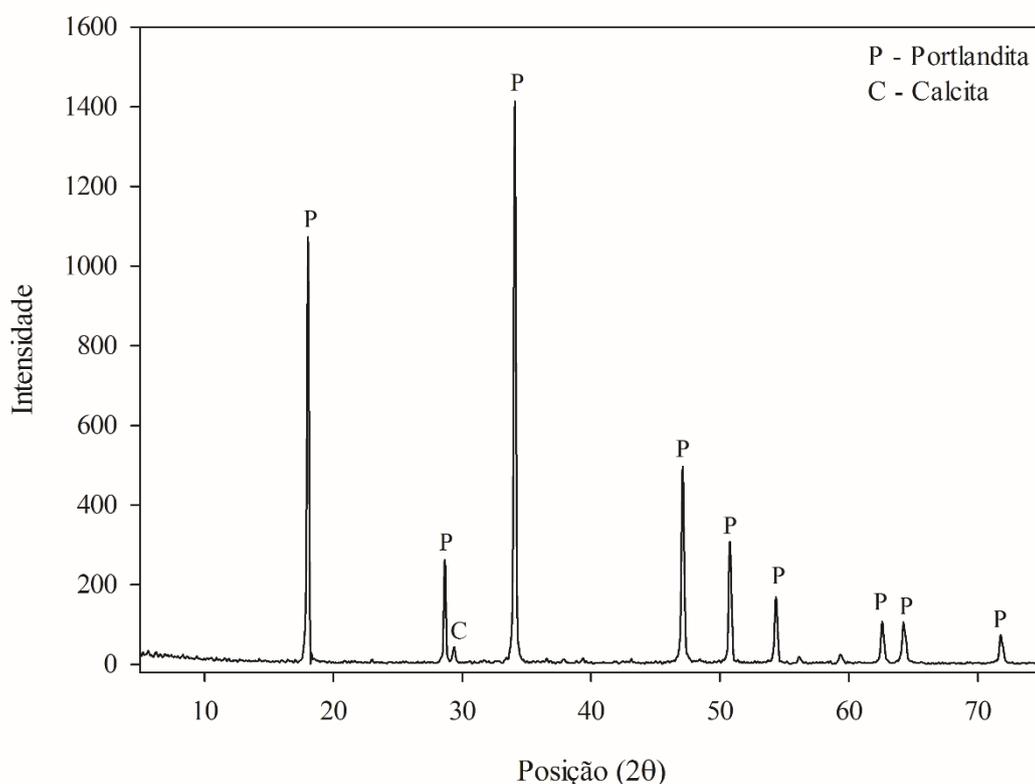
**Figura 32:** Curva granulométrica da COH

Conforme análise por FRX (Tabela 16) a COH é majoritariamente composta por óxido de cálcio (72,90%). Já o difratograma da cal (Figura 33) evidencia a presença de portlandita [Ca(OH)<sub>2</sub>], calcita (CaCO<sub>3</sub>) e peróxido de magnésio (MgO<sub>2</sub>).

**Tabela 16:** Composição química da COH

Óxidos	CBCA
CaO	72,90%
SiO <sub>2</sub>	0,31 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,36 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,13 %
MgO	1,17 %
Perda ao fogo	25,14 %

**Fonte:** Consoli *et al.*, 2020.

**Figura 33:** Difratoograma da COH

**Fonte:** Consoli *et al.*, 2020. Modificado.

### 3.3.1.6. Pasta álcali-ativada

A composição química da pasta álcali-ativada foi obtida por FRX em um equipamento PANalytical Epsilon 3X do Laboratório de Materias da UFOP. Já a DRX realizada no Laboratório de Materias da UFOP permitiu analisar as fases cristalinas da pasta pelo método em pó em um difratômetro da marca Brucker D2 Phaser 2nd generation equipado com tubo de ânodo fixo de cobre ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) e operando a 20 kV e 10 mA (intervalo angular de 10-70°  $2\theta$  em passo de 0,02°/s).

A microestrutura da pasta e sua composição química foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios-x por dispersão em energia (EDS), respectivamente. A MEV explora a superfície da amostra, ponto a ponto, utilizando um feixe de elétrons que colidem com os átomos do material. Essas colisões geram sinais detectáveis pelo microscópio para formar a imagem. Realizada em conjunto a uma MEV, uma EDS permite análises químicas da amostra, detectando elementos em espécimes polidos a condições de alto vácuo (SCRIVENER, K. *et al.*, 2016). Neste estudo, a MEV foi realizada no Laboratório

Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução da UFG e no Laboratório de Materias da UFOP (análise com EDS integrada) em amostras revestidas de ouro, a partir de um feixe de elétrons de 20 kV retroespalhados (BSE) com magnificação de 1500x e secundários (SE) com magnificação de 500x (equipamentos Quorum Q150 e JSM-6610).

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) analisou ligações químicas da pasta. Esta técnica consiste na emissão de radiação infravermelha na amostra, sendo parte da radiação absorvida e e outra parte transmitida. O sinal no detector é um espectro que fornece informações estruturais da amostra (ligações químicas) (THERMOFISHER SCIENTIFIC, 2022). A análise foi conduzida no Laboratório de Materias da UFOP por meio de um espectrômetro Thermo Scientific Nicolet iS5 para comprimentos de onda entre 400–4000  $\text{cm}^{-1}$  a uma resolução de 1  $\text{cm}^{-1}$ . Pastilhas para realização da FTIR foram preparadas misturando-se parte da amostra a 1% de brometo de potássio seco e moído.

De maneira a parar as reações químicas previamente à realização de análises de FRX, DRX, MEV-EDS e FTIR, amostras de até 2 mm de espessura retiradas dos espécimes já ensaiados foram submersas em acetona por 3 dias e subsequentemente secas em estufa a 40°C por 3 dias.

#### 3.3.1.7. Solo-ligante álcali-ativado

A composição mineralógica de amostras de solo com o ligante álcali-ativado foi obtida por DRX realizada na Central Analítica do Departamento de Engenharia Química da UFSM utilizando o método em pó em um difratômetro da marca Brucker D2 Phaser 2nd generation equipado com tubo de ânodo fixo de cobre ( $\lambda = 1.541862 \text{ \AA}$ ) e operando a 30 kV e 10 mA (intervalo angular de 5-99,98° 2 $\theta$  em passo de 0,06°/s). Análises de MEV-EDS realizadas no *Research Resources Center - Electron Microscopy Core* da *University of Illinois at Chicago* avaliaram a microestrutura e a composição química das amostras, respectivamente. A MEV foi realizada em amostras revestidas por pulverização de Pt/Pd no equipamento JEOL JSM-IT500HR, a partir de um feixe de elétrons de 20 kV retroespalhados (BSE) com magnificação de 500x. A EDS foi realizada usando um Oxford instruments equipado com um detector Ultim Max e *software* Aztec. De maneira a parar as reações químicas previamente à realização da DRX e do MEV-EDS, amostras de até 2 mm de espessura retiradas dos espécimes já ensaiados foram submersas em acetona por 3 dias e subsequentemente secas em estufa a 40°C por 3 dias.

### 3.3.2. Métodos

#### 3.3.2.1. *Moldagem e cura dos corpos de prova: pastas álcali-ativadas*

A moldagem das pastas álcali-ativadas iniciou-se com a pesagem individual da cinza do bagaço de cana-de-açúcar e da cal de ovo hidratada em uma balança de precisão 0,01 g. Previamente a realização da mistura os materiais foram individualmente acondicionados em sacos plásticos para que continuassem secos e não reagissem entre si. A solução de hidróxido de sódio foi preparada solubilizando-se as micropérolas de NaOH em água destilada até ser atingida a concentração necessária (0,5; 1; 2 e 3 Mol/L, o que corresponde, respectivamente, a 20,41; 40,81; 81,63; 122,44 g/L). A quantidade de hidróxido adicionada variou conforme a relação A/L pré-estabelecida e a molaridade estudada. A quantidade de CBCA e COH foi calculada a partir da massa comportada pelo molde (120 g) menos a massa de solução. Pesados os materiais, a cinza e a cal eram homogeneizadas e o hidróxido acrescido e misturado até ser obtida uma consistência uniforme. Finalizada a mistura o material era manualmente compactado, em três camadas, em um molde de PVC (37 mm de diâmetro e 74 mm de altura). Estas dimensões foram definidas para manter uma relação 2/1 entre altura e diâmetro, visto que o maior diâmetro comercial de cano disponível era de 37 mm. O molde de PVC permitiu a cura simultânea de múltiplos corpos de prova, já que a pasta não possuía resistência mínima suficiente para ser desmoldada após o processo de moldagem.

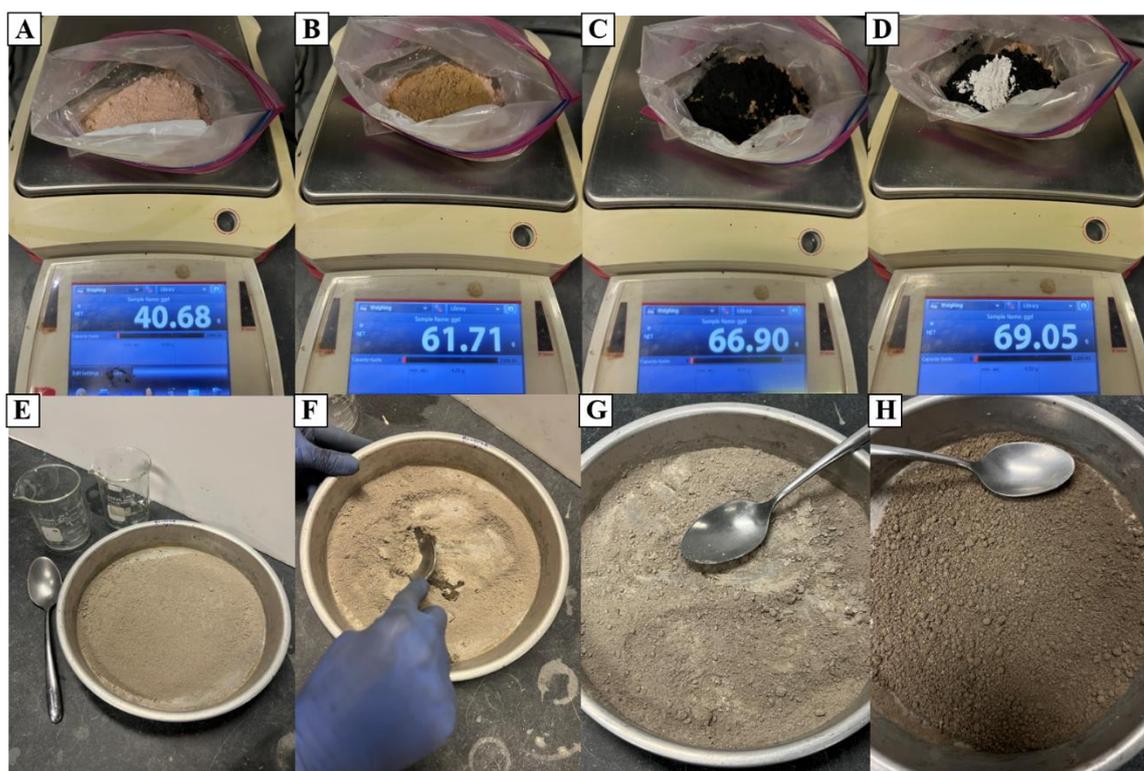
Subsequente a moldagem, o corpo de prova foi acondicionado em um saco plástico e levado à câmara úmida para cura a temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ . Passado o tempo de cura (7 dias), as amostras eram extrudadas dos canos de PVC e suas dimensões verificadas com auxílio de um paquímetro. Como critério de aceitação os corpos de prova deveriam atender aos seguintes requisitos: diâmetro  $\pm 0,5$  mm do valor alvo; e altura  $\pm 1,0$  mm do valor alvo.

#### 3.3.2.2. *Moldagem e cura dos corpos de prova: resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, durabilidade e sucção matricial*

O procedimento de moldagem iniciava-se a partir da pesagem individual dos materiais em uma balança com dois dígitos de precisão (0,01 g) (Figura 34a,b,c e d). Para ser mantida a condição seca dos materiais, a cinza, o solo e a cal eram acondicionados juntos em um saco plástico (Figura 34d). Sacudia-se o saco plástico para homogeneização do material seco (Figura 34e). Os mesmos procedimentos eram realizados para misturas com cimento Portland CP V-ARI. Em seguida, água destilada era acrescida (Figura 34f) e, após alcançada uma homogeneidade inicial, para amostras álcali-ativadas adicionava-se a solução de hidróxido de sódio (Figura 34g)

prossequindo a mistura até que uma consistência uniforme fosse alcançada (Figura 34h). Nota-se que para amostras álcali-ativadas a quantidade de NaOH adicionada foi definida a partir do teor de álcalis (2,61% para todas as misturas, conforme item 3.3.2) e a quantidade de água destilada era complementar a solução, visando alcançar o teor de umidade pré-estabelecido.

**Figura 34:** Moldagem e cura dos corpos de prova



Finalizada a mistura úmida três cápsulas eram preenchidas para aferição da umidade e o restante do material era dividido em três frações iguais, correspondentes ao número de camadas a serem compactadas. A moldagem era então realizada em moldes metálicos untados com desmoldante, em três camadas compactadas estaticamente cujo topo era escarificado para garantir aderência. Após a extrusão do corpo de prova as dimensões, altura e diâmetro, eram verificadas com auxílio de um paquímetro e a amostra era pesada com precisão de 0,01g. Subsequentente, o corpo de prova era acondicionado em um saco plástico e levado a câmara úmida para cura a temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  ou acondicionado em um tanque aquecido para cura a  $40\pm 2^{\circ}\text{C}$  (Figura 35). Como critério de aceitação os corpos de prova deveriam atender aos seguintes requisitos: peso específico  $\pm 1\%$  do valor alvo; umidade  $\pm 0,5\%$  do valor alvo; diâmetro  $\pm 0,5$  mm do valor alvo; e altura  $\pm 1,0$  mm do valor alvo.

**Figura 35:** Tanque para cura térmica a  $40 \pm 2^\circ\text{C}$  (destaque para a aferição de temperatura)



Para os ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo cisalhante inicial e sucção matricial utilizou-se um molde metálico com 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, já para os ensaios de durabilidade o molde utilizado possuía 12 cm de altura e 10 cm de diâmetro.

### 3.3.2.3. *Moldagem e cura dos corpos de prova: expansão livre*

A moldagem de corpos de prova para os ensaios de expansão livre de amostras solo-ligante seguiu os procedimentos iniciais descritos no item anterior. Entretanto, após a mistura úmida as amostras eram estaticamente compactadas em uma única camada, em um anel metálico de 71,33 mm de diâmetro e 25 mm de altura. Após a moldagem, o anel com a mistura era pesado com precisão de 0,01g. Subsequente, o corpo de prova era acondicionado em um saco plástico e levado a câmara úmida para cura a temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ . Para ser testado o corpo

de prova deveria atender aos seguintes critérios: peso específico  $\pm 1\%$  do valor alvo; umidade  $\pm 0,5\%$  do valor alvo.

#### 3.3.2.4. Resistência à compressão simples (RCS)

Os ensaios de resistência à compressão simples ( $q_u$ ) foram realizados conforme a norma ASTM D2166 (ASTM, 2016) em uma prensa automática com deslocamento controlado. Uma taxa de deslocamento constante (1,14 mm/min) foi utilizada para medir a performance mecânica de corpos de prova submersos em água por 24h; esta imersão, um dia antes do tempo de cura pré-estabelecido, visa saturar as amostras e minimizar os efeitos de sucção. As amostras cilíndricas eram deslocadas contra a base de uma célula de carga com capacidade de 10 kN (amostras sem cura térmica) e 20 kN (amostras com cura térmica). Por meio da equação de calibração da célula de carga o valor da reação do corpo de prova contra a célula, auferido em um sistema de aquisição, era convertido em carga. A resistência à compressão simples era então determinada pela Equação 22:

$$q_u = \frac{Q}{\left(\frac{\pi D_m^2}{4}\right)} \quad \text{Eq. 22}$$

Onde Q é o carregamento aplicado à amostra (kN), obtido pela calibração da célula de carga; e  $D_m$  é o diâmetro médio (m) do espécime obtido por meio de medições de base, topo e centro.

Para ser aprovado no critério de aceitação, a resistência à compressão simples de cada espécime da repetição (i.e., corpos de prova moldados nos mesmos níveis de fatores controláveis) não podia desviar mais de 10% da resistência média.

#### 3.3.2.5. Módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ) ou ensaio de pulso ultrassônico

Os ensaios de pulso ultrassônico foram realizados com uso do instrumento PundiLab(+). A estimativa do módulo cisalhante a pequeníssimas deformações ocorreu por meio da medição dos tempos de propagação de ondas de compressão e de cisalhamento nos corpos de prova cilíndricos. A primeira onda, de compressão, foi induzida pela vibração de transdutores a uma frequência de 54 kHz, já a onda de cisalhamento foi obtida por meio da vibração de transdutores a 250 kHz; ressalta-se que em meios considerados não dispersivos o tempo de propagação da onda cisalhante independe da frequência empregada. O ensaio iniciou-se após o término do período de cura e imersão dos corpos de prova. Primeiramente, leu-se o tempo de deslocamento

da onda de compressão através do corpo de prova ( $t_p$ ) e, em seguida, o tempo de deslocamento da onda cisalhante ( $t_s$ ). Para a realização de cada leitura a interface entre o corpo de prova e o transdutor foi preenchida com um gel específico, que auxilia a transmissão e leitura do sinal. As velocidades de compressão e cisalhamento ( $V_p$  e  $V_s$ , respectivamente) foram determinadas a partir da relação entre a altura média de cada corpo de prova e o tempo aferido. A média de três leituras consecutivas no equipamento correspondeu ao tempo  $t_p$ , enquanto a leitura do  $t_s$  foi realizada na interface computacional do PundiLab (+). A Equação 23 descreve o cálculo do módulo cisalhante inicial.

$$G_0 = \rho \times V_s^2 \quad \text{Eq. 23}$$

Onde  $\rho$  é a massa específica do material ( $\text{g/cm}^3$ ); e  $V_s$  é a velocidade da onda cisalhante (m/s).

#### 3.3.2.6. Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral seguiram a norma NBR 7222 (ABNT, 2011), consistindo nos mesmos procedimentos de rompimento da RCS (item 3.4.2.5). A RCTD diferencia-se somente no posicionamento do corpo de prova na prensa. Este deve ser de forma que o plano axial do corpo de prova, definido por geratrizes diametralmente opostas, coincida com o eixo de aplicação de carga. A partir da força máxima obtida no ensaio, a resistência à tração por compressão diametral é determinada pela Equação 24:

$$q_u = \frac{2Q}{\pi L_m D_m} \quad \text{Eq. 24}$$

Onde  $Q$  é o carregamento aplicado à amostra (kN), obtido pela calibração da célula de carga;  $D_m$  é o diâmetro médio (m) do espécime obtido por meio de medições de base, topo e centro; e  $L_m$  é o comprimento médio (m) do corpo de prova.

Para ser aprovado no critério de aceitação, a resistência à tração por compressão diametral de cada espécime da repetição (i.e., corpos de prova moldados nos mesmos níveis de fatores controláveis) não podia desviar mais de 20% da resistência média.

#### 3.3.2.7. Durabilidade por molhagem-secagem e escovação

Os ensaios de durabilidade a ciclos de molhagem-secagem e escovação foram realizados conforme a norma ASTM D559 (ASTM, 2015). Cada ciclo compreendeu as seguintes etapas: (i) 5 h de imersão em água; (ii) 42 h de secagem em estufa a temperatura de  $71 \pm 3^\circ\text{C}$ ; (iii)

escovação com escova metálica padronizada e posterior pesagem para avaliação da perda de massa. A perda de massa foi aferida em cada um dos 12 ciclos, com 48 h de duração cada. Para que fosse possível essa avaliação a pesagem ocorreu após os corpos de prova saírem da estufa e após as escovações. Foram realizadas 18 a 20 escovações ao longo da circunferência do corpo de prova e 4 escovações no topo e na base, todas com uma força de 13,3 N. Esta força foi medida e mantida constante realizando-se a escovação em cima de uma balança.

### 3.3.2.8. Ensaio de expansão livre ( $\epsilon_s$ )

Os ensaios de expansão livre unidimensional foram realizados conforme o Método A (amostras remoldadas) da norma ASTM D4546 (ASTM, 2014a). Cada espécime era alocado em uma célula odométrica modificada (Figura 36), com pedras porosas saturadas e papel filtro na base e no topo, e pré-adensado por um top cap com peso de 1 kPa. Em seguida, as células eram preenchidas com água destilada (temperatura de 23°C). A expansão vertical dos espécimes inundados era medida em intervalos de tempo de 30 s, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 24 h e 48 h (quando não era mais observada variação na expansão) por meio de um dispositivo LVDT acoplado a um sistema de aquisição de dados. Estes intervalos de tempo estão em acordo com a norma supracitada. A taxa de expansão ou deformação vertical ao longo do tempo é medida pela Equação 25.

$$\epsilon_s = \frac{\Delta H}{H_{inicial}} \times 100 \quad \text{Eq. 25}$$

Onde  $\Delta H$  é a variação da altura da amostra após inundação (mm); e  $H_{inicial}$  é a altura da amostra no momento da inundação (igual a altura do anel, 25 mm).

**Figura 36:** Célula odométrica modificada

### 3.3.2.9. *Sucção matricial*

Solos finos coesivos na condição não saturada estão sujeitos a uma sucção matricial, oriunda dos efeitos de capilaridade do solo. Devido aos efeitos dessa poropressão negativa na aferição de resistências (e.g. resistência à compressão simples, resistência ao cisalhamento) a sucção foi medida neste trabalho. O método utilizado foi o do papel filtro, simples de ser realizado em laboratório. Este método envolve a colocação de um papel filtro (marca Whatman nº 42) em contato com a amostra de solo, de forma que o papel se umidifique e entre em equilíbrio com a magnitude de sucção do solo. Posteriormente, a aferição do teor de umidade do papel permite a obtenção da matriz de sucção (pressões capilares) por meio de correlações estabelecidas entre a umidade do papel filtro e a sucção (CHANDLER; GUTIERREZ, 1986). Estas correlações, identificadas nas Equações 26 e 27, foram obtidas por meio de calibrações entre o papel Whatman nº 42 e solos de sucção conhecida (CHANDLER; CRILLY; SMITH, 1992).

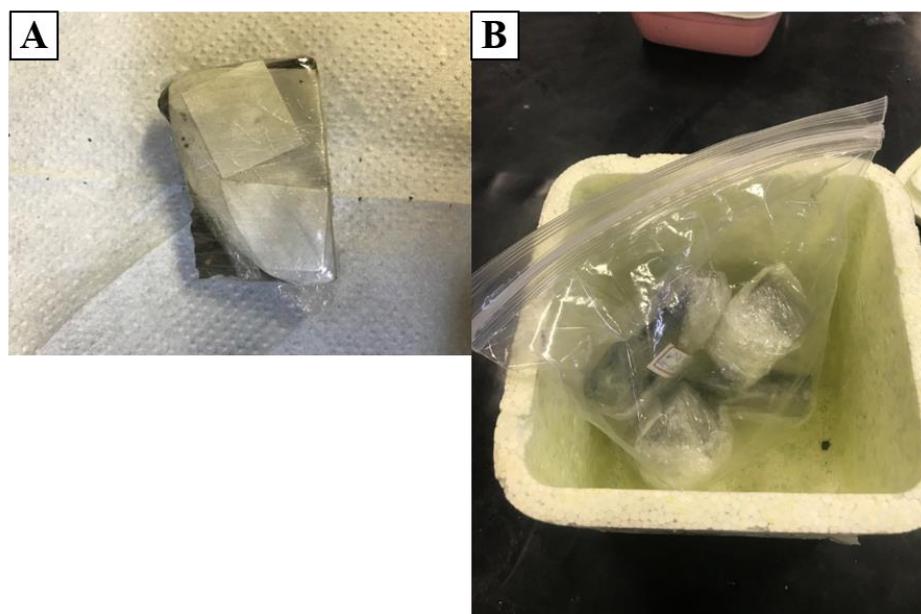
$$\text{Para teor de umidade } (w) \leq 47\% \rightarrow \text{Sucção (kPa)} = 10^{4,84-0,0622w} \quad \text{Eq. 26}$$

$$\text{Para teor de umidade } (w) > 47\% \rightarrow \text{Sucção (kPa)} = 10^{6,05-2,48\log w} \quad \text{Eq. 27}$$

A aferição da sucção matricial foi realizada conforme a norma ASTM D5298 (ASTM, 2016). Após a realização do ensaio de resistência à compressão simples a obtenção da sucção iniciava-se com a alocação de dois pedaços retangulares de papel filtro, com área aproximada de  $2 \text{ cm}^2$ , na parte de cima de uma amostra de solo com dimensão aproximada de 2,5 cm de altura e 5 cm de diâmetro. Por precaução, um pedaço maior de papel filtro foi alocado sob os dois menores e em contato direto com o solo para que não houvesse material fino aderido aos papéis menores. O papel filtro foi utilizado na condição seca ao ar, e seu manuseio foi realizado por meio de uma pinça metálica para evitar alterações físicas no papel. Feita a alocação dos papéis na amostra de solo o conjunto era revestido em plástico filme de PVC (Figura 37a) e embalado em um saco plástico hermeticamente fechado para garantir que a umidade não evaporasse. O saco plástico contendo os espécimes (solo + papel filtro + plástico filme) devidamente identificados era então armazenado em uma caixa de isopor por no mínimo 7 dias para que o teor de umidade do papel filtro alcançasse um valor de equilíbrio (Figura 37b).

Após o tempo mínimo necessário cada pedaço de papel filtro era alocado em um recipiente metálico com tampa, cuja tara já fora medida, e pesado a seguir em uma balança com precisão de 0,0001 g. Obtido o peso úmido do conjunto (papel filtro + recipiente metálico), os recipientes eram levados a uma estufa de  $60^\circ\text{C}$  por 48 h e posteriormente pesados para determinação do peso seco do conjunto. Através do peso seco e úmido do conjunto e da tara do recipiente o teor de umidade de cada papel foi calculado. Determinado o teor de umidade, as Equações 26 e 27 eram aplicadas e a sucção matricial aferida.

**Figura 37:** Espécime preparado para medições de sucção matricial



### 3.3.2.10. Medição do pH de misturas CBCA-COH-água destilada e CBCA-COH-NaOH

A medição do pH de misturas (i) CBCA-COH-água destilada e (ii) CBCA-COH-NaOH foi realizada conforme a norma ASTM D6739 (ASTM, 2020e). Primeiramente, 5g da mistura CBCA-COH foram adicionadas a um béquer, preenchido em sequência por 100ml de água destilada (caso i) ou 100ml de solução de hidróxido de sódio 1 mol/L (caso ii). A seguir, o conteúdo do béquer foi misturado por 5 min. Um pHmetro, previamente calibrado em três soluções tampão (pH 4, 7 e 10), foi inserido na mistura e anotou-se o pH medido pelo aparelho.

## 3.4. METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

### 3.4.1. Avaliação ambiental do ciclo de vida (ACV)

A avaliação ambiental de amostras solo-ligante álcali-ativado e solo-cimento Portland foi baseada na avaliação de ciclo de vida conforme as normas ISO 14.040/14.044 (ISO, 2006a, 2006b; REDDY; CAMESELLE; ADAMS, 2019). Esta avaliação foi dividida em quatro fases principais: (i) objetivo e escopo; (ii) análise de inventário; (iii) avaliação de impacto e (iv) interpretação. Os impactos ambientais foram avaliados por meio do *software* SimaPro versão 9.0.0.47 (PRÉ CONSULTANTS, 2020).

As Equações 32 e 36 foram utilizadas no cálculo do índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  correspondente a uma RCS de 2,1 MPa (7 dias de cura e 23°C) para amostras do ligante álcali-ativado e de cimento Portland, respectivamente. Esta resistência é o valor mínimo requisitado de misturas solo-cimento curadas por 7 dias que constituirão uma base de pavimento de acordo com o DNIT (2006). Este valor de resistência corresponde a um uso específico do solo estabilizado (base de pavimento), entretanto, serve de referência para este trabalho. Ressalta-se que uma ACV não realiza análise de risco, e, por exemplo, a 28 dias de cura a mistura solo-cimento Portland apresenta RCS e durabilidade mais altas do que o ligante álcali-ativado. Assim, a cura a 7 dias e o cálculo relativo de dosagem corresponde a um cenário menos favorável ao cimento Portland.

Para uma resistência equivalente a 2,1 MPa, o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  corresponde a 26,51 para o ligante álcali-ativado (Equação 38) e 29,89 para o cimento Portland (Equação 42). Ambos valores do índice resultam em perda de massa acumulada (PMA) inferior a 6%, em acordo com o limite máximo de PMA estabelecido pela USACE (2020) para ensaios de durabilidade. Baseado

nestes valores de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  duas dosagens foram definidas para representar condições de alta densidade/baixo teor de ligante – ADBL, e baixa densidade/alto teor de ligante – BDAL, compreendendo valores detalhados no item 3.3.1 conforme Tabela 17, i.e., densidade entre 11 kN/m<sup>3</sup> e 13kN/m<sup>3</sup> e teor de ligante entre 20% e 30%. O teor de ligante definiu os parâmetros das dosagens (peso específico aparente seco, porosidade, teor volumétrico de ligante -  $B_{iv}$ ).

**Tabela 17:** Dosagens para a ACV dos ligantes estudados

Ligante	Dosagem	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\eta$ (%)	B (%)	$B_{iv}$ (%)	$\eta/B_{iv}^{0,28}$	RCS (MPa)
Álcali-ativado	AA-ADBL	12,00	52,41	20	11,40	26,51	2,1
	AA-BDAL	11,00	55,52	27	14,01		
Cimento Portland	CP-ADBL	12,60	53,59	20	8,05	29,89	
	CP-BDAL	11,50	58,40	30	10,94		

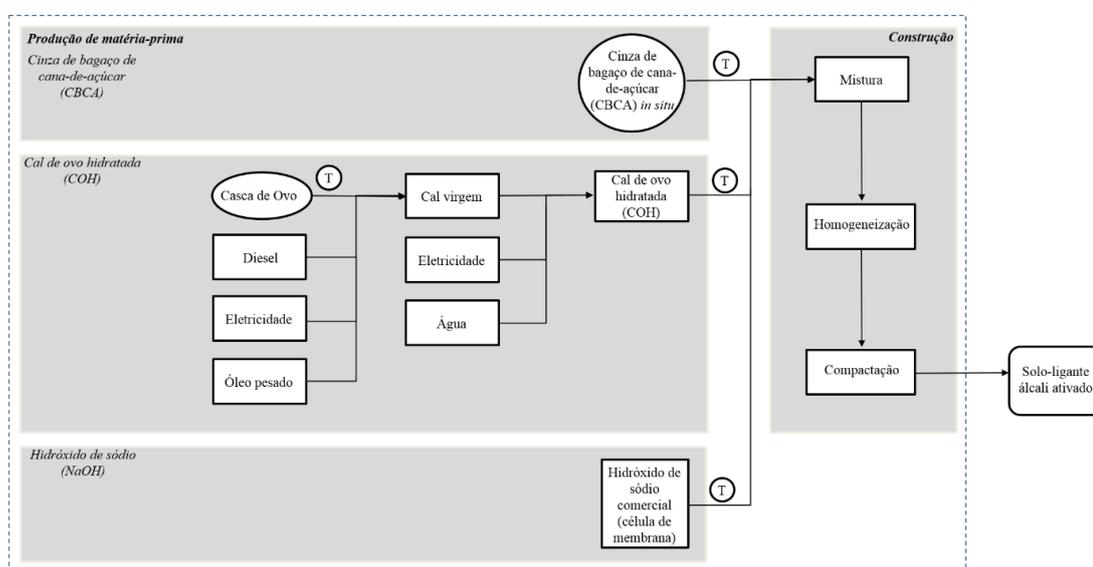
#### 3.4.1.1. Objetivo e escopo

O objetivo da ACV foi comparar os impactos ambientais de duas estratégias de dosagem para duas alternativas de estabilização de solo (Tabela 17 e Tabela 18) para a unidade funcional de 1m<sup>3</sup> de solo estabilizado. O público alvo inclui pesquisadores, tomadores de decisão, a indústria do cimento e empresas que atuam na construção civil e seus respectivos funcionários. Este estudo justifica-se pela falta de pesquisas compreendendo ACV comparativas entre diferentes tipos de ligante utilizados na estabilização de solos.

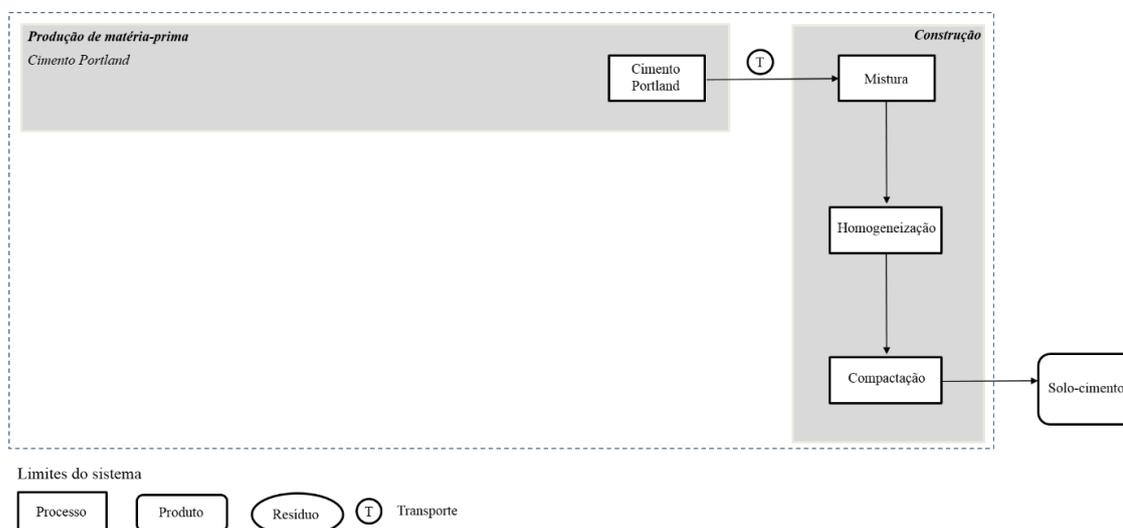
O estudo de ACV compreendeu uma análise do berço ao portão (*cradle-to-gate*), excluindo-se as fases de uso, manutenção e disposição final (Figura 38). Para a mistura solo-ligante álcali-ativado os processos considerados foram: *transporte da CBCA, produção da COH e seu transporte, produção do hidróxido de sódio e seu transporte*. Já para a mistura solo-cimento Portland considerou-se a *produção e transporte de cimento Portland*. Os limites do sistema de ambos ligantes considerou a *produção de diesel* (consumido nos maquinários responsáveis pelo transporte de materiais, e pela mistura, homogeneização e compactação das misturas solo-ligante), e *consumo de água local*. No caso da estabilização com o ligante álcali-ativado considerou-se o *consumo de diesel por uma betoneira* utilizada no preparo da solução de hidróxido de sódio em campo (concentração 1 mol/L) visto que o NaOH foi recebido no estado sólido. A CBCA e a COH são resíduos e por isso não possuem impacto ambiental associado à sua cadeia produtiva.

**Tabela 18:** Quantitativo de materiais para 1m<sup>3</sup> de solo estabilizado

Material	Dosagens			
	AA-ADBL	AA-BDAL	CP-ADBL	CP-BDAL
Solo (kg/m <sup>3</sup> )	949,47	799,26	1006,56	804,21
COH (kg/m <sup>3</sup> )	48,11	59,12		
CBCA (kg/m <sup>3</sup> )	192,42	236,49		
NaOH (kg/m <sup>3</sup> )	8,10 (= 0,04 kg de NaOH/L de solução)	9,96 (= 0,04 kg de NaOH/L de solução)		
Cimento Portland (kg/m <sup>3</sup> )			253,44	344,66
Água (kg/m <sup>3</sup> )	308,51 (198,5 kg para preparo da solução)	285,08 (243,96 kg para preparo da solução)	328,56	302,32

**Figura 38:** Limites do sistema da ACV de misturas (a) solo-ligante álcali-ativado e (b) solo-cimento Portland

(a)



(b)

### 3.4.1.2. Análise de inventário

Dados secundários de inventário foram extraídos do banco de dados do *Ecoinvent* v.3.4 (The ecoinvent centre, 2017) disponível no SimaPro. A *produção de COH* compreendeu o (i) processamento da cal virgem (extinção, moagem e abatimento de poeira); (ii) uso de água para hidratação da cal; (iii) eletricidade consumida pelo maquinário e pelos serviços administrativos; e (iv) infraestrutura utilizada. Ainda, a *produção da cal de ovo virgem* incluiu a (i) calcinação das cascas de ovo; (ii) eletricidade consumida pelo maquinário utilizado e pelos serviços administrativos; (iii) óleo utilizado nos processos de calcinação e (iv) infraestrutura utilizada. A *produção de hidróxido de sódio* comercial (célula de membrana) incluiu o (i) processo de eletrólise em uma célula de membrana; e (ii) produção, purificação e restauração da solução salina. A *produção de cimento Portland* envolveu a (i) produção de clínquer; (ii) extração de gesso; (iii) extração e beneficiamento do calcário; (iv) eletricidade consumida pelo maquinário (considerando-se a produção brasileira de energia elétrica, i.e., energia hidrelétrica); e (v) infraestrutura utilizada. Impactos relacionados ao transporte de materiais e a mistura, homogeneização e compactação do solo-ligante foram contabilizados por meio do consumo de diesel pelo maquinário.

Os quantitativos de materiais para  $1\text{m}^3$  de solo estabilizado (Tabela 18) foram inseridos no SimaPro para estimar os impactos ambientais advindos da produção destes materiais (i.e., extração de matéria-prima, beneficiamento e uso). A Tabela 19 mostra o consumo de diesel para o transporte destes materiais. Para o transporte, considerou-se um caminhão com potência de 360 HP, eficiência de 18L/h e capacidade de  $14\text{ m}^3$  (30 toneladas) (DA ROCHA *et al.*, 2022). Três distâncias de transporte (km) foram consideradas: (i) 30 km para cada trecho do transporte de COH, hidróxido de sódio, e cimento Portland, visto que estes materiais estão disponíveis em Porto Alegre; (ii) 80 km para cada trecho do transporte de cascas de ovo devido a distância dos fornecedores; e (iii) 550 km para cada trecho do transporte da cinza baseado na distância entre Porto Alegre e o local onde se encontra o fornecedor (Porto Xavier, RS). Considerou-se uma velocidade média de 55 km/h para o transporte de materiais em Porto Alegre e região metropolitana (COH, NaOH e cimento Portland) e 65 km/h para o transporte da CBCA. O tempo de carga/descarga dos materiais foi estimado em 20 min.

Uma sequência de cálculos foi realizada para se obter o consumo de diesel para o transporte de materiais (Tabela 19), inserido no SimaPro para cálculo dos impactos ambientais. Primeiramente, o tempo de deslocamento (horas) foi calculado adicionando-se o tempo de carga

e descarga (0,33h em cada trecho) à distância percorrida em ambos trechos dividida pela velocidade média do caminhão. Após isto, a capacidade real de carga (toneladas) foi calculada multiplicando-se a densidade natural ( $\text{kg/m}^3$ ) pela capacidade do caminhão ( $14 \text{ m}^3$ ). O tempo de deslocamento (horas) dividido pela capacidade real de carga (toneladas) resultou em horas/tonelada, que multiplicada pela eficiência do caminhão (18L/h) resultou em litros/tonelada. Este último multiplicado pelo quantitativo do material (Tabela 18) resultou no consumo total de diesel (litros) para o transporte do material (Tabela 19).

Cálculos similares foram realizados para o consumo de diesel na mistura, homogeneização e compactação da mistura solo-ligante (Tabela 20). Primeiramente, a taxa de consumo de diesel pelos equipamentos foi definida. O consumo de diesel por hora para motoniveladora, rolo compactador pé de carneiro e rolo compactador liso foi retirado do fabricante *Caterpillar performance handbook* (CATERPILLAR, 2018). Um baixo consumo de diesel foi considerado para o cimento Portland e um consumo médio de diesel para o ligante álcali-ativado. O último utiliza dois materiais (COH e CBCA), abrangendo condições de campo de médio impacto. O trator de grade de disco rebocável e o caminhão pipa não possuíam especificação técnica no catálogo da Caterpillar, de forma que o consumo de diesel foi 15% da potência do maquinário (DA ROCHA *et al.*, 2016). O consumo de combustível da betoneira baseou-se nas Tabelas de composições de preços para orçamentos (TCPO) (PINI, 2010). Após isto, o consumo de diesel (L) multiplicado pelo tempo (horas) gasto pelo equipamento no processamento de  $1 \text{ m}^3$  de material (H) (SINAPI, 2021) resultou no consumo de diesel (litros) por  $\text{m}^3$  da mistura (L x H). Sendo a unidade funcional  $1 \text{ m}^3$  o consumo total de diesel (litros) foi equivalente à coluna L x H.

A Tabela 21 resume os quantitativos utilizados no SimaPro na análise de inventário de  $1 \text{ m}^3$  de solo estabilizado com uso do ligante álcali-ativado e de cimento Portland. Os seguintes processos estão detalhados: (i) para o ligante álcali-ativado: consumo de diesel para o transporte dos materiais e pelo maquinário utilizado na estabilização do solo, consumo de água, consumo de hidróxido de sódio e de COH; e (ii) para o cimento Portland: consumo de diesel para o transporte dos materiais e pelo maquinário utilizado na estabilização do solo, consumo de água e de cimento Portland. A produção de hidróxido de sódio considerou o processo de eletrólise em uma célula de membrana por esta tecnologia de manufatura ser utilizada nas regiões sul e sudeste do Brasil (ABLICOR, 2014).

### 3.4.1.3. Avaliação de impacto e análise de sensibilidade

A metodologia CML-IA (CML, 2016) foi utilizada para a avaliação de impacto como recomendado em *Product Category Rules for Type III Environmental Product Declaration of Construction Products to EN 15804:2012* (BRE, 2013). Esta avaliação considerou o modelo *allocation at the point of substitution* (GOEDKOOOP *et al.*, 2016b) e as seguintes categorias de impacto: (i) acidificação (kg SO<sub>2</sub>-eq), (ii) eutrofização (kg PO<sub>4</sub>-eq), (iii) depleção de recursos abióticos (kg Sb-eq), (iv) aquecimento global (kg CO<sub>2</sub>-eq), (v) depleção da camada de ozônio (kg CFC-11-eq), (vi) toxicidade humana (kg 1.4-DB eq), (vii) ecotoxicidade aquática em água doce (kg 1.4-DB eq), (viii) ecotoxicidade aquática marinha (kg 1.4-DB eq), (ix) ecotoxicidade terrestre (kg 1.4-DB eq), e (x) oxidação fotoquímica (kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq). Uma análise de sensibilidade foi realizada para avaliar os efeitos de dois parâmetros nos impactos ambientais das dosagens examinadas. A metodologia de avaliação de impacto americana TRACI (EPA, 2013) foi utilizada para comparar os resultados com a metodologia CML-IA e a influência de diferentes distâncias de transporte da CBCA (450, 350, 250, 150 e 50 km) também foi avaliada.

**Tabela 19:** Consumo de diesel para o transporte de materiais

Materiais	Distância (km)	Tempo de deslocamento - hora (D)	Densidade natural (kg/m <sup>3</sup> )	Capacidade real de carga - ton (R)	Horas/ton (D/R)	Litros/ton	Dosagem AA-ADBL		Dosagem AA-BDAL		Dosagem CP-ADBL		Dosagem CP-BDAL	
							Ton	Total (Litros)						
COH	30,00	1,76	450,50	6,31	0,28	5,02	0,05	0,24	0,06	0,30				
CBCA	550,00	17,59	298,00	4,17	4,22	75,89	0,19	14,60	0,24	17,95				
NaOH	30,00	1,76	964,00	13,50	0,13	2,34	0,01	0,02	0,01	0,02				
Casca ovo	80,00	3,58	1231,50	17,24	0,21	3,73	0,10	0,36	0,12	0,44				
Cimento Portland	30,00	1,76	1025,00	14,35	0,12	2,20					0,25	0,56	0,34	0,76

**Tabela 20:** Consumo de diesel pelo maquinário utilizado na mistura, homogeneização e compactação e por operações para o preparo de misturas solo-ligante

Equipamento <sup>a</sup>	Potência (HP)	Ligante álcali-ativado (AA-ADBL e BDAL)				Cimento Portland (CP-ADBL e BDAL)			
		Litros/h (L)	Horas/m <sup>3</sup> (H) <sup>a</sup>	Litros/m <sup>3</sup> (L x H)	Total (Litros)	Litros/h (L)	Horas/m <sup>3</sup> (H) <sup>a</sup>	Litros/m <sup>3</sup> (LxH)	Total (Litros)
Motoniveladora	125	11,9 <sup>b</sup>	0,008	0,095	0,095	8,05 <sup>b</sup>	0,008	0,064	0,064
Trator com grade de disco rebocável	85	12,75	0,008	0,102	0,102	12,75	0,008	0,102	0,102
Caminhão pipa	230	34,5	0,004	0,138	0,138	34,5	0,004	0,138	0,138
Rolo compactador pé de carneiro	74	7,6 <sup>b</sup>	0,015	0,114	0,114	5,5 <sup>b</sup>	0,015	0,083	0,083
Rolo compactador liso	100,6	9,1 <sup>b</sup>	0,004	0,036	0,036	6,65 <sup>b</sup>	0,004	0,027	0,027
Betoneira <sup>c</sup>	2	0,3	0,077	0,023	0,023	0	0,000	0,000	0,000

<sup>a</sup>Cadernos técnicos de composições para aterros, bases, sub bases e imprimações (SINAPI, 2021)

<sup>b</sup>Caterpillar performance handbook (CATERPILLAR, 2018)

<sup>c</sup>Tabelas de composições de preços para orçamentos (TCPO) (PINI, 2010)

**Tabela 21:** Dados para a análise de inventário

Método de estabilização –Cenário de dosagem	Input	Processo <sup>(a)</sup> /Geografia	Quantidade	Unidade
AA-ADBL	Equipamento para mistura, homogeneização e compactação	<i>Diesel, burned in building machine/Global</i>	18,24	MJ
	Transporte, COH	<i>Diesel, burned in building machine/Global</i>	8,65	MJ
	Transporte, CBCA	<i>Diesel, burned in building machine/Global</i>	523,67	MJ
	Transporte, NaOH	<i>Diesel, burned in building machine/Global</i>	0,68	MJ
	Transporte, casca ovo	<i>Diesel, burned in building machine/Global</i>	12,88	MJ
	Produção de matéria-prima	<i>Lime, hydrated, loose weight/Rest of the world</i>	48,11	kg
		<i>Sodium hydroxide, without water, chlor-alkali electrolysis, membrane cell/Rest of the world</i>	8,10	kg
<i>Tap water, underground water without treatment/Rest of the world</i>		308,51	kg	
AA-BDAL	Equipamento para mistura, homogeneização e compactação	<i>Diesel, burned in building machine/Global</i>	18,24	MJ
	Transporte, COH	<i>Diesel, burned in building machine/Global</i>	10,63	MJ
	Transporte, CBCA	<i>Diesel, burned in building machine/Global</i>	643,60	MJ
	Transporte, NaOH	<i>Diesel, burned in building machine/Global</i>	0,84	MJ
	Transporte, casca ovo	<i>Diesel, burned in building machine/Global</i>	15,83	MJ
	Produção de matéria-prima	<i>Lime, hydrated, loose weight/Rest of the world</i>	59,12	kg
		<i>Sodium hydroxide, without water, chlor-alkali electrolysis, membrane cell/Rest of the world</i>	9,96	kg
<i>Tap water, underground water without treatment/Rest of the world</i>		285,08	kg	
CP-ADBL	Equipamento para mistura, homogeneização e compactação	<i>Diesel, burned in building machine/Global</i>	14,83	MJ
	Transporte, CP	<i>Diesel, burned in building machine</i>	20,04	MJ
	Produção de matéria-prima	<i>Tap water, underground water without treatment/Rest of the world</i>	328,56	kg
		<i>Cement, Portland/Brazil</i>	253,44	kg
CP-BDAL	Equipamento para mistura, homogeneização e compactação	<i>Diesel, burned in building machine/Global</i>	14,83	MJ
	Transporte, CP	<i>Diesel, burned in building machine/Global</i>	27,25	MJ
	Produção de matéria-prima	<i>Tap water, underground water without treatment/Rest of the world</i>	302,32	kg
		<i>Cement, Portland/Brazil</i>	344,66	kg

(a) Processos do banco de dados Ecoinvent v3.4

### 3.4.2. Avaliação do custo do ciclo de vida (ACCV)

#### 3.4.2.1. Custos diretos

Os custos diretos para a estabilização de 1m<sup>3</sup> de solo com cimento Portland ou o ligante álcali-ativado basearam-se em: (i) custos de composições analítico (encargos sociais não desonerado)

das tabelas de preço nacionais (Porto Alegre, RS) do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil [SINAPI (CAIXA; IBGE, 2022)]; e (ii) custos providos por fornecedores de insumos localizados em Porto Alegre. Custos com manutenção, depreciação e lucro dos equipamentos foram incluídos.

A Tabela 22 especifica os custos diretos de quatro processos: (i) mistura, homogeneização e compactação das misturas solo-ligante, (ii) transporte de materiais, (iii) aquisição de materiais, e (iv) consumo de combustível. O processo de *mistura, homogeneização e compactação do solo-ligante* compreendeu o uso de equipamentos (motoniveladora, trator com grade de disco rebocável, caminhão pipa, rolo compactador pé de carneiro, rolo compactador liso) e incluiu custos de mobilização e mão-de-obra (operador). Misturas de solo com o ligante álcali-ativado incluíram custos com a betoneira e seu operador. Estes custos foram calculados com base no número de horas dispendidas por equipamentos (Tabela 20, coluna H) e pelo servente (Tabela 22) no processamento de 1 m<sup>3</sup> de mistura, multiplicado pelo preço unitário horário do equipamento/servente [SINAPI (CAIXA; IBGE, 2022)].

O processo *transporte de materiais* compreendeu custos com o caminhão basculante e o motorista. Primeiramente, o número de horas para o transporte de cada material correspondeu à multiplicação das colunas “horas/ton” e “ton” da Tabela 19. O número de horas para o motorista correspondeu ao número total de horas para o transporte de materiais. O custo total do processo correspondeu a multiplicação do número de horas dispendido no transporte de cada material pelo preço unitário horário do caminhão/motorista [CAIXA e IBGE (2022)].

O processo *aquisição de matéria-prima* compreendeu custos de aquisição dos materiais. Primeiramente, a quantidade (kg) de material por m<sup>3</sup> de solo estabilizado foi considerado da Tabela 21. Em seguida, o custo por kg de material correspondeu a média do custo de aquisição de quatro fornecedores localizados em Porto Alegre, para abril/2022. O custo da cal de ovo hidratada correspondeu ao custo da cal comercial. Por fim, o custo total de cada material resultou do custo por kg multiplicado pela quantidade de material (kg).

O processo *consumo de combustível* correspondeu ao custo do diesel consumido pelo maquinário (equipamentos para a estabilização do solo e transporte de materiais), incluindo a betoneira utilizada na estabilização com álcali-ativação. Primeiramente, o consumo de diesel em L por m<sup>3</sup> foi apresentado na Tabela 21 (1 L diesel = 36 MJ). Em seguida, o custo do diesel correspondeu a média do custo do litro em quatro postos de combustíveis de Porto Alegre, para

abril/2022. Por fim, o consumo total de diesel resultou do consumo de diesel multiplicado pelo custo do litro do diesel.

**Tabela 22:** Dados para composição de custos

Dosagem	Processo	Componentes	Quantidade <sup>(a)</sup>	Unidade	Preço unitário (\$/h) <sup>(a)</sup>	Custo total (\$)
Todas	Mistura, homogeneização e compactação de misturas solo-ligante	Motoniveladora	0,008	h	43,76	0,35
		Trator com grade de disco	0,008	h	22,40	0,18
		Caminhão pipa	0,004	h	49,26	0,20
		Rolo pé de carneiro	0,015	h	33,69	0,51
		Rolo liso	0,004	h	33,60	0,13
		Servente	0,200	h	3,48	0,70
AA-ADBL	Construção	Operador de betoneira	0,077	h	3,38	0,26
		Betoneira	0,077	h	0,98	0,08
	Transporte de materiais	Caminhão basculante, Ovos	0,020	h	47,78	0,95
		Caminhão basculante, COH	0,013	h	47,78	0,64
		Caminhão basculante, CBCA	0,811	h	47,78	38,76
	Aquisição de matéria-prima	Caminhão basculante, NaOH	0,001	h	47,78	0,05
		Motorista	0,85	h	4,39	3,71
	Consumo de combustível	Hidróxido de sódio	8,1	kg	9,30	75,33
		Cal de casca de ovo	48,11	kg	0,14	6,52
	AA-BDAL	Construção	Equipamento, construção	0,509	L	1,18
Transporte de materiais			15,222	L	1,18	17,93
Construção		Operador de betoneira	0,077	h	3,38	0,26
		Betoneira	0,077	h	0,98	0,08
Transporte de materiais		Caminhão basculante, Ovos	0,025	h	47,78	1,17
		Caminhão basculante, COH	0,016	h	47,78	0,79
		Caminhão basculante, CBCA	0,997	h	47,78	47,64
Aquisição de matéria-prima		Caminhão basculante, NaOH	0,001	h	47,78	0,06
		Motorista	1,04	h	4,39	4,57
Consumo de combustível		Hidróxido de sódio	9,96	kg	9,30	92,63
	Cal de casca de ovo	59,12	kg	0,14	8,01	
CP-ADBL	Transporte de materiais	Equipamento, construção	0,509	L	1,18	0,60
		Transporte de materiais	18,71	L	1,18	22,03
	Aquisição de matéria-prima	Caminhão basculante, CPV	0,031	h	47,78	1,48
		Motorista	0,03	h	4,39	0,14
	Consumo de combustível	Cimento Portland - CPV	253,44	kg	0,15	37,53
		Equipamento, construção	0,414	L	1,18	0,49
CP-BDAL	Transporte de materiais	Transporte de materiais	0,56	L	1,18	0,66
		Caminhão basculante, CPV	0,042	h	47,78	2,02
	Aquisição de matéria-prima	Motorista	0,042	h	4,39	0,19
		Cimento Portland - CPV	344,66	kg	0,15	51,04
	Consumo de combustível	Equipamento, construção	0,414	L	1,18	0,49
		Transporte de materiais	0,76	L	1,18	0,89

(a) Baseado na unidade funcional de 1m<sup>3</sup> de solo estabilizado

### 3.4.2.2. Custos indiretos

Os custos indiretos corresponderam ao custo social do CO<sub>2</sub> ou *social cost of carbon* (SCC). Este custo é o valor monetário do dano à sociedade ao se adicionar pequenas quantidades de CO<sub>2</sub> anualmente na atmosfera. Ele inclui impactos na produtividade agrícola, efeitos na saúde humana, dano a propriedades devido ao maior risco de desastres naturais, disfunção de sistemas de energia, risco de conflito, dentre outros (INTERAGENCY WORKING GROUP, 2021).

O SCC é calculado a partir da tabela *ES-1: Social Cost of CO<sub>2</sub>, 2020-2050 (in 2020 dollars per metric ton of CO<sub>2</sub>)* presente no *Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide Interim Estimates under Executive Order 13990* (INTERAGENCY WORKING GROUP, 2021). Para o ano de 2020, o custo social de 1 tonelada de CO<sub>2</sub> equivale a \$51 considerando-se uma taxa de desconto de 3%. Segundo a *Federal Highway Agency* (U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2002) para análises de custo de ciclo de vida a taxa de desconto está entre 3 e 5%.

### 3.4.3. Avaliação social do ciclo de vida (ASCV)

O estudo de ACV compreendeu uma análise do berço ao portão (*cradle-to-gate*). Para a avaliação social do ciclo de vida os limites do sistema incluíram a produção e transporte de matéria-prima (cal hidratada, cimento Portland, hidróxido de sódio, cinza do bagaço de cana-de-açúcar) e processos construtivos (mistura, homogeneização e compactação das misturas solo-ligante). A ASCV foi considerada igual para ambas dosagens do ligante álcali-ativado e do cimento Portland. Os impactos sociais da cadeia produtiva do diesel não foram analisados, visto que somente processos e companhias mais próximas ao produto final devem ser avaliadas do ponto de vista social (DREYER, 2006; METHOT, 2005).

#### 3.4.3.1. Estruturação e coleta de dados

A estrutura hierárquica da ASCV é composta por três *stakeholders* (trabalhadores, sociedade e comunidade local) e dez indicadores sociais baseados na *Methodological Sheets* da UNEP/SETAC (2013) e no *Handbook for Product Social Impact Assessment* (UNEP/SETAC, 2020), conforme Tabela 23. Para o *stakeholder* Trabalhadores os indicadores sociais “Acidentes de trabalho”, “Salário médio” e “Participação feminina” foram selecionados dentre sete indicadores discretizados no *Handbook*; já o indicador “Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores” foi selecionado dentre os oito indicadores

apresentados no *Methodological Sheets*. Para o *stakeholder* Comunidade local os indicadores sociais “Riscos à saúde e segurança”, “Empresa/indústria informa, consulta e envolve a comunidade local” e “Empresa/indústria oferece desenvolvimento de habilidades” foram selecionados dentre cinco indicadores discretizados no *Handbook*. Por fim, para o *stakeholder* Sociedade os indicadores sociais “Contribuição do serviço/produto com o progresso econômico”, “Compromisso com pautas de sustentabilidade” e “Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico” foram selecionados dentre os cinco indicadores discretizados no *Methodological Sheets*.

A seleção dos indicadores foi realizada com base em três critérios: (i) indicadores que refletissem potencialidades e desafios da realidade social do mercado de trabalho no Brasil; (ii) indicadores mensuráveis por meio de dados primários coletados de questionários; (iii) indicadores cujos distintos cenários (i.e., opções de resposta a dada pergunta do questionário) envolvessem conceitos de fácil compreensão e distinção pelos participantes. Por exemplo, é complexa a segregação do indicador “Oportunidades iguais/discriminação” (*stakeholder* Trabalhadores do *Methodological Sheets*) em distintos cenários, bem como a escolha de apenas um cenário pelo participante, visto ser um indicador muito abrangente e de múltiplas percepções. Portanto, este indicador não cumpre os critérios ii e iii. Por sua vez, o indicador “Salário médio” é fundamental para entendimento da realidade social dentro de distintos setores do mercado de trabalho brasileiro (cumpre critério i); dados primários deste indicador são facilmente mensurados pelo questionário (cumpre critério ii); e a segregação em distintos cenários é facilitada pelo uso da expressão “piso salarial da categoria”, de fácil compreensão pelos participantes (cumpre critério iii).

Assim, os indicadores sociais foram mensurados por meio de um questionário aplicado a especialistas e outros trabalhadores das áreas de interesse para cada processo (i.e. produção de matéria-prima, transporte de materiais e processos construtivos) relacionado aos ligantes estudados (Tabela 24).

**Tabela 23:** Stakeholders e indicadores sociais da ASCV

Stakeholder	Indicador
Trabalhadores	Acidentes de trabalho Salário médio Participação feminina
Comunidade local	Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores Riscos à saúde e segurança Empresa/indústria informa, consulta e envolve a comunidade local Empresa/indústria oferece desenvolvimento de habilidades
Sociedade	Contribuição do serviço/produto com o progresso econômico Compromisso com pautas de sustentabilidade Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico

**Tabela 24:** Processos relacionados a cada ligante estudado

Processo	Ligante	
	Álcali-ativado	Cimento Portland
Produção de cal hidratada	x	
Produção de hidróxido de sódio	x	
Produção de cimento Portland		x
Transporte rodoviário	x	x
Construção de estradas	x	x

Dezenove *experts* responderam aos questionários atribuídos a cada processo (Tabela 25). Os profissionais foram instruídos a responder as perguntas considerando sua percepção pessoal e global. Estes questionários foram divididos em duas partes: (i) avaliação dos indicadores sociais (dez questões iniciais), e (ii) definição da importância ou peso destes indicadores (quatro questões finais). Para a primeira parte os entrevistados foram instruídos a selecionar, para cada questão, a opção que mais representa a empresa/indústria em relação ao indicador social. Destaca-se que cada questão contém perguntas específicas ao processo analisado, conforme Apêndice A. Na segunda parte do questionário os entrevistados foram instruídos a definir (i) a importância de cada indicador para cada *stakeholder* (i.e., numerar de menos importante a mais importante cada indicador para determinado *stakeholder*); e (ii) qual indicador era o mais importante dentre os indicadores considerados como “mais importante” em cada *stakeholder*. Desta forma, os indicadores foram numerados de 1 a 10, conforme ordem de importância definida pelo entrevistado.

Como a aplicação dos questionários envolveu seres humanos foi necessário encaminhar um Projeto de Pesquisa (*Análise de ciclo de vida social de misturas solo-ligante álcali-ativado e solo-cimento Portland*) para apreciação e aprovação da Comissão de Pesquisa de Engenharia (COMPESQ) e do Comitê de Ética da UFRGS, via Plataforma Brasil (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2022). O Projeto de Pesquisa supracitado foi aprovado pelo Comitê de Ética da UFRGS sob o número CAAE 62830022.6.0000.5347, conforme o Parecer Consubstanciado número 5.686.824 do Comitê de Ética em Pesquisa - CEP (ANEXO A).

Os entrevistados foram colegas de trabalho (caso 1) e pessoas localizadas por meio da mídia social profissional “LinkedIn” (caso 2). Para o primeiro caso, o convite individual para responder ao questionário foi enviado por e-mail. Após anuência do entrevistado, o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (Apêndice B) e o Questionário foram enviados por e-mail. Para o segundo caso, o convite individual para participação foi enviado via *chat* do LinkedIn. Após anuência do entrevistado via *chat*, o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido e o Questionário foram enviados por e-mail. No total, cinquenta e quatro *experts* foram contatados, mas somente dezenove responderam aos questionários, obtendo-se uma taxa de retorno de 35%.

**Tabela 25:** Profissão e cargo dos entrevistados por processo analisado

Processo	Profissão do entrevistado	Cargo
Produção de cal hidratada	Engenheiro Eletricista	Consultor em produção de calcário, cal e derivados
Produção de hidróxido de sódio	Não informado	Vendedor externo
	Não informado	Vendedor externo
	Técnico em química industrial	Supervisor de processos e qualidade
Produção de cimento Portland	Engenheiro Químico	Engenheiro de processos sênior
	Engenheiro Químico	Analista de Marketing e Produtos
	Engenheiro Civil	Não informado
Transporte rodoviário	Engenheiro Civil	Gerente de projetos
	Engenheiro Civil	Consultor de Desenvolvimento de Negócios e Marketing
	Administradora	Sócia-proprietária
	Não informado	Proprietário: Empresa de transporte de materiais asfálticos
	Engenheiro Civil	Proprietário: Empresa de transporte de materiais asfálticos
Construção de estradas	Engenheiro Civil	Fiscalização de obras de estradas
	Engenheiro Civil	Proprietário: Empresa de transporte de carga
	Engenheiro Civil	Engenheiro projetista
	Engenheiro Civil	Fiscalização de obras de estradas
	Engenheiro Civil	Fiscalização de obras de estradas
	Engenheiro Civil	Consultor do DNIT

#### 3.4.3.2. Caracterização e peso dos indicadores sociais

Após aplicação do questionário, a avaliação dos indicadores pelos entrevistados foi convertida em uma escala de cinco pontos, sendo -2 fortemente negativo, -1 negativo, 0 neutro, +1 positivo e +2 fortemente positivo (UNEP/SETAC, 2020), Tabela 26. O valor de 0 também foi atribuído à opção “Não tenho conhecimento/não saberia informar”. À importância de cada indicador foi atribuído proporcionalmente um valor de 0,1 (opção menos importante) a 1 (opção mais importante), Tabela 27.

**Tabela 26:** Escala de avaliação dos indicadores sociais

Opção assinalada pelo entrevistado na primeira parte do questionário	Escala correspondente
1 <sup>a</sup>	2
2 <sup>a</sup>	1
3 <sup>a</sup>	0
4 <sup>a</sup>	-1
5 <sup>a</sup>	-2
6 <sup>a</sup>	0

**Tabela 27:** Escala de importância dos indicadores sociais

Importância atribuída ao indicador pelo entrevistado na segunda parte do questionário	Escala correspondente
1 <sup>o</sup>	0,1
2 <sup>o</sup>	0,2
3 <sup>o</sup>	0,3
4 <sup>o</sup>	0,4
5 <sup>o</sup>	0,5
6 <sup>o</sup>	0,6
7 <sup>o</sup>	0,7
8 <sup>o</sup>	0,8
9 <sup>o</sup>	0,9
10 <sup>o</sup>	1,0

Para avaliação da consistência interna do questionário e da confiabilidade das respostas coletadas o coeficiente alfa de Cronbach foi calculado (DONG; NG, 2015; VISENTIN *et al.*, 2021), cuja fórmula é descrita na Equação 28 (BLAND; ALTMAN, 1997).

$$\alpha = \frac{k_i}{k_i - 1} \left( 1 - \frac{\sum s_i^2}{s_T^2} \right) \quad \text{Eq. 28}$$

Onde  $k_i$  é o número de itens (questões),  $s_i^2$  é a variância de cada item e  $s_T^2$  é a variância do score total resultante da soma dos itens.

A variância do somatório de um grupo de variáveis independentes é a soma de suas variâncias. Se os itens são idênticos e perfeitamente correlacionados todo  $s_i^2$  será igual e  $s_T^2 = k_i s_i^2$ , ou seja,

$\frac{\sum s_i^2}{s_T^2} = \frac{1}{k_i}$  e  $\alpha = 1$ . Se os itens são independentes  $s_T^2 = \sum s_i^2$  e  $\alpha = 0$ . Assim, ao se comparar grupos valores de  $\alpha$  entre 0,7 e 0,8 são satisfatórios (BLAND; ALTMAN, 1997).

### 3.4.3.3. Cálculo do score dos indicadores sociais e respectivos stakeholders

Avaliada a confiabilidade das respostas obtidas na avaliação dos indicadores os dados foram compilados para cálculo do *score* final de cada indicador, respectivo *stakeholder* e *score* social total. Os cálculos a seguir foram baseados em Hossain *et al.* (2018) e Visentin *et al.* (2021). Primeiramente, para cada processo o *score* de cada indicador foi calculado a partir da média dos resultados obtidos após a multiplicação das respostas dos entrevistados sobre a avaliação e peso de cada indicador (Equação 29).

$$S_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (I_{ji} \times W_{ji}) \quad \text{Eq. 29}$$

Onde  $S_i$  é o *score* do indicador “i”,  $n$  é o número de entrevistados,  $j$  é a ordem do entrevistado,  $I_{ji}$  é o valor do indicador “i” (-2 a +2) para o entrevistado “j” e  $W_{ji}$  é o peso do indicador “i” (0,1 a 1) para o entrevistado “j”.

Em seguida, a soma do *score* do indicador “i” para cada processo contido no ligante analisado (Tabela 24) resulta no seu *score* final (Equação 30). Estes processos são: produção de cal hidratada, produção de hidróxido de sódio, transporte rodoviário e construção de estradas para o ligante álcali-ativado; e produção de cimento Portland, transporte rodoviário e construção de estradas para o cimento.

$$S_{Fi} = \sum_{k=1}^p S_{ik} \quad \text{Eq. 30}$$

Onde  $S_{Fi}$  é o *score* final do indicador “i”, “p” é o número de processos, “k” é a ordem do processo e  $S_{ik}$  é o *score* do indicador “i” para o processo “k”.

Após o cálculo do *score* final de cada indicador é possível o cálculo do *score* dos *stakeholders*, conforme Equação 31. Assim, a soma do *score* final dos indicadores resulta no *score* total de cada *stakeholder* para cada ligante estudado.

$$SS_i = \sum_{i=1}^m S_{Fi} \quad \text{Eq. 31}$$

Onde  $SS_i$  é o *score* do stakeholder “i”, m é o número de indicadores do stakeholder “i” e  $S_{Fi}$  é o *score* final do indicador “i”.

Após o cálculo do *score* dos *stakeholders*, o cálculo do *score* social total (Equação 32) resulta da soma do *score* de cada *stakeholder* do ligante estudado.

$$SS_{\text{ocial}} = \sum_{i=1}^r SS_i \quad \text{Eq. 32}$$

Onde  $SS_{\text{ocial}}$  é o *score* social total, r é o número de *stakeholders* e  $SS_i$  é o *score* do stakeholder “i”.

#### 3.4.4. MIVES

A integração quantitativa dos três pilares de sustentabilidade (ambiental, econômico e social) foi realizada por meio do MIVES (*Spanish Integrated Value Model for the Sustainability Assessment*). O método relaciona dados de entrada e saída para a unidade funcional estudada e para cada pilar de sustentabilidade, sendo cada pilar (requerimento) definido por pesos, critérios e respectivos indicadores quantificáveis (DAMIANS *et al.*, 2015), conforme Tabela 28. Os pesos foram igualmente atribuídos para cada requerimento, critérios relativos a dado requerimento e indicadores relativos a cada critério. Para cada indicador há uma função valor associada ( $V_i$ ), a qual objetiva homogeneizar diferentes valores de indicadores (qualitativos ou quantitativos) de forma que cada critério tenha uma escala única, entre 0 e 1 (PONS; DE LA FUENTE; AGUADO, 2016).

A função valor  $V_i$  possui dois pontos principais, correspondentes à mínima satisfação ( $S_{\text{mín}} = 0$ ) e máxima satisfação ( $S_{\text{máx}} = 1$ ). Ainda, esta função pode ter tendência de crescimento ou decréscimo e possuir diferentes formatos (linear, côncava, convexa, formato S). Para os indicadores econômicos e sociais uma função decrescente convexa foi utilizada por (i) o ponto de máxima satisfação corresponder ao menor valor do indicador (função decrescente), e (ii) para garantir a localização das alternativas o mais próximo possível do ponto de máxima satisfação (função convexa). Já os indicadores sociais foram analisados por meio de uma função

crescente linear que reflete um aumento constante de satisfação conforme o valor do indicador aumenta (ALARCON *et al.*, 2011).

**Tabela 28:** Requerimentos, critérios e indicadores

Requerimento	Peso requerimento (%)	Critério	Peso critério (%)	Indicadores	Peso indicador (%)	
Ambiental	33,33%	Ar	33,33%	Aquecimento global (kg CO2 eq)	33,33%	
				Depleção da camada de ozônio (kg CFC-11 eq)	33,33%	
				Oxidação fotoquímica (kg C2H4-eq)	33,33%	
		Uso da água e impactos relacionados	33,33%	33,33%	Ecotoxicidade aquática em água doce (kg 1.4-DB eq)	25,00%
					Ecotoxicidade aquática marinha (kg 1.4-DB eq)	25,00%
					Acidificação (kg SO2-eq)	25,00%
					Eutrofização (kg PO4-eq)	25,00%
		Terra e ecossistema	33,33%	33,33%	Ecotoxicidade terrestre (kg 1.4-DB eq)	33,33%
					Toxicidade humana (kg 1.4-DB eq)	33,33%
					Depleção de recursos abióticos (kg Sb-eq)	33,33%
Econômico	33,33%	Custos diretos	50,00%	Construção (\$)	25,00%	
				Transporte de materiais (\$)	25,00%	
				Aquisição de matéria-prima (\$)	25,00%	
				Consumo de combustível (\$)	25,00%	
		Custos indiretos	50,00%	Custo social do CO <sub>2</sub> (\$)	100,00%	
Social	33,33%	Trabalhadores	33,33%	Acidentes de trabalho	25,00%	
				Salário médio	25,00%	
				Participação feminina	25,00%	
				Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores	25,00%	
		Comunidade local	33,33%	33,33%	Riscos à saúde e segurança	33,33%
					Empresa/indústria informa, consulta e envolve a comunidade local	33,33%
					Empresa/indústria oferece desenvolvimento de habilidades	33,33%
		Sociedade	33,33%	33,33%	Riscos à saúde e segurança	33,33%
					Empresa/indústria informa, consulta e envolve a comunidade local	33,33%
					Empresa/indústria oferece desenvolvimento de habilidades	33,33%

A expressão matemática para a função valor  $V_i$  é dada pela Equação 33 (ALARCON *et al.*, 2011).

$$V_i = B_{vi} \cdot \left[ 1 - e^{-K_c \cdot \left( \frac{|X - S_{\min}|}{C_p} \right)^P} \right] \quad \text{Eq. 33}$$

Onde  $B_{vi}$  é um fator que garante o valor de  $V_i$  entre 0 e 1 (assume-se que a máxima satisfação possui valor 1);  $S_{\max}$  e  $S_{\min}$  são os pontos de máxima e mínima satisfação, respectivamente;  $X$

é a abscissa que gera um valor igual a  $V_i$ ;  $P$  define o formato da curva da função como côncavo ( $P < 1$ ), linear ( $P = 1$ ) e formato S ou convexo ( $P > 1$ );  $C_p$  é um parâmetro que define o x-valor do ponto de inflexão para curvas com  $P > 1$ ;  $K_c$  é um parâmetro que define aproximadamente o y-valor no ponto  $C_p$ .

$$B_{vi} = \frac{1}{1 - e^{-K_c \cdot \left(\frac{|S_{m\acute{a}x} - S_{m\acute{i}n}|}{C_p}\right)^P}} \quad \text{Eq. 34}$$

Para os indicadores estudados os valores de  $P$ ,  $K_c$  e  $C_p$  utilizados, conforme Alarcon *et al.* (2011), são descritos na Tabela 29.

**Tabela 29:** Valores de P, K e C

Indicador	Tendência	Função	P	$K_c$	$C_p$
Social	Aumento	Linear	1	0,1	$X_{m\acute{i}n}$
Ambiental	Decréscimo	Convexo	3	0,05	$C = (3X_{m\acute{a}x} + X_{m\acute{i}n})/4$
Econômico	Decréscimo	Convexo	3	0,05	$C = (3X_{m\acute{a}x} + X_{m\acute{i}n})/4$

Conforme Da S Trentin *et al.* (2019) o dado de saída do MIVES é um índice de sustentabilidade ( $V_{final}$ ) que varia de 0 a 1, onde 1 é o valor mais satisfatório. Esse índice pode ser utilizado para uma tomada de decisão objetiva entre alternativas de sistemas ou produtos (DAMIANS *et al.*, 2015). Para se obter  $V_{final}$  o valor de cada indicador ( $V_{ind}$ ) foi calculado por meio da função  $V_i$  e ponderado por um peso ( $P_{ind}$ ) para se encontrar o valor do critério ( $V_{cr}$ ), conforme Equação 35:

$$V_{cr} = \sum_1^t V_{ind} \times P_{ind} \quad \text{Eq. 35}$$

Onde  $t$  é o número de indicadores. O valor de cada pilar ( $V_{req}$ ) é então determinado por pesos atribuídos aos critérios ( $P_{cr}$ ), conforme Equação 36:

$$V_{req} = \sum_1^u V_{cr} \times P_{cr} \quad \text{Eq. 36}$$

Onde  $u$  é o número de critérios. E o valor final é determinado a partir do peso atribuído a cada pilar ( $P_{req}$ ), conforme Equação 37:

$$V_{final} = \sum_1^v V_{req} \times P_{req} \quad \text{Eq. 37}$$

Onde  $v$  é o número de pilares, no caso deste trabalho três.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. PASTAS ÁLCALI-ATIVADAS

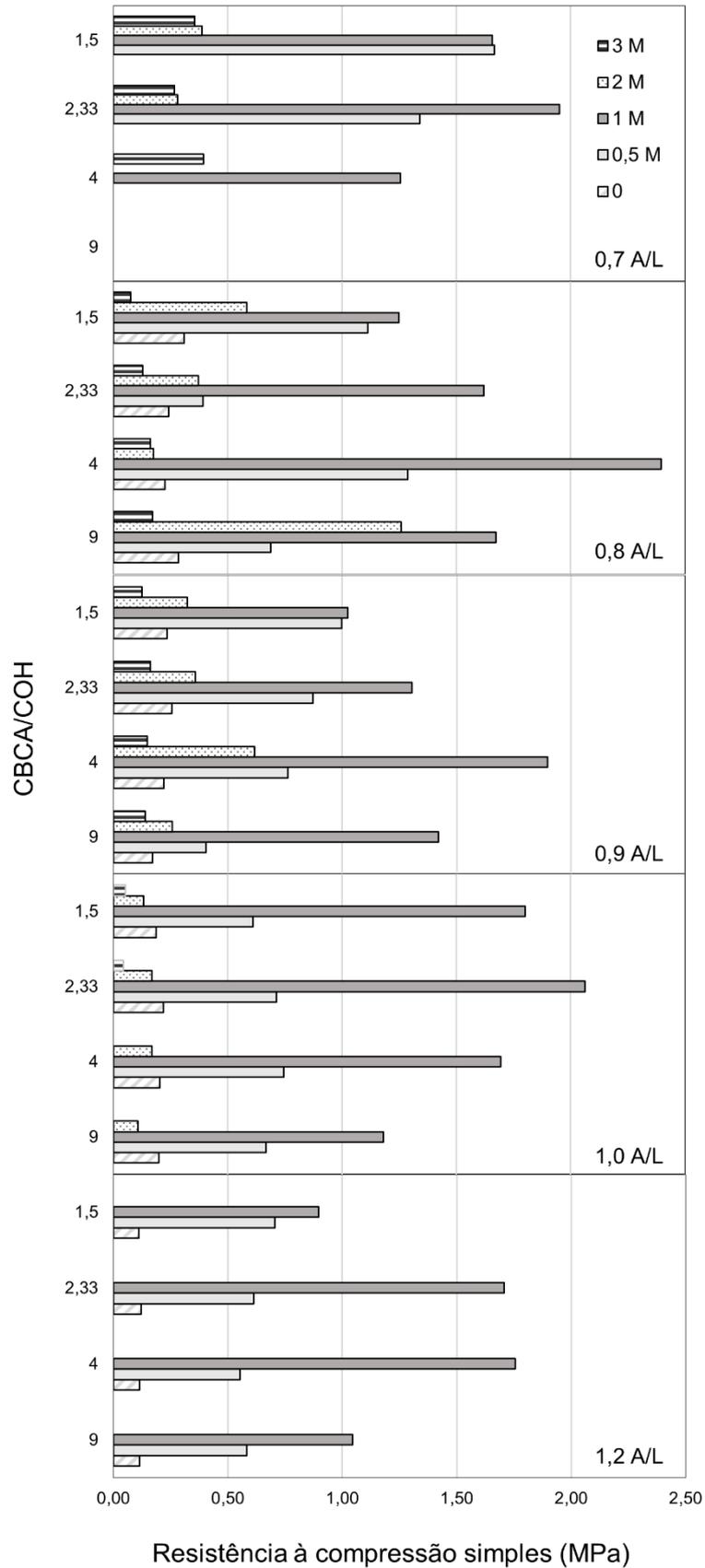
#### 4.1.1. Efeito dos fatores controláveis sobre a RCS

A Figura 39 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples das pastas álcali-ativadas. Observa-se que quanto maior a relação água/ligante (A/L) e a molaridade (M) das amostras maior o teor de álcalis (%Na<sub>2</sub>O). Esta porcentagem corresponde a porcentagem em peso entre o teor de álcalis (Na<sub>2</sub>O) da solução ativadora e o teor de material precursor utilizado (CBCA + COH). As correlações encontram-se na Tabela 30.

**Tabela 30:** Teor de álcalis das pastas álcali-ativadas

Relação A/L	Molaridade (M)	Teor de álcalis (%Na <sub>2</sub> O)
1,2	0,5	1,94
	1,0	3,95
	2,0	8,20
	3,0	12,88
1,0	0,5	1,61
	1,0	3,25
	2,0	6,78
	3,0	10,49
0,9	0,5	1,44
	1,0	2,94
	2,0	6,06
	3,0	9,36
0,8	0,5	1,28
	1,0	2,61
	2,0	5,35
	3,0	8,19
0,7	0,5	1,12
	1,0	2,25
	2,0	4,63
	3,0	7,17

**Figura 39:** Resistência à compressão simples das pastas álcali-ativadas



Observa-se na Figura 39 que maiores valores de resistência estão relacionados a molaridade 1M. Menores resistências mecânicas ocorreram nas concentrações 0 e 3M. Para uma relação A/L de 1,2 a resistência é nula para ativações alcalinas com concentração 3M. Ainda, para uma relação 0,7 A/L a resistência é nula em amostras moldadas com água destilada. Fisicamente, uma resistência nula significa que os corpos de prova não possuíam resistência mínima para serem desmoldados. Uma concentração 2M levou a maiores resistências que 3M, e uma concentração 0,5M gerou resistências superiores a ambas. Entretanto, as molaridades 0,5M e 2M resultaram em resistências inferiores às alcançadas com 1M. A adição de um ativador alcalino aumentou o pH das misturas: de 12,81, para amostras CBCA-COH-água destilada, para 14 para amostras CBCA-COH-1M NaOH. Assim, a adição de 1M aumentou o pH da mistura e, conseqüentemente, acelerou a taxa de dissolução do precursor. Em conclusão, a falta de um ativador alcalino (0M) e o excesso de álcalis (em soluções 3M) são prejudiciais a resistência à compressão simples das amostras. Isso ocorre devido a necessidade de álcalis para dissolução da sílica e alumina da cinza, entretanto, concentrações excessivas do íon hidroxila levam a uma menor solubilidade do hidróxido de cálcio prejudicando a formação de produtos de reação e reduzindo a resistência (LEI; LAW; YANG, 2021; YIP; LUKEY; VAN DEVENTER, 2005).

Maiores resistências ocorreram para razões entre precursores (CBCA/COH) de 2,33 (0,7 e 1,0 A/L) e 4 (0,8, 0,9 e 1,2 A/L). Dentre estas, o maior valor de resistência estava associado a 80% de CBCA e 20% de COH (razão de 4), com concentração molar de 1M e relação A/L de 0,8 (2,61% de álcalis segundo a Tabela 30), correspondendo a 2,39 MPa. A segunda maior resistência correspondeu a 70% de CBCA e 30% de COH (razão de 2,33), com concentração molar de 1M e relação A/L de 1,0 (3,25% de álcalis segundo a Tabela 30), correspondendo a 2,06 MPa. Estes resultados estão de acordo com resultados encontrados na literatura. Segundo Temuujin, Van Riessen e Williams (2009) a adição de componentes de cálcio em amostras curadas a temperatura ambiente aumentou a taxa de geopolimerização levando a maiores valores de resistência à compressão. Dombrowski, Buchwald e Weil (2007) estudaram a influência de adições de cálcio (0-20%) em geopolímeros a base de cinza volante ativados por NaOH. Para amostras pequenas (10 x 10 x 60 mm<sup>3</sup>), a maior resistência à compressão simples e formação de produtos de reação ocorreu para a adição de 20% de Ca(OH)<sub>2</sub>. Buchwald, Dombrowski e Weil (2005) estudaram adições de 0-40% de cálcio a geopolímeros de cinza volante-NaOH e relacionaram maiores resistência à compressão simples a adições de 30%.

Para se verificar a influência dos fatores controláveis sobre a variável de resposta (resistência à compressão simples) foi realizada uma análise de variância (ANOVA), conforme Tabela 31. A

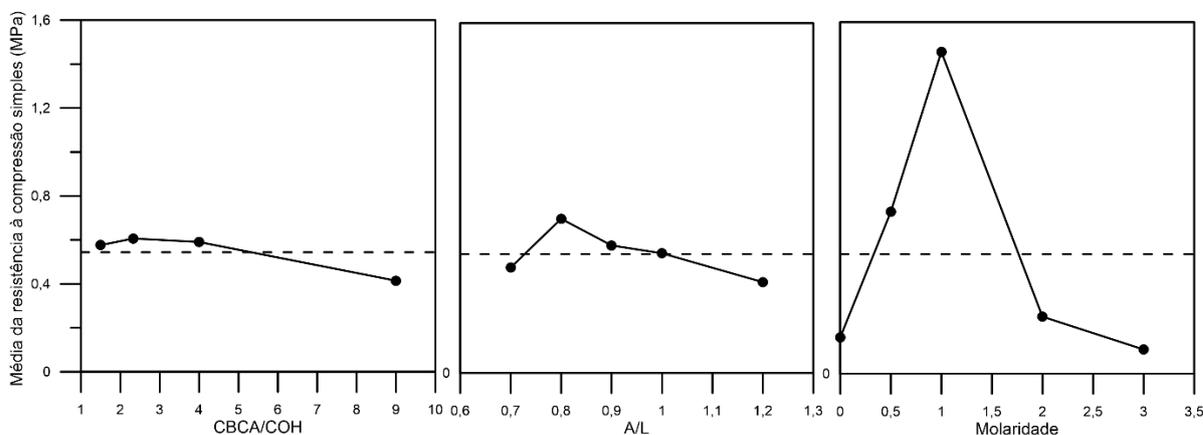
ANOVA foi realizada a partir do design fatorial completo com repetição utilizado na execução do ensaio de compressão das pastas, que resultou em 200 ensaios. Os fatores controláveis (SBCA/COH, A/L e Molaridade) e seus respectivos níveis podem ser visualizados na Tabela 6.

**Tabela 31:** ANOVA para pastas álcali-ativadas

Fonte	Graus de liberdade (GL)	Soma ajustada dos quadrados (SQ Aj.)	Quadrados médios ajustados (QM Aj.)	Valor-F	Valor-P	Significância
CBCA/COH	3	1,191	0,3970	27,65	0,0000	Significativo
A/L	4	1,932	0,4829	33,63	0,0000	Significativo
Molaridade	4	51,924	12,9809	903,99	0,0000	Significativo
CBCA/COH*A/L	12	4,836	0,4030	28,07	0,0000	Significativo
CBCA/COH*Molaridade	12	4,320	0,3600	25,07	0,0000	Significativo
A/L*Molaridade	16	2,080	0,1300	9,05	0,0000	Significativo
CBCA/COH*A/L*	48	6,945	0,1447	10,08	0,0000	Significativo
Molaridade						
Erro	100	1,436	0,0144			
Total	199	74,664				

Resultados da ANOVA mostraram que todos os fatores controláveis e suas interações influenciaram significativamente a variável de resposta (valor-p <0,05) para um intervalo de confiança na decisão de 95% (1-0,05; sendo 0,05 o nível de significância). O Valor-F representa a magnitude dos efeitos de cada fator e suas interações sobre a resistência à compressão simples. A maior magnitude foi observada para a molaridade (903,99), seguida da relação A/L (33,63). A Figura 40 mostra os efeitos dos fatores principais (SBCA/COH, A/L e Molaridade) sobre  $q_u$ , onde a linha pontilhada corresponde a resposta média de todos ensaios executados.

**Figura 40:** Efeitos dos fatores principais – pastas álcali-ativadas



Observa-se na Figura 40 que a Molaridade apresentou maior efeito sobre a resistência à compressão simples, sendo o maior valor médio de resistência para a molaridade 1M, seguida

pelo efeito da relação A/L igual a 0,8. Por fim, a razão CBCA/COH, em consonância com a Tabela 31, teve menor influência sobre a variável de saída, sendo os maiores valores médios de resistência muito próximos para as razões CBCA/COH de 2,33 e 4. De maneira geral, um aumento no nível dos fatores principais levou a um valor máximo de resistência para um nível ótimo, com queda de resistência para os níveis superiores a este.

A partir da ANOVA é possível identificar o nível de cada fator controlável que resulta no maior valor da variável de resposta. Para tanto, é necessário a realização de uma comparação múltipla de médias (CMM) para fatores com dois ou mais níveis, a fim de identificar quais níveis diferem entre si. O método utilizado nesta análise foi o Método de Tukey. Como a interação entre os fatores foi significativa a CMM foi realizada fixando o nível de um dos fatores e comparando as médias dos níveis do outro fator. Conforme Figura 40 a resistência à compressão simples foi maximizada para amostras ensaiadas na combinação de 1M e A/L 0,8, assim, nas interações de dois fatores esses valores foram fixados um por vez e comparou-se as médias dos níveis da razão CBCA/COH. Primeiramente, a razão A/L de 0,8 foi fixada e as médias dos níveis da razão CBCA/COH foram comparadas (Tabela 32). Em seguida, a molaridade 1M foi fixada e as médias dos níveis da razão CBCA/COH foram comparadas (Tabela 33).

Conforme Tabela 32 os tratamentos 4\*0,8 e 9\*0,8 (CBCA/COH\*A/L) são estatisticamente iguais configurando um empate técnico, ou seja, ambos tratamentos levaram a maiores valores da resistência à compressão simples. Os tratamentos escolhidos foram CBCA/COH\*A/L de 4\*0,8, visto que apresentaram maior média de resistência. Conforme Tabela 33 os tratamentos 4\*1 e 2,33\*1 (CBCA/COH\*Molaridade) também apresentaram empate técnico, mas o primeiro apresenta maior valor médio de resistência e menor consumo de cal. Assim, a melhor combinação de variáveis correspondeu a razão CBCA/COH igual a 4, relação A/L de 0,8 e concentração molar de 1M (2,61% de álcalis). Esta combinação é endossada pela Tabela 34 (CMM da interação entre os três fatores controláveis), apresentando maior média (2,395 MPa) e menor consumo de cal em relação aos outros tratamentos estatisticamente empatados a este (2,33\*1\*1; 2,33\*0,7\*1; 4\*0,9\*1; para a razão CBCA/COH, relação A/L e Molaridade, respectivamente).

Definida a melhor combinação de variáveis para as pastas álcali-ativadas duas variáveis podem ser fixadas para as amostras solo-ligante, conforme item 3.3.2: relação CBCA/COH = 4 (80% de CBCA e 20% de COH) e concentração de álcalis = 2,61% Na<sub>2</sub>O (correspondente a uma relação A/L = 0,8 e molaridade 1M para as pastas).

**Tabela 32:** Comparação Múltipla de Médias, Método de Tukey para interação CBCA/COH\*A/L

CBCA/COH*A/L	Repetições	Média $q_u$ (MPa)	Agrupamento
4,00 * 0,8	10	0,850	A
9,00 * 0,8	10	0,816	A B
1,50 * 0,8	10	0,610	C D E F
2,33 * 0,8	10	0,550	D E F

Nota: médias que não compartilham uma letra são estatisticamente distintas

**Tabela 33:** Comparação Múltipla de Médias, Método de Tukey para interação CBCA/COH\*Molaridade

CBCA/COH*Molaridade	Repetições	Média $q_u$ (MPa)	Agrupamento
4,00 * 1,0	10	1,798	A
2,33 * 1,0	10	1,728	A
1,50 * 1,0	10	1,271	B
9,00 * 1,0	10	1,063	C

Nota: médias que não compartilham uma letra são estatisticamente distintas

**Tabela 34:** Comparação Múltipla de Médias, Método de Tukey para a interação de três fatores

CBCA/COH*A/L* Molaridade	Repetições	Média $q_u$ (MPa)	Agrupamento
4,00 * 0,8 * 1,0	2	2,395	A
2,33 * 1,0 * 1,0	2	2,060	A B
2,33 * 0,7 * 1,0	2	1,950	A B C
4,00 * 0,9 * 1,0	2	1,900	A B C
1,50 * 1,0 * 1,0	2	1,800	B C D
4,00 * 1,2 * 1,0	2	1,755	B C D E
2,33 * 1,2 * 1,0	2	1,705	B C D E F
4,00 * 1,0 * 1,0	2	1,690	B C D E F
9,00 * 0,8 * 1,0	2	1,675	B C D E F
1,50 * 0,7 * 0,5	2	1,670	B C D E F
1,50 * 0,7 * 1,0	2	1,660	B C D E F
2,33 * 0,8 * 1,0	2	1,620	B C D E F G

Nota: médias que não compartilham uma letra são estatisticamente distintas

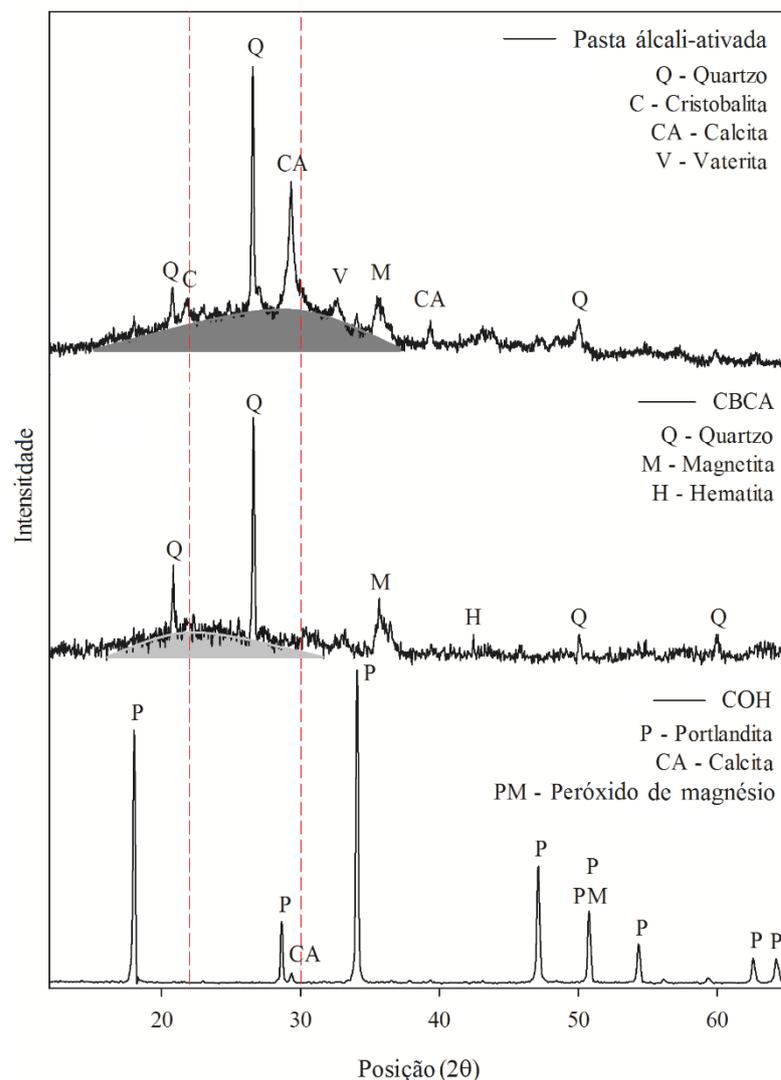
#### 4.1.2. Composição química e mineralógica e microestrutura da pasta álcali-ativada

A pasta álcali-ativada com maior resistência à compressão simples (CBCA/COH=4, A/L = 0,8 e 1M) foi analisada em termos de composição química, mineralógica e microestrutural (análises de FRX, DRX e SEM-EDS, respectivamente). Resultados de FRX (Tabela 35) identificaram majoritariamente na pasta álcali-ativada óxidos de silício (40,45%) e cálcio (31,81%) originados da CBCA e da COH, respectivamente. Ainda, óxidos de ferro (10,03%), sódio (4,05%) e alumínio (3,03%) também foram identificados. Os óxidos de ferro ( $Fe_2O_3$ ) e alumínio ( $Al_2O_3$ ) originaram-se da CBCA, e o óxido de sódio do ativador alcalino.

**Tabela 35:** Composição química da pasta álcali-ativada

Óxidos (%)	SiO <sub>2</sub>	CaO	FeO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	MnO	SO <sub>3</sub>	Cl	Outros
	40,45	31,81	10,03	4,05	3,32	3,03	2,50	1,76	1,36	0,48	0,47	0,36	0,38

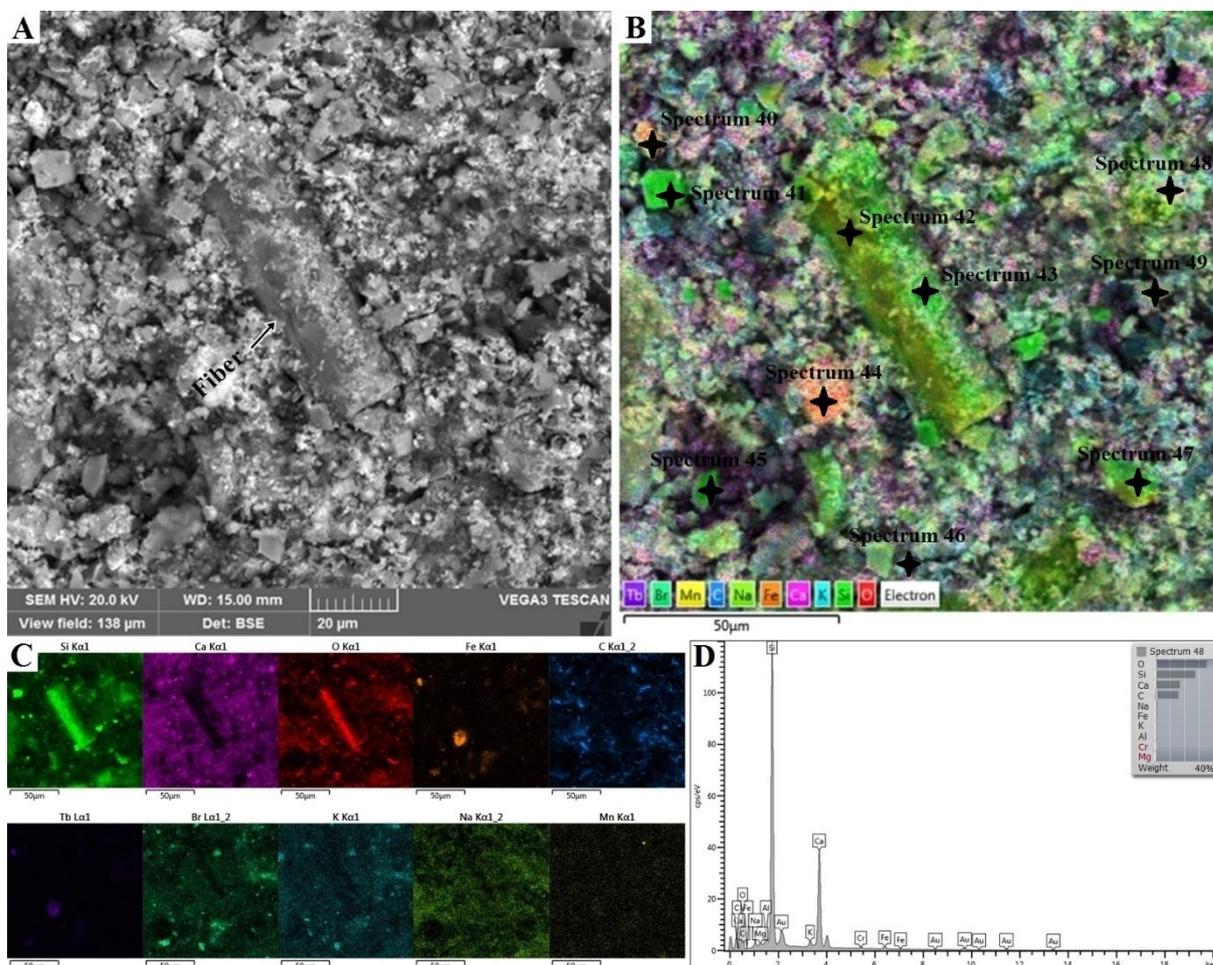
A DRX (Figura 41) indicou a presença de quartzo (SiO<sub>2</sub>), cristobalita (SiO<sub>2</sub>), calcita (CaCO<sub>3</sub>), vaterita (CaCO<sub>3</sub>), magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) e hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Quartzo, cristobalita e magnetita, e calcita originaram-se da CBCA e da COH, respectivamente. Vaterita, um polimorfo mineral de CaCO<sub>3</sub>, foi produzida após a desidratação do carbonato de cálcio hidratado amorfo (da COH) devido ao pH elevado e baixa temperatura (23°C). Tobermorita, um mineral que se assemelha a estrutura pouco cristalina do gel C-(N)-A-S-H, pode estar localizada dentro do espesso pico de calcita. O gel C-(N)-A-S-H é observado na forma de um halo amorfo ao longo da linha de radiação de fundo da DRX. O deslocamento do halo amorfo entre a linha de radiação de fundo da CBCA e da pasta álcali-ativada (22° para 30° 2θ, respectivamente) é consequência de reações de geopolimerização (COSTA *et al.*, 2021). A COH é um material cristalino e não apresenta halo amorfo. Portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>), um componente majoritário da COH, não foi identificada na DRX da pasta por ter sido consumida durante o processo de ativação alcalina.

**Figura 41:** DRX da CBCA, COH e pasta álcali-ativada

Imagens de MEV (Figura 42) mostram a morfologia da pasta. O precursor está embebido no que aparenta ser uma matriz cimentícia (Figura 42a-b). Entretanto, a matriz apresenta uma estrutura menos densa e mais porosa (padrões escuros indicam ausência de material) do que materiais cimentantes convencionais, considerando-se que a 7 dias de cura reações álcali-ativadas ainda estão ocorrendo. A Figura 42a apresenta fibras de cana-de-açúcar, majoritariamente compostas por Si e O (Figura 42c). A fibra não foi dissolvida durante o processo de ativação alcalina por não ser um material amorfo. A imagem EDS (Figura 42b) contém áreas ricas em Ca, Si, Na e Al. Estas áreas indicam o processo de gelação do precursor ativado (CBCA) em um meio alto cálcio (COH). Ainda, a Figura 42c mostra uma distribuição homogênea de cálcio (da COH) e de sódio (do NaOH). O mapa químico do *spectrum* 48 (Figura

42d) indica majoritariamente a presença de silício e cálcio, e conseqüentemente de um gel C-S-H.

**Figura 42:** Imagens de MEV da pasta álcali-ativada (0,8 A/L, 1 M, 4 CBCA/COH): (a) magnificação de 1500x, (b) imagem EDS e (c) distribuição de elementos, e (d) mapa química



A Tabela 36 mostra a composição elemental de pontos da EDS presentes na Figura 42b. Nove pontos foram avaliados para quantificação da distribuição dos elementos na imagem. A média das razões Ca/Si e Na/Ca é 0,28 e 0,15, respectivamente. Para amostras de areia com 30% de pó de vidro e 7% de cal de carbureto ativadas por NaOH (3M), Consoli *et al.* (2021c) encontrou uma razão média Na/Ca de 0,06 para o gel C-S-H e uma razão média Ca/Si de 0,49 para o gel (C,N)-A-S-H, valores semelhantes aos encontrados neste estudo.

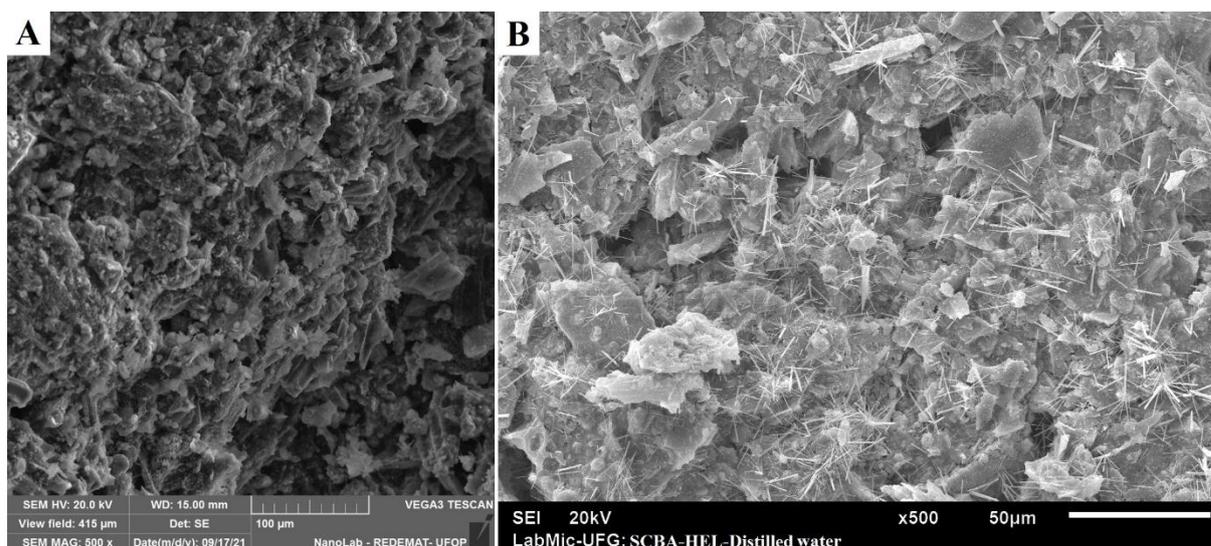
Para um melhor entendimento dos resultados anteriores imagens de MEV da pasta álcali-ativada e não ativada (0M) foram comparadas após 7 dias de cura. Nota-se que há maior homogeneização e menor porosidade, e os agregados possuem uma textura e estrutura mais regular na pasta álcali-ativada (Figura 43a). Isto é devido a maior precipitação de géis C-S-H e

C-A-S-H. A pasta não ativada contém somente água destilada e os produtos de reação se desenvolvem ao longo de maiores períodos de tempo. Assim, somente hidratos em forma de agulha foram observados (Figura 43b). Da mesma forma, Figueiredo e Pavía (2020) encontraram hidratos em forma de agulha em pastas de cal, CBCA e água curadas por 7 dias. Estas diferenças morfológicas entre pastas explicam a maior RCS da pasta álcali-ativada (Figura 39).

**Tabela 36:** Composição elementar da pasta álcali-ativada determinada por EDS, considerando os pontos da Figura 42

Pontos	Si	Al	Ca	Na	Ca/Si	Na/Al	Na/Si	Na/Ca
	% em massa				Razões			
40	3,86	2,46	1,05	0	0,27	0	0	0
41	52,02	0	0	0	0	-	0	0
42	27,88	0	0,33	0,16	0,01	-	0,01	0,48
43	37,93	0,30	2,07	0,44	0,05	1,47	0,01	0,21
44	9,45	0,55	4,55	2,00	0,48	3,64	0,21	0,44
45	60,55	0	2,20	0,17	0,04	-	0	0,08
46	7,51	0,39	5,73	1,19	0,76	3,05	0,16	0,21
47	43,58	0,46	4,89	0,31	0,11	0,67	0,01	0,06
48	27,40	0,44	16,70	0,59	0,61	1,34	0,02	0,04
49	15,04	0	6,78	0	0,45	0	0	0
Média	28,35	0,3	4	0,25	0,28	1,02	0,04	0,15

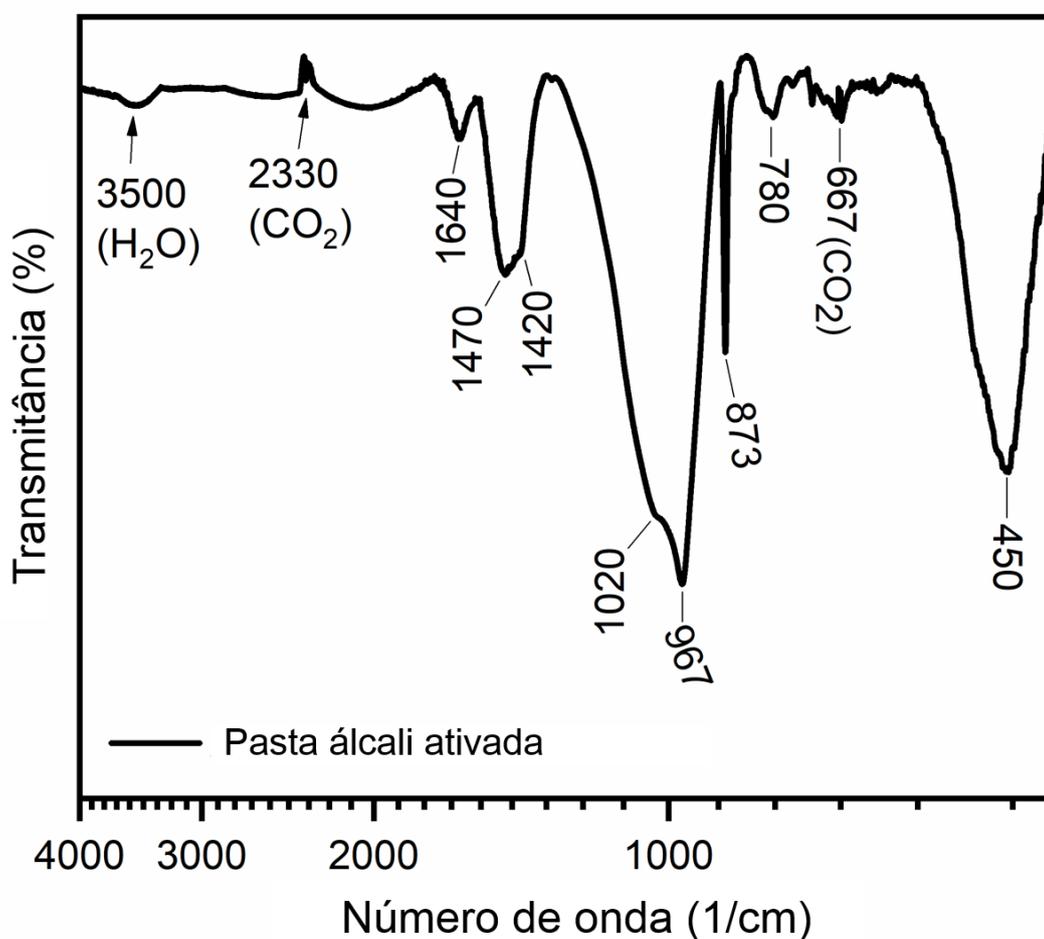
**Figura 43:** Imagens de MEV: (a) pasta álcali-ativada (0,8 A/L, 1 M, 4 CBCA/COH), e (b) pasta não álcali-ativada (0,8 A/L, 0 M, 4 CBCA/COH) a uma magnificação de 500x



A Figura 44 apresenta a espectroscopia FTIR da pasta álcali-ativada. A banda de menor valor ( $450 \text{ cm}^{-1}$ ) está associada a vibrações por flexão O-Si-O (PUERTAS; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; BLANCO-VARELA, 2004). Em torno de  $961\text{-}969 \text{ cm}^{-1}$  (neste estudo,  $967 \text{ cm}^{-1}$ ) a

banda está associada a vibrações de alongamento assimétrico Si-O no tetraedro  $\text{SiO}_4$  e corresponde a formação do gel C-A-S-H (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2011; PUERTAS; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; BLANCO-VARELA, 2004). Vibrações a  $1020 \text{ cm}^{-1}$  (T-O vibrações, sendo T igual a Si ou Al) são típicas da banda principal de géis N-A-S-H (DE VARGAS *et al.*, 2014; GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2011). Vibrações por flexão dos grupos hidroxila da água adsorvida estão associadas a banda em  $3500 \text{ cm}^{-1}$ .

**Figura 44:** FTIR para a pasta álcali-ativada



## 4.2 MISTURA SOLO-LIGANTE: LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO E CIMENTO PORTLAND

4.2.1. Resistência à compressão simples e tração por compressão diametral, módulo cisalhante inicial e sucção matricial

A Tabela 37 apresenta os tratamentos experimentais executados a partir do projeto fatorial para os ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo cisalhante inicial e sucção matricial para ambos ligantes estudados (álcali-ativado e cimento Portland).

**Tabela 37:** Tratamentos relativos aos ensaios de resistência, módulo cisalhante inicial e sucção matricial

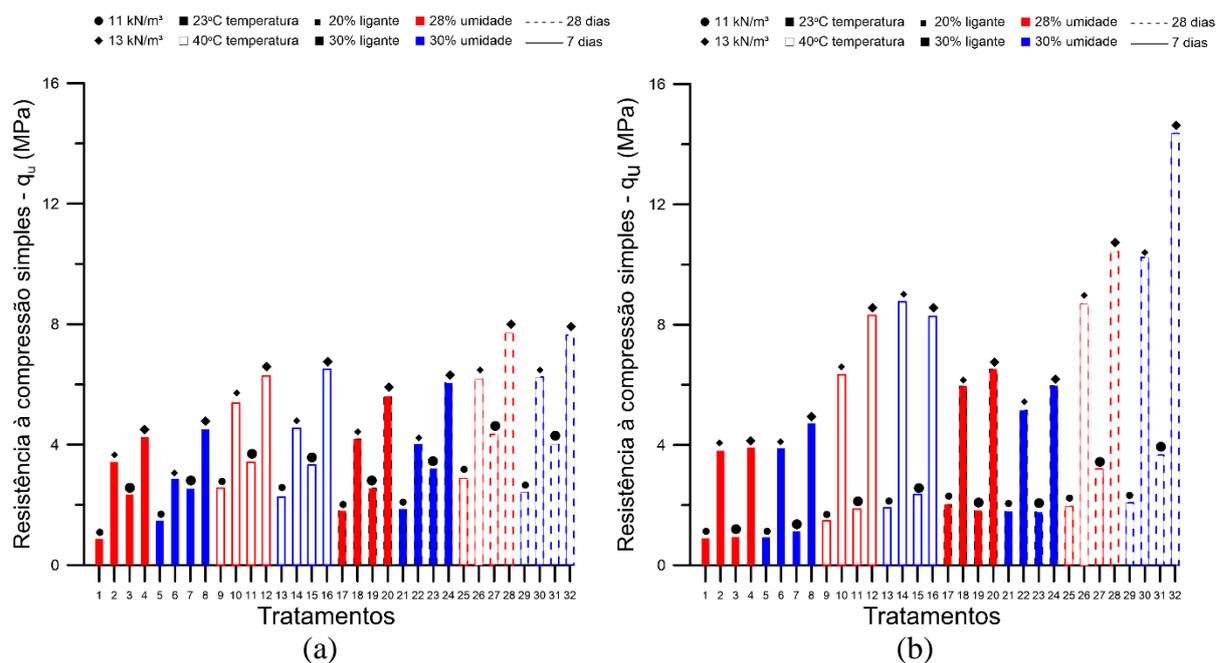
Tratamento	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	D (dias)	T (°C)	L (%)	w (%)
1; 33	11	7	23	20	28
2; 34	13	7	23	20	28
3; 35	11	7	23	30	28
4; 36	13	7	23	30	28
5; 37	11	7	23	20	30
6; 38	13	7	23	20	30
7; 39	11	7	23	30	30
8; 40	13	7	23	30	30
9; 41	11	7	40	20	28
10; 42	13	7	40	20	28
11; 43	11	7	40	30	28
12; 44	13	7	40	30	28
13; 45	11	7	40	20	30
14; 46	13	7	40	20	30
15; 47	11	7	40	30	30
16; 48	13	7	40	30	30
17; 49	11	28	23	20	28
18; 50	13	28	23	20	28
19; 51	11	28	23	30	28
20; 52	13	28	23	30	28
21; 53	11	28	23	20	30
22; 54	13	28	23	20	30
23; 55	11	28	23	30	30
24; 56	13	28	23	30	30
25; 57	11	28	40	20	28
26; 58	13	28	40	20	28
27; 59	11	28	40	30	28
28; 60	13	28	40	30	28
29; 61	11	28	40	20	30
30; 62	13	28	40	20	30
31; 63	11	28	40	30	30
32; 64	13	28	40	30	30
65; 66; 67; 68; 69	12	17,5	31,5	25	29

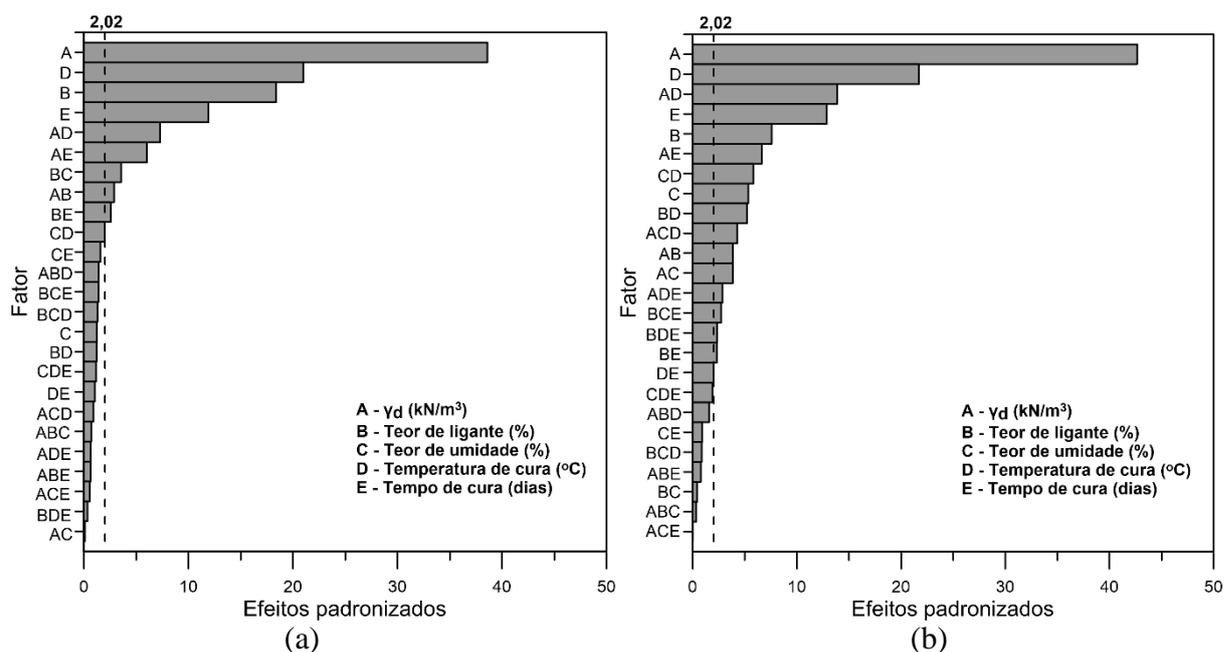
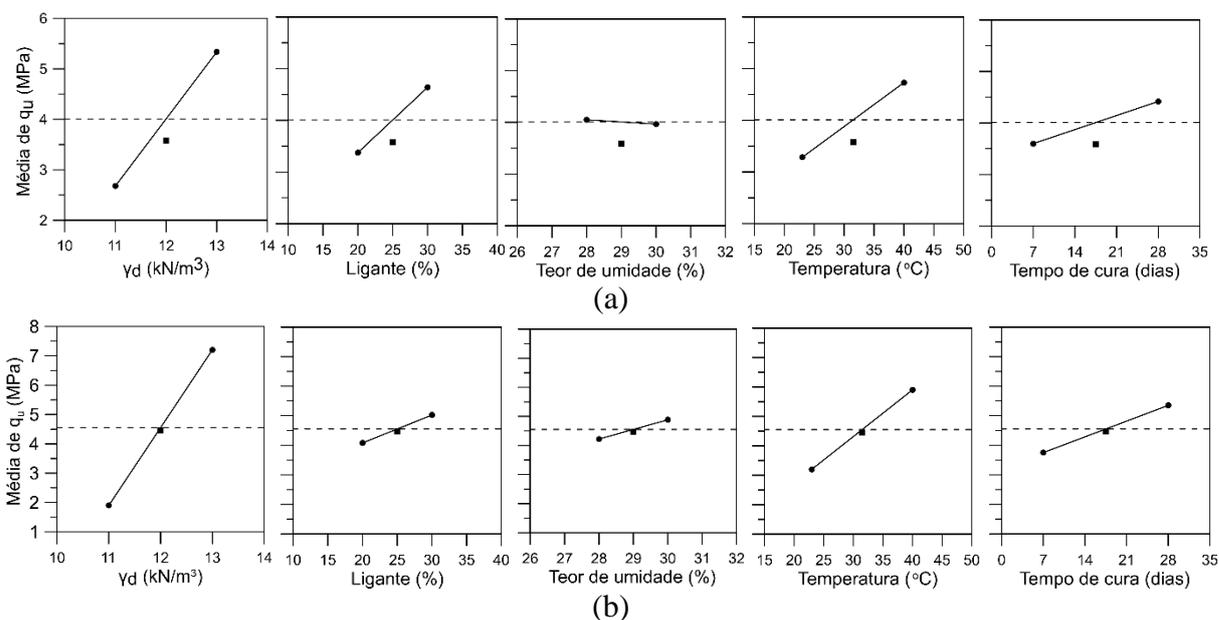
#### 4.2.1.1. Resistência à compressão simples

A Figura 45 apresenta os resultados de resistência à compressão simples (RCS) para os espécimes tratados com o ligante álcali-ativado e cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI). Estes resultados foram obtidos a partir da média simples da repetição de cada tratamento. A Figura 46 expõe o gráfico de Pareto para cada ligante. Neste gráfico, as barras horizontais representam a magnitude dos efeitos de cada fator principal e suas interações. As

barras representando fatores que possuem efeito significativo sobre a variável de resposta ( $q_u$ ), do maior ao menor efeito, ultrapassam a linha pontilhada, a qual corresponde ao teste F calculado para um nível de significância de 5%. Por fim, os gráficos de efeitos principais (de primeira ordem) com o respectivo ponto central são delineados na Figura 47. A inclinação da reta descreve a intensidade do efeito, i.e., uma maior inclinação corresponde a uma maior influência do fator. A linha pontilhada corresponde a resposta média dos ensaios executados. A ANOVA realizada a partir do design fatorial de cada ligante encontra-se no Apêndice C.

**Figura 45:** Resistência à compressão simples: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland



**Figura 46:** Gráfico de Pareto da RCS para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland**Figura 47:** Efeitos principais sobre  $q_u$ : (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland

O gráfico de barras da Figura 45 compara os valores médios de resistência dos ligantes. Nota-se que para amostras com menor peso específico o ligante álcali-ativado e o cimento Portland apresentaram valores semelhantes de resistência à compressão simples, havendo entre estes resultados superiores para a álcali-ativação (e.g. Figura 45a tratamentos 3, 5, 9, 13, 25, 27, 29 e 31). Maiores valores de  $q_u$  em amostras de cimento Portland relacionaram-se a um maior peso específico (13 kN/m<sup>3</sup>), maior temperatura (40°C) e tempo de cura (28 dias).

O gráfico de Pareto (Figura 46a) do ligante álcali-ativado indica que os fatores principais A (peso específico aparente seco), D (temperatura de cura), B (teor de ligante), E (tempo de cura) e a interação de segunda ordem AD (interação entre o peso específico e a temperatura de cura) possuem, nesta ordem, maior magnitude de influência sobre a resistência à compressão simples. O fator principal C (teor de umidade) não apresentou efeito significativo sobre a variável de resposta. Para o cimento Portland, o gráfico de Pareto (Figura 46b) indica que os fatores principais A (peso específico aparente seco) e D (temperatura de cura), a interação de segunda ordem AD (interação entre o peso específico e a temperatura de cura), e os fatores E (tempo de cura) e B (teor de ligante) possuem, nesta ordem, maior magnitude de influência sobre a resistência à compressão simples. O fator principal C (teor de umidade) apresentou efeito significativo sobre a variável de resposta para o cimento Portland.

Nota-se a partir dos resultados apresentados (Figura 45 e Figura 47) que um aumento no nível dos fatores controláveis peso específico, teor de ligante, temperatura de cura e tempo de cura levou a um aumento nos valores de resistência. O aumento de umidade ocasionou um aumento de resistência somente para o cimento Portland. Em ambos ligantes uma maior inclinação da reta foi observada para os efeitos principais peso específico e temperatura. Este comportamento corrobora a maior influência destes fatores sobre a resistência. Para o cimento Portland houve menor influência do teor de ligante sobre a resistência em comparação ao cimento álcali-ativado. Ainda, os pontos centrais representados na Figura 47 e o resultado significativo do fator curvatura na ANOVA (Apêndice C) para o ligante álcali-ativado evidenciam um comportamento não linear dos níveis dos fatores principais. Para o cimento Portland o fator curvatura foi não significativo.

A maior influência do peso específico aparente seco (A) em relação aos outros fatores controláveis é explicada pelo maior inter-travamento (i.e. maior mobilização de atrito entre partículas) entre as partículas de solo e ligante devido a um maior grau de compactação (CONSOLI, *et al.*, 2012; DA FONSECA; CRUZ; CONSOLI, 2009). O segundo fator de maior impacto na resistência foi a temperatura de cura (D), cujo aumento acelera as reações de hidratação do cimento Portland (KALETA-JUROWSKA; JUROWSKI, 2020) e as reações entre a CBCA, a COH e o ativador, gerando produtos de reação em menores períodos de tempo e, conseqüentemente, uma estrutura mais densa. A menores temperaturas, pastas álcali-ativadas ganham resistência mais lentamente (HANEHARA *et al.*, 2001; MUSTAFA AL BAKRIA *et al.*, 2011; PALOMO, Angel *et al.*, 2004). Em relação aos efeitos da temperatura de cura na mistura solo-ligante observa-se um efeito prático: uma base de pavimento estabilizada por

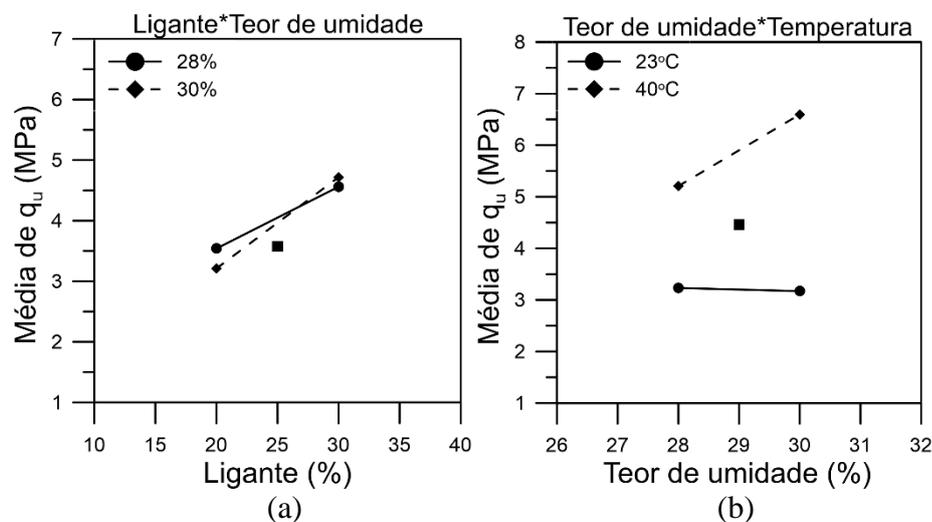
ambos ligantes alcança a altas temperaturas (i.e. no período de verão) a RCS mínima de 2,1 MPa requerida de uma base de pavimento solo-cimento a 7 dias de cura (DNIT, 2006).

O fator B (teor de ligante) foi o terceiro fator de maior efeito significativo para as misturas álcali-ativadas. Um maior teor de ligante ocasiona maior precipitação de compostos cimentícios (e.g. géis C-A-S-H e N-A-S-H) e aglutinação das partículas de solo, assim, maior rigidez e resistência são obtidas (SYED; GUHARAY; KAR, 2020; ZHANG *et al.*, 2013). Já para o cimento Portland, o terceiro fator de maior impacto foi a interação AD (peso específico e temperatura), devido a elevada influência da temperatura em amostras de maior peso específico, onde há maior área de contato entre partículas de solo e ligante. Assim, o aumento de temperatura acelera a formação de produtos de hidratação, e os silicatos hidratados enrijecem conectando os grãos do solo e do cimento.

O tempo de cura foi o quarto fator de maior influência na RCS de ambos ligantes. Um maior tempo de cura possibilita a ocorrência de reações pozolânicas ao longo do tempo. Assim, mais produtos de reação são gerados e maior resistência é alcançada (CLARE; POLLARD, 1954; CRIADO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2010). Por fim, o quinto fator de maior influência sobre a RCS foi a relação AD para o ligante álcali-ativado e o fator B para o cimento Portland. Este último teve menor influência sobre o cimento Portland visto que a adição de 20% de cimento resultou em RCS próximas às da estabilização com 30% do ligante.

O efeito do fator principal teor de umidade (C) foi significativo somente para o cimento Portland. Isso se deve ao papel principal da água nos processos de hidratação do cimento Portland, enquanto para o cimento álcali-ativado a água fornece um meio para que as reações ocorram e o geopolímero não hidrata (PARK; POUR-GHAZ, 2018). Entretanto, as interações BC e CD foram significativas para o cimento álcali-ativado, i.e., a interação da umidade com o teor de ligante e a temperatura, respectivamente, foi significativa. Para o cimento Portland as interações CD e AC são significativas, sendo AC a interação entre o peso específico aparente seco e o teor de umidade. As interações de segunda ordem BC (ligante álcali-ativado) e CD (cimento Portland), de maior magnitude de influência, são apresentados na Figura 48 para melhor visualização da interação do teor de umidade com outros fatores.

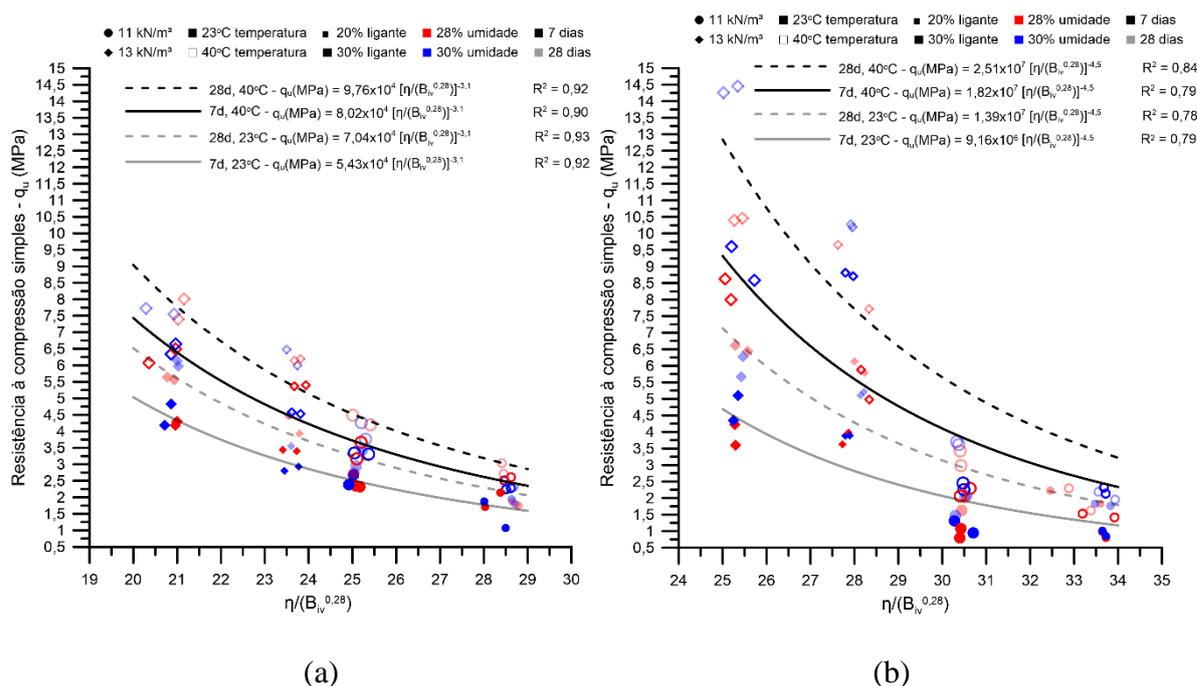
**Figura 48:** Gráficos de interações entre dois fatores: (a) BC para o ligante álcali-ativado (b) CD para o cimento Portland



Observa-se no gráfico de interação BC para o ligante álcali-ativado (Figura 48a) que o menor nível do ligante (20%) resulta em maior  $q_u$  para 28% de umidade enquanto o maior nível de ligante (30%) resulta em maior  $q_u$  para 30% de umidade. Isto pode ser explicado pela curva de Proctor (Figura 24), segundo a qual o teor de umidade ótimo para 20% de ligante é 28% e para 30% de ligante é 32%. Conforme o gráfico de interação CD (Figura 48b) para o cimento Portland um aumento de umidade ocasiona maior  $q_u$  para amostras curadas a 40°C e não causa variação significativa da RCS para amostras curadas a 23°C. Assim, há maior demanda de água após um aumento de temperatura e, conseqüentemente, da velocidade das reações de hidratação do cimento Portland.

A Figura 49 correlaciona os resultados de RCS para o cimento álcali-ativado e o cimento Portland ao índice porosidade/teor volumétrico de ligante ( $\eta/B_{iv}^{0,28}$ ). Para compatibilizar os efeitos entre porosidade e teor de ligante um expoente interno de 0,28 foi estabelecido, valor previamente utilizado por estudos que estabilizaram solos siltosos e argilosos (BRUSCHI, 2020; CONSOLI *et al.*, 2007, 2016, 2018a).

**Figura 49:** Relação entre  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  e RCS para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland



Conforme Figura 49 uma menor porosidade e um maior teor de ligante (i.e. menor valor de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ ) resultou em maior resistência à compressão simples. Uma menor porosidade, alcançada através de uma maior compactação, aumenta a área de contato entre as partículas de solo e ligante e leva a um maior inter-travamento destas, resultando em maior mobilização de atrito. Já o aumento no teor de ligante resulta em uma maior precipitação de compostos cimentícios e aumento de resistência. Em ambos ligantes houve um significativo aumento de RCS devido ao aumento do tempo de cura e da temperatura, especialmente para o último fator. Destaca-se que o cimento Portland apresentou aos 7 dias de cura ganho de resistência médio de 70% em relação à resistência aos 28 dias de cura. Esse valor é compatível com o ganho de resistência aos 7 dias de argamassas de cimento de alta resistência inicial, o qual pode variar entre 70-90% do ganho de resistência aos 28 dias de cura (CEMENT AUSTRALIA, 2011). Comparando-se o ligante álcali-ativado (Figura 49a) ao cimento Portland (Figura 49b) nota-se que os respectivos valores de resistência são próximos para amostras moldadas a 23°C (e.g. RCS próxima a 5 MPa para amostras de alta densidade/alto teor de ligante com 30% de teor de umidade). Com o aumento de temperatura o cimento Portland apresentou maiores valores de RCS. Assim, apesar de uma maior temperatura de cura resultar em maiores resistências para as amostras do cimento álcali-ativado, devido a uma aceleração das reações deste, as reações de hidratação do cimento ocorrem mais rapidamente a altas temperaturas e levam a uma maior precipitação de produtos de hidratação (gel C-S-H).

Coefficientes de determinação ( $R^2$ ) elevados foram encontrados entre a RCS e o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , o que indica a viabilidade do índice na previsão da RCS. Para o ligante álcali-ativado os coeficientes variaram de 0,90 a 0,93 (Equações 38 a 41), e para o cimento Portland a variação foi de 0,78 a 0,84 (Equações 42 a 45). Para o cimento Portland a equação de curva foi ajustada por um expoente externo de -4,5; enquanto o cimento álcali-ativado foi ajustado por um expoente de -3,1. Ambos expoentes resultaram em elevados coeficientes de determinação para o maior número de curvas em cada ligante. Ainda, houve a necessidade de uma maior inclinação para as curvas representando o cimento Portland, visto haver uma maior variação de resistência entre as amostras com menor peso específico e amostras mais densas (maior magnitude de influência do fator A no cimento Portland em relação ao cimento álcali-ativado, conforme Figura 46). Assim, as Equações 38 a 41 (ligante álcali-ativado) e as Equações 42 a 45 (cimento Portland) mostram que o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  mantém o mesmo formato de curva e expoentes em cada cimento estudado, apresentando somente escalares com valores distintos. De um ponto de vista prático um engenheiro pode selecionar a melhor opção para uma desejada RCS: alta densidade/baixo teor de ligante - ADBL e baixa densidade/alto teor de ligante - BDAL). Em um estudo envolvendo a estabilização de um solo dispersivo Da rocha *et al.* (2016) concluiu que menores impactos ambientais resultaram de uma dosagem ADBL para uma resistência alvo.

$$q_u(MPa)_{7 \text{ dias}-23^\circ C} = 5,43 \times 10^4 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,1} \quad R^2 = 0,92 \quad \text{Eq. 38}$$

$$q_u(MPa)_{28 \text{ dias}-23^\circ C} = 7,04 \times 10^4 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,1} \quad R^2 = 0,93 \quad \text{Eq. 39}$$

$$q_u(MPa)_{7 \text{ dias}-40^\circ C} = 8,02 \times 10^4 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,1} \quad R^2 = 0,90 \quad \text{Eq. 40}$$

$$q_u(MPa)_{28 \text{ dias}-40^\circ C} = 9,76 \times 10^4 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,1} \quad R^2 = 0,92 \quad \text{Eq. 41}$$

$$q_u(MPa)_{7 \text{ dias}-23^\circ C} = 9,16 \times 10^6 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,5} \quad R^2 = 0,79 \quad \text{Eq. 42}$$

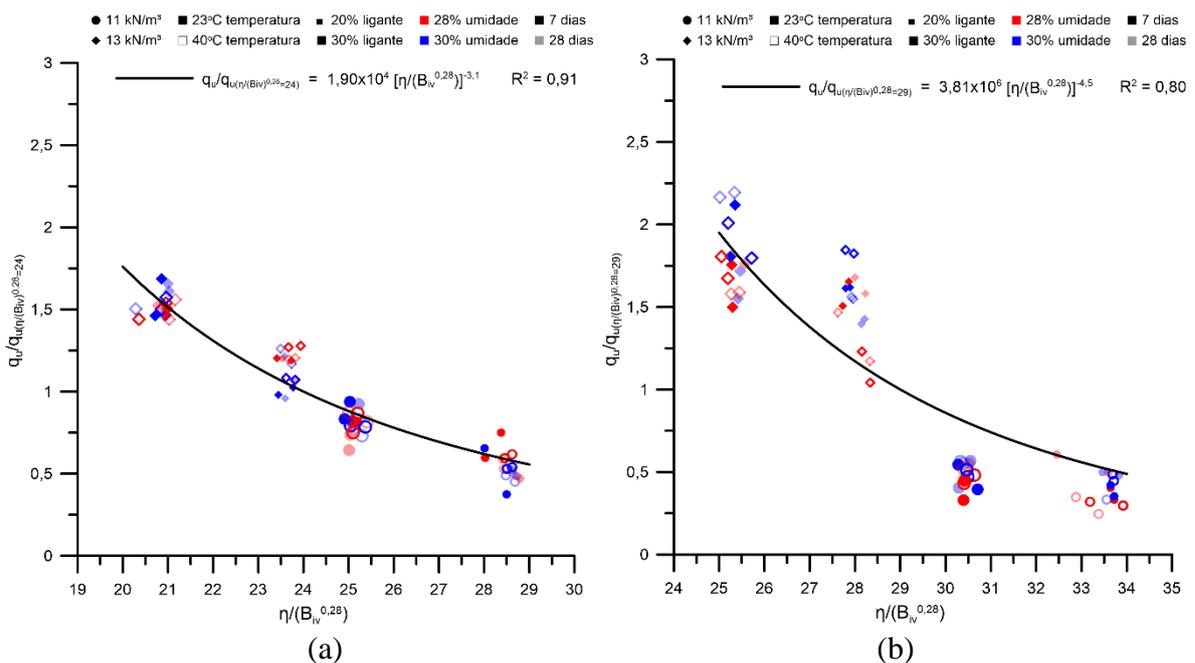
$$q_u(MPa)_{28 \text{ dias}-23^{\circ}C} = 1,39 \times 10^7 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,5} \quad R^2 = 0,78 \quad \text{Eq. 43}$$

$$q_u(MPa)_{7 \text{ dias}-40^{\circ}C} = 1,82 \times 10^7 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,5} \quad R^2 = 0,79 \quad \text{Eq. 44}$$

$$q_u(MPa)_{28 \text{ dias}-40^{\circ}C} = 2,51 \times 10^7 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,5} \quad R^2 = 0,84 \quad \text{Eq. 45}$$

Para generalizar a relação entre resistência à compressão simples ( $q_u$ ) e o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  um procedimento de normalização foi realizado. Assim, para o ligante álcali-ativado os valores de resistência foram divididos por um valor particular de  $q_u$  (correspondente a  $\eta/B_{iv}^{0,28} = 24$ ), resultando na Equação 46 e na Figura 50a. Para o cimento Portland os valores de resistência foram divididos por um valor particular de  $q_u$  (correspondente a  $\eta/B_{iv}^{0,28} = 29$ ), resultando na Equação 47 e Figura 50b. Os valores de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  utilizados na normalização foram escolhidos por estarem em uma posição central dentre os valores de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  plotados. O procedimento de normalização e a obtenção de elevados valores de  $R^2$  (0,92 para o ligante álcali-ativado e 0,81 para o cimento Portland) demonstram que é possível traçar uma única curva para relacionar o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  à RCS, independente do tempo e temperatura de cura, para os dois ligantes estudados.

**Figura 50:** Relação normalizada de RCS para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland



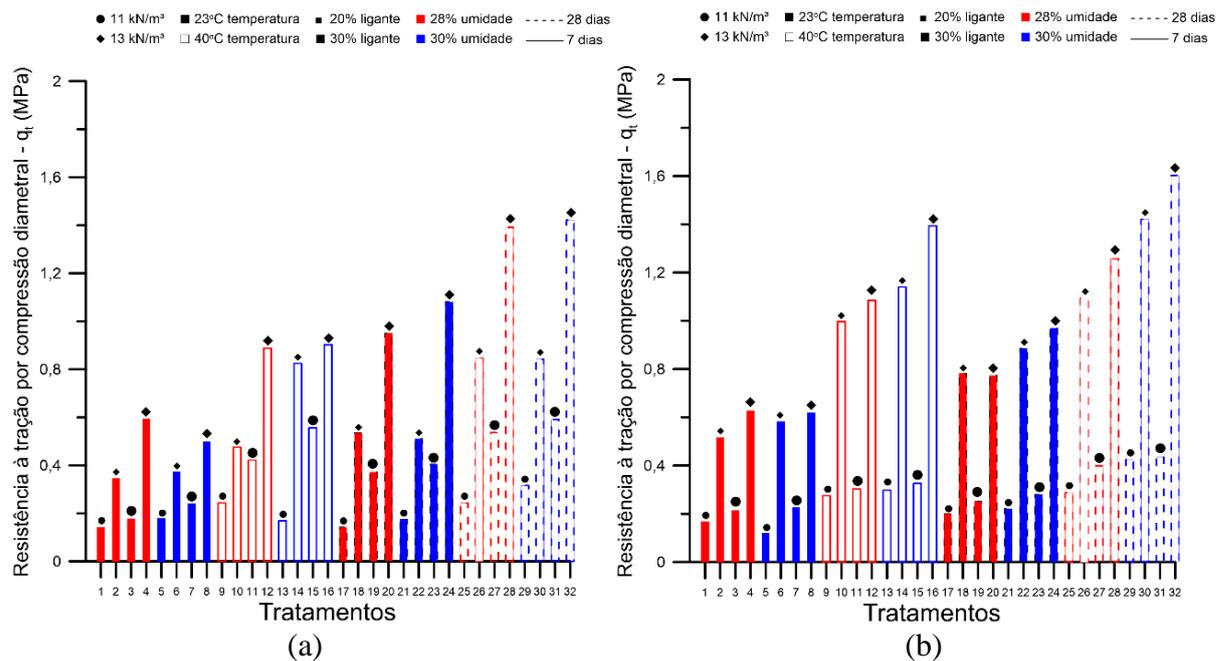
$$\frac{q_u}{q_u\left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}}=24\right)} = 1,90 \times 10^4 \left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}}\right)^{-3,1} \quad R^2 = 0,91 \quad \text{Eq. 46}$$

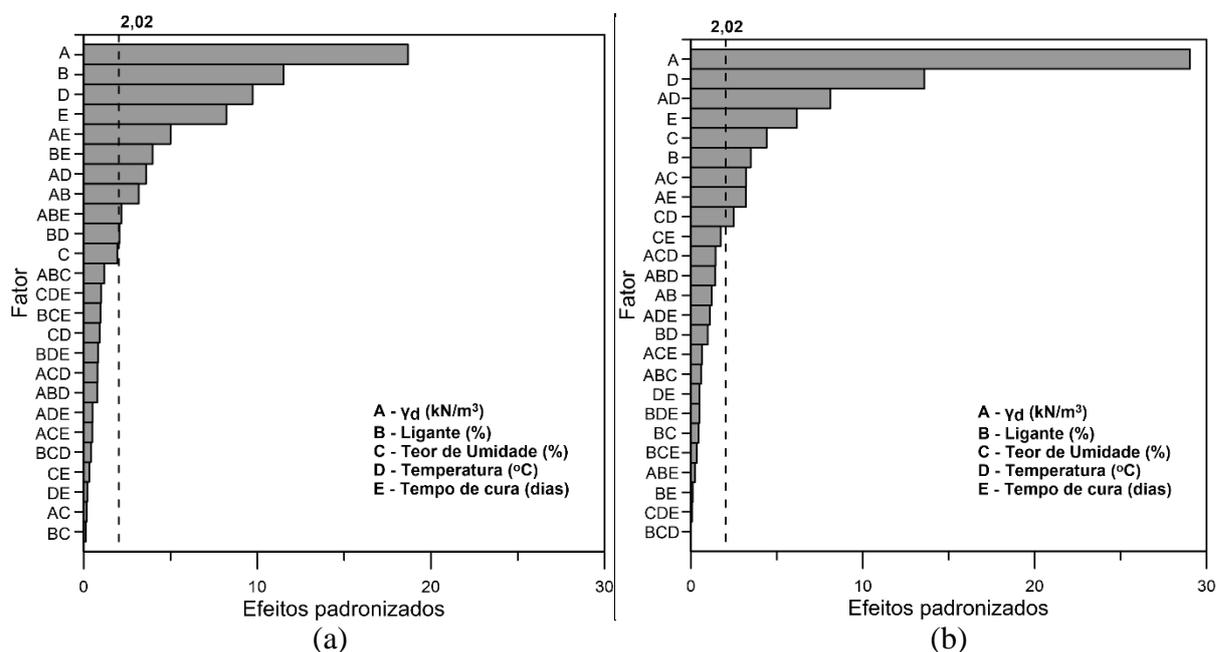
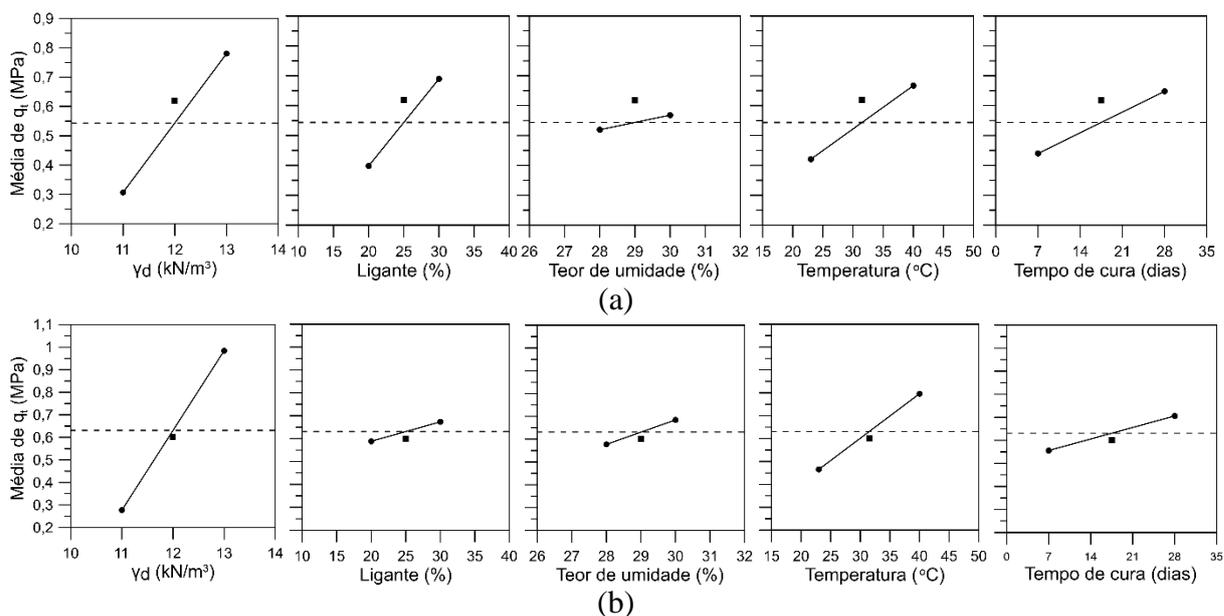
$$\frac{q_u}{q_u\left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}}=29\right)} = 3,81 \times 10^6 \left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}}\right)^{-4,5} \quad R^2 = 0,80 \quad \text{Eq. 47}$$

#### 4.2.1.2. Resistência à tração por compressão diametral

A Figura 51 apresenta os resultados de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) para os espécimes tratados com o ligante álcali-ativado e cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI). A Figura 52 e a Figura 53 expõe o gráfico de Pareto e os gráficos de efeitos principais com o respectivo ponto central, respectivamente. A ANOVA realizada a partir do design fatorial encontra-se no Apêndice C.

**Figura 51:** Resistência à tração por compressão diametral: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland



**Figura 52:** Gráfico de Pareto da RTCD para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland**Figura 53:** Efeitos principais sobre  $q_t$ : (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland

Os gráficos de barras representados na Figura 51 permitem comparar os valores médios de resistência à tração por compressão diametral. Em conformidade com o observado para os resultados de RCS, para amostras de menor peso específico o ligante álcali-ativado e o cimento Portland apresentaram valores semelhantes de resistência à tração por compressão diametral. Da mesma forma, maiores valores de  $q_t$  em amostras de cimento Portland destacaram-se para o maior peso específico estudado (13 kN/m<sup>3</sup>), temperatura mais alta (40°C) e maior tempo de cura (28 dias). Ainda, em amostras de cimento Portland foi observada uma maior influência da

umidade sobre a variável de resposta  $q_t$  quando comparada a influência deste fator na RCS (Figura 45).

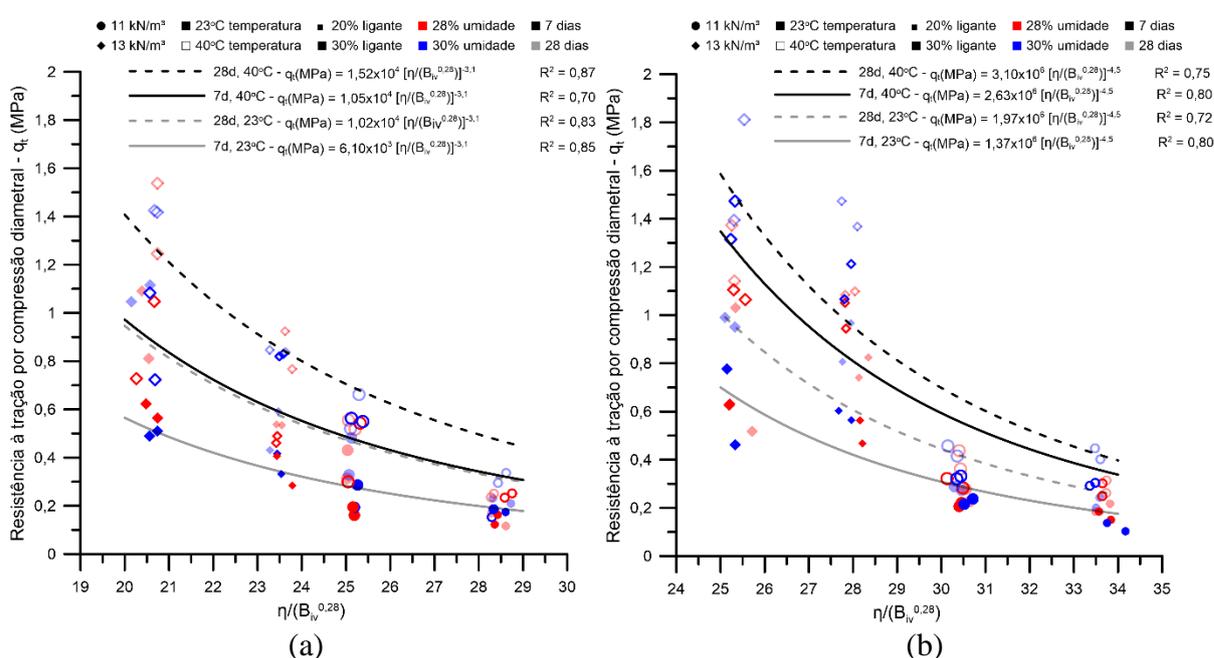
De acordo com o gráfico de Pareto (Figura 52a), em amostras com uso do ligante álcali-ativado os fatores principais A (peso específico aparente seco), B (teor de ligante), D (temperatura de cura), E (tempo de cura) e a interação de segunda ordem AE (interação entre o peso específico e o tempo de cura) possuem, nesta ordem, maior magnitude de influência sobre a resistência à tração por compressão diametral. O fator principal C (teor de umidade) não apresentou efeito significativo sobre  $q_t$ . Para o cimento Portland, o gráfico de Pareto (Figura 52b) indica que os fatores principais A (peso específico aparente seco) e D (temperatura de cura), a interação de segunda ordem AD (interação entre o peso específico e a temperatura de cura), e os fatores E (tempo de cura) e C (teor de umidade) possuem, nesta ordem, maior magnitude de influência sobre a resistência à tração por compressão diametral. O fator principal B encontra-se logo abaixo do teor de umidade em magnitude de influência para amostras de cimento Portland. Conforme Figura 53 um aumento no nível de todos os fatores controláveis resultou em um aumento no valor médio de resistência. Observa-se uma maior inclinação da reta para os efeitos principais peso específico e temperatura em ambos ligantes, devido a maior influência destes fatores sobre a resistência. Para o cimento Portland houve menor influência do teor de ligante sobre a resistência em comparação ao cimento álcali-ativado, evidenciado pela menor inclinação da reta do ligante. Os pontos centrais representados e o resultado não significativo do fator curvatura na ANOVA (Apêndice C) evidenciam um comportamento linear dos níveis dos fatores principais.

Em consonância com o comportamento observado para a resistência à compressão simples, o fator A (peso específico aparente seco) possuiu maior magnitude de influência sobre a variável de resposta (RTCD) tanto para o ligante álcali-ativado quanto para o cimento Portland, devido ao maior inter-travamento entre as partículas e maior área de contato para o desenvolvimento de reações no sistema solo-ligante. Para amostras álcali-ativadas, o teor de ligante (B) apresentou maior influência sobre a resistência à tração por compressão diametral do que a temperatura, ainda, a interação entre os fatores AE (peso específico aparente seco e tempo de cura) apresentou maior influência na RTCD do que a interação AD (peso específico aparente seco e temperatura de cura); comportamento contrário foi observado em amostras de RCS. No que tange o cimento Portland, a diferença entre os fatores com maior magnitude de influência sobre a resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral está no teor de umidade (C), quinto fator de maior influência na RTCD. Para a RCS o quinto fator

de maior influência foi o teor de ligante (B). Dessa forma, a influência da umidade, necessária ao desenvolvimento das reações de hidratação do cimento Portland, é maior nas amostras de RTCD. O teor de umidade por sua vez não foi significativo para amostras do ligante álcali-ativado, bem como a interação deste fator com os outros fatores.

A Figura 54 relaciona os resultados de resistência à tração por compressão diametral para o cimento álcali-ativado e o cimento Portland ao índice porosidade/teor volumétrico de ligante ( $\eta/B_{iv}^{0,28}$ ).

**Figura 54:** Relação entre  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  e RTCD para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland



Observa-se na Figura 54 que um menor valor de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  ocasionou um aumento na resistência à tração por compressão diametral. Conforme analisado na RCS uma maior compactação (i.e., redução da porosidade) aumenta a área de contato entre as partículas de solo e ligante e resulta em maior mobilização de atrito. Ainda, o aumento no teor de ligante leva a uma maior precipitação de compostos cimentícios e aumento de resistência. Em ambos ligantes há um significativo aumento de RCS devido a uma maior temperatura e tempo de cura. Para amostras de cimento álcali-ativado o aumento da temperatura de cura para 40°C resultou em maiores valores de resistência à tração por compressão diametral a 7 dias de cura em relação a amostras curadas a 23°C por 28 dias. Igual ao observado para amostras de RCS, a 23°C os valores de resistência foram próximos para ambos ligantes (e.g. RTCD próxima a 0,6 MPa para amostras de alta densidade/alto teor de ligante com 28% de teor de umidade). Para amostras moldadas a 40°C o cimento Portland apresentou maiores valores de RTCD.

Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) significativos foram encontrados relacionando-se os dados experimentais e o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , o que indica a viabilidade do índice na previsão da RTCD. Para o cimento álcali-ativado os coeficientes variaram de 0,70 a 0,87 (Equações 48 a 51). Já no cimento Portland a variação foi de 0,72 a 0,80 (Equações 52 a 55). As curvas foram ajustadas por um expoente externo de -3,1 para o cimento álcali-ativado e por um expoente de -4,5 para o cimento Portland, devido a necessidade de uma maior inclinação para as curvas representando o cimento Portland. As Equações 48 a 51 (ligante álcali-ativado) e as Equações 52 a 55 (cimento Portland) mostram que o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  mantém o mesmo formato de curva e expoentes em cada cimento estudado, apresentando somente escalares com valores distintos.

$$q_t(MPa)_{7 \text{ dias}-23^\circ C} = 6,10 \times 10^3 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,1} \quad R^2 = 0,85 \quad \text{Eq. 48}$$

$$q_t(MPa)_{28 \text{ dias}-23^\circ C} = 1,02 \times 10^4 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,1} \quad R^2 = 0,83 \quad \text{Eq. 49}$$

$$q_t(MPa)_{7 \text{ dias}-40^\circ C} = 1,05 \times 10^4 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,1} \quad R^2 = 0,70 \quad \text{Eq. 50}$$

$$q_t(MPa)_{28 \text{ dias}-40^\circ C} = 1,52 \times 10^4 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,1} \quad R^2 = 0,87 \quad \text{Eq. 51}$$

$$q_t(MPa)_{7 \text{ dias}-23^\circ C} = 1,37 \times 10^6 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,5} \quad R^2 = 0,80 \quad \text{Eq. 52}$$

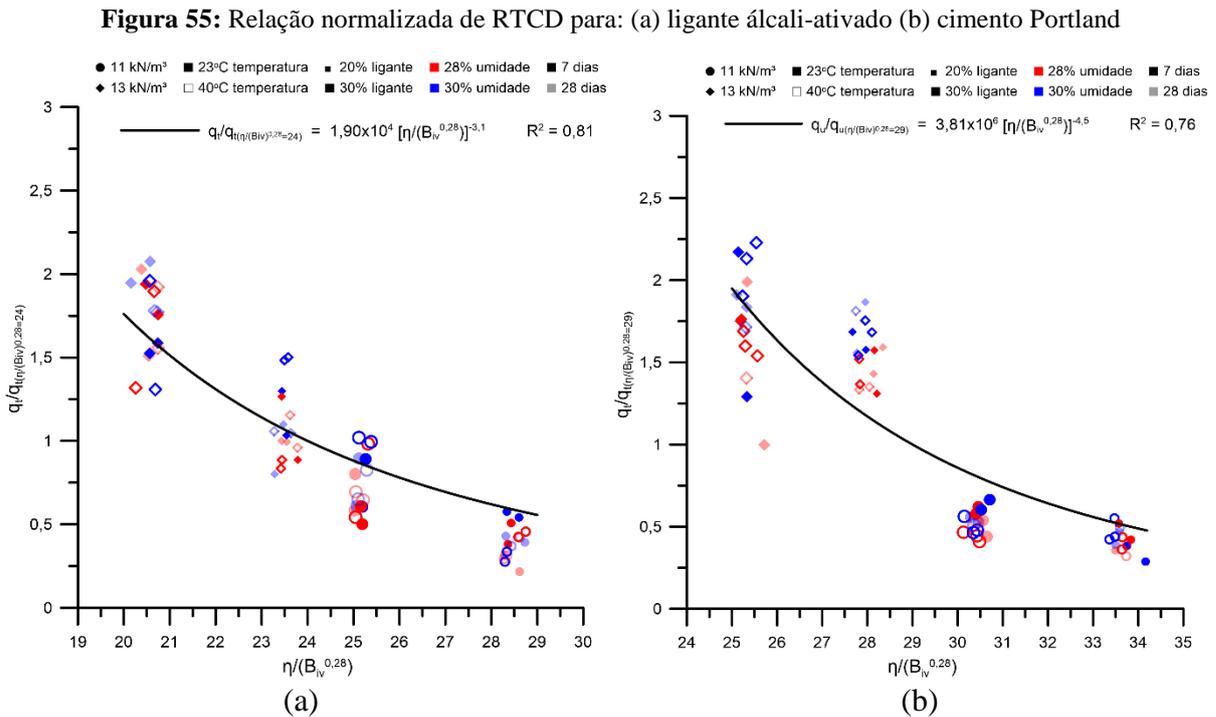
$$q_t(MPa)_{28 \text{ dias}-23^\circ C} = 1,97 \times 10^6 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,5} \quad R^2 = 0,72 \quad \text{Eq. 53}$$

$$q_t(MPa)_{7 \text{ dias}-40^\circ C} = 2,63 \times 10^6 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,5} \quad R^2 = 0,80 \quad \text{Eq. 54}$$

$$q_t(MPa)_{28 \text{ dias}-40^\circ C} = 3,10 \times 10^6 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,5} \quad R^2 = 0,75 \quad \text{Eq. 55}$$

A Figura 55 apresenta o processo de normalização realizado para generalizar a relação entre resistência à tração por compressão diametral e o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para diferentes tempos de cura e temperaturas. Assim, para o ligante álcali-ativado os valores de resistência foram divididos

por um valor particular de  $q_t$  central às curvas da Figura 54 (correspondente a  $\eta/B_{iv}^{0,28} = 24$ ), resultando na Equação 56 e na Figura 55a. Para o cimento Portland os valores de resistência foram divididos por um valor de  $q_t$  correspondente a  $\eta/B_{iv}^{0,28} = 29$ , resultando na Equação 57 e Figura 55b. Valores significativos de  $R^2$  foram obtidos para o procedimento de normalização (0,81 para o ligante álcali-ativado e 0,76 para o cimento Portland).

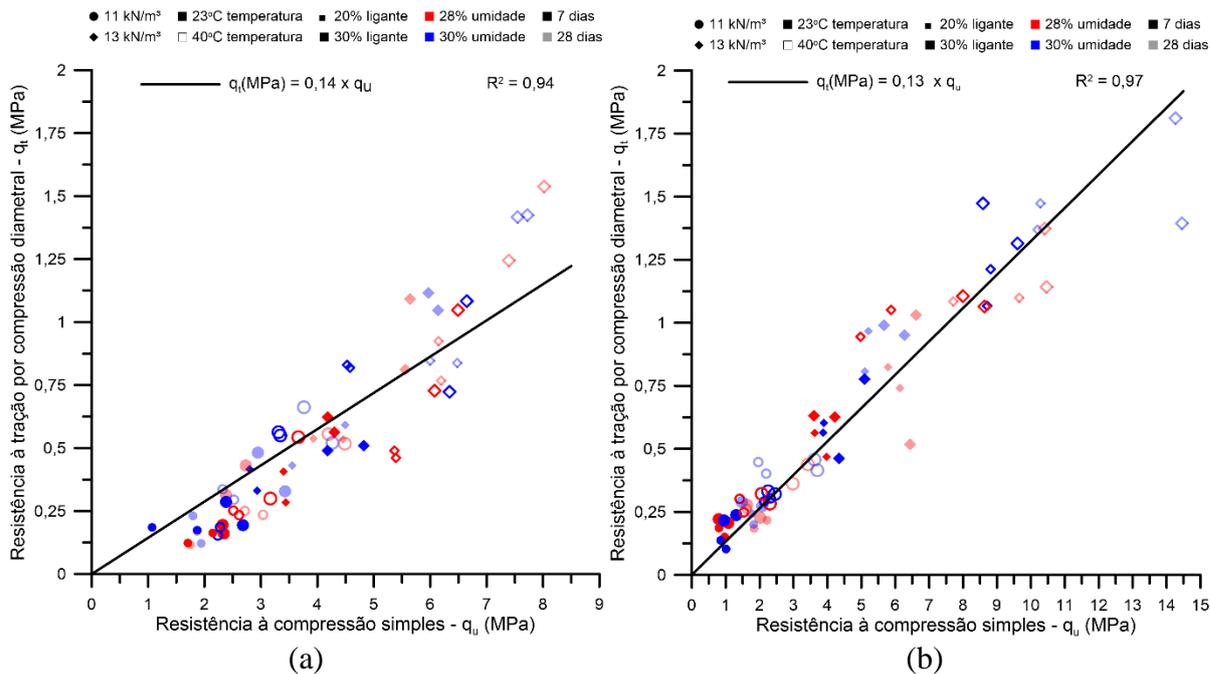


$$\frac{q_t}{q_{t(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}}=24)}} = 1,90 \times 10^4 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,1} \quad R^2 = 0,81 \quad \text{Eq. 56}$$

$$\frac{q_t}{q_{t(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}}=29)}} = 3,81 \times 10^6 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,5} \quad R^2 = 0,76 \quad \text{Eq. 57}$$

A partir dos resultados encontrados para a resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral foi possível estabelecer uma relação entre  $q_u$  e  $q_t$ . Assim, de acordo com a Figura 56  $q_t$  correspondeu a 14% de  $q_u$  para o cimento álcali-ativado (Equação 58) e 13% de  $q_u$  (Equação 59) para o cimento Portland. Esses valores são similares a valores previamente encontrados na literatura (CONSOLI, 2021a). O elevado valor de  $R^2$  (0,94 e 0,97 para os ligantes alternativo e tradicional, respectivamente) permite a previsão da RTCD a partir de valores de RCS.

**Figura 56:** Relação entre  $q_u$  e  $q_t$  para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland



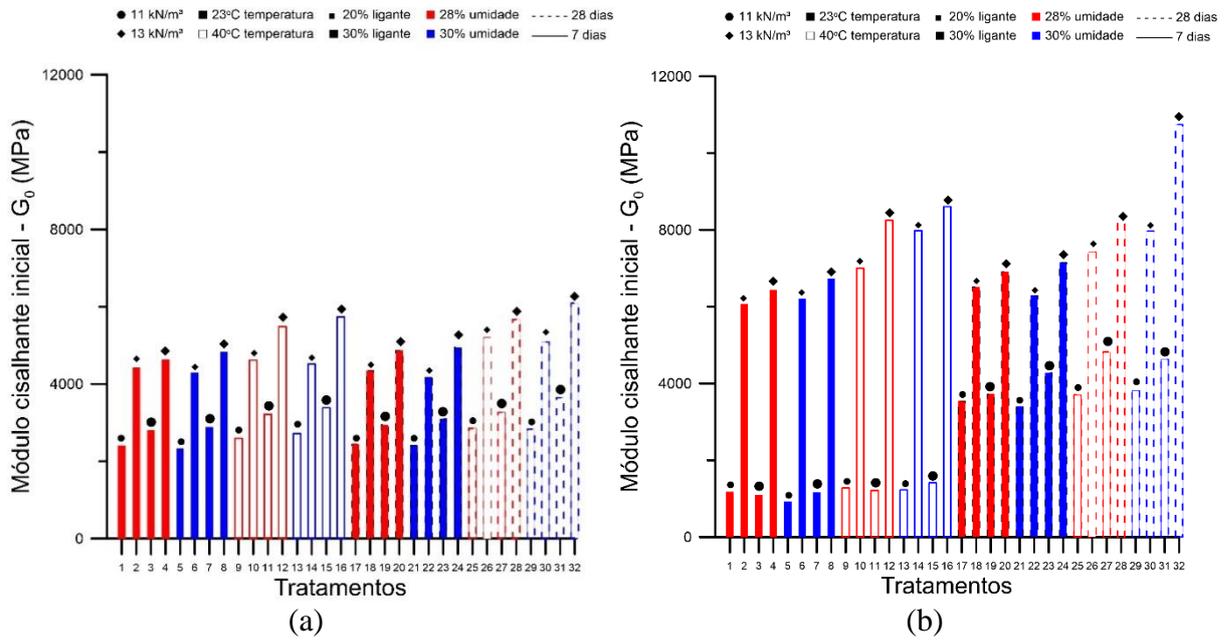
$$q_t (\text{MPa}) = 0,14 \times q_u \quad R^2 = 0,94 \quad \text{Eq. 58}$$

$$q_t (\text{MPa}) = 0,13 \times q_u \quad R^2 = 0,97 \quad \text{Eq. 59}$$

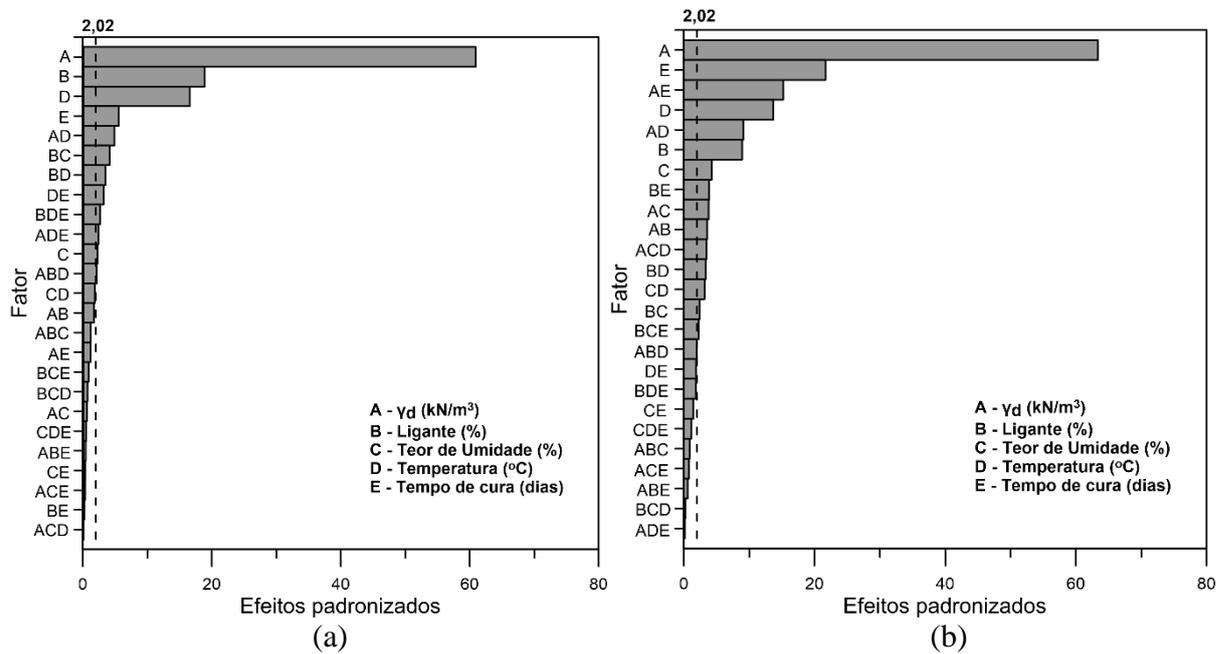
#### 4.2.1.3. Módulo cisalhante inicial

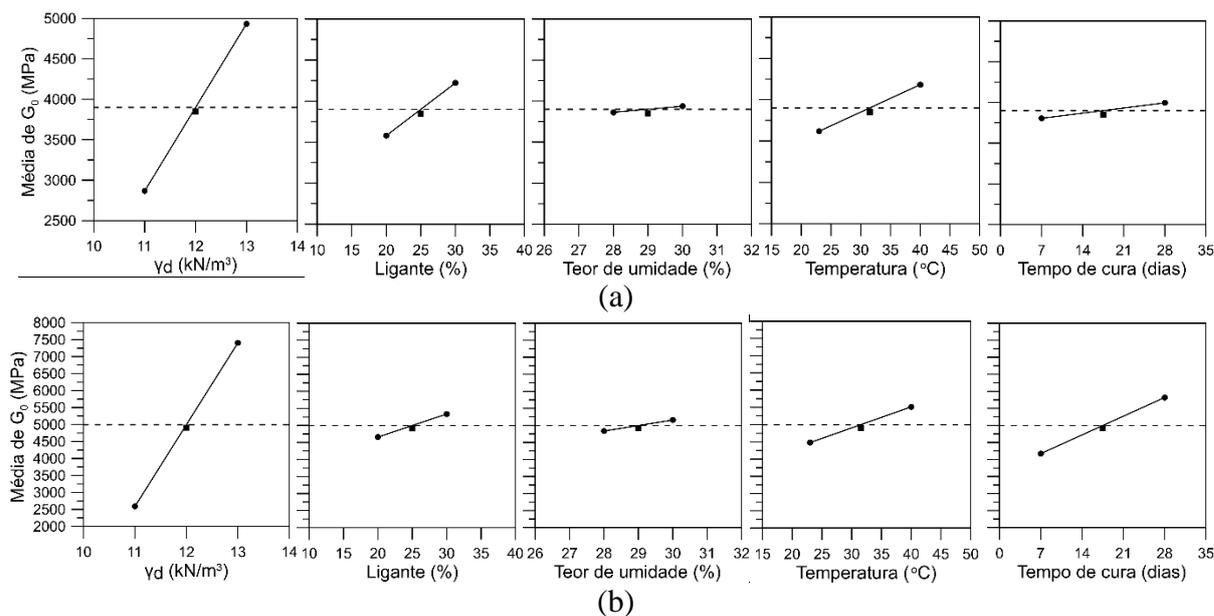
A Figura 57 apresenta os resultados de módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ) para os espécimes tratados com o ligante álcali-ativado e cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI). A Figura 58 e a Figura 59 expõe o gráfico de Pareto e os gráficos de efeitos principais com o respectivo ponto central, respectivamente. A ANOVA realizada a partir do design fatorial encontra-se no Apêndice C.

**Figura 57:** Módulo cisalhante inicial: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland



**Figura 58:** Gráfico de Pareto de G<sub>0</sub> para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland



**Figura 59:** Efeitos principais sobre  $G_0$ : (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland

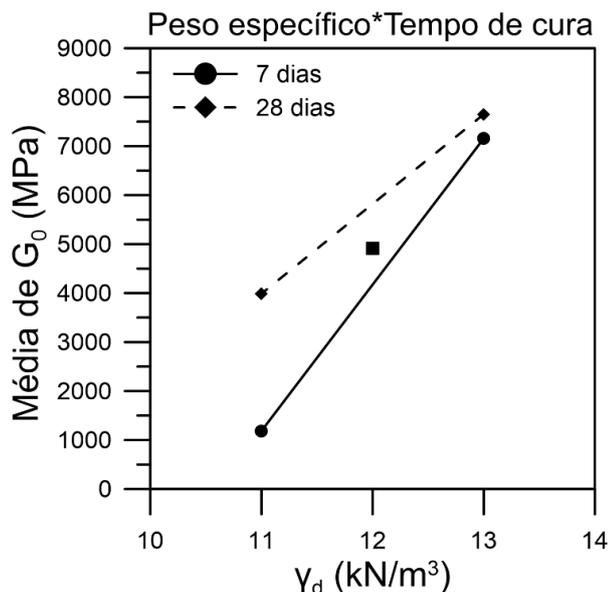
Os gráficos de barras representados na Figura 57 permitem analisar os valores médios de módulo cisalhante inicial. Observa-se que o ligante álcali-ativado apresentou rigidez superior a o cimento Portland para amostras com menor peso específico e 7 dias de cura. Isto se deve à moldagem de amostras de cimento nos mesmos níveis de fatores controláveis das amostras álcali-ativadas, i.e., com um teor de umidade inferior ao ideal. Assim, amostras de cimento de baixa densidade curadas por 7 dias possuíam mais poros, visto que as reações de hidratação consumiram a água disponível e produtos de hidratação ainda estavam sendo produzidos. Entretanto, um maior tempo de cura elevou os valores de rigidez para o cimento Portland, ocasionando valores de  $G_0$  superiores aos do cimento álcali-ativado para as duas densidades avaliadas.

De acordo com o gráfico de Pareto (Figura 58a), em amostras com uso do ligante álcali-ativado os fatores principais A (peso específico aparente seco), B (teor de ligante), D (temperatura de cura), E (tempo de cura) e a interação de segunda ordem AD (interação entre o peso específico e a temperatura de cura) possuem, nesta ordem, maior magnitude de influência sobre o módulo cisalhante inicial. O fator principal C (teor de umidade) apresentou efeito significativo sobre  $G_0$  para o cimento álcali-ativado, comportamento não observado previamente para as amostras de RCS e RTCD. Para o cimento Portland, o gráfico de Pareto (Figura 58b) indica que os fatores principais A (peso específico aparente seco) e E (tempo de cura), a interação de segunda ordem AE (interação entre o peso específico e tempo de cura), o fator D (temperatura de cura) e a interação de segunda ordem AD (interação entre o peso específico e a temperatura de cura)

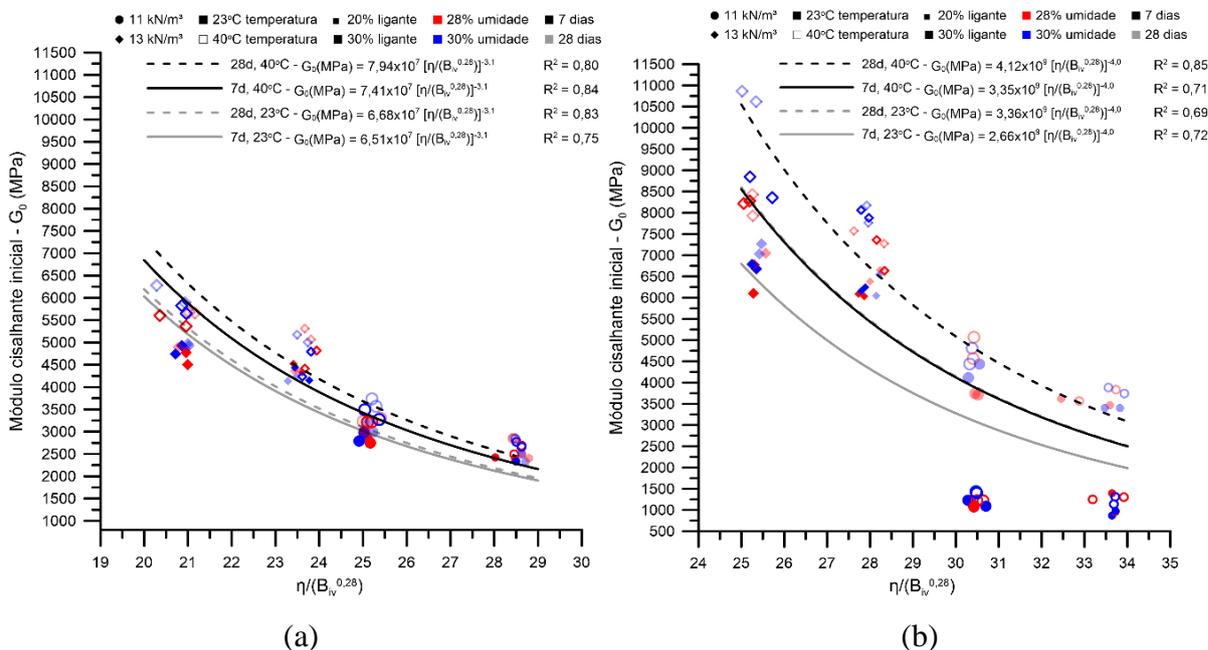
possuem, nesta ordem, maior magnitude de influência sobre o módulo cisalhante inicial. Os fatores principais B e C encontram-se logo abaixo da interação AD em magnitude de influência para amostras de cimento Portland.

A Figura 59 evidencia que um aumento no nível dos fatores controláveis ocasionou um aumento nos valores de rigidez. Como previamente observado para a RCS e RTCD, uma maior inclinação da reta para os efeitos principais peso específico e temperatura em ambos ligantes denota uma maior influência destes fatores. Os pontos centrais e o resultado não significativo do fator curvatura na ANOVA (Apêndice C) evidenciam um comportamento linear dos níveis dos fatores principais.

Em conformidade ao observado para a resistência à compressão simples e diametral o fator A (peso específico aparente seco) possuiu maior magnitude de influência sobre a variável de resposta ( $G_0$ ) em ambos ligantes. Para amostras álcali-ativadas, os quatro fatores de maior magnitude de influência sobre  $G_0$  são os mesmos da RTCD. Para o cimento Portland, é observado um comportamento distinto na rigidez em relação a RCS e RTCD: o segundo fator de maior influência para o módulo cisalhante inicial foi o tempo de cura (E) e o terceiro a interação AE (interação entre o peso específico e o tempo de cura). Este comportamento deve-se a menor rigidez de amostras menos densas curadas a 7 dias e maior rigidez de amostras curadas a 28 dias. A interação AE (peso específico aparente seco e tempo de cura, Figura 60) para o cimento Portland apresentou um comportamento interessante: um aumento do nível do fator A (i.e. de  $11 \text{ kN/m}^3$  para  $13 \text{ kN/m}^3$ ) resultou em valores de rigidez muito próximos para os dois tempos de cura analisados (7e 28 dias). Assim, amostras de cimento Portland mais densas apresentaram menor variação da sua rigidez ao longo do tempo.

**Figura 60:** Gráfico da interação entre dois fatores AE para o cimento Portland

A Figura 61 apresenta os resultados do módulo cisalhante inicial para o cimento álcali-ativado e o cimento Portland em função do índice porosidade/teor volumétrico de ligante ( $\eta/B_{iv}^{0,28}$ ).

**Figura 61:** Relação entre  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  e  $G_0$  para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland

Conforme Figura 61 um menor valor de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  resultou em maior rigidez. Assim, igual ao observado para a RCS e RTCD, uma maior compactação aumenta a área de contato entre as partículas de solo e ligante e o aumento no teor de ligante leva a uma maior precipitação de compostos cimentícios, como consequência, há aumento de rigidez. Para o cimento álcali-ativado (Figura 61a) os valores de rigidez foram bastante próximos para 7 e 28 dias de cura em

ambas temperaturas, em especial para amostras curadas a 23°C. Este comportamento é representado pela menor inclinação da reta correspondente ao fator principal tempo de cura na Figura 59a. Entretanto, um aumento de temperatura levou a maiores valores de  $G_0$ . Já para o cimento Portland (Figura 61b) tanto um aumento no tempo de cura quanto um aumento de temperatura resultaram em variação significativa do módulo cisalhante inicial. Nota-se para amostras curadas a 7 dias que o aumento da temperatura de cura para 40°C resultou em valores próximos de rigidez em relação a amostras de cimento Portland curadas a 23°C por 28 dias. Como observado anteriormente, menores valores de rigidez para o cimento Portland em amostras de menor peso específico e 7 dias de cura são visualizados no canto inferior direito da Figura 61b. Com exceção destas amostras o cimento Portland apresentou maiores valores de módulo cisalhante inicial em relação ao cimento álcali-ativado.

Coefficientes de determinação ( $R^2$ ) significativos foram encontrados entre os dados experimentais e o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  evidenciando a viabilidade do índice na previsão da rigidez. Para o cimento álcali-ativado os coeficientes variaram de 0,75 a 0,84 (Equações 60 a 63). Já no cimento Portland a variação foi de 0,69 a 0,85 (Equações 64 a 67). As curvas foram ajustadas por um expoente externo de -3,1 para o cimento álcali-ativado e por um expoente de -4,0 para o cimento Portland. Estas equações mostram que o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  mantém o mesmo formato de curva e expoentes em cada cimento estudado, apresentando somente escalares com valores distintos.

$$G_0(MPa)_{7 \text{ dias}-23^\circ C} = 6,51 \times 10^7 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,1} \quad R^2 = 0,75 \quad \text{Eq. 60}$$

$$G_0(MPa)_{28 \text{ dias}-23^\circ C} = 6,68 \times 10^7 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,1} \quad R^2 = 0,83 \quad \text{Eq. 61}$$

$$G_0(MPa)_{7 \text{ dias}-40^\circ C} = 7,41 \times 10^7 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,1} \quad R^2 = 0,84 \quad \text{Eq. 62}$$

$$G_0(MPa)_{28 \text{ dias}-40^\circ C} = 7,94 \times 10^7 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,1} \quad R^2 = 0,80 \quad \text{Eq. 63}$$

$$G_0(MPa)_{7 \text{ dias}-23^\circ C} = 2,66 \times 10^9 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,0} \quad R^2 = 0,72 \quad \text{Eq. 64}$$

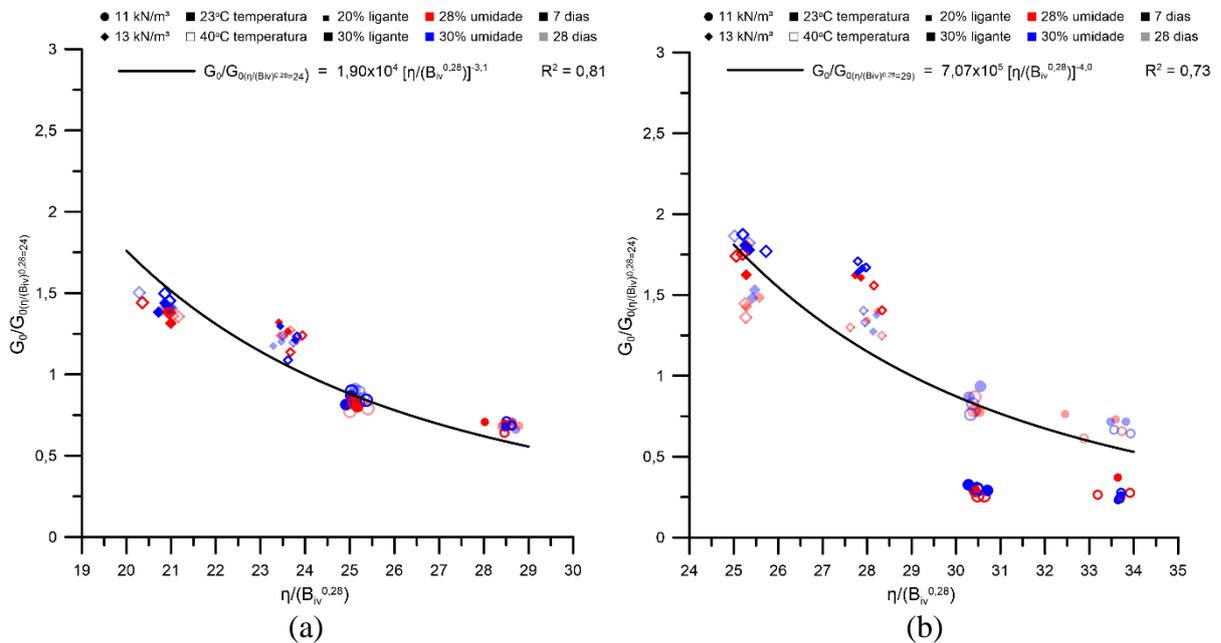
$$G_0(MPa)_{28 \text{ dias}-23^\circ C} = 3,36 \times 10^9 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,0} \quad R^2 = 0,69 \quad \text{Eq. 65}$$

$$G_0(MPa)_{7 \text{ dias}-40^\circ C} = 3,35 \times 10^9 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,0} \quad R^2 = 0,71 \quad \text{Eq. 66}$$

$$G_0(MPa)_{28 \text{ dias}-40^\circ C} = 4,12 \times 10^9 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,0} \quad R^2 = 0,85 \quad \text{Eq. 67}$$

A Figura 62 generaliza a relação entre o módulo cisalhante inicial e o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , para diferentes tempos de cura e temperaturas, por meio de uma normalização realizada para cada ligante. Para o ligante álcali-ativado os valores de rigidez foram divididos por um valor particular de  $G_0$  central às curvas da Figura 61 (correspondente a  $\eta/B_{iv}^{0,28} = 24$ ), resultando na Equação 68 e na Figura 62a. Para o cimento Portland os valores de rigidez foram divididos por um valor de  $G_0$  correspondente a  $\eta/B_{iv}^{0,28} = 29$ , resultando na Equação 69 e Figura 62b. Valores significativos de  $R^2$  foram obtidos para o procedimento de normalização (0,81 para o ligante álcali-ativado e 0,73 para o cimento Portland).

**Figura 62:** Relação normalizada de  $G_0$  para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland



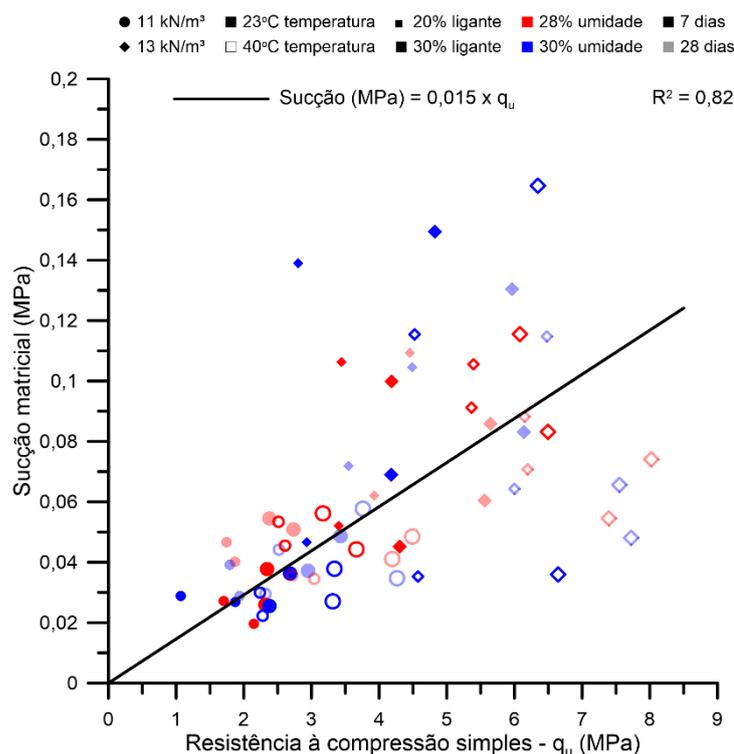
$$\frac{G_0}{G_0\left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}=24}\right)} = 1,90 \times 10^4 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,1} \quad R^2 = 0,81 \quad \text{Eq. 68}$$

$$\frac{G_0}{G_0 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} - 29 \right)} = 7,07 \times 10^5 \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-4,0} \quad R^2 = 0,73 \quad \text{Eq. 69}$$

#### 4.2.1.4. Sucção matricial

Os resultados dos ensaios de sucção matricial encontram-se no Apêndice D. Observa-se nas tabelas relativas ao ligante álcali-ativado uma saturação inicial das amostras entre 54% e 87% (média de 70%) e uma saturação final, após a imersão, entre 87% e 100% (média de 95%). Para o cimento Portland houve uma saturação inicial entre 53% e 83% (média de 67%) e uma saturação final entre 70% e 93% (média de 84%). A saturação final justifica a imersão das amostras em água por um período de 24h: uma maior saturação reduz os efeitos de sucção. Ainda, para o ligante álcali-ativado os valores de sucção das amostras variaram de 20 kPa a 165 kPa (média de 62 kPa), o que correspondeu, respectivamente, a 0,5% e 3,75% da resistência à compressão simples. Já para o cimento Portland, os valores de sucção variaram de 0,27 kPa a 167 kPa (média de 15 kPa), correspondendo a 0,03% e 1,74%, respectivamente, da resistência à compressão simples. Estes valores estão em acordo com Foppa (2005), segundo o qual solos compactados próximos a umidade ótima apresentam saturação entre 70% e 90% e valores de sucção entre 30 kPa e 250 kPa. Ainda, a baixa contribuição percentual da sucção em relação a resistência à compressão simples das amostras permite que seus efeitos sejam desconsiderados.

Conforme Figura 63 a sucção para o ligante álcali-ativado correspondeu a 1,5% de  $q_u$ . Para o cimento Portland não foi possível obter-se um bom ajuste linear devido a grande dispersão dos valores de sucção.

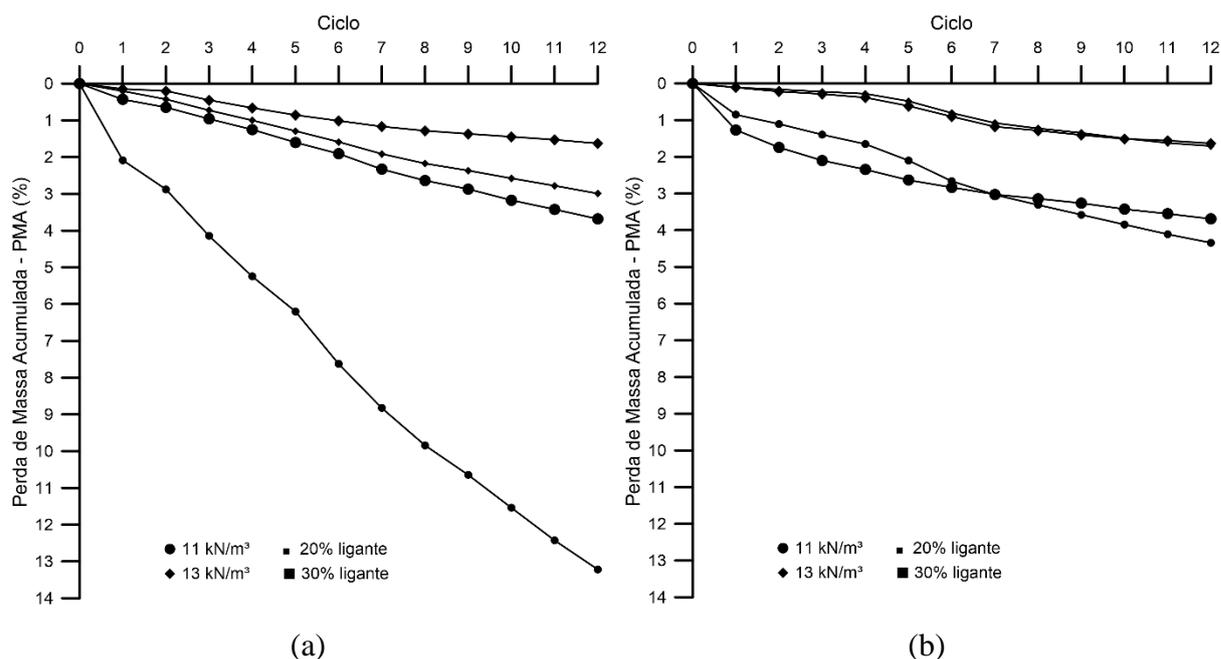
**Figura 63:** Relação entre sucção matricial e  $q_u$  para o ligante álcali-ativado

#### 4.2.2. Durabilidade por ciclos de molhagem-secagem e escovação

A Tabela 38 apresenta os tratamentos experimentais executados para o ensaio de durabilidade, para ambos ligantes estudados (álcali-ativado e cimento Portland). A Figura 64 apresenta os resultados de perda de massa acumulada (PMA) das amostras para 12 ciclos de molhagem-secagem.

**Tabela 38:** Tratamentos relativos ao ensaio de durabilidade

Tratamento	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	D (dias)	T (°C)	L (%)	w (%)
1	11	7	23	20	28
2	13	7	23	20	28
3	11	7	23	30	28
4	13	7	23	30	28

**Figura 64:** Perda de massa acumulada (PMA) para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland

Conforme Figura 64, amostras com maior peso específico aparente seco e teor de ligante possuem menor PMA. Após 12 ciclos, a maior perda de massa acumulada foi 13,22% e 4,34% ( $11\text{kN/m}^3$  e teor de ligante de 20%) para o ligante álcali-ativado e o cimento Portland, respectivamente. A menor PMA foi 1,63% para ambos ligantes ( $13\text{kN/m}^3$  e teor de ligante de 30%). Em ambos ligantes nota-se uma maior influência do peso específico aparente seco sobre a perda de massa em relação à influência do teor de ligante (i.e., uma maior densidade causou menor perda de massa comparativamente a uma maior adição de ligante). Este resultado é análogo ao encontrado para a resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e módulo cisalhante inicial. Assim, um maior grau de compactação resulta em maior mobilização de atrito entre partículas de solo, ocasionando aumento da resistência mecânica e da rigidez e diminuição da perda de massa acumulada.

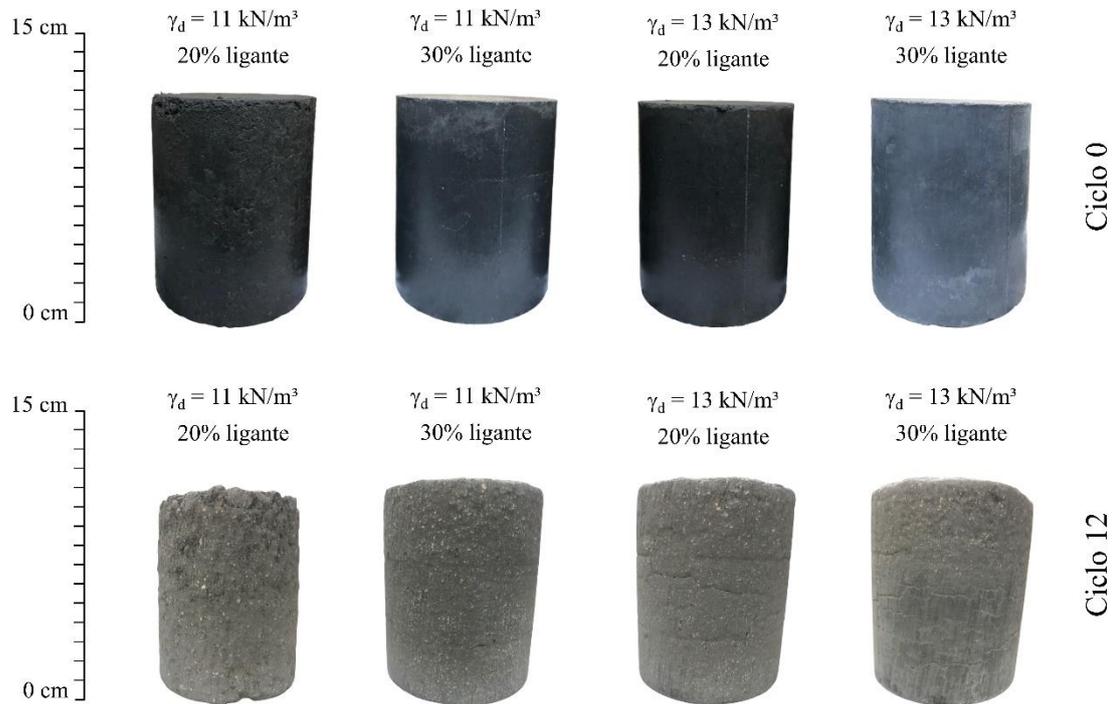
Também é possível observar uma maior diferença percentual de perda de massa entre amostras com menor e maior teor de ligante, para uma mesma densidade, no ligante álcali-ativado comparativamente ao cimento Portland. Neste último, amostras com o mesmo peso específico aparente seco mas teor de ligante distinto possuem uma PMA próxima, sendo uma diferença percentual de 0,07% observada entre a PMA de amostras com  $\gamma_d$  igual a  $13\text{kN/m}^3$ . Entretanto, o ligante álcali-ativado e o cimento Portland apresentaram mesma PMA no 12º ciclo para amostras com menor peso específico ( $11\text{kN/m}^3$ ) e maior teor de ligante (30%), e amostras com

maior peso específico ( $13 \text{ kN/m}^3$ ) e maior teor de ligante (30%): 3,68% e 1,63%, respectivamente.

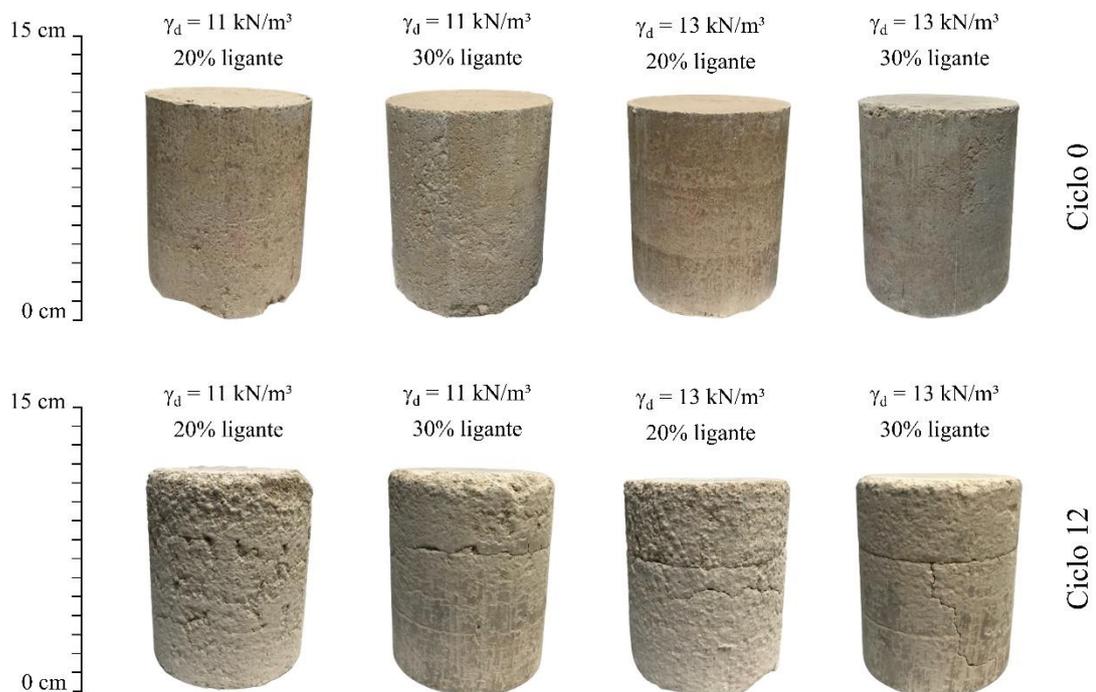
A classificação da AASHTO reproduzida na ASTM D3283 (ASTM, 2015a) classifica o solo utilizado nesta pesquisa no grupo A-7 (solo argiloso). Para este grupo, a PMA após 12 ciclos de secagem e molhagem é limitada a 7% de acordo com a PCA (1992), e 6% de acordo com a USACE (2020). Assim, somente a amostra do ligante álcali-ativado de menor peso específico aparente seco ( $11 \text{ kN/m}^3$ ) e menor teor de ligante (20%) apresentou uma PMA superior a 6%.

A Figura 65 apresenta o estado físico das amostras antes do primeiro ciclo (ciclo 0) e após o último ciclo (ciclo 12). A amostra do ligante álcali-ativado de menor peso específico ( $11 \text{ kN/m}^3$ ) e menor teor de ligante (20%) apresentou maior alteração volumétrica no ciclo final comparativamente a amostra correspondente de cimento Portland. As outras amostras apresentaram alterações físicas similares após o décimo segundo ciclo, i.e., aparecimento de trincas e fissuras e perda de material.

**Figura 65:** Perda de massa para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland

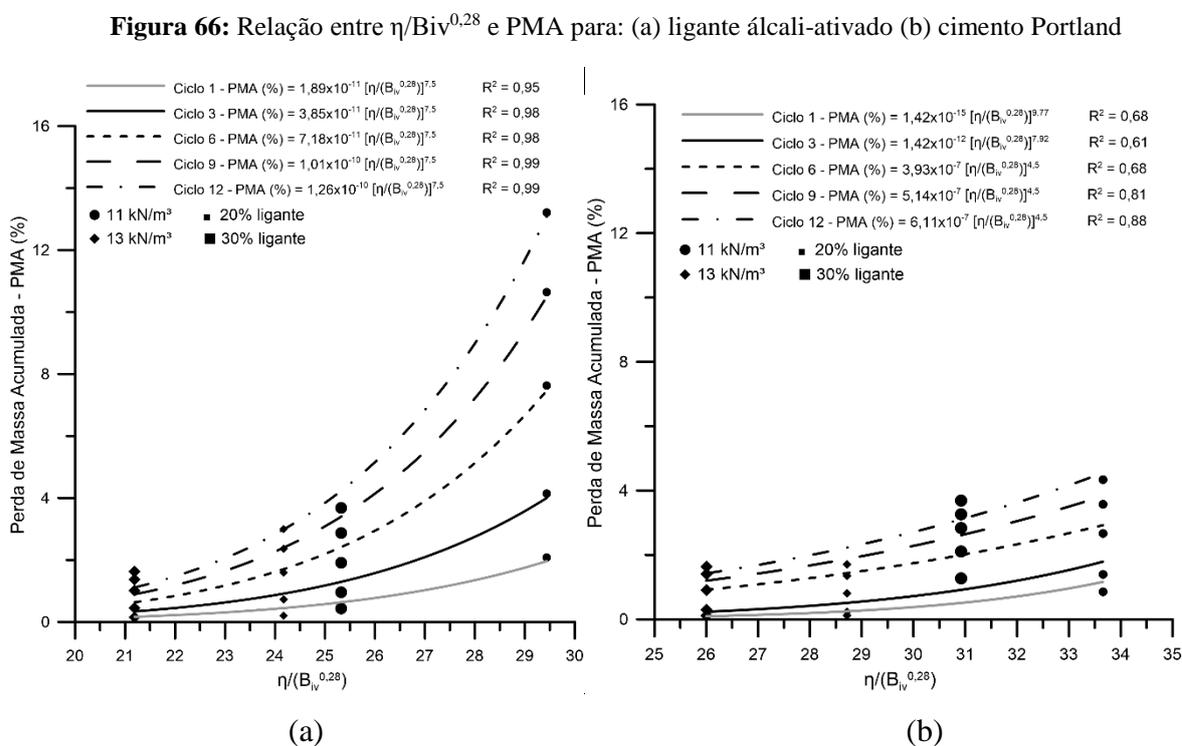


(a)



(b)

A Figura 66 apresenta a PMA em função do índice porosidade/teor volumétrico de ligante ( $\eta/B_{iv}^{0,28}$ ) para os ciclos 1, 3, 6, 9 e 12.



Conforme Figura 66 um menor valor de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  resultou em menor perda de massa. Assim, igual ao observado para a RCS, RTCD e  $G_0$  uma menor porosidade e um aumento no teor de ligante ocasionou menor perda de massa acumulada. Amostras do ligante álcali-ativado com maior valor de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  apresentaram maior PMA: após 12 ciclos a perda de massa acumulada para a amostra álcali-ativada de  $\gamma_d$  igual a  $11 \text{ kN/m}^3$  e teor de ligante igual a 20% foi 305% superior a PMA nas mesmas condições para a amostra com cimento Portland.

Coefficientes de determinação ( $R^2$ ) significativos foram encontrados entre os dados experimentais e o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  evidenciando a viabilidade do índice na previsão da PMA. Para o cimento álcali-ativado os coeficientes variaram de 0,95 a 0,99 (Equações 70 a 74). Já no cimento Portland a variação foi de 0,61 a 0,88 (Equações 75 a 79).

$$\text{Ciclo 1} - PMA(\%) = 1,89 \times 10^{-11} \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{7,5} \quad R^2 = 0,95 \quad \text{Eq. 70}$$

$$\text{Ciclo 3} - PMA(\%) = 3,85 \times 10^{-11} \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{7,5} \quad R^2 = 0,98 \quad \text{Eq. 71}$$

$$\text{Ciclo 6} - PMA(\%) = 7,18 \times 10^{-11} \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{7,5} \quad R^2 = 0,98 \quad \text{Eq. 72}$$

$$\text{Ciclo 9} - PMA(\%) = 1,01 \times 10^{-10} \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{7,5} \quad R^2 = 0,99 \quad \text{Eq. 73}$$

$$\text{Ciclo 12} - PMA(\%) = 1,26 \times 10^{-10} \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{7,5} \quad R^2 = 0,99 \quad \text{Eq. 74}$$

$$\text{Ciclo 1} - PMA(\%) = 1,42 \times 10^{-15} \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{9,77} \quad R^2 = 0,68 \quad \text{Eq. 75}$$

$$\text{Ciclo 3} - PMA(\%) = 1,42 \times 10^{-12} \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{7,92} \quad R^2 = 0,61 \quad \text{Eq. 76}$$

$$\text{Ciclo 6} - PMA(\%) = 3,93 \times 10^{-7} \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{4,5} \quad R^2 = 0,68 \quad \text{Eq. 77}$$

$$\text{Ciclo 9} - PMA(\%) = 5,14 \times 10^{-7} \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{4,5} \quad R^2 = 0,81 \quad \text{Eq. 78}$$

$$\text{Ciclo 12} - PMA(\%) = 6,11 \times 10^{-7} \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{4,5} \quad R^2 = 0,88 \quad \text{Eq. 79}$$

#### 4.2.3. Equação geral para o índice porosidade/teor volumétrico de ligante ( $\eta/B_{iv}^{0,28}$ )

As amostras estabilizadas pelo ligante álcali-ativado e pelo cimento Portland apresentaram correlações significativas entre o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  e  $q_u$ ,  $q_t$ ,  $G_0$  e PMA. Como resultado, a seguinte equação geral pôde ser estabelecida:

$$q_u, q_t, G_0, ALM = A_e \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{C_e} \quad \text{Eq. 80}$$

Na Equação 80, o termo  $A_e$  é um escalar e o termo  $C_e$  é um expoente cujo valor varia conforme o teste realizado e o ligante analisado. A magnitude do escalar  $A_e$  aumenta a medida que o valor da propriedade mecânica do solo (e.g., resistência, rigidez) aumenta. Para os testes de resistência e módulo cisalhante inicial, um maior tempo de cura e temperatura elevou a magnitude do escalar. No teste de durabilidade, um maior número de ciclos de molhagem e

secagem (i.e., maior PMA) eleva a magnitude do escalar. O expoente  $C_e$  foi -3,1 para  $q_u$ ,  $q_t$ ,  $G_0$  de amostras do ligante álcali-ativado. Para o cimento Portland o expoente  $C_e$  foi -4,5 para  $q_u$  e  $q_t$  e -4,0 para  $G_0$ . Em relação a PMA, o expoente foi 7,5 para o cimento alternativo e 4,5, 7,92 e 9,77 para o cimento Portland, variando conforme o ciclo de molhagem e secagem para o último. Em geral, o termo  $C_e$  descreve a relação entre a propriedade mecânica do solo estudado e  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ : se um maior valor de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  reduz o valor da propriedade mecânica o termo é negativo; ao contrário, se um maior valor de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  aumenta o valor da propriedade mecânica o termo é positivo. Por exemplo, um maior valor de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  reduziu  $q_u$ , i.e., o termo  $C_e$  é negativo. Já nos testes de durabilidade um maior valor de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  aumentou a PMA, i.e., o termo  $C_e$  é positivo.

#### 4.2.4. Expansão livre

Ensaios de expansão livre ( $\epsilon_s$ ) preliminares para o ligante álcali-ativado foram conduzidos para os mesmos níveis de fatores controláveis utilizados nos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à compressão por tração diametral, módulo cisalhante inicial e sucção matricial. Conforme Tabela 39 os ensaios preliminares apontaram um controle da expansão a 7 dias de cura para diferentes teores de ligante, peso específico e umidade. Assim, um novo projeto experimental foi delineado, fatorial  $2^4$ , e novos ensaios conduzidos (Tabela 40).

Neste novo projeto (Tabela 40) menores tempos de cura (0 e 7 dias) foram estudados. A temperatura de cura foi constante e mantida a 23°C. A partir da curva 10% CBCA + COH (Figura 24) definiu-se os valores de peso específico (12,5 kN/m<sup>3</sup> e 14,5 kN/m<sup>3</sup>) e umidade ótima (19,7% e 24,7%) utilizados. Os teores de ligante de 4% e 10% foram definidos a partir de Consoli *et al.* (2021b) e Zhang *et al.* (2013). Consoli *et al.* (2021b) avaliou a expansão livre de misturas de bentonita e caulim curadas a 23°C e estabilizadas com uso de cimento Portland CP V-ARI. Os autores aplicaram um projeto fatorial  $2^5$  a partir dos seguintes fatores controláveis: teor de bentonita (10% e 50%), peso específico aparente seco (10,2 kN/m<sup>3</sup> e 12,2 kN/m<sup>3</sup>), teor de cimento (0% e 4%), teor de umidade (22,5% e 27,5%) e tempo de cura (0 e 7 dias).

**Tabela 39:** Resultados preliminares de expansão livre (ligante álcali-ativado)

Nomenclatura amostra	Expansão (%)
13G-7D-23T-20B-28U	0,00
11G-7D-23T-30B-28U	0,20
11G-7D-23T-20B-30U	0,00
13G-7D-23T-30B-30U	1,79
11G-7D-40T-20B-28U	0,00
13G-7D-40T-30B-28U	0,00

\*VG-WD-XT-YB-ZU: V = peso específico dos grãos; W = tempo de cura;  
X = temperatura; Y = teor de ligante; Z = teor de umidade

**Tabela 40:** Tratamentos relativos ao novo projeto experimental para ensaios de expansão livre (ligante álcali-ativado)

Tratamento	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	L (%)	w (%)	D (dias)
1; 17	12,5	4	19,7	0,0
2; 18	14,5	4	19,7	0,0
3; 19	12,5	10	19,7	0,0
4; 20	14,5	10	19,7	0,0
5; 21	12,5	4	24,7	0,0
6; 22	14,5	4	24,7	0,0
7; 23	12,5	10	24,7	0,0
8; 24	14,5	10	24,7	0,0
9; 25	12,5	4	19,7	7,0
10; 26	14,5	4	19,7	7,0
11; 27	12,5	10	19,7	7,0
12; 28	14,5	10	19,7	7,0
13; 29	12,5	4	24,7	7,0
14; 30	14,5	4	24,7	7,0
15; 31	12,5	10	24,7	7,0
16; 32	14,5	10	24,7	7,0
33; 34; 35; 36	13,5	7	22,2	3,5

A Figura 67 apresenta os resultados de expansão livre ( $\epsilon_s$ ) dos espécimes tratados com o ligante álcali-ativado e cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI). Os resultados da Figura 67a foram obtidos a partir da média simples da repetição de cada tratamento. Os resultados para espécimes estabilizados com cimento Portland (Figura 67b) correspondem aos ensaios de Consoli *et al.* (2021b) para amostras com 10% de bentonita e 90% de caulim, 10/90 B/K, (Tabela 41). Apesar de em Consoli *et al.* (2021b) os fatores controláveis possuem valores diferentes dos estudados para o ligante álcali-ativado nesta pesquisa, a influência dos fatores e de suas combinações sobre a variável de resposta (i.e., expansão livre) pôde ser comparada entre ligantes. A Figura 68 e a Figura 69 expõem o gráfico de Pareto e os gráficos de efeitos principais com o respectivo ponto central, respectivamente, para ambos ligantes. A ANOVA realizada a partir do design fatorial encontra-se no Apêndice C. A Figura 70 apresenta os

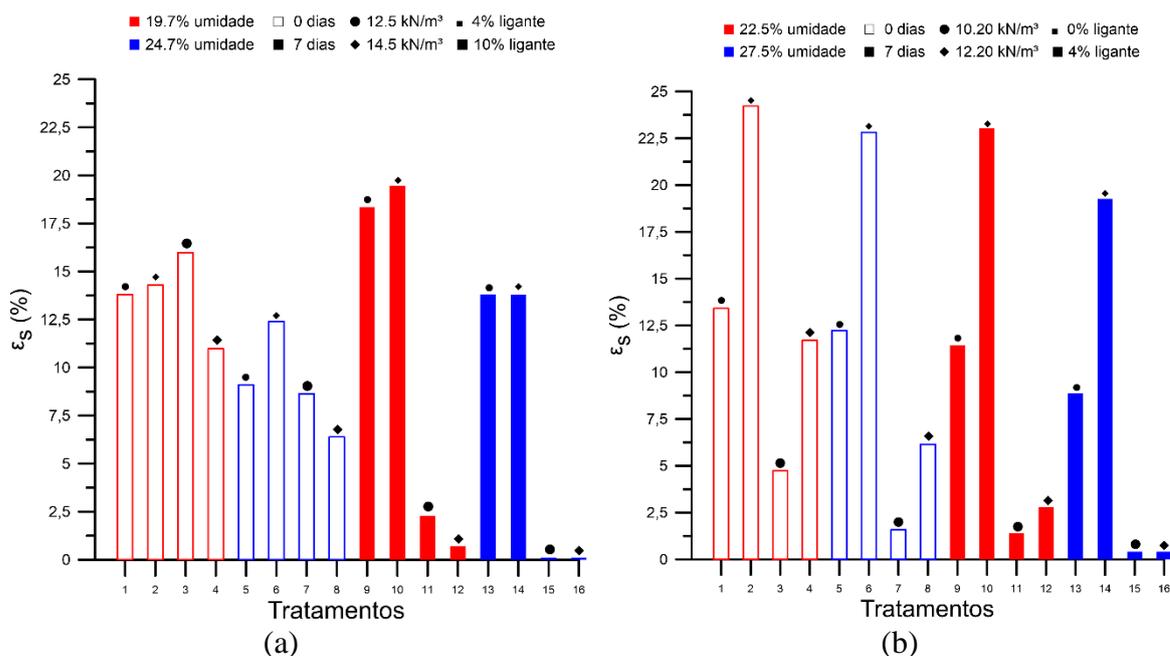
resultados de expansão livre por tempo de ensaio para amostras álcali-ativadas contendo somente (a) solo e água; (b) solo e hidróxido de sódio; (c) cinza do bagaço de cana-de-açúcar, solo e água; e (d) cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

**Tabela 41:** Tratamentos relativos ao projeto experimental para ensaios de expansão livre (cimento Portland, 10/90 B/K)

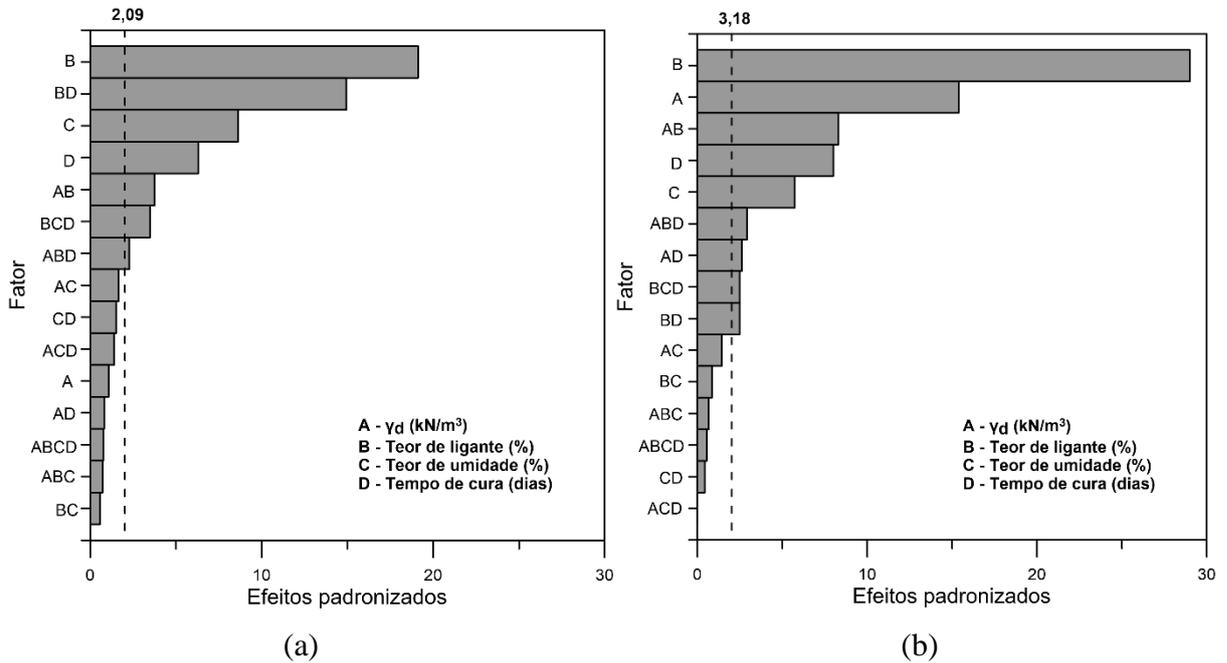
Tratamento	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	L (%)	w (%)	D (dias)
1	10,2	0	22,5	0
2	12,2	0	22,5	0
3	10,2	4	22,5	0
4	12,2	4	22,5	0
5	10,2	0	27,5	0
6	12,2	0	27,5	0
7	10,2	4	27,5	0
8	12,2	4	27,5	0
9	10,2	0	22,5	7
10	12,2	0	22,5	7
11	10,2	4	22,5	7
12	12,2	4	22,5	7
13	10,2	0	27,5	7
14	12,2	0	27,5	7
15	10,2	4	27,5	7
16	12,2	4	27,5	7
17	11,2	2	25,0	3,5

Fonte: Consoli *et al.*, 2021b. Modificado.

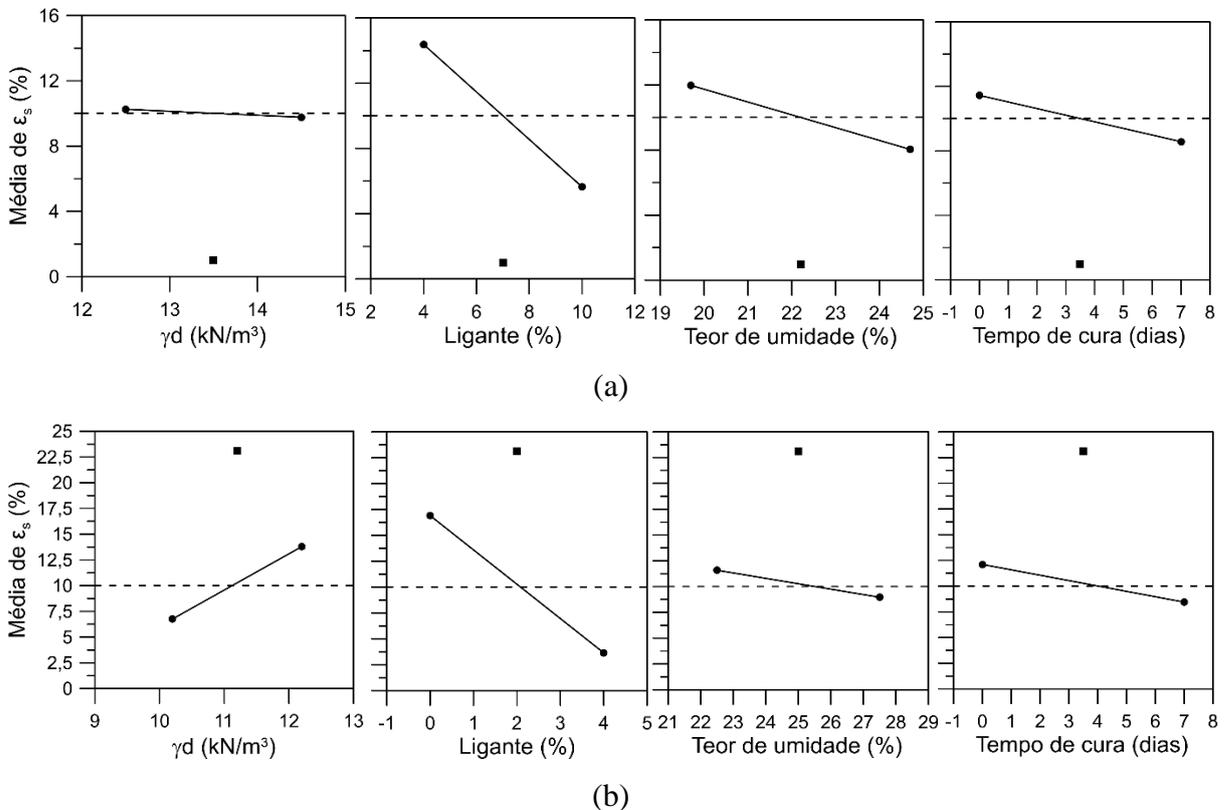
**Figura 67:** Expansão livre para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (CONSOLI *et al.*, 2021b)



**Figura 68:** Gráfico de Pareto de  $\epsilon_s$  para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (CONSOLI *et al.*, 2021b)



**Figura 69:** Efeitos principais sobre  $\epsilon_s$  para: (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (CONSOLI *et al.*, 2021b)



Conforme Figura 67 um maior teor de umidade reduziu a expansão. Isto é explicado pela redução dos efeitos de sucção devido ao aumento da saturação do solo e uma consequente

redução da afinidade do solo pela adsorção de água (FATTAH; SALIM; IRSHAYYID, 2017). Nas amostras contendo cimento Portland o aumento de densidade ocasionou maior expansão, visto que amostras mais compactas possuem menos espaços vazios entre partículas e, conseqüentemente, menor volume disponível para as partículas se rearranjarem ao expandirem (CONSOLI *et al.*, 2021b). Para o ligante álcali-ativado não há uma clara correlação entre aumento de densidade e expansão das amostras. Entretanto, amostras de cimento álcali-ativado com maior teor de ligante apresentaram uma redução na expansão com aumento da densidade. Isto ocorreu porque a presença expressiva de NaOH em amostras de maior densidade e teor de ligante controlou a expansão.

Um aumento do tempo de cura e do teor de ligante resultou em menores valores de expansão para ambos ligantes, com exceção de amostras de 4% de ligante e 7 dias de cura no ligante álcali-ativado. Nestas, a precipitação de compostos cimentícios (e.g. géis C-A-S-H e N-A-S-H) não foi suficiente para conter a expansão da cinza (Figura 70d) e da bentonita (Figura 70a) durante o período de cura (i.e., a expansão da cinza e da bentonita atrapalhou o desenvolvimento dos produtos de reação). Entretanto, em amostras de 7 dias de cura e maior teor de ligante a formação de produtos de reação foi superior. Assim, estes produtos se solidificaram impedindo a expansão da bentonita e da cinza durante o período de cura e após a imersão das amostras em água (e.g. tratamentos 15 e 16 na Figura 67a apresentaram expansão quase nula).

O gráfico de Pareto (Figura 68a) de amostras álcali-ativadas mostra que o fator principal B (teor de ligante), a interação de segunda ordem BD (interação entre o teor de ligante e o tempo de cura), os fatores principais C (teor de umidade) e D (tempo de cura), e a interação de segunda ordem AB (interação entre o peso específico e o teor de ligante) possuíram, nesta ordem, maior magnitude de influência sobre a expansão livre. Nota-se que o fator principal A (peso específico aparente seco) não apresentou influência estatística significativa sobre a expansão, em conformidade com observações anteriores. Para o cimento Portland, o gráfico de Pareto (Figura 68b) indica que os fatores principais B (teor de ligante) e A (peso específico aparente seco), a interação de segunda ordem AB (interação entre o peso específico e o teor de ligante), e os fatores principais D (tempo de cura) e C (teor de umidade), possuíram, nesta ordem, maior magnitude de influência sobre a expansão livre.

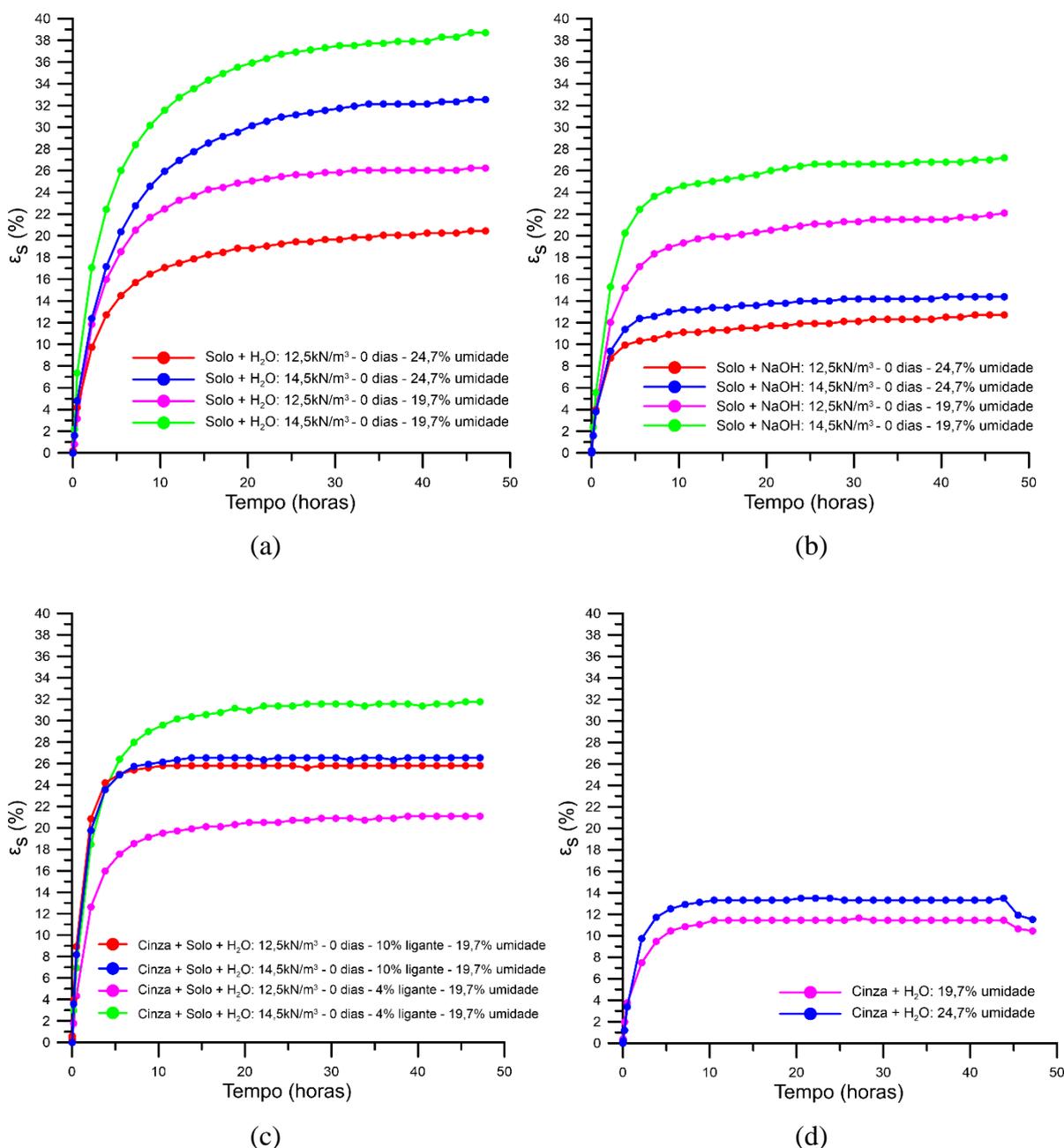
Em ambos agentes cimentantes o teor de ligante (B) teve maior magnitude de influência sobre a expansão. Isso se deve à precipitação de compostos cimentícios (e.g. géis C-A-S-H e N-A-S-H) formados após a hidratação do cimento e como resultado da álcali-ativação. Ainda, após a

adição destes ligantes,  $\text{Ca}^{2+}$  está presente em solução e ocorre troca catiônica entre  $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$ . A troca catiônica e a cimentação reduzem a expansão (MITCHELL; SOGA, 2005).

Conforme Figura 69, um aumento no nível dos fatores controláveis teor de ligante, teor de umidade e tempo de cura reduziu a expansão. Uma maior inclinação da reta para o efeito principal teor de ligante denota uma maior influência deste fator sobre a expansão. Os pontos centrais e o resultado significativo do fator curvatura na ANOVA (Apêndice C) evidenciam um comportamento não linear dos níveis dos fatores principais. Para os fatores controláveis estudados ambos ligantes apresentaram resultado médio de expansão semelhante (10%).

A Figura 70 corrobora explicações prévias acerca do comportamento do solo expansivo estudado. Conforme Figura 70b, amostras contendo hidróxido de sódio apresentaram expansão inferior a amostras contendo somente água (Figura 70a). Isto é explicado pelo aumento do pH, medido em consonância com a norma ASTM D4972 (ASTM, 2013), em amostras de solo e NaOH (pH = 14) em comparação a amostras de solo e água (pH = 8,57). Este aumento pode mudar o sinal de carga face-aresta da bentonita reduzindo a dispersão do solo devido a agregação de partículas (FAN *et al.*, 2013). Ainda, o aumento de cátions no meio, devido à presença de  $\text{Na}^+$  da solução de hidróxido de sódio, reduz a dupla camada difusa da bentonita com consequente floculação das partículas e redução de expansão (MITCHELL; SOGA, 2005). Conforme Figura 70c, amostras contendo 4% de cinza e solo com densidade de  $12,5 \text{ kN/m}^3$  e umidade de 19,7% (linha rosa) e amostras com 10% de cinza e solo com densidade de  $14,5 \text{ kN/m}^3$  e umidade de 19,7% (linha azul) expandiram similarmente a amostras de solo e NaOH de mesma umidade e densidade (linhas rosa e verde da Figura 70b, respectivamente). Entretanto, as demais amostras da Figura 70c apresentaram expansão superior a amostras de solo e NaOH de mesma umidade e densidade. Este comportamento é explicado observando-se a Figura 70d: a cinza quando ensaiada nas umidades estudadas apresentou comportamento expansivo devido à hidratação do óxido de magnésio presente em sua composição.

**Figura 70:** Expansão livre para amostras contendo somente: (a) solo e água (b) solo e hidróxido de sódio (c) cinza, solo e água e (d) cinza



#### 4.2.5. Análise microestrutural – álcali-ativação

A técnica de difração de raios x (DRX) foi realizada para identificação das fases cristalinas de amostras solo-ligante álcali-ativado, conforme Figura 71. As amostras ensaiadas apresentavam peso específico aparente seco de 13 kN/m<sup>3</sup>, 30% de ligante e 30% de umidade, e compreenderam ensaios realizados a 7 e 28 dias de cura a temperaturas de 23°C e 40°C. Esses

níveis de fatores controláveis foram escolhidos por representarem amostras de maior resistência mecânica, das quais espera-se uma maior precipitação de produtos de reação.

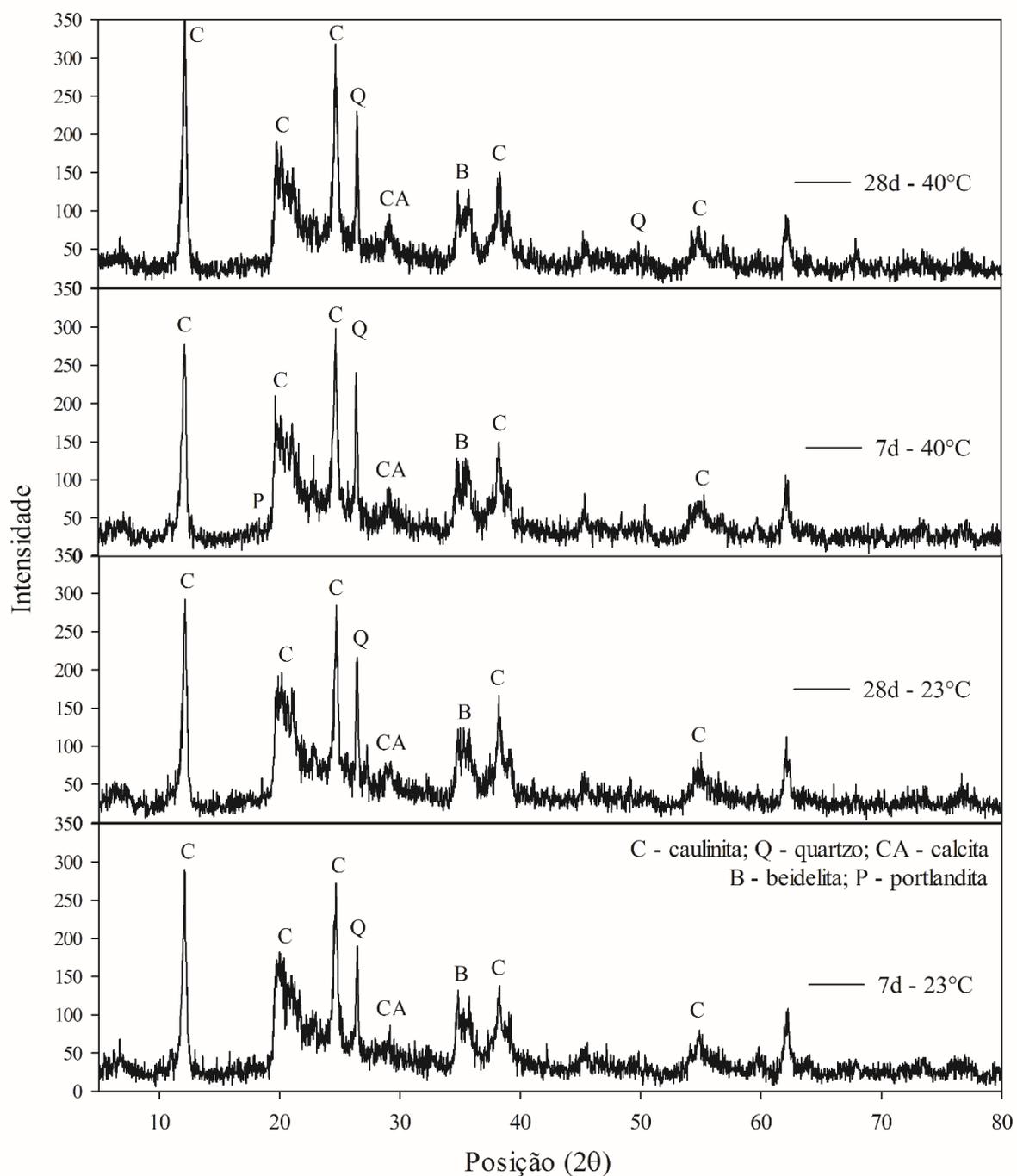
A Figura 71 evidencia a presença de fases cristalinas e semicristalinas contendo quartzo, caulinita, portlandita, beidelita e calcita. O quartzo é proveniente da cinza do bagaço de cana-de-açúcar e da bentonita, a caulinita do caulim e a portlandita da cal de ovo hidratada. Tobermorita [ $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ], um mineral se assemelha a estrutura pouco cristalina do gel C-A-S-H, pode estar localizada dentro do pico de calcita. A beidelita [ $(\text{Na}, \text{Ca})\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ], outro pico cristalino detectado, é formada durante os processos de ativação alcalina, quando cátions de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Na}^+$  estão tomando parte nas reações (ZAILANI *et al.*, 2020). Há um halo amorfo entre os ângulos de difração  $19^\circ$ - $32^\circ$  ( $2\theta$ ), atribuído a estruturas desordenadas e conteúdos altamente amorfos (i.e. produtos de reação como os géis C-A-S-H e (C,N)-A-S-H). Comparando-se amostras de 7 e 28 dias de cura a  $40^\circ\text{C}$  nota-se um consumo de portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) durante o processo de ativação alcalina. Amostras curadas a  $40^\circ\text{C}$  apresentaram maior intensidade do pico de calcita comparativamente a amostras curadas a  $23^\circ\text{C}$ . Isto deve-se a aceleração da precipitação de géis a altas temperaturas.

Os mecanismos de reação do sistema CBCA-COH explicam a precipitação dos produtos de reação: (i)  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  da CBCA dissolvem no meio altamente alcalino; (ii)  $\text{CaO}$  da COH reage com monômeros de silicato e aluminato para formar produtos de reação; (iii) parte do  $\text{CaO}$  reage com ambos monômeros de silicato e aluminato para formar C-A-S-H, e parte do  $\text{CaO}$  reage somente com o monômero de silicato formando C-S-H; (iv) o cátion  $\text{Na}^+$  é utilizado para balancear cargas e é absorvido em fases do sistema sílica-alumina formando N-A-S-H; (v) o cátion  $\text{Ca}^{2+}$  pode substituir  $\text{Na}^+$  formando C-A-S-H (GARCÍA-LODEIRO, I.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2013a; MA *et al.*, 2019).

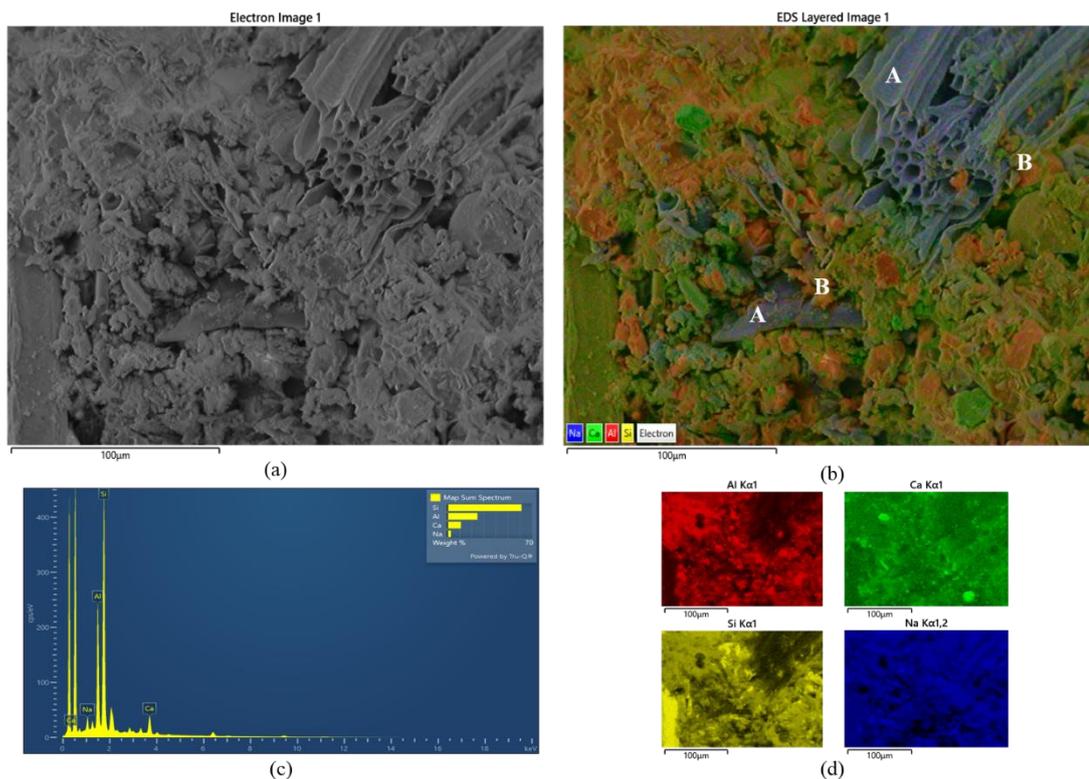
Imagens de MEV (Figura 72a, Figura 73a, Figura 74a, Figura 75a) mostram a estrutura morfológica do solo estabilizado pelo ligante álcali-ativado ( $\gamma_d = 13 \text{ kN/m}^3$ , 30% de ligante e 30% de teor de umidade). Em todas imagens o solo está embebido em uma matriz cimentícia composta por produtos de reação. Estes produtos ou géis apresentam grande heterogeneidade de composição e estrutura amorfa, como visto na DRX. A imagem EDS resultou no mapa químico (Figura 72c, Figura 73c, Figura 74c, Figura 75c) e distribuição elementar (Figura 72d, Figura 73d, Figura 74d, Figura 75d) das amostras analisadas. Estes mostram, respectivamente, a proporção e concentração dos principais elementos químicos presentes na amostra: Si, Al, Ca

e Na. Estes elementos estão distribuídos na mistura e indicam a coexistência do gel C-S-H e do gel (C,N)-A-S-H, o último incorporando cátions de sódio do ativador.

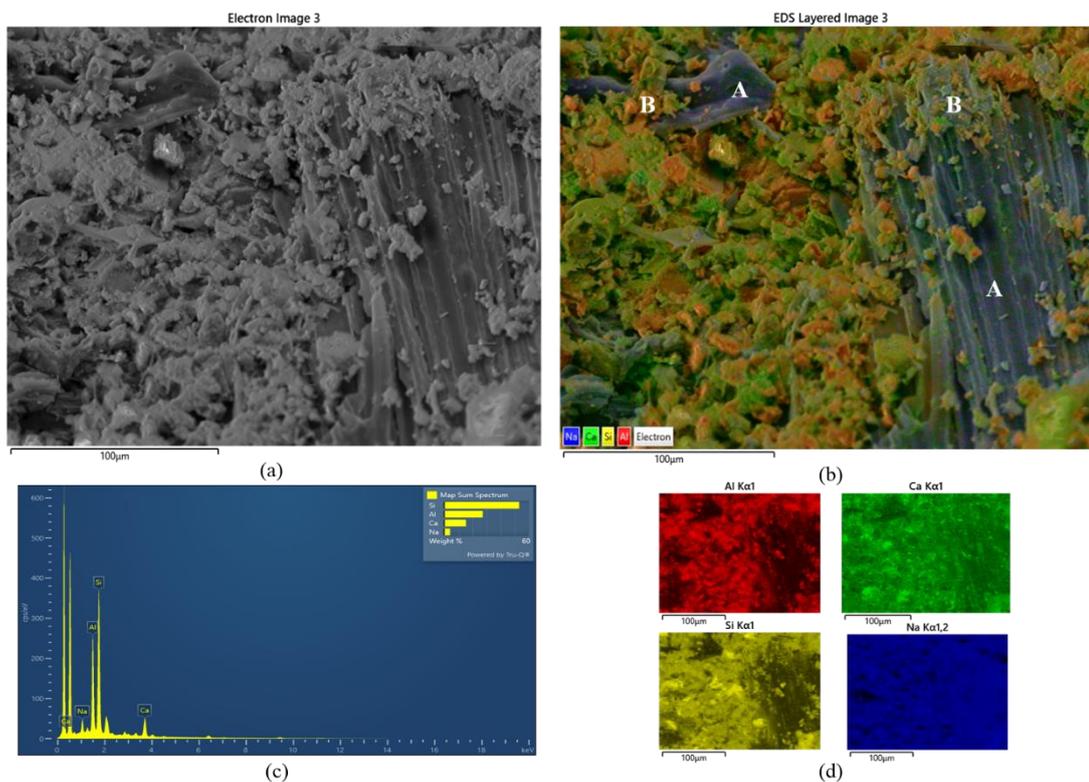
Um maior período de cura permitiu a formação de mais produtos de reação nas misturas estudadas. A Figura 72b mostra fibras do bagaço de cana-de-açúcar (A) cobertas nas suas extremidades por pequenas quantidades de produtos de reação (B). Conforme Figura 73b, após 28 dias de cura as extremidades das fibras foram completamente cobertas por produtos de reação. O mesmo é observado comparando-se a Figura 74 à Figura 75. Ainda, por a amostra da Figura 74 ter sido curada a 40°C por 7 dias, ela apresentou mais compostos amorfos do que a Figura 72 (7 dias de cura a 23°C) possuindo estrutura similar a da Figura 73 (28 dias de cura a 23°C). A Figura 75 apresenta uma estrutura mais densa e compacta do que as anteriores, já que esta amostra foi curada por 28 dias em alta temperatura. A presença de fibras é quase imperceptível visto que o material está quase completamente coberto por produtos de reação. Dessa forma, maiores períodos de cura e temperatura resultam na precipitação de mais géis, advindos do processo de ativação alcalina, e, conseqüentemente, em ganho de resistência e rigidez.

**Figura 71:** Difratoograma para amostras do ligante álcali-ativado

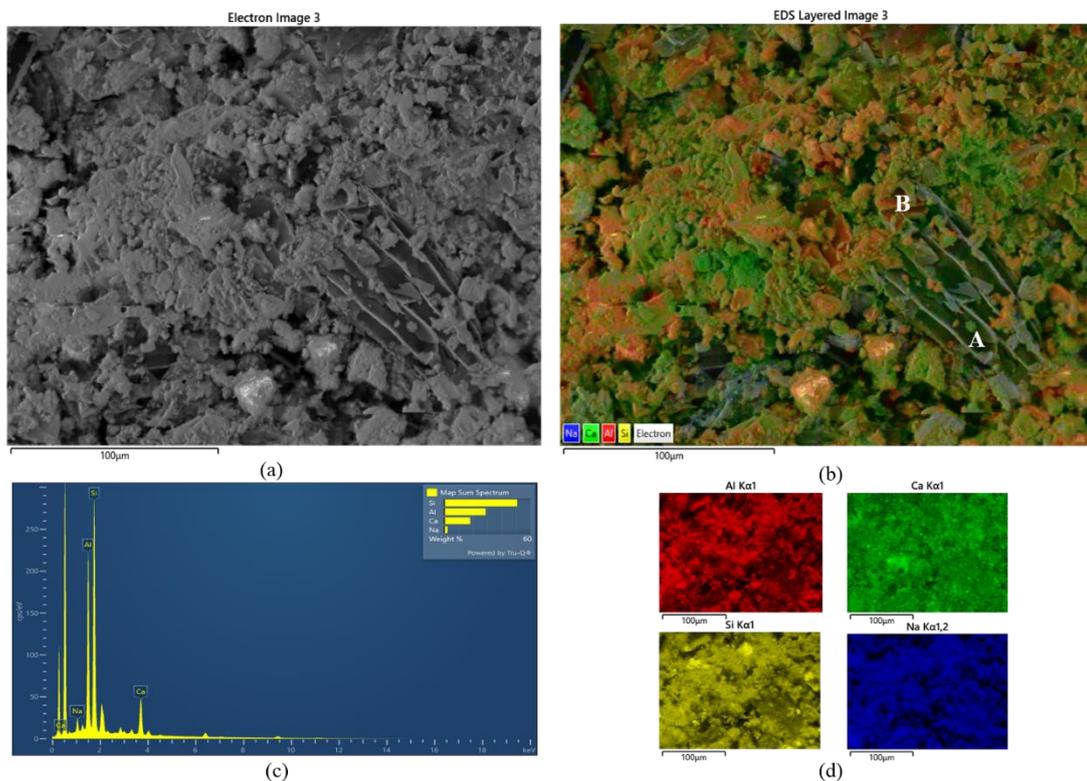
**Figura 72:** Amostras álcali-ativadas curadas por 7 dias a 23°C: (a) magnificação de 500x, (b) imagem EDS e (c) mapa químico, e (d) distribuição elementar



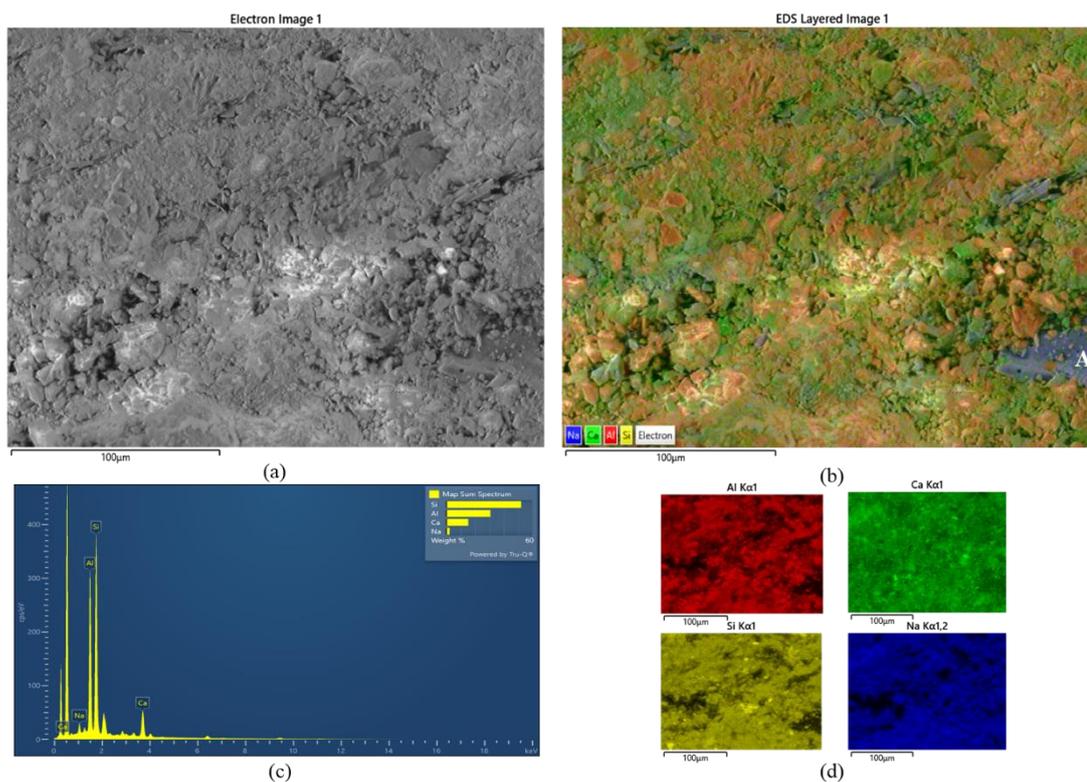
**Figura 73:** Amostras álcali-ativadas curadas por 28 dias a 23°C: (a) magnificação de 500x, (b) imagem EDS e (c) mapa químico, e (d) distribuição elementar



**Figura 74:** Amostras álcali-ativadas curadas por 7 dias a 40°C: (a) magnificação de 500x, (b) imagem EDS e (c) mapa químico, e (d) distribuição elementar



**Figura 75:** Amostras álcali-ativadas curadas por 28 dias a 40°C: (a) magnificação de 500x, (b) imagem EDS e (c) mapa químico, e (d) distribuição elementar



## 4.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

### 4.3.1. Avaliação ambiental do ciclo de vida

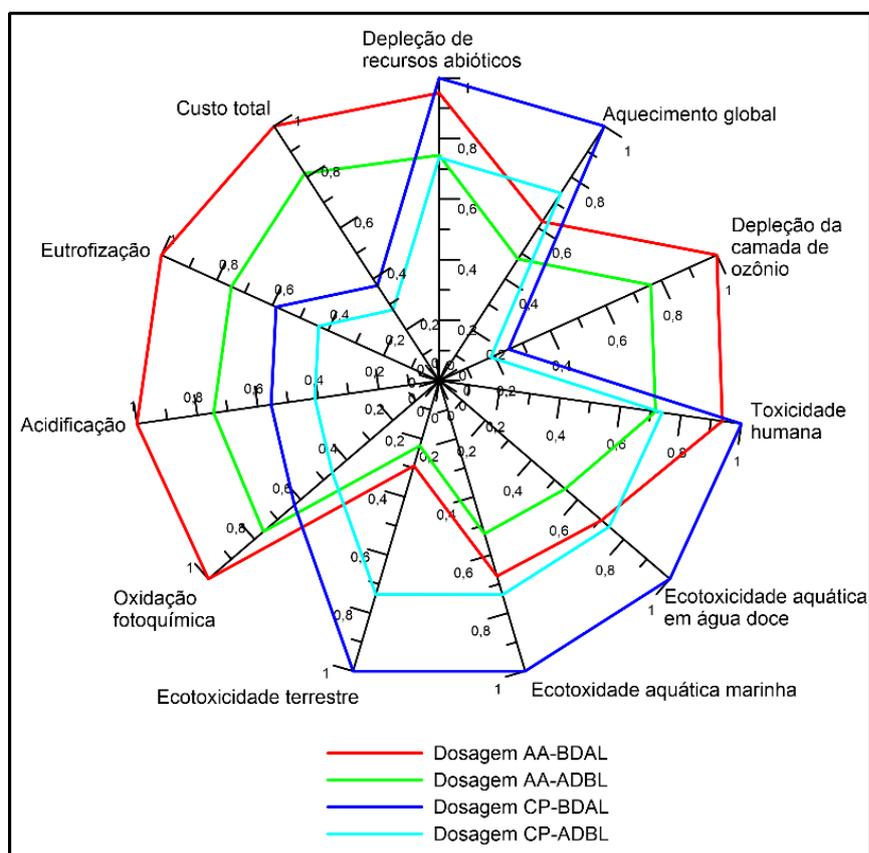
A Figura 76 e a Figura 77 mostram os impactos ambientais das dosagens do ligante álcali-ativado (AA-ADBL e AA-BDAL) e do cimento Portland (CP-ADBL e CP-BDAL). O valor de 1 foi atribuído para a dosagem com maior impacto em uma determinada categoria e menores impactos foram definidos proporcionalmente. Dosagens com menor densidade e maior teor de ligante (AA-BDAL e CP-BDAL) apresentaram maior impacto ambiental em todas as categorias analisadas em relação às dosagens com maior densidade e menor teor de ligante (AA-ADBL e CP-ADBL). Isto ocorre devido a maiores quantidades de matéria-prima (COH, NaOH e cimento) em amostras com maior teor de ligante (Tabela 21). No geral, CP-BDAL obteve maiores impactos ambientais, seguido por AA-BDAL, CP-ADBL e AA-ADBL. A dosagem apresentou maiores impactos em seis categorias: (i) depleção de recursos abióticos, (ii) aquecimento global, (iii) toxicidade humana, (iv) ecotoxicidade aquática em água doce, (v) ecotoxicidade aquática marinha e (vi) ecotoxicidade terrestre. Já a dosagem AA-BDAL apresentou maior impacto em quatro categorias: (i) oxidação fotoquímica, (ii) acidificação, (iii) eutrofização e (iv) depleção da camada de ozônio.

Para as dosagens AA-BDAL e CP-BDAL, a contribuição do processo de produção da matéria-prima para as categorias de impacto variou entre 53-80% e 92-99%, respectivamente, enquanto para o processo de transporte de materiais a contribuição foi de 20-46% e 1-5% (Figura 77). A contribuição do processo construtivo foi muito baixa, entre 1-3% para ambos ligantes. Assim, o maior impacto ambiental da dosagem CP-BDAL nas categorias listadas deve-se ao processo de produção de matéria-prima, i.e. produção de cimento Portland, um processo de alta emissão e consumo energético sendo aproximadamente 50% da emissão de CO<sub>2</sub> relacionada ao processo de calcinação (HUNTZINGER; EATMON, 2009). Em relação a dosagem AA-BDAL, maiores impactos ambientais nas categorias oxidação fotoquímica, acidificação, eutrofização e depleção da camada de ozônio ocorreram devido a produção de matéria-prima (i.e., NaOH e COH são processos de produção intensiva) seguida do diesel consumido para fins de transporte, especialmente devido a maior distância de transporte da CBCA. Os impactos do NaOH devem-se principalmente ao consumo de eletricidade para a eletrólise em célula de membrana e extração de sal para sua manufatura (2,18x10<sup>3</sup> kWh/t NaOH e 1,7t/t NaOH, respectivamente)

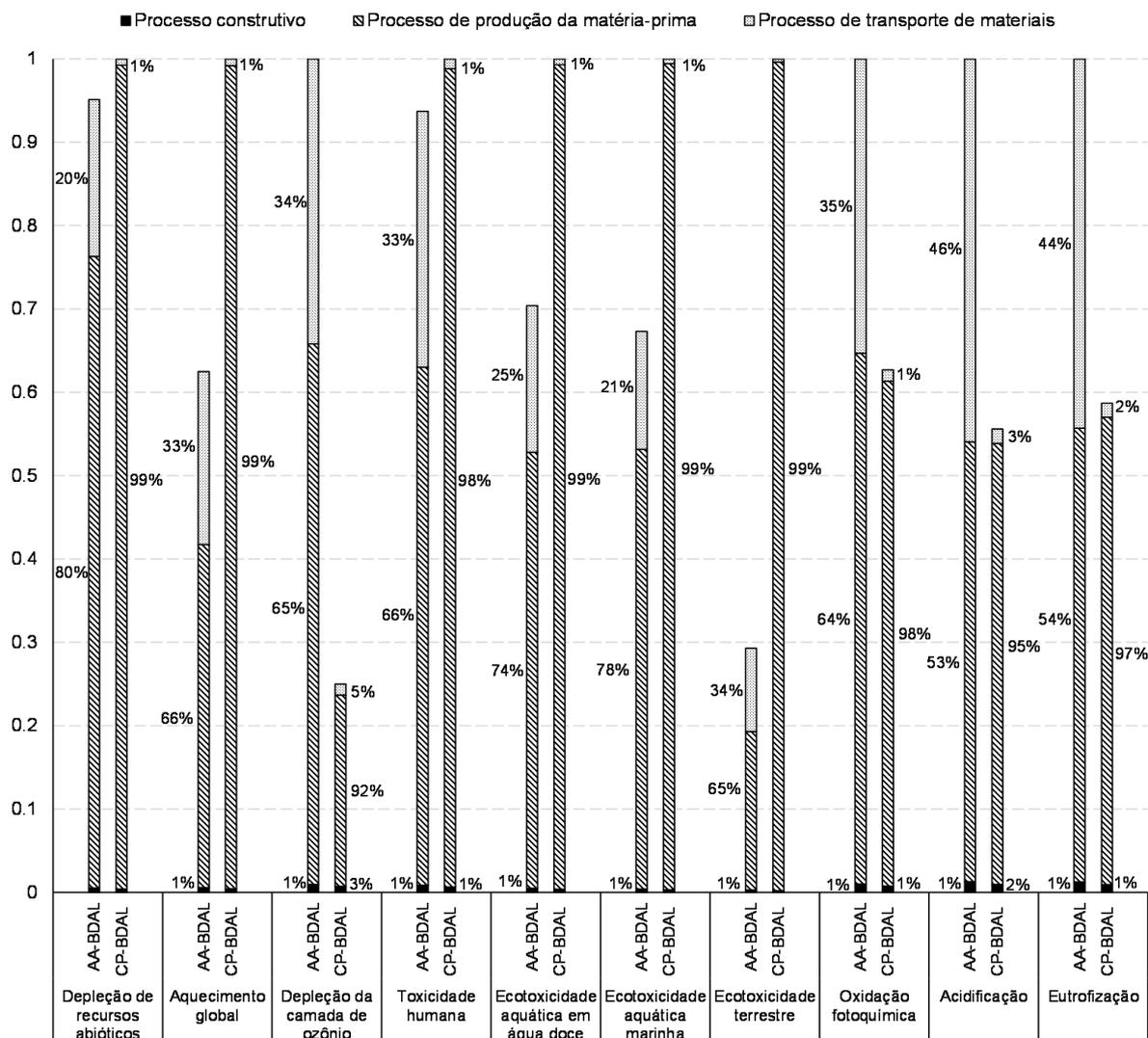
(HONG *et al.*, 2014; ZAHMAK *et al.*, 2021). Os impactos da casca de ovo devem-se ao processo de calcinação para a produção de COH (SALDANHA *et al.*, 2021).

Similarmente às descobertas de Ghadir *et al.* (2021), o qual examinou um solo argiloso estabilizado com cimento Portland e com um ligante álcali-ativado composto por cinza vulcânica e hidróxido de sódio, este estudo também revelou que uma grande parte dos impactos do solo estabilizado com cimento Portland advém da manufatura deste ligante, especificamente da decomposição de  $\text{CaCO}_3$  para a produção de clínquer. Em conformidade, o NaOH era um dos maiores contribuintes para os impactos ambientais do ligante álcali-ativado. Zahmak *et al.* (2021) avaliaram quatro dosagens de um ligante álcali-ativado (cinza volante e escória granulada de alto forno como precursores, e  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  e NaOH como ativadores) e de cimento Portland para estabilização de uma rodovia. Em conformidade com Zahmak *et al.* (2021) este estudo demonstrou que dosagens do ligante álcali-ativado tiveram maior impacto ambiental do que dosagens de cimento Portland para as categorias depleção da camada de ozônio e eutrofização. Para a primeira categoria, os impactos foram devido ao gás cloro, um subproduto do processo de fabricação do NaOH por meio de uma eletrólise em célula de membrana. Para a segunda, o impacto deveu-se ao gás  $\text{NO}_x$  advindo do processo de fabricação do NaOH.

**Figura 76:** Impactos ambientais para dois métodos de estabilização utilizando duas dosagens



**Figura 77:** Processos do ciclo de vida de dosagens AA-BDAL e CP-BDAL



#### 4.3.1.1. Análise de sensibilidade

A comparação dos métodos CML-IA e TRACI indica poucas mudanças nas três categorias de impacto (aquecimento global, depleção da camada de ozônio, e acidificação, comum aos dois métodos) como indicado na Tabela 42 e na Tabela 43. Cada metodologia de avaliação de impacto possui fatores de caracterização distintos aplicados para converter os resultados da análise de inventário às unidades de medida das categorias de impacto. Assim, metodologias distintas podem ocasionar resultados distintos para as categorias de impacto (FINNVEDEN *et al.*, 2009), o que não foi observado. A maior diferença foi observada para a categoria depleção da camada de ozônio na dosagem CP-BDAL: 4,13%. Entretanto, em média, a diferença entre os resultados das metodologias CML-IA e TRACI foi inferior a 1%.

A Figura 78 mostra a influência da distância de transporte da CBCA sobre a categoria acidificação. Para esta categoria, 46% do impacto da dosagem AA-BDAL ocorreu devido ao processo de transporte de materiais (Figura 77). Uma menor distância de transporte da CBCA para o ligante álcali-ativado resultou em menores impactos ambientais, como descrito pela inclinação da reta da Figura 78. Assim, na dosagem AA-ADBL uma redução da distância de transporte de 550 km para 50 km reduziu a acidificação em 39%. Isto indica que a distância de transporte pode ter grande influência nos impactos ambientais e por isso deve ser minimizada (i.e., deve-se priorizar fontes de matéria-prima próximas ao local da obra).

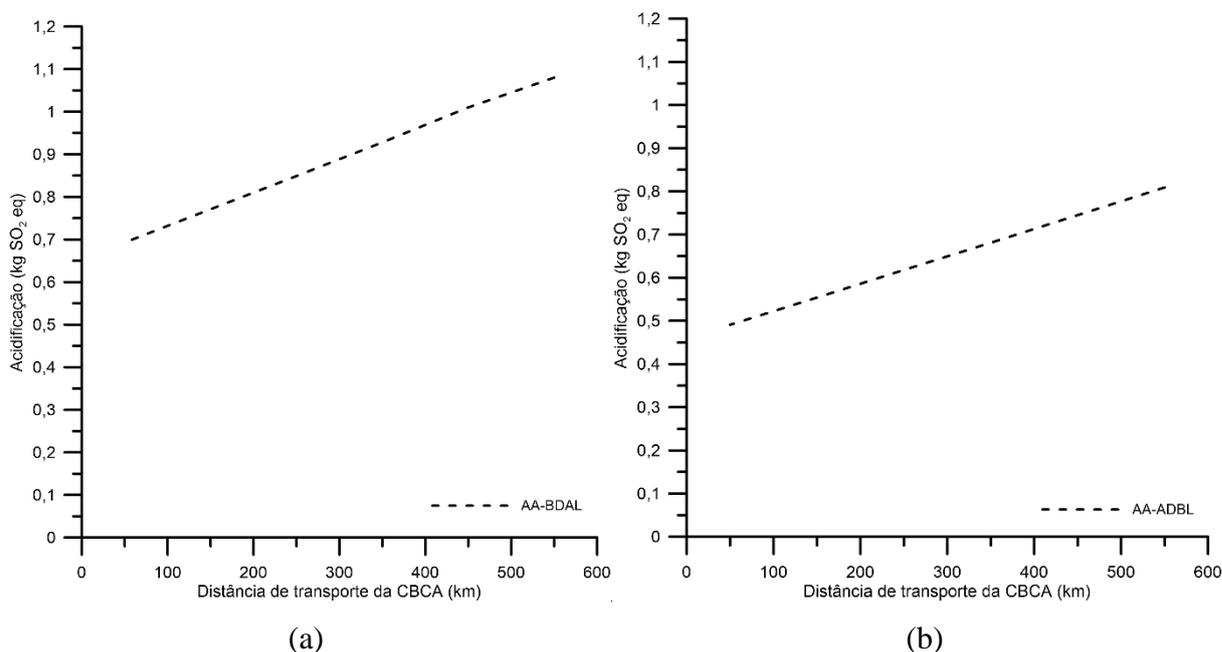
**Tabela 42:** Análise de sensibilidade por metodologia de avaliação de impacto (ligante álcali-ativado)

Categoria de impacto	Dosagem					
	AA-BDAL			AA-ADBL		
	CML-IA (1)	TRACI (2)	% Diferença [(1-2)/1]	CML-IA (1)	TRACI (2)	% Diferença [(1-2)/1]
Aquecimento global (kg CO <sub>2</sub> eq)	148	148	0,00	194	194	0,00
Depleção da camada de ozônio (kg CFC -11 eq)	3,26E-05	8,96E-05	-1,75	3,41E-05	4,29E-05	-0,26
Acidificação (kg SO <sub>2</sub> eq)	0,809	1,01	-0,25	1,08	1,35	-0,25

**Tabela 43:** Análise de sensibilidade por metodologia de avaliação de impacto (cimento Portland)

Categoria de impacto	Dosagem					
	CP-BDAL			CP-ADBL		
	CML-IA (1)	TRACI (2)	% Diferença [(1-2)/1]	CML-IA (1)	TRACI (2)	% Diferença [(1-2)/1]
Aquecimento global (kg CO <sub>2</sub> eq)	229	228	0,00	310	309	0,00
Depleção da camada de ozônio (kg CFC -11 eq)	6,36E-06	3,26E-05	-4,13	8,53E-06	1,13E-05	-0,32
Acidificação (kg SO <sub>2</sub> eq)	0,446	0,491	-0,10	0,602	0,663	-0,10

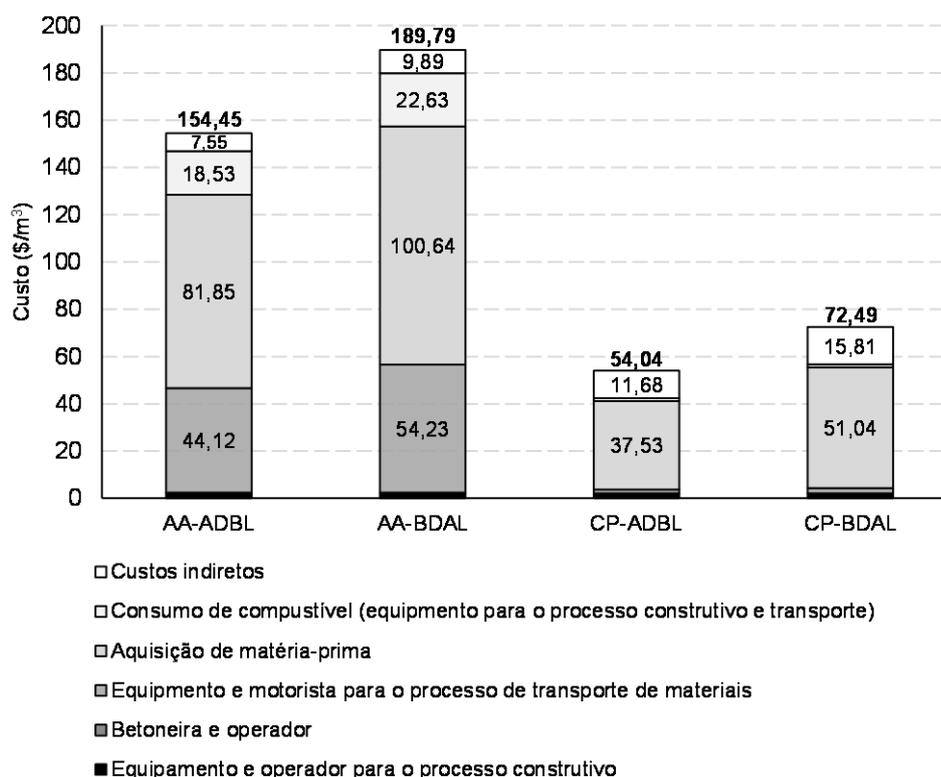
**Figura 78:** Impactos da distância de transporte da CBCA na categoria acidificação para: (a) AA-BDAL e (b) AA-ADBL



#### 4.3.2. Avaliação do custo do ciclo de vida

O custo total das dosagens do ligante álcali-ativado foi superior ao custo total das dosagens com cimento Portland (Figura 76 e Figura 79). Isto se deve ao maior custo direto das primeiras em relação às últimas. A Figura 79 mostra os maiores contribuintes para o custo direto de dosagens AA-ADBL e AA-BDAL: (i) aquisição de matéria-prima (\$100,64 para AA-BDAL comparado a \$51,04 para CP-BDAL); (ii) equipamento e motorista para o processo de transporte de materiais (\$54,23 para AA-BDAL comparado a \$2,2 para CP-BDAL); e (iii) consumo de combustível (\$22,63 para AA-BDAL comparado a \$1,38 para CP-BDAL). Estes resultados estão alinhados a Zahmak et al. (2021), i.e., dosagens de cimento Portland apresentaram menor custo para a aquisição e transporte de materiais comparadas a dosagens álcali-ativadas. Da mesma forma, neste estudo o maior contribuinte para o custo total da dosagem álcali-ativada foi a compra de NaOH (53% do custo total). O custo indireto (i.e., custo social do CO<sub>2</sub>) de dosagens do ligante álcali-ativado foi inferior a dosagens de cimento Portland, o que é explicado pela maior emissão de CO<sub>2</sub> das dosagens de cimento. Para as dosagens AA-ADBL e AA-BDAL, e CCP-ADBL e CP-BDAL, as emissões de CO<sub>2</sub> foram, respectivamente, 148 kg e 194kg, e 229 kg e 310 kg.

**Figura 79:** Componente e custo total ( $\$/m^3$ ) para dois métodos de estabilização e dois cenários de dosagens



#### 4.3.3. Discussão: Análise ambiental de ciclo de vida e análise de custo do ciclo de vida

A dosagem CP-BDAL teve maiores impactos ambientais em seis categorias, seguida pela dosagem AA-BDAL, a qual teve maiores impactos ambientais em quatro categorias. Em ambos casos estes impactos deveram-se principalmente a produção de matéria-prima, i.e., cimento Portland, cal, e hidróxido de sódio utilizados nos ligantes. Estudos devem ser realizados visando a modificação destes processos produtivos para redução de impactos ambientais. Por exemplo, pode-se avaliar a realização da etapa de calcinação para produção de cal em temperaturas mais baixas (e.g. em torno de  $900^{\circ}\text{C}$ ), reduzindo-se o consumo de combustível (aproximadamente  $4,25 \text{ GJ/ton}$  de cal virgem) (EUROPEAN LIME ASSOCIATION, 2019), mas mantendo a qualidade da cal produzida. Por outro lado, misturas com o cimento Portland tiveram melhor performance do ponto de vista econômico por possuírem menor custo em relação a misturas álcali-ativadas devido ao alto custo do NaOH. Muitas vezes o tomador de decisão escolhe um *design* de projeto baseado nos custos totais. Assim, para que a tecnologia de álcali-ativação possua aplicações em larga escala em obras de engenharia o ativador deve ser acessível. O alto custo de produção do NaOH está associado ao processo eletrolítico (MEDINA-MARTOS *et al.*, 2022), e tecnologias de produção mais baratas são necessárias para redução de custos.

Ativador de nano-sílica de olivina, ativador à base de RHA com refluxo de NaOH, ativador à base de pó de vidro preparado termoquimicamente e ativador de licor bayer (ADESANYA *et al.*, 2021) são algumas das novas tecnologias que podem reduzir o custo de tais processos. Estes ativadores alternativos utilizam resíduos agrícolas e industriais que são em sua maioria depositados em aterros sanitários, assim, seu uso soluciona problemas de manejo de resíduo e traz benefícios econômicos e ambientais (ADESANYA *et al.*, 2021).

Maiores impactos ambientais de dosagens AA nas categorias oxidação fotoquímica, acidificação, eutrofização e depleção da camada de ozônio em relação a dosagens CP ocorreram devido a maior distância de transporte da cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA). Ainda, o transporte de materiais foi o segundo fator de maior contribuição para o custo total de dosagens álcali-ativadas devido a uma distância de transporte da CBCA de 550 km comparativamente a distância de transporte do CP de 30 km. A análise de sensibilidade mostrou que os impactos ambientais do transporte decresceram linearmente com o decréscimo da distância de transporte. Dessa forma, de um ponto de vista ambiental e econômico fornecedores devem estar localizados próximos ao local de construção. Se o cimento Portland fosse transportado de distâncias superiores à do transporte de CBCA os resultados seriam diferentes, i.e., o ligante álcali-ativado teria alguns dos seus impactos ambientais e custos reduzidos. Por exemplo, para uma distância de transporte de 250 km para o cimento Portland e de 30 km para a CBCA nas dosagens CP-BDAL e AA-BDAL, respectivamente, a dosagem CP possuiria maior impacto ambiental em 8 de 10 categorias (depleção de recursos abióticos, aquecimento global, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática em água doce, ecotoxicidade aquática marinha e ecotoxicidade terrestre, acidificação e eutrofização).

As quatro dosagens estudadas (AA-ADBL, AA-BDAL, CP-ADBL e CP-BDAL) resultam em uma RCS de 2,1 MPa mas possuem densidades e teor de ligante distintos. A incorporação de mais ligante a dosagens AA-BDAL e CP-BDAL resultou em maiores custos e impactos ambientais. Como previamente descrito neste trabalho, resultados mecânicos (e.g. resistência, rigidez) podem ser relacionados ao índice  $\eta / B_{iv}^{0,28}$ . Assim, para um dado resultado mecânico (neste estudo, 2,1 MPa) é possível a redução de impactos ambientais e custos em processos de estabilização do solo utilizando dosagens de menor teor de ligante e maior grau de compactação (dosagens ADBL). Em adição a isto, tomadores de decisão devem analisar a localização do fornecedor de materiais para definir o uso de cimento ou do ligante álcali-ativado (precursor e ativador): (i) se o cimento e o precursor(es) e ativador(es) estão localizados próximos ao local de construção (<30 km), a dosagem AA-ADBL configura a melhor escolha; (ii) se o cimento

está prontamente disponível mas o precursor(es) e ativador(es) requerem longas distâncias de transporte (>550 km), a dosagem CP-ADBL é indicada. A primeira opção possui maior custo econômico (principalmente devido a aquisição de materiais), mas é contrabalanceada por créditos de carbono devido a menores emissões de CO<sub>2</sub> da dosagem AA. O transporte de materiais é responsável por 33% da categoria aquecimento global na dosagem AA-BDAL (Figura 77), em consequência, a redução da distância de transporte irá afetar diretamente a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida.

#### 4.3.4. Avaliação social do ciclo de vida

##### 4.3.4.1. Coeficiente alfa de Cronbach

Determinou-se o coeficiente alfa de Cronbach ( $\alpha$ ) (Tabela 44) para os questionários aplicados para cada processo. Para o processo *construção de estradas*  $\alpha$  foi 0,78: este valor está dentro da faixa 0,7-0,8 considerada satisfatória, sugerindo uma boa correlação entre as questões. O valor de  $\alpha$  superior a 0,8 para o processo *produção de hidróxido de sódio* ( $\alpha = 0,85$ ) indica uma forte consistência interna do questionário. Valores de  $\alpha$  um pouco inferiores à faixa considerada satisfatória podem ser aceitáveis caso haja um número limitado de questões (no caso deste estudo dez) e ampla gama de conhecimentos avaliados (BERGER; HÄNZE, 2015). Isto explica o resultado do questionário da *produção de cal hidratada*:  $\alpha$  de 0,62.

Os processos *transporte rodoviário* e *produção de cimento Portland* apresentaram baixos valores de  $\alpha$  (0,38 e 0,11, respectivamente). Acredita-se que as respostas dos *experts* afetaram a consistência interna dos questionários destes processos, já que os entrevistados apresentaram opiniões muito semelhantes reduzindo a variabilidade total do questionário e consequentemente o valor de  $\alpha$ . Para aumentar o  $\alpha$  recomenda-se adicionar mais itens (mensurando distintos elementos) aos questionários e aplicá-los a um maior número de pessoas com diferentes graus de instrução e experiência profissional. Os valores do coeficiente alfa de Cronbach obtidos nesta pesquisa aplicam-se a amostras específicas para uma avaliação específica e não são considerados uma característica fixa do instrumento de avaliação proposto (questionários).

**Tabela 44:** Coeficiente  $\alpha$  de Cronbach para processos avaliados

Processo	Transporte rodoviário	Construção de estradas	Produção de cimento Portland	Produção de cal hidratada	Produção de hidróxido de sódio
$\alpha$	0,38	0,78	0,11	0,62	0,85

##### 4.3.4.2. Impactos sociais

A Tabela 45 apresenta o *score* social total para os ligantes estudados. Destaca-se que o impacto social não avalia a variação de densidade e teor de ligante, sendo os impactos iguais para as dosagens AA-ADBL e AA-BDAL, e CP-ADBL e CP-BDAL. Diagramas visuais (Figura 80 e Figura 81) apresentam os impactos sociais da estrutura hierárquica estudada. Diferentemente da Tabela 45 os valores dos diagramas são apresentados em módulo visto que as cores vermelho e verde denotam, respectivamente, impactos sociais negativos e positivos. Há um aumento de área verde (impactos positivos) do cimento Portland para o ligante álcali-ativado. Isso reflete-se no *score* final dos ligantes: 3,8 para o cimento Portland e 5,9 para o ligante álcali-ativado. Assim o último possui maior impacto social positivo.

Para o cimento Portland um maior impacto social foi observado no *stakeholder* Trabalhadores, seguido por Sociedade e Comunidade local. Um maior impacto social positivo deste ligante para os Trabalhadores deve-se principalmente aos indicadores “Salário médio” e “Acidentes de trabalho”. Isto é explicado pela avaliação positiva e alta importância atribuída pelos entrevistados a estes dois indicadores nos processos de produção de cimento Portland e transporte rodoviário. Já o ligante álcali-ativado apresentou maior impacto sobre o *stakeholder* Sociedade, seguido por Trabalhadores e Comunidade local. O maior impacto social positivo sobre a Sociedade deve-se majoritariamente ao indicador “Contribuição do serviço/produto com o progresso econômico”, seguido por “Compromisso com pautas de sustentabilidade”. Isto é explicado pela avaliação positiva destes dois indicadores pelos entrevistados nos processos de produção de cal hidratada e de hidróxido de sódio.

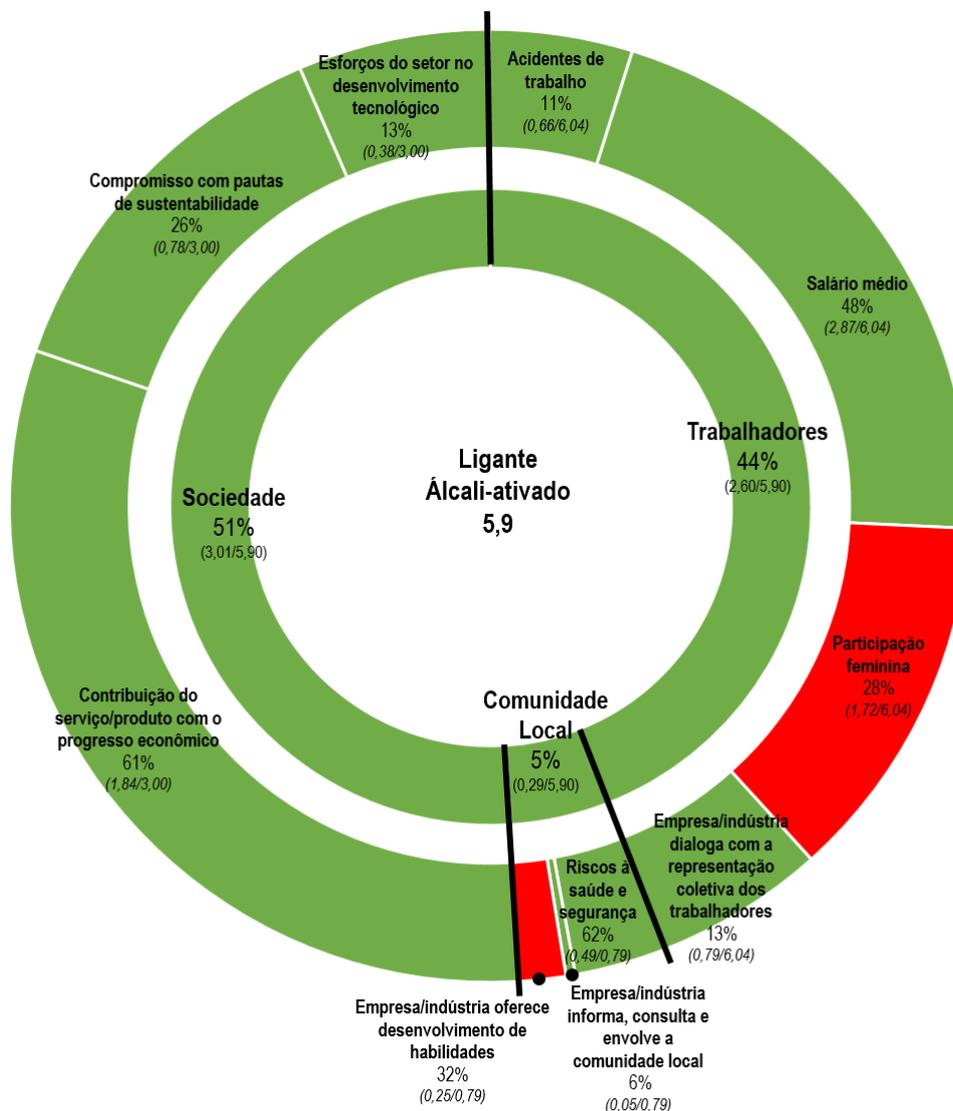
Em ambos ligantes observou-se um impacto social negativo do indicador “Participação feminina”, no *stakeholder* Trabalhadores. Isto é explicado pela baixa participação feminina nos processos estudados (produção de matéria-prima, transporte e construção de estradas). Também se nota nos ligantes um impacto social negativo do indicador “Empresa/indústria oferece desenvolvimento de habilidades” no *stakeholder* Comunidade Local. Assim, os processos estudados neste trabalho não oferecem, em geral, treinamento aos seus colaboradores. No cimento Portland há um impacto social negativo do indicador “Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico” para o *stakeholder* Sociedade. Para o ligante álcali-ativado este indicador possui impacto social positivo. Isto deve-se, principalmente, a avaliação positiva deste indicador pelos entrevistados para o processo de produção de hidróxido de sódio.

**Tabela 45:** Stakeholders, indicadores e score total para os ligantes estudados

Stakeholders (STK)	Indicadores (IN)	Cimento Portland		Ligante álcali-ativado	
		IN	STK	IN	STK
Trabalhadores	Acidentes de trabalho	+0,99	+2,53	+0,66	+2,60
	Salário médio	+1,37		+2,87	
	Participação feminina	-0,68		-1,72	
	Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores	+0,86		+0,79	
Comunidade local	Riscos à saúde e segurança	+0,46	+0,39	+0,49	+0,29
	Empresa/indústria informa, consulta e envolve a comunidade local	+0,52		+0,05	
	Empresa/indústria oferece desenvolvimento de habilidades	-0,58		-0,25	
Sociedade	Contribuição do serviço/produto com o progresso econômico	+1,11	+0,91	+1,84	+3,01
	Compromisso com pautas de sustentabilidade	+0,12		+0,78	
	Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico	-0,32		+0,38	
Score total			+3,83		+5,90

**Figura 80:** Diagrama visual cimento Portland

**Figura 81:** Diagrama visual ligante álcali-ativado

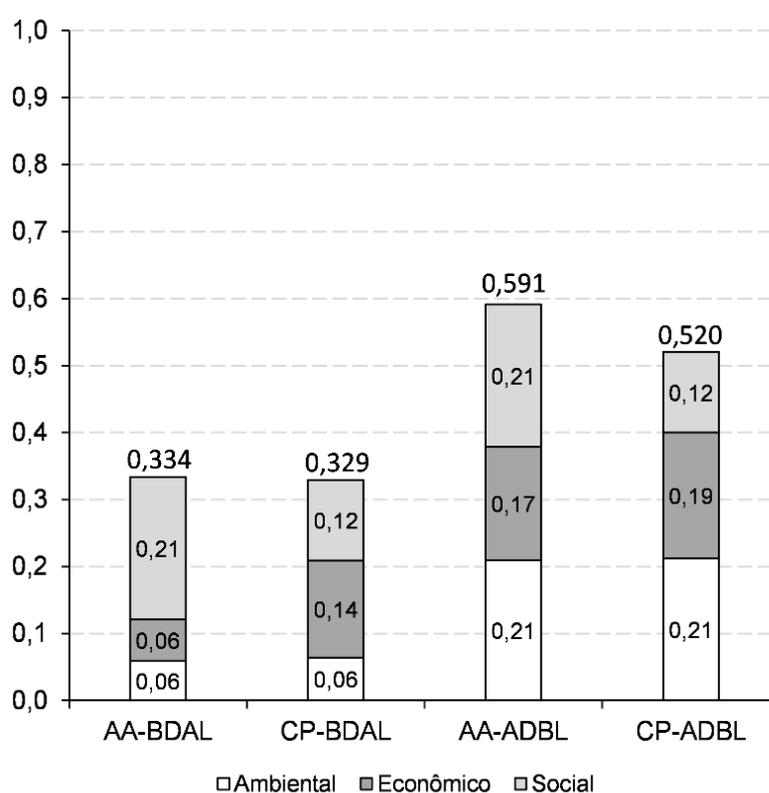


#### 4.3.5. Índice de sustentabilidade final

A Figura 82 apresenta o índice de sustentabilidade final ( $V_{\text{final}}$ ) das dosagens do ligante álcali-ativado (AA-ADBL e AA-BDAL) e do cimento Portland (CP-ADBL e CP-BDAL). A dosagem AA-ADBL obteve a maior pontuação final (0,591), seguida por CP-ADBL (0,520), AA-BDAL (0,334) e CP-BDAL (0,329). Isto significa que a dosagem AA-ADBL é a mais sustentável. O pilar ambiental apresentou maior pontuação para as dosagens AA-ADBL e CP-ADBL, seguidas por AA-BDAL e CP-BDAL. Para AA-ADBL e CP-ADBL a pontuação do pilar ambiental foi idêntica: conforme Figura 76 cada uma destas dosagens possui menor impacto ambiental em cinco das dez categorias estudadas. As dosagens AA-BDAL e CP-BDAL apresentaram maiores impactos ambientais e mesma pontuação do pilar ambiental após a função valor ( $V_i$ )

homogeneizar diferentes valores de categorias ambientais. O pilar econômico apresentou maior pontuação para a dosagem CP-ADBL, seguida por AA-ADBL, CP-BDAL e AA-BDAL. Isto é explicado pelo menor custo direto desta dosagem (Figura 79). Entretanto, menor custo indireto foi observado na dosagem AA-ADBL, o que justifica a maior pontuação do pilar econômico desta dosagem em relação a dosagem CP-BDAL. O pilar social apresentou maior pontuação para as dosagens AA-ADBL e AA-BDAL, seguidas por CP-ADBL e CP-BDAL, em acordo com o observado na Figura 81 e Figura 80, respectivamente. Dosagens de maior densidade e menor teor de ligante (AA-ADBL e CP-ADBL) resultaram em maiores índices de sustentabilidade por apresentarem menores custos e impactos ambientais.

**Figura 82:** Índice de sustentabilidade final para cada dosagem conforme MIVES



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Com base nos ensaios e análises realizadas, as seguintes considerações finais podem ser aferidas.

#### **Pastas álcali-ativadas:**

- (a) O uso de cinza do bagaço de cana-de açúcar e cal de casca de ovo hidratada na produção de um ligante álcali-ativado agrega valor aos resíduos agroindustriais e evita sua disposição final em aterros sanitários e industriais ou lixão a céu aberto, reduzindo o risco de lixiviação de contaminantes (da cinza) e transmissão de doenças (da biodegradação da casca de ovo);
- (b) De acordo com a ANOVA das pastas álcali-ativadas todos fatores controláveis (razão CBCA/COH, molaridade e relação A/L) e suas interações influenciaram significativamente a resistência à compressão simples. Entretanto, uma maior magnitude dos efeitos foi observada para dois fatores: molaridade e relação A/L;
- (c) Pastas álcali-ativadas moldadas somente com água ou a maiores molaridades (3M) apresentaram baixa resistência à compressão simples. Isto permite concluir que a presença de álcalis é necessária para dissolver a sílica e alumina da cinza e iniciar as reações químicas no período de tempo estudado (7 dias de cura). Entretanto, concentrações excessivas do íon hidroxila levam a uma menor solubilidade do hidróxido de cálcio prejudicando a formação de produtos de reação. A adição de componentes de cálcio permitiu que as amostras fossem moldadas a menores molaridades alcançando resistências significativas a 7 dias de cura a 23°C;
- (d) O ligante álcali-ativado que alia maior resistência à compressão simples e menor quantidade de cal é composto por: relação CBCA/COH = 4 (80% de CBCA e 20% de COH) e concentração de álcalis = 2,61% Na<sub>2</sub>O (correspondente a uma relação A/L = 0,8 e molaridade 1M para as pastas);
- (e) Na pasta álcali-ativada identificou-se um gel C-(N)-A-S-H na forma de um halo amorfo ao longo da linha de radiação de fundo da difração. Portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>) não foi identificada

no difratograma por ter sido consumida durante o processo de ativação alcalina. Imagens de MEV da pasta mostraram que os produtos de reação do processo possuem um efeito cimentante, com uma estrutura menos densa e mais porosa do que materiais cimentantes convencionais. A EDS evidenciou áreas ricas em Ca, Si, Na e Al e o mapa químico indicou a presença de cálcio, oxigênio e silício, e consequentemente de um gel C-S-H. O espectro de FTIR da pasta mostrou bandas a  $460\text{ cm}^{-1}$ , associada a vibrações por flexão O-Si-O,  $967\text{ cm}^{-1}$ , associada a formação do gel C-A-S-H, e  $1020\text{ cm}^{-1}$ , típica da banda principal de géis N-A-S-H;

### **Mistura solo-ligante álcali-ativado e solo-cimento Portland:**

- (f) Para ensaios de resistência à compressão simples em misturas solo-ligante o gráfico de Pareto indicou que para o ligante álcali-ativado os fatores principais A (peso específico aparente seco), D (temperatura de cura), B (teor de ligante), E (tempo de cura) e a interação de segunda ordem AD (interação entre o peso específico e a temperatura de cura) possuem, nesta ordem, maior magnitude de influência sobre a resistência à compressão simples. O fator principal teor de umidade não apresentou efeito significativo. Para o cimento Portland os fatores principais A (peso específico aparente seco) e D (temperatura de cura), a interação de segunda ordem AD (interação entre o peso específico e a temperatura de cura), e os fatores E (tempo de cura) e B (teor de ligante) possuem, nesta ordem, maior magnitude de influência sobre a resistência à compressão simples. O fator principal teor de umidade apresentou efeito significativo;
- (g) Para ensaios de resistência à tração por compressão diametral em misturas solo-ligante o gráfico de Pareto indicou que para amostras com uso do ligante álcali-ativado os fatores principais A (peso específico aparente seco), B (teor de ligante), D (temperatura de cura), E (tempo de cura) e a interação de segunda ordem AE (interação entre o peso específico e o tempo de cura) possuem, nesta ordem, maior magnitude de influência sobre a resistência à tração por compressão diametral. O fator principal teor de umidade não apresentou efeito significativo. Para o cimento Portland, o gráfico de Pareto indicou que os fatores principais A (peso específico aparente seco) e D (temperatura de cura), a interação de segunda ordem AD (interação entre o peso específico e a temperatura de cura), e os fatores E (tempo de cura) e C (teor de umidade) possuem, nesta ordem, maior magnitude de influência sobre a resistência à tração por compressão diametral. O fator principal B encontra-se logo abaixo do teor de umidade em magnitude de influência;

- (h) Para ensaios de módulo cisalhante inicial em misturas solo-ligante, o gráfico de Pareto indicou que em amostras com uso do ligante álcali-ativado os fatores principais A (peso específico aparente seco), B (teor de ligante), D (temperatura de cura), E (tempo de cura) e a interação de segunda ordem AD (interação entre o peso específico e a temperatura de cura) possuem, nesta ordem, maior magnitude de influência sobre o módulo cisalhante inicial. O fator principal teor de umidade apresentou efeito significativo sobre  $G_0$  para o cimento álcali-ativado, comportamento não observado previamente para as amostras de RCS e RTCD. Para o cimento Portland, os fatores principais A (peso específico aparente seco) e E (tempo de cura), a interação de segunda ordem AE (interação entre o peso específico e tempo de cura), o fator D (temperatura de cura) e a interação de segunda ordem AD (interação entre o peso específico e a temperatura de cura) possuem, nesta ordem, maior magnitude de influência sobre o módulo cisalhante inicial. Os fatores principais B e C encontram-se logo abaixo da interação AD em magnitude de influência;
- (i) A partir dos resultados estatísticos para  $q_u$ ,  $q_t$  e  $G_0$  nota-se que o fator de maior magnitude de influência sobre as variáveis de resposta analisadas, tanto para o ligante álcali-ativado quanto para o cimento Portland, foi o peso específico aparente seco (A). Esta influência é explicada pelo maior inter-travamento entre as partículas de solo e ligante, devido a uma maior compactação, e maior área de contato para o desenvolvimento de reações no sistema solo-ligante. O segundo fator de maior magnitude de influência sobre  $q_t$  e  $G_0$  para o cimento álcali-ativado foi o teor de ligante (B). O aumento no teor de ligante leva a uma maior precipitação de compostos cimentícios (e.g. géis C-A-S-H e N-A-S-H), os quais relacionam-se a uma maior rigidez e resistência por ocasionarem aglutinação das partículas. Para o cimento Portland, o segundo fator de maior magnitude de influência sobre  $q_u$  e  $q_t$  foi a temperatura de cura (D), visto que um aumento de temperatura acelera as reações de hidratação do cimento Portland. A temperatura de cura também ocasionou um aumento na velocidade das reações químicas para amostras de ligante álcali-ativado, sendo o terceiro fator de maior magnitude de influência sobre as variáveis de resposta  $q_t$  e  $G_0$  neste ligante. Para o cimento Portland, o terceiro fator de maior magnitude de influência sobre  $q_u$  e  $q_t$  foi a interação de segunda ordem AD (peso específico aparente seco e temperatura). Por fim, o quarto fator de maior magnitude de influência sobre as variáveis de resposta para ambos ligantes estudados, com exceção de  $G_0$  no cimento Portland, foi o tempo de cura (E). Um maior tempo de cura possibilita a ocorrência de reações pozolânicas

ao longo do tempo. Assim, mais produtos de reação são gerados e maior resistência é alcançada;

- (j) O efeito do fator principal teor de umidade (C) foi significativo sobre a resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e módulo cisalhante inicial no solo com cimento Portland. Para o cimento álcali-ativado a umidade influenciou significativamente somente o módulo cisalhante inicial. Isso se deve ao papel da água nas reações envolvendo o cimento Portland, onde a água é necessária para a ocorrência da hidratação desse cimento. Por outro lado, em cimentos álcali-ativados a água atua como um meio em que ocorrem as reações, não fazendo parte da composição dos géis formados;
- (k) Conforme gráficos de efeitos principais sobre  $q_u$ ,  $q_t$  e  $G_0$  um aumento no nível dos fatores controláveis peso específico, teor de ligante, teor de umidade, temperatura de cura e tempo de cura ocasionou aumento nos valores de resistência e rigidez para ambos ligantes. Com exceção da resistência à compressão simples no ligante álcali-ativado, foi observado resultado não significativo do fator curvatura na ANOVA, evidenciando um comportamento linear dos níveis dos fatores principais;
- (l) Gráficos de barras representando os valores médios de  $q_u$ ,  $q_t$  e  $G_0$  para os ligantes estudados evidenciaram valores semelhantes de resistência e rigidez para amostras com menor peso específico, havendo resultados superiores em amostras do ligante álcali-ativado;
- (m) Resultados dos ensaios de sucção matricial para o ligante álcali-ativado variaram de 20 kPa a 165 kPa (média de 62 kPa), o que corresponde, respectivamente, a 0,5% e 3,75% da resistência à compressão simples. Já para o cimento Portland, os valores de sucção variaram de 0,27 kPa a 167 kPa (média de 15 kPa), correspondendo a 0,03% e 1,74%, respectivamente, da resistência à compressão simples. A baixa contribuição percentual da sucção em relação a resistência à compressão simples das amostras permitiu que seus efeitos fossem desconsiderados;
- (n) O cimento Portland e o ligante álcali-ativado apresentaram mesma PMA no 12º ciclo para amostras com menor peso específico ( $11 \text{ kN/m}^3$ ) e maior teor de ligante (30%), e amostras com maior peso específico ( $13 \text{ kN/m}^3$ ) e maior teor de ligante (30%): 3,68% e 1,63%, respectivamente. Somente a amostra do ligante álcali-ativado de menor peso específico aparente seco ( $11 \text{ kN/m}^3$ ) e menor teor de ligante (20%) resultou em uma PMA superior

ao máximo permitido (6%). Esta amostra apresentou maior alteração volumétrica no 12º ciclo comparativamente a amostra correspondente de cimento Portland;

- (o) Para o cimento álcali-ativado e o cimento Portland, os resultados de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo cisalhante inicial e durabilidade apresentaram boas correlações (i.e., valores significativos de  $R^2$ ) com o índice porosidade/teor volumétrico de ligante ( $\eta/B_{iv}^{0,28}$ );
- (p) Para os ligantes estudados, uma redução da porosidade e aumento do teor de ligante (i.e., menor índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ ) ocasionaram aumento de resistência, rigidez e durabilidade (i.e., menor perda de massa). Uma menor porosidade, alcançada através de um maior grau de compactação, aumenta a área de contato entre as partículas de solo e ligante e leva a um maior inter-travamento destas, resultando em maior mobilização de atrito. Já o aumento no teor de ligante resulta em maior precipitação de compostos cimentícios e aumento de resistência, rigidez e durabilidade;
- (q) Um procedimento de normalização foi realizado para generalizar a relação entre os ensaios mecânicos realizados ( $q_u$ ,  $q_t$  e  $G_0$ ) e o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  para diferentes tempos de cura e temperaturas. Boas correlações (i.e., valores significativos de  $R^2$ ) foram obtidas em ambos ligantes estudados;
- (r) Conforme a ANOVA de ensaios de expansão livre ( $\epsilon_s$ ) para o ligante álcali-ativado e o cimento Portland, o teor de ligante (B) apresentou maior magnitude de influência sobre a expansão. Isso se deve à precipitação de compostos cimentícios (e.g. géis C-A-S-H e N-A-S-H) após a hidratação do cimento e como resultado da álcali-ativação. Ainda, após a adição destes ligantes,  $Ca^{2+}$  está presente em solução e ocorre troca catiônica entre  $Na^+$  e  $Ca^{2+}$ . A troca catiônica e a cimentação reduzem a expansão. Um aumento no nível dos fatores controláveis teor de ligante, teor de umidade e tempo de cura reduziu a expansão. Entretanto, ao contrario de misturas com cimento Portland, amostras de solo-ligante álcali-ativado não apresentaram uma correlação clara entre maior densidade e maior expansão. Para os fatores controláveis estudados ambos ligantes apresentaram resultado médio de expansão semelhante (10%). A presença expressiva de NaOH em amostras álcali-ativadas de alta densidade e teor de ligante controlou a expansão devido ao aumento de pH do meio. Da mesma forma, amostras contendo somente solo e o ativador expandiram menos que amostras de solo e água. A cinza expandiu ao longo do tempo, entretanto, em amostras de

7 dias de cura e maior teor de ligante a formação de produtos de reação foi alta. Assim, estes produtos se solidificaram impedindo a expansão da bentonita e da cinza durante o período de cura e após a imersão das amostras em água;

- (s) Os difratograma de misturas solo-ligante álcali-ativado mostraram a presença de fases cristalinas e semicristalinas contendo de quartzo, caulinita, portlandita, beidelita e tobermorita. O mineral tobermorita  $[Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2 \cdot 4H_2O]$  se assemelha a estrutura pouco cristalina do gel C-A-S-H. Já a beidelita  $[(Na, Ca)Al_2Si_4O_{10}(OH)_2]$  é formada durante os processos de ativação alcalina e se assemelha a estrutura do gel (C,N)-A-S-H. Um halo entre os ângulos de difração  $19^\circ$ - $32^\circ$  ( $2\theta$ ) foi atribuído a estruturas desordenadas e conteúdos altamente amorfos, i.e., produtos de reação. Comparando-se amostras de 7 e 28 dias de cura nota-se um consumo de portlandita ( $Ca(OH)_2$ ) e um aumento na intensidade do pico correspondente a tobermorita. Em relação a temperatura de cura, amostras curadas a  $40^\circ C$  apresentaram maior intensidade do pico de tobermorita e de fase amorfa comparativamente a amostras curadas a  $23^\circ C$ . A morfologia geral das amostras atestou que o solo está embebido em uma matriz cimentícia composta por produtos de reação de grande heterogeneidade composicional e estrutura amorfa, com distribuição homogênea de Si, Al, Ca e Na. A amostra curada por 28 dias a alta temperatura apresentou uma estrutura mais densa e compacta;

#### **Avaliação do ciclo de vida, misturas solo-ligante álcali-ativado e solo-cimento Portland:**

- (t) Dosagens de menor densidade e maior teor de ligante apresentaram maior impacto ambiental devido a maior quantidade de matéria-prima e consumo de diesel para o transporte de materiais. Para estas dosagens, a produção de cimento Portland (CP-BDAL) e hidróxido de sódio (AA-BDAL) foram os principais contribuintes para os impactos ambientais, visto que ambos são processos de alto consumo energético e emissão de gases de efeito estufa. A dosagem CP-BDAL apresentou maiores impactos nas categorias depleção de recursos abióticos, aquecimento global, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática em água doce, ecotoxicidade aquática marinha e ecotoxicidade terrestre. A dosagem AA-BDAL apresentou maiores impactos nas categorias oxidação fotoquímica, acidificação, eutrofização e depleção da camada de ozônio;
- (u) Uma análise de sensibilidade da avaliação ambiental do ciclo de vida resultou em impactos ambientais similares utilizando-se as metodologias de avaliação de impacto CML-IA e

TRACI. Ainda, uma análise paramétrica adicional mostrou que uma redução da distância de transporte da cinza de bagaço de cana-de-açúcar de 550 km para 50 km na dosagem AA-ADBL levou a queda dos impactos ambientais (e.g. o impacto acidificação reduziu em 39% quando a distância de transporte não excede 50 km);

- (v) Dosagens do ligante álcali-ativado apresentaram custo total superior a dosagens de cimento Portland devido a um maior custo direto, relacionado a aquisição de matéria-prima (NaOH é mais caro do que o cimento Portland), equipamento e motorista para o processo de transporte de materiais e consumo de combustível (maior distância de transporte para a CBCA). O custo indireto (custo social do carbono) de ambas dosagens álcali-ativadas foi inferior a dosagens de cimento Portland, o que é explicado pela maior emissão de CO<sub>2</sub> das dosagens de cimento;
- (w) A dosagem AA-ADBL deve ser escolhida se o cimento Portland e o precursor (es) e ativador (es) estão localizados próximos ao local de construção (<30 km). Se o cimento Portland estiver prontamente disponível, mas o precursor (es) e ativador (es) requererem uma distância maior de transporte (>550 km), a dosagem CP-ADBL é indicada. A dosagem AA-ADBL resultará em maiores custos, mas isto é contrabalanceado pelos créditos de carbono advindos de menores emissões de CO<sub>2</sub>;
- (x) O ligante álcali-ativado apresentou maior impacto social positivo. Há um aumento de área verde (impactos positivos) do cimento Portland para o ligante álcali-ativado, o que reflete no *score* final dos ligantes: 3,8 para o cimento Portland e 5,9 para o ligante álcali-ativado;
- (y) Para o cimento Portland um maior impacto social foi observado no *stakeholder* Trabalhadores, seguido por Sociedade e Comunidade local. Um maior impacto social positivo deste ligante para os Trabalhadores deve-se principalmente aos indicadores “Salário médio” e “Acidentes de trabalho”. Já o ligante álcali-ativado apresentou maior impacto sobre o *stakeholder* Sociedade, seguido por Trabalhadores e Comunidade local. O maior impacto social positivo sobre a Sociedade deve-se majoritariamente ao indicador “Contribuição do serviço/produto com o progresso econômico”, seguido por “Compromisso com pautas de sustentabilidade”. Em ambos ligantes observou-se um impacto social negativo do indicador “Participação feminina” no *stakeholder* Trabalhadores, e do indicador “Empresa/indústria oferece desenvolvimento de habilidades” no *stakeholder* Comunidade Local.

(z) A dosagem AA-ADBL obteve maior índice de sustentabilidade final (0,591), seguida por CP-ADBL (0,520), AA-BDAL (0,334) e CP-BDAL (0,329). Assim, a dosagem AA-ADBL é a mais sustentável. O pilar ambiental apresentou maior pontuação para as dosagens AA-ADBL e CP-ADBL, seguidas por AA-BDAL e CP-BDAL. O pilar econômico apresentou maior pontuação para a dosagem CP-ADBL, seguida por AA-ADBL, CP-BDAL e AA-BDALO. Já o pilar social apresentou maior pontuação para as dosagens AA-ADBL e AA-BDAL, seguidas por CP-ADBL e CP-BDAL. Dosagens de maior densidade e menor teor de ligante (AA-ADBL e CP-ADBL) resultaram em maiores índices de sustentabilidade por apresentarem menores custos e impactos ambientais.

Com base no exposto a **conclusão final** do trabalho é:

O ligante álcali-ativado oriundo de resíduos mostrou-se eficiente para a estabilização do solo expansivo em termos de comportamento mecânico (i.e. resistência, rigidez, durabilidade e expansão), podendo ser aplicado em obras de Engenharia, mais especificamente como material de base de pavimentos. Além disso, a estabilização do solo com o ligante álcali-ativado apresentou maior índice de sustentabilidade (pilares ambiental, econômico e social) comparativamente ao solo estabilizado com cimento Portland CPV-ARI.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para ampliação do conhecimento científico acerca do comportamento mecânico e microestrutural e da sustentabilidade de um solo expansivo estabilizado por ligante álcali-ativado, sugere-se os seguintes tópicos de pesquisa:

- (a) Avaliação do comportamento mecânico (e.g. resistência à compressão simples) a longo prazo do solo expansivo estabilizado com ligante álcali-ativado;
- (b) Aplicação de análises TGA e FTIR ao solo estabilizado pelo ligante álcali-ativado;
- (c) Execução de ensaios triaxiais drenados e não-drenados no solo estabilizado pelos ligantes estudados;
- (d) Estudo de ativadores alcalinos mais sustentáveis (e.g. ativador de nano-sílica de olivina, ativador à base de RHA com refluxo de NaOH, ativador à base de pó de vidro preparado termoquimicamente e ativador de licor bayer) em substituição ao NaOH;

- (e) Aplicação de novas categorias de impacto ambiental e metodologias de avaliação de impacto para os ligantes estudados;
- (f) Análise de sensibilidade da ACV considerando-se diferentes localidades para os processos utilizados no SimaPro na análise de inventário;
- (g) Cálculo do custo de se evitar a disposição de resíduos em aterros sanitários e do custo ambiental envolvido nesse processo;
- (h) Introdução de novos indicadores ao questionário para avaliação social de ciclo de vida e aplicação do mesmo para um maior número de participantes.

## REFERÊNCIAS

ABDELJOUAD, Lokmane *et al.* Effect of Clay Content on Soil Stabilization with Alkaline Activation. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 0, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40891-019-0157-y>

ABLICOR - BRAZIL CHLOR-ALKALI AND DERIVATES INDUSTRY. **Ablicor 2014 annual report**. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: <http://abiclor.com.br/relatorio2014/en-indicadores-do-setor.html>.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NB2 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais pozolânicos — Requisitos**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2018a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2017a.

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: [s. n.], 2017b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2017c.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Solos e rochas - Terminologia**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2022.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2017d.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2018b.

ABREU, D. G. *et al.* Why is sustainability important in Geotechnical Engineering? **Geotechnical Special Publication**, [s. l.], n. 178, p. 821–828, 2008. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/40971\(310\)102](https://doi.org/10.1061/40971(310)102)

ACI. **ACI 230.1R-09: Report on Soil Cement**. Farmington Hills, MI: [s. n.], 2009.

ADESANYA, Elijah *et al.* Opportunities to improve sustainability of alkali-activated materials: A review of side-stream based activators. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 286, p. 125558, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125558>

AFNOR. **NFP 18-513: Métakaolin, addition pouzzolanique pour bétons – Addition pour béton hydraulique – Métakaolin – Spécifications et critères de conformité**. [S. l.: s. n.], 2012.

ALARCON, Bibiana *et al.* A value function for assessing sustainability: Application to industrial buildings. **Sustainability**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 35–50, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su3010035>

ALEHYEN, S. *et al.* Porosity and fire resistance of fly ash based geopolymer. **Journal of Materials and Environmental Science**, [s. l.], v. 8, n. 10, p. 3676–3689, 2017.

ARCE, Gabriel *et al.* **Use of Bagasse Ash as a Concrete Additive for Road Pavement Application**. Baton Rouge: [s. n.], 2019.

ARIF, Elisabeth; CLARK, Malcolm W.; LAKE, Neal. Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 128, p. 287–297, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.091>

ASTM. D2166/D2166M: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. **American Society for Testing and Materials**, [s. l.], p. 1–7, 2016. Disponível em: [https://doi.org/10.1520/D2166\\_D2166M-16](https://doi.org/10.1520/D2166_D2166M-16)

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C109/C109M-20b: Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50 mm] cube specimens). **Annual Book of ASTM Standards**, [s. l.], p. 12, 2020a. Disponível em: [https://doi.org/10.1520/C0109\\_C0109M-20B](https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-20B)

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1157/C1157M: Standard Performance Specification for Hydraulic Cement**. [S. l.: s. n.], 2020b. Disponível em: [https://doi.org/10.1520/C1157\\_C1157M-20](https://doi.org/10.1520/C1157_C1157M-20).

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C150/C150M: Standard Specification for Portland Cement**. [S. l.: s. n.], 2020c. Disponível em: [https://doi.org/0.1520/C0150\\_C0150M-20](https://doi.org/0.1520/C0150_C0150M-20).

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. [S. l.: s. n.], 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/C0618-19>.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C977-18: Standard Specification for Quicklime and Hydrated Lime for Soil Stabilization**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/C0977-18>.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **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>))**. [S. l.: s. n.], 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/D1557-12>.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2487 – 17: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)**. [S. l.: s. n.], 2020d. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/D2487-17E01>.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3282–15: Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes**. [S. l.: s. n.], 2015a. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/D3282-15>.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D4546: Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils. **American Society for Testing and**

**Materials**, [s. l.], p. 1–10, 2014a. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/D4546-14>.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4972-13: Standard Test Method for pH of Soils**. [S. l.: s. n.], 2013.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5298: Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper** ASTM International. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/D5298-16>.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D559/D559M: Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures**. [S. l.: s. n.], 2015b. Disponível em: [https://doi.org/10.1520/D0559\\_D0559M-15](https://doi.org/10.1520/D0559_D0559M-15).

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D6739: Standard test method for silica — pH value**. [S. l.: s. n.], 2020e.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D8295: Standard Test Method for Determination of Shear Wave Velocity and Initial Shear Modulus in Soil Specimens using Bender Elements**. [S. l.: s. n.], 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/D8295-19>.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D854: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer**. [S. l.: s. n.], 2014b. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/D0854-14>.

BASU, Dipanjan; MISRA, Aditi; PUPPALA, Anand J. Sustainability and geotechnical engineering: Perspectives and review. **Canadian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 52, n. 1, p. 96–113, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0120>

BEHNOOD, Ali. Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. **Transportation Geotechnics**, [s. l.], v. 17, n. July, p. 14–32, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.08.002>

BERGER, Roland; HÄNZE, Martin. Impact of Expert Teaching Quality on Novice Academic Performance in the Jigsaw Cooperative Learning Method. **International Journal of Science Education**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 294–320, 2015. Disponível em:

<https://doi.org/10.1080/09500693.2014.985757>

BJØRN, Anders *et al.* LCA History. *In:* HAUSCHILD, Michael Z.; K. ROSENBAUM, Ralph; OLSEN, Stig Irving (org.). **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018a. p. 1215.

BJØRN, Anders *et al.* Life Cycle Inventory Analysis. *In:* HAUSCHILD, Michael Z.; K. ROSENBAUM, Ralph; OLSEN, Stig Irving (org.). **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018b. p. 1215.

BJØRN, Anders *et al.* Main Characteristics of LCA. *In:* HAUSCHILD, Michael Z.; K. ROSENBAUM, Ralph; OLSEN, Stig Irving (org.). **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018c. p. 1215.

BJØRN, Anders *et al.* Scope Definition. *In:* HAUSCHILD, Michael Z.; K. ROSENBAUM, Ralph; OLSEN, Stig Irving (org.). **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018d. p. 1215.

BLAND, J M.; ALTMAN, D. G. Statistics notes: Cronbach's alpha. **BMJ**, [*s. l.*], v. 314, n. 7080, p. 572–572, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.314.7080.572>

BRADFORD, Joe M. **Fundamentals of Soil Behavior**. [*S. l.: s. n.*], 1976. v. 40 Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1976.03615995004000040003x>

BRE. **Product Category Rules for Type III Environmental Product Declaration of Construction Products to EN 15804:2012**. Watford, UK: [*s. n.*], 2013.

BRUNDTLAND, Gro Harlem. **Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development (WCED)**. New York: [*s. n.*], 1987.

BRUSCHI, Giovani Jordi. **Estabilização de rejeitos de mineração de bauxita por meio de um sistema ligante álcali-ativado de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cal de carbureto**. 184 f. 2020. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [*s. l.*], 2020.

BRUSCHI, Giovani Jordi *et al.* Green stabilization of bauxite tailings: A mechanical study on alkali-activated materials. **Journal of Materials in Civil Engineering, in press**, [*s. l.*], 2021.

BUCHWALD, A.; DOMBROWSKI, K.; WEIL, M. The influence of calcium content on the

performance of geopolymeric binder especially the resistance against acids. *In:* , 2005, Saint-Quentin, France. **Proceedings of the World Congress Geopolymer**,. Saint-Quentin, France: [s. n.], 2005. p. 35–39.

BUCHWALD, A.; ZELLMANN, H. D.; KAPS, Ch. Condensation of aluminosilicate gels-model system for geopolymer binders. **Journal of Non-Crystalline Solids**, [s. l.], v. 357, n. 5, p. 1376–1382, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.12.036>

CAIXA; IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL - SINAPI**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/referencias-precos-insumos/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 15 nov. 2020.

CATERPILLAR. **Caterpillar Performance Handbook**. Peoria, Illinois, U.S.A.: [s. n.], 2018.

CEMENT AUSTRALIA. **High Early Strength Cement**. [S. l.], 2011. Disponível em: [https://www.cementaustralia.com.au/sites/default/files/2018-09/product\\_data\\_sheet\\_high\\_early\\_cement.pdf](https://www.cementaustralia.com.au/sites/default/files/2018-09/product_data_sheet_high_early_cement.pdf). Acesso em: 20 jul. 2021.

CHANDLER, RJ; CRILLY, MS; SMITH, MG. A LOW-COST METHOD OF ASSESSING CLAY DESICCATION FOR LOW-RISE BUILDINGS. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering**, [s. l.], v. 92, n. 2, p. 82–89, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/icien.1992.18771>

CHANDLER, R. J.; GUTIERREZ, C. I. The filter-paper method of suction measurement. **Geotechnique**, [s. l.], v. 36, n. 2, p. 265–268, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.2.265>

CHENG, T. W.; CHIU, J. P. Fire-resistant geopolymer produce by granulated blast furnace slag. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 205–210, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00008-6)

CHITHIRAPUTHIRAN, Sundararaman; NEITHALATH, Narayanan. Isothermal reaction kinetics and temperature dependence of alkali activation of slag, fly ash and their blends. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 45, p. 233–242, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.061>

CLARE, K. E.; POLLARD, A. E. The effect of curing temperature on the compressive strength of soil-cement mixtures. **Geotechnique**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 97–106, 1954. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/geot.1954.4.3.97>

CML - DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ECOLOGY. **CML-IA Characterisation Factors**. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>. Acesso em: 28 dez. 2021.

COKCA, Erdal; YAZICI, Veysel; OZAYDIN, Vehbi. Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS) and GBFS-Cement. **Geotechnical and Geological Engineering**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 489–499, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10706-008-9250-z>

CONSOLI, N. C. *et al.* Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. **Geotechnique**, [s. l.], v. 62, n. 2, p. 177–183, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/geot.8.P.084>

CONSOLI, Nilo; DA ROCHA, Cecília Gravina; SILVANI, Carina. Devising dosages for soil-fly ash-lime blends based on tensile strength controlling equations. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 55, p. 238–245, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.044>

CONSOLI, Nilo Cesar *et al.* Durability, strength, and stiffness of compacted gold tailings – cement mixes. **Canadian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 55, n. 4, p. 486–494, 2018a. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0391>

CONSOLI, Nilo Cesar *et al.* Durability, strength, and stiffness of green stabilized sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 144, n. 9, p. 1–10, 2018b. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001928](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001928)

CONSOLI, Nilo Cesar *et al.* Durability evaluation of reclaimed asphalt pavement, ground glass and carbide lime blends based on unconfined compression tests. **Transportation Geotechnics**, [s. l.], v. 27, n. June 2020, 2021a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100461>

CONSOLI, Nilo Cesar *et al.* Eggshell Produced Limes: Innovative Materials for Soil Stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 32, n. 11, p. 06020018, 2020. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003418](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003418)

CONSOLI, Nilo Cesar *et al.* Increasing density and cement content in stabilization of expansive soils: Conflicting or complementary procedures for reducing swelling? **Canadian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 58, n. 6, p. 866–878, 2021b. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0855>

CONSOLI, Nilo Cesar *et al.* Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 133, n. 2, p. 197–205, 2007. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:2\(197\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(197))

CONSOLI, Nilo Cesar *et al.* Lime–Ground Glass–Sodium Hydroxide as an Enhanced Sustainable Binder Stabilizing Silica Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 147, n. 10, p. 06021011, 2021c. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002624](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002624)

CONSOLI, Nilo Cesar *et al.* Porosity-Cement Ratio Controlling Strength of Artificially Cemented Clays. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 23, n. 8, p. 1249–1254, 2011. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000283](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000283)

CONSOLI, Nilo Cesar *et al.* Single model establishing strength of dispersive clay treated with distinct binders. **Canadian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 53, n. 12, p. 2072–2079, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0606>

CONSOLI, Nilo Cesar *et al.* Strength and Stiffness of Ground Waste Glass-Carbide Lime Blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 31, n. 10, p. 2–7, 2019. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002862](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002862)

CONSOLI, Nilo Cesar; DA SILVA LOPES, Luizmar; HEINECK, Karla Salvagni. Key parameters for the strength control of lime stabilized soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 21, n. 5, p. 210–216, 2009. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:5\(210\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:5(210))

CONSOLI, Nilo Cesar; ROSA, Amanda Dalla; SALDANHA, Rodrigo Beck. Variables Governing Strength of Compacted Soil–Fly Ash–Lime Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 432–440, 2011. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000186](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000186)

CORDEIRO, Guilherme C.; KURTIS, Kimberly E. Effect of mechanical processing on sugar

cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 97, p. 41–49, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.008>

CORDEIRO, Guilherme Chagas *et al.* Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 39, n. 2, p. 110–115, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.005>

CORDEIRO, Guilherme Chagas; ANDREÃO, Priscila Vinco; TAVARES, Luís Marcelo. Pozzolanic properties of ultrafine sugar cane bagasse ash produced by controlled burning. **Heliyon**, [s. l.], v. 5, n. 10, p. 0–5, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02566>

COSTA, Leonardo Martins *et al.* Influence of the addition of amorphous and crystalline silica on the structural properties of metakaolin-based geopolymers. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 215, p. 106312, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106312>

COUDERT, Elodie *et al.* Use of alkali activated high-calcium fly ash binder for kaolin clay soil stabilisation: Physicochemical evolution. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 201, p. 539–552, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.188>

CRIADO, M.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Alkali activation of fly ash. Part III: Effect of curing conditions on reaction and its graphical description. **Fuel**, [s. l.], v. 89, n. 11, p. 3185–3192, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.03.051>

CRIADO, M.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. **Fuel**, [s. l.], v. 84, n. 16, p. 2048–2054, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.03.030>

CRISTELO, Nuno *et al.* Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 29, p. 167–174, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.049>

DA FONSECA, António Viana; CRUZ, Rodrigo Caberlon; CONSOLI, Nilo Cesar. Strength properties of sandy soil-cement admixtures. **Geotechnical and Geological Engineering**, [s. l.], v. 27, n. 6, p. 681–686, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10706-009-9267-y>

DA ROCHA, Cecília Gravina *et al.* Life cycle assessment for soil stabilization dosages: A study

for the Paraguayan Chaco. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 139, p. 309–318, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.219>

DA ROCHA, Cecília Gravina *et al.* Social and environmental assessments of Eco-friendly Pavement alternatives. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 325, n. May 2021, p. 126736, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126736>

DA S TRENTIN, Adan W. *et al.* Quantitative Assessment of Life Cycle Sustainability (QUALICS): Framework and its application to assess electrokinetic remediation. **Chemosphere**, [s. l.], v. 230, p. 92–106, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.200>

DAMIANS, Ivan P. *et al.* Environmental assessment of earth retaining wall structures. **Environmental Geotechnics**, [s. l.], v. 4, n. 6, p. 415–431, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/jenge.15.00040>

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry & Applications**. 2. ed. Saint-Quentin, France: Institut Géopolymère, 2008. *E-book*.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers - Inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**, [s. l.], v. 37, n. 8, p. 1633–1656, 1991. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF01912193>

DAVIDOVITS, Joseph. False Values on CO2 Emission for Geopolymer Cement/Concrete published In Scientific Papers. **Geopolymer Institute Library, Technical Paper**, [s. l.], v. 24, p. 1–9, 2015.

DAVIDOVITS, Joseph. GEOPOLYMERS BASED ON NATURAL AND SYNTHETIC METAKAOLIN A CRITICAL REVIEW. *In:* , 2017, Daytona Beach, Florida. (Waltraud M. Kriven *et al.*, Org.) **Proceedings of the 41st International Conference on Advanced Ceramics and Composites**. Daytona Beach, Florida: The American Ceramic Society, 2017. p. 277.

DAVIDOVITS, Prof Joseph. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications . Market Trends and Potential Breakthroughs . **Geopolymer 2002 Conference**, [s. l.], p. 1–16, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

DE VARGAS, Alexandre Silva *et al.* Strength development of alkali-activated fly ash produced with combined NaOH and Ca(OH)<sub>2</sub> activators. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 53, p. 341–349, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.06.012>

DNIT. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro: Ministério do Transporte, 2006.

DOMBROWSKI, K.; BUCHWALD, A.; WEIL, M. The influence of calcium content on the structure and thermal performance of fly ash based geopolymers. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 42, n. 9, p. 3033–3043, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0532-7>

DONG, Ya Hong; NG, S. Thomas. A social life cycle assessment model for building construction in Hong Kong. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 20, n. 8, p. 1166–1180, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0908-5>

DREYER, L. **Interpretation of the fundamental ILO conventions into business context: background for development of social LCA**. Lyngby, Denmark: [s. n.], 2006.

DUXSON, P. Geopolymer precursor design. *In*: PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S.J. (org.). **Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications**. 1. ed. Oxford: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2009. p. 469.

DUXSON, P. *et al.* Geopolymer technology: The current state of the art. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>

DUXSON, P.; VAN DEVENTER, J. S.J. Commercialization of geopolymers for construction – opportunities and obstacles. *In*: PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S.J. (org.). **Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications**. 1. ed. Oxford: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2009. p. 469.

EKVALL, Tomas; FINNVEDEN, Göran. Allocation in ISO 14041 - a critical review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 197–208, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(00\)00052-4](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(00)00052-4)

EMARAH, Dina A.; SELEEM, Safwat A. Swelling soils treatment using lime and sea water for roads construction. **Alexandria Engineering Journal**, [s. l.], v. 57, n. 4, p. 2357–2365,

2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.08.009>

EPA - U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Mineral Products Industry. *In*: AP-42: COMPILATION OF AIR EMISSIONS FACTORS. [S. l.: s. n.], 1998.

EPA - U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts (TRACI)**. [S. l.], 2013.

EUROPEAN LIME ASSOCIATION. **A competitive and efficient lime industry**. Bruxelas: [s. n.], 2019.

FAN, Ri-dong *et al.* Engineering behavior and sedimentation behavior of lead contaminated soil-bentonite vertical cutoff wall backfills. **Journal of Central South University**, [s. l.], v. 20, p. 2255–2262, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11771-013-1732-3>

FATTAH, Mohammed Y; SALIM, Nahla M; IRSHAYYID, Entesar J. Influence of soil suction on swelling pressure of bentonite-sand mixtures. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, [s. l.], p. 1–15, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1320236>

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. **Cementos de escorias activadas alcalinamente: influencia de las variables y modelización del proceso**. 352 f. 2000. - Universidad Autónoma de Madrid, [s. l.], 2000.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. *et al.* The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. **Microporous and Mesoporous Materials**, [s. l.], v. 91, n. 1–3, p. 111–119, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.11.015>

FERNANDEZ-JIMENEZ, Ana; PALOMO, A. Characterisation of fly ashes . Potential reactivity as alkaline cements. **Fuel**, [s. l.], v. 82, p. 2259–2265, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00194-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00194-7)

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Nanostructure/microstructure of fly ash geopolymers. *In*: PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S.J. (org.). **Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications**. 1. ed. Oxford: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2009. p. 469.

FERREIRA, Silvio Romero de Melo *et al.* Avaliação da expansão de um solo do município de

Paulista-PE melhorado com cal. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 22, n. suppl 1, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170005.0266>

FIGUEIREDO, R. Lima; PAVÍA, S. A study of the parameters that determine the reactivity of sugarcane bagasse ashes (SCBA) for use as a binder in construction. **SN Applied Sciences**, [s. l.], v. 2, n. 9, p. 1–15, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03224-w>

FINNVEDEN, Göran *et al.* Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 91, n. 1, p. 1–21, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>

FLETCHER, Ross A. *et al.* The composition range of aluminosilicate geopolymers. **Journal of the European Ceramic Society**, [s. l.], v. 25, n. 9, p. 1471–1477, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.06.001>

FOPPA, Diego. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 146 f. 2005. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2005.

FRARE, Andreza; LUZ, Caroline Angulski da. Cimentos álcali ativados: efeito da cura térmica no desenvolvimento da resistência mecânica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 25, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0872>

FRÍAS, Moisés; VILLAR, Ernesto; SAVASTANO, Holmer. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 490–496, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.003>

GARCIA-LODEIRO, I. *et al.* Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na<sub>2</sub>O-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 41, n. 9, p. 923–931, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.006>

GARCÍA-LODEIRO, I.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Hydration kinetics in hybrid binders: Early reaction stages. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 39, p. 82–92, 2013a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.025>

GARCÍA-LODEIRO, I.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Variation in hybrid cements over time. Alkaline activation of fly ash-portland cement blends. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 52, p. 112–122, 2013b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.022>

GARCÍA-LODEIRO, Inés *et al.* Hybrid alkaline cements. Part I: Fundamentals. **Revista Romana de Materiale/ Romanian Journal of Materials**, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 330–335, 2012.

GARCIA-LODEIRO, I; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Crucial insights on the mix design of alkali-activated cement-based binders. *In*: PACHECO-TORGAL, F. *et al.* (org.). **Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015a. p. 855.

GARCIA-LODEIRO, I; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Crucial insights on the mix design of alkali-activated cement-based binders. *In*: PACHECO-TORGAL, F. *et al.* (org.). **Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015b. p. 855.

GARTNER, Ellis; SUI, Tongbo. Alternative cement clinkers. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 114, p. 27–39, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.002>

GHADIR, Pooria *et al.* Transportation Geotechnics Shear strength and life cycle assessment of volcanic ash-based geopolymer and cement stabilized soil: A comparative study. **Transportation Geotechnics**, [s. l.], v. 31, n. August, p. 100639, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100639>

GIDDINGS, Bob; HOPWOOD, Bill; O'BRIEN, Geoff. Environment, economy and society: Fitting them together into sustainable development. **Sustainable Development**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 187–196, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/sd.199>

GIRI, Rajiv K.; REDDY, Krishna R. Sustainability Assessment of Two Alternate Earth-Retaining Structures. *In*: , 2015, Reston, VA. **IFCEE 2015**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2015. p. 2836–2845. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/9780784479087.265>

GOEDKOOOP, Mark *et al.* **Introduction to LCA with SimaPro Colophon**. [S. l.: s. n.], 2016a.

GOEDKOOOP, Mark *et al.* **SimaPro TutorialSimaPro**. [S. l.: s. n.], 2016b.

GOMES CORREIA, A.; WINTER, M. G.; PUPPALA, A. J. A review of sustainable approaches in transport infrastructure geotechnics. **Transportation Geotechnics**, [s. l.], v. 7, p. 21–28, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.03.003>

HABERT, G.; D'ESPIROSE DE LACAILLERIE, J. B.; ROUSSEL, N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: Reviewing current research trends. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 19, n. 11, p. 1229–1238, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.012>

HANEHARA, Shunsuke *et al.* Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 31–39, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00441-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00441-5)

HEAH, C. Y. *et al.* Effect of curing profile on kaolin-based geopolymers. **Physics Procedia**, [s. l.], v. 22, p. 305–311, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.11.048>

HOLT, Peter K. *et al.* A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 211, n. 2–3, p. 233–248, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(02\)00285-6](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00285-6)

HONG, Jinglan *et al.* Life cycle assessment of caustic soda production: A case study in China. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 66, p. 113–120, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.009>

HOSSAIN, Md Uzzal *et al.* Development of social sustainability assessment method and a comparative case study on assessing recycled construction materials. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 23, n. 8, p. 1654–1674, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1373-0>

HUIJBREGTS, Mark A.J. *et al.* Framework for modelling data uncertainty in life cycle inventories. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 127–132, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02978728>

HUNKELER, David;; REBITZER, Gerald. The future of life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 10, p. 305–308, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1065/lca2005.09.001>

HUNKELER, David; LICHTENVORT, Kerstin; REBITZER, Gerald (org.). **Environmental Life Cycle Costing**. Webster, New York, USA: CRC Press, 2008.

HUNTZINGER, Deborah N.; EATMON, Thomas D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 17, n. 7, p. 668–675, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.007>

IKEAGWUANI, C. C.; OBETA, I. N.; AGUNWAMBA, J. C. Stabilization of black cotton soil subgrade using sawdust ash and lime. **Soils and Foundations**, [s. l.], v. 59, n. 1, p. 162–175, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.10.004>

INTERAGENCY WORKING GROUP. **Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide interim estimates under executive order 13990**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: [https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/02/TechnicalSupportDocument\\_SocialCostofCarbonMethaneNitrousOxide.pdf](https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/02/TechnicalSupportDocument_SocialCostofCarbonMethaneNitrousOxide.pdf).

ISO. **ISO 14040 (2006): Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework**. Switzerland: [s. n.], 2006a.

ISO. **ISO 14042 (1999): Environmental management - Life cycle I assessment - Life cycle impact assessment**. Switzerland: [s. n.], 1999.

ISO. **ISO 14044 (2006): Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines**. Switzerland: [s. n.], 2006b. Disponível em: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11367-011-0297-3>.

IUCN; UNEP; WWF. **Caring for the Earth: A strategy for sustainable living**. [S. l.: s. n.], 1991. Disponível em: <https://doi.org/10.4324/9781315066073>

JAMES, Robert *et al.* Behaviour of lime - Slag-treated clay. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement**, [s. l.], v. 161, n. 4, p. 207–216, 2008. Disponível em:

<https://doi.org/10.1680/grim.2008.161.4.207>

JEGANDAN, Seevaratnam *et al.* Sustainable binders for soil stabilisation. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement**, [s. l.], v. 163, n. 1, p. 53–61, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/grim.2010.163.1.53>

JIANG, Rui; WU, Peng. Estimation of environmental impacts of roads through life cycle assessment: A critical review and future directions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s. l.], v. 77, n. November, p. 148–163, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.010>

JONES, Lee D; JEFFERSON, Ian. Expansive soils. *In*: INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS MANUALS SERIES. [S. l.]: ICE Publishing, 2015. p. 46.

JUNG, Chulmin; BOBET, Antonio. **POST-CONSTRUCTION EVALUATION OF LIME-TREATED SOILS** JOINT TRANSPORTATION RESEARCH PROGRAM. West Lafayette: [s. n.], 2008.

KALETA-JUROWSKA, Alina; JUROWSKI, Krystian. The influence of ambient temperature on high performance concrete properties. **Materials**, [s. l.], v. 13, n. 20, p. 1–16, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13204646>

KANI, Ebrahim Najafi; ALLAHVERDI, Ali. Effects of curing time and temperature on strength development of inorganic polymeric binder based on natural pozzolan. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 44, n. 12, p. 3088–3097, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3411-1>

KAR, Arkamitra. **CHARACTERIZATIONS OF CONCRETES WITH ALKALI-ACTIVATED BINDER AND CORRELATING THEIR PROPERTIES FROM MICRO-TO SPECIMEN LEVEL**. 241 f. 2013. - West Virginia University, [s. l.], 2013.

KHALIFA, Ahmed Z. *et al.* Advances in alkali-activation of clay minerals. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 132, n. March, p. 106050, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106050>

KLINOWSKI, J. NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE STUDIES OF ZEOLITES. **Progress in NMR Spectroscopy**, [s. l.], v. 16, p. 237–309, 1984.

KLOEPFFER, Walter. State-of-the-Art in Life Cycle Sustainability Assessment ( LCSA ) Life Cycle Sustainability Assessment of Products. **Int J LCA**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 89–95, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1065/lca2008.02.376>

KOVALCHUK, G.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development - Part II. **Fuel**, [s. l.], v. 86, n. 3, p. 315–322, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.07.010>

KRIVENKO, P. Why alkaline activation - 60 years of the theory and practice of alkali-activated materials. **Journal of Ceramic Science and Technology**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 323–333, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.4416/JCST2017-00042>

LANGDON, Davis. **Life cycle costing ( LCC ) as a contribution to sustainable construction : a common methodology Draft Methodology : Key issues and outline framework**. [S. l.: s. n.], 2006.

LEI, Jiawei; LAW, Wei Wee; YANG, En Hua. Effect of calcium hydroxide on the alkali-silica reaction of alkali-activated slag mortars activated by sodium hydroxide. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 272, p. 121868, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121868>

LEITE, Rafaella *et al.* Lime stabilization of expansive soil from Sergipe - Brazil. **E3S Web of Conferences**, [s. l.], v. 9, p. 14005, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160914005>

LI, Chao; SUN, Henghu; LI, Longtu. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 40, n. 9, p. 1341–1349, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020>

LI, Xiao Juan; ZHENG, Yan dan. Using LCA to research carbon footprint for precast concrete piles during the building construction stage: A China study. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 245, p. 118754, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118754>

LICHTENVORT, Kerstin *et al.* Introduction History of Life Cycle Costing, Its Categorization, and Its Basic Framework. *In*: HUNKELER, David; LICHTENVORT, Kerstin; REBITZER, Gerald (org.). **Environmental Life Cycle Costing**. Webster, New York, USA: CRC Press,

2008. p. 211.

MA, Hongqiang *et al.* Preparation and reaction mechanism characterization of alkali-activated coal gangue-slag materials. **Materials**, [s. l.], v. 12, n. 14, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12142250>

MACNEIL, Joseph Herman. **HATCHERY EGG SHELL WASTE PROCESSING METHOD AND DEVICE**. US 6,899,294 B2. Concessão: 2005.

MEDINA-MARTOS, Enrique *et al.* Environmental and economic performance of carbon capture with sodium hydroxide. **Journal of CO2 Utilization**, [s. l.], v. 60, n. March, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.101991>

METHOT, A. **FIDD: A green and socially responsible venture capital fund. Presentation on the life cycle approaches for green investment**. Lausanne, Switzerland: 26 LCA Swiss Discussion Forum, 2005.

MINERALOGICAL SOCIETY OF GREAT BRITAIN & IRELAND; THE CLAY MINERALS SOCIETY. **Images of Clay Archive**. [S. l.], 2020. Disponível em: [www.minersoc.org/images-of-clay.html](http://www.minersoc.org/images-of-clay.html). Acesso em: 19 nov. 2020.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Plataforma Brasil**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://plataformabrasil.saude.gov.br/login.jsf>. Acesso em: 17 out. 2022.

MITCHELL, J.K. Soil improvement - State-of-the-art Report. *In:* , 1981, Stockholm, Sweden. **Proceeding of 10th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Stockholm, Sweden: [s. n.], 1981. p. Vol. 4, 509-565.

MITCHELL, James K.; SOGA, Kenichi. **Fundamentals of Soil Behavior**. 3. ed. Hoboken, New Jersey: JOHN WILEY & SONS, 2005.

MOLTESEN, Andreas *et al.* Social Life Cycle Assessment: An Introduction. *In: HAUSCHILD, Michael Z.; K. ROSENBAUM, Ralph; OLSEN, Stig Irving (org.). Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. p. 1215.

MOLTESEN, Andreas; BJØRN, Anders. LCA and Sustainability. *In: HAUSCHILD, Michael Z.; K. ROSENBAUM, Ralph; OLSEN, Stig Irving (org.). Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. p. 1215.

MOREAU, Vincent; WEIDEMA, Bo P. The computational structure of environmental life cycle costing. **Int J Life Cycle Assess**, [s. l.], p. 5, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0952-1>

MUÑIZ-VILLARREAL, M. S. *et al.* The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer. **Materials Letters**, [s. l.], v. 65, n. 6, p. 995–998, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.12.049>

MUSTAFA AL BAKRIA, A. M. *et al.* The effect of curing temperature on physical and chemical properties of geopolymers. **Physics Procedia**, [s. l.], v. 22, p. 286–291, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.11.045>

NATIONAL LIME ASSOCIATION. **Lime-Treated Soil Construction Manual: Lime Stabilization & Lime Modification**. [S. l.: s. n.], 2004. Disponível em: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:LIME-TREATED+SOIL+CONSTRUCTION+MANUAL+LIME+STABILIZATION+&+LIME+MODIFICATION#0>.

OUELLET-PLAMONDON, C.; HABERT, G. **Life cycle assessment (LCA) of alkali-activated cements and concretes**. [S. l.]: Woodhead Publishing Limited, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1533/9781782422884.5.663>

PALOMO, A. *et al.* Opc-fly ash cementitious systems: Study of gel binders produced during alkaline hydration. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 42, n. 9, p. 2958–2966, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0585-7>

PALOMO, A *et al.* A review on alkaline activation: new analytical perspectives ; Activación alcalina: Revisión y nuevas perspectivas de análisis. **Materiales de construcción**, [s. l.], v. 64, n. 315, p. 22, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3989/mc.2014.00314>

PALOMO, Angel *et al.* Alkaline Activation of Fly Ashes : NMR Study of the Reaction Products. **Journal of the American Ceramic Society**, [s. l.], v. 87, n. 6, p. 1141–1145, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2004.01141.x>

PARK, Sungwoo; POUR-GHAZ, Mohammad. What is the role of water in the geopolymerization of metakaolin? **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 182, p. 360–370, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.073>

PCA - PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Soil-Cement Laboratory Handbook**. Illinois: [s. n.], 1992.

PEREIRA DOS SANTOS, Carolina *et al.* Stabilization of gold mining tailings with alkali-activated carbide lime and sugarcane bagasse ash. **Transportation Geotechnics**, [s. l.], v. 32, n. November 2021, p. 100704, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100704>

PERERA, D. S. *et al.* Influence of curing schedule on the integrity of geopolymers. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 42, n. 9, p. 3099–3106, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0533-6>

PINI. **Tabelas de composições de preços para orçamentos (TCPO)**. [S. l.: s. n.], 2010.

PONS, Oriol; DE LA FUENTE, Albert; AGUADO, Antonio. The use of MIVES as a sustainability assessment MCDM method for architecture and civil engineering applications. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 8, n. 5, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su8050460>

PRÉ CONSULTANTS. **Company history**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.pre-sustainability.com/about-pre/company-history>. Acesso em: 2 maio 2020.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S.J. Introduction to geopolymers. *In*: PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S.J. (org.). **Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications**. 1. ed. Oxford: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2009. p. 469.

PROVIS, John L. Activating solution chemistry for geopolymers. *In*: PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S.J. (org.). **Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications**. 1. ed. Oxford: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2009. p. 469.

PROVIS, John L. *et al.* Historical Aspects and Overview. *In*: PROVIS, John; DEVENTER, Jannie van (org.). **Alkali activated materials: State of The Art Report**. [S. l.]: Springer Netherlands, 2014. p. 388.

PROVIS, John L. Introduction and Report. *In*: PROVIS, John; DEVENTER, Jannie van (org.). **Alkali activated materials: State of The Art Report**. 1. ed. [S. l.]: Springer Netherlands,

2014. p. 388.

PROVIS, John L.; LUKEY, Grant C.; VAN DEVENTER, Jannie S.J. Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? a reexamination of existing results. **Chemistry of Materials**, [s. l.], v. 17, n. 12, p. 3075–3085, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/cm050230i>

PUERTAS, F. *et al.* A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements. **Journal of the European Ceramic Society**, [s. l.], v. 31, n. 12, p. 2043–2056, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.04.036>

PUERTAS, F.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; BLANCO-VARELA, M. T. Pore solution in alkali-activated slag cement pastes. Relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 139–148, 2004. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00254-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00254-0)

PUPPALA, Anand J.; PEDARLA, Aravind. Innovative ground improvement techniques for expansive soils. **Innovative Infrastructure Solutions**, [s. l.], v. 2, n. 1, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41062-017-0079-2>

REBITZER, Gerald *et al.* Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**, [s. l.], v. 30, n. 5, p. 701–720, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>

REDDY, Krishna R; CAMESELLE, Claudio; ADAMS, Jeffrey A. **Sustainable engineering drivers, metrics, tools, and applications**. [S. l.]: Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, Inc, 2019.

RICHARDSON, I. G. Tobermorite/jennite- and tobermorite/calcium hydroxide-based models for the structure of C-S-H: Applicability to hardened pastes of tricalcium silicate,  $\beta$ -dicalcium silicate, Portland cement, and blends of Portland cement with blast-furnace slag, metakaol. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 34, n. 9, p. 1733–1777, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.034>

RIVERA, J. F. *et al.* Clayey soil stabilization using alkali-activated cementitious materials. **Materiales de Construcción**, [s. l.], v. 70, n. 337, p. 211, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3989/mc.2020.07519>

ROBAYO-SALAZAR, Rafael *et al.* Life cycle assessment (LCA) of an alkali-activated binary

concrete based on natural volcanic pozzolan: A comparative analysis to OPC concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 176, p. 103–111, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.017>

RÖDGER, Jan-Markus; KJÆR, Louise Laumann; PAGOROPOULOS, Aris. Life Cycle Costing: An Introduction. *In*: HAUSCHILD, Michael Z.; ROSENBAUM, Ralph K.; OLSEN, Stig Irving (org.). **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. p. 1215.

ROGERS, C D F; GLENDINNING, S. Modification of clay soils using lime. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering**, [s. l.], p. 99–114, 1996.

ROSENBAUM, Ralph *et al.* Life Cycle Impact Assessment. *In*: HAUSCHILD, Michael Z.; ROSENBAUM, Ralph K.; OLSEN, Stig Irving (org.). **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. p. 1215.

RUIZ-SANTAQUITERIA, C. *et al.* Clay reactivity: Production of alkali activated cements. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 73, n. 1, p. 11–16, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.10.012>

SALDANHA, Rodrigo Beck *et al.* Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 298, p. 123648, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123648>

SALES, Almir; LIMA, Sofia Araújo. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste Management**, [s. l.], v. 30, n. 6, p. 1114–1122, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.026>

SANTOS, Leandro Victor dos. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE UMA BENTONITA EM UM SOLO RESIDUAL PARA USO COMO CAMADA SELANTE**. 157 f. 2008. - UFRJ, [s. l.], 2008.

SARGENT, P. The development of alkaliactivated mixtures for soil stabilisation. *In*: PACHECO-TORGAL, F. *et al.* (org.). **Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. p. 885.

SCRIVENER, Karen *et al.* Electron microscopy. *In*: SCRIVENER, Karen; SNELLINGS,

Ruben; LOTHENBACH, Barbara (org.). **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. New York, United States: CRC Press, 2016. p. 530.

SCRIVENER, Karen L.; JOHN, Vanderley M.; GARTNER, Ellis M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 114, n. February, p. 2–26, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>

SEVERO, C G S *et al.* Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [s. l.], v. 82, p. 55–67, 2013. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/334/276>

SHI, Caijun; STEGEMANN, J. A. Acid corrosion resistance of different cementing materials. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 30, n. 5, p. 803–808, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00234-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00234-9)

SHI, Zhenguog; LOTHENBACH, Barbara. The role of calcium on the formation of alkali-silica reaction products. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 126, n. September, p. 105898, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105898>

SILVA, P. De; SAGOE-CRENSTIL, K.; SIRIVIVATNANON, V. Kinetics of geopolymerization: Role of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub>. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 37, n. 4, p. 512–518, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.003>

SINAPI. **CADERNOS TÉCNICOS DE COMPOSIÇÕES PARA Aterros, Bases, Sub bases e Imprimações**. [S. l.: s. n.], 2021.

SINGHI, Binod; LASKAR, Aminul Islam; AHMED, M. Ali. Investigation on Soil–Geopolymer with Slag, Fly Ash and Their Blending. **Arabian Journal for Science and Engineering**, [s. l.], v. 41, n. 2, p. 393–400, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1677-y>

SINGHI, Binod; LASKAR, Aminul Islam; AHMED, Mokaddes Ali. Mechanical Behavior and Sulfate Resistance of Alkali Activated Stabilized Clayey Soil. **Geotechnical and Geological Engineering**, [s. l.], v. 35, n. 5, p. 1907–1920, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0216-x>

SNELLINGS, Ruben. X-ray powder diffraction applied to cement. *In*: SCRIVENER, Karen; SNELLINGS, Ruben; LOTHENBACH, Barbara (org.). **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. New York, United States: CRC Press, 2016. p. 530.

SOUZA, José William de Lima *et al.* Optimization of epoxy resin: An investigation of eggshell as a synergic filler. **Materials**, [s. l.], v. 12, n. 9, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12091489>

SPHERA. **GaBi Software Suite - #1 LCA Software**. [S. l.], 2020. Disponível em: <http://www.gabi-software.com/news/news-detail/article/a-brief-history-of-life-cycle-assessment-lca/>. Acesso em: 2 maio 2020.

SUHENDRO, Bambang. Toward green concrete for better sustainable environment. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 95, n. Scescm, p. 305–320, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.190>

SYED, Mazhar; GUHARAY, Anasua; KAR, Arkamitra. Stabilization of Expansive Clayey Soil with Alkali Activated Binders. **Geotechnical and Geological Engineering**, [s. l.], v. 38, n. 6, p. 6657–6677, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01461-9>

TEMUJIN, J.; VAN RIESSEN, A.; WILLIAMS, R. Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 167, n. 1–3, p. 82–88, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.12.121>

TEMUJIN, J.; WILLIAMS, R. P.; VAN RIESSEN, A. Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 209, n. 12–13, p. 5276–5280, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.03.016>

TERASHI, M.; JURAN, Llan. Ground Improvement - State Of The Art. *In*: , 2000. **ISRM International Symposium**. [S. l.]: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2000. p. 59.

THE ECOINVENT CENTRE. **Ecoinvent 3.4**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org/database/older-versions/ecoinvent-34/ecoinvent-34.html>. Acesso em: 1 set. 2020.

THERMOFISHER SCIENTIFIC. **Conceitos básicos de FTIR**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.thermofisher.com/br/en/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/molecular-spectroscopy-information/ftir-information/ftir-basics.html>. Acesso em: 6 nov. 2022.

THOMAS JEFFERSON PLANNING DISTRICT COMMISSION. **The 1998 Sustainability Accords**. Virginia: [s. n.], 1998. Disponível em: <http://www.charlottesville.org/home/showdocument?id=25001>

TURNER, Louise K.; COLLINS, Frank G. Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolimer and OPC cement concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 43, p. 125–130, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Life Cycle Cost Analysis Primer**. [S. l.: s. n.], 2002.

UNEP/SETAC. **Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products**. Druk in de weer, Belgium: [s. n.], 2009.

UNEP/SETAC. **Product Social Impact Assessment Handbook - 2020**. Amersfoort: [s. n.], 2020.

UNEP/SETAC. **The Methodological Sheets for Sub - Categories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA)**. [S. l.: s. n.], 2013.

UNEP/SETAC. **Towards a Life Cycle Sustainability Assessment**. [S. l.]: UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2011.

USACE. **SOIL STABILIZATION AND MODIFICATION FOR PAVEMENTS**. [S. l.: s. n.], 2020.

VISENTIN, Caroline *et al.* Social life cycle assessment of the nanoscale zero-valent iron synthesis process for application in contaminated site remediation. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17319-3>

WEIL, M.; DOMBROWSKI, K.; BUCHWALD, A. Life-cycle analysis of geopolymers. *In*:

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S.J. (org.). **Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications**. 1. ed. Oxford: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2009. p. 469.

WHITE, Claire E. *et al.* The use of XANES to clarify issues related to bonding environments in metakaolin: A discussion of the paper S. Sperinck *et al.*, “dehydroxylation of kaolinite to metakaolin-a molecular dynamics study,” *J. Mater. Chem.*, 2011, 21, 2118-2125. **Journal of Materials Chemistry**, [*s. l.*], v. 21, n. 19, p. 7007–7010, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/c1jm10379b>

WILKINSON, A.; HAQUE, A.; KODIKARA, J. Stabilisation of clayey soils with industrial by-products: Part B. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement**, [*s. l.*], v. 163, n. 3, p. 165–172, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/grim.2010.163.3.165>

XU, Qing *et al.* Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials. **Materials**, [*s. l.*], v. 12, n. 1, p. 1–19, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12010039>

YANG, Keun Hyeok; SONG, Jin Kyu; SONG, Keum Il. Assessment of CO<sub>2</sub> reduction of alkali-activated concrete. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 39, p. 265–272, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.001>

YIP, C. K.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S.J. The coexistence of geopolymetric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 35, n. 9, p. 1688–1697, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.042>

YOUNG, Francis J. *et al.* **The Science and Technology of Civil Engineering Materials**. New Jersey: Prentice-Hall, 1998.

ZAHMAK, Abdulla *et al.* Environmental performance of alkali-activated binders for ground improvement. **Transportation Geotechnics**, [*s. l.*], v. 31, n. August, p. 100631, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100631>

ZAILANI, Warid Wazien Ahmad *et al.* Bonding strength characteristics of FA-based geopolymer paste as a repair material when applied on opc substrate. **Applied Sciences**

(Switzerland), [s. l.], v. 10, n. 9, p. 1–14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10093321>

ZHANG, Mo *et al.* Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 47, p. 1468–1478, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.017>

ZHAO, Honghua *et al.* Effects of chemical stabilizers on an expansive clay. **KSCE Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 18, n. 4, p. 1009–1017, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12205-013-1014-5>

## APÊNDICE A

### QUESTIONÁRIO – TRANSPORTE RODOVIÁRIO

#### Dados de perfil

#### 1 - Em qual setor do mercado você trabalha?

- Transporte rodoviário       Construção de rodovias       Indústria de cimento  
Portland
- Indústria de cal       Indústria de hidróxido de sódio       Outro.  
Especifique: \_\_\_\_\_

#### 2 - Qual sua profissão e/ou cargo ocupado?

---

#### Este questionário compreende três categorias sociais:

1. **Trabalhadores:** todas as pessoas da empresa de transporte rodoviário que utilizam da própria força de trabalho para executar obras ou serviços, mediante o pagamento de salário, por exemplo: motorista, mecânico, supervisor, engenheiro, gerente, etc.;
2. **Comunidade Local:** todos os agrupamentos de pessoas que estão dentro da mesma área geográfica onde a empresa está instalada, por exemplo: moradores da região, funcionários de instituições privadas e públicas, etc.;
3. **Sociedade:** grupos de indivíduos humanos que estão sob um mesmo regime político e econômico, em um mesmo território, por exemplo: sociedade brasileira, etc.

### Avaliação de indicadores sociais

**1. Qual cenário reflete a saúde dos trabalhadores da empresa de transporte rodoviário** (isto é, o transporte de materiais e equipamentos dos seus locais de estoque até o canteiro de obras de estradas)?

<input type="checkbox"/>	<u>Nunca</u> ocorreram acidentes de trabalho.
<input type="checkbox"/>	<u>Raramente</u> (menos de uma vez ao ano) ocorre um acidente que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente menos sério</u> (cortes superficiais, fraturas leves, etc.) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério</u> (atropelamento, esmagamento, colisão com outros veículos, queimaduras, etc.) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda permanente</u> da sua capacidade para o trabalho. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério por ano</u> ocasionando a <u>morte</u> do trabalhador. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda permanente e/ou temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**2 – Qual cenário reflete o salário dos trabalhadores da empresa de transporte rodoviário?**

<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria, <u>mas a maioria ainda</u> recebe um <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> os trabalhadores recebem <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário pelo menos igual</u> ao piso salarial da categoria, e <u>outros</u> trabalhadores recebem <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem um <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**3 - Qual cenário reflete a participação feminina (incluindo mulheres transexuais e travestis) na força de trabalho da empresa de transporte rodoviário?**

<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 20% ou mais da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 15% ou mais e menos de 20% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 10% ou mais e menos de 15% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a mais de 5% e menos de 10% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 5% ou menos da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**4 – Qual cenário reflete o nível de diálogo (ex: pagamento de salário, férias, horas extras, demissões, etc) com a representação coletiva dos trabalhadores para discutir relações de trabalho da empresa de transporte rodoviário?**

( )	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, <u>executa os acordos</u> (ex: ajustes salariais, férias, licença paternidade, etc) feitos em negociação coletiva com o sindicato, e <u>consulta o sindicato</u> sobre decisões com grandes consequências (ex: demissões, etc).
( )	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>executa os acordos</u> feitos em negociação coletiva com o sindicato.
( )	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
( )	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, mas <u>não participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
( )	O empregador <u>interfere/dificulta a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>não participa</u> de negociação coletiva em negociação coletiva.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**5 – Qual cenário reflete a situação da empresa de transporte rodoviário na saúde e segurança da comunidade local (ex: reduzir/evitar ou favorecer a poluição sonora, poluição de córregos e rios por resíduos ou efluentes/esgoto, contaminação de solos, emissão de gases poluentes, acidentes e/ou mortes ocasionadas por falha tecnológica ou por não cumprimento de procedimentos de segurança do trabalho, etc.)?**

<input type="checkbox"/>	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> (ex: frotas compostas por caminhões de tecnologia avançada) e possui <u>parcerias com empresas público-privadas</u> para melhorar a saúde e a segurança da comunidade local <sup>1</sup> .
<input type="checkbox"/>	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> que impactam na saúde e segurança da comunidade local.
<input type="checkbox"/>	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
<input type="checkbox"/>	<u>Raramente</u> ocorrem acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
<input type="checkbox"/>	Ocorre <u>pelo menos um acidente por ano</u> com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

<sup>1</sup>Exemplos: parcerias com prefeituras, hospitais/postos de saúde e empresas para adquirir/doar materiais e equipamentos da saúde e da segurança pública, e materiais de construção para reforma/ampliação de áreas hospitalares/postos de saúde e para iluminação pública, etc.

**6 - Qual cenário reflete a situação da empresa de transporte rodoviário no engajamento comunitário** (isto é, conjunto de ações para entender as preocupações, necessidades e desejos da comunidade local por meio do diálogo com líderes comunitários)?

( )	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> para entender as demandas da comunidade, <u>possui normas internas</u> para incorporar as demandas das comunidades e <u>leva em consideração as necessidades das minorias locais</u> (ex: LGBTQIA+, indígenas, comunidades ribeirinhas, etc).
( )	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários, e <u>possui normas internas</u> que obrigam a tomada de decisão posteriormente ao consentimento da comunidade local.
( )	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários.
( )	O empregador <u>raramente informa ou consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
( )	O empregador <u>nunca informa e nunca consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**7 – Qual cenário reflete a situação da empresa de transporte rodoviário no desenvolvimento de habilidades da comunidade local (realização de cursos, palestras ou treinamentos para as pessoas da localidade, de modo a suprir o déficit de mão de obra qualificada para atender às necessidades futuras do empregador)?**

( )	O empregador oferece <u> cursos relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de direção defensiva e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos </u> da comunidade <u> que se interessem </u> e patrocina cursos de capacitação técnica <u> não relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de primeiros socorros, informática, idiomas, etc).
( )	O empregador oferece apenas <u> cursos relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de direção defensiva e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos </u> da comunidade <u> que se interessam </u> .
( )	O empregador <u> oferece apenas cursos relacionados à sua área de atuação </u> e apenas para os <u> adultos </u> da comunidade que <u> já atuam no transporte rodoviário </u> .
( )	O empregador <u> não oferece cursos </u> mas <u> desenvolveu um plano inicial </u> para qualificar a mão-de-obra local.
( )	O empregador <u> não oferece cursos </u> mesmo havendo um déficit de mão-de-obra qualificada para atender às necessidades da empresa
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**8 – Qual cenário reflete a situação da empresa de transporte rodoviário na contribuição para o progresso econômico da sociedade (ex: criação de trabalhos, capacitação técnica, etc)?**

( )	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> (ex: criação de novas filiais, incentivo ao primeiro emprego e à qualificação profissional, etc) e <u>é reconhecido como uma força construtiva na sociedade</u> .
( )	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> .
( )	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos</u> , e <u>nunca se envolveu</u> em ações prejudiciais ao progresso econômico (ex: evasões fiscais, corrupção, etc).
( )	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos</u> , e <u>já realizou</u> ações prejudiciais ao progresso econômico, mas mudou sua atitude <u>implementando políticas internas para acabar</u> com essas ações.
( )	O empregador <u>não estimula a criação de empregos</u> e se envolve em ações prejudiciais ao progresso econômico e não implementa/implementou políticas internas para acabar com estas ações.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**9 – Qual cenário reflete a situação da empresa de transporte rodoviário no compromisso público com pautas de sustentabilidade frente a sociedade (ex: saúde e bem-estar, redução de desigualdades, preservação da fauna e flora, ações contra mudanças no clima, etc)?**

( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> (ex: caminhões de menor consumo de combustíveis ou com acessórios para redução da emissão de ruídos/gases poluentes, etc) e <u>sociais</u> (ex: pagamento de salário acima do praticado por concorrentes, etc) em seus produtos ou serviços.
( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> em seus produtos ou serviços.
( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>traçou um plano de ação</u> para práticas mais sustentáveis que <u>ainda não está em funcionamento</u> .
( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade, mas <u>nenhum plano de ação foi traçado</u> para práticas mais sustentáveis.
( )	O empregador <u>nunca se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**10 – Qual cenário reflete a situação da empresa de transporte rodoviário no desenvolvimento tecnológico da sociedade (ex: criação e/ou melhoria de produtos, serviços, processos ou técnicas como desenvolvimento de novas tecnologias para caminhões visando menor consumo de combustível, estabilidade do veículo, etc.)?**

( )	O empregador <u>investiu em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades que resultaram em <u>novos produtos/serviços já comercializados no mercado</u> , e <u>continua a investir na criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços</u> .
( )	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços</u> .
( )	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>aprimoramento de produtos/serviços já existentes</u> .
( )	O empregador <u>desenvolveu um plano de ação</u> visando contribuir com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua, mas este plano ainda <u>não foi colocado em prática</u> .
( )	O empregador <u>não contribui</u> com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua (não realiza nenhuma das ações listadas acima).
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**Importância dos indicadores sociais**

**1 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Trabalhadores? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 4 (menos importante).**

- ( ) Acidentes de trabalho no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- ( ) Salário médio dos trabalhadores no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- ( ) Participação de mulheres no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- ( ) Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores

**2 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Comunidade Local? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante).**

- ( ) Riscos para a saúde e segurança da comunidade local
- ( ) Empresa/contratante informa, consulta e envolve a comunidade local
- ( ) Empresa/contratante oferece desenvolvimento de habilidades para a comunidade local

**3 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Sociedade? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante).**

- ( ) Contribuição do serviço/produto para o progresso econômico
- ( ) Compromisso público com pautas de sustentabilidade
- ( ) Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico

**4 – Dentre os indicadores considerados mais importantes nas questões 1 a 3, numere-os por ordem de importância (1 = mais importante, 3 = menos importante).**

- ( )
- ( )
- ( )

## QUESTIONÁRIO – CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS

### Dados de perfil

#### 1 - Em qual setor do mercado você trabalha?

- Transporte rodoviário     Construção de rodovias     Indústria de cimento  
Portland
- Indústria de cal     Indústria de hidróxido de sódio     Outro.
- Especifique: \_\_\_\_\_

#### 2 - Qual sua profissão e/ou cargo ocupado?

---

#### Este questionário compreende três categorias sociais:

1. **Trabalhadores:** todas as pessoas da empresa de construção de estradas que utilizam da própria força de trabalho para executar obras ou serviços, mediante o pagamento de salário, por exemplo: motorista, mecânico, supervisor, engenheiro, gerente, etc.;
2. **Comunidade Local:** todos os agrupamentos de pessoas que estão dentro da mesma área geográfica onde a empresa está instalada, por exemplo: moradores da região, funcionários de instituições privadas e públicas, etc.;
3. **Sociedade:** grupos de indivíduos humanos que estão sob um mesmo regime político e econômico, em um mesmo território, por exemplo: sociedade brasileira, etc.

**Avaliação de indicadores sociais**

**1. Qual cenário reflete a saúde dos trabalhadores da empresa de construção de estradas?**

( )	<u>Nunca</u> ocorreram acidentes de trabalho.
( )	<u>Raramente</u> (menos de uma vez ao ano) ocorre um acidente que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
( )	Ocorre pelo menos <u>um acidente menos sério</u> (cortes superficiais, fraturas leves, etc.) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
( )	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério</u> (atropelamento, soterramento, esmagamento, queimaduras, choques elétricos, inalação de gases, vapores e material particulado, etc) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda permanente</u> da sua capacidade para o trabalho. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
( )	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério por ano</u> ocasionando a <u>morte</u> do trabalhador. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda permanente e/ou temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**2 – Qual cenário reflete o salário dos trabalhadores da empresa de construção de estradas?**

<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria, <u>mas a maioria ainda</u> recebe um <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> os trabalhadores recebem <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário pelo menos igual</u> ao piso salarial da categoria, e <u>outros</u> trabalhadores recebem <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem um <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**3 - Qual cenário reflete a participação feminina (incluindo mulheres transexuais e travestis) na força de trabalho da empresa de construção de estradas?**

<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 30% ou mais da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 20% ou mais e menos de 30% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 10% ou mais e menos de 20% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a mais de 5% e menos de 10% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 5% ou menos da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**4 – Qual cenário reflete o nível de diálogo (ex: pagamento de salário, férias, horas extras, demissões, etc) com a representação coletiva dos trabalhadores para discutir relações de trabalho da empresa de construção de estradas?**

( )	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, <u>executa os acordos</u> (ex: ajustes salariais, férias, licença paternidade, etc) feitos em negociação coletiva com o sindicato, e <u>consulta o sindicato</u> sobre decisões com grandes consequências (ex: demissões, etc).
( )	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>executa os acordos</u> feitos em negociação coletiva com o sindicato.
( )	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
( )	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, mas <u>não participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
( )	O empregador <u>interfere/dificulta a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>não participa</u> de negociação coletiva em negociação coletiva.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**5 – Qual cenário reflete a situação da empresa de construção de estradas na saúde e segurança da comunidade local** (ex: reduzir/evitar ou favorecer a: poluição sonora, poluição de córregos e rios por resíduos ou efluentes/esgoto, contaminação de solos, emissão de gases poluentes, acidentes e/ou mortes ocasionadas por falha tecnológica ou por não cumprimento de procedimentos de segurança do trabalho, etc)?

<input type="checkbox"/>	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> (ex: veículos e equipamentos com tecnologia avançada, etc) e possui <u>parcerias com empresas público-privadas</u> para melhorar a saúde e a segurança da comunidade local <sup>1</sup> .
<input type="checkbox"/>	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> que impactam na saúde e segurança da comunidade local.
<input type="checkbox"/>	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
<input type="checkbox"/>	<u>Raramente</u> ocorrem acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
<input type="checkbox"/>	Ocorre <u>pelo menos um acidente por ano</u> com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

<sup>1</sup>Exemplos: parcerias com prefeituras, hospitais/postos de saúde e empresas para adquirir/doar materiais e equipamentos da saúde e da segurança pública, e materiais de construção para reforma/ampliação de áreas hospitalares/postos de saúde e para iluminação pública, etc.

**6 - Qual cenário reflete a situação da empresa de construção de estradas no engajamento comunitário** (isto é, conjunto de ações para entender as preocupações, necessidades e desejos da comunidade local por meio do diálogo com líderes comunitários)?

( )	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> para entender as demandas da comunidade, <u>possui normas internas</u> para incorporar as demandas das comunidades e <u>leva em consideração as necessidades das minorias locais</u> (ex: LGBTQIA+, indígenas, comunidades ribeirinhas, etc).
( )	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários, e <u>possui normas internas</u> que obrigam a tomada de decisão posteriormente ao consentimento da comunidade local.
( )	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários.
( )	O empregador <u>raramente informa ou consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
( )	O empregador <u>nunca informa e nunca consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**7 – Qual cenário reflete a situação da empresa de construção de estradas no desenvolvimento de habilidades da comunidade local (realização de cursos, palestras ou treinamentos para as pessoas da localidade, de modo a suprir o déficit de mão de obra qualificada para atender às necessidades futuras do empregador)?**

( )	O empregador oferece <u> cursos relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de direção defensiva e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos </u> da comunidade <u> que se interessem </u> e patrocina cursos de capacitação técnica <u> não relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de primeiros socorros, informática, idiomas, etc).
( )	O empregador oferece apenas <u> cursos relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de direção defensiva e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos </u> da comunidade <u> que se interessam </u> .
( )	O empregador <u> oferece apenas cursos relacionados à sua área de atuação </u> e apenas para os <u> adultos </u> da comunidade que <u> já atuam na construção de estradas </u> .
( )	O empregador <u> não oferece cursos </u> mas <u> desenvolveu um plano inicial </u> para qualificar a mão-de-obra local.
( )	O empregador <u> não oferece cursos </u> mesmo havendo um déficit de mão-de-obra qualificada para atender às necessidades da empresa
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**8 – Qual cenário reflete a situação da empresa de construção de estradas na contribuição para o progresso econômico da sociedade (ex: criação de trabalhos, capacitação técnica, etc)?**

( )	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> (ex: criação de novas filiais, incentivo ao primeiro emprego e à qualificação profissional, etc) e <u>é reconhecido como uma força construtiva na sociedade</u> .
( )	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> .
( )	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos</u> , e <u>nunca se envolveu em ações prejudiciais</u> ao progresso econômico (ex: evasões fiscais, corrupção, etc).
( )	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos</u> , e <u>já realizou ações prejudiciais</u> ao progresso econômico, mas mudou sua atitude <u>implementando políticas internas para acabar</u> com essas ações.
( )	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos</u> , e <u>se envolve em ações prejudiciais</u> ao progresso econômico e <u>não implementa/implementou políticas internas para acabar</u> com estas ações.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**9 – Qual cenário reflete a situação da empresa de construção de estradas no compromisso público com pautas de sustentabilidade frente a sociedade (ex: saúde e bem-estar, redução de desigualdades, preservação da fauna e flora, ações contra mudanças no clima, etc)?**

( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> (ex: veículos e equipamentos de menor consumo de combustíveis e/ou com acessórios para redução da emissão de ruídos/gases poluentes, etc) e <u>sociais</u> (ex: pagamento de salário acima do praticado por concorrentes, etc) em seus produtos ou serviços.
( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> em seus produtos ou serviços.
( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>traçou um plano de ação</u> para práticas mais sustentáveis que <u>ainda não está em funcionamento</u> .
( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade, mas <u>nenhum plano de ação foi traçado</u> para práticas mais sustentáveis.
( )	O empregador <u>nunca se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**10 – Qual cenário reflete a situação da empresa de construção de estradas no desenvolvimento tecnológico da sociedade (ex: criação e/ou melhoria de produtos, serviços, processos ou técnicas como desenvolvimento de pavimentos mais duráveis/sustentáveis, etc)?**

( )	O empregador <u>investiu em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades que resultaram em <u>novos produtos/serviços já comercializados no mercado</u> , e <u>continua a investir</u> na criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços.
( )	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços</u> .
( )	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>aprimoramento de produtos/serviços já existentes</u> .
( )	O empregador <u>desenvolveu um plano de ação</u> visando contribuir com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua, mas este plano ainda <u>não foi colocado em prática</u> .
( )	O empregador <u>não contribui</u> com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua (não realiza nenhuma das ações listadas acima).
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**Importância dos indicadores sociais**

**1 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Trabalhadores? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 4 (menos importante).**

- ( ) Acidentes de trabalho no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- ( ) Salário médio dos trabalhadores no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- ( ) Participação de mulheres no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- ( ) Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores

**2 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Comunidade Local? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante).**

- ( ) Riscos para a saúde e segurança da comunidade local
- ( ) Empresa/contratante informa, consulta e envolve a comunidade local
- ( ) Empresa/contratante oferece desenvolvimento de habilidades para a comunidade local

**3 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Sociedade? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante).**

- ( ) Contribuição do serviço/produto para o progresso econômico
- ( ) Compromisso público com pautas de sustentabilidade
- ( ) Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico

**4 – Dentre os indicadores considerados mais importantes nas questões 1 a 3, numere-os por ordem de importância (1 = mais importante, 3 = menos importante).**

- ( )
- ( )
- ( )

## QUESTIONÁRIO – INDÚSTRIA DE CIMENTO PORTLAND

### Dados de perfil

#### 1 - Em qual setor do mercado você trabalha?

- Transporte rodoviário     Construção de rodovias     Indústria de cimento Portland  
 Indústria de cal     Indústria de hidróxido de sódio     Outro.  
 Especifique: \_\_\_\_\_

#### 2 - Qual sua profissão e/ou cargo ocupado?

---

#### Este questionário compreende três categorias sociais:

1. **Trabalhadores:** todas as pessoas da empresa de cimento Portland que utilizam da própria força de trabalho para executar obras ou serviços, mediante o pagamento de salário, por exemplo: motorista, mecânico, operador, químico, supervisor, engenheiro, gerente, etc.;
2. **Comunidade Local:** todos os agrupamentos de pessoas que estão dentro da mesma área geográfica onde a empresa está instalada, por exemplo: moradores da região, funcionários de instituições privadas e públicas, etc.;
3. **Sociedade:** grupos de indivíduos humanos que estão sob um mesmo regime político e econômico, em um mesmo território, por exemplo: sociedade brasileira, etc.

**Avaliação de indicadores sociais**

**1. Qual cenário reflete a saúde dos trabalhadores da empresa de produção de cimento Portland?**

( )	<u>Nunca</u> ocorreram acidentes de trabalho.
( )	<u>Raramente</u> (menos de uma vez ao ano) ocorre um acidente que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
( )	Ocorre pelo menos <u>um acidente menos sério</u> (cortes superficiais, fraturas leves, dores em geral, amnésia, perda da fala, etc) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
( )	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério</u> (atropelamento, esmagamento, queimaduras, cortes, choques elétricos, inalação de gases, etc) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda permanente</u> da sua capacidade para o trabalho. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
( )	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério</u> por ano ocasionando a <u>morte</u> do trabalhador. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda permanente e/ou temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**2 – Qual cenário reflete o salário dos trabalhadores da empresa de produção de cimento Portland?**

<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria, <u>mas a maioria ainda</u> recebe um <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> os trabalhadores recebem <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário pelo menos igual</u> ao piso salarial da categoria, e <u>outros</u> trabalhadores recebem <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem um <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**3 - Qual cenário reflete a participação feminina (incluindo mulheres transexuais e travestis) na força de trabalho da empresa de produção de cimento Portland?**

<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 30% ou mais da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 20% ou mais e menos de 30% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 15% ou mais e menos de 20% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a mais de 10% e menos de 15% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 10% ou menos da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**4 – Qual cenário reflete o nível de diálogo (ex: pagamento de salário, férias, horas extras, demissões, etc) com a representação coletiva dos trabalhadores para discutir relações de trabalho da empresa de produção de cimento Portland?**

( )	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, <u>executa os acordos</u> (ex: ajustes salariais, férias, licença paternidade, etc) feitos em negociação coletiva com o sindicato, e <u>consulta o sindicato</u> sobre decisões com grandes consequências (ex: demissões, etc).
( )	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>executa os acordos</u> feitos em negociação coletiva com o sindicato.
( )	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
( )	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, mas <u>não participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
( )	O empregador <u>interfere/dificulta a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>não participa</u> de negociação coletiva em negociação coletiva.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**5 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cimento Portland na saúde e segurança da comunidade local** (ex: reduzir/evitar ou favorecer a: poluição sonora, poluição de córregos e rios por resíduos ou efluentes/esgoto, contaminação de solos, emissão de gases poluentes, acidentes e/ou mortes ocasionadas por falha tecnológica ou por não cumprimento de procedimentos de segurança do trabalho, etc)?

( )	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> (ex: embalagens mais resistentes, equipamentos com tecnologia avançada) e possui <u>parcerias com empresas público-privadas</u> para melhorar a saúde e a segurança da comunidade local <sup>1</sup> .
( )	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> que impactam na saúde e segurança da comunidade local.
( )	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
( )	<u>Raramente</u> ocorrem acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
( )	Ocorre <u>pelo menos um acidente por ano</u> com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

<sup>1</sup>Exemplos: parcerias com prefeituras, hospitais/postos de saúde e empresas para adquirir/doar materiais e equipamentos da saúde e da segurança pública, e materiais de construção para reforma/ampliação de áreas hospitalares/postos de saúde e para iluminação pública, etc.

**6 - Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cimento Portland no engajamento comunitário (isto é, conjunto de ações para entender as preocupações, necessidades e desejos da comunidade local por meio do diálogo com líderes comunitários)?**

( )	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> para entender as demandas da comunidade, <u>possui normas internas</u> para incorporar as demandas das comunidades e <u>leva em consideração as necessidades das minorias locais</u> (ex: LGBTQIA+, indígenas, comunidades ribeirinhas, etc).
( )	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários, e <u>possui normas internas</u> que obrigam a tomada de decisão posteriormente ao consentimento da comunidade local.
( )	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários.
( )	O empregador <u>raramente informa ou consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
( )	O empregador <u>nunca informa e nunca consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**7 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cimento Portland no desenvolvimento de habilidades da comunidade local** (realização de cursos, palestras ou treinamentos para as pessoas da localidade, de modo a suprir o déficit de mão de obra qualificada para atender às necessidades futuras do empregador)?

( )	O empregador oferece <u> cursos relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de manuseio de produtos químicos e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos </u> da comunidade <u> que se interessem </u> e patrocina cursos de capacitação técnica <u> não relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de primeiros socorros, informática, idiomas, etc).
( )	O empregador oferece apenas <u> cursos relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de manuseio de produtos químicos e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos </u> da comunidade <u> que se interessam </u> .
( )	O empregador <u> oferece apenas cursos relacionados à sua área de atuação </u> e apenas para os <u> adultos </u> da comunidade <u> que já atuam na produção de cimento Portland </u> .
( )	O empregador <u> não oferece cursos </u> mas <u> desenvolveu um plano inicial </u> para qualificar a mão-de-obra local.
( )	O empregador <u> não oferece cursos </u> mesmo havendo um déficit de mão-de-obra qualificada para atender às necessidades da empresa
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**8 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cimento Portland na contribuição para o progresso econômico da sociedade (ex: criação de trabalhos, capacitação técnica, etc)?**

( )	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> (ex: criação de novas filiais, incentivo ao primeiro emprego e à qualificação profissional, etc) e <u>é reconhecido como uma força construtiva na sociedade</u> .
( )	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> .
( )	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos</u> , e <u>nunca se envolveu</u> em ações prejudiciais ao progresso econômico (ex: evasões fiscais, corrupção, etc).
( )	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos</u> , e <u>já realizou</u> ações prejudiciais ao progresso econômico, mas <u>mudou sua atitude implementando políticas internas para acabar com essas ações</u> .
( )	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos</u> , e <u>se envolve</u> em ações prejudiciais ao progresso econômico e <u>não implementa/implementou</u> políticas internas para acabar com estas ações.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**9 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cimento Portland no compromisso público com pautas de sustentabilidade frente a sociedade (ex: saúde e bem-estar, redução de desigualdades, preservação da fauna e flora, ações contra mudanças no clima, etc)?**

( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> (ex: equipamentos com menor consumo de eletricidade, equipamentos para redução da emissão de ruídos/gases poluentes, etc) e <u>sociais</u> (ex: pagamento de salário acima do praticado por concorrentes, etc) em seus produtos ou serviços.
( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> em seus produtos ou serviços.
( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>traçou um plano de ação</u> para práticas mais sustentáveis que <u>ainda não está em funcionamento</u> .
( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade, mas <u>nenhum plano de ação foi traçado</u> para práticas mais sustentáveis.
( )	O empregador <u>nunca se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**10 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cimento Portland no desenvolvimento tecnológico da sociedade** (ex: criação e/ou melhoria de produtos, serviços, processos ou técnicas como desenvolvimento de novas embalagens para o produto, etc)?

( )	O empregador <u>investiu em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades que resultaram em <u>novos produtos/serviços já comercializados no mercado</u> , e <u>continua a investir na criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços</u> .
( )	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para criação e/ou <u>aprimoramento de produtos/serviços</u> .
( )	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>aprimoramento de produtos/serviços já existentes</u> .
( )	O empregador <u>desenvolveu um plano de ação</u> visando contribuir com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua, mas este plano ainda <u>não foi colocado em prática</u> .
( )	O empregador <u>não contribui</u> com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua (não realiza nenhuma das ações listadas acima).
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**Importância dos indicadores sociais**

**1 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Trabalhadores? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 4 (menos importante).**

- ( ) Acidentes de trabalho no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- ( ) Salário médio dos trabalhadores no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- ( ) Participação de mulheres no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- ( ) Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores

**2 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Comunidade Local? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante).**

- ( ) Riscos para a saúde e segurança da comunidade local
- ( ) Empresa/contratante informa, consulta e envolve a comunidade local
- ( ) Empresa/contratante oferece desenvolvimento de habilidades para a comunidade local

**3 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Sociedade? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante).**

- ( ) Contribuição do serviço/produto para o progresso econômico
- ( ) Compromisso público com pautas de sustentabilidade
- ( ) Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico

**4 – Dentre os indicadores considerados mais importantes nas questões 1 a 3, numere-os por ordem de importância (1 = mais importante, 3 = menos importante).**

- ( )
- ( )
- ( )

## QUESTIONÁRIO – INDÚSTRIA DE CAL

### Dados de perfil

#### 1 - Em qual setor do mercado você trabalha?

- Transporte rodoviário     Construção de rodovias     Indústria de cimento Portland  
 Indústria de cal     Indústria de hidróxido de sódio     Outro.  
 Especifique: \_\_\_\_\_

#### 2 - Qual sua profissão e/ou cargo ocupado?

---

#### Este questionário compreende três categorias sociais:

1. **Trabalhadores:** todas as pessoas da empresa de produção de cal que utilizam da própria força de trabalho para executar obras ou serviços, mediante o pagamento de salário, por exemplo: motorista, químico, operador, supervisor, engenheiro, gerente, etc.;
2. **Comunidade Local:** todos os agrupamentos de pessoas que estão dentro da mesma área geográfica onde a empresa está instalada, por exemplo: moradores da região, funcionários de instituições privadas e públicas, etc.;
3. **Sociedade:** grupos de indivíduos humanos que estão sob um mesmo regime político e econômico, em um mesmo território, por exemplo: sociedade brasileira, etc.

**Avaliação de indicadores sociais**

**I. Qual cenário reflete a saúde dos trabalhadores da empresa de produção de cal?**

( )	<u>Nunca</u> ocorreram acidentes de trabalho.
( )	<u>Raramente</u> (menos de uma vez ao ano) ocorre um acidente que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
( )	Ocorre pelo menos <u>um acidente menos sério</u> (cortes superficiais, fraturas leves, dores em geral, amnésia, perda da fala, etc) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
( )	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério</u> (atropelamento, esmagamento, queimaduras, cortes, choques elétricos, inalação de gases, etc) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda permanente</u> da sua capacidade para o trabalho. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
( )	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério por ano</u> ocasionando a <u>morte</u> do trabalhador. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda permanente e/ou temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**2 – Qual cenário reflete o salário dos trabalhadores da empresa de produção de cal?**

<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria, <u>mas a maioria ainda</u> recebe um <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> os trabalhadores recebem <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário pelo menos igual</u> ao piso salarial da categoria, e <u>outros</u> trabalhadores recebem <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem um <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**3 - Qual cenário reflete a participação feminina (incluindo mulheres transexuais e travestis) na força de trabalho da empresa de produção de cal?**

<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 30% ou mais da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 20% ou mais e menos de 30% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 15% ou mais e menos de 20% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a mais de 10% e menos de 15% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 10% ou menos da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**4 – Qual cenário reflete o nível de diálogo (ex: pagamento de salário, férias, horas extras, demissões, etc) com a representação coletiva dos trabalhadores para discutir relações de trabalho da empresa de produção de cal?**

( )	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, <u>executa os acordos</u> (ex: ajustes salariais, férias, licença paternidade, etc) feitos em negociação coletiva com o sindicato, e <u>consulta o sindicato</u> sobre decisões com grandes consequências (ex: demissões, etc).
( )	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>executa os acordos</u> feitos em negociação coletiva com o sindicato.
( )	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
( )	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, mas <u>não participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
( )	O empregador <u>interfere/dificulta a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>não participa</u> de negociação coletiva em negociação coletiva.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**5 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cal na saúde e segurança da comunidade local** (ex: reduzir/evitar ou favorecer a: poluição sonora, poluição de córregos e rios por resíduos ou efluentes/esgoto, contaminação de solos, emissão de gases poluentes, acidentes e/ou mortes ocasionadas por falha tecnológica ou por não cumprimento de procedimentos de segurança do trabalho, etc)?

( )	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> (ex: embalagens mais resistentes, equipamentos com tecnologia avançada, etc) e possui <u>parcerias com empresas público-privadas</u> para melhorar a saúde e a segurança da comunidade local <sup>1</sup> .
( )	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> que impactam na saúde e segurança da comunidade local.
( )	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
( )	<u>Raramente</u> ocorrem acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
( )	Ocorre <u>pele menos um acidente por ano</u> com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

<sup>1</sup>Exemplos: parcerias com prefeituras, hospitais/postos de saúde e empresas para adquirir/doar materiais e equipamentos da saúde e da segurança pública, e materiais de construção para reforma/ampliação de áreas hospitalares/postos de saúde e para iluminação pública, etc.

**6 - Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cal no engajamento comunitário** (isto é, conjunto de ações para entender as preocupações, necessidades e desejos da comunidade local por meio do diálogo com líderes comunitários)?

( )	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> para entender as demandas da comunidade, <u>possui normas internas</u> para incorporar as demandas das comunidades e <u>leva em consideração as necessidades das minorias locais</u> (ex: LGBTQIA+, indígenas, comunidades ribeirinhas, etc).
( )	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários, e <u>possui normas internas</u> que obrigam a tomada de decisão posteriormente ao consentimento da comunidade local.
( )	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários.
( )	O empregador <u>raramente informa ou consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
( )	O empregador <u>nunca informa e nunca consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**7 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cal no desenvolvimento de habilidades da comunidade local (realização de cursos, palestras ou treinamentos para as pessoas da localidade, de modo a suprir o déficit de mão de obra qualificada para atender às necessidades futuras do empregador)?**

( )	O empregador oferece <u> cursos relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de manuseio de produtos químicos e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos </u> da comunidade <u> que se interessem </u> e patrocina cursos de capacitação técnica <u> não relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de primeiros socorros, informática, idiomas, etc).
( )	O empregador oferece apenas <u> cursos relacionados à sua área de atuação </u> (ex: cursos de manuseio de produtos químicos e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos </u> da comunidade <u> que se interessem </u> .
( )	O empregador <u> oferece apenas cursos relacionados à sua área de atuação </u> e apenas para os <u> adultos </u> da comunidade <u> que já atuam na produção de cal </u> .
( )	O empregador <u> não oferece cursos </u> , mas <u> desenvolveu um plano inicial </u> para qualificar a mão-de-obra local.
( )	O empregador <u> não oferece cursos </u> mesmo havendo um déficit de mão-de-obra qualificada para atender às necessidades da empresa.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**8 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cal na contribuição para o progresso econômico da sociedade (ex: criação de trabalhos, capacitação técnica, etc)?**

( )	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> (ex: criação de novas filiais, incentivo ao primeiro emprego e à qualificação profissional, etc), e <u>é reconhecido como uma força construtiva na sociedade</u> .
( )	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> .
( )	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos</u> , e <u>nunca se envolveu em ações prejudiciais ao progresso econômico</u> (ex: evasões fiscais, corrupção, etc).
( )	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos</u> , e <u>já realizou ações prejudiciais ao progresso econômico</u> , mas <u>mudou sua atitude implementando políticas internas para acabar com essas ações</u> .
( )	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos</u> , e <u>se envolve em ações prejudiciais ao progresso econômico e não implementa/implementou políticas internas para acabar com estas ações</u> .
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**9 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cal no compromisso público com pautas de sustentabilidade frente a sociedade (ex: saúde e bem-estar, redução de desigualdades, preservação da fauna e flora, ações contra mudanças no clima, etc)?**

( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> (ex: equipamentos com menor consumo de eletricidade, equipamentos para redução da emissão de ruídos/gases poluentes, etc) e <u>sociais</u> (ex: pagamento de salário acima do praticado por concorrentes, etc) em seus produtos ou serviços.
( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> em seus produtos ou serviços.
( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>traçou um plano de ação</u> para práticas mais sustentáveis que <u>ainda não está em funcionamento</u> .
( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade, mas <u>nenhum plano de ação foi traçado</u> para práticas mais sustentáveis.
( )	O empregador <u>nunca se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**10 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de cal no desenvolvimento tecnológico da sociedade** (ex: criação e/ou melhoria de produtos, serviços, processos ou técnicas como desenvolvimento de novas embalagens para o produto, etc)?

( )	O empregador <u>investiu em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades que resultaram em <u>novos produtos/serviços já comercializados no mercado</u> , e <u>continua a investir</u> na criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços.
( )	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços</u> .
( )	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>aprimoramento de produtos/serviços já existentes</u> .
( )	O empregador <u>desenvolveu um plano de ação</u> visando contribuir com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua, mas este plano ainda <u>não foi colocado em prática</u> .
( )	O empregador <u>não contribui</u> com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua (não realiza nenhuma das ações listadas acima).
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

### **Importância dos indicadores sociais**

**1 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Trabalhadores? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 4 (menos importante).**

- ( ) Acidentes de trabalho no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- ( ) Salário médio dos trabalhadores no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- ( ) Participação de mulheres no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- ( ) Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores

**2 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Comunidade Local? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante).**

- ( ) Riscos para a saúde e segurança da comunidade local
- ( ) Empresa/contratante informa, consulta e envolve a comunidade local
- ( ) Empresa/contratante oferece desenvolvimento de habilidades para a comunidade local

**3 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Sociedade? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante).**

- ( ) Contribuição do serviço/produto para o progresso econômico
- ( ) Compromisso público com pautas de sustentabilidade
- ( ) Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico

**4 – Dentre os indicadores considerados mais importantes nas questões 1 a 3, numere-os por ordem de importância (1 = mais importante, 3 = menos importante).**

- ( )
- ( )
- ( )

## QUESTIONÁRIO – INDÚSTRIA DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO

### Dados de perfil

#### 1 - Em qual setor do mercado você trabalha?

- Transporte rodoviário     Construção de rodovias     Indústria de cimento Portland  
 Indústria de cal     Indústria de hidróxido de sódio     Outro.  
 Especifique: \_\_\_\_\_

#### 2 - Qual sua profissão e/ou cargo ocupado?

---

#### Este questionário compreende três categorias sociais:

1. **Trabalhadores:** todas as pessoas da empresa de hidróxido de sódio que utilizam da própria força de trabalho para executar obras ou serviços, mediante o pagamento de salário, por exemplo: motorista, químico, operador, supervisor, engenheiro, gerente, etc.;
2. **Comunidade Local:** todos os agrupamentos de pessoas que estão dentro da mesma área geográfica onde a empresa está instalada, por exemplo: moradores da região, funcionários de instituições privadas e públicas, etc.;
3. **Sociedade:** grupos de indivíduos humanos que estão sob um mesmo regime político e econômico, em um mesmo território, por exemplo: sociedade brasileira, etc.

**Avaliação de indicadores sociais**

**1. Qual cenário reflete a saúde dos trabalhadores da empresa de produção de hidróxido de sódio?**

( )	<u>Nunca</u> ocorreram acidentes de trabalho.
( )	<u>Raramente</u> (menos de uma vez ao ano) ocorre um acidente que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
( )	Ocorre pelo menos <u>um acidente menos sério</u> (cortes superficiais, fraturas leves, dores em geral, amnésia, perda da fala, etc) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
( )	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério</u> (atropelamento, esmagamento, queimaduras, cortes, choques elétricos, inalação de gases, problemas respiratórios graves, perda de visão, irritações, etc) <u>por ano</u> ocasionando ao trabalhador <u>perda permanente</u> da sua capacidade para o trabalho. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
( )	Ocorre pelo menos <u>um acidente sério por ano</u> ocasionando a <u>morte</u> do trabalhador. <u>Pode ou não ter ocorrido um acidente</u> que ocasione ao trabalhador <u>perda permanente e/ou temporária</u> da sua capacidade para o trabalho.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**2 – Qual cenário reflete o salário dos trabalhadores da empresa de produção de hidróxido de sódio?**

<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário superior</u> ao piso salarial da categoria, <u>mas a maioria ainda</u> recebe um <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> os trabalhadores recebem <u>salário igual</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Alguns</u> trabalhadores recebem <u>salário pelo menos igual</u> ao piso salarial da categoria, e <u>outros</u> trabalhadores recebem <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	<u>Todos</u> trabalhadores recebem um <u>salário inferior</u> ao piso salarial da categoria.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**3 - Qual cenário reflete a participação feminina (incluindo mulheres transexuais e travestis) na força de trabalho da empresa de produção de hidróxido de sódio?**

<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 20% ou mais da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 15% ou mais e menos de 20% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 10% ou mais e menos de 15% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a mais de 5% e menos de 10% da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Mulheres correspondem a 5% ou menos da força de trabalho.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**4 – Qual cenário reflete o nível de diálogo (ex: pagamento de salário, férias, horas extras, demissões, etc) com a representação coletiva dos trabalhadores para discutir relações de trabalho da empresa de produção de hidróxido de sódio?**

( )	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, <u>executa os acordos</u> (ex: ajustes salariais, férias, licença paternidade, etc) feitos em negociação coletiva com o sindicato, e <u>consulta o sindicato</u> sobre decisões com grandes consequências (ex: demissões, etc).
( )	O empregador <u>incentiva a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>executa os acordos</u> feitos em negociação coletiva com o sindicato.
( )	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
( )	O empregador <u>não interfere na filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa, mas <u>não participa</u> de negociação coletiva com o sindicato.
( )	O empregador <u>interfere/dificulta a filiação</u> dos trabalhadores ao sindicato que os representa e <u>não participa</u> de negociação coletiva em negociação coletiva.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**5 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de hidróxido de sódio na saúde e segurança da comunidade local (ex: reduzir/evitar ou favorecer a: poluição sonora, poluição de córregos e rios por resíduos ou efluentes/esgoto, contaminação de solos, emissão de gases poluentes, acidentes e/ou mortes ocasionadas por falha tecnológica ou por não cumprimento de procedimentos de segurança do trabalho, etc)?**

<input type="checkbox"/>	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> (ex: embalagens mais resistentes, equipamentos com tecnologia avançada, etc) e possui <u>parcerias com empresas público-privadas</u> para melhorar a saúde e a segurança da comunidade local <sup>1</sup> .
<input type="checkbox"/>	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local, e o empregador <u>utiliza tecnologias mais seguras</u> que impactam na saúde e segurança da comunidade local.
<input type="checkbox"/>	<u>Não há relatos</u> de acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
<input type="checkbox"/>	<u>Raramente</u> ocorrem acidentes com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
<input type="checkbox"/>	Ocorre <u>pelo menos um acidente por ano</u> com danos ou riscos à saúde e segurança da comunidade local.
<input type="checkbox"/>	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

<sup>1</sup>Exemplos: parcerias com prefeituras, hospitais/postos de saúde e empresas para adquirir/doar materiais e equipamentos da saúde e da segurança pública, e materiais de construção para reforma/ampliação de áreas hospitalares/postos de saúde e para iluminação pública, etc.

**6 - Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de hidróxido de sódio no engajamento comunitário** (isto é, conjunto de ações para entender as preocupações, necessidades e desejos da comunidade local por meio do diálogo com líderes comunitários)?

( )	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> para entender as demandas da comunidade, <u>possui normas internas</u> para incorporar as demandas das comunidades e <u>leva em consideração as necessidades das minorias locais</u> (ex: LGBTQIA+, indígenas, comunidades ribeirinhas, etc).
( )	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários, e <u>possui normas internas</u> que obrigam a tomada de decisão posteriormente ao consentimento da comunidade local.
( )	O empregador <u>implementa canais de comunicação</u> entre ele e a comunidade local para informar e ouvir opiniões e pontos de vista comunitários.
( )	O empregador <u>raramente informa ou consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
( )	O empregador <u>nunca informa e nunca consulta</u> a comunidade local sobre decisões que a afetam.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**7 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de hidróxido de sódio no desenvolvimento de habilidades da comunidade local** (realização de cursos, palestras ou treinamentos para as pessoas da localidade, de modo a suprir o déficit de mão de obra qualificada para atender às necessidades futuras do empregador)?

( )	O empregador oferece <u> cursos relacionados à sua área de atuação</u> (ex: cursos de manuseio de produtos químicos e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos</u> da comunidade <u> que se interessem</u> e patrocina cursos de capacitação técnica <u> não relacionados à sua área de atuação</u> (ex: cursos de primeiros socorros, informática, idiomas, etc).
( )	O empregador oferece apenas <u> cursos relacionados à sua área de atuação</u> (ex: cursos de manuseio de produtos químicos e prevenção a acidentes de trabalho, etc) para <u> todos adultos</u> da comunidade <u> que se interessem</u> .
( )	O empregador <u> oferece apenas cursos relacionados à sua área de atuação</u> e apenas para os <u> adultos</u> da comunidade <u> que já atuam na produção de hidróxido de sódio</u> .
( )	O empregador <u> não oferece cursos</u> , mas <u> desenvolveu um plano inicial</u> para qualificar a mão-de-obra local.
( )	O empregador <u> não oferece cursos</u> mesmo havendo um déficit de mão-de-obra qualificada para atender às necessidades da empresa.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**8 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de hidróxido de sódio na contribuição para o progresso econômico da sociedade (ex: criação de trabalhos, capacitação técnica, etc)?**

( )	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> (ex: criação de novas filiais, incentivo ao primeiro emprego e à qualificação profissional, etc), e <u>é reconhecido como uma força construtiva na sociedade</u> .
( )	O empregador <u>apoia</u> o progresso econômico ao <u>estimular a criação de empregos diretos e indiretos</u> .
( )	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos</u> , e <u>nunca se envolveu</u> em ações prejudiciais ao progresso econômico (ex: evasões fiscais, corrupção, etc).
( )	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos</u> , e <u>já realizou</u> ações prejudiciais ao progresso econômico, mas <u>mudou sua atitude implementando políticas internas para acabar</u> com essas ações.
( )	O empregador <u>não estimula a criação de empregos diretos e indiretos</u> , e <u>se envolve</u> em ações prejudiciais ao progresso econômico e <u>não implementa/implementou</u> políticas internas para acabar com estas ações.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**9 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de hidróxido de sódio no compromisso público com pautas de sustentabilidade frente a sociedade (ex: saúde e bem-estar, redução de desigualdades, preservação da fauna e flora, ações contra mudanças no clima, etc)?**

( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> (ex: equipamentos com menor consumo de eletricidade, equipamentos para redução da emissão de ruídos/gases poluentes, etc) e <u>sociais</u> (ex: pagamento de salário acima do praticado por concorrentes, etc) em seus produtos ou serviços.
( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>incorpora soluções ambientais</u> em seus produtos ou serviços.
( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade e <u>traçou um plano de ação</u> para práticas mais sustentáveis que <u>ainda não está em funcionamento</u> .
( )	O empregador <u>se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade, mas <u>nenhum plano de ação foi traçado</u> para práticas mais sustentáveis.
( )	O empregador <u>nunca se comprometeu</u> publicamente com pautas de sustentabilidade.
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**10 – Qual cenário reflete a situação da empresa de produção de hidróxido de sódio no desenvolvimento tecnológico da sociedade** (ex: criação e/ou melhoria de produtos, serviços, processos ou técnicas como desenvolvimento de novas embalagens para o produto, etc)?

( )	O empregador <u>investiu em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades que resultaram em <u>novos produtos/serviços já comercializados no mercado</u> , e <u>continua a investir</u> na criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços.
( )	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>criação e/ou aprimoramento de produtos/serviços</u> .
( )	O empregador <u>investe em pesquisas</u> de laboratórios e/ou universidades para <u>aprimoramento de produtos/serviços já existentes</u> .
( )	O empregador <u>desenvolveu um plano de ação</u> visando contribuir com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua, mas este plano ainda <u>não foi colocado em prática</u> .
( )	O empregador <u>não contribui</u> com o desenvolvimento tecnológico da área em que atua (não realiza nenhuma das ações listadas acima).
( )	Não tenho conhecimento/não saberia informar.

**Importância dos indicadores sociais**

**1 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Trabalhadores? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 4 (menos importante).**

- ( ) Acidentes de trabalho no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- ( ) Salário médio dos trabalhadores no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- ( ) Participação de mulheres no empreendimento, indústria ou local de trabalho
- ( ) Empresa/indústria dialoga com a representação coletiva dos trabalhadores

**2 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Comunidade Local? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante).**

- ( ) Riscos para a saúde e segurança da comunidade local
- ( ) Empresa/contratante informa, consulta e envolve a comunidade local
- ( ) Empresa/contratante oferece desenvolvimento de habilidades para a comunidade local

**3 – Qual a importância dos indicadores abaixo para a categoria Sociedade? Ordene os indicadores de 1 (mais importante) a 3 (menos importante).**

- ( ) Contribuição do serviço/produto para o progresso econômico
- ( ) Compromisso público com pautas de sustentabilidade
- ( ) Esforços do setor no desenvolvimento tecnológico

**4 – Dentre os indicadores considerados mais importantes nas questões 1 a 3, numere-os por ordem de importância (1 = mais importante, 3 = menos importante).**

- ( )
- ( )
- ( )

## APÊNDICE B

### **Análise de ciclo de vida social de misturas solo-ligante álcali-ativado e solo-cimento Portland**

PROJETO APROVADO PELO CEP-UFRGS CAAE Nº 62830022.6.0000.5347

#### TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Você está convidado a participar de uma pesquisa para avaliação dos impactos sociais envolvidos na estabilização de um solo para base e sub-base de pavimentos, utilizando-se um ligante álcali-ativado (a base de resíduos agroindustriais) e cimento Portland. Caso aceite participar da pesquisa sua participação será responder um questionário com perguntas relacionadas a indicadores de impactos sociais de setores do mercado de trabalho envolvidos na estabilização de solo.

Quanto aos riscos provenientes da participação dos sujeitos no presente estudo pode-se citar o tempo necessário para o preenchimento do questionário, o qual será em torno de 20 minutos. Os benefícios gerados a partir da sua participação nesta pesquisa serão a identificação e compreensão dos impactos sociais gerados nos processos para estabilização de solo para base e sub-base de pavimentos. Sua participação na pesquisa é totalmente voluntária, ou seja, não é obrigatória. Caso você decida não participar, ou ainda, desistir de participar e retirar seu consentimento, não haverá nenhum prejuízo.

Não está previsto nenhum tipo de pagamento pela sua participação na pesquisa e você não terá nenhum custo com respeito aos procedimentos envolvidos, a não ser o tempo destinado à participação. Os dados coletados durante a pesquisa serão tratados confidencialmente. Os resultados serão apresentados de forma conjunta, sem a identificação dos participantes. O pesquisador ficará responsável por guardar todos os e-mails enviados e recebidos com a anuência dos participantes pelo tempo mínimo de 5 anos após o término da pesquisa. Caso você tenha dúvidas, poderá entrar em contato com a pesquisadora responsável Mariana Tonini de Araújo, pelo e-mail [mariana.tonini@ufrgs.br](mailto:mariana.tonini@ufrgs.br).

O projeto foi avaliado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da UFRGS (CEP-UFRGS), órgão colegiado de caráter consultivo, deliberativo e educativo, cuja finalidade é avaliar – emitir parecer e acompanhar os projetos de pesquisa envolvendo seres humanos em seus aspectos éticos e metodológicos, realizados no âmbito da instituição. Você pode entrar em contato com o CEP-UFRGS no endereço Av. Paulo Gama, 110, sala 311, prédio Anexo I da Reitoria Campus Centro, Porto Alegre/RS, CEP: 90040-060; fone +55 51 3308 3738; e-mail: [etica@propeq.ufrgs.br](mailto:etica@propeq.ufrgs.br). Horário de funcionamento de segunda a sexta-feira das 08:00 às 12:00 e das 13:00 às 17:00.

## APÊNDICE C

ANOVA – RCS ligante álcali-ativado

Fonte	GL	SQ Aj.	QM Aj.	Valor-F	Valor-P	Significati vo
Peso específico	1	112,778	112,778	1577,12	0,000000	Sim
% Ligante	1	25,512	25,512	356,76	0,000000	Sim
Teor de umidade	1	0,118	0,118	1,65	0,206310	Não
Temperatura	1	33,347	33,347	466,33	0,000000	Sim
Tempo de cura	1	10,762	10,762	150,50	0,000000	Sim
Peso específico*% Ligante	1	0,625	0,625	8,75	0,005128	Sim
Peso específico*Teor de umidade	1	0,001	0,001	0,01	0,928130	Não
Peso específico*Temperatura	1	4,030	4,030	56,36	0,000000	Sim
Peso específico*Tempo de cura	1	2,746	2,746	38,41	0,000000	Sim
% Ligante*Teor de umidade	1	0,953	0,953	13,33	0,000733	Sim
% Ligante*Temperatura	1	0,111	0,111	1,55	0,219902	Não
% Ligante*Tempo de cura	1	0,494	0,494	6,91	0,012012	Sim
Teor de umidade*Temperatura	1	0,308	0,308	4,31	0,044216	Sim
Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,192	0,192	2,69	0,108614	Não
Temperatura*Tempo de cura	1	0,081	0,081	1,14	0,292311	Não
Peso específico*% Ligante*Teor de umidade	1	0,037	0,037	0,52	0,476951	Não
Peso específico*% Ligante*Temperatura	1	0,153	0,153	2,13	0,151638	Não
Peso específico*% Ligante*Tempo de cura	1	0,028	0,028	0,40	0,532477	Não
Peso específico*Teor de umidade*Temperatura	1	0,064	0,064	0,89	0,351024	Não
Peso específico*Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,025	0,025	0,35	0,557113	Não
Peso específico*Temperatura*Tempo de cura	1	0,033	0,033	0,46	0,502982	Não
% Ligante*Teor de umidade*Temperatura	1	0,126	0,126	1,76	0,192309	Não
% Ligante*Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,149	0,149	2,08	0,156541	Não
% Ligante*Temperatura*Tempo de cura	1	0,009	0,009	0,12	0,728476	Não
Teor de umidade*Temperatura*Tempo de cura	1	0,105	0,105	1,47	0,232234	Não
Curvatura	1	0,442	0,442	6,18	0,017080	Sim
Falta de ajuste	6	0,465	0,077	1,10	0,382593	Não
Erro puro	35	2,467	0,070			
Total	67	196,161				

## ANOVA – RCS cimento Portland

Fonte	GL	SQ Aj.	QM Aj.	Valor-F	Valor-P	Significati vo
Peso específico	1	449,578	449,578	1818,44	0,00000	Sim
% Ligante	1	14,248	14,248	57,63	0,00000	Sim
Teor de umidade	1	7,023	7,023	28,41	0,00000	Sim
Temperatura	1	116,724	116,724	472,12	0,00000	Sim
Tempo de cura	1	40,961	40,961	165,68	0,00000	Sim
Peso específico*% Ligante	1	3,708	3,708	15,00	0,00038	Sim
Peso específico*Teor de umidade	1	3,671	3,671	14,85	0,00040	Sim
Peso específico*Temperatura	1	47,416	47,416	191,79	0,00000	Sim
Peso específico*Tempo de cura	1	10,900	10,900	44,09	0,00000	Sim
% Ligante*Teor de umidade	1	0,049	0,049	0,20	0,65896	Não
% Ligante*Temperatura	1	6,754	6,754	27,32	0,00001	Sim
% Ligante*Tempo de cura	1	1,327	1,327	5,37	0,02559	Sim
Teor de umidade*Temperatura	1	8,418	8,418	34,05	0,00000	Sim
Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,192	0,192	0,78	0,38338	Não
Temperatura*Tempo de cura	1	0,980	0,980	3,97	0,05313	Não
Peso específico*% Ligante*Teor de umidade	1	0,030	0,030	0,12	0,72902	Não
Peso específico*%Ligante*Temperatura	1	0,611	0,611	2,47	0,12350	Não
Peso específico*% Ligante*Tempo de cura	1	0,152	0,152	0,61	0,43770	Não
Peso específico*Teor de umidade*Temperatura	1	4,522	4,522	18,29	0,00011	Sim
Peso específico*Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,000	0,000	0,00	0,99346	Não
Peso específico*Temperatura*Tempo de cura	1	2,026	2,026	8,20	0,00659	Sim
% Ligante*Teor de umidade*Temperatura	1	0,186	0,186	0,75	0,39142	Não
% Ligante*Teor de umidade*Tempo de cura	1	1,834	1,834	7,42	0,00944	Sim
% Ligante*Temperatura*Tempo de cura	1	1,373	1,373	5,56	0,02328	Sim
Teor de umidade*Temperatura*Tempo de cura	1	0,887	0,887	3,59	0,06532	Não
Curvatura	1	0,033	0,033	0,13	0,71878	Não
Falta de ajuste	6	5,277	0,880	6,34	0,00014	Sim
Erro puro	35	4,859	0,139			
Total	67	733,741				

## ANOVA – RTCD ligante álcali-ativado

Fonte	GL	SQ Aj.	QM Aj.	Valor-F	Valor-P	Significati vo
Peso específico	1	3,58015	3,58015	349,04	0,00000	Sim
% Ligante	1	1,35768	1,35768	132,36	0,00000	Sim
Teor de umidade	1	0,03843	0,03843	3,75	0,05982	Não
Temperatura	1	0,97001	0,97001	94,57	0,00000	Sim
Tempo de cura	1	0,69293	0,69293	67,56	0,00000	Sim
Peso específico*% Ligante	1	0,10321	0,10321	10,06	0,00287	Sim
Peso específico*Teor de umidade	1	0,00037	0,00037	0,04	0,84940	Não
Peso específico*Temperatura	1	0,13323	0,13323	12,99	0,00084	Sim
Peso específico*Tempo de cura	1	0,25657	0,25657	25,01	0,00001	Sim
% Ligante*Teor de umidade	1	0,00018	0,00018	0,02	0,89631	Não
% Ligante*Temperatura	1	0,04376	0,04376	4,27	0,04524	Sim
% Ligante*Tempo de cura	1	0,16196	0,16196	15,79	0,00028	Sim
Teor de umidade*Temperatura	1	0,00871	0,00871	0,85	0,36229	Não
Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,00110	0,00110	0,11	0,74471	Não
Temperatura*Tempo de cura	1	0,00043	0,00043	0,04	0,83891	Não
Peso específico*% Ligante*Teor de umidade	1	0,01464	0,01464	1,43	0,23907	Não
Peso específico*% Ligante*Temperatura	1	0,00650	0,00650	0,63	0,43067	Não
Peso específico*% Ligante*Tempo de cura	1	0,04830	0,04830	4,71	0,03586	Sim
Peso específico*Teor de umidade*Temperatura	1	0,00658	0,00658	0,64	0,42770	Não
Peso específico*Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,00256	0,00256	0,25	0,62008	Não
Peso específico*Temperatura*Tempo de cura	1	0,00259	0,00259	0,25	0,61794	Não
% Ligante*Teor de umidade*Temperatura	1	0,00176	0,00176	0,17	0,68104	Não
% Ligante*Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,00957	0,00957	0,93	0,33983	Não
% Ligante*Temperatura*Tempo de cura	1	0,00712	0,00712	0,69	0,40956	Não
Teor de umidade*Temperatura*Tempo de cura	1	0,01041	0,01041	1,01	0,31967	Não
Curvatura	1	0,02131	0,02131	2,08	0,15709	Não
Falta de ajuste	6	0,10427	0,01738	1,92	0,10441	Não
Erro puro	35	0,31627	0,00904			
Total	67	7,90057				

## ANOVA – RTCD cimento Portland

Fonte	GL	SQ Aj.	QM Aj.	Valor-F	Valor-P	Significati vo
Peso específico	1	7,9971	7,99706	842,02	0,00000	Sim
% Ligante	1	0,1149	0,11492	12,10	0,00121	Sim
Teor de umidade	1	0,1845	0,18447	19,42	0,00007	Sim
Temperatura	1	1,7517	1,75172	184,44	0,00000	Sim
Tempo de cura	1	0,3594	0,35941	37,84	0,00000	Sim
Peso específico*% Ligante	1	0,0139	0,01392	1,47	0,23303	Não
Peso específico*Teor de umidade	1	0,0981	0,09812	10,33	0,00255	Sim
Peso específico*Temperatura	1	0,6257	0,62574	65,88	0,00000	Sim
Peso específico*Tempo de cura	1	0,0977	0,09767	10,28	0,00260	Sim
% Ligante*Teor de umidade	1	0,0017	0,00173	0,18	0,67203	Não
% Ligante*Temperatura	1	0,0090	0,00904	0,95	0,33504	Não
% Ligante*Tempo de cura	1	0,0001	0,00011	0,01	0,91630	Não
Teor de umidade*Temperatura	1	0,0591	0,05911	6,22	0,01673	Sim
Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,0287	0,02866	3,02	0,08986	Não
Temperatura*Tempo de cura	1	0,0023	0,00231	0,24	0,62432	Não
Peso específico*% Ligante*Teor de umidade	1	0,0033	0,00333	0,35	0,55714	Não
Peso específico*%Ligante*Temperatura	1	0,0189	0,01890	1,99	0,16590	Não
Peso específico*% Ligante*Tempo de cura	1	0,0006	0,00055	0,06	0,81099	Sim
Peso específico*Teor de umidade*Temperatura	1	0,0196	0,01960	2,06	0,15842	Não
Peso específico*Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,0040	0,00404	0,43	0,51802	Não
Peso específico*Temperatura*Tempo de cura	1	0,0116	0,01158	1,22	0,27588	Não
% Ligante*Teor de umidade*Temperatura	1	0,0000	0,00000	0,00	0,99710	Não
% Ligante*Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,0011	0,00114	0,12	0,73090	Não
% Ligante*Temperatura*Tempo de cura	1	0,0022	0,00223	0,23	0,63074	Não
Teor de umidade*Temperatura*Tempo de cura	1	0,0000	0,00004	0,00	0,95107	Não
Curvatura	1	0,0034	0,00345	0,36	0,55028	Não
Falta de ajuste	6	0,0223	0,00371	0,35	0,90268	Não
Erro puro	35	0,3671	0,01049			
Total	67	11,7982				

ANOVA – G<sub>0</sub> ligante álcali-ativado

Fonte	GL	SQ Aj.	QM Aj.	Valor-F	Valor-P	Significati vo
Peso específico	1	68398709	68398709	3713,76	0,00000	Sim
% Ligante	1	6588648	6588648	357,74	0,00000	Sim
Teor de umidade	1	93425	93425	5,07	0,02973	Sim
Temperatura	1	5081684	5081684	275,91	0,00000	Sim
Tempo de cura	1	576066	576066	31,28	0,00000	Sim
Peso específico*% Ligante	1	55839	55839	3,03	0,08915	Não
Peso específico*Teor de umidade	1	6962	6962	0,38	0,54208	Não
Peso específico*Temperatura	1	443104	443104	24,06	0,00002	Sim
Peso específico*Tempo de cura	1	27879	27879	1,51	0,22559	Não
% Ligante*Teor de umidade	1	314321	314321	17,07	0,00017	Sim
% Ligante*Temperatura	1	228249	228249	12,39	0,00107	Sim
% Ligante*Tempo de cura	1	872	872	0,05	0,82883	Não
Teor de umidade*Temperatura	1	64820	64820	3,52	0,06778	Não
Teor de umidade*Tempo de cura	1	2731	2731	0,15	0,70216	Não
Temperatura*Tempo de cura	1	188652	188652	10,24	0,00265	Sim
Peso específico*% Ligante*Teor de umidade	1	28269	28269	1,53	0,22243	Não
Peso específico*% Ligante*Temperatura	1	84434	84434	4,58	0,03826	Sim
Peso específico*% Ligante*Tempo de cura	1	3620	3620	0,20	0,65986	Não
Peso específico*Teor de umidade*Temperatura	1	130	130	0,01	0,93337	Não
Peso específico*Teor de umidade*Tempo de cura	1	1975	1975	0,11	0,74500	Não
Peso específico*Temperatura*Tempo de cura	1	109409	109409	5,94	0,01922	Sim
% Ligante*Teor de umidade*Temperatura	1	9703	9703	0,53	0,47206	Não
% Ligante*Teor de umidade*Tempo de cura	1	14119	14119	0,77	0,38637	Não
% Ligante*Temperatura*Tempo de cura	1	132849	132849	7,21	0,01040	Sim
Teor de umidade*Temperatura*Tempo de cura	1	4907	4907	0,27	0,60852	Não
Curvatura	1	10470	10470	0,57	0,45518	Não
Falta de ajuste	6	82723	13787	0,72	0,63796	Não
Erro puro	35	672400	19211			
Total	67	83226968				

ANOVA – G<sub>0</sub> cimento Portland

Fonte	GL	SQ Aj.	QM Aj.	Valor-F	Valor-P	Significati vo
Peso específico	1	371032709	371032709	4014,58	0,00000	Sim
% Ligante	1	7339917	7339917	79,42	0,00000	Sim
Teor de umidade	1	1676988	1676988	18,15	0,00012	Sim
Temperatura	1	17241364	17241364	186,55	0,00000	Sim
Tempo de cura	1	43443609	43443609	470,06	0,00000	Sim
Peso específico*% Ligante	1	1150067	1150067	12,44	0,00105	Sim
Peso específico*Teor de umidade	1	1328864	1328864	14,38	0,00048	Sim
Peso específico*Temperatura	1	7646121	7646121	82,73	0,00000	Sim
Peso específico*Tempo de cura	1	21375207	21375207	231,28	0,00000	Sim
% Ligante*Teor de umidade	1	544708	544708	5,89	0,01967	Não
% Ligante*Temperatura	1	1048459	1048459	11,34	0,00166	Sim
% Ligante*Tempo de cura	1	1381937	1381937	14,95	0,00039	Sim
Teor de umidade*Temperatura	1	914386	914386	9,89	0,00308	Sim
Teor de umidade*Tempo de cura	1	187348	187348	2,03	0,16208	Não
Temperatura*Tempo de cura	1	327773	327773	3,55	0,06678	Não
Peso específico*% Ligante*Teor de umidade	1	70962	70962	0,77	0,38600	Não
Peso específico*%Ligante*Temperatura	1	361979	361979	3,92	0,05455	Não
Peso específico*% Ligante*Tempo de cura	1	30623	30623	0,33	0,56802	Não
Peso específico*Teor de umidade*Temperatura	1	1076516	1076516	11,65	0,00146	Sim
Peso específico*Teor de umidade*Tempo de cura	1	59951	59951	0,65	0,42524	Não
Peso específico*Temperatura*Tempo de cura	1	2064	2064	0,02	0,88194	Não
% Ligante*Teor de umidade*Temperatura	1	5085	5085	0,06	0,81572	Não
% Ligante*Teor de umidade*Tempo de cura	1	482614	482614	5,22	0,02755	Sim
% Ligante*Temperatura*Tempo de cura	1	306196	306196	3,31	0,07604	Não
Teor de umidade*Temperatura*Tempo de cura	1	114651	114651	1,24	0,27186	Não
Curvatura	1	27601	27601	0,30	0,58769	Não
Falta de ajuste	6	2185305	92421	7,95	0,00002	Sim
Erro puro	35	1603966	45828			
Total	67	482966970				

ANOVA –  $\epsilon_s$  ligante álcali-ativado

Fonte	GL	SQ Aj.	QM Aj.	Valor-F	Valor-P	Significati vo
Peso específico	1	1,94	1,936	1,16	0,29488	Não
% Ligante	1	609,55	609,547	365,29	0,00000	Sim
Teor de umidade	1	124,02	124,024	74,33	0,00000	Sim
Tempo de cura	1	66,16	66,162	39,65	0,00000	Sim
Peso específico*% Ligante	1	23,54	23,542	14,11	0,00134	Sim
Peso específico*Teor de umidade	1	4,55	4,553	2,73	0,11499	Não
Peso específico*Tempo de cura	1	1,10	1,105	0,66	0,42596	Não
% Ligante*Teor de umidade	1	0,53	0,533	0,32	0,57841	Não
% Ligante*Tempo de cura	1	372,46	372,463	223,21	0,00000	Sim
Teor de umidade*Tempo de cura	1	3,85	3,851	2,31	0,14519	Não
Peso específico*% Ligante*Teor de umidade	1	0,87	0,871	0,52	0,47884	Não
Peso específico*% Ligante*Tempo de cura	1	8,72	8,722	5,23	0,03389	Sim
Peso específico*Teor de umidade*Tempo de cura	1	3,26	3,262	1,96	0,17816	Não
% Ligante*Teor de umidade*Tempo de cura	1	20,33	20,335	12,19	0,00245	Sim
Peso específico*% Ligante*Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,96	0,960	0,58	0,45740	Não
Curvatura	1	289,18	289,182	173,30	0,00000	Sim
Erro	19	31,70	1,669			
Total	35	1562,75				

ANOVA –  $\epsilon_s$  cimento Portland

Fonte	GL	SQ Aj.	QM Aj.	Valor-F	Valor-P	Significati vo
Peso específico	1	198,18	198,176	236,61	0,00060	Sim
% Ligante	1	703,97	703,974	840,52	0,00009	Sim
Teor de umidade	1	27,54	27,536	32,88	0,01053	Sim
Tempo de cura	1	53,69	53,692	64,11	0,00407	Sim
Peso específico*% Ligante	1	57,80	57,798	69,01	0,00366	Sim
Peso específico*Teor de umidade	1	1,71	1,710	2,04	0,24842	Não
Peso específico*Tempo de cura	1	5,75	5,748	6,86	0,07902	Não
% Ligante*Teor de umidade	1	0,62	0,620	0,74	0,45280	Não
% Ligante*Tempo de cura	1	5,19	5,187	6,19	0,08859	Não
Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,16	0,158	0,19	0,69338	Não
Peso específico*% Ligante*Teor de umidade	1	0,36	0,357	0,43	0,56040	Não
Peso específico*% Ligante*Tempo de cura	1	7,17	7,169	8,56	0,06121	Não
Peso específico*Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,00	0,000	0,00	0,99398	Não
% Ligante*Teor de umidade*Tempo de cura	1	5,19	5,187	6,19	0,08859	Não
Peso específico*% Ligante*Teor de umidade*Tempo de cura	1	0,25	0,248	0,30	0,62450	Não
Curvatura	1	527,85	527,851	630,23	0,00014	Sim
Erro	3	2,51	0,838			
Total	19	1597,92				

## APÊNDICE D

Sucção matricial – ligante álcali-ativado

Nomenclatura amostra	Saturação inicial (%)	Saturação final (%)	Sucção (kPa)	Sucção/Resistência (%)
11G-7D-23T-20B-28U	59,03	91,45	40,15	2,35
13G-7D-23T-20B-28U	79,19	96,78	62,11	1,80
11G-7D-23T-30B-28U	56,91	91,48	54,58	2,33
13G-7D-23T-30B-28U	75,20	95,87	60,45	1,45
11G-7D-23T-20B-30U	64,37	92,69	39,20	3,43
13G-7D-23T-20B-30U	83,03	96,77	104,51	3,73
11G-7D-23T-30B-30U	62,19	94,04	48,66	1,81
13G-7D-23T-30B-30U	81,60	98,48	83,04	1,72
11G-7D-23T-20B-28U (2)	57,86	90,82	46,59	3,75
13G-7D-23T-20B-28U (2)	77,30	95,92	109,31	3,21
11G-7D-23T-30B-28U (2)	58,28	93,64	50,91	2,19
13G-7D-23T-30B-28U (2)	76,12	98,29	85,86	2,00
11G-7D-23T-20B-30U (2)	61,77	92,95	28,89	2,70
13G-7D-23T-20B-30U (2)	82,87	98,99	71,86	2,45
11G-7D-23T-30B-30U (2)	64,32	97,54	37,15	1,56
13G-7D-23T-30B-30U (2)	82,92	99,66	130,47	3,12
11G-7D-40T-20B-28U	57,96	92,86	27,19	1,08
13G-7D-40T-20B-28U	75,88	96,02	106,27	1,97
11G-7D-40T-30B-28U	56,89	94,45	37,70	1,03
13G-7D-40T-30B-28U	77,98	97,77	99,84	1,64
11G-7D-40T-20B-30U	62,04	93,62	26,80	1,20
13G-7D-40T-20B-30U	83,26	99,28	138,97	3,07
11G-7D-40T-30B-30U	63,20	97,59	36,33	1,09
13G-7D-40T-30B-30U	83,11	100,00	149,47	2,36
11G-7D-40T-20B-28U (2)	56,52	90,79	19,63	0,75
13G-7D-40T-20B-28U (2)	77,19	96,62	52,10	0,97
11G-7D-40T-30B-28U (2)	56,96	94,26	25,97	0,82
13G-7D-40T-30B-28U (2)	76,79	98,61	45,18	0,70
11G-7D-40T-20B-30U (2)	60,33	91,85	28,81	1,27
13G-7D-40T-20B-30U (2)	81,97	97,17	46,65	1,02
11G-7D-40T-30B-30U (2)	60,01	93,27	25,53	0,77
13G-7D-40T-30B-30U (2)	81,66	99,68	68,97	1,04
11G-28D-23T-20B-28U	57,81	90,68	35,66	2,72
13G-28D-23T-20B-28U	76,69	93,78	70,77	1,80
11G-28D-23T-30B-28U	57,28	91,59	41,10	1,73
13G-28D-23T-30B-28U	75,22	95,37	74,08	1,33
11G-28D-23T-20B-30U	61,87	90,53	29,53	2,09
13G-28D-23T-20B-30U	83,41	96,87	64,29	1,43
11G-28D-23T-30B-30U	60,66	90,82	57,72	1,68
13G-28D-23T-30B-30U	80,80	97,27	65,64	1,07

\*VG-WD-XT-YB-ZU: V = peso específico dos grãos; W = tempo de cura; X = temperatura; Y = teor de ligante; Z = teor de umidade

## Sucção matricial – ligante álcali-ativado (continuação)

Nomenclatura amostra	Satuação inicial (%)	Satuação final (%)	Sucção (kPa)	Sucção/Resistência (%)
11G-28D-23T-20B-28U (2)	58,72	90,61	34,52	1,47
13G-28D-23T-20B-28U (2)	78,01	96,10	88,24	1,98
11G-28D-23T-30B-28U (2)	54,26	87,30	48,58	1,78
13G-28D-23T-30B-28U (2)	71,68	89,71	54,45	0,96
11G-28D-23T-20B-30U (2)	62,70	89,88	44,24	1,91
13G-28D-23T-20B-30U (2)	82,31	96,14	114,80	3,23
11G-28D-23T-30B-30U (2)	62,03	92,32	34,77	1,18
13G-28D-23T-30B-30U (2)	82,31	98,26	48,12	0,81
11G-28D-40T-20B-28U	58,01	91,33	53,41	1,97
13G-28D-40T-20B-28U	76,07	95,02	105,52	1,70
11G-28D-40T-30B-28U	55,27	91,38	44,27	1,06
13G-28D-40T-30B-28U	74,93	96,93	115,54	1,44
11G-28D-40T-20B-30U	59,99	89,35	29,93	1,29
13G-28D-40T-20B-30U	82,41	94,85	115,44	1,93
11G-28D-40T-30B-30U	60,51	91,45	37,91	1,02
13G-28D-40T-30B-30U	83,06	96,51	164,61	2,28
11G-28D-40T-20B-28U (2)	58,85	91,95	45,53	1,50
13G-28D-40T-20B-28U (2)	76,91	96,47	91,16	1,48
11G-28D-40T-30B-28U (2)	57,78	93,60	56,21	1,25
13G-28D-40T-30B-28U (2)	75,47	97,40	83,19	1,12
11G-28D-40T-20B-30U (2)	62,73	93,58	22,31	0,89
13G-28D-40T-20B-30U (2)	85,53	98,83	35,29	0,54
11G-28D-40T-30B-30U (2)	62,05	94,28	27,11	0,64
13G-28D-40T-30B-30U (2)	86,67	100,00	35,94	0,47

\*VG-WD-XT-YB-ZU: V = peso específico dos grãos; W = tempo de cura; X = temperatura; Y = teor de ligante; Z = teor de umidade

## Sucção matricial – cimento Portland

Nomenclatura amostra	Saturação inicial (%)	Saturação final (%)	Sucção (kPa)	Sucção/Resistência (%)
11G-7D-23T-20B-28U	53,42	77,37	5,77	0,26
13G-7D-23T-20B-28U	71,77	86,80	17,13	0,30
11G-7D-23T-30B-28U	52,81	81,33	4,03	0,20
13G-7D-23T-30B-28U	70,69	84,73	15,41	0,24
11G-7D-23T-20B-30U	58,56	82,32	3,98	0,23
13G-7D-23T-20B-30U	81,03	89,24	22,16	0,43
11G-7D-23T-30B-30U	57,39	84,14	5,10	0,25
13G-7D-23T-30B-30U	77,77	86,09	7,19	0,11
11G-7D-23T-20B-28U (2)	54,90	75,20	4,74	0,26
13G-7D-23T-20B-28U (2)	72,80	85,16	21,70	0,35
11G-7D-23T-30B-28U (2)	53,43	78,68	5,84	0,36
13G-7D-23T-30B-28U (2)	73,40	87,39	16,32	0,25
11G-7D-23T-20B-30U (2)	59,73	80,07	6,69	0,37
13G-7D-23T-20B-30U (2)	82,99	92,81	6,52	0,13
11G-7D-23T-30B-30U (2)	57,66	88,34	3,18	0,22
13G-7D-23T-30B-30U (2)	80,13	87,89	5,68	0,10
11G-7D-40T-20B-28U	54,58	75,17	8,40	0,86
13G-7D-40T-20B-28U	75,21	89,09	13,73	0,38
11G-7D-40T-30B-28U	54,82	88,37	4,86	0,61
13G-7D-40T-30B-28U	74,12	89,58	19,67	0,55
11G-7D-40T-20B-30U	56,28	82,97	4,88	0,48
13G-7D-40T-20B-30U	81,46	90,58	35,11	0,91
11G-7D-40T-30B-30U	57,47	90,39	4,01	0,31
13G-7D-40T-30B-30U	80,68	92,52	45,26	0,89
11G-7D-40T-20B-28U (2)	54,52	76,33	5,39	0,67
13G-7D-40T-20B-28U (2)	72,77	85,92	25,17	0,63
11G-7D-40T-30B-28U (2)	53,85	77,24	0,27	0,03
13G-7D-40T-30B-28U (2)	75,06	88,35	1,66	0,04
11G-7D-40T-20B-30U (2)	58,24	79,86	7,53	0,89
13G-7D-40T-20B-30U (2)	82,74	90,27	1,54	0,04
11G-7D-40T-30B-30U (2)	58,48	89,10	0,27	0,03
13G-7D-40T-30B-30U (2)	80,13	92,58	15,44	0,36
11G-28D-23T-20B-28U	54,27	86,32	6,06	0,37
13G-28D-23T-20B-28U	74,51	88,42	41,33	0,54
11G-28D-23T-30B-28U	53,41	79,31	5,86	0,20
13G-28D-23T-30B-28U	73,37	88,02	17,89	0,17
11G-28D-23T-20B-30U	60,08	81,79	5,36	0,27
13G-28D-23T-20B-30U	79,02	87,26	22,17	0,22
11G-28D-23T-30B-30U	59,26	87,21	5,04	0,14
13G-28D-23T-30B-30U	77,11	86,46	31,11	0,22

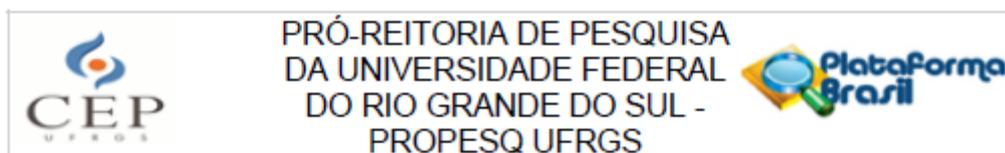
\*VG-WD-XT-YB-ZU: V = peso específico dos grãos; W = tempo de cura; X = temperatura; Y = teor de ligante; Z = teor de umidade

## Sucção matricial – cimento Portland (continuação)

Nomenclatura amostra	Saturação inicial (%)	Saturação final (%)	Sucção (kPa)	Sucção/Resistência (%)
11G-28D-23T-20B-28U (2)	54,31	81,79	6,55	0,29
13G-28D-23T-20B-28U (2)	74,67	89,66	30,61	0,32
11G-28D-23T-30B-28U (2)	54,89	78,83	4,65	0,14
13G-28D-23T-30B-28U (2)	74,89	90,39	18,67	0,18
11G-28D-23T-20B-30U (2)	59,73	80,50	4,68	0,21
13G-28D-23T-20B-30U (2)	82,01	87,95	24,51	0,24
11G-28D-23T-30B-30U (2)	58,40	85,06	3,70	0,10
13G-28D-23T-30B-30U (2)	79,56	87,26	22,20	0,15
11G-28D-40T-20B-28U	54,05	69,63	5,21	0,37
13G-28D-40T-20B-28U	76,14	88,38	26,46	0,34
11G-28D-40T-30B-28U	53,56	74,68	4,40	0,19
13G-28D-40T-30B-28U	73,85	84,50	36,38	0,45
11G-28D-40T-20B-30U	59,25	76,81	4,18	0,20
13G-28D-40T-20B-30U	80,28	87,76	24,34	0,28
11G-28D-40T-30B-30U	57,18	84,91	4,87	0,22
13G-28D-40T-30B-30U	78,01	87,42	25,82	0,37
11G-28D-40T-20B-28U (2)	54,45	69,93	4,55	0,30
13G-28D-40T-20B-28U (2)	74,50	85,44	25,61	0,51
11G-28D-40T-30B-28U (2)	55,61	78,52	4,33	0,30
13G-28D-40T-30B-28U (2)	71,80	85,44	13,32	0,15
11G-28D-40T-20B-30U (2)	58,96	79,90	4,25	0,25
13G-28D-40T-20B-30U (2)	79,35	87,08	12,03	0,14
11G-28D-40T-30B-30U (2)	57,36	82,66	3,17	0,13
13G-28D-40T-30B-30U (2)	78,65	85,37	166,81	1,74

\*VG-WD-XT-YB-ZU: V = peso específico dos grãos; W = tempo de cura; X = temperatura; Y = teor de ligante; Z = teor de umidade

## ANEXO A



## PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

## DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

**Título da Pesquisa:** ANÁLISE DE CICLO DE VIDA SOCIAL DE MISTURAS SOLO-LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO E SOLO-CIMENTO PORTLAND

**Pesquisador:** NILO CESAR CONSOLI

**Área Temática:**

**Versão:** 3

**CAAE:** 62830022.6.0000.5347

**Instituição Proponente:** Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Patrocinador Principal:** Financiamento Próprio

## DADOS DO PARECER

**Número do Parecer:** 5.686.824

**Apresentação do Projeto:**

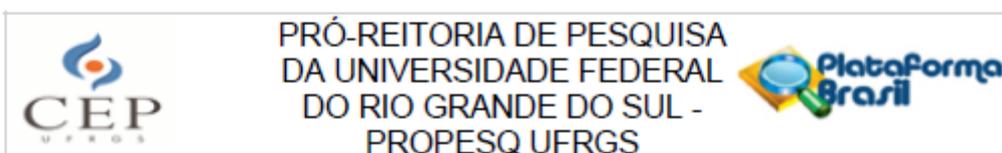
O pesquisador responsável, Prof. Dr. Nilo Cesar Consoli (UFRGS), encaminha projeto de pesquisa intitulado "Análise de Ciclo de Vida Social de Misturas Solo-ligante Alkali-ativado e Solo-cimento Portland" com vistas a avaliar os impactos sociais envolvidos na estabilização de solo para base e sub-base de pavimentos, utilizando um ligante álcali-ativado (a base de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo), comparativamente ao uso de cimento Portland.

Trata-se de estudo da área de Engenharias que contará com financiamento próprio, duas doutorandas contempladas com bolsas como membros da equipe, além de pesquisadora sediada na Austrália.

O estudo será desenvolvido inteiramente no Brasil e envolverá entrevistas com 15 participantes.

Os proponentes esperam mensurar os impactos sociais da estabilização solo-ligante álcali-ativado e solo-cimento Portland; compreender como cada setor envolvido contribui para os impactos sociais em termos de magnitude e sentido; e compreender como os stakeholders (trabalhadores, comunidade local e sociedade) são afetados. Os resultados da Análise de Ciclo de Vida Social (ACVS) serão incluídos na ACV ambiental e econômica (estudos anteriormente realizados) para

**Endereço:** Av. Paulo Gama, 110 - Sala 311 do Prédio Anexo 1 da Reitoria - Campus Centro  
**Bairro:** Farroupilha **CEP:** 90.040-060  
**UF:** RS **Município:** PORTO ALEGRE  
**Telefone:** (51)3308-3787 **E-mail:** etica@propesq.ufrgs.br



Continuação do Parecer: 5.686.824

determinar qual produto é mais sustentável.

Os resultados serão utilizados tanto nas teses de doutorado de duas pesquisadoras quanto na publicação de artigos científicos.

**Objetivo da Pesquisa:**

Objetivo primário:

O objetivo primário da pesquisa é avaliar os impactos sociais envolvidos na estabilização de solo para base e sub-base de pavimentos, utilizando um ligante álcali-ativado (a base de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo), comparativamente ao uso de cimento Portland. A pesquisa a ser desenvolvida orienta-se pela hipótese de que o solo estabilizado com ligante álcali-ativado causa menor impacto social do que o solo estabilizado com cimento Portland.

**Avaliação dos Riscos e Benefícios:**

Riscos:

Segundo os proponentes, os riscos identificados serão mínimos, considerando principalmente que o tempo necessário para preenchimento do questionário não excederá 20 minutos. No questionário, não haverá perguntas sobre informações pessoais dos participantes.

Benefícios:

Os benefícios apontados serão a identificação e a compreensão dos impactos sociais gerados nos processos para estabilização de solo para base e sub-base de pavimentos, utilizando ligante álcali-ativado comparativamente ao cimento Portland.

**Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:**

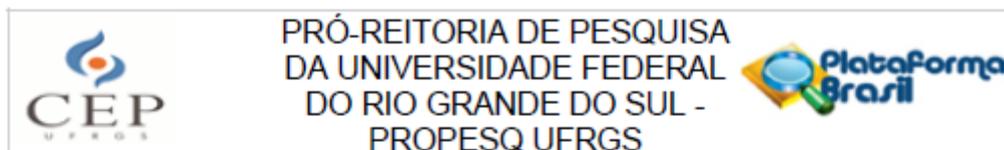
O estudo envolverá entrevistas com especialistas e outros trabalhadores em áreas de interesse para a avaliação de dez indicadores sociais. As classes de entrevistados e indicadores sociais estão identificados em tabela presente no "Projeto Detalhado".

Um questionário foi formulado para cada um dos cinco setores do mercado envolvidos: transporte rodoviário; construção de estradas; indústria de cimento Portland; indústria de cal; e indústria de hidróxido de sódio.

Segundo os proponentes, não serão coletados dados pessoais e não haverá uso de fontes secundárias de dados como prontuários, dados demográficos, etc.

Endereço: Av. Paulo Gama, 110 - Sala 311 do Prédio Anexo 1 da Reitoria - Campus Centro	
Bairro: Farroupilha	CEP: 90.040-060
UF: RS	Município: PORTO ALEGRE
Telefone: (51)3308-3787	E-mail: <a href="mailto:etica@propesq.ufrgs.br">etica@propesq.ufrgs.br</a>

Página 02 de 05



Continuação do Parecer: 5.686.824

O número de indivíduos abordados pessoalmente, recrutados, ou que sofrerão algum tipo de intervenção na pesquisa será de 15.

Cronograma foi apresentado com início da aplicação da pesquisa em 01 de novembro e conclusão da análise e redação dos dados em 31 de dezembro de 2022. Há previsão de redação e submissão de artigos científicos até final de março de 2023.

Orçamento informado no valor de R\$ R\$ 264,00. Financiamento próprio.

**Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:**

Vide campo Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações'.

**Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:**

Trata-se de resposta ao parecer consubstanciado CEP Nº 5.648.669, datado em 16/09/2022:

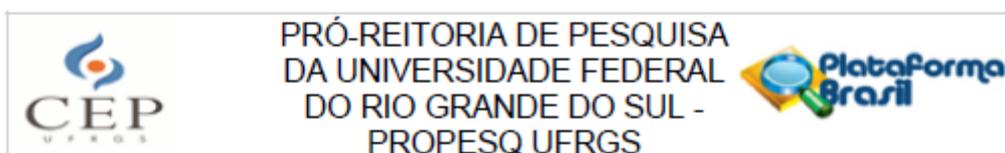
**Pendência 9:** De acordo com a Norma Operacional CNS Nº 001 de 2013, item 3.3.e, todos os protocolos de pesquisa devem conter, obrigatoriamente, orçamento que detalhe os recursos, fontes e destinação, apresentar previsão de ressarcimento de despesas do participante e seus acompanhantes, quando necessário. Os valores de bolsas concedidas a pós-graduandos por agências governamentais não se caracterizam como orçamento da pesquisa, uma vez que no âmbito da UFRGS as pesquisas não podem onerar os alunos envolvidos. Sendo assim, solicita-se que a menção às bolsas seja removida, e que os itens, tais como material de consumo apresentados, sejam pormenorizados no orçamento, e que a responsabilidade do orçamento será do pesquisador principal.

**Resposta versão 2:** A resposta para a pendência 9 está incluída no "item 4" na página 11 do Projeto de Pesquisa, e na página 1 do TCLE.

**Análise versão 2:** Nas novas versões dos documentos, foi informado que serão desnecessários recursos financeiros para a execução da pesquisa, visto que as entrevistas e envio de documentos (TCLE) serão realizados por meio virtual. No entanto, ressalta-se que para o Sistema CEP/CONEP, não existem pesquisas com "custo zero". Ainda que o pesquisador entenda que não será necessário obter ou disponibilizar recursos para a realização do estudo, ele precisará informar o valor necessário para cada procedimento e etapa do estudo (mesmo que, de fato, o pesquisador

Endereço: Av. Paulo Gama, 110 - Sala 311 do Prédio Anexo 1 da Reitoria - Campus Centro  
 Bairro: Farroupilha CEP: 90.040-060  
 UF: RS Município: PORTO ALEGRE  
 Telefone: (51)3308-3787 E-mail: etica@propesq.ufrgs.br

Página 03 de 05



Continuação do Parecer: 5.686.824

não arque com tais gastos), por exemplo, gastos com profissionais da área, exames, material de escritório, previsão de ressarcimento dos participantes de pesquisa, entre outros. Sendo assim, solicita-se que seja apresentado orçamento financeiro detalhado, que especifique TODOS os recursos, as fontes e a destinação. (Norma Operacional CNS Nº 001 de 2013, item 3.3.e). Pendência não atendida.

Resposta versão 3: A resposta a esta pendência está incluída no item "4. Orçamento", páginas 11 e 12 do Projeto de Pesquisa Análise: Às páginas 11 e 12 do Projeto Detalhado, foi apresentado quadro com orçamento financeiro detalhado para a execução da pesquisa. As explicações e justificativas foram apresentadas junto ao texto. A fonte dos recursos para custear os gastos será a taxa de bancada da Bolsa de Produtividade em Pesquisa (PQ) do pesquisador responsável, Prof. Nilo Cesar Consoli.

Análise versão 3: PENDÊNCIA ATENDIDA.

Diante do exposto, o Comitê de Ética em Pesquisa – CEP, de acordo com as atribuições definidas na Resolução CNS Nº 510, de 2016, na Resolução CNS Nº 466, de 2012, e na Norma Operacional Nº 001, de 2013, do CNS, manifesta-se pela aprovação do protocolo de pesquisa proposto.

Reitera-se aos pesquisadores a necessidade de elaborar e apresentar os relatórios parciais e final da pesquisa, como preconiza a Resolução CNS/MS nº 466/2012, Capítulo XI, Item XI.2: "d.

#### Considerações Finais a critério do CEP:

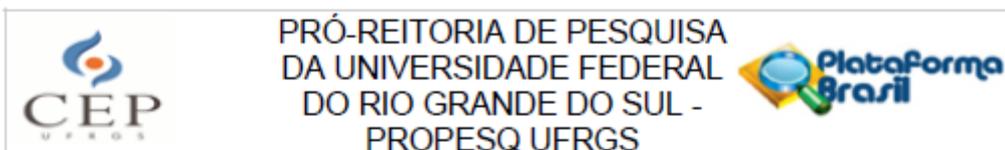
Aprovado.

#### Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_2010011.pdf	26/09/2022 16:11:02		Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	ProjetoMarianaeSuellen2022UFRGS.pdf	26/09/2022 16:09:17	Suéllen Tonatto Ferrazzo	Aceito
Outros	CARTA_RESPOSTA.pdf	26/09/2022 16:03:15	Suéllen Tonatto Ferrazzo	Aceito

Endereço: Av. Paulo Gama, 110 - Sala 311 do Prédio Anexo 1 da Reitoria - Campus Centro  
 Bairro: Farroupilha CEP: 90.040-060  
 UF: RS Município: PORTO ALEGRE  
 Telefone: (51)3308-3787 E-mail: etica@propesq.ufrgs.br

Página 04 de 05



Continuação do Parecer: 5.686.824

TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	ApendiceBTermodeconsentimento.docx	09/09/2022 21:20:11	Mariana Tonini de Araujo	Aceito
Folha de Rosto	folhaDeRosto_assinada.pdf	31/08/2022 15:28:44	Mariana Tonini de Araujo	Aceito
Outros	ApendiceAQUESTIONARIOSDAPESQUISA.pdf	31/08/2022 12:20:43	Mariana Tonini de Araujo	Aceito

**Situação do Parecer:**

Aprovado

**Necessita Apreciação da CONEP:**

Não

PORTO ALEGRE, 06 de Outubro de 2022

Assinado por:

**Patrícia Daniela Melchioris Angst  
(Coordenador(a))**

Endereço: Av. Paulo Gama, 110 - Sala 311 do Prédio Anexo 1 da Reitoria - Campus Centro  
 Bairro: Farroupilha CEP: 90.040-060  
 UF: RS Município: PORTO ALEGRE  
 Telefone: (51)3308-3787 E-mail: etica@propesq.ufrgs.br

Página 05 de 05