

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

**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**

**Giovani Jordi Bruschi**

Porto Alegre  
2020

GIOVANI JORDI BRUSCHI

**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**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia.

Porto Alegre

2020

**GIOVANI JORDI BRUSCHI**

**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**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 31 de dezembro de 2020.

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Ph.D. pela Concórdia University  
Orientador

Prof. Sérgio Marques  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Coorientador

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Profª. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Rodrigo Beck Saldanha (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Profª. Michéle Dal Toé Casagrande (UnB)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Eduardo Pavan Korf (UFFS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

### CIP - Catalogação na Publicação

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 / Giovani Jordi Bruschi. -- 2020.

184 f.

Orientador: Nilo Cesar Consoli.

Coorientador: Sergio Filipe Veloso Marques.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. rejeito de mineração de bauxita. 2. cinza do bagaço de cana-de-açúcar. 3. cal de carbureto. 4. álcali-ativação. 5. ligante alternativo. I. Consoli, Nilo Cesar, orient. II. Veloso Marques, Sergio Filipe, coorient. III. Título.

Dedico este trabalho a meus pais Gerson e Itamara, a meu irmão Júnior e a todos amigos, pela compreensão durante o período de desenvolvimento desta pesquisa.

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos que possibilitou a minha total dedicação ao mestrado e ao desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço imensamente a meus pais, Gerson e Itamara, e também ao meu irmão, Júnior, por todo o apoio e amor incondicional proporcionados. Vocês são e sempre serão a minha base, obrigado por sempre estarem presentes, amo vocês.

Agradeço ao Prof. Nilo Cesar Consoli por sempre estar disponível e fazer tudo em seu alcance para o desenvolvimento desta pesquisa. Sou muito grato pela troca de experiências e pela oportunidade de dividirmos um ambiente de trabalho.

Agradeço ao Prof. Levino Bertochi Júnior, pela amizade de mais de uma década e pelo incentivo na persecução da carreira acadêmica. Todas as trocas de experiências e discussões foram de exímia importância não apenas para o desenvolvimento desta pesquisa, mas também, para meu crescimento como pesquisador e pessoa. Sou muito grato pela vida ter cruzado nossos caminhos.

Agradeço às meninas álcali-ativadas (Carolina Pereira dos Santos, Camila Martinatto, Mariana Tonini de Araújo e Suéllen Tonatto Ferrazzo) por tornarem a vida do crente mais fácil, pois, Deus sabe que ela é cheia de provações. À Carol, minha dupla da vida e um exemplo de mulher e de engenheira, pelas incontáveis horas de laboratório, por toda confiança durante a execução dos ensaios, pelas discussões, risadas e, até mesmo, as lágrimas, obrigado por essa grande amizade. À Camila pelas incansáveis discussões e troca de conhecimento. À Mariana, nossa gaúcha honorária, por todos ensinamentos e vivências compartilhados, obrigado pela grande sintonia e por sempre se fazer presente. Por último, mas não menos importante, à minha conterrânea Suéllen, pela parceria e disponibilidade.

Agradeço ao meu grande amigo e colega de pós-graduação Fernando Fante. Por todo o apoio, companheirismo e, é claro, muitas horas de estudo e discussão investidas durante o mestrado.

Um agradecimento especial também é destinado a Yuri Gugel, que fez com que o tempo de execução desta pesquisa transcorresse de uma forma mais leve. Obrigado por se fazer presente

nos momentos ruins, ouvindo incansavelmente todos os choros e reclamações, e prestigiar, mesmo que a distância, os momentos bons.

Por fim, agradeço a todos os professores e colegas da pós-graduação que de alguma forma contribuíram para a execução desta pesquisa.

*When the going gets tough, the tough reinvents.*

RuPaul Andre Charles





## RESUMO

BRUSCHI, G. J. **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.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O setor extrativo minerador é de vital importância para o funcionamento da sociedade, visto que produz insumos indispensáveis para a vida cotidiana. Em contrapartida, as atividades mineradoras geram volumes exorbitantes de resíduos no decorrer dos processos de extração. Dentre esses resíduos, destaca-se o rejeito de mineração bauxita que é resultante do processo de obtenção do alumínio. Devido à toxicidade de sua composição química e ao seu amplo volume de geração, esse material origina uma série de problemas geoambientais. Com isso, iniciativas sustentáveis, a partir do desenvolvimento de tecnologias inovadoras, são esperadas globalmente. O processo de álcali-ativação se apresenta como uma solução para os obstáculos inerentes a geração de resíduos, pois permite a criação de uma alternativa para a substituição de materiais cimentícios tradicionais. Assim, o objetivo desta pesquisa consiste na avaliação da viabilidade técnica do processo de álcali-ativação na estabilização de um rejeito de mineração de bauxita, por meio de ensaios de resistência, rigidez e durabilidade. Como grupo de controle, o mesmo rejeito foi estabilizado com cimento Portland de alta resistência inicial. Os resultados demonstraram que o ligante álcali-ativado se apresenta como uma opção adequada para o melhoramento do comportamento mecânico do rejeito de mineração de bauxita. Além disso, o índice porosidade/teor de ligante foi um parâmetro adequado para a avaliação da estabilização dos materiais, onde a redução da porosidade e aumento do teor de ligante levaram à uma melhora no comportamento mecânico das misturas estudadas.

**Palavras-chave:** *Rejeito de mineração de bauxita; cinza do bagaço de cana-de-açúcar; cal de carbureto; álcali-ativação; ligante alternativo.*



## ABSTRACT

BRUSCHI, G. J. **Stabilization of bauxite tailings through an alkali-activated system of sugar cane bagasse ash and carbide lime**. 2020. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

The mining industry is of vital importance for the functioning of society, as it produces essential commodities for daily life. On the other hand, the mining activities generate exorbitant volumes of waste during extraction processes. Bauxite tailings are especially concerning due to their toxicity and volume generation. In addition, these materials have the potential to cause a series of geoenvironmental problems. Thus, sustainable initiatives based on the development of innovative technologies are expected globally. The alkali-activation process is presented as a solution for the referred problems, as it allows the creation of an alternative for the replacement of traditional cementitious materials. The objective of this research is to evaluate the viability of the alkali-activation process in the stabilization of bauxite mining tailings, through strength, stiffness, and durability tests. As the control group, the same mining tailing was stabilized with high initial strength Portland cement. Results have shown that the alternative binder is a suitable option to improve the mechanical behavior of bauxite tailings. The porosity/binder index ( $\eta/B_{iv}$ ) was an appropriate parameter for the evaluation of bauxite tailings stabilization: reduction in porosity and binder content increasing (decreasing  $\eta/B_{iv}$ ) led to an improvement in the mechanical behavior of the studied mixtures.

**Key-words:** *Bauxite tailings; sugar cane bagasse ash; carbide lime; alkali-activation; alternative binder.*



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Arranjo mundial dos depósitos de bauxita (Adaptado de Schulte & Foley, 2013).....	23
Figura 2.2: Processos para a obtenção da alumina (Adaptado de DNPM, 2014).....	27
Figura 2.3: Processo <i>Bayer</i> (Adaptado de ABAL, 2020).....	27
Figura 2.4: Faixa de variação granulométrica de rejeitos de mineração de bauxita (Adaptado de OBONI; OBONI, 2020).....	33
Figura 2.5: Distribuição granulométrica rejeito de bauxita (Adaptado de ROUT; SAHOO; DAS, 2013).....	34
Figura 2.6: Valores típicos de coeficiente de condutividade hidráulica de rejeitos de mineração (Adaptado de BEDIN; SCHNAID, 2010).....	39
Figura 2.7: Troca catiônica: (a) pré-troca catiônica; (b) pós-troca catiônica (Adaptado de ROGERS; GLENDINNING, 1996).....	44
Figura 2.8: Estado do solo (a) pré aglomeração e (b) pós aglomeração (Adaptado de FITZPATRICK <i>et al.</i> , 1994).....	45
Figura 2.9: Estado típico de um solo com adição de agente cimentício (a) pré hidratação e (b) após a cura (Adaptado de FITZPATRICK <i>et al.</i> , 1994).....	47
Figura 2.10: Produtos das ligações cimentícias formados durante a hidratação (Adaptado de DUXSON <i>et al.</i> , 2007).....	48
Figura 2.11: Variação da resistência a compressão não confinada com a porosidade (Adaptado de CONSOLI <i>et al.</i> , 2009).....	51
Figura 2.12: Variação da resistência a compressão simples com a porosidade e teor volumétrico de cimento (CONSOLI <i>et al.</i> , 2007).....	52
Figura 2.13: Mecanismo de reação da álcali-ativação de sistemas de alto teor de cálcio (Adaptado de SOFI <i>et al.</i> , 2007).....	60
Figura 2.14: Modelo C-S-H com alumínio em rede linear (Adaptado de FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2003).....	62
Figura 2.15: Modelo C-S-H com alumínio em rede linear cadeias reticuladas esporádicas (Adaptado de FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2003).....	63
Figura 2.16: Modelo esquemático formação do gel N-A-S-H (Adaptado de DUXSON <i>et al.</i> , 2007).....	65
Figura 4.1: Curva granulométrica do rejeito de mineração de bauxita (Elaborado pelo Autor, 2020).....	85
Figura 4.2: Curvas de compactação rejeito de mineração de bauxita (Elaborado pelo Autor, 2020).....	87
Figura 4.3: Curvas de compactação misturas (Elaborado pelo Autor, 2020).....	88
Figura 4.4: DRX cinza do bagaço de cana-de-açúcar (Elaborado pelo Autor, 2020). .....	91
Figura 4.5: Difratograma da cal de carbureto (Elaborado pelo autor, 2020).....	94
Figura 4.6: Relação CBCA/CC para diferentes concentrações de NaOH (Elaborado pelo Autor, 2020).....	95
Figura 4.7: Resultados médios resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020).....	100
Figura 4.8: Gráficos de Pareto da resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020).....	101
Figura 4.9: Efeitos principais resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020).....	103
Figura 4.10: Interações resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020).....	104

Figura 4.11: Resultados médios resistência à tração por compressão diametral (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)	105
Figura 4.12: Gráficos de Pareto resistência à tração por compressão diametral (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)	106
Figura 4.13: Efeitos principais resistência à tração por compressão diametral (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)	108
Figura 4.14: Interações resistência à tração por compressão diametral (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020).....	108
Figura 4.15: Resultados médios módulo cisalhante inicial (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)	111
Figura 4.16: Gráficos de Pareto resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020).....	112
Figura 4.17: Efeitos principais resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020).....	113
Figura 4.18: Interações resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)	114
Figura 4.19: Perda de massa individual (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)	115
Figura 4.20: Perda de massa acumulada (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)	117
Figura 4.21: Ciclos de molhagem e secagem (a) ciclo 0 (b) ciclo 12.....	119
Figura 4.22: Módulo cisalhante inicial ao longo dos ciclos de durabilidade (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)	120
Figura 4.23: Relação entre a resistência à compressão simples e o índice $\eta/B_{iv}$ (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)	121
Figura 4.24: Resistência à compressão simples normalizada para ambos tempos de cura (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)	123
Figura 4.25: Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e o índice $\eta/B_{iv}$ (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020).....	124
Figura 4.26: Resistência à tração por compressão diametral normalizada para ambos tempos de cura (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)	126
Figura 4.27: Relação entre a rigidez e o índice $\eta/B_{iv}$ (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)	127
Figura 4.28: Rigidez inicial normalizada para ambos tempos de cura (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020).....	128
Figura 4.29: Relação entre a perda de massa acumulada ao longo dos ciclos e o índice $\eta/B_{iv}$ (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020).....	130
Figura 4.30: Relação entre o módulo cisalhante inicial ao longo dos ciclos e o índice $\eta/B_{iv}$ (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020).....	132

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Depósitos de bauxita brasileiros .....	24
Tabela 2.2: Reações químicas básicas no processo <i>Bayer</i> .....	28
Tabela 2.3: Condições de digestão da bauxita .....	28
Tabela 2.4: Características básicas da alumina obtida pelo processo <i>Bayer</i> .....	29
Tabela 2.5: Rejeitos gerados a partir da produção de bauxita lavada.....	31
Tabela 2.6: Densidade de rejeitos de bauxita .....	35
Tabela 2.7: Composição química de rejeitos de bauxita .....	36
Tabela 2.8: Limites de <i>Atterberg</i> de rejeitos de bauxita.....	37
Tabela 2.9: Peso específico máximo e umidade rejeitos de bauxita.....	37
Tabela 2.10: Coeficiente de condutividade hidráulica rejeitos de mineração .....	38
Tabela 2.11: Parâmetros de compressibilidade rejeitos de bauxita .....	40
Tabela 2.12: Parâmetro de resistência para rejeitos de bauxita .....	41
Tabela 2.13: Produção de novos insumos a partir do rejeitos de bauxita.....	42
Tabela 2.14: Produtos de reação formados em diferentes ligantes.....	61
Tabela 2.15: Processo de álcali-ativação na estabilização de solos.....	69
Tabela 3.1: Tipologia e classificação pesquisa científica .....	73
Tabela 3.2: Programa experimental .....	73
Tabela 3.3: Variáveis fixadas.....	83
Tabela 3.4: Variáveis controladas.....	84
Tabela 4.1: Propriedades físicas rejeito de mineração de bauxita .....	86
Tabela 4.2: Ensaio de compactação rejeito de mineração de bauxita.....	87
Tabela 4.3: Curvas de compactação misturas .....	88
Tabela 4.4: Composição química rejeito de mineração de bauxita (% em peso) .....	89
Tabela 4.5: Análise do lixiviado rejeito de mineração de bauxita.....	89
Tabela 4.6: Análise do solubilizado rejeito de mineração de bauxita .....	90
Tabela 4.7: Propriedades físicas cinza do bagaço de cana-de-açúcar.....	90
Tabela 4.8: Composição química cinza do bagaço de cana-de-açúcar (% em peso).....	91
Tabela 4.9: Análise do lixiviado cinza do bagaço de cana-de-açúcar .....	92
Tabela 4.10: Análise do solubilizado cinza do bagaço de cana-de-açúcar .....	92
Tabela 4.11: Propriedades físicas da cal de carbureto .....	93
Tabela 4.12: Propriedades químicas da cal de carbureto .....	93
Tabela 4.13: Informações dos fatores controláveis .....	96
Tabela 4.14: Análise de variância .....	96
Tabela 4.15: Comparação múltipla de médias pelo Método de Tukey .....	97
Tabela 4.16: Tratamento estatístico ensaios de compressão simples e pulso ultrassônico..	99
Tabela 4.17: Ensaio de sucção matricial.....	109
Tabela 4.18: Perda de massa individual média.....	116
Tabela 4.19: Perda de massa acumulada .....	117



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BET	Área superficial específica
BSE	Microscopia por elétrons retroespalhados
CBCA	Cinza do bagaço de cana-de-açúcar
CC	Cal de carbureto
CPC	Cimento Portland convencional
DRX	Difração de raios X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
FRX	Espectrometria de fluorescência de raios X
<i>ICDD</i>	<i>International Centre for Diffraction Data</i>
IP	Índice de plasticidade
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
LL	Limite de liquidez
<i>LOI</i>	<i>Loss on ignition</i>
LP	Limite de plasticidade
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma Brasileira
RMB	Rejeito de mineração de bauxita
<i>ROM</i>	<i>Run of mine</i>
SSA	Superfície específica
TWO-WAY ANOVA	Análise de variância modelo de dois fatores

XRF

Espectrômetro de fluorescência de raios-X

## LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
Al(OH) <sub>3</sub>	Gibbsita
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .3H <sub>2</sub> O	Hidróxido de alumínio de forma tri-hidratada
B <sub>iv</sub>	Teor volumétrico de ligante
c'	Intercepto coesivo efetivo
C2S	Silicato dicálcico
C3A	Aluminato tricálcico
C3S	Silicato tricálcico
C4AF	Ferroaluminato tetracálcico
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio
C <sub>c</sub>	Coefficiente de compressão
C <sub>iv</sub>	Teor volumétrico de cimento
CO <sub>2</sub>	Gás carbônico
Cs	Césio
C <sub>v</sub>	Coefficiente de adensamento
Fe	Ferro
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematita
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de ferro
G <sub>0</sub>	Módulo cisalhante inicial
G <sub>s</sub>	Peso específico real dos grãos
k	Condutividade hidráulica
K	Potássio
K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Silicato de potássio
KOH	Hidróxido de potássio
L/S	Relação líquido-sólido
Li	Lítio
L <sub>iv</sub>	Teor volumétrico de cal
M	Grupo dos metais alcalinos
M <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ,	Carbonatos alcalinos

$M_2SO_4$	Sulfatos alcalinos
$M_n-[SiO_2]-[AlO_2]_n \cdot wH_2O$	Hidrato de aluminossilicato alcalino amorfo
Na	Sódio
$Na_2O$	Concentração de álcalis
$Na_2O \cdot Al_2O_3$	Aluminato de sódio
$Na_2SiO_3$	Silicato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
$q_t$	Resistência à compressão por tração diametral
$q_u$	Resistência à compressão simples
$R^+$	Cátion alcalino
Rb	Rubídio
Si	Silício
-Si-O <sup>-</sup>	Sialato
$SiO_2$	Dióxido de silício
$SiO_2$	Quartzo
-Si-OH	Silanol
SiQ	Silício tetraédrico
$t_p$	Onda de compressão
$t_s$	Onda de cisalhamento
$U_{ótima}$	Umidade ótima
$V_c$	Volume de cimento
$V_p$	Velocidade de compressão
$V_s$	Velocidade de cisalhamento
$V_v$	Volume de vazios
$\alpha-AlO(OH)$	Diásporo
$\gamma-AlO(OH)$	Boemita
$\gamma_d$	Peso específico aparente seco
$\gamma_{dmax}$	Peso específico aparente seco máximo
$\eta$	Porosidade
$\eta/(B_{iv})$	Relação da porosidade e teor volumétrico de ligante
$\eta/(C_{iv})$	Relação da porosidade e teor volumétrico de cimento
$\eta/(L_{iv})$	Relação da porosidade e teor volumétrico de cal
$\phi$	Ângulo de atrito



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA.....	16
1.2	OBJETIVO GERAL.....	18
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
1.4	JUSTIFICATIVA .....	16
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	18
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>20</b>
2.1	BAUXITA .....	20
2.1.1	Classificação e representatividade mundial.....	21
2.1.2	Classificação e representatividade nacional .....	23
2.1.3	Produção de alumínio .....	25
2.1.3.1	Lavra.....	26
2.1.3.2	Processamento mineral.....	26
2.1.3.3	Obtenção de alumina.....	26
2.2	REJEITOS DE MINERAÇÃO DE BAUXITA .....	30
2.2.1	Propriedades geotécnicas.....	31
2.2.1.1	Distribuição granulométrica.....	32
2.2.1.2	Densidade dos grãos.....	35
2.2.1.3	Composição química .....	36
2.2.1.4	Limites de consistência .....	36
2.2.1.5	Compactação .....	37
2.2.1.6	Condutividade hidráulica .....	38
2.2.1.7	Compressibilidade e adensamento .....	40
2.2.1.8	Resistência ao cisalhamento.....	41
2.2.2	Aplicações geotécnicas.....	42
2.3	ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE MATERIAIS GEOTÉCNICOS ARGILOSOS.....	43
2.3.1	Troca catiônica.....	43
2.3.2	Aglomeração.....	44

2.3.3	Hidratação .....	45
2.3.4	Reações pozolânicas .....	47
2.3.4.1	Efeitos inerentes à adição de cal .....	48
2.3.4.2	Efeitos inerentes ao tempo de cura.....	49
2.3.4.3	Efeitos inerentes à temperatura de cura.....	50
2.3.4.4	Efeitos inerentes à porosidade da mistura .....	50
2.3.4.5	Efeitos inerentes à relação porosidade e teor volumétrico de aglomerante .....	51
2.4	<b>UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA ESTABILIZAÇÃO DE MATERIAIS GEOTÉCNICOS.....</b>	<b>54</b>
2.4.1	Cinza do bagaço de cana-de-açúcar.....	54
2.4.2	Cal de carbureto .....	56
2.5	<b>ÁLCALI-ATIVACÃO .....</b>	<b>57</b>
2.5.1	Mecanismos de reação.....	59
2.5.2	Sistemas com alto teor de cálcio.....	60
2.5.3	Sistemas com baixo teor de cálcio.....	63
2.5.4	Precursores.....	66
2.5.5	Ativadores.....	67
2.5.6	Álcali-ativação aplicada à estabilização de solos.....	68
2.5.7	Álcali-ativação aplicada à estabilização de rejeitos de mineração.....	70
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODO .....</b>	<b>71</b>
3.1	<b>MATERIAIS.....</b>	<b>71</b>
3.1.1	Rejeito de mineração de bauxita (RMB) .....	71
3.1.2	Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA).....	71
3.1.3	Cal de carbureto .....	72
3.1.4	Hidróxido de sódio .....	72
3.1.5	Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI).....	72
3.2	<b>MÉTODO DE PESQUISA.....</b>	<b>73</b>
3.2.1	Procedimentos experimentais .....	74
3.2.1.1	Espectrometria de Fluorescência de raios X (FRX).....	74
3.2.1.2	Difratometria de raios X (DRX).....	75

3.2.1.3	Distribuição granulométrica.....	75
3.2.1.4	Limites de consistência .....	75
3.2.1.5	Massa específica real dos grãos .....	76
3.2.1.6	Ensaio de lixiviação .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
3.2.1.7	Ensaio de solubilização .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
3.2.1.8	Compactação .....	76
3.2.1.9	Resistência à compressão simples (RCS).....	76
3.2.1.10	Resistência à tração por compressão diametral (RCD).....	77
3.2.1.11	Durabilidade .....	78
3.2.1.12	Pulso ultrassônico (G0).....	78
3.2.1.13	Sucção matricial .....	79
3.2.2	Projeto de experimentos .....	80
3.2.2.1	Variáveis fixadas .....	82
3.2.2.2	Variáveis controláveis .....	83
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>85</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	85
4.1.1	Rejeito de mineração de bauxita (RMB).....	85
4.1.2	Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA).....	90
4.1.3	Cal de carbureto (CC).....	93
4.1.4	Ligante álcali-ativado .....	94
4.2	RESISTÊNCIA, RIGIDEZ E DURABILIDADE.....	99
4.2.1	Resistência .....	99
4.2.1.1	Resistência à compressão simples.....	100
4.2.1.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	105
4.2.1.3	Sucção Matricial.....	109
4.2.2	Módulo cisalhante inicial.....	110
4.2.3	Durabilidade .....	115
4.2.3.1	Módulo cisalhante inicial ao longo dos ciclos de durabilidade.....	120
4.3	RELAÇÕES COM O ÍNDICE H/B <sub>IV</sub> .....	121
4.3.1	Resistência à compressão simples .....	121
4.3.2	Resistência à tração por compressão diametral .....	124



4.3.3 Rigidez.....	126
4.3.4 Durabilidade .....	129
4.3.4.1 Módulo cisalhante inicial ao longo dos ciclos de durabilidade.....	131
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>134</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>140</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A indústria da mineração é fonte fornecedora direta de empregos para mais de 35 milhões de trabalhadores no mundo (NISHIJIMA; ROCHA, 2020), bem como, aprovisiona apoio indireto para aproximadamente 200 milhões de pessoas. Na economia, materiais provenientes das indústrias extrativas de mineração são de vital importância para o funcionamento da sociedade, visto que constituem produtos indispensáveis como metais e materiais de construção (BAHURUDEEN *et al.*, 2015; BURRIS *et al.*, 2015).

Apesar da importância do setor extrativo minerador, suas atividades geram volumes consideráveis de resíduos no decorrer do processo, independentemente do tamanho das operações de extração mineral. Dados casos, a quantia se assemelha a ordem de magnitude de processos geológicos fundamentais da formação da Terra (*i.e.* milhares de milhões de toneladas) (ARMSTRONG *et al.*, 2019).

Materiais sem aparente valor econômico, oriundos do processo de mineração, são conhecidos como rejeitos de mineração (GOMES *et al.*, 2017). Dentre eles, destaca-se o rejeito de bauxita que é resultante do processo de obtenção do alumínio. Esse resíduo apresenta uma natureza periculosa, com altos níveis de alcalinidade residual e metais pesados (HUA; HEAL; FRIESL-HANL, 2017). Devido à toxicidade de sua composição química e ao seu amplo volume de geração, diversos problemas de descarte e armazenamento associados a esse rejeito são encontrados mundialmente (NATH; SAHOO; SAHOO, 2015).

Os rejeitos de bauxita devem ser dispostos em ambientes devidamente projetados, de modo a minimizar os possíveis impactos socioambientais de seu processo produtivo (DAVIES, 2002; GOMES *et al.*, 2017). Diferentes técnicas de disposição podem ser encontradas na literatura especializada, entretanto, o método mais difundido para a disposição de rejeitos de mineração consiste no represamento por meio de uma estrutura conhecida como barragem de rejeitos (LUMBROSO *et al.*, 2019a). Este armazenamento coloca em pauta uma série de preocupações, sendo a mais importante, a segurança.

O processo construtivo de uma barragem de rejeitos exige, muitas vezes, o uso de material compactado para a criação do dique de partida. Portanto, o completo entendimento geomecânico e hidráulico do material constituinte do aterro, é fundamental para garantir a segurança da construção (DUCHESNE; DOYE, 2005).

Habitualmente, os materiais utilizados no sistema de construção de uma barragem de rejeitos, são os disponíveis durante o processo de mineração ou aqueles que estejam à uma distância economicamente viável da planta de produção. (LUMBROSO *et al.*, 2019b). A utilização desses rejeitos como material de construção nos aterros da barragem (ou qualquer outro tipo de aterro) apresenta alguns problemas associados a variabilidade do material.

O comportamento geotécnico dos rejeitos está relacionado as características do material, a natureza do depósito e a método de disposição (NIERWINSKI, 2019). Além disso, a natureza tóxica dos rejeitos requer extensas medidas preventivas para mitigação de riscos, que fazem alusão à segurança dos operários, vazamentos nos ecossistemas e vias navegáveis e potencial de colapso da estrutura (PANDA *et al.*, 2017).

Eventos recentes, como o rompimento da barragem de rejeitos de bauxita de Muri na Índia e de Luoyang na China, demonstraram a fragilidade dessas estruturas de armazenamento (RAI *et al.*, 2019; ROCHE; THYGESSEN; BAKER, 2017). Em âmbito nacional, o rompimento e o fenômeno de *overflow* (transbordamento) também foram verificados nas cidades Mirai e Barcarena, respectivamente (ARMSTRONG *et al.*, 2019; VEIZAGA *et al.*, 2014). Tais episódios chamaram à atenção da indústria e da sociedade para os impactos catastróficos dos rejeitos de mineração frente à falha dos sistemas de gerenciamento desses materiais.

Ainda, em meio à intensificação das preocupações socioambientais relacionadas à segurança das comunidades e à fragilidade dos ecossistemas, leis e normativas cada vez mais necessárias e rigorosas devem ser implementadas (FILHO *et al.*, 2013). A luz deste escrutínio emergente, a indústria de mineração sofre pressões sociopolíticas para concretizar um gerenciamento responsável de seus rejeitos, além de remediar o impacto ambiental deixado nas áreas circundantes (ZHANG; AHMARI; ZHANG, 2011).

A mudança climática também tem se apresentado como um sério problema que requer um esforço substancial para ser solucionado (CHEN *et al.*, 2020b). Datando de 1850 a 2018, foi constatado um aumento de mais de 30% nos níveis globais de gás carbônico (CO<sub>2</sub>). Essa elevação na concentração, provém das mais de 35 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> liberadas na atmosfera anualmente devido a ações antrópicas (KIRK; LUND, 2018). Com isso, procedimentos e posicionamentos que minimizem a pegada de carbono de todos os setores produtivos mundiais são requeridos urgentemente.

O setor da indústria mineral, em especial, tem contribuído diretamente no aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera. De acordo com Kirk and Lund (2018), metade do gás

carbônico industrial gerado anualmente é oriundo de apenas 50 empresas, que atuam com grandes indústrias de combustíveis fósseis. De maneira geral, empresas de extração mineral ocupam 40% das posições da lista supramencionada. Fato posto, faz-se necessário que as indústrias de mineração reduzam significativamente a quantidade de CO<sub>2</sub> liberado no decorrer de seus processos produtivos.

Muitas estratégias vêm sendo empregues pelas indústrias de extração mineral para atenuação da geração de CO<sub>2</sub>, as mais comuns consistindo no aproveitamento de novas tecnologias e inovações com o intuito de (a) adicionar fontes renováveis ao suprimento de eletricidade, (b) melhorar os processos de mineração, (c) mudar de combustíveis fósseis para combustíveis renováveis, (d) reduzir o desperdício e (e) otimizar o transporte (CHEN et al., 2020a, 2020b; SEMIENIUK; YAKOVENKO, 2020).

Iniciativas de mineração sustentável (*green mining*), a partir do desenvolvimento de tecnologias inovadoras e eficiência energética, são esperadas globalmente (ZHANG; AHMARI; ZHANG, 2011). Desta maneira, a demanda por materiais de baixo impacto ambiental, em conjunção com soluções para os rejeitos gerados pelos processos existentes, se apresenta como um dos desafios hodiernos da sociedade (PARVEEN et al., 2018).

Uma das soluções para os obstáculos inerentes a geração de resíduos, consiste na estabilização por meio da álcali-ativação. Esse processo permite a criação de uma alternativa para materiais cimentícios tradicionais (e.g. cimento), podendo contribuir para a monetização de rejeitos de mineração e resíduos industriais (AHMARI; ZHANG; ZHANG, 2012). A substituição dos agentes cimentícios tradicionais é uma operação extremamente visada no âmbito ambiental, pois o processo produtivo desses materiais envolve um enorme gasto energético e altas emissões de gás carbônico (MCLELLAN et al., 2011).

Nesse sentido, a cal de carbureto (CONSOLI et al., 2019a) e a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (MASUED, 2017) se apresentam como resíduos industriais com potencial de reaproveitamento na engenharia geotécnica, especialmente na estabilização de solos, em virtude de suas composições químicas reativas e suas propriedades físicas (FILHO et al., 2013).

Com isso, a aplicação do processo de álcali-ativação com precursores alternativos (e.g. cal de carbureto e a cinza do bagaço de cana-de-açúcar) para a estabilização de solos, faz alusão direta ao desenvolvimento sustentável (SOFI et al., 2007). Essa funcionalidade pode diminuir significativamente o impacto ambiental, reduzindo a pegada de carbono causada pela produção e descarte desses resíduos industriais (SORMUNEN; KÄRKI, 2019).

Destaca-se ainda, que o ligante álcali-ativado gerado apresenta a capacidade de prover um desempenho comparável à ligantes cimentícios convencionais, no que diz respeito às propriedades físicas, químicas e mecânicas (PROVIS, 2006). Além disso, as reações de álcali-ativação são eficazes na estabilização de rejeitos de mineração, o que pode acarretar na melhora não apenas das características mecânicas, mas também, encapsular possíveis elementos tóxicos na composição do material (DAVIDOVITS, 1994).

## 1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

Ante à literatura exposta, esta pesquisa propõe responder a seguinte questão: “Qual o comportamento de rejeitos de mineração de bauxita quando estabilizados por meio de um sistema ligante álcali-ativado de precursores alternativos?”.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Aproximadamente 0,8 a 1,5 toneladas de rejeitos de bauxita são geradas na produção de 1 tonelada de alumínio (NATH; SAHOO; SAHOO, 2015). Esse rejeito altamente alcalino (*i.e.* pH maior que 11) é normalmente armazenado em barragens de rejeitos ou lagoas de deposição, com baixo teor de sólidos (15% a 40% em volume) (LI, 1998) ou em sua forma seca com alto teor de sólidos (superior a 65% em volume) (KIM *et al.*, 2017).

Em ambos os casos, há a necessidade de uma vasta área para deposição desses rejeitos, podendo ocasionar em sérios problemas ambientais, como: (i) contaminação do solo; (ii) poluição das águas subterrâneas e superficiais devido à alta alcalinidade; e (iii) degradação da vegetação local (ZHANG *et al.*, 2018). Para evitar as adversidades que podem resultar do modo de armazenamento, faz-se necessário a utilização do rejeito como um material alternativo construtivo e/ou geotécnico.

Ao longo dos anos, muitas tentativas foram relatadas para direcionar as aplicações do rejeito de bauxita. Esse resíduo apresenta potencial de utilização na produção de materiais de construção como cimento, tijolos ou concreto (AGATZINI-LEONARDOU *et al.*, 2008; HUA; HEAL; FRIESL-HANL, 2017; HUANG *et al.*, 2016; KIM *et al.*, 2017; LIU; POON, 2016), ou ainda, para o tratamento de águas residuais, gases residuais ou solos contaminados (GUPTA; GUPTA; SHARMA, 2001; HUA; HEAL; FRIESL-HANL, 2017; WANG *et al.*, 2005). Por ser enriquecido com óxido de ferro ( $Fe_2O_3$ ), o mesmo possui um grande potencial para a

estabilização de resíduos, devido à alta formação de estruturas cristalinas por meio de seus processos de reação (HUANG *et al.*, 2016; LIU; NAIDU, 2014).

Diversos pesquisadores vêm estudando extensivamente as propriedades básicas mecânicas e microestruturais do rejeito de bauxita. Wang e Liu (2012) relatam que o material é composto por partículas finas e apresenta uma grande área superficial específica, indicando um elevado potencial para aplicação em misturas de argamassa para alvenaria.

Zhang *et al.* (2018) indicam que o rejeito de bauxita pode ser utilizado como substituto parcial de cal em pavimentos asfálticos, demonstrando uma performance aprimorada no comportamento mecânico nas amostras analisadas.

Além disso, Sutar *et al.* (2016) auferem que o rejeito de bauxita pode ser utilizado como um material de preenchimento na substituição de cimento Portland para a produção de concreto, em taxas de até 20%. Para misturas de rejeito-cimento, Romano *et al.* (2018) observam que a nucleação e efeito de preenchimento de partículas do material intensificam o desenvolvimento da hidratação do agente cimentício e a formação de sua microestrutura.

No âmbito ambiental e econômico, considerar rejeitos de bauxita como uma alternativa parcial (*i.e.* material de preenchimento) para a geotecnia é extremamente benéfico. No entanto, o número de descobertas, provenientes de pesquisas científicas, acerca do tema é limitado.

Em sua maioria, investigações científicas experimentais não foram aplicadas em grande escala. O volume utilizado do rejeito de bauxita é incrivelmente pequeno devido ao processo complexo e risco inerente. Consequentemente, o armazenamento e a utilização de montanhas de resíduos ainda são um problema urgente a ser resolvido.

Com isso, a geotecnia e geotecnologia ambiental anseiam utilizar tecnologias e metodologias inovadoras de maneira a contribuir no exame cauteloso de novas alternativas que provejam soluções mais econômicas e sustentáveis, com a mitigação dos impactos ambientais causados pelas indústrias. Uma perspectiva que vem sendo sobrelevada, consiste na reutilização de resíduos industriais que, até então, não apresentam monetização expressiva e são considerados como material de descarte (*e.g.* cal de carbureto e cinza do bagaço de cana-de-açúcar).

Neste contexto, julga-se imprescindível que novas pesquisas sejam realizadas na área de desenvolvimento de materiais geotécnicos, com o intuito de buscar diretrizes seguras para o emprego e aproveitamento com qualidade dos insumos, garantindo que estes sejam inseridos com maior frequência na indústria da construção civil. Com esta pesquisa, anseia-se aprimorar o conhecimento sobre o comportamento químico e mecânico do rejeito de mineração de

bauxita, estabilizado por meio do processo de álcali-ativação utilizando os resíduos cal de carbureto e cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

Constitui-se como objetivo geral deste estudo avaliar a viabilidade técnica do processo de álcali-ativação, a partir de precursores alternativos (cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cal de carbureto), na estabilização de rejeitos de mineração de bauxita.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diante do objetivo geral e do problema proposto nesta pesquisa, os seguintes objetivos específicos são requeridos:

- a) Caracterizar o comportamento químico e físico-mecânico do rejeito de mineração de bauxita, cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cal de carbureto;
- b) Avaliar a influência das diferentes proporções de precursores e solução ativadora na resposta mecânica do ligante álcali-ativado;
- c) Determinar as condições de dosagem que maximizem a resposta mecânica das pastas álcali-ativadas;
- d) Analisar estatisticamente a influência das variáveis de pesquisa nos resultados de resistência à compressão simples, resistência à compressão por tração diametral, rigidez inicial e durabilidade;
- e) Arguir sobre a viabilidade de correlação entre as variáveis resposta e à relação porosidade por teor volumétrico de agente aglomerante.

### 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta pesquisa está estruturada em cinco capítulos. O primeiro, é composto por características introdutórias. Apresenta uma delimitação do universo que se pretende estudar, o problema de pesquisa, os objetivos, geral e específicos, bem como a apresentação da justificativa teórica e relevância prática do tema.

No capítulo dois a fundamentação teórica é apresentada com cinco seções. A primeira reflete as conceptualizações acerca da rocha bauxita e suas características. A segunda seção explora os aspectos inerentes a geração de rejeitos de mineração, oriundos do processamento mineral. Em seguida, são apresentados os conceitos relativos a estabilização química de solos e rejeitos de mineração. Esse capítulo encontra seu fim na apresentação do processo de álcali-ativação.

O terceiro capítulo abarca as determinações metodológicas deste estudo. Logo, o capítulo é composto pelo delineamento da pesquisa e especificação do problema de pesquisa em um primeiro momento. São expostos ainda, o projeto de experimentos, em conjuntura com as explicações inerentes aos processos de tomada de decisão, bem como a descrição dos ensaios realizados.

O quarto capítulo expõe os resultados dos materiais estudados e prevê a análise e discussão dos dados obtidos. Por fim, o quinto capítulo contém as considerações finais acerca dos resultados, além de sugestões para trabalhos futuros.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo possui o intuito de fundamentar teoricamente os principais aspectos associados ao tema estudado. Logo, com o objetivo de permitir um entendimento cabível dos conceitos utilizados, esta seção explora as características da rocha bauxita, dos rejeitos oriundos do processamento mineral, a estabilização química de solos e por fim, o processo de alcali-ativação.

### 2.1 BAUXITA

A bauxita é distinguida das outras rochas sobretudo pelo seu exterior de coloração rúbea e sua composição de mistura de óxidos de alumínio hidratados (KLEIN, 2001; PAREKH; GOLDBERGER, 1976). De acordo com Parekh e Goldberger (1976), esses óxidos podem ser sintetizados em (i) gibbsita; (ii) boemita; e (iii) diásporo. A gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), também conhecida como hidrargilita, consiste em uma das configurações minerais do hidróxido de alumínio de forma tri-hidratada ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ). Por outro lado, a boemita ( $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$ ) e o diásporo ( $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$ ) se apresentam como duas formas mono-hidratadas da alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) (MELFI, CARVALHO, 1983; MELFI, CARVALHO, BOULANGÉ, LUCAS, 1997; SGARBI, 2012).

Suas proporções na rocha, variam muito entre depósitos, e dependem da quantidade das impurezas do minério. Além disso, na estruturação da bauxita, compostos pormenores podem ser evidenciados: goethita; hematita; caulinita; haloisita; rutilo e sílica (KLEIN, 2001).

A pigmentação e tonalidade de uma rocha estão relacionadas à proporção de óxidos de ferro presentes no material. Bauxitas vermelhas normalmente apresentam proporções de até 25%, as brancas, por sua vez, ostentam percentagens menores que variam de 2% a 4% (SGARBI, 2012). O teor de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) presente em uma bauxita determina a viabilidade e o proveito econômico do insumo. Para que seja aproveitável, essa quantia deve ser no mínimo 30% e para que haja viabilidade econômica (com rendimento considerável), essa taxa deve variar de 50% a 55% (KLEIN, 2001).

O proveito da bauxita ultrapassa a marca de 100 milhões de toneladas de produção anual. O alumínio metálico, produzido pelo processo *Bayer*, consiste no produto mais ambicionado, compondo 95% de todo o processo de produção. Isso representa uma geração final de aproximadamente 40 milhões de toneladas do metal anualmente (MÁRTIRES, 2001).

A bauxita não-metalúrgica, que compõe os 5% restantes do processo de produção, quando calcinada pode ser aplicada na confecção de outros materiais (*e.g.* cimento). A alumina que não passa pelo processo de calcinação pode ser utilizada para a obtenção de produtos químicos (PAREKH; GOLDBERGER, 1976).

De acordo com IAI (2008), as reservas mundiais de bauxita estão distribuídas nas regiões tropical (56%), mediterrânea (34%) e subtropical (10%). No que diz respeito a sua produção, seis países se destacam como os principais, sendo eles: (i) Austrália; (ii) China; (iii) Brasil; (iv) Jamaica; (v) Índia; e (vi) Guiana.

Em consonância com os dados expostos por Mártires (2001), o Brasil dispõe cerca de 3,5 bilhões de toneladas de reservas de bauxita, ocupando a terceira posição no *ranking* mundial de acúmulos. Além disso, as reservas brasileiras são compostas (em sua pluralidade) por bauxitas de grau metalúrgico. Uma perspectiva mais acertada sobre a extração mundial e brasileira pode ser verificada nas subseções seguintes.

### 2.1.1 Classificação e representatividade mundial

A classificação da bauxita é um tema acadêmico amplamente explorado, com inúmeras proposições na literatura (BÁRDOSSY, 1982; CARVALHO, 1989; PAZ, 2016). Bárdossy (1982) estudou a litologia do substrato, classificando os depósitos de bauxita em dois conjuntos elementares: (i) depósitos alocados sobre rochas alumino-silicáticas; e (ii) depósitos alocados sobre rochas carbonáticas. O primeiro conjunto foi subdividido em duas parcelas: depósitos lateríticos e depósitos sedimentares.

A partir do estudo dos parâmetros inerentes a morfologia e aspectos genéticos de depósitos de bauxita, realizado por Carvalho (1989), criou-se uma classificação subdividida em três conjuntos: (i) lateríticos de cobertura; (ii) sedimentares; e (iii) cársticas. De acordo com Paz (2016), indicadores como mineralogia, finalidade tecnológica (*i.e.*, metalúrgica ou não-metalúrgica) e composição química também podem ser utilizados para a categorização de depósitos de bauxita.

A classificação de Bárdossy (1982) foi selecionada para expor as informações sobre os depósitos de bauxita existentes. Justifica-se essa escolha pela globalidade e clareza das informações geradas por tal classificação.

Depósitos alocados sobre rochas carbonáticas se caracterizam pela baixa percentagem de alumínio. Entretanto, em função da facilidade de dissolução e lixiviação dos carbonatos, esse

alumínio se torna muito mais concentrado (SANTOS, 2011). A ocorrência desse tipo de depósito transcorre normalmente em depressões paleocársticas, como configurações de material argiloso aglomerado incorporado por sequências de carbonatos (*e.g.* calcário e dolomita) (BÁRDOSY, 1982; PAJOVIĆ, 2009). Esses depósitos são comercialmente valiosos e ocorrem frequentemente em territórios como China, Europa, Jamaica e Oriente Médio.

A idade mineralógica influencia diretamente na composição mineral (litologia) deste tipo de bauxita e sua coloração tende a ser preta ou acinzentada. A boemita se destaca como o material de composição mais contumaz e abundoso, entretanto, o diásporo também pode ser encontrado em depósitos mais primitivos (RETALLACK, 2010).

Depósitos alocados sobre rochas lateríticas retratam cerca de 85% das reservas mundiais. Segundo Bardossy (1994), jazidas de rochas alumino-silicáticas representam a gênese desse tipo de bauxita. Verifica-se a ocorrência deste material perante à corpos lenticulares dissecados por processos erosivos recentes que capeiam áreas planas (*e.g.* platôs e chapadas). O minério aproveitável dessas estruturas possui, no máximo, 10 metros de espessura e apresenta variações nas proporções de alumínio, ferro e silício (FERENCZI, 2001).

Bauxitas alocadas sobre rochas lateríticas (*i.e.* basalto, gnaisse, granito, sienito e xisto) comumente ocorrem em perfis de grande espessura, perfis esses que são concebidos por intermédio de intemperismo químico prolongado e lixiviação de aluminossilicatos (FERENCZI, 2001; RETALLACK, 2010). A litologia se apresenta de maneira variável com tipologias friáveis e altamente litificadas.

Como exposto anteriormente, a composição química depende diretamente da anosidade do material. Depósitos antigos apresentam mais boemita e depósitos novos gibbsita (SGARBI, 2012). Conforme Bárdossy (1994), a coloração da bauxita laterítica varia em tonalidades de amarelo, branco, laranja, marrom, rosa e rúbeo.

Por fim, depósitos alocados sobre rochas sedimentares possuem natureza alóctone, com associação à estratos de formação ígnea, metamórfica ou sedimentar. De acordo com Bárdossy (1982), esses insumos representam uma parcela de menor magnitude econômica e advêm de regiões tectonicamente harmônicas (*i.e.* plataformais ou paraplatáformais). Para o caso de bauxitas alocadas sobre rochas sedimentares a idade mineralógica não afeta a composição mineral do material. Proporções variáveis de boemita, caulinita e gibbsita são as principais substâncias encontradas na constituição dessa bauxita (SCHULTE; FOLEY, 2013).

Jazidas de bauxitas apresentam ocorrência em diversos continentes, áreas e subáreas. O arranjo e a distribuição mundial desses depósitos são apresentados na Figura 2.1.

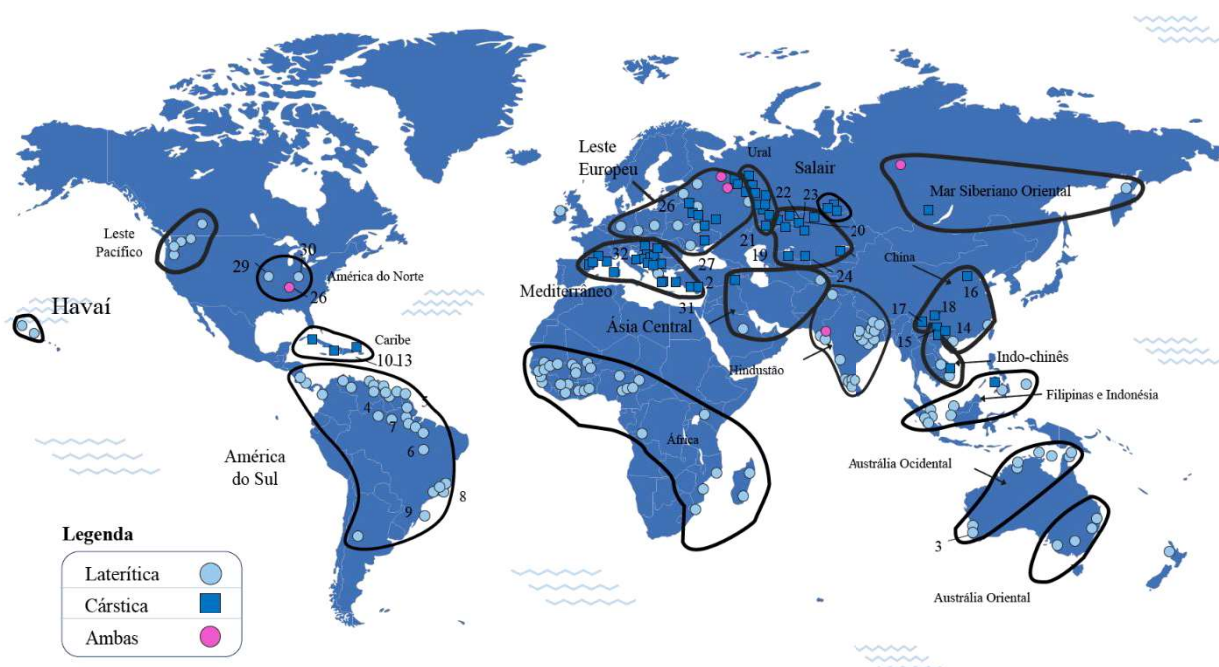


Figura 2.1: Arranjo mundial dos depósitos de bauxita (Adaptado de Schulte & Foley, 2013)

Em consonância com dados levantados por Schulte e Foley (2013), os depósitos mundiais de bauxita totalizam aproximadamente 30 bilhões de toneladas e se estima que os recursos totais estejam em uma faixa de 50 a 80 bilhões de toneladas. No que diz respeito a representação percentual de tais reservas, de acordo com *U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey* (2017) a quantificação pode ser realizada no seguintes itens: (i) 32% para África; (ii) 23% para Oceania; (iii) 21% América do Sul e Caribe; (iv) 18% para Ásia; e (v) 6% para o restante do mundo.

Uma vez discriminadas algumas das particularidades dos depósitos de bauxita em nível mundial a subseção que segue apresenta as características da extração nacional.

### 2.1.2 Classificação e representatividade nacional

O estudo realizado por Melfi *et al.* (1997) caracterizou os depósitos brasileiros de bauxita como lateríticos de origem correlata às condições climáticas e geomorfológicas impostas ao meio. A reconhecimento da tipologia do material estudado ocorreu por intermédio da síntese de pesquisas

prévias de inúmeros autores (e.g. ALEVA, 1981; ALMEIDA, 1977; DENNEN NORTON, 1977; GRUBB, 1979; MELFI, CARVALHO, 1983; SIGOLO, 1979; VARAJÃO, 1988).

Bauxitas formadas a partir de rochas sedimentares representam os depósitos mais relevantes no âmbito nacional, correspondendo a aproximadamente 96% do total de jazidas existentes no Brasil (concentradas na região amazônica) (DENNEN; NORTON, 1977). As regiões sul e sudeste do Brasil comportam a parcela restante, entretanto, a formação desses depósitos diverge completamente dos supracitados. Essas jazidas foram geradas a partir de rochas alcalinas (e.g. nefelina-sienito), cristalinas pré-cambrianas (e.g. anfíbolitos) ou metassedimentares (e.g. filitos) (MELFI *et al.*, 1997).

Em consonância com os dados apresentados por Melfi *et al.* (1997), os depósitos brasileiros de bauxita são fracionados substancialmente em três regiões: (i) Amazônia Oriental – alocada sobre rochas sedimentares e pré-cambrianas meta-vulcânicas básicas; (ii) Sul-sudeste – alocada sobre rochas alcalinas, cristalinas pré-cambrianas e metassedimentares; e (iii) Central da Mantiqueira/Quadrilátero Ferrífero – alocada sobre rochas sedimentares e meta-vulcânicas. A súpula dos dados supramencionados está exposta na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Depósitos de bauxita brasileiros

Região	Estado	Depósito	Rocha-mãe
Norte	Pará	Almerin	Sedimentos arcoseanos
		Porto Trombetas	Sedimentos arcoseanos
		Carajás	Basalto
		Rondon de Pará	Arenito arcoseano
	Pará/Maranhão	Paragominas	Sedimentos
	Amapá	Morro do Felipe	Sedimentos
Quadrilátero Ferrífero e Província Mantiqueira Central	Minas Gerais	Fraga	Filito
		Nova Lima	Riodacito
		Macaquinho	Sedimentos
		Cataguases	Gnaisse
		Itamarati de Minas	Gnaisse
		Descoberto	Anfíbolito
		Mirai	Gnaisse enderbítico e charknokito
		Nazaré Paulista	Anfíbolito
	São Paulo	Curucutu	Diabásio
		Mogi das Cruzes	Granito
		Rio de Janeiro	Resende
Sul-Sudeste	Minas Gerais	Poço de Caldas	Rochas alcalinas, sienitos
	Rio de Janeiro	Passa Quatro	Rochas alcalinas, sienitos
	Santa Catarina	Lages	Basalto, diabásio, fonolito

Fonte: Adaptado de Melfi *et al.* (1997)

Dada a exposição da classificação e do processo de extração mineral, nos âmbitos internacional e nacional, a subseção que segue elucida os procedimentos, características e peculiaridades inerentes à um dos produtos que a mineração de processamento de bauxita confere a população, o alumínio.

### 2.1.3 Produção de alumínio

A bauxita é a principal fonte de alumínio do mundo, uma vez que o alumínio começa como minério de bauxita (minério de alumínio formado a partir do solo laterítico) (LUMLEY, 2011). Antes de tornar-se alumínio, a rocha destinada a esse uso deve primeiramente passar por um processo gerador de alumina (RETALLACK, 2010). Segundo Schulte e Foley (2013), estima-se que mais de 95% da produção mundial de bauxita é convertida em alumina, com o restante direcionado para uma variedade de produtos (*e.g.* abrasivos, produtos químicos, cimentos).

A nomenclatura inerente ao alumínio pode ser subdividida em primária e secundária. O primeiro termo faz referência ao produto obtido por meio da transformação da bauxita em alumina. Já o segundo, provém do material que é reaproveitado de processos industriais ou de produtos com vida útil esgotada (ABAL, 2020). No Brasil, a obtenção do alumínio secundário ocorre via reciclagem da sucata. Comparativamente à média mundial, o país se destaca em virtude a alta porcentagem de sucata reciclada.

De acordo com ALCOA (2020), o alumínio não é encontrado em seu estado puro na natureza. Geralmente, compostos são formados a partir da combinação com outros elementos, como o silício, o oxigênio e o hidrogênio. Assim, diversos estágios de produção são necessários para a obtenção do produto final do alumínio a partir da mineração de bauxita.

Inicialmente, o insumo resultante da extração e beneficiamento da bauxita é expedido à uma refinaria para a produção de alumina. Com isso, realiza-se a redução dessa alumina em alumínio primário, por intermédio do processo *Hall-Héroult* (LUMLEY, 2011).

Este processo se fundamenta na redução eletrolítica da alumina ( $Al_2O_3$ ) dissolvida em um banho de criolita fundida e fluoreto de alumínio (ABAL, 2020). Segundo ALCOA (2020), mais de 90% da alumina mundial obtida é utilizada no processo eletrolítico *Hall-Héroult* para a preparação do alumínio metálico. O restante é aplicado na indústria de papel, vidros e outros.

Da etapa de prospecção do minério até a produção da bauxita, são realizadas uma série de atividades compreendidas em três estágios: (i) estágio de reconhecimento - Lavra; (ii) estágio de prospecção preliminar – processamento mineral; e (iii) estágio de prospecção detalhada –

obtenção da alumina (CHOUDHURI; MUKHERJEE, 1992). As subseções porvindouras são dedicadas a explicar os procedimentos inerentes cada uma das etapas do processo.

#### 2.1.3.1 Lavra

Rohrlich, Mistry, Ruhrberg e Martens (2001) verificaram que menos de 18% da produção de bauxita laterítica mundial utiliza métodos por lavra subterrânea. O mecanismo escolhido para a lavra de minérios de bauxita é diretamente dependente da natureza dos corpos mineralizados das jazidas, uma vez que as condições do terreno influenciam em sua lavra. Entretanto, um padrão verificado em indústrias mineradoras é a escolha do processo *strip mining*, caracterizado pela extração do minério em tiras (SILVA FILHO *et al.*, 2007; HUANG *et al.*, 2016).

Esse método é composto pelas operações sequenciais de: (i) remoção planejada da vegetação e do solo orgânico; (ii) remoção e disposição do estéril e (iii) lavra do minério. A rocha mineralizada é escavada em forma de blocos retangulares paralelos e adjacentes. As tiras são retiradas sequencialmente por equipamentos e/ou explosivos, e depositadas na tira lavrada anteriormente (LUMLEY, 2011). A partir da finalização desta etapa, os minérios são encaminhados para o processamento mineral.

#### 2.1.3.2 Processamento mineral

Devido ao elevado teor de alumina presente nos minérios de bauxita, os mecanismos de processamento mineral não se apresentam de maneira elaborada no que pesa à execução. Em virtude dessa simplicidade, as técnicas convencionais se aplicam parcialmente a esse tipo de minério (PAZ, 2016).

O processamento mineral pode ser dividido em 4 etapas, sendo elas: (i) britagem, para reduzir o tamanho dos aglomerados; (ii) lavagem, para retirar a parcela de granulometria mais fina (altos teores de sílica); (iii) peneiramento e separação, para reduzir o volume total transportado e (iv) secagem, para reduzir custos de transporte (VILLAR, 2002).

#### 2.1.3.3 Obtenção de alumina

A obtenção de alumina pode ser realizada por diversos processos, os quatro principais estão ilustrados na Figura 2.2.

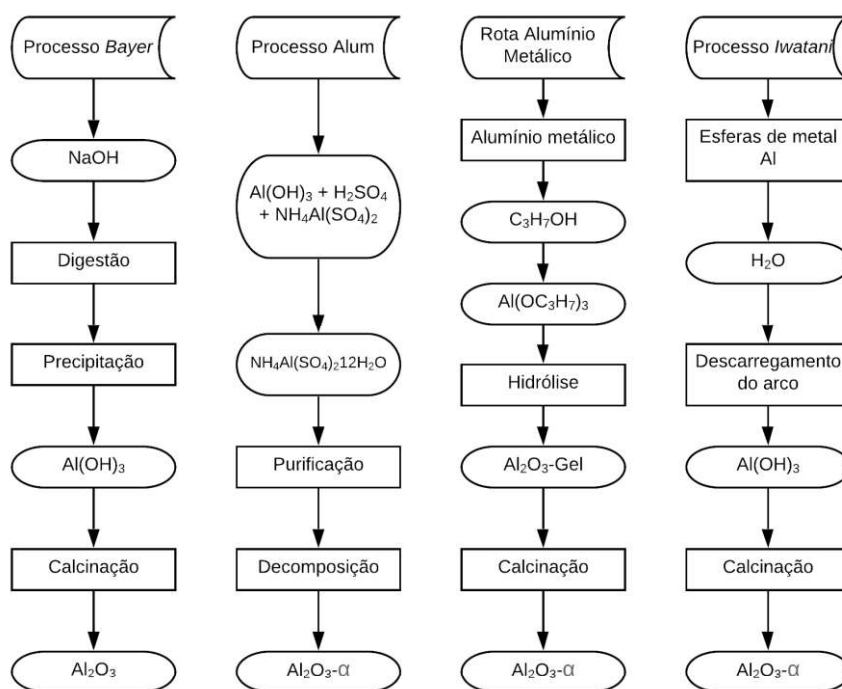


Figura 2.2: Processos para a obtenção da alumina (Adaptado de DNPM, 2014)

O mais utilizado, e conseqüentemente mais conhecido, é o processo *Bayer* (HIND; BHARGAVA; GROCOTT, 1999). Apenas esse método será desenvolvido detalhadamente nesta subseção, visto que o rejeito utilizado nesta pesquisa é um subproduto proveniente do processo supracitado.

Segundo Villar (2002), o princípio básico que orienta o processo *Bayer* fundamenta-se na solubilidade dos hidratos de alumínio em soda cáustica. Esse processo, em consonância com ABAL (2020), pode ser sintetizado em cinco etapas principais, que estão discriminadas na Figura 2.3.

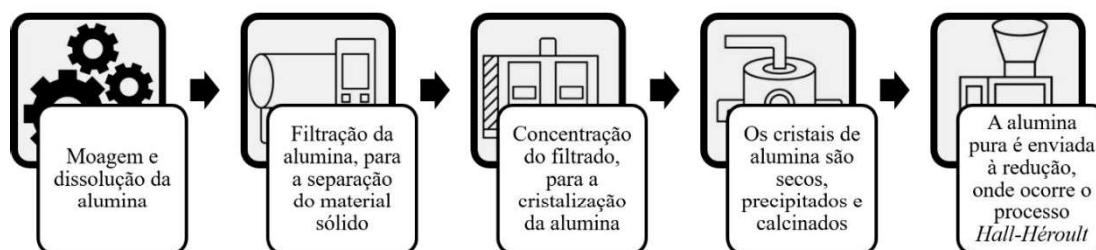


Figura 2.3: Processo *Bayer* (Adaptado de ABAL, 2020)

A forma do alumínio presente na bauxita interfere diretamente na tipologia da etapa de digestão e, conseqüentemente origina uma grande variabilidade na produção mundial (IAI, 2008). Os



principais hidróxidos de alumínio presentes na bauxita (*i.e.* gibbsita, boemita e diásporo) são seletivamente extraídos e dissolvidos em uma solução de hidróxido de sódio (RETALLACK, 2010; LIU & POON, 2016;).

O aglutinado de bauxita moída normalmente apresenta um tamanho de grãos inferior a 200µm e uma razão mássica de  $Al_2O_3/SiO_2 > 10$ . Esse composto é misturado em uma solução de soda cáustica e reage sob pressão, em equipamentos reatores (POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2011). Perante as condições supracitadas, constata-se a ocorrência da dissolução da bauxita com a formação de uma solução de aluminato de sódio ( $Na_2O \cdot Al_2O_3$ ). As impurezas do composto continuam na fase sólida e são classificadas como um subproduto nomeado lama vermelha (STINSON, 2013).

Ademais, outras impurezas podem ser constatadas no decorrer do processo *Bayer* e apesar de sua concentração ser muito menor, ainda podem afetar a qualidade da alumina gerada. Logo, as reações químicas geradas entre a alumina e minerais de sílica com a solução de soda cáustica são o sustentáculo para a digestão química da bauxita (POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2011). As reações químicas básicas que ocorrem no processo *Bayer* estão descritas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Reações químicas básicas no processo *Bayer*

Mineral	Reação
Gibbsita	$Al_2O_3 \cdot 3H_2O + 2NaOH \leftrightarrow 2NaAlO_2 + 4H_2O$
Boemita	$Al_2O_3 \cdot H_2O + 2NaOH \leftrightarrow 2NaAlO_2 + 2H_2O$
Caulinita	$5[(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O)] + Al_2O_3 \cdot 3H_2O + 12NaOH \leftrightarrow 2[3Na_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 \cdot 5H_2O] + 10H_2O$

Fonte: Adaptado de Power; Gräfe e Klauber (2011)

Em soda cáustica, o maior grau de solubilidade dos hidróxidos de alumínio, presentes na bauxita, é verificado na gibbsita, subsequentemente na boemita e no diásporo. Em consonância com os dados apresentados por Constantino, Araki, Silva e Oliveira (2002), na Tabela 2.3 estão apresentadas as premissas necessárias para que ocorra a completa solubilização dos compostos.

Tabela 2.3: Condições de digestão da bauxita

Composição da bauxita	Temperatura (°C)	NaOH (g/L)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)
Gibbsita	107	260	165
	142	105-145	90-130
Boemita	197	150-250	120-160
	237	105-145	90-130
Diásporo	262	150-250	100-150

Fonte: Adaptado de Constantino *et al.* (2002)

Posterior ao processo de digestão, o material derivado é transferido para a fase de redução por meio de uma série de equipamentos (*e.g.* reatores à pressão, espessadores e filtros prensa) (LIU; POON, 2016).

A próxima etapa consiste no resfriamento e precipitação do material, que são realizados por intermédio de torres de resfriamento e precipitadores, nos quais a alumina tri-hidratada é finalmente cristalizada. Em seguida, o produto é filtrado, lavado, secado e calcinado, e como resultado obtém-se a forma pura da alumina (HIND; BHARGAVA; GROCOTT, 1999). Para que a alumina produzida durante o processo *Bayer* seja considerada rentável e de qualidade aceitável, a mesma deve cumprir as especificações expostas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Características básicas da alumina obtida pelo processo *Bayer*

Impurezas	% peso	Impurezas	% peso
Ca	0,01-0,07	P	0,0005-0,001
Fe	0,009-0,03	Pb	0,0001-0,001
Ga	0,01-0,05	Si	0,004-0,01
Mn	0,0005-0,0015	Ti	0,001-0,005
Na	0,02-0,50	Zn	0,005-0,015
Características físicas		Alumina arenosa	Alumina pó
Adsorção de água (%)		1-3	0,2-0,5
Alumina alfa $Al_2O_3-\alpha$ (%)		10-50	70-90
Ângulo de repouso (°)		30-40	40-50
Densidade aparente ( $kg/m^3$ )		880-960	800-960
Peso específico ( $g/cm^3$ )		3,6-3,7	3,8-3,9
Distribuição granulométrica (% acumulada)			
147 $\mu m$		1-10	0-5
74 $\mu m$		40-80	20-50
43 $\mu m$		85-98	50-70

Fonte: Adaptado de Power; Gräfe; Klauber (2011)

A massa de alumina, produzida pelo processo *Bayer*, é convertida em alumínio metálico por meio de redução eletrolítica em banho fundido de criolita natural ou sintética, utilizando o processo *Hall-Héroult* (POWER *et al.*, 2011). Esse corresponde ao principal processo industrial de fundição de alumínio, envolvendo a dissolução do óxido de alumínio (alumina) em criolita derretida e a eletrólise do banho de sal derretido, normalmente em uma célula projetada (HIND; BHARGAVA; GROCOTT, 1999).

Aplicado em escala industrial, o processo de *Hall-Héroult* ocorre de 940 °C a 980 °C e produz 99,5% a 99,8% de alumínio puro. O alumínio reciclado não requer eletrólise, portanto, não acaba nesse processo (HIND; BHARGAVA; GROCOTT, 1999).

Percebe-se que para a obtenção final do alumínio, inúmeros procedimentos de transformação do insumo inicial são necessários. Cabe destacar que toda a abrangência de processos produtivos possui como característica inerente a geração de resíduos.

De acordo com Azapagic (2004), os rejeitos gerados na atividade mineradora se diferenciam parcialmente dos produzidos em outros setores. Esse fenômeno ocorre em função da existência de uma parcela composta por resíduos sólidos provenientes da extração e do material resultante do processo de beneficiamento. Portanto, a seção subsequente abarca as ideias e conceptualizações acerca dos rejeitos provenientes do processo de extração mineral de bauxita.

## 2.2 REJEITOS DE MINERAÇÃO DE BAUXITA

O processo de extração mineral gera altas quantias de materiais que não apresentam valor econômico e que necessitam de uma destinação adequada (DAVIES, 2002). Esses insumos são industrialmente produzidos e, portanto, tendem a apresentar características de comportamento distintas dos materiais naturais normalmente analisados na engenharia (SHACKELFORD, SEVICK, EYKHOLT, 2010).

Em busca da aquisição de um produto comercialmente viável, a indústria mineradora realiza diversos processos de trituração, pulverização e processamento em uma alta quantidade de rochas (HUA, HEAL, FRIESL-HANL, 2017). O material estéril, constituído por resíduos sólidos (*e.g.* pilhas de minérios pobres, rochas, sedimentos e solos), é visto como o insumo do processo supracitado (SHACKELFORD, SEVICK, EYKHOLT, 2010).

Ademais, uma grande quantidade de finas partículas de rocha, cuja granulometria normalmente varia entre areia fina e argila, é produzida no decorrer do processo de beneficiamento. Essas partículas finas e ultrafinas, sem valor comercial, são denominadas de rejeitos de mineração (GOMES, CORREA, SÁ, NETO, BERNARDINO, 2017). Os rejeitos de mineração são em geral misturas com elevada presença de água em função do processo de lavagem para separação da fração fina da fração grossa, que geralmente contém o minério de interesse (VILLAR, 2002).

A geração de estéreis e rejeitos de mineração não apresenta uma equivalência e vincula-se diretamente à composição dos minérios extraídos (YOUNGER; WOLKERSDORFER, 2004).

Por exemplo, a extração de minérios não-metálicos gera altos teores de estéreis, entretanto, minérios metálicos (por passarem pelo processo de transformação mineral) são potenciais produtores de rejeitos de mineração (SHACKELFORD, SEVICK, EYKHOLT, 2010).

Em regiões tropicais e subtropicais, a forma mais comum de lavra constitui-se pelo método a céu aberto. Para a produção final de uma tonelada de alumínio é necessário beneficiar de três a seis toneladas do minério de bauxita. Ainda, estima-se que a produção de uma tonelada de alumínio gere aproximadamente uma a duas toneladas de rejeito de bauxita (*i.e.* lama vermelha) (REDDY; RAO, 2016).

Em um âmbito nacional, Deursen (2016) estudou a relação da produção/geração de rejeitos de três mineradoras distintas (*i.e.* CBA, MRN e NH). Os resultados deste trabalho estão sintetizados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Rejeitos gerados a partir da produção de bauxita lavada

Mineradora	<i>Run of mine</i> (Mt)	Bauxita beneficiada (Mt)	Rejeito seco (Mt)	Rejeito úmido (Mt)
CBA	7,5	3,0	4,5	10,0
MRN	25,7	18,0	7,7	14,0
NH	13,14	9,2	3,9	6,6

Fonte: Adaptado de Deursen (2016)

Por meio das informações expostas, nota-se que a geração de rejeitos, por ambas metodologias de disposição, é extremamente elevada quando comparadas a quantia de minério beneficiado. Os rejeitos de mineração supracitados apresentam características geotécnicas distintas dos materiais habituais da prática de engenharia. Com isso, a subseção seguinte objetiva clarificar tais aspectos comportamentais.

### 2.2.1 Propriedades geotécnicas

As propriedades geotécnicas de rejeitos de mineração dependem de uma série de fatores, como: (a) a origem do minério lavrado; (b) a tipologia do beneficiamento; (c) a tipologia da refinaria; (d) a disposição e armazenamento, dentre outros (SOUZA VILLAR *et al.*, 2009).

Por se tratar de um material geotécnico, as propriedades inerentes a rejeitos de mineração são similares a de um solo, ou seja, analisam-se parâmetros como distribuição granulométrica, densidade dos grãos, composição química, limites de consistência, compactação, condutividade hidráulica, compressibilidade e adensamento, desempenho térmico, e resistência ao cisalhamento (REDDY; RAO, 2016).

### 2.2.1.1 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica é uma propriedade geotécnica fundamental para o entendimento do comportamento de um material. Segundo Schnaid *et al.* (2015), a determinação da curva granulométrica de um rejeito de mineração é carregada de incertezas, sendo possível apenas definir uma faixa de variação que normalmente apresenta partículas do tamanho de siltes.

O rejeito de bauxita, por sua vez, ostenta uma distribuição granulométrica totalmente dependente e relacionada com a origem da rocha-mãe, ao processo de extração do minério, ao processamento e ao tipo de deposição (VILLAR *et al.*, 2009; VILLAR, 2002). Assim, a definição de uma curva padronizada para esse tipo de material é de difícil obtenção, sendo mais comumente definida uma faixa de variação (BRUNORI *et al.*, 2005; NATH; SAHOO; SAHOO, 2015).

Oboni e Oboni (2020) constataram a variabilidade supracitada, operando um apanhado de ensaios de caracterização granulométrica realizados em rejeitos de bauxita de mineradoras distintas, conforme ilustrado na Figura 2.4.

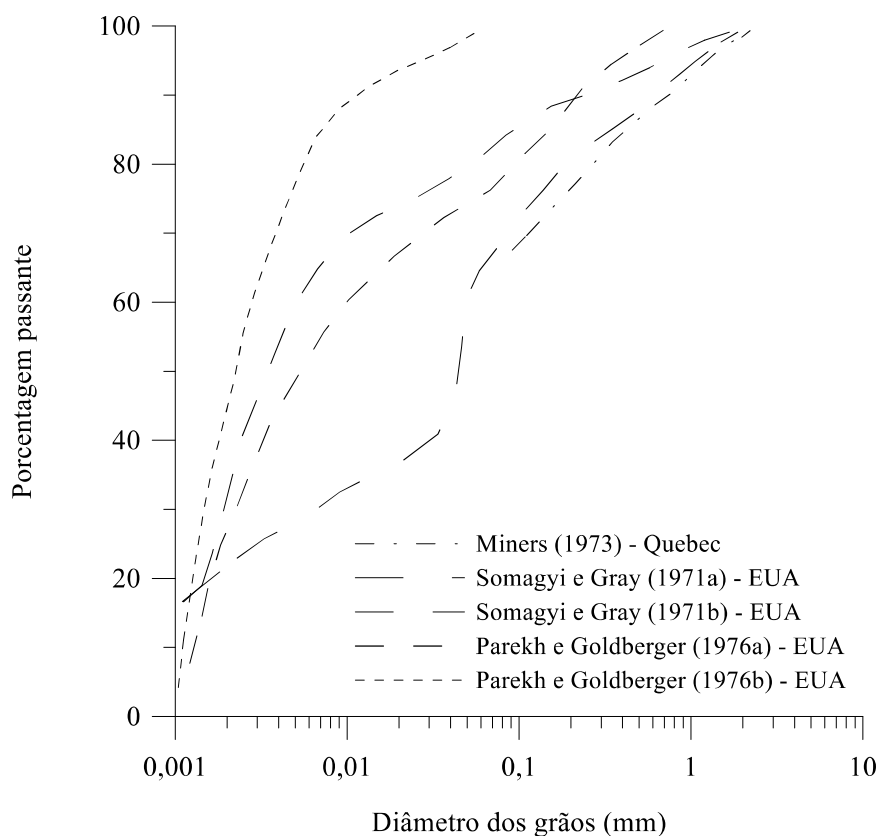


Figura 2.4: Faixa de variação granulométrica de rejeitos de mineração de bauxita (Adaptado de OBONI; OBONI, 2020)

A partir da análise da faixa de variação granulométrica do material estudado por Oboni e Oboni (2020), é possível constatar a existência de uma tendência de partículas majoritariamente com diâmetros de siltes. Partículas do tamanho de argilas e areias finas também são constatadas em menor quantidade.

A distribuição granulométrica de um rejeito de mineração pode ainda apresentar codependência com o grau de trituração e o teor de argila contido no minério de origem (SARSBY, 2013; SILVA FILHO; ALVES; MOTTA, 2007).

A maioria dos estudos realizados em rejeitos de bauxita são direcionados a materiais submetidos ao processo *Bayer*. Fora desse espectro, a literatura ainda é extremamente escassa. O estudo realizado por Rout *et al.* (2013) explorou as características granulométricas de um rejeito de bauxita, por meio do ensaio de sedimentação, e as comparou com dois materiais distintos (*i.e.* solo proveniente da jazida de extração e cinza volante). Os resultados de seu estudo são apresentados graficamente na Figura 2.5.

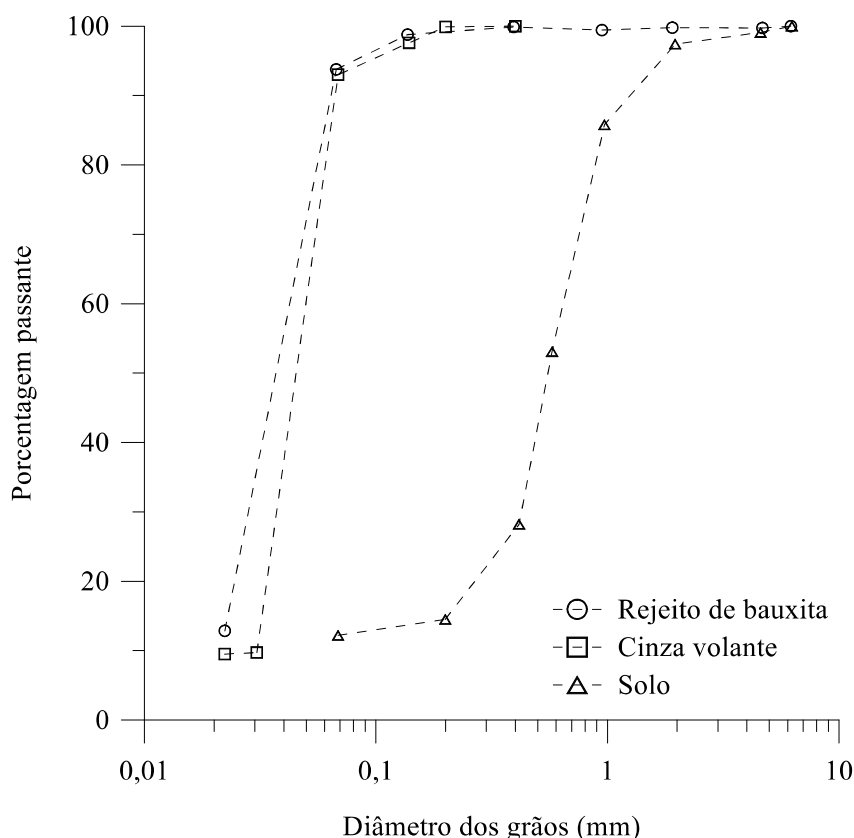


Figura 2.5: Distribuição granulométrica rejeito de bauxita (Adaptado de ROUT; SAHOO; DAS, 2013)

A realização do ensaio de distribuição granulométrica de solos finos, em consonância com normas nacionais e internacionais (NBR 7181 e ASTM D6913/D6913M-17), deve ser concebida por meio do ensaio de granulometria por sedimentação, com a utilização de um agente dispersor. Contudo, estudos realizados por Senft, Masala e Nik (2011) bem como por Jedari *et al.* (2017) fundamentaram a possibilidade da inferência de erros em ensaios de granulometria por sedimentação em rejeitos de mineração.

A porcentagem de partículas finas, parte majoritária de um rejeito de mineração, é afetada pelo método de ensaio escolhido para a realização da caracterização granulométrica. Ensaios por sedimentação, quando comparados à ensaios a *laser*, subestimam a parcela fina do material. De acordo com Senft, Masala, Nik (2011) e Jedari *et al.* (2017), a premissa supracitada fundamenta-se na aglutinação das partículas ocasionada pela interação química entre o agente dispersor e as partículas que compõem o material.

A simples análise da distribuição granulométrica permite a realização de hipóteses iniciais inerentes ao desempenho esperado do material (GORE, 2015). Todavia, o entendimento global

do comportamento de qualquer material deve fundamentar-se em uma caracterização completa (NATH; SAHOO; SAHOO, 2015).

Tratando-se do rejeito da bauxita, um material predominantemente fino, o comportamento esperado consiste em uma baixa plasticidade e condutividade hidráulica (GORDON; PINNOCK; MOORE, 1996). Além disso, a confluência dessas propriedades indica um material com baixa capacidade de drenagem, o que pode acarretar em problemas de estabilidade (LIU; POON, 2016).

### 2.2.1.2 Densidade dos grãos

O teor de sólidos dos rejeitos de mineração, lançados em barragens de rejeitos, normalmente varia de 15% a 30% em peso (ROUT; SAHOO; DAS, 2013). A densidade dos grãos (relação entre a quantia de matéria e volume) pode ser apenas aplicada a uma determinada faixa da barragem, devido à efeitos de segregação do material durante sua disposição (ALAM; DAS; RAO, 2019).

Diversos autores, datando desde a década de 1970 até os dias atuais, estudaram a densidade dos grãos de diferentes rejeitos de bauxita. A Tabela 2.6 sintetiza esse panorama temporal.

Tabela 2.6: Densidade de rejeitos de bauxita

Origem	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Autor
África	3,10	Parekh and Goldberger, 1976
África	2,89	Parekh and Goldberger, 1976
África	2,67	Parekh and Goldberger, 1976
Estados Unidos	2,65	Parekh and Goldberger, 1976
África	2,9-3,0	Stinson, 1981
Brasil	2,9	Melo e Silveira, 1991
Brasil	2,75-3,5	Bedin, 2006
Brasil	2,67	Pedrosa, 2012
Índia	3,34	Rout <i>et al.</i> , 2013
África	3,41	Gore, 2015
África	3,65	Gore, 2015
Brasil	3,06	Nierwinski, 2019
Índia	3,27-3,33	Alam <i>et al.</i> , 2019

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Ao comparar os valores de densidade encontrados na literatura para rejeitos de bauxita, se constata uma grande disparidade. Em consonância com Villar (2002), essa variabilidade se justifica principalmente pelos diferentes teores de ferro na composição química, mineralogia da rocha-mãe e, além disso, pelo processo produtivo.



### 2.2.1.3 Composição química

As características químicas de um material proveniente do processo de mineração de bauxita dependem diretamente da composição mineralógica, processamento e beneficiamento e da jazida de origem (WANG; LIU, 2012).

A Tabela 2.7 apresenta um panorama da composição química de rejeitos de bauxita provenientes de diversos países.

Tabela 2.7: Composição química de rejeitos de bauxita

Autor	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	MgO (%)	CaO (%)	K <sub>2</sub> O (%)
Piga <i>et al.</i> , 1995	31,60	25,30	13,20	7,70	12,10	-	7,70	-
Singh <i>et al.</i> , 1996	33,10	18,20	8,80	5,80	19,60	-	2,70	-
Koumanova <i>et al.</i> , 1997	48,40	26,60	5,50	-	2,80	0,90	1,20	-
Pera <i>et al.</i> , 1997	26,62	15,00	4,98	1,02	15,76	0,95	22,21	0,02
Altundogan <i>et al.</i> , 2002	36,94	20,39	15,74	10,10	4,98	-	2,23	-
Park <i>et al.</i> , 2002	16,60	23,70	22,90	11,60	6,70	-	6,70	-
Freitas, 2003	46,60	14,36	16,57	2,43	4,34	0,08	2,62	-
Díaz <i>et al.</i> , 2004	37,00	12,00	-	5,00	20,00	-	6,00	-
Halász <i>et al.</i> , 2005	33-48	16-18	9-15	8-12	4-6	0,3-1	0,5-3,5	-
Peng <i>et al.</i> , 2005	14,17	28,2	5,81	2,70	4,09	-	-	-
Wang <i>et al.</i> , 2005	60,00	15,00	5,00	16,00	5,00	-	-	-
Hildebrando <i>et al.</i> , 2006	40,20	19,10	19,90	9,01	3,07	0,04	1,23	0,12
Alam <i>et al.</i> , 2019	51,04	17,57	8,65	8,03	3,24	0,21	1,64	0,19
Alam <i>et al.</i> , 2019	35,54	16,80	15,63	13,56	7,73	0,10	1,24	0,06
Gupta <i>et al.</i> , 2019	22,56	13,05	7,56	2,13	1,96	-	3,13	0,83
Gupta <i>et al.</i> , 2019	24,21	7,63	6,03	0,93	1,34	-	2,64	0,75

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

De uma maneira geral se nota que os principais compostos que constituem o rejeito de bauxita (*i.e.*, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, MgO, CaO e K<sub>2</sub>O) são evidenciados na maioria dos estudos relatados. A heterogeneidade dos resultados analisados se alicerça na justificativa supracitada e apresentada por Wang e Liu (2012).

### 2.2.1.4 Limites de consistência

O conhecimento e a mensura dos limites de consistência são considerados relevantes na previsão de propriedades da engenharia (*e.g.* expansão, retração, resistência), bem como na identificação e classificação dos materiais (GORE *et al.*, 2016). A determinação desses índices se torna ainda mais imperativa quando o insumo em questão é considerado um rejeito de mineração (NIERWINSKI, 2019).

A Tabela 2.8 sintetiza os valores encontrados na literatura para os limites de consistência de rejeitos de bauxita de diferentes origens.

Tabela 2.8: Limites de *Atterberg* de rejeitos de bauxita

Origem	LL (%)	IP (%)	Autor
Brasil	43,2	13,2	Villar <i>et al.</i> , 2009
Brasil	57,4	25,5	Pedrosa, 2012
Índia	24,75	7,25	Rout <i>et al.</i> , 2013
África	44,0	11,0	Gore, 2015; Gore, 2016
Índia	41,0	5,0	Reddy e Rao, 2016; Reddy e Rao, 2018a; Reddy e Rao, 2018b
Brasil	38,0	3,0	Niewinski, 2019

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Na Tabela 2.8 pode-se observar que valores típicos para índices de consistência de rejeitos de bauxita não estabilizados, variam entre 25% a 60%, para o limite de liquidez, e 5% a 25% para o índice de plasticidade. Assim, o material é classifica-se como de baixa plasticidade.

#### 2.2.1.5 Compactação

A compactação pode ser geralmente definida como a densificação de um material, pela remoção do ar e rearranjo de suas partículas, por meio da adição de energia mecânica (PINTO, 2006). A energia exercida por esse processo força o material a preencher os vazios disponíveis, e com isso, as forças de atrito geradas melhoram as propriedades mecânicas do produto final.

De acordo com Lambe e Whitman (1979), os parâmetros que fazem alusão a compactação de um material (*i.e.* densidade e umidade ótima) são diretamente dependentes de três fatores principais: (i) a origem; (ii) a tipologia e (iii) a energia de compactação. A Tabela 2.9 apresenta uma síntese de estudos que buscaram compreender e quantificar as características de compactação de rejeitos de bauxita.

Tabela 2.9: Peso específico máximo e umidade rejeitos de bauxita

Rejeito de bauxita	Proctor energia normal		Proctor energia modificada		Autores
	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	U <sub>ótima</sub> (%)	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	U <sub>ótima</sub> (%)	
Secagem natural	14,2 - 14,8	30 - 32	16,3 - 16,8	25 - 26	Gore <i>et al.</i> , 2016
Secagem natural	14,7	34	16,1	19	Gore <i>et al.</i> , 2016
Secagem por pressão	15,5	30	17,4	24	Gore <i>et al.</i> , 2016
Secagem natural	12 - 16	33 - 45	17,8 - 18	21 - 23	Reddy <i>et al.</i> , 2016
Secagem natural	12,8 - 15,1	34 - 39	17,7 - 17,9	21 - 23	Reddy <i>et al.</i> , 2018

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Em consonância com a literatura supracitada, na Tabela 2.9 é notório que os parâmetros de compactação de rejeitos de mineração de bauxita são afetados pela energia mecânica aplicada. Em ensaios com energia normal, apesar de levemente dispersos, os valores de densidade e umidade ótima ficaram compreendidos em faixas de 12 kN/m<sup>3</sup> a 16 kN/m<sup>3</sup> e 30% a 45% respectivamente. Por outro lado, ensaios com energia modificada foram menos variáveis, com densidades oscilando entre 16,1 kN/m<sup>3</sup> e 17,19 kN/m<sup>3</sup> e umidades de 19% a 26%.

#### 2.2.1.6 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica faz alusão à diversos obstáculos cotidianos da prática de engenharia (e.g. drenagem superficial, rebaixamento do nível de água, cálculo de vazões, análise de recalques e estabilidade de taludes) e, portanto, é de extrema importância para a caracterização de um material (LAMBE; WHITMAN, 1979). Essa propriedade representa a capacidade que um material possui de permitir o escoamento de água em seus vazios e é determinada pelo parâmetro do coeficiente de condutividade hidráulica (k).

Referente a solos naturais, Fernandes (2016) afirma que são encontradas cerca de oito grandezas distintas para esse parâmetro, ou seja, a condutividade hidráulica apresenta-se como uma das propriedades com maior faixa de variação de valores e dificuldade de generalização. Sua grandeza depende de diversos fatores, como: (i) distribuição granulométrica; (ii) índice de vazios; (iii) temperatura; (iv) estrutura do solo; (v) composição mineralógica; (vi) grau de saturação e (vii) estratificação do terreno.

Em consonância Oboni e Oboni (2020), rejeitos de mineração apresentam variações de coeficientes de condutividade hidráulica na faixa de 10<sup>-4</sup> (para materiais arenosos grosseiros) a 10<sup>-10</sup> m/s (para lamas bem consolidadas de alta plasticidade). O aumento do teor de finos, plasticidade e profundidade do depósito diminuem gradativamente o coeficiente de condutividade hidráulica. Na Tabela 2.10 pode-se observar a variação dessa propriedade, conforme as características do material.

Tabela 2.10: Coeficiente de condutividade hidráulica rejeitos de mineração

Características do rejeito	Condutividade hidráulica (m/s)
Arenoso grosso, limpo, menos de 15% de finos	10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-5</sup>
Arenoso próximo dos pontos de despejo, mais de 30% de finos	10 <sup>-5</sup> a 5x10 <sup>-6</sup>
Baixa plasticidade ou não plástico	10 <sup>-7</sup> a 5x10 <sup>-9</sup>
Alta plasticidade	10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-10</sup>

Fonte: Adaptado de Oboni e Oboni (2020)

O coeficiente de condutividade hidráulica de rejeitos de mineração também é afetado pelo mecanismo de disposição dos insumos e a segregação das partículas. De acordo com Oboni e Oboni (2020), materiais de alta permeabilidade se concentram nas proximidades do ponto de descarga, seguidos de uma zona de transição entre materiais grosseiros e finos e por fim se encontram os materiais majoritariamente finos. Nessas condições, as faixas de concentração de materiais mais grosseiros terão um coeficiente de condutividade hidráulica maior, reduzindo gradativamente até a área dos materiais finos.

De uma maneira geral, os rejeitos de mineração apresentam um coeficiente de condutividade hidráulica intermediário (SCHNAID; LEHANE; FAHEY, 2004). A Figura 2.6 expõe os valores dessa propriedade para diferentes rejeitos de mineração.

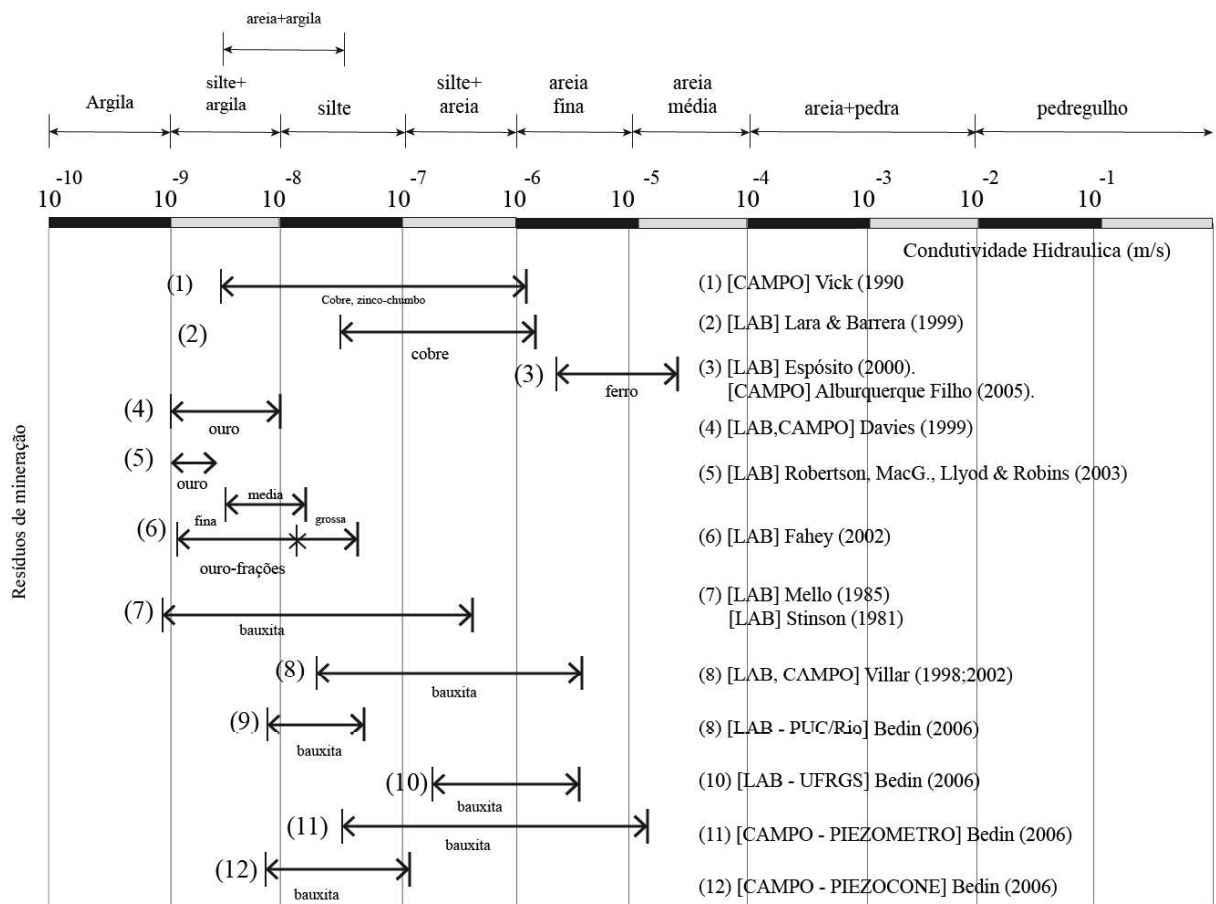


Figura 2.6: Valores típicos de coeficiente de condutividade hidráulica de rejeitos de mineração (Adaptado de BEDIN; SCHNAID, 2010)

Por se tratarem de materiais com um comportamento intermediário (BEDIN; SCHNAID, 2010) a interpretação de ensaios em rejeitos de mineração, adotando-se condições totalmente drenadas ou condições não-drenadas, podem não retratar adequadamente o comportamento do material

em questão (KLAHOLD, 2013; NIERWINSKI, 2019; SCHNAID *et al.*, 2016; SCHNAID; LEHANE; FAHEY, 2004; SOSNOSKI, 2016).

#### 2.2.1.7 Compressibilidade e adensamento

A propriedade de compressibilidade de um material está relacionada à redução de seu volume sob a aplicação de um esforço externo. Essa redução é resultado de um fenômeno de compactação (eliminação de ar dos vazios) ou de adensamento (drenagem da água dos vazios) (TERZAGHI, 1943).

Materiais provenientes de barragens de rejeitos se propendem à uma compressibilidade superior quando comparados à materiais naturais de mesmas características. Essa premissa é justificada com base na interferência gerada pelo procedimento de disposição dos rejeitos, que resulta em materiais de baixa densidade e alta angularidade de grãos (BEDIN; SCHNAID, 2007, 2010).

A interpretação da curva de adensamento para rejeitos de mineração é de dificuldade substancial, pois o trecho de recompressão e reta virgem do material não apresentam uma clara distinção, como no caso de argilas (OBONI; OBONI, 2020). Quando se analisa rejeitos arenosos, se constata uma ampla curvatura como resposta ao ensaio, exigindo que os valores de  $c_c$ , nesses casos, sejam acompanhados dos níveis de tensões para os quais foram determinados.

Os valores usuais para parâmetros de compressibilidade de rejeitos de mineração variam de acordo com a tipologia do material estudado. Oboni e Oboni (2020) afirmam que o parâmetro  $c_c$  está contido em uma faixa de 0,05 a 0,1, para materiais arenosos, e 0,20 a 0,6 para materiais de granulometria fina. Por outro lado, os valores de  $c_v$  são da ordem de  $5 \times 10^{-1}$  e  $10^{-2}$   $\text{cm}^2/\text{s}$  para materiais com propriedades arenosa e  $10^{-2}$  a  $10^{-7}$   $\text{cm}^2/\text{s}$  para os rejeitos de granulometria fina. A Tabela 2.11 sintetiza os parâmetros de compressibilidade de rejeitos de bauxita encontrados na literatura.

Tabela 2.11: Parâmetros de compressibilidade rejeitos de bauxita

Origem	Método aplicado	$c_c$	$c_v$	Autor
África	Tensão controlada	-	$1,6 \times 10^{-3}$ a $9,5 \times 10^{-4}$	Stinson, 1981
Austrália	Tensão controlada	-	$1,6 \times 10^{-3}$ a $9,5 \times 10^{-6}$	Stinson, 1981
Brasil	Tensão controlada	-	$1,6 \times 10^{-3}$ a $9,5 \times 10^{-7}$	Stinson, 1981
Brasil	Adensamento convencional	-	$7 \times 10^{-3}$ a $8 \times 10^{-3}$	Bedin, 2006
Brasil	Oedômetro	-	$7 \times 10^{-3}$ a $2,1 \times 10^{-2}$	Bedin, 2006
Brasil	Oedômetro	-	$10^{-3}$ a $2 \times 10^{-3}$	Bedin, 2006
África	Oedométrico convencional	0,56	-	Gore, 2015
África	Oedométrico convencional	0,36	-	Gore, 2015

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

No lançamento dos rejeitos, constituídos de grande porcentagem de partículas finas e elevado teor de umidade, inicia-se um processo de deposição que envolve sedimentação em conjunto com o adensamento por peso próprio do material, resultando em grandes deformações (SCHNAID *et al.*, 2015). Logo, o conhecimento das leis de compressibilidade e permeabilidade é de extrema importância para a resolução de problemas inerentes a geotecnia (BEDIN; SCHNAID, 2007).

#### 2.2.1.8 Resistência ao cisalhamento

A maior parcela de resistência ao cisalhamento de um solo é consequência do atrito entre as partículas do material, resistência essa, contida em um parâmetro conhecido como ângulo de atrito (LAMBE; WHITMAN, 1979; SOUZA PINTO, 2006). Esse ângulo é dependente da força normal aplicada e consiste no máximo ângulo que a componente tangencial pode exercer em relação à força normal ao plano, sem que ocorra o deslizamento.

Em adição à resistência gerada em função do atrito entre as partículas, alguns solos apresentam um componente de resistência em virtude da coesão (*i.e.* resistência que independe das tensões normais aplicadas, gerada apenas pela atração química entre as partículas) (LAMBE; WHITMAN, 1979). Em níveis de tensões similares, rejeitos de mineração tendem a apresentar ângulos de atrito efetivos maiores que solos naturais.

A Tabela 2.12 apresenta alguns valores de parâmetros de resistência encontrados na literatura para rejeitos de mineração de bauxita.

Tabela 2.12: Parâmetro de resistência para rejeitos de bauxita

Origem	Informações	$\phi$ (°)	$c'$ (kPa)	Autor
Inglaterra	Triaxial consolidado não-drenado	42,00	-	Newson <i>et al.</i> , 2006
Índia	Triaxial consolidado não-drenado	34,38	28,80	Rout <i>et al.</i> , 2013
Brasil	Triaxial consolidado não-drenado	35,00	-	Schnaid <i>et al.</i> , 2014
Espanha	Triaxial consolidado não-drenado	38,00	79,15	Rubinos <i>et al.</i> , 2015
África	Triaxial consolidado não-drenado	33,50	11,72	Gore, 2015
África	Triaxial consolidado não-drenado	39,40	9,65	Gore, 2015

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Os valores típicos do ângulo de atrito dos rejeitos de mineração estão compreendidos na faixa de 30 a 40 graus, sendo que o fator que mais afeta este parâmetro é o nível de tensões analisado (SCHNAID *et al.*, 2015).

Com base no conhecimento pleno das propriedades geotécnicas de um material e de seu comportamento, aplicações tecnológicas diretas podem ser concebidas. A subseção seguinte apresenta os possíveis empregos, no âmbito da engenharia, para o rejeito de bauxita.

### 2.2.2 Aplicações geotécnicas

A reutilização do rejeito de bauxita vem sendo estudada desde a década de 90, com extensas pesquisas, normalmente, compreendidas em quatro categorias distintas: (i) extração de componentes do rejeito; (ii) uso do rejeito para uma característica específica (*e.g.* coloração de outros materiais); (iii) uso do rejeito como um material de construção e (iv) uso do rejeito como material impermeável para cobertura de aterros.

A Tabela 2.13 apresenta um compêndio dos diversos estudos inerentes às possíveis formas de reaproveitamento/valorização do rejeito de bauxita em aplicações na engenharia civil.

Tabela 2.13: Produção de novos insumos a partir do rejeitos de bauxita

Aplicação	Autores
Cobertura de aterros	Snars; Gilkes, 2009
Extração de coagulantes alumino-férricos	Ma <i>et al.</i> , 2014
Extração de metais raros	Liu e Naidu, 2014
Material de preenchimento	Santini, 2015
Produção de asfalto	Zhang <i>et al.</i> , 2018
Produção de argamassas	Sutar <i>et al.</i> , 2016
Produção de clínquer	Singh <i>et al.</i> , 1996; Gordon <i>et al.</i> , 1996; Agatzini-Leonardou <i>et al.</i> , 2008; Martins <i>et al.</i> , 2008
Produção de colorantes	Pera <i>et al.</i> , 1997
Produção de concretos autonivelantes	Liu e Poon, 2016
Produção de materiais cerâmicos	Sglavo <i>et al.</i> , 2000; Yang; Xiao, 2008; Yang <i>et al.</i> , 2009;
Produção de pozolanas	Martins <i>et al.</i> , 2008;

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

A crescente conscientização pública com os conceitos da sustentabilidade é um incentivo para o estabelecimento de práticas alternativas que prescrevem o uso do rejeito de bauxita (ALAM; DAS; RAO, 2019). De acordo com os dados apresentados na Tabela 2.13, se constata uma ampla gama de aplicações, mais ou menos sistemáticas, para a reutilização desse material. Essas aplicações, geram efeitos benéficos significativos no âmbito sustentável, em especial para as indústrias de produção de alumínio.

Na construção civil, a utilização de resíduos oriundos de outros setores da economia é vantajosa não apenas em virtude da alta disponibilidade de subprodutos industriais, mas, sobretudo, devido à redução do consumo de matérias-primas não renováveis, tão necessárias às atividades

da construção civil convencional (MAGALHÃES; DANILEVICZ; SAURIN, 2017; SORMUNEN; KÄRKI, 2019).

Após a exposição das características comportamentais inerentes aos rejeitos de mineração de bauxita *in natura*, a subseção seguinte busca entender o método de estabilização química aplicado à materiais de origem geotécnica, cujo comportamento permeia a classificação argilosa.

## 2.3 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE MATERIAIS GEOTÉCNICOS ARGILOSOS

De maneira a entender sumariamente o processo de estabilização química do solo, quatro reações químicas, que ocorrem entre o aglomerante e o solo, devem ser mencionadas; sendo elas: (i) troca catiônica; (ii) aglomeração/floculação; (iii) hidratação e (iv) reações pozolânicas; (ROGERS; GLENDINNING, 2000). Cada uma destas etapas é explicada nas subseções porvindouras.

### 2.3.1 Troca catiônica

O fenômeno de troca catiônica consiste na interação entre íons de cálcio, liberados por meio da adição de um agente aglomerante na massa de solo, e íons metálicos provenientes da estrutura argilosa do material. Esse processo gera diversas mudanças físico-mecânicas na estrutura do solo e pode se estender por algumas horas (ROGERS; GLENDINNING, 1996, 2000, FITZPATRICK *et al.*, 1994).

A redução do espaçamento da dupla camada elétrica das partículas de argila, se apresenta como uma das primeiras alterações evidenciadas (FITZPATRICK *et al.*, 1994). O arranjo físico das partículas de argila determina o tamanho da dupla camada elétrica; arranjos paralelos permitem a formação de envoltórias maiores. Ainda, uma redução na espessura da dupla camada elétrica resulta em partículas de argila menos propensas à adição de água (ROGERS; GLENDINNING, 1996).

Conforme Rogers e Glendinning (2000), a segunda mudança evidenciada se apresenta no processo de aglomeração, no qual as forças de *van der Waals* superam a repulsão das partículas argilosas negativamente carregadas, resultando na aproximação e consequente redução da espessura da camada de água adsorvida, como ilustrado na Figura 2.7.



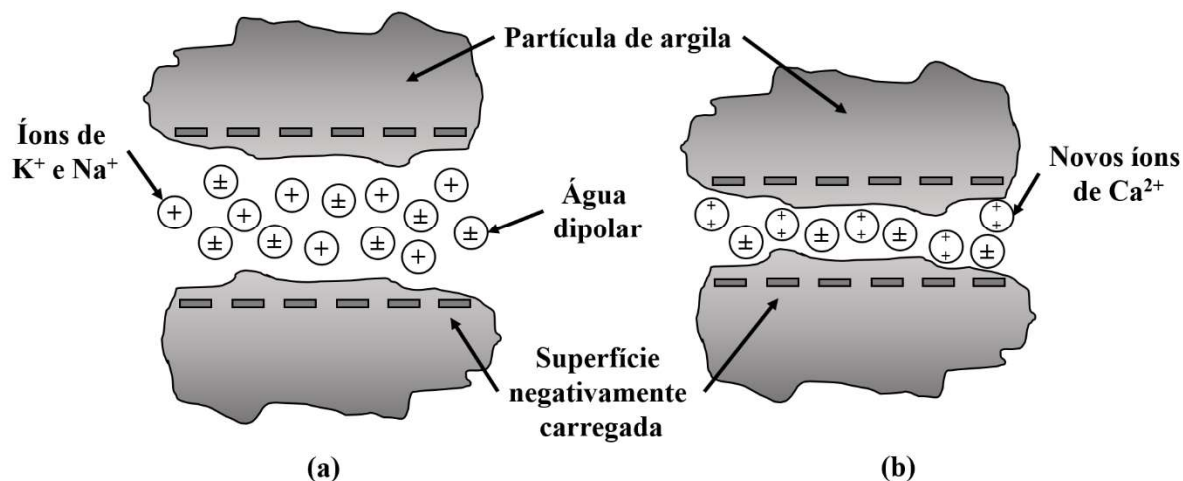


Figura 2.7: Troca catiônica: (a) pré-troca catiônica; (b) pós-troca catiônica  
(Adaptado de ROGERS; GLENDINNING, 1996)

Essas alterações modificam a textura e resistência da massa de solo, com uma transição de uma argila plástica para um solo mais granular, caracterizado por um menor índice de plasticidade. Isso resulta em um aumento no ângulo de atrito e na resistência ao cisalhamento (BURRIS *et al.*, 2015).

Alguns dos cátions mais comuns envolvidos na troca catiônica incluem alumínio, cálcio, magnésio, potássio, sódio e hidrogênio. O potencial de adsorção de um cátion é influenciado pela valência e pelo peso atômico, por conseguinte, quanto mais altos esses valores, maior o nível de adsorção (ROGERS; GLENDINNING, 1996).

### 2.3.2 Aglomeração

Assim como com a troca catiônica, a aglomeração ocorre imediatamente após a mistura, envolvendo a reestruturação das partículas de argila com carga negativa, que são cercadas por uma camada de cátions. A espessura dessa camada é diretamente dependente do nível de carga; quanto maior a carga, mais espessa a camada (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD - NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1987).

Inicialmente, as partículas de argila apresentam grande dispersão, com um arranjo paralelo, devido à carga superficial negativa e a camada de cátions com carga positiva (responsável pela repulsão). Essa repulsão pode ser superada pelas forças de *van der Waals*, fazendo com que as partículas floculem e deem uma nova orientação ao arranjo, conforme representado na Figura 2.8 (FITZPATRICK *et al.*, 1994).

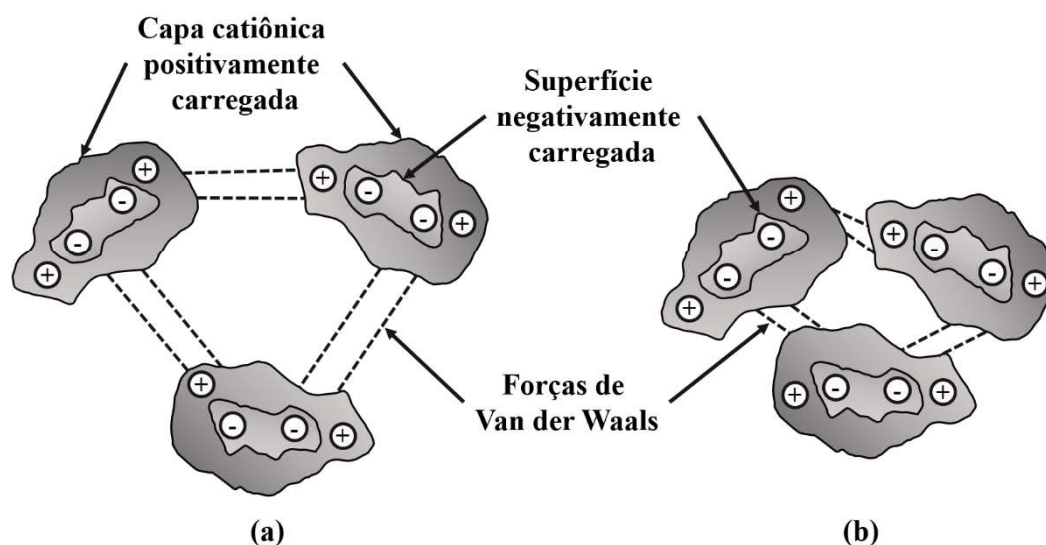


Figura 2.8: Estado do solo (a) pré aglomeração e (b) pós aglomeração (Adaptado de FITZPATRICK *et al.*, 1994)

Os aglomerantes são classificados em duas categorias distintas, favoráveis e desfavoráveis. Os favoráveis apresentam íons com raios hidratados maiores e valências mais altas (*i.e.* cálcio e magnésio); os desfavoráveis, por outro lado, incluem íons com raios hidratados menores e valências mais baixas (*i.e.* sódio e potássio) (DIAMOND; KINTER, 1965).

O processo de floculação gera uma melhora significativa nas características físicas, químicas e mecânicas, especificamente aumentando a resistência ao cisalhamento e provendo uma textura granular ao material (HERRIN, 1961).

### 2.3.3 Hidratação

O processo de hidratação tradicional tem início frente à mistura de água com um agente cimentante (*e.g.* cal, cimento) e, esse processo, pode ocorrer por até um mês (FITZPATRICK *et al.*, 1994). Após a mistura, o conteúdo de água do solo diminui gradativamente à medida que a água é consumida na hidratação. Esse processo de secagem é essencial no melhoramento de solos moles com alto teor de umidade.

De acordo com Herzog *et al.* (1963), o teor de umidade do solo deve ser suficientemente alto para que o material cimentante possa reagir completamente. Além disso, deve-se constatar uma quantidade de água suficiente (posterior a evaporação gerada ao processo exotérmico de hidratação), para garantir que a troca iônica ocorra entre os íons cálcio da cal hidratada e os íons alcalinos dos minerais da argila (AYTEKIN; NAS, 1998).

O produto da reação de óxido de cálcio se dissocia na água da mistura, o que aumenta a concentração eletrolítica e o pH, dissolvendo os compostos de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) provenientes das partículas de argila. Isso desencadeia coletivamente a troca iônica, a aglomeração e as reações pozolânicas (BERGADO, D.T; ANDERSON, L.R; MIURA, N; BALASUBRAMANIAM, 1996).

Dois fenômenos básicos estão envolvidos no processo de hidratação: (i) mecanismo de solução e (ii) mecanismo topoquímico. O mecanismo de solução envolve a dissolução de compostos anidros em relação aos seus constituintes iônicos, a formação de hidratos na solução e, finalmente, a precipitação devido à baixa solubilidade (BURRIS *et al.*, 2015). Por sua vez, o mecanismo topoquímico (*i.e.*, hidratação no estado sólido) envolve reações que ocorrem nas superfícies de compostos de cimento anidro, enquanto não entram em solução (BURRIS *et al.*, 2015).

A partir de uma mistura de água, agente cimentante e uma massa de solo, quatro etapas são constatadas: (i) dissolução das partículas do agente cimentante; (ii) aumento nos níveis de concentração iônica da água; (iii) dissolução dos compostos na solução aquosa e (iv) precipitação dos compostos como produtos de hidratação sólidos (AYTEKIN; NAS, 1998).

A resistência gerada pelo cimento é atribuída à existência de quatro compostos principais em sua composição, dois à base de silicatos (*i.e.* silicato tricálcico, silicato dicálcico) e dois à base de aluminatos (*i.e.* aluminato tricálcico, ferroaluminato tetracálcico) (BURRIS *et al.*, 2015).

O silicato tricálcico (C3S) apresenta a hidratação e endurecimento de forma rápida (até três horas após a mistura) e é responsável por ganhos iniciais de resistência. Por outro lado, a hidratação e endurecimento, do silicato dicálcico (C2S), ocorre de forma mais lenta (uma a duas semanas após a mistura) (AYTEKIN; NAS, 1998; BERGADO, D.T; ANDERSON, L.R; MIURA, N; BALASUBRAMANIAM, 1996).

O aluminato tricálcico (C3A) libera quantidades de calor durante os primeiros dois dias de cura e é responsável pelo desenvolvimento inicial de resistência. Já o ferroaluminato tetracálcico (C4AF) se hidrata rapidamente e diminui a temperatura do clínquer, contribuindo muito pouco para o desenvolvimento de resistência (BERGADO, ANDERSON, MIURA, BALASUBRAMANIAM, 1996).

Os quatro compostos supracitados são de extrema importância para proporcionar ganhos de resistência. Imediatamente após a mistura, o cimento se hidrata e gera produtos cimentícios primários, ou produtos de hidratação principais, sendo eles silicatos e aluminatos de cálcio

hidratados (*i.e.*  $C_2SH_x$ ,  $C_3S_2H_x$ ,  $C_3AH_x$  e  $C_4AH_x$ ) (AYTEKIN; NAS, 1998; BURRIS *et al.*, 2015).

O esqueleto de solo-cimento é gerado durante o processo de endurecimento, por meio de ligações entre as partículas adjacentes de cimento e os grãos de solo não perturbados (BURRIS *et al.*, 2015). A Figura 2.9 expõe o processo de formação dos compostos de C-S-H e hidratos de cálcio, a partir da hidratação do C3S e C2S.

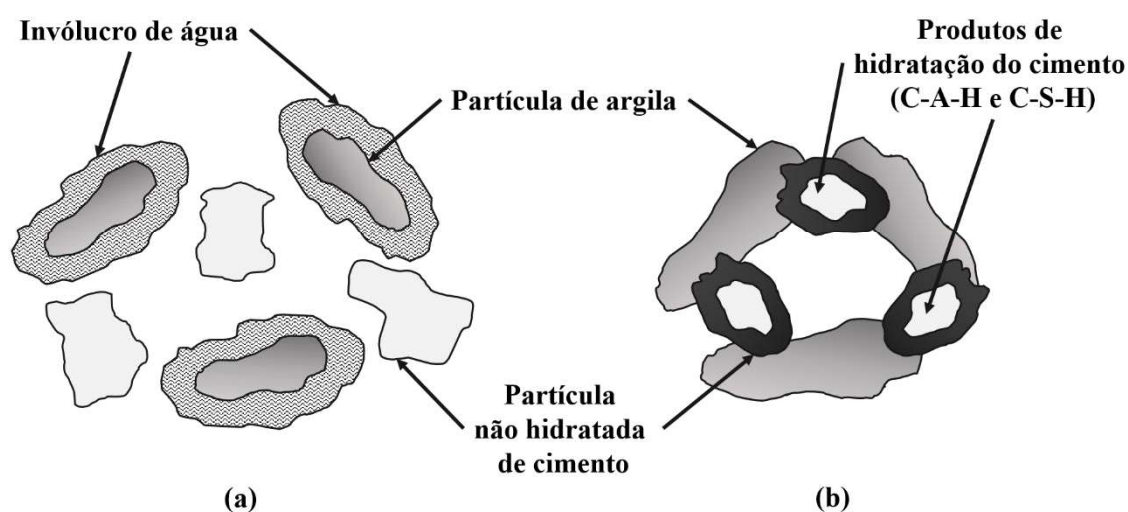


Figura 2.9: Estado típico de um solo com adição de agente cimentício (a) pré hidratação e (b) após a cura (Adaptado de FITZPATRICK *et al.*, 1994)

A temperatura possui uma drástica influência sobre o grau de hidratação das reações químicas. Os géis C-S-H não são plenamente compreendidos referente a sua composição mineralógica, pois apresentam uma grande alternância variando de amorfos à fracamente cristalinos (BURRIS *et al.*, 2015; HERRIN, 1961).

Destaca-se que os graus de hidratação, das quatro fases processuais supramencionadas, podem variar entre si significativamente e dependem da composição do agente cimentício aplicado. Ademais, como consequência direta da dissociação da cal hidratada, o processo de hidratação leva à um aumento do pH da mistura (BERGADO, D.T; ANDERSON, L.R; MIURA, N; BALASUBRAMANIAM, 1996).

### 2.3.4 Reações pozolânicas

As reações pozolânicas são processos que ocorrem perante à longas escalas de tempo (DUXSON *et al.*, 2007). Fitzpatrick *et al.* (1994) defendem que esse processo pode durar meses ou até mesmo anos. Seu principal mecanismo consiste no transporte do hidróxido de cálcio, por

intermédio da água, visando a reação com os aluminatos e ou silicatos presentes nos minerais de argila (ZHANG *et al.*, 2013).

Os íons dissolvidos no solo (*e.g.*  $\text{Ca}^{2+}$ ) reagem com o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) das partículas de argila para a produção dos géis de C-S-H e C-A-H, que possuem a capacidade de cimentar as partículas, como exposto na Figura 2.10 (DUXSON; LUKEY; VAN DEVENTER, 2007).

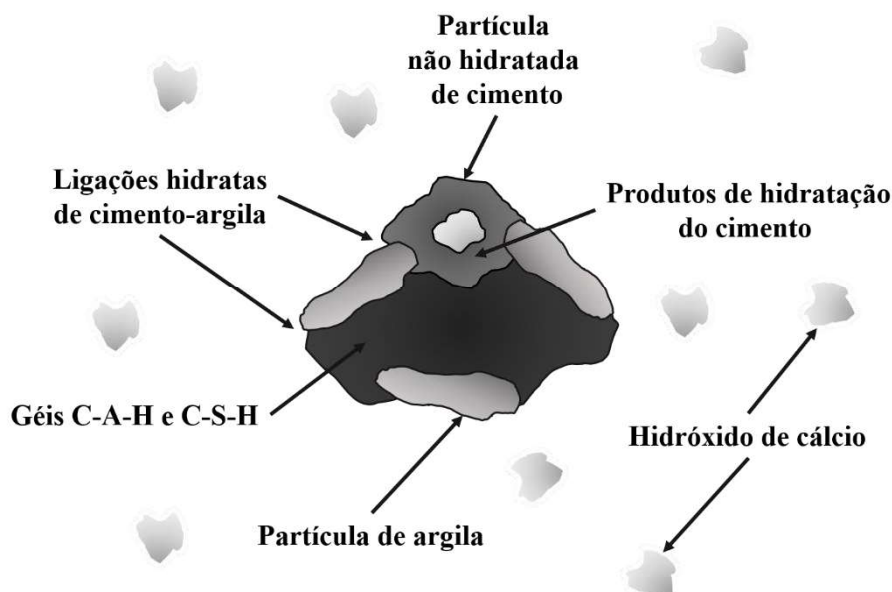


Figura 2.10: Produtos das ligações cimentícias formados durante a hidratação (Adaptado de DUXSON *et al.*, 2007)

As reações pozolânicas geradas consomem uma parcela do montante total de água presente no solo (AYTEKIN; NAS, 1998). A partir desse fenômeno, o material torna-se mais rígido e menos suscetível à retração e expansão, bem como mais resistente a dissolução e à erosão (WILKINSON; HAQUE; KODIKARA, 2010).

A partir da assimilação integral do funcionamento dos mecanismos básicos da estabilização química de solos é possível realizar análises multifacetadas, escrutinando particularidades inerentes a: (i) adição de cal; (ii) tempo de cura; (iii) temperatura de cura; (iv) porosidade da mistura e (v) relação da porosidade e teor de agente aglomerante.

#### 2.3.4.1 Efeitos inerentes à adição de cal

De forma isolada ou em combinação com outros materiais, a cal pode ser utilizada para estabilizar diferentes tipos de solo. As propriedades mineralógicas desses materiais determinam

seu grau de reatividade com a cal e a resistência máxima que a mistura estabilizada apresentará (SAID; TAIB, 2009).

Em geral, solos com granulometrias finas (*i.e.* mínimo 25% de material passante na peneira de 74 mm) são considerados bons candidatos à estabilização exclusiva com cal. Solos contendo quantidades significativas de material orgânico (superior a 1%) ou sulfatados (superior a 0,3%) podem exigir procedimentos e materiais especiais para a estabilização (BALDOVINO *et al.*, 2018).

As propriedades de um solo normalmente são afetadas de uma maneira favorável a partir da estabilização com cal. Isso é refletido por meio da análise de algumas características físicas, sendo elas: (i) compactação; (ii) condutividade hidráulica; (iii) contração e retração; (iv) distribuição granulométrica; (v) durabilidade; (vi) limites de consistência; (vii) peso específico e (viii) resistência ao cisalhamento (AYTEKIN; NAS, 1998).

Consoli *et al.* (2001) analisaram um solo arenoso estabilizado com cal de carbureto e cinza volante e concluíram que essa adição aumenta não somente a resistência, como também diminui a deformabilidade. Além disso, verificaram que solos arenosos, frente à estabilização somente com cal, não apresentam reações secundárias e necessitam de um agente fornecedor de sílica amorfa (*e.g.* cinza volante) para que essas reações ocorram.

Perante condições apropriadas de hidratação, em conjuntura com uma quantia suficiente de cal reativa e pozolana disponível, há a ocorrência de reações pozolânicas, resultando na cimentação do material estabilizado (BROMS, 1991).

Destaca-se ainda que, em um composto de solo majoritariamente argiloso, a cal apresenta a possibilidade de reação tanto com o material pozolânico quanto com os argilominerais do solo. Isso resulta em reações mais rápidas devido à presença imediata dos materiais reagentes (*i.e.* silicatos e aluminatos) (AMPERA; AYDOGMUS, 2005).

Por fim, as premissas supramencionadas são corroboradas por meio de inúmeros estudos realizados em diferentes localidades (AKINWUMI *et al.*, 2019; BALDOVINO *et al.*, 2018; CONSOLI; ROSA; SALDANHA, 2011; CONSOLI; SAMANIEGO; VILLALBA, 2016; DIAMBRA *et al.*, 2017; JHA; SIVAPULLAIAH, 2018).

#### 2.3.4.2 Efeitos inerentes ao tempo de cura

O tempo de cura de uma mistura de solo estabilizada quimicamente, influencia severamente nos parâmetros de resistência de um material. Devido à natureza das reações pozolânicas

existentes, maiores tempos de cura possibilitam a formação integral dos géis C-S-H e C-A-H, o que resulta em uma melhora progressiva das propriedades mecânicas (SAID; TAIB, 2009).

Entretanto, o aumento de resistência frente à evolução do tempo apresenta um limite dependente da disponibilidade de hidróxido de cálcio, sílica e alumina, além de exigir condições mínimas de hidratação (ROSA, 2009).

Diversos autores estudaram a influência do tempo de cura na resposta de resistência mecânica em materiais estabilizados (CONSOLI; SAMANIEGO; VILLALBA, 2016; MARÍN, 2017; ROSA, 2009; THOMÉ, 1994). De maneira geral, os autores verificaram que, durante os primeiros trinta dias de cura das amostras estabilizadas, ocorre um aumento mais pronunciado nos valores de resistência. Com o passar do tempo, constata-se uma redução gradativa desse acréscimo até que seja atingido um patamar de estabilização das reações, no qual a resistência não apresenta mais variação.

#### 2.3.4.3 Efeitos inerentes à temperatura de cura

A hidratação da cal, gerada a partir das reações pozolânicas, apresenta um comportamento exotérmico (*i.e.* reações que possuem um balanço negativo de energia quando se compara a entalpia total dos reagentes com a dos produtos) e, espera-se que quanto maior a temperatura de cura, maior será a resistência atingida pelo material (THOMPSON, 1965).

Diversos autores estudaram o efeito da temperatura de cura frente à resistência mecânica de amostras de solo estabilizadas quimicamente (MATEOS, 1961; SALDANHA, 2014; SILVANI, 2013; THOMPSON, 1965). De maneira geral, os autores evidenciaram uma faixa ótima de temperatura, onde a atividade pozolânica (consumo de hidróxido de cálcio) é intensificada, resultando em maiores valores de resistência. Essa faixa ótima de temperatura encontrava-se acima da temperatura ambiente de 23°C. Apesar do aumento de temperatura gerar um aumento na resistência, esse acréscimo é limitado pela faixa ótima de temperatura para a tipologia específica de cada material.

#### 2.3.4.4 Efeitos inerentes à porosidade da mistura

O aumento na compactação de solos estabilizados visa incrementar o contato entre os grãos, reduzir o volume de vazios, gerar um sistema mais homogêneo, aumentar a resistência mecânica e reduzir a compressibilidade e a permeabilidade da mistura (LAMBE; WHITMAN, 1979).

Nessa conjuntura, a propriedade de compacidade pode ser refletida por meio do parâmetro de porosidade. Quando relacionado à resistência mecânica de um material estabilizado, uma tendência aproximadamente linear pode ser evidenciada (CONSOLI *et al.*, 2009). Essa predisposição é elucidada na Figura 2.11.

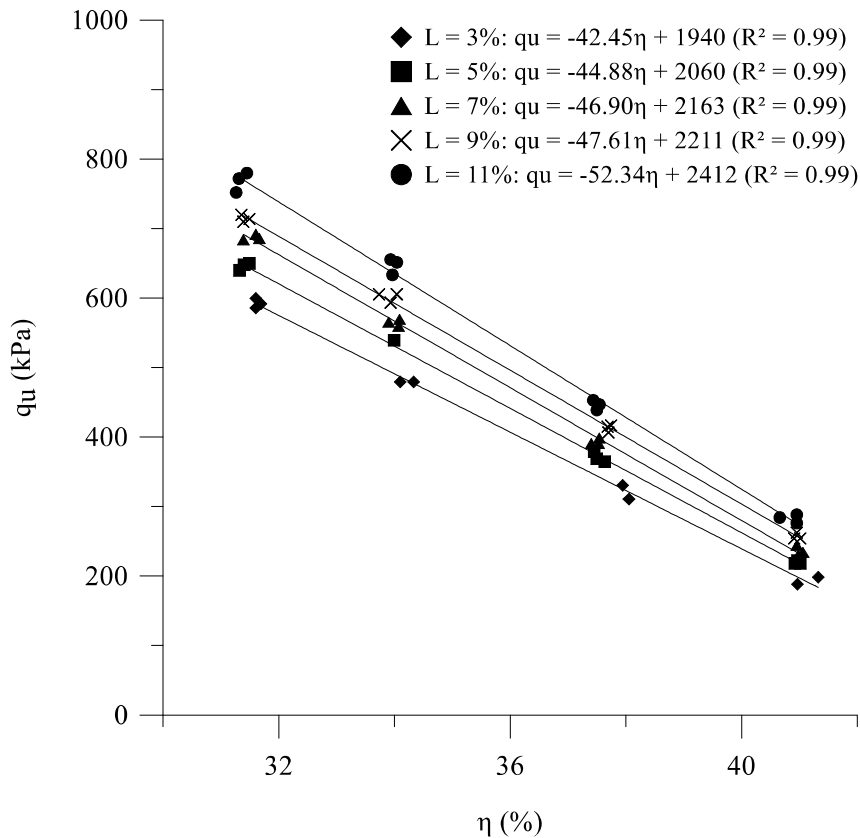


Figura 2.11: Variação da resistência a compressão não confinada com a porosidade (Adaptado de CONSOLI *et al.*, 2009)

Destaca-se ainda, que o aumento do peso específico aparente seco é contemporizado na literatura como um dos agentes produtores de incremento na resistência mecânica de misturas de solo estabilizadas (AKINWUMI *et al.*, 2019; CONSOLI; TOMASI, 2018; DIAMBRA *et al.*, 2017; JHA; SIVAPULLAIAH, 2018; LIU *et al.*, 2018).

#### 2.3.4.5 Efeitos inerentes à relação porosidade e teor volumétrico de aglomerante

Foppa (2005) e Consoli *et al.* (2007) estudaram os fatores de maior influência no comportamento de solos artificialmente cimentados. A partir de seus estudos, apresentaram uma metodologia de dosagem racional alicerçada na relação entre o volume de vazios ( $V_v$ ) e o volume de cimento ( $V_c$ ), expressa pela Equação (2.1).



$$\frac{V_v}{V_c} = \frac{V_v/V_{\text{total}}}{V_c/V_{\text{total}}} = \frac{\eta}{C_{iv}} \quad (2.1)$$

A Figura 2.12 demonstra que o parâmetro de resistência à compressão simples ( $q_u$ ) apresenta uma relação do tipo potência com a relação da porosidade e teor volumétrico de agente cimentício ( $\eta/C_{iv}$ ) (CONSOLI *et al.*, 2007).

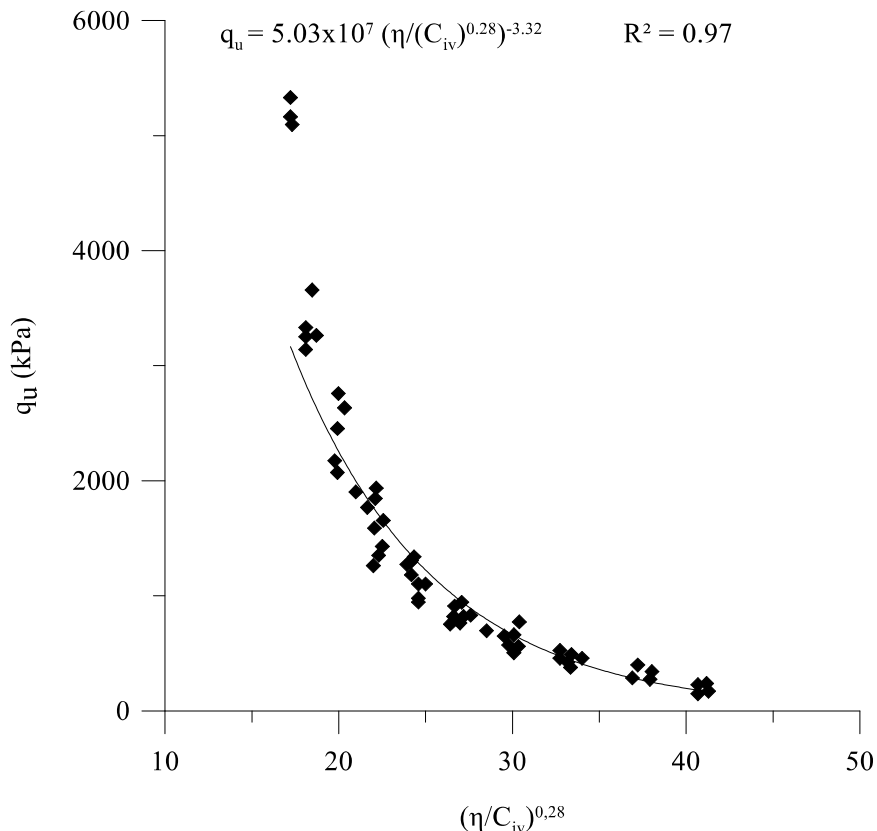


Figura 2.12: Variação da resistência a compressão simples com a porosidade e teor volumétrico de cimento (CONSOLI *et al.*, 2007)

O expoente aplicado na relação supramencionada tem o objetivo de compatibilizar os efeitos da porosidade e do teor de cimento sobre a variável reposita. Posteriormente, além do comportamento mecânico ligado à resistência, foi demonstrada a eficácia da relação  $\eta/(C_{iv})^k$  em descrever outros parâmetros comportamentais de materiais artificialmente cimentados, como rigidez inicial (CONSOLI *et al.*, 2017a, 2018b) e durabilidade (CONSOLI *et al.*, 2017b).

Uma relação correlata à apresentada por Foppa (2005) e Consoli *et al.* (2007) foi criada por Consoli *et al.* (2009). Nessa relação o teor volumétrico de cimento ( $C_{iv}$ ) é substituído pelo teor volumétrico de cal ( $L_{iv}$ ).

As mesmas relações comportamentais encontradas para o parâmetro  $\eta/(C_{iv})^k$  foram apresentadas pelo índice  $\eta/(L_{iv})^k$ . Ou seja, o mesmo deve ser ajustado com um expoente  $k$  a fim

de que haja a compatibilização entre os efeitos da porosidade e do teor de agente cimentante. Essa mesma relação foi utilizada de maneira satisfatória em outras misturas de solo estabilizado (CONSOLI *et al.*, 2017b, 2019a; CONSOLI; ROCHA; SALDANHA, 2014; MARÍN, 2017; SALDANHA, 2018; SAMANIEGO, 2015).

Tendo em vista expressão da influência da porosidade pelo teor de cal e teor de pozolana em solos estabilizados, Consoli et al. (2019b) propuseram um novo índice  $\eta/(B_{iv})$ . Esse índice pode ser definido pelas Equações (2.2) e (2.3).

$$\eta = 100 - 100 \left\{ \left[ \frac{\gamma_d}{\frac{S}{100} + \frac{P}{100} + \frac{C}{100}} \right] \left[ \frac{S}{\gamma_{SS}} + \frac{P}{\gamma_{SP}} + \frac{C}{\gamma_{SC}} \right] \right\} \quad (2.2)$$

$$B_{iv} = \frac{V_P + V_C}{V} = \frac{m_P/\gamma_{SP} + m_C/\gamma_{SC}}{V} \quad (2.3)$$

A porosidade ( $\eta$ ) é encontrada em função do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) e conteúdo de solo (S), pozolana (P) e cal (C). Além disso, cada substância apresenta uma massa específica diferente ( $\gamma_{SS}$ ,  $\gamma_{SP}$  e  $\gamma_{SC}$  para o solo, pozolana e cal respectivamente), que deve ser considerada no cálculo da porosidade. O ligante ( $B_{iv}$ ) é calculado a partir das relações volumétricas de ambos materiais estabilizadores (*e.g.* pozolana e cal).

O índice  $\eta/(B_{iv})^k$  também pode ser ajustado com um expoente  $k$  para a compatibilização entre os efeitos da compactação e do teor de ligante, pois os parâmetros de comportamento mecânico também apresentam relações do tipo potência. Por fim, a relação entre resultados de resistência, rigidez inicial e durabilidade com esse novo índice se mostrou satisfatória quando distintas pozolanas, em diferentes teores, foram combinadas com teores de cal variados (CONSOLI *et al.*, 2019a, 2019c).

O entendimento dos mecanismos do melhoramento de solos é de suma importância para a criação de técnicas que gerem cada vez menos impactos ambientais. Fato posto, a subseção seguinte explora a utilização de materiais alternativos, como substitutos dos agentes aglomerantes tradicionais, na estabilização química de solos.

## 2.4 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA ESTABILIZAÇÃO DE MATERIAIS GEOTÉCNICOS

Grande parte dos resíduos gerados pode ser reciclada, reutilizada, transformada e incorporada, de modo a produzir novos materiais de construção e atender às crescentes demandas por tecnologias alternativas de construção mais eficaz, econômica e sustentável (SILVA; BRITO; DHIR, 2019).

Pesquisas recentes vêm demonstrado a aplicabilidade de resíduos industriais ou agrícolas de elevada disponibilidade local na estabilização e melhoramento de solos (AMU; ADETUBERU, 2010; BEHIRY, 2014; ISAH; SHARMILA, 2015; KUMAR *et al.*, 2016; NNOCHIRI; EMEKA; TANIMOLA, 2017; NNOCHIRI; OGUNDIPE, 2016; OGORK; ABUBAKAR; BAYERO, 2014). Esses subprodutos, quando comparados à agentes cimentícios tradicionais, possibilitam não apenas a redução de custos, mas também, contribuem para o desenvolvimento sustentável (CONSOLI *et al.*, 2019a). Dentre eles, podem-se destacar resíduos como: a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, cinza da casca de arroz, cinza de serragem, cinza de casca de coco, cal de carbureto e cal de casca de ovo.

Em função de suas composições químicas reativas e suas propriedades físicas favoráveis, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar e a cal de carbureto apresentam grande potencial de aplicação na geotecnia (CONSOLI *et al.*, 2019a; TALIB; NORIYUKI, 2017). Além disso, por se tratarem de resíduos altamente disponíveis no Brasil, soluções para a disposição e aplicação desses insumos, até então não monetizáveis, se tornam cada vez mais buscadas (TALIB; NORIYUKI, 2017).

Com isso, as subseções porvindouras buscam expressar as características da cinza do bagaço de cana-de-açúcar e da cal de carbureto quando aplicadas ao processo de estabilização de materiais geotécnicos.

### 2.4.1 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar

Na esfera social e empresarial é possível constatar uma maior percepção acerca dos conceitos de sustentabilidade, em especial, sobre as consequências do uso de combustíveis fósseis no balanço de carbono atmosférico e seus efeitos no aquecimento global (POGGIALI *et al.*, 2012). Assim, a agroindústria sucroalcooleira apresenta um potencial oportuno, uma vez que o etanol é um combustível ecologicamente correto e é obtido de uma fonte renovável (FILHO *et al.*, 2013).

O Brasil ostenta o cargo de maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com ampla relevância para a economia do país (POGGIALI *et al.*, 2012). O crescimento exponencial de etanol mundial, aliado às grandes áreas cultiváveis e condições climatológicas favoráveis à cana-de-açúcar, tornaram o Brasil um país importante para a exportação desse insumo (SHIMOLA, 2018).

A produção de cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul, apesar de pequena em relação à produção nacional, tem importância por estar tradicionalmente associada às atividades desenvolvidas em áreas de pequena propriedade, relacionadas à criação de gado e ao processamento artesanal de vários produtos, como cachaça, rum, rapadura, melado, dentre outros. O processo para a obtenção dos subprodutos da cana-de-açúcar (*e.g.* açúcar, álcool) gera um resíduo conhecido como cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA). A quantidade de CBCA produzida anualmente no Brasil equivale a aproximadamente 2,5 milhões de toneladas, valor que representa cerca de 7% da produção de cimento Portland no Brasil (CORDEIRO *et al.*, 2009).

Cabe destacar que durante a queima do bagaço de cana-de-açúcar, uma vasta quantidade de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é liberada na atmosfera. Contudo, o balanço nas emissões do gás é estatisticamente insignificante para a generalidade do processo, pois no decorrer do ciclo e cultura do material primário, a geração de CO<sub>2</sub> é compensada (CORDEIRO *et al.*, 2009).

Referente a composição química e grau de reatividade, a CBCA apresenta teores de sílica amorfa maiores que 60% (BAHURUDEEN *et al.*, 2015; CORDEIRO *et al.*, 2009; CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009; FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011; POGGIALI *et al.*, 2012). Essa característica pode possibilitar o emprego desse resíduo como um material pozolânico e, com isso, reduzir as despesas e o impacto ambiental relativos à sua disposição no meio ambiente (POGGIALI *et al.*, 2012). Além disso, a incorporação da cinza pode agregar valor econômico ao resíduo agroindustrial e proporcionar vantagens técnicas e ambientais com a substituição parcial de cimento Portland (FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011).

Diversos autores comprovaram a viabilidade da CBCA como um agente estabilizador para diferentes tipos de solo (HASAN *et al.*, 2016; MASUED, 2017; SHIMOLA, 2018; TALIB; NORIYUKI, 2017). Em geral, os autores evidenciaram que a estabilização com o uso da CBCA não apenas melhora a resistência, como também facilita os processos inerentes à tramites ambientais por meio da redução de resíduos da indústria sucroalcooleira.

### 2.4.2 Cal de carbureto

O carbeto de cálcio, conhecido popularmente como cal de carbureto (CC), é o subproduto residual gerado na produção comercial de acetileno gasoso, por reação do carboneto de cálcio com água. Esse material é constituído majoritariamente por hidróxido de cálcio (70% a 90%), com quantidades variáveis de carbonato de cálcio (1% a 15%, dependendo da exposição ao ar) e 5% a 10% de carbonato silicáceo, além de impurezas inorgânicas (MASSALIMOV; KIREEVA; SANGALOV, 2002).

A composição da CC, em especial no lodo altamente básico formado durante o processo de produção, pode apresentar alguns metais pesados (*e.g.* bromo, cádmio, cobre, ferro, zinco) e, por isso, seu gerenciamento e descarte requerem cuidados especiais (KAMPALA; HORPIBULSUK, 2013). Ainda, o hidróxido de amônia (presente no sobrenadante) e o acetileno (dissolvido na fração de água) também podem ser problemáticos, sendo necessária uma ventilação adequada durante o processo de armazenamento (AKINWUMI *et al.*, 2019). Apesar dos fatores supramencionados, o material não é classificado como perigoso (SALDANHA *et al.*, 2018).

Os elevados custos do tratamento, para neutralização do pH e posterior descarte em aterros sanitários, em conjuntura com os pouquíssimos usos comerciais da CC, resultam em mais de 1.400.000 toneladas do resíduo sendo acumuladas anualmente no mundo (KAMPALA; HORPIBULSUK, 2013; SALDANHA *et al.*, 2018). A CC representa o terceiro resíduo mais produzido mundialmente, atrás apenas da escória de ferro/aço e da escória de carvão proveniente de usinas de energia (AKINWUMI *et al.*, 2019).

Inerente a sua reutilização, os usos são limitados a estabilização de solos, aplicação como agente neutralizante na lavagem de gases de combustão de ácidos residuais, constituinte de argamassas e cimentos, produção de blocos de construção e material de pavimentação e, ainda, fabricação de fertilizantes agrícolas (CAI *et al.*, 2018).

Na estabilização de solos, resíduos industriais como a CC apresentam grande potencial de utilização como um estabilizante químico, a fim de melhorar as propriedades à curto prazo (*i.e.* aglomeração, floculação, troca catiônica e possível carbonatação) e à longo prazo (*i.e.* reações pozolânicas) (LI; YI, 2020).

A literatura apresenta diversos estudos que comprovaram a aplicabilidade da CC como um agente estabilizador para diferentes tipos de solo (CONSOLI *et al.*, 2001; DU; ZHANG; LIU, 2011; KAMPALA; HORPIBULSUK, 2013; SAID; TAIB, 2009; SALDANHA *et al.*, 2018;

AKINWUMI *et al.*, 2019). Os efeitos da CC observados foram os mesmos da cal hidratada comercial. Portanto, esse material pode ser utilizado como um insumo benéfico que elimina a necessidade de seu descarte em aterros como um rejeito.

O potencial de substituição de agentes cimentícios tradicionais por materiais aglomerantes alternativos, possibilita a instauração de metodologias que fazem alusão à sustentabilidade. Uma forma de aproveitamento de resíduos industriais como substituinte de agentes cimentícios convencionais é na produção de ligante álcali-ativado por meio do processo de ativação alcalina.

## 2.5 ÁLCALI-ATIVAÇÃO

Ligantes álcali-ativados, incluindo os referidos como geopolímeros, têm atraído o interesse acadêmico e comercial mundialmente (AHMARI; ZHANG; ZHANG, 2012; SHEKHAWAT; SHARMA; SINGH, 2019; SOFI *et al.*, 2007). Esses materiais são produzidos por meio da reação entre uma fonte de metal alcalino e uma fonte de aluminossilicato (DAVIDOVITS, 1994). A fonte alcalina deste sistema pode incluir hidróxidos alcalinos, carbonatos e sulfatos ou, ainda, qualquer substância solúvel que possa (a) fornecer cátions de metais alcalinos, (b) aumentar o pH da mistura e (c) acelerar a dissolução do precursor (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2015). Esse processo é capaz de transformar estruturas vítreas (parcialmente amorfas e ou metaestáveis) em materiais cimentantes (PACHECO-TORGAL; CASTRO-GOMES; JALALI, 2008).

Os conceitos de geopolímero e geopolimerização, por sua vez, foram introduzidos ao cenário mundial por Davidovits na década de 1970. Cabe destacar que, a tecnologia de álcali-ativação antecede essa terminologia em mais de meio século, com uma patente de Kuhl produzida em 1908 e ainda, extensas pesquisas realizadas por Purdon de 1930 a 1950 e por Glukhovsky a partir de 1950 (DUXSON *et al.*, 2007).

O recente desenvolvimento comercial da técnica supramencionada, simultaneamente à criação de orientações executivas mais padronizadas, possibilitou uma grande disponibilidade de materiais álcali-ativados mundialmente (ASSI; EDDIE DEEVER; ZIEHL, 2018; MORSY *et al.*, 2014; OGUNDIRAN; NUGTEREN; WITKAMP, 2013; PHUMMIPHAN *et al.*, 2016). Apesar dessa popularização, o cenário acadêmico atual se encontra segregado em duas vertentes ideológicas distintas.

O primeiro grupo, faz o uso dos termos álcali-ativação e geopolimerização indistintamente. Por outro lado, o segundo grupo afirma que, apesar de semelhantes, os produtos de reação de ligantes álcali-ativados e geopolímeros não são iguais.

Davidovits (1991) dita que, sistemas álcali-ativados podem ser considerados geopolímeros apenas quando os produtos de reação apresentarem uma coordenação tetraédrica com o silício e ao menos duas ligações com o alumínio, tendo como resultado uma estrutura muito similar a zeolita. Desta maneira, a estrutura formada necessita apresentar coordenações do tipo  $\text{SiQ}_4(2\text{Al})$  e  $\text{SiQ}_4(3\text{Al})$ . O autor afirma ainda, que os ligantes álcali-ativados possuem sistemas de formação distintos, e que apenas a formação dos géis C-A-S-H e N-A-S-H não os tornam geopolímeros. O produto da geopolimerização ocorre apenas frente a baixos teores de cálcio, atrelados à alta concentração de alumínio, sob maior presença de um agente ativador.

De modo a evitar a falta de clareza inerente as terminologias estudadas, as reações apresentadas no decorrer desta pesquisa são tratadas apenas como produtos do processo de álcali-ativação.

Uma das características mais importantes da tecnologia de álcali-ativação consiste na possibilidade de utilização tanto de materiais naturais como de subprodutos industriais. Além disso, ligantes álcali-ativados apresentam potencial de portar diversas propriedades comercialmente atraentes, como por exemplo: (i) resistência e durabilidade química (ALAM; DAS; RAO, 2019; XU; VAN DEVENTER, 2000); (ii) resistência a altas temperaturas (KUA *et al.*, 2016) e (iii) baixo custo de produção (ZHANG *et al.*, 2013).

O entendimento do comportamento de um material cuja formação é oriunda de um processo de reações químicas, depende diretamente da caracterização dos mecanismos de reação por trás de seu sistema (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2015). No caso da álcali-ativação, as reações que ocorrem entre a solução ativadora e os precursores definem a natureza do produto formado (DUXSON *et al.*, 2007).

Os mecanismos de reação de um ligante álcali-ativado apresentam-se como o alicerce para a criação de produtos economicamente vantajosos, bem como com bom desempenho e durabilidade. Com isso, a subseção porvindoura explora as características inerentes a esses mecanismos.

### 2.5.1 Mecanismos de reação

O mecanismo de reação compreendido pelo processo de álcali-ativação pode ser descrito por um modelo conceitual simplificado em quatro fases distintas, sendo elas: (i) dissolução; (ii) rearranjo; (iii) condensação e (iv) resolidificação (PROVIS, 2006).

A dissolução da fonte sólida, pelo processo de hidrólise alcalina, gera produtos de aluminatos e silicatos. Uma vez em solução os produtos liberados pela dissolução são incorporados na fase aquosa e, a partir disso, uma mistura complexa de produtos de silicatos, aluminatos e aluminossilicatos é formada (SWADDLE, 2001; SWADDLE; SALERNO; TREGLOAN, 1994; ZHANG *et al.*, 2013).

A dissolução dos aluminossilicatos amorfos ocorre de forma quase instantânea em sistemas de pH alto, com a geração acelerada de uma solução supersaturada de aluminossilicatos. Em soluções concentradas, isso resulta em um gel devido à formação por condensação de grandes redes oriundas dos oligômeros, presentes na fase aquosa (DAVIDOVITS, 1991).

A duração do processo de transformação de uma solução supersaturada de aluminossilicatos para um gel, varia consideravelmente de acordo com a natureza de processamento da matéria-prima e as condições de composição e síntese da solução (DUXSON *et al.*, 2007).

A reação de ativação é resultado de duas etapas sucessivas, a condensação e a resolidificação. A condensação, ou a dissolução do material aluminossilicato e a formação de espécies álcali-ativadas, é altamente dependente dos parâmetros termodinâmicos e cinéticos. A resolidificação é o estágio durante o qual os núcleos atingem um tamanho crítico e os cristais começam a se desenvolver. Esses processos de reorganização estrutural geram a microestrutura e a distribuição dos poros do material, que são críticos na determinação de muitas propriedades físicas (DUXSON; LUKEY; VAN DEVENTER, 2007).

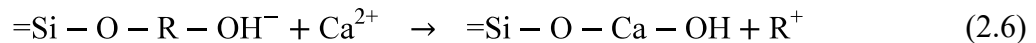
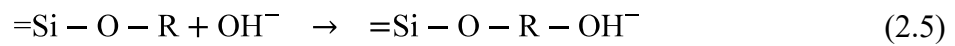
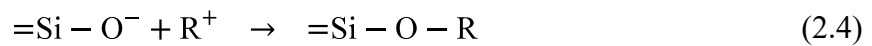
Ligantes álcali-ativados, em sua forma genérica, apresentam estruturas químicas diversificadas. Essa variedade leva a um sistema de classificação que segrega os materiais em duas categorias distintas, sendo elas: (i) sistemas com alto teor de cálcio e (ii) sistemas com baixo teor de cálcio (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2015). Ainda, o conteúdo de cálcio na composição de um ligante álcali-ativado, se apresenta como um dos fatores que determina o grau de polimerização das estruturas de silicato (DUXSON *et al.*, 2007). Com isso, a seção subsequente explora as ideias e conceitos inerentes a esses sistemas e seus respectivos processos.



## 2.5.2 Sistemas com alto teor de cálcio

Os sistemas com alto teor de cálcio compostos por materiais ricos em cálcio e silício (*e.g.* escória de alto forno), são normalmente ativados sob condições alcalinas moderadas e seu produto de reação principal, se apresenta na forma de um gel silico-aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H) (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2015).

De acordo com Pacheco-Torgal *et al.* (2015), a álcali-ativação de sistemas com alto teor de cálcio e sílica, pode ser explicada por meio de um modelo composto de uma série de reações químicas, sintetizado pelas Equações (2.4), (2.5) e (2.6).



O cátion alcalino ( $R^+$ ) age como um catalizador nas fases iniciais do processo de hidratação, por meio da troca catiônica com os íons de  $Ca^{2+}$ . Conforme as reações químicas ocorrem, os cátions alcalinos são incorporados gradativamente na estrutura química (SOFI *et al.*, 2007).

A natureza do ânion na solução cumpre um papel de fundamental importância na álcali-ativação, especialmente na configuração da pasta em idades iniciais (ASSI; EDDIE DEEVER; ZIEHL, 2018). Os mecanismos de reação do sistema álcali-ativado com alto teor de cálcio, podem ser representados por um modelo simplificado, de acordo com a Figura 2.13.

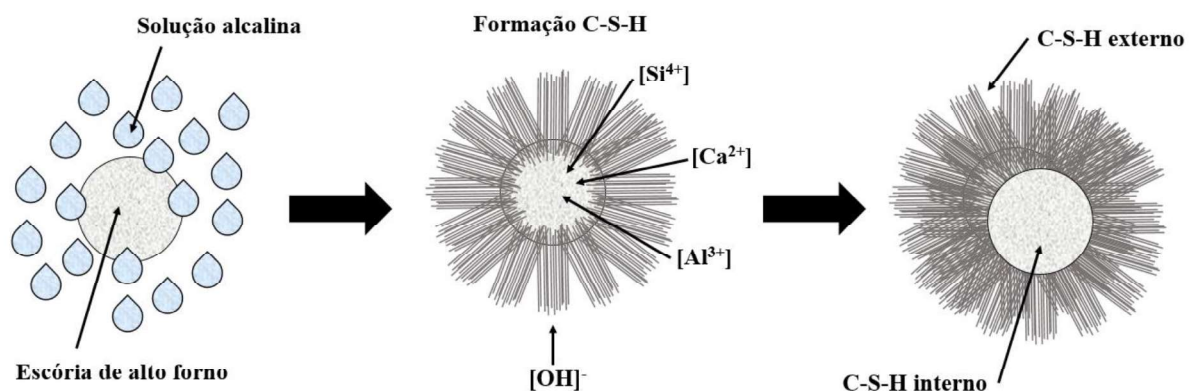


Figura 2.13: Mecanismo de reação da álcali-ativação de sistemas de alto teor de cálcio (Adaptado de SOFI *et al.*, 2007)

A álcali-ativação de sistemas com alto teor de cálcio consiste em um processo complexo que ocorre em estágios, na qual a dissolução do precursor é seguida pela condensação dos produtos de reação (GARTNER, 2004).

O produto primário de hidratação do cimento Portland convencional (CPC) compreende um gel do tipo C-S-H, o qual é responsável pelas propriedades mecânicas da mistura. O produto secundário, por sua vez, inclui estruturas como a portlandita, a etringita e o monossulfoaluminato de cálcio (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2015).

Os produtos de reação de um material álcali-ativado são análogos aos encontrados na hidratação do CPC, onde o produto de hidratação primário também compreende um gel, cuja estrutura e composição varia ligeiramente da encontrada no CPC, com diversos produtos secundários (RICHARDSON *et al.*, 1994). O tipo de estrutura dos produtos secundários é dependente de uma série de fatores, como a composição do precursor, a concentração e a composição do ativador e o pH da mistura (SWADDLE, 2001).

A Tabela 2.14 apresenta uma comparação entre os produtos de reação encontrados no processo de hidratação do CPC e de ligantes álcali-ativados.

Tabela 2.14: Produtos de reação formados em diferentes ligantes

Tipo de ligante	Produto de reação formado*	
	Primário	Secundário
Cimento Portland convencional	C-S-H	Ca(OH) <sub>2</sub> AF <sub>m</sub> AF <sub>t</sub>
Álcali-ativado	(Na,K) <sub>2</sub> O-CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	C-A-S-H Hidrotalcita [Mg <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (OH) <sub>16</sub> .4H <sub>2</sub> O] C <sub>4</sub> AH <sub>13</sub> CASH <sub>8</sub> C <sub>4</sub> AcH <sub>11</sub> C <sub>8</sub> Ac <sub>2</sub> H <sub>24</sub>
	(Na,K) <sub>2</sub> O-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	N-A-S-H Hidrotalcita Hidroxisodalita Zeolita P Na-chabazita Zeolita Y Faujasita

\*C = CaO; S = SiO<sub>2</sub>; A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; N= Na<sub>2</sub>O; H= H<sub>2</sub>O; c = CO<sub>2</sub>

Fonte: Adaptado de Pacheco-Torgal *et al.* (2015)

A determinação da nanoestrutura dos produtos de reação primários, oriundos do processo de álcali-ativação, possui uma natureza extremamente complexa em virtude da amorficidade do material (SOFI *et al.*, 2007). Entretanto, modelos com o intuito de verificar e descrever tais estruturas têm sido desenvolvidos, a partir de diversas técnicas de caracterização.

Os estudos de Fernández-Jiménez e Palomo (2003), Richardson *et al.* (1994), Richardson e Groves, (1997) e Schilling *et al.* (1994) propuseram modelos químicos nos quais o alumínio é incorporado no produto de hidratação primário de materiais álcali-ativados. A partir dessa integração, o alumínio tetraédrico é capaz de substituir o silício tetraédrico (representado por

SiQ) nas posições de ponte, originando unidades de  $\text{SiQ}^1$ ,  $\text{SiQ}^2$  e  $\text{SiQ}^2(1\text{Al})$ . De acordo com o tipo de ligação realizada pelo tetraedro, formações do tipo C-(A)-S-H podem ser evidenciadas, de acordo com a Figura 2.14.

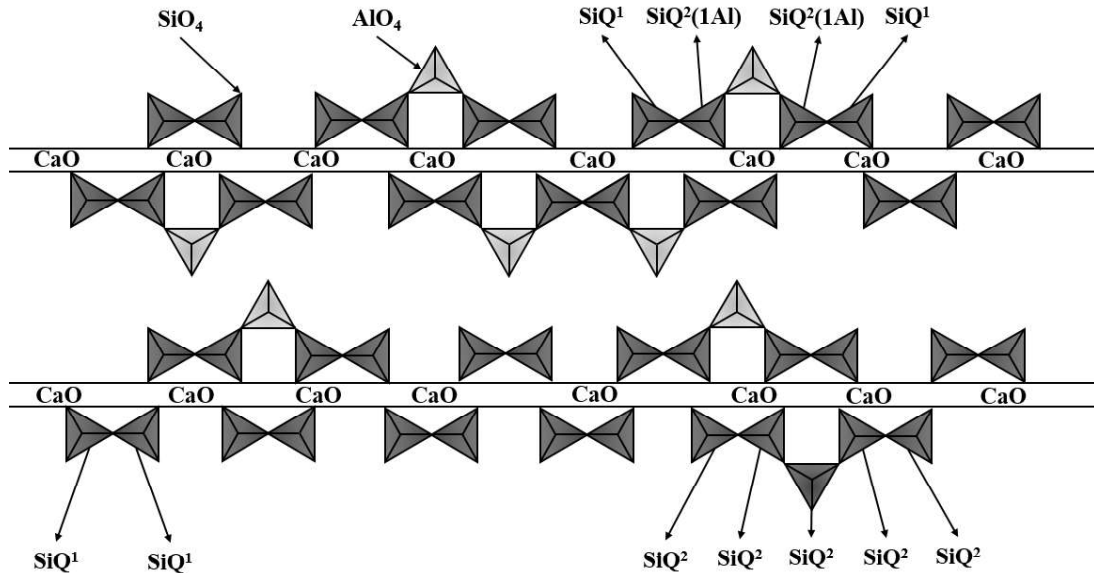


Figura 2.14: Modelo C-S-H com alumínio em rede linear (Adaptado de FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2003)

Fernández-Jiménez e Palomo (2003) afirmam ainda, que a presença do alumínio origina géis de cadeias lineares mais longas e a possível existência de cadeias reticuladas esporádicas (ligações do tipo Si-O-Al), que resultam em estruturas bidimensionais de  $\text{SiQ}^3(\text{Al})$ . A partir dessas condições, o gel C-S-H se transforma em uma estrutura do tipo C-(A)-S-H, em consonância com o demonstrado na Figura 2.15.

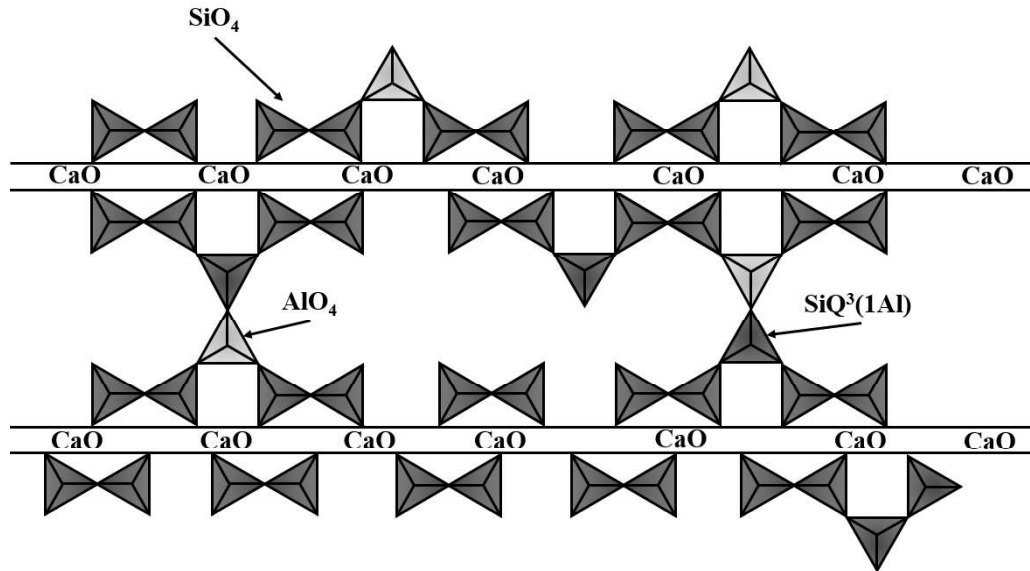


Figura 2.15: Modelo C-S-H com alumínio em rede linear cadeias reticuladas esporádicas (Adaptado de FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2003)

Neste segundo modelo, os átomos de alumínio conectam as cadeias lineares, dando uma formação plana a estrutura, variando apenas a coordenação do alumínio quando comparado ao modelo anterior (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2003).

### 2.5.3 Sistemas com baixo teor de cálcio

A álcali-ativação em sistemas com baixo teor de cálcio é oriunda de materiais ricos em alumínio e silício (*e.g.* cinza volante) (KUMAR; KUMAR; MEHROTRA, 2007). O mecanismo geral que descreve as reações de álcali-ativação desses materiais é constituído por três fases: (i) destruição-coagulação; (ii) coagulação-condensação e (iii) condensação-cristalização (SUKMAK; HORPIBULSUK; SHEN, 2013b).

As reações do processo iniciam quando os íons de  $\text{OH}^-$  do ativador alcalino quebram as ligações Si-O-Si. Os íons redistribuem sua densidade em torno dos átomos de silício, enfraquecendo as ligações e aumentando sua susceptibilidade à ruptura (DAVIDOVITS, 1991). Esse ataque resulta em unidades de sialato ( $-\text{Si}-\text{O}^-$ ) e silanol ( $-\text{Si}-\text{OH}$ ) (MUÑIZ-VILLARREAL *et al.*, 2011). A presença do cátion alcalino neutraliza a carga negativa resultante do processo, enquanto a formação de ligações  $\text{Si}-\text{O}^- \text{Na}^+$  impede a reversão ao siloxano (Si-O-Si), de acordo com a Equação (2.7).



KRIVENKO; SHI; ROY, 2006; PALOMO; LÓPEZ DELA FUENTE, 2003). Um modelo esquemático simplificado das fases supracitadas é apresentado na Figura 2.16.

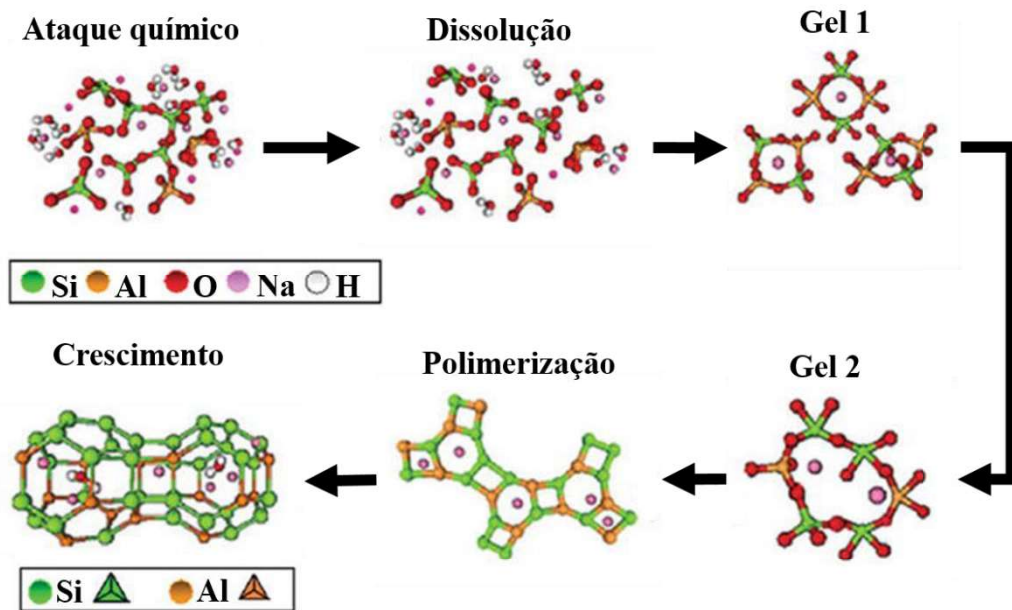


Figura 2.16: Modelo esquemático formação do gel N-A-S-H (Adaptado de DUXSON *et al.*, 2007)

Ao entrar em contato com uma solução alcalina, a fonte de aluminossilicatos se dissolve formando monômeros de sílica e alumina (PROVIS, 2014). Esses monômeros, interagem para formar dímeros, que por sua vez reagem com outros monômeros para formar trimeros, tetrameros e assim por diante (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2015).

Quando a solução atinge a saturação, é constatada a precipitação de um gel inicialmente rico em alumínio, como um produto intermediário de reação metaestável (DUXSON *et al.*, 2007). As ligações Al-O são mais fracas que as ligações Si-O e, portanto, a dissolução do alumínio ocorre de forma mais rápida, o que justifica as altas quantias iniciais evidenciadas no gel (GUO; SHI; DICK, 2010).

Com a progressão das reações, mais grupos de Si-O são dissolvidos, o que aumenta a concentração de silício no meio e, conseqüentemente, sua proporção no gel (PROVIS, 2014). Essa reorganização estrutural determina a composição final do material e suas propriedades físicas, químicas e mecânicas (PACHECO-TORGAL; CASTRO-GOMES; JALALI, 2008).

De acordo com Pacheco-Torgal *et al.* (2015), o produto de reação final gerado pelo processo de álcali-ativação de sistemas de baixo cálcio é um hidrato de aluminossilicato alcalino amorfo ( $M_n\text{-}[\text{SiO}_2]\text{-}[\text{AlO}_2]_n\cdot w\text{H}_2\text{O}$ ).

O gel N-A-S-H é caracterizado por uma estrutura tridimensional, na qual o silício é encontrado em diversos ambientes, com predominância de unidades  $Q^4(nAl)$ , com os valores de  $n$  sendo 0, 1, 2, 3 ou 4. Os cátions  $Si^{4+}$  e  $Al^{3+}$  são coordenados tetraédricamente e unidos por ligações de oxigênio. A carga negativa do grupo  $AlO_4^-$  é neutralizada pela presença de cátions alcalinos. No entanto, variações significativas podem ser detectadas na estrutura do gel, dependendo do grau de reação, temperatura de cura e particularmente da presença de sílica solúvel no ativador (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2015).

Ante ao exposto, é possível notar que os produtos de reação, resultantes do processo de álcali-ativação, são fundamentalmente afetados pela tipologia dos precursores e ativadores utilizados durante sua concepção. Com isso, a subseção seguinte busca explorar tal influência.

#### 2.5.4 Precursores

Materiais compostos predominantemente por sílica e ou alumina apresentam, teoricamente, potencial para serem álcali-ativados (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2015). No entanto, cabe destacar que os teores elevados de sílica e alumina não garantem a reatividade do sistema ligante álcali-ativado. Essa capacidade reativa é dependente de uma série de parâmetros como: teor de material amorfo; superfície específica do material; teor de fase vítrea e tamanho da partícula (DUXSON *et al.*, 2007).

A matéria-prima inicial e que faz alusão as origens do processo de álcali-ativação, consiste no metacaulim e, por isso, esse material é normalmente utilizado como comparação quando estudam-se outros precursores (DAVIDOVITS, 1991). Diversos outros materiais, como minerais naturais, resíduos metalúrgicos e cinzas orgânicas, vêm sendo estudados como precursores nos últimos anos (ASSI; EDDIE DEEVER; ZIEHL, 2018; KARTHIK; SUDALAIMANI; VIJAYA KUMAR, 2017; PARVEEN *et al.*, 2018; SHEHAB; EISA; WAHBA, 2016).

Os materiais precursores de aluminossilicato, utilizados no processo de álcali-ativação, podem ser segregados em dois grupos: (i) materiais calcinados (*e.g.* cinzas volantes, escória, resíduos de construção e resíduos pozolânicos e (ii) materiais não calcinados (*e.g.* caulinita, feldspato, argilas e rejeitos de processamento mineral) (SOFI *et al.*, 2007; ZHANG *et al.*, 2013).

A álcali-ativação a partir do uso de precursores calcinados geralmente apresenta uma taxa mais rápida de dissolução e gelificação, o que resulta em insumos com maior resistência à compressão inicial quando comparados à precursores não calcinados. Esse fenômeno justifica-se no aumento da reatividade gerado pelo processo de calcinação, que altera a estrutura

previamente cristalina para uma estrutura amorfa, de mais fácil dissolução (ZHANG *et al.*, 2013).

Apesar disso, ligantes sintetizados com precursores não calcinados apresentam aumentos mais significativos, da resistência mecânica, nos estágios posteriores à reação de álcali-ativação. Uma mistura de precursores calcinados e não calcinados pode gerar produtos de alta resistência, devido as interações realizadas pelos dois tipos de materiais. (XU; VAN DEVENTER, 2000, 2002).

### 2.5.5 Ativadores

O objetivo principal dos ativadores alcalinos consiste no fornecimento de cátions de metais alcalinos, de modo a aumentar o pH da mistura e acelerar a dissolução do precursor sólido. Esses ativadores podem ser divididos em quatro grupos, sendo eles: (i) hidróxidos alcalinos; (ii) silicatos alcalinos; (iii) carbonatos alcalinos e (iv) sulfatos alcalinos (DUXSON *et al.*, 2007).

De acordo com Duxson *et al.* (2007), os hidróxidos alcalinos são bases fortes e altamente corrosivas compostos por um cátion alcalino metálico e um ânion hidróxido. O cátion metálico pode ser oriundo de diversos elementos, como por exemplo sódio (Na), potássio (K), lítio (Li), rubídio (Rb) ou céσιο (Cs). No entanto, o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH) são as soluções alcalinas mais comuns devido ao baixo custo, adequação para ativar os ligantes e alta solubilidade em água (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

Os silicatos alcalinos são semelhantes ao grupo dos hidróxidos alcalinos, onde os cátions metálicos provêm de elementos como sódio e potássio (PROVIS, 2006). Os ativadores mais utilizados são o silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) e o silicato de potássio ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ), em virtude de sua adaptabilidade e solubilidade (SARGENT *et al.*, 2013). Ainda, as soluções de silicato de sódio são identificadas como tendo um impacto notável no desempenho da dissolução e nas características de precipitação dos ligantes álcali-ativados, potencializando o ataque químico aos aluminossilicatos e conseqüentemente acelerando a formação do produto final (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2015).

Os carbonatos alcalinos são conhecidos como  $\text{M}_2\text{CO}_3$ , onde M representa o grupo dos metais alcalinos. Uma das principais vantagens associadas a esses ativadores consiste na redução do impacto ambiental (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009). O carbonato de sódio se apresenta como o mais conhecido e estudado, enquanto o de potássio e outros carbonatos metálicos não são tão comumente utilizados devido a fatores como reatividade, preço e disponibilidade (DUXSON *et al.*, 2007).



Os sulfatos alcalinos apresentam sua formulação genérica como  $M_2SO_4$ , onde M representa o grupo dos metais alcalinos. Semelhante aos carbonatos alcalinos, o sulfato de sódio é o ativador mais utilizado para a dissolução dos aluminossilicatos, pois consome menos energia e possui o menor preço (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2015).

Além dos precursores e ativadores, outros fatores também desempenham um papel fundamental no processo de álcali-ativação, como: moagem e trituração do precursor (CHAND; SUBBARAO, 2007; KUMAR; KUMAR, 2011; TEMUJIN; WILLIAMS; VAN RIESSEN, 2009); temperatura de cura do processo (MUÑIZ-VILLARREAL *et al.*, 2011); e quantidade de água na mistura (KARTHIK; SUDALAIMANI; VIJAYA KUMAR, 2017).

O entendimento da influência do tipo de ativador e precursor no processo de álcali-ativação, possibilita a aplicação prática e tecnológica do ligante gerado. As subseções porvindouras, elucidam os aspectos inerentes a aplicação de ligantes álcali-ativados na estabilização de materiais geotécnicos.

### 2.5.6 Álcali-ativação aplicada à estabilização de solos

O cimento e a cal são utilizados há muito tempo como materiais aglomerantes; sendo o primeiro considerado mais favorável no fornecimento de aprimoramentos rápidos de resistência (HOSSAIN, 2010; JEGANDAN *et al.*, 2010; ROGERS; GLENDINNING, 2000). A presença de água do solo e silicatos/aluminatos de cálcio nos agentes cimentícios reage para formar produtos de hidratação, incluindo géis de hidróxido de sílica de cálcio e hidróxido de aluminato de cálcio.

Entretanto, a utilização de cimento e cal como agentes aglomerantes defronta diretamente o conceito de sustentabilidade, especificamente devido ao alto consumo de energia, custo financeiro e emissões de carbono geradas durante o processo de produção (GARTNER, 2004). Portanto, é necessário identificar agentes cimentícios substitutos que sigam as diretrizes ditadas pelo âmbito técnico e ambiental. Esses materiais devem fornecer desempenhos de engenharia comparáveis ou superiores aos agentes cimentícios convencionais (JEGANDAN *et al.*, 2010).

O desenvolvimento de ligantes álcali-ativados tem se mostrado como uma solução popular para a seleção de novos agentes cimentícios. O processo de álcali-ativação normalmente utiliza subprodutos industriais à base de aluminossilicatos (WEIL; DOMBROWSKI; BUCHWALD, 2009) que podem reduzir os gases do efeito estufa em até 64% (MCLELLAN *et al.*, 2011). Além disso, os custos de produção desses insumos chegam a ser 30% menores do que os de produção do cimento convencional (DUXSON *et al.*, 2007).

Os subprodutos industriais à base de aluminossilicatos mais populares incluem a escória granulada de alto forno, a escória de aço, as cinzas volantes e o resíduo da fabricação de dióxido de titânio (*i.e.* gesso vermelho) (GAZQUEZ *et al.*, 2013; HUGHES *et al.*, 2011; MCCARTHY *et al.*, 1984).

Devido as súperas resistências atingidas, a escória granulada de alto forno e as cinzas volantes do tipo C apresentam-se como os materiais mais utilizados. Por outro lado, a escória de aço, as cinzas volantes do tipo F e o gesso vermelho normalmente são aplicados em combinação com outros resíduos cimentícios, devido ao baixo conteúdo de silicato tricálcico em sua composição (KRIVENKO; SHI; ROY, 2006).

Além disso, cinzas produzidas pela queima de certos materiais orgânicos (*e.g.* bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e madeira) apresentam potencial de utilização, pois são constatados altos níveis de pozolanicidade e reatividade em conjunção com alto teor de CaO e sílica em sua composição (ABU BAKAR; RAMADHANSYAH; MEGAT AZMI, 2011; MASUED, 2017; SHIMOLA, 2018; ZAIN *et al.*, 2011).

A introdução de ativadores alcalinos, como o hidróxido de sódio, nos subprodutos industriais à base de aluminossilicatos acelera a taxa na qual as propriedades mecânicas de solos estabilizados são melhoradas. Essa adição aumenta o pH do solo e, conseqüentemente, potencializa as reações pozolânicas e ligações cimentícias ocorrentes na mistura (DUXSON *et al.*, 2007; KRIVENKO; SHI; ROY, 2006; PALOMO; GRUTZECK; BLANCO, 1999).

A estabilização química de solos por meio da álcali-ativação foi estudada, desde sua concepção, de maneira extensa na literatura. Uma síntese desses estudos é apresentada na Tabela 2.15.

Tabela 2.15: Processo de álcali-ativação na estabilização de solos

Tipo de análise	Autores	Ensaio realizado
Físico-mecânica	Hughes; Glendinning (2004)	Compressão simples
	Horpibulsuk <i>et al.</i> (2010)	Compressão simples
	Wilkinson; Haque; Kodikara (2010a)	Compressão simples; VANE
	Wilkinson; Haque; Kodikara (2010b)	Compressão simples; VANE
	Horpibulsuk; Rachan; Suddepong (2011)	Compressão simples
	Åhnberg (2007)	Triaxial
	Sargent <i>et al.</i> (2013)	Triaxial
Mineralógica	Al-Tabbaa; Evans (1999)	DRX; MEV
	Hughes; Glendinning (2004)	DRX; MEV
	Wilkinson; Haque; Kodikara (2010a)	DRX; MEV
	Wilkinson; Haque; Kodikara (2010b)	DRX; MEV
	Hughes <i>et al.</i> (2011)	DRX; MEV
	Sargent <i>et al.</i> (2013)	DRX; MEV
	Zhang <i>et al.</i> (2013)	DRX; MEV

Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos autores supracitados (2020)

Nota-se que os estudos apresentados são divididos em dois grandes grupos, aqueles que examinam o desempenho mecânico (de engenharia) e aqueles que examinam como a mineralogia de solos estabilizados muda com a cura, a fim de explicar o melhoramento do desempenho físico-mecânico.

### 2.5.7 Álcali-ativação aplicada à estabilização de rejeitos de mineração

A utilização do processo de álcali-ativação em materiais oriundos de rejeitos de mineração vem sendo estudada por diversos pesquisadores. A possibilidade de estabilização de rejeitos de mineração por intermédio da álcali-ativação foi comprovada por estudos de Davidovits (1994) e Jaarsveld *et al.* (2000).

Por outro lado, a utilização de diferentes rejeitos de mineração como substitutos (parciais ou totais) dos precursores convencionais no processo geopolimerização, também se mostrou viável para diferentes materiais: rejeitos de tungstênio (PACHECO-TORGAL; CASTRO-GOMES; JALALI, 2008); rejeitos de cobre (AHMARI; ZHANG; ZHANG, 2012; ZHANG; AHMARI; ZHANG, 2011); rejeitos de chumbo (OGUNDIRAN; NUGTEREN; WITKAMP, 2013); (iv) e rejeitos de bauxita (ALAM; DAS; RAO, 2019). Além disso, a álcali-ativação pode resultar na imobilização de metais tóxicos em rejeitos de mineração, devido ao encapsulamento físico e ligações químicas envolvidos no processo de estabilização (XU *et al.*, 2006; ZHANG *et al.*, 2008).

Os estudos supramencionados revelam a possibilidade de aplicação do processo de álcali-ativação na estabilização e utilização de rejeitos de mineração. No entanto, nota-se uma grande lacuna de conhecimento no que diz respeito à álcali-ativação com a utilização integral de rejeitos de mineração como matéria-prima e, também, a utilização de precursores alternativos nesse processo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODO

Este capítulo escrutina os materiais utilizados na pesquisa, o programa experimental e método aplicado para a realização dos ensaios, o projeto de experimentos e seus níveis de complexidade, a preparação das amostras e os detalhes relevantes à execução dos ensaios.

#### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados nesta pesquisa se categorizam em: (i) agente a ser estabilizado (rejeito de mineração de bauxita); (ii) precursores (cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cal de carbureto) e (iii) ativador alcalino (hidróxido de sódio). Ainda, para o grupo controle será utilizado do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI).

##### 3.1.1 Rejeito de mineração de bauxita (RMB)

Rejeitos de mineração de bauxita são materiais em abundância no cenário brasileiro. Logo, para os fins desta pesquisa, diversas empresas foram contatadas para a aquisição desse material. Uma empresa norte-brasileira<sup>1</sup> se mostrou solícita às exigências da pesquisa e cedeu o material a ser estabilizado.

Nas atividades de mineração de bauxita desta empresa, o beneficiamento é feito por meio da britagem e lavagem da bauxita bruta, a fim de remover argila e areia fina. A retirada dessa fração, que é considerada resíduo de lavagem, é descartada como rejeito em barragens e constitui o material analisado nesta pesquisa.

##### 3.1.2 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA)

Nesta pesquisa, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizada é oriunda do processamento de subprodutos da cana-de-açúcar, proveniente de uma empresa localizada no município de Porto Xavier, Rio Grande do Sul, Brasil. Destaca-se que, em virtude da simplicidade dos processos realizados pela fornecedora, a cinza é procedente de uma queima com temperaturas não controladas.

A empresa fornecedora da cinza do bagaço de cana-de-açúcar tem sua plantação localizada a oeste do município e a colheita da lavoura acontece entre os meses de setembro e novembro.

---

<sup>1</sup>Em vista de questões alheias ao controle do pesquisador, o nome da empresa fornecedora dos materiais deve ser mantido em sigilo. Houve uma solicitação por parte da instituição e por questões éticas e legais seu nome permanecerá velado.

Além disso, o solo dessa região cumpre os requisitos básicos edafoclimáticos para um bom desenvolvimento e produção do insumo, ou seja, consiste em uma área propícia para o plantio. Ainda, três critérios fundamentais foram utilizados para a seleção dessa empresa: (i) gratuidade do produto; (ii) acessibilidade de fornecimento e (iii) facilidade de transporte.

### 3.1.3 Cal de carbureto (CC)

A cal de carbureto é um resíduo oriundo do processo produtivo do gás acetileno, de uma empresa localizada no município de Esteio do Estado, Rio Grande do Sul, Brasil. Nessa empresa a geração de cal de carbureto atinge patamares de aproximadamente 2200 toneladas/ano.

De acordo com a normativa ASTM C977 (2018), mais de 90% de óxido de cálcio deve estar presente em uma cal cujo objetivo consista na estabilização de solos. Saldanha (2018), caracterizou a cal de carbureto, oriunda dessa empresa, como altamente reativa contendo aproximadamente 96% de óxido de cálcio.

Além do cumprimento do pré-requisito supracitado, a empresa oferece gratuidade do produto e acessibilidade de transporte e, por isso, foi selecionada como provedora da cal de carbureto utilizada nesta pesquisa.

### 3.1.4 Hidróxido de sódio

Como ativador alcalino foi utilizado o hidróxido de sódio (NaOH). De acordo com o fabricante, esse composto se apresenta como um sólido branco, cristalino, altamente tóxico e corrosivo, com ponto de fusão igual a 318°C. Uma de suas características se configura em sua alta solubilidade em água, e essa dissolução é exotérmica, ou seja, libera energia na forma de calor.

O hidróxido de sódio utilizado nesta pesquisa é oriundo da empresa RF Química, localizada na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. A escolha dessa empresa é justificada no custo benefício do produto, em conjunção com a garantia de pureza analítica de 98%.

utilizada nesta pesquisa.

### 3.1.5 Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI)

O cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) foi utilizado de modo a gerar um grupo de controle para as misturas álcali-ativadas. O material foi escolhido em virtude de seu acelerado ganho de resistência à baixos tempos de cura e possuía uma massa específica de 3,15 g/cm<sup>3</sup>.

## 3.2 MÉTODO DE PESQUISA

Em consonância com o objetivo geral deste estudo, esta pesquisa foi classificada frente à sua tipologia de abordagem, natureza, objetivos e procedimentos (vide Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Tipologia e classificação pesquisa científica

Tipologia	Classificação da pesquisa
Abordagem	Quantitativa
Natureza	Aplicada
Objetivos	Exploratória
Procedimentos	Experimental

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Com isso, a fundamentação teórica possuiu como método a pesquisa bibliográfica, operacionalizada por intermédio da técnica de *desk-research*. Nesse procedimento os dados coletados não são primários, assim cabe ao pesquisador organizar as informações disponíveis para um melhor entendimento do tema estudado (SNYDER, 2019).

Com relação ao método do programa experimental, o mesmo foi dividido em quatro fases distintas sintetizadas de acordo com a Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Programa experimental

Fases	Materiais analisados	Procedimentos
1. Preparação e caracterização dos materiais	RMB, CBCA, CC	Espectrometria de Florescência de raios-X
		Difratometria de raios-X
		Análise granulométrica
		Massa específica real dos grãos
2. Preparação do ligante álcali-ativado	Pastas de CBCA, CC e NaOH	Classificação de resíduo
		Resistência à compressão simples
3. Estudo da interação rejeito /ligante	Misturas de RMB, CBCA, CC e NaOH Misturas RMB e CPV-ARI	Compactação
		Resistência à compressão simples
		Resistência à compressão diametral
		Sucção matricial
		Durabilidade
4. Verificação do índice $\eta/(B_{iv})$	Misturas de RMB, CBCA, CC e NaOH Misturas RMB e CPV-ARI	Pulso ultrassônico
		Análise dos resultados experimentais com o índice $\eta/(B_{iv})$

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

A primeira fase faz alusão à preparação e a caracterização dos materiais utilizados. Com isso, foram avaliadas as características físicas, químicas e mineralógicas do RMB, CBCA e CC.

A segunda fase consistiu na preparação do ligante álcali-ativado por meio da dosagem de diferentes teores de CBCA, CC e concentração de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) da solução ativadora. A partir dessa dosagem, a resistência mecânica à compressão simples pode ser verificada e as variáveis a serem estudadas puderam ser definidas.

Na terceira fase um projeto de experimentos pode ser executado, com base nas definições das fases antecedentes. Isso possibilitou a avaliação do efeito dos fatores controláveis sobre as variáveis respostas analisadas, permitindo elencar os elementos mais influentes.

A quarta fase teve como objetivo verificar a viabilidade de utilização e adequação do índice porosidade/teor volumétrico de ligante ( $\eta/B_{iv}$ ) com a resistência à compressão simples, a resistência à compressão por tração diametral, durabilidade e rigidez.

Como grupo de controle deste trabalho foi utilizado o rejeito de mineração estabilizado por meio do uso de cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI). Com isso, espera-se criar um panorama de comparação para com o comportamento mecânico das misturas álcali-ativadas. Destaca-se ainda, que todos os tratamentos realizados para as misturas álcali-ativadas, no que diz respeito às variáveis peso específico aparente máximo, quantidade de ligante e tempo de cura, também foram realizados no grupo de controle.

Os ensaios apresentados na Tabela 3.2 obedeceram aos procedimentos e normas estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Com isso, as subseções seguintes objetivam elucidar os procedimentos inerentes ao programa experimental elaborado, variáveis estudadas e condições dos ensaios, bem como o projeto de experimentos utilizado e seus níveis de fatores controláveis.

### 3.2.1 Procedimentos experimentais

Esta subseção tem como objetivo apresentar e escrutinar os procedimentos inerentes aos ensaios propostos no programa experimental.

#### 3.2.1.1 Espectrometria de Fluorescência de raios X (FRX)

A espectrometria de fluorescência de raios X foi realizada por meio da análise quantitativa com curva de calibração a partir de padrões de rocha tabelados da *Geostandards*. O preparo da amostra se deu pelo método da pastilha prensada. A presença de voláteis foi avaliada através de técnicas gravimétricas. O espectrômetro de fluorescência de raios-X (XRF) em

funcionamento no laboratório é um WDS e está equipado com tubo de raios-X de Rh, o seu modelo é RIX 2000 da marca Rigaku ®.

#### 3.2.1.2 Difratomia de raios X (DRX)

A análise por difração de raios X foi realizada em um difratômetro de raios X da marca Siemens ® (BRUKER AXS), modelo D-5000 ( $\theta$ - $2\theta$ ) equipado com tubo de ânodo fixo de Cu ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ), operando a 40 kV e 25 mA no feixe primário e monocromador curvado de grafite no feixe secundário.

O procedimento aplicado consiste no método do pó. Na amostra em pó, o material pulverizado ou desagregado é depositado em um porta-amostra específico para pó procurando-se preservar a desorientação das partículas onde todos os minerais ou estruturas cristalinas são analisados.

Os minerais e/ou fases cristalinas foram identificados por meio da medida das distâncias interplanares e das intensidades relativas dos picos nos difratogramas. O banco de dados utilizado foi o *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

As amostras em pó foram analisadas no intervalo angular de 5 a  $75^\circ 2\theta$  em passo de  $0.05^\circ/1s$  utilizando-se fendas de divergência e anti-espalhamento de 2 mm e 0.2 mm no detector.

#### 3.2.1.3 Distribuição granulométrica

A análise granulométrica dos materiais desta pesquisa foi realizada por peneiramento e sedimentação, seguindo o procedimento proposto na NBR 7181 (ABNT, 2018). Além disso, para o caso do rejeito de mineração de bauxita, a análise granulométrica à *laser*, em consonância com a ISO 13320 (2020), também foi empregada. Ensaios por sedimentação em rejeitos de mineração, quando comparados à ensaios a *laser*, subestimam a parcela fina do material. Essa premissa se fundamenta, de acordo com Senft, Masala e Nik (2011) e Jedari *et al.* (2017), na aglutinação das partículas ocasionada pela interação química entre o agente dispersor utilizado e as partículas que compõem o material analisado.

#### 3.2.1.4 Limites de consistência

Na presente pesquisa, a determinação dos limites de consistência foi realizada conforme os procedimentos e recomendações das normativas NBR 6459 (ABNT, 2017a) e NBR 7180 (ABNT, 2016).



### 3.2.1.5 Massa específica real dos grãos

O ensaio para determinação de massa específica real dos grãos do rejeito de mineração de bauxita foi realizado seguindo as especificações da norma NM 52 (ABNT, 2009). Por se tratarem de materiais finos, a CBCA e a CC foram caracterizadas em consonância com os procedimentos da NBR 16605 (ABNT, 2017b).

### 3.2.1.6 Classificação Ambiental

De modo a caracterizar as características do lixiviado dos materiais utilizados nesta pesquisa, fez-se o uso do ensaio de lixiviação. Esse ensaio foi realizado de acordo com os procedimentos indicados na NBR 10.005 (ABNT, 2004b). As análises dos metais foram realizadas pela Técnica de Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-AES) e as demais substâncias (voláteis) pelo Método Padrão de Análise da Água e Esgoto (APHA, AWWA e WEF, 2012).

O ensaio de solubilização foi utilizado com o intuito de caracterizar o solubilizado dos materiais utilizados nesta pesquisa. Para tanto, foram seguidos os procedimentos indicados na NBR 10.006 (ABNT, 2004c). Assim como para as amostras do extrato lixiviado, fez-se o estudo dos metais presentes no extrato solubilizado pela Técnica de Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-AES) e dos voláteis pelo Método Padrão de Análise da Água e Esgoto (APHA, AWWA e WEF, 2012).

### 3.2.1.7 Compactação

O ensaio de compactação foi realizado de acordo com os procedimentos da norma NBR 7182 (ABNT, 2020). Neste ensaio se faz possível a verificação da umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo do material estudado para as energias normal, intermediária e modificada.

### 3.2.1.8 Resistência à compressão simples (RCS)

Este ensaio foi executado seguindo os procedimentos da NBR 5739 (ABNT, 2018b). Para a execução das amostras foram utilizados corpos-de-prova com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. A preparação ocorreu por intermédio da pesagem de cada um dos materiais (RMB, CBCA, CC, água e NaOH), mistura, compactação, desmoldagem, alocação em sacos plásticos e posterior acondicionamento para cura.

A pesagem de todos os componentes foi realizada em uma balança com resolução de 0,01 g. Os primeiros materiais misturados foram o RMB, a CBCA e a CC, com o auxílio de uma colher,

até que a mistura adquirisse uma coloração uniforme. Após isso, separou-se a quantidade necessária de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), na forma de solução de hidróxido de sódio, definida na dosagem e a quantidade de água necessária para completar a umidade ótima da mistura. Inicialmente realizou-se a mistura com a água e após ser notada uma certa uniformidade, adicionou-se o NaOH e, então, se realizou uma nova mistura até que o material estivesse homogêneo.

A mistura foi compactada em três camadas, portanto o material foi pesado para cada uma delas e separado em recipientes com tampa (para minimizar a perda de umidade). Com a sobra do material foram pesadas cápsulas cujo objetivo consistiu na conferência do teor de umidade. Em seguida, se iniciou o processo de moldagem dos corpos-de-prova. A escarificação entre as camadas intermediárias foi realizada, para que houvesse maior aderência entre as mesmas. As formas dos corpos-de-prova foram untadas com desmoldante para facilitação na extrusão.

Após a extrusão o corpo-de-prova foi pesado e, com um paquímetro, suas dimensões foram medidas. O corpo-de-prova foi imediatamente alocado em um saco hermético para evitar variações no teor de umidade. Os corpos de prova eram considerados adequados para teste se atendessem aos seguintes critérios: grau de compactação  $\pm 1\%$  do valor alvo; umidade  $\pm 0,5\%$  do valor alvo; diâmetro  $\pm 0,5$  mm do valor alvo; e a altura  $\pm 1$  mm do valor alvo.

Após o período de cura estipulado, os corpos-de-prova foram retirados do envolvimento plástico 24 horas antes do rompimento, e colocados em imersão em água à temperatura ambiente para minimizar o efeito da sucção. Então, o corpo-de-prova era seco, pesado e por fim era executado o rompimento.

Para o rompimento dos corpos-de-prova foi utilizada uma prensa automática com células de carga de capacidade de 5 kN, 10 kN e 20kN, que eram trocadas de acordo com a previsão de resistência de cada amostra. A velocidade de deformação destes ensaios foi de 1,14 mm por minuto. Como critério de aceitação, foi estipulado que as resistências individuais das duplicatas não deveriam se desviar mais de 15% da resistência média.

#### 3.2.1.9 Resistência à tração por compressão diametral (RCD)

Este ensaio foi executado seguindo os procedimentos da NBR 7222 (ABNT, 2011). A preparação das amostras, bem como os critérios de aceitação, foi idêntica tanto para o ensaio de resistência à compressão simples quanto para o de tração por compressão diametral. O rompimento dos corpos de prova ocorreu de acordo com o procedimento exposto no item 3.2.1.8.

### 3.2.1.10 Durabilidade

Os procedimentos adotados para a realização do ensaio foram baseados na norma da ASTM D 559 (ASTM, 2015). A norma prescreve o método para a determinação de perda de massa, variação de umidade e a variação de volume produzida por ciclos de molhagem e secagem.

Nesse ensaio, os corpos-de-prova possuíam dimensões de 100 mm de diâmetro e 120 mm de altura, atendendo ao que prevê a norma americana (volume de  $944 \pm 11 \text{ cm}^3$ ). Os procedimentos adotados para a confecção dos corpos-de-prova foram idênticos aos utilizados para as amostras moldadas para os ensaios de resistência à compressão simples e tração na compressão diametral: pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, disposição em sacos plásticos e posterior acondicionamento para cura.

As amostras foram compactadas em três camadas dentro do molde de ferro fundido, para que, ao final, se atingisse o peso específico aparente seco definido. Entre as camadas foi realizada a escarificação para a aderência das mesmas. Concluído o processo de moldagem e extrusão, o corpo-de-prova era pesado e medido e, então, as amostras eram imediatamente acondicionadas em sacos herméticos e identificadas.

Após a cura, os corpos-de-prova moldados foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem. Conforme previsto pela norma, cada um dos 12 ciclos apresentou uma duração de 48 horas, distribuídos da seguinte maneira: (i) 5 horas de imersão em água; (ii) 42 horas de secagem em estufa a  $71 \text{ }^\circ\text{C}$  e (iii) 1 hora de intervalo para escovação e pesagem a fim de avaliar a perda de massa.

Segundo a norma (ASTM, 2003), as amostras devem ser escovadas verticalmente por meio de 18 a 20 passadas de escova na lateral do corpo-de-prova, cobrindo-o duas vezes. Além disso, são exigidas quatro escovadas no topo e na base. Cada passada de escova deve ser feita com uma força de 13,3 N. Por esse motivo, a escovação foi realizada sobre uma balança.

### 3.2.1.11 Pulso ultrassônico ( $G_0$ )

Os ensaios de pulso ultrassônico foram realizados com o uso do instrumento PundiLab(+) e envolvem a medição dos tempos de propagação de ondas de compressão e de cisalhamento pelos corpos de prova cilíndricos de modo a se obter uma estimativa do módulo cisalhante a pequeníssimas deformações ( $G_0$ ).

A primeira (compressão) foi induzida pela vibração de transdutores a uma frequência de 54 kHz e a segunda, por sua vez, devia-se à vibração de outros tipos transdutores a 250 kHz. Em

meios considerados não dispersivos o tempo de propagação da onda cisalhante independe da frequência empregada. O procedimento de ensaio se iniciou após o término do período de cura e imersão dos corpos de prova. Primeiramente leu-se o tempo do deslocamento da onda de compressão através 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 respectivas velocidades ( $V_p$  e  $V_s$ ) foram determinadas a partir da relação entre a altura média de cada corpo de prova e o tempo aferido. Foram feitas, ao menos, três medições correspondentes ao tempo  $t_p$ , sendo esse tido como a média das três, e mais de dez relativas ao tempo  $t_s$ . A leitura do  $t_p$  acontece diretamente no instrumento enquanto a leitura do  $t_s$  é realizada na interface computacional do PundiLab(+).

#### 3.2.1.12 Sucção matricial

Com base na premissa de que os corpos de prova do programa experimental se encontravam em uma condição não-saturada, é esperado que um certo nível de sucção esteja presente. Tendo em vista a representatividade da grandeza dessa variável optou-se por aferir medidas de sucção matricial, aquela oriunda das forças capilares existentes no interior da amostra.

Para a medição da sucção matricial fez-se o uso da técnica do papel filtro, devido a sua simplicidade e baixo custo associado. O método consiste no princípio de absorção e equilíbrio que existe quando um material poroso é posto em contato com um papel filtro. O papel filtro passa a absorver certa quantidade de água do solo até que o sistema entre em equilíbrio de sucção. Com a relação entre sucção e umidade do papel filtro (curva de calibração) é possível obter a sucção do solo a partir de uma curva de calibração (Marinho, 1995).

Nesta pesquisa fez-se o uso do papel filtro da marca Whatman N° 42 e da calibração proposta por Chandler *et al.* (1992), de acordo com as Equações (3.1) e (3.2).

$$w > 47\% \rightarrow \text{Sucção (kPa)} = 10^{(6,05-2,48\log w)} \quad (3.1)$$

$$w \leq 47\% \rightarrow \text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,84-0,0622w)} \quad (3.2)$$

O método fornece resultados satisfatórios desde que os procedimentos de ensaio sejam realizados com extrema acurácia. Nesse sentido, posterior ao ensaio de resistência, uma amostra era extraída do corpo de prova com dimensões aproximadas de 5cm de diâmetro e 2,5cm de altura. Dois pedaços de papel filtro, com uma área de aproximadamente 2cm<sup>2</sup>, eram alocados na parte superior da amostra, com o cuidado para que não houvesse a sobreposição dos mesmos.

Cabe destacar que o papel filtro deve ser utilizado diretamente da caixa, na condição seco ao ar. Todo o manuseio do material deve ser realizado com o auxílio de pinças metálicas, de modo a evitar quaisquer alterações em suas características originais.

Após a alocação dos papéis filtros na amostra retirada do corpo de prova, o conjunto era envolto por filme plástico de PVC e então acomodado em um saco hermético com o intuito de garantir que o fluxo de água ocorresse somente entre a amostra e o papel filtro, sem interferências externas.

As amostras eram identificadas e, então, alocadas em uma caixa de isopor tampada por um período de no mínimo 7 dias, período esse necessário para o equilíbrio da sucção entre o solo e o papel filtro. Posterior ao equilíbrio, os papéis filtro eram removidos da amostra e alocados em recipientes plásticos numerados e com tampa. É importante ressaltar que toda a operação deve ser realizada muito rapidamente, dentro de 3 a 5 segundos.

Os conjuntos eram pesados em uma balança de precisão, com resolução mínima de 0,0001 g. Após a pesagem, os papéis eram transferidos para cápsulas com tampa e secos em uma estufa à 60 °C durante 48 horas. Posterior a secagem, os papéis eram novamente pesados e o teor de umidade era calculado. A sucção matricial era então calculada de acordo com as Equações (3.1) e (3.2).

### 3.2.2 Projeto de experimentos

O projeto de experimentos consiste na projeção de qualquer tarefa que tenha como objetivo descrever e explicar a variação de informações sob condições hipotetizadas para refletir sua variação. O termo é geralmente associado a experimentos em que o projeto introduz condições que afetam diretamente a variação (MDEGE *et al.*, 2014).

Na sua forma mais simples, um experimento visa prever o resultado introduzindo uma alteração das pré-condições, representada por uma ou mais variáveis independentes, também conhecidas como variáveis de entrada. A mudança em uma ou mais variáveis independentes geralmente tem a hipótese de resultar em uma alteração em uma ou mais variáveis dependentes, também conhecidas como variáveis de saída ou de resposta (GLAVAN *et al.*, 2019).

O projeto experimental pode ainda identificar variáveis de controle que devem ser mantidas constantes para evitar que fatores externos afetem os resultados. O projeto envolve não apenas a seleção de variáveis independentes, dependentes e de controle adequadas, mas o planejamento da entrega do experimento sob condições estatisticamente ideais, dadas as restrições de recursos

disponíveis (MONTGOMERY, 2017). Existem várias abordagens para determinar o conjunto de pontos de projeto (combinações únicas das configurações das variáveis independentes) a serem usadas no experimento.

As principais preocupações no projeto experimental incluem o estabelecimento de validade, confiabilidade e replicabilidade. Por exemplo, essas preocupações podem ser parcialmente tratadas escolhendo cuidadosamente a variável independente, reduzindo o risco de erro de medição e garantindo que a documentação do método seja suficientemente detalhada. As preocupações relacionadas incluem a obtenção de níveis adequados de poder estatístico e sensibilidade (GLAVAN *et al.*, 2019; MDEGE *et al.*, 2014).

Para estudar o efeito de um fator é preciso que se tenha no mínimo dois níveis. Dessa forma, o fatorial “2k” é o mais econômico tipo de experimento fatorial. O número de pontos experimentais cresce numa progressão geométrica de razão 2. O “2k” é útil para investigar simultaneamente vários fatores para posteriormente afunilar a investigação naqueles que se mostram mais relevantes (MONTGOMERY, 2017). O nome dado para esse experimento é “*screening designs*” ou “*screening experiments*” (GLAVAN *et al.*, 2019).

O fatorial “2k” é interessante para: (i) estudar poucos fatores fazendo repetições de cada ponto experimental; (ii) estudar vários fatores com uma única repetição para cada ponto experimental; (iii) estudar “k” fatores com mais de uma repetição; (iv) estudar k fatores a partir da fração do “2k”; e (v) estudar “k” fatores quantitativos em um esquema de planejamento evolucionário de experimento (MONTGOMERY, 2017).

Os experimentos fatoriais “2k” são uma categoria especial dos experimentos fatoriais gerais. Essa nomenclatura é utilizada para indicar que são estudados “k” fatores, cada um deles com dois níveis, de forma completamente cruzada, perfazendo “p” pontos experimentais (GARUD; KARIMI; KRAFT, 2017). Esses projetos são a base para os planejamentos experimentais mais utilizados em pesquisas e em processos produtivos (MONTGOMERY, 2017), dentre eles, pode-se destacar o planejamento composto central.

A abordagem experimental aqui empregada está embasada em conceitos estatísticos de projeto e análise de experimentos os quais permitem a avaliação dos efeitos dos fatores controláveis e suas interações nas variáveis respostas analisadas. As subseções subsequentes apresentam as variáveis fixadas e controladas aplicadas na realização desta pesquisa.

### 3.2.2.1 Variáveis fixadas

As variáveis da terceira fase foram divididas em independentes e dependentes. As primeiras estão relacionadas ao objetivo dessa pesquisa, ou seja, ao estudo da influência sobre as variáveis dependentes (resistência à compressão e tração por compressão diametral, perda de massa acumulada por intermédio de ensaios de durabilidade e rigidez inicial). As variáveis independentes são divididas ainda, em fixadas e controladas, sendo as fixadas: (i) umidade; (ii) tipo de agentes estabilizadores; (iii) relação agente estabilizador/agente estabilizador ou ligante/ligante; (iv) concentração do ativador alcalino; (v) tipo de ativador alcalino; (vi) temperatura de cura; e (vii) procedimentos para realização dos ensaios.

Para o caso da umidade se optou por utilizar a umidade ótima proveniente da curva de compactação de energia modificada da mistura dos materiais (vide Figura 4.3). Com isso, a umidade utilizada nos ensaios de análise mecânica foi fixada em 26,86%. A energia modificada foi escolhida em virtude do maior grau de compactação e conseqüente resistência associada a mesma.

A escolha do teor ótimo de umidade é alicerçada na seguinte premissa, quando água é adicionada a um solo seco, as partículas absorvem uma película de água. Uma certa quantidade de água adicionada faz com que a película se torne mais espessa e permita que as partículas de solos deslizem uma sobre as outras. Se a umidade presente no solo está acima do valor ótimo, a água ocupará o lugar das partículas de solo, resultando na diminuição da densidade. Por outro lado, caso o teor de umidade seja defasado e lubrificação não seja completa, as partículas sólidas não conseguirão um empacotamento apropriado, deixando vazios na massa de solo.

Para que a relação ligante/ligante pudesse ser mantida constante ao longo da pesquisa, amostras com diferentes relações de CBCA/CC e concentrações molares de hidróxido de sódio foram executadas, de acordo com a segunda fase do programa experimental (Item 4.1.4). Com isso a relação ligante/ligante foi fixada em 70% de CBCA para 30% de CC, com uma concentração de álcalis de 3,68%.

A escolha do hidróxido de sódio como ativador alcalino, se justifica na literatura atual inerente ao processo de álcali-ativação (ALAM; DAS; RAO, 2019; KUA *et al.*, 2016; LI *i*, 2019; MORSY *et al.*, 2014; SUKMAK; HORPIBULSUK; SHEN, 2013a). Os autores supramencionados convergem na ideia de menor custo e menor impacto ambiental do hidróxido de sódio (NaOH), quando comparado a outros ativadores como o silicato de sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), silicato de potássio (K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) e hidróxido de potássio (KOH). Além disso, o hidróxido de sódio

apresenta a capacidade de potencializar os valores de resistência mecânica do produto final do processo de álcali-ativação (GUO; SHI; DICK, 2010; HOY *et al.*, 2016; PHUMMIPHAN *et al.*, 2016; SHEKHAWAT; SHARMA; SINGH, 2019).

A influência da temperatura em um produto ligante álcali-ativado vêm sendo extensivamente estudada na literatura vigente (ALAM; DAS; RAO, 2019; HOY *et al.*, 2016; KUA *et al.*, 2016; SHEKHAWAT; SHARMA; SINGH, 2019; SUKMAK; HORPIBULSUK; SHEN, 2013a). Visto que a lacuna de conhecimento inerente ao efeito da temperatura frente a produtos álcali-ativados já foi amplamente explorada, optou-se por fixar a temperatura desta pesquisa em 23°C, de modo a representar a temperatura ambiente.

Uma síntese das variáveis fixadas utilizadas nessa pesquisa é apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Variáveis fixadas

Variável fixada	Níveis
Teor de umidade	26,86%
Agentes estabilizadores	CBCA e CC
Relação CBCA/CC	70/30
Concentração de álcalis (Na <sub>2</sub> O)	3,68%
Ativador alcalino	NaOH
Temperatura de cura	23°C

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

### 3.2.2.2 Variáveis controláveis

As variáveis independentes controláveis foram definidas como: (i) peso específico aparente seco; (ii) relação rejeito/agentes estabilizadores; e (iii) tempo de cura. O estabelecimento desses níveis, para cada um dos fatores, seguiu critérios distintos, os quais estão consonância com procedimentos e a literatura da área geotécnica.

A variável condizente ao peso específico aparente seco teve como base o ensaio de compactação de energia modificada. Fato posto, dois valores distintos de 15 kN/m<sup>3</sup> e 13 kN/m<sup>3</sup> foram selecionados, representando o peso específico aparente seco máximo (ensaio de Proctor com energia modificada) e uma dedução para todas as relações de rejeito/material estabilizante.

A definição das relações rejeito/agentes estabilizadores teve como base pesquisas que aplicaram o processo de estabilização química e ou álcali-ativação em rejeitos de mineração de bauxita (BELEM; BENZAAZOUA, 2004; BENZAAZOUA *et al.*, 2008; DESOGUS *et al.*, 2013; KUSHWAHA; KISHAN, 2016; NEHDI; TARIQ, 2007), além de testes preliminares com substituições de 5%, 15% e 30%, onde a substituição de 5% não demonstrou resultados



satisfatórios. Com isso, de modo a auferir uma resistência considerável sem tornar a mistura uma substituição plena do material a ser estabilizado, as relações foram definidas em 85% para 15% e 70% para 30% de rejeito e ligante respectivamente.

Os tempos de cura desta pesquisa foram segmentados em 7 e 28 dias, com o objetivo de avaliar o ganho inicial e o ganho gradativo de resistência da mistura. Ainda, o processo de cimentação por meio de reações pozolânicas é normalmente lento, e, com isso, longos períodos de cura são necessários para avaliar o desenvolvimento da cimentação da mistura (HE, 2000; HORPIBULSUK; RACHAN; SUDDEEPPONG, 2011; ROJAS; CABRERA, 2002). Entretanto, devido a otimização ocasionada pelo processo de álcali-ativação, a análise aqui mencionada deve ser também realizada em períodos de tempo mais curtos (DUXSON *et al.*, 2005; JAARSVELD *et al.*, 2000; KUMAR; KUMAR; MEHROTRA, 2007; LI; YI, 2020; SHEKHAWAT; SHARMA; SINGH, 2019).

Uma síntese das variáveis controladas utilizadas nesta pesquisa é apresentada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Variáveis controladas

Variáveis controladas	Níveis
Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> )	15 e 13
Relação rejeito/agentes estabilizadores	85/15 e 70/30
Tempo de cura (dias)	7 e 28

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Visto os parâmetros metodológicos, o capítulo seguinte se centra na análise e discussão dos resultados. Assim, questões relacionadas à caracterização dos materiais e do projeto de experimentos são vistas detalhadamente. O capítulo encontrará seu fim com a discussão acerca das relações com o índice  $\eta/Biv$ .

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Esta subseção tem como objetivo apresentar e discutir os resultados inerentes a caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa, sendo eles: rejeito de mineração de bauxita, cinza do bagaço de cana-de-açúcar, cal de carbureto, hidróxido de sódio e ligante álcali-ativado.

#### 4.1.1 Rejeito de mineração de bauxita (RMB)

A curva de distribuição granulométrica do rejeito de mineração de bauxita é apresentada na Figura 4.1. Realizaram-se dois tipos de ensaio, um com o uso de defloculante e um somente com o uso de água destilada, de modo a analisar o comportamento do rejeito frente à possíveis reações químicas com o agente dispersante.

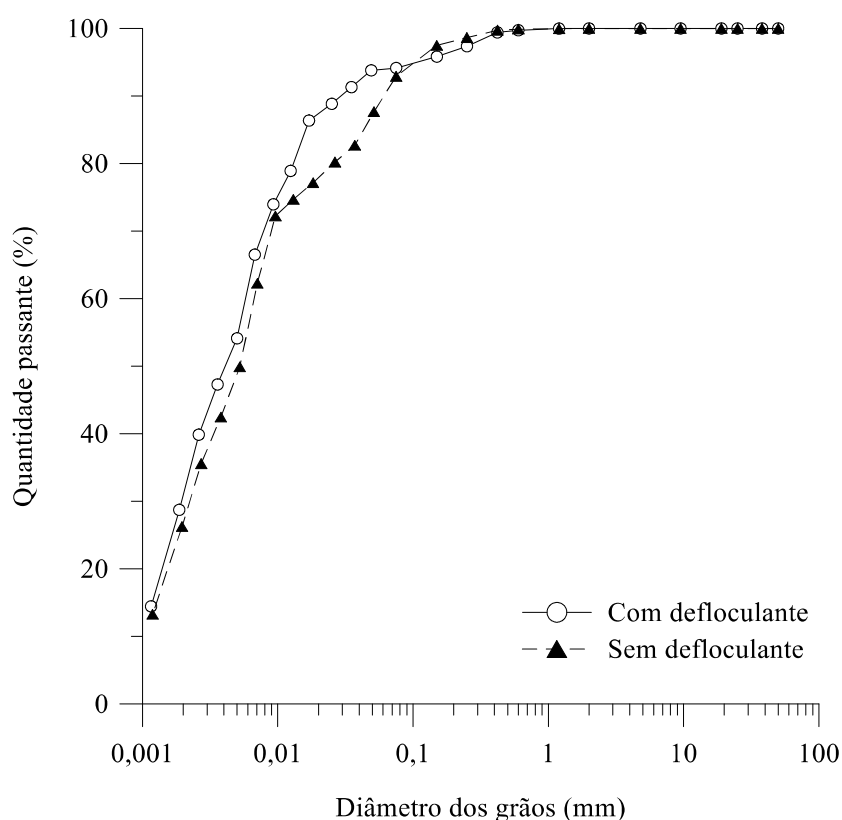


Figura 4.1: Curva granulométrica do rejeito de mineração de bauxita (Elaborado pelo Autor, 2020)

É possível notar, por meio da análise da Figura 4.1, que a ação do defloculante não foi um fator de grande influência nos resultados, devido à similaridade dos valores para ambos os ensaios. Além disso, de acordo com a classificação da normativa D2487 (ASTM, 2017), o rejeito de

mineração foi classificado como uma silte (ML). A Tabela 4.1 apresenta uma síntese das demais características físicas do material estudado.

Tabela 4.1: Propriedades físicas rejeito de mineração de bauxita

Propriedade	Resultado	Normativa
Limite de liquidez (%)	36,94	NBR 6459
Limite de plasticidade (%)	33,30	NBR 7180
Índice de plasticidade	3,64	-
Massa específica real dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	3,05	NBR 7181
Areia grossa (%) – 0,6 ≤ d < 2 mm	0	
Areia média (%) – 0,2 ≤ d < 0,6 mm	3	
Areia fina (%) – 0,06 ≤ d < 0,2 mm	3	NBR 7181
Silte (%) – 0,002 ≤ d < 0,06 mm	64	
Argila (%) – d < 0,002 mm	30	
Classificação	ML	ASTM D2487

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

No que diz respeito ao ensaio de compactação, inicialmente foram realizados testes com a energia normal, intermediária e modificada, de modo a gerar um panorama de caracterização completo do comportamento do material. A Figura 4.2 apresenta as curvas de compactação, enquanto a Tabela 4.2 sintetiza os valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima de cada energia analisada.

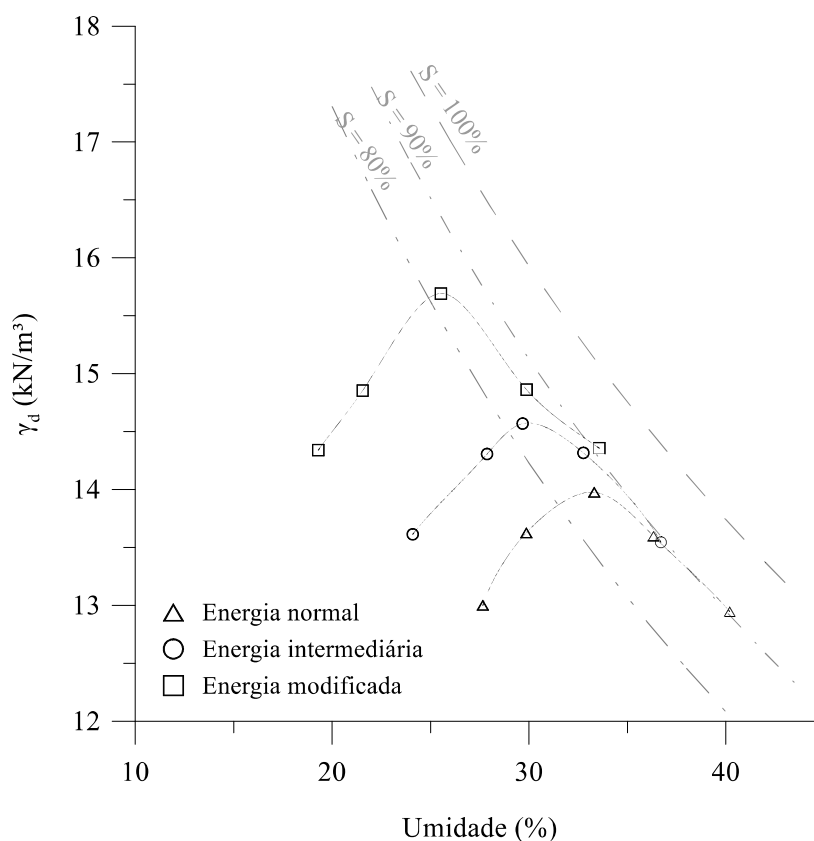


Figura 4.2: Curvas de compactação rejeito de mineração de bauxita (Elaborado pelo Autor, 2020)

Tabela 4.2: Ensaio de compactação rejeito de mineração de bauxita

Energia de ensaio	Peso específico aparente seco máximo (kN/m <sup>3</sup> )	Umidade ótima (%)
Normal	13,98	33,82
Intermediária	14,57	29,68
Modificada	15,69	25,53

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Os resultados da caracterização física do rejeito de mineração de bauxita, estão de acordo com a faixa de valores encontrados na literatura para esse tipo de material<sup>2</sup>.

Com o intuito de obter peso específico e umidade para a estabilização do material, foram realizados ensaios de compactação das misturas de rejeito com as adições pré-definidas de precursores, sendo elas 15% e 30%. Destaca-se que os ensaios de compactação das misturas foram realizados somente com a energia modificada, tendo em vista o aferimento do maior peso específico e, conseqüentemente, os mais elevados valores de resistência. A Figura 4.3 mostra

<sup>2</sup> Para mais informações, ver Item 2.2.1.

as curvas de compactação, enquanto a Tabela 4.3 sintetiza os valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima de cada mistura analisada.

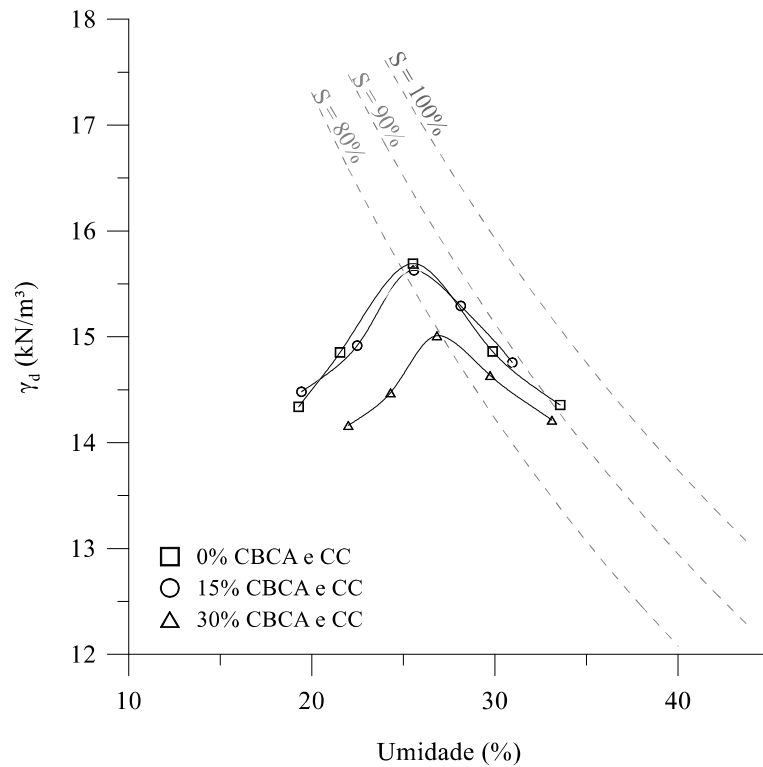


Figura 4.3: Curvas de compactação misturas (Elaborado pelo Autor, 2020)

Tabela 4.3: Curvas de compactação misturas

Mistura	Peso específico aparente seco máximo (kN/m³)	Umidade ótima (%)
15% CBCA e CC	15,63	25,58
30% CBCA e CC	15,00	26,84

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Tendo em vista a exequibilidade dos corpos de prova, para ambas misturas, o peso específico aparente seco e a umidade ótima escolhidos partiram dos resultados encontrados para a mistura com adição de 30%, pois o valor de peso específico aparente seco máximo dessa mistura ( $\gamma_{dmax} = 15,00 \text{ kN/m}^3$ ) está contido na extensão da curva de compactação da mistura de 15% ( $\gamma_{dmax} = 15,63 \text{ kN/m}^3$ ).

A composição química do rejeito de mineração de bauxita foi determinada por meio da técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), cujos valores são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Composição química rejeito de mineração de bauxita (% em peso)

Elemento	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI*
Rejeito	18,2	21,6	30,4	0,15	<0,10	1,47	10,9	<0,10	5,79	<0,10	9,73

\*LOI = Loss on ignition (Perda no fogo – 1000°C)

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

O resultado da análise química revelou que o rejeito de mineração de bauxita é composto principalmente pelos óxidos de ferro (30,4%), alumínio (21,6%), silício (18,2%), sódio (10,9%), além de titânio (5,79%), cálcio (1,47%), e uma parcela residual de outros óxidos (1,91%). Composições químicas similares foram encontradas na literatura, de acordo com o Item 2.2.1.

A caracterização do lixiviado do rejeito de mineração de bauxita foi realizada de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004a). A Tabela 4.5 apresenta os resultados desse ensaio.

Tabela 4.5: Análise do lixiviado rejeito de mineração de bauxita

Elemento	Limite normativo (mg/L)	Contido no lixiviado (mg/L)
Prata (Ag)	5	0,11
Arsênio (As)	1	0,08
Bário (Ba)	70	-
Cádmio (Cd)	0,5	0,02
Cromo (Cr)	5	0,19
Mercúrio (Hg)	0,1	0,09
Chumbo (Pb)	1	0,16
Selênio (Se)	1	0,41

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

A análise do lixiviado denotou que nenhum dos elementos encontrados ultrapassou o limite normativo exposto pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a). Por sua vez, a análise do solubilizado é exposta na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Análise do solubilizado rejeito de mineração de bauxita

Elemento	Limite normativo (mg/L)	Contido no solubilizado (mg/L)
Prata (Ag)	0,05	<b>0,11</b>
Alumínio (Al)	0,2	<b>817</b>
Arsênio (As)	0,01	<b>0,08</b>
Bário (Ba)	0,7	*
Cádmio (Cd)	0,005	<b>0,023</b>
Cromo (Cr)	0,05	<b>0,58</b>
Cobre (Cu)	2	0,11
Ferro (Fe)	0,3	<b>5,46</b>
Merúrio (Hg)	0,001	<b>0,085</b>
Manganês (Mn)	0,1	-
Sódio (Na)	200	<b>454</b>
Chumbo (Pb)	0,01	<b>0,19</b>
Selênio (Se)	0,01	<b>0,41</b>
Zinco (Zn)	5	0,02
Cloreto (Cl)	250	3,42
Surfactantes	0,5	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

O resultado da análise do lixiviado revelou que os elementos: prata (Ag), alumínio (Al), arsênio (As), cádmio (Cd), cromo (Cr), ferro (Fe), mercúrio (Hg), sódio (Na), chumbo (Pb) e selênio (Se) ultrapassaram os limites estipulados pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a). Sendo assim, o rejeito de mineração de bauxita foi classificado como um resíduo não-perigoso não-inerte classe II A. Os resíduos não inertes, Classe II A, são os resíduos que não se apresentam como inflamáveis, corrosivos, tóxicos, patogênicos, e nem possuem tendência a sofrer uma reação química. Entretanto, os materiais desta classe podem apresentar propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

#### 4.1.2 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA)

Uma síntese das propriedades físicas da CBCA é apresentada Tabela 4.7. Para os fins desta pesquisa, todo o material foi passado na peneira de malha #200 ( $d < 0,075\text{mm}$ ) de modo a aumentar sua superfície específica e conseqüentemente sua reatividade.

Tabela 4.7: Propriedades físicas cinza do bagaço de cana-de-açúcar

Propriedade	Resultado	Normativa
Limite de liquidez (%)	-	NBR 6459
Limite de plasticidade (%)	-	NBR 7180
Índice de plasticidade	-	-
Superfície específica (SSA)	125,15 m <sup>2</sup> /g	BET
Massa específica real dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,08	NBR 7181
Areia grossa (%) – $0,6 \leq d < 2\text{ mm}$	0	
Areia média (%) – $0,2 \leq d < 0,6\text{ mm}$	0	
Areia fina (%) – $0,06 \leq d < 0,2\text{ mm}$	7	NBR 7181
Silte (%) – $0,002 \leq d < 0,06\text{ mm}$	92	
Argila (%) – $d < 0,002\text{ mm}$	1	

Propriedade	Resultado	Normativa
Classificação	ML	ASTM D2487

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Os resultados da composição química da CBCA foram obtidos por meio do ensaio de fluorescência de raios-X (FRX), e estão apresentados na Tabela 4.8

Tabela 4.8: Composição química cinza do bagaço de cana-de-açúcar (% em peso)

Elemento	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>
CBCA	72,19	15,41	2,34	0,07	1,24	2,67	3,48	4,49	0,25	0,10	0,59

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

O resultado da análise química revelou que a CBCA é composta majoritariamente pelos óxidos de silício (72,19%), alumínio (15,41%) e sódio (10,9%). Os resultados obtidos por meio da difratometria de raios-X (DRX) são demonstrados na Figura 4.4.

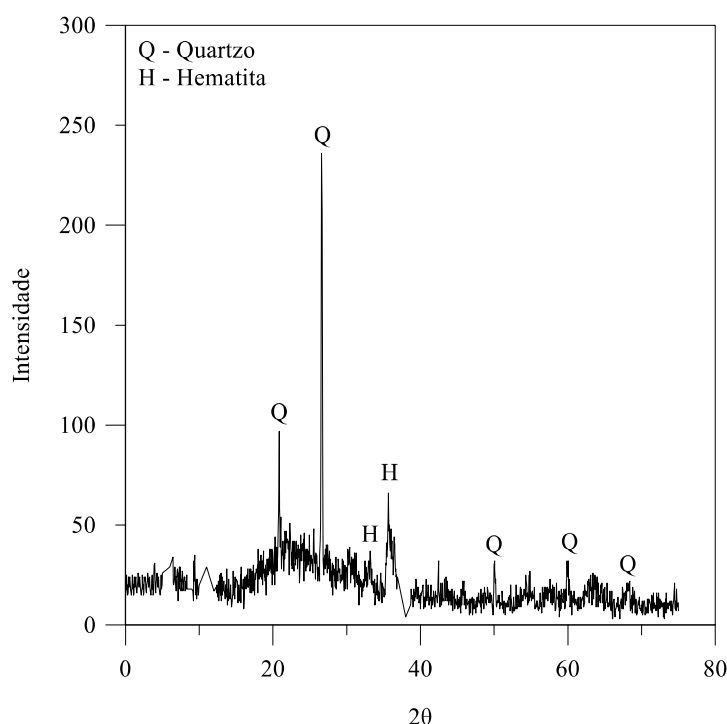


Figura 4.4: DRX cinza do bagaço de cana-de-açúcar (Elaborado pelo Autor, 2020).

O difratograma da Figura 4.4 evidencia a natureza semicristalina da CBCA, o que denota a possibilidade do uso desse material como uma pozolana. Além disso, é possível notar a presença de dois minerais principais na composição do material, sendo eles o quartzo (SiO<sub>2</sub>) e a hematita



(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Os resultados encontrados para a CBCA, tanto para a caracterização física como para a química, vão de encontro aos valores demonstrados na literatura, de acordo com o Item 2.4.1. A caracterização do lixiviado da CBCA foi realizada de acordo com os procedimentos da NBR 10.004 (ABNT, 2004a). A Tabela 4.9 apresenta os resultados desse ensaio.

Tabela 4.9: Análise do lixiviado cinza do bagaço de cana-de-açúcar

Elemento	Limite normativo (mg/L)	Contido no lixiviado (mg/L)
Prata (Ag)	5	0,12
Arsênio (As)	1	0,13
Bário (Ba)	70	0,66
Cádmio (Cd)	0,5	0,03
Cromo (Cr)	5	0,13
Mercúrio (Hg)	0,1	<b>0,14</b>
Chumbo (Pb)	1	0,22
Selênio (Se)	1	0,67

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

A análise do lixiviado da CBCA indicou que apenas um dos elementos encontrados ultrapassou o limite normativo exposto pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a), sendo ele o mercúrio (Hg). Por sua vez, a análise do solubilizado é exposta na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Análise do solubilizado cinza do bagaço de cana-de-açúcar

Elemento	Limite normativo (mg/L)	Contido no solubilizado (mg/L)
Prata (Ag)	0,05	<b>0,12</b>
Alumínio (Al)	0,2	<b>4,22</b>
Arsênio (As)	0,01	<b>0,09</b>
Bário (Ba)	0,7	*
Cádmio (Cd)	0,005	<b>0,023</b>
Cromo (Cr)	0,05	<b>0,09</b>
Cobre (Cu)	2	0,12
Ferro (Fe)	0,3	<b>0,71</b>
Mercúrio (Hg)	0,001	<b>0,1</b>
Manganês (Mn)	0,1	-
Sódio (Na)	200	11,85
Chumbo (Pb)	0,01	<b>0,17</b>
Selênio (Se)	0,01	<b>0,39</b>
Zinco (Zn)	5	0,02
Cloreto (Cl)	250	6,29
Surfactantes	0,5	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

O resultado da análise do lixiviado revelou que os elementos prata, alumínio, arsênio, cádmio, cromo, ferro, mercúrio, chumbo e selênio ultrapassaram os limites estipulados pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a). Assim, a CBCA foi classificada como um resíduo perigoso classe I. Resíduos

perigosos classe I, são materiais que em função de suas propriedades físico-químicas e infectocontagiosas, podem apresentar risco à saúde pública e ao meio ambiente. Podem ser condicionados, armazenados temporariamente, incinerados, tratados ou dispostos em aterros sanitários próprios para receber resíduos perigosos. Por fim, apresentam pelo menos uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

#### 4.1.3 Cal de carbureto (CC)

A cal de carbureto utilizada nesta pesquisa foi aquela passante na peneira de malha #200 ( $d < 0,075\text{mm}$ ), de modo a aumentar a superfície específica e conseqüentemente a reatividade do material. O material passante na peneira era depositado em uma embalagem hermética, com o intuito de evitar o contato com o ar. Quando exposto ao ambiente, o óxido de cálcio da CC reage com o dióxido de carbono presente no ar; esse fenômeno denomina-se carbonatação e ocasiona a formação de carbonato de cálcio. As propriedades físicas da CC são apresentadas na Tabela 4.11 e a composição química é apresentada na Tabela 4.12.

Tabela 4.11: Propriedades físicas da cal de carbureto

Propriedade	Resultado	Norma
Peso específico real dos grãos ( $G_s$ )	2,19 g/cm <sup>3</sup>	NBR 6508
Superfície específica (SSA)	22,60 m <sup>2</sup> /g	BET
Areia fina (0,06 mm < d < 0,2 mm)	82%	Análise granulométrica à laser
Silte (0,002 mm < d < 0,06 mm)	16%	
Argila (d < 0,002 mm)	2%	
Classificação USCS	SP	ASTM D2487

Fonte: Adaptado de Saldanha *et al.* (2018)

Tabela 4.12: Propriedades químicas da cal de carbureto

Elemento	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	LOI*
Cal de carbureto	1,47	0,35	0,13	0,40	0,2	72,0	0,01	-	25,2

\*LOI = Loss on ignition (Perda no fogo – 1000°C)

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Deve ser ressaltado que a propriedade da superfície específica é extremamente importante na caracterização de resíduos, principalmente no que diz respeito à reatividade do material. Os elevados resultados de superfície específica da CC utilizada neste estudo, podem ser indicativos de uma grande reatividade em potencial do material.

O resultado da análise química revelou que a CC é composta majoritariamente pelo óxido de cálcio (74%). A Figura 4.5 apresenta o difratograma da CC, evidenciando a natureza semicristalina do material.

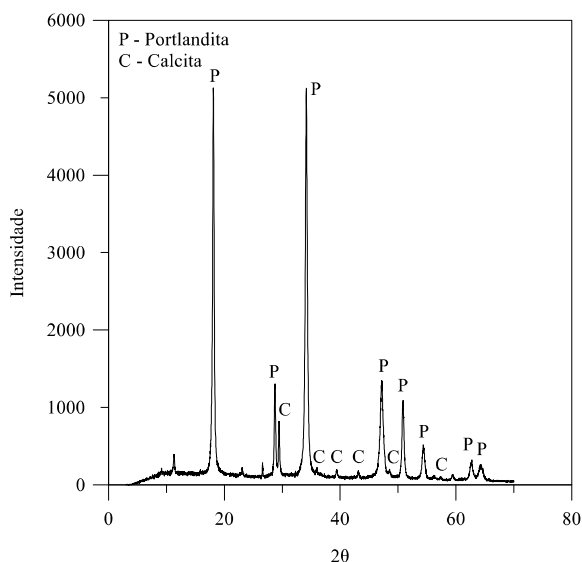


Figura 4.5: Difratograma da cal de carbureto (Elaborado pelo autor, 2020)

O difratograma da CC denota a presença majoritária do mineral portlandita, o qual corresponde à fase cristalina do hidróxido de sódio presente no material. A presença de calcita, oriunda do processo de carbonatação do hidróxido de cálcio, também foi detectada nos resultados. Entretanto, a quantia de carbonato de cálcio em relação ao hidróxido de cálcio é insignificante.

#### 4.1.4 Ligante álcali-ativado

De modo a avaliar uma grande gama de relações CBCA/CC, foram estudadas relações ligante/ligante de material desde 10/90 até 90/10 com incrementos graduais de 10% para todas as misturas.

A concentração de NaOH empregada foi variada de 0,5M à 8M, a diferentes concentrações de álcalis (%Na<sub>2</sub>O) de 1,88 a 23,80. A concentração de álcalis é obtida por meio da razão entre o peso total de álcalis e o peso total do ligante. Estudos anteriores (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ et al., 2006; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2003) apontam que sistemas de alto teor de cálcio apresentam suas maiores resistências mecânicas frente a baixas concentrações de álcalis, devido a fraca solubilidade da portlandita [Ca(OH)<sub>2</sub>] em meios fortemente alcalinos.

A relação líquido-sólido (L/S) foi definida com base na menor quantidade de solução alcalina necessária para garantir a trabalhabilidade e homogeneidade das misturas. Essa relação foi fixada em 0,51 para todas as misturas estudadas.

Visto a significativa coletânea literária no que pesa ao efeito da temperatura em produtos álcali-ativados (ALAM; DAS; RAO, 2019; HOY et al., 2016; KUA *et al.*, 2016; SHEKHAWAT; SHARMA; SINGH, 2019; SUKMAK; HORPIBULSUK; SHEN, 2013a), optou-se por fixar a temperatura em 23°C, para ser fiel à ambiente. Por fim, com base na otimização de resistência ocasionada pelo processo de álcali-ativação, a análise do tempo de cura foi fixada em sete dias. Os corpos de prova foram ensaiados frente à sua resistência à compressão simples e seus resultados são expressos graficamente na Figura 4.6.

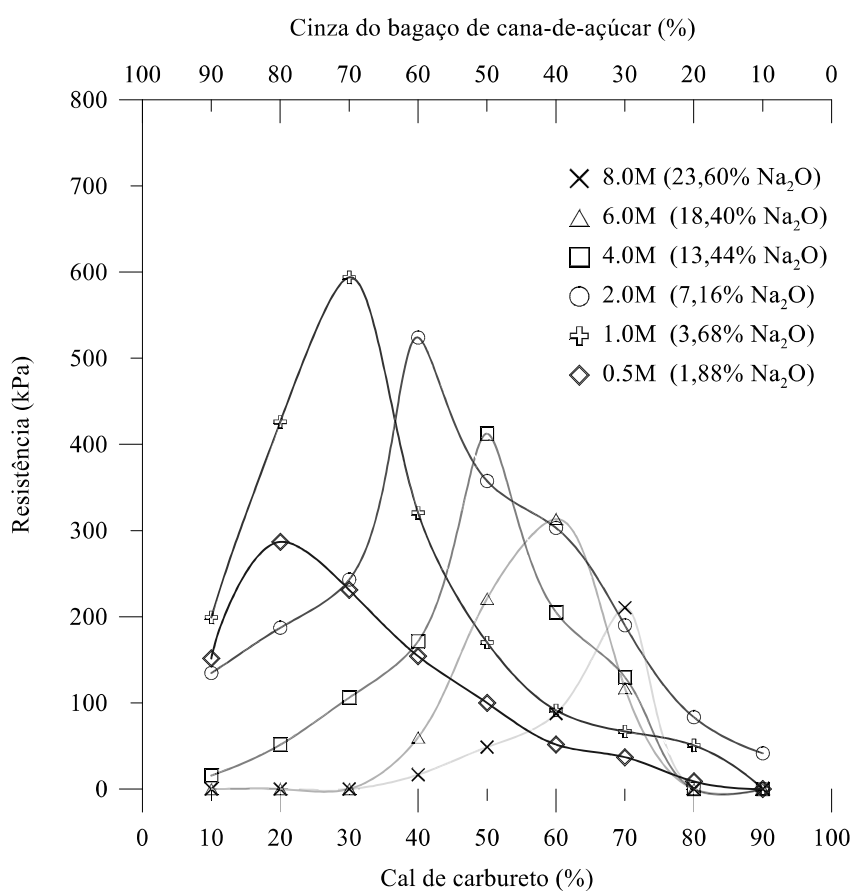


Figura 4.6: Relação CBCA/CC para diferentes concentrações de NaOH (Elaborado pelo Autor, 2020)

De maneira geral, observa-se um acréscimo da resistência com o aumento da concentração molar até um ponto ótimo de 1M e a partir desse marco a resistência decresce com o aumento da concentração do ativador. Esse comportamento está diretamente atrelado a fraca solubilidade da portlandita  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  em meios fortemente alcalinos.

Os maiores valores de resistência foram evidenciados nas amostras compostas por 70% de CBCA e 30% de CC, com concentração molar de 1M e concentração de álcalis de 3,86%. Foi constatado que o pico de resistência das curvas se desloca à direita com o aumento da

concentração do ativador, ou seja, uma maior quantidade de CC é necessária quando a concentração da solução é aumentada. Entretanto, deve-se considerar que quantias de cal muito elevadas podem levar a patologias como a carbonatação.

A literatura vigente, no que tange a álcali-ativação de sistemas com alto teor de cálcio, afirma que os teores ótimos de material são diretamente dependentes da composição química dos precursores e da concentração molar dos ativadores. Usualmente, concentrações molares e adições de cálcio de até 3M e 30%, respectivamente, resultam na otimização cinemática das reações e no aumento da magnitude da resposta mecânica de sistemas ligantes álcali-ativados com alto teor de cálcio (REIG *et al.*, 2013; TEMUJIN; RIESSEN, 2009; TEMUJIN; WILLIAMS; VAN RIESSEN, 2009).

Os resultados de resistência a compressão simples foram validados por meio da metodologia estatística de análise de variância (ANOVA) mediante a um modelo de dois fatores (TWO-WAY ANOVA) baseado na comparação das médias das diferentes amostras.

A significância estatística aplicada nesta pesquisa foi de 5% ( $\alpha = 0,05$ ) e, portanto, a confiabilidade do estudo é de 95%. Os fatores controláveis consistiram em (i) relação CBCA/CC, com 9 níveis de significância e (ii) concentração alcalina da solução, com 6 níveis de significância. A partir da multiplicação dos fatores controláveis, obteve-se um total de 54 tratamentos. Para cada um dos tratamentos foram realizadas 2 repetições, ou seja, 108 ensaios. A Tabela 4.13 apresenta uma síntese com as informações dos fatores controláveis.

Tabela 4.13: Informações dos fatores controláveis

Fator	Níveis	Valores
Relação CBCA/CC	9	9; 4; 2,33; 1,5; 1; 0,67; 0,43; 0,25; 0,11
Concentração solução (M)	6	0,5; 1; 2; 4; 6; 8

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Os resultados da análise estatística de variância (tabela ANOVA) para a variável resposta de resistência à compressão simples são apresentados na Tabela 4.14. Essa análise teve como base a refutação da hipótese nula, com um nível de significância de 5% e uma confiabilidade de 95%, onde o valor-p ( $0,000 < \alpha (0,05)$ ).

Tabela 4.14: Análise de variância

Fonte	Graus de liberdade (GL)	Somas ajustadas dos quadrados (SQ)	Quadrados médios ajustados (MQ)	Valor-F	Valor-p
CBCA/CC	8	594918	74364,8	232,39	0,000

Fonte	Graus de liberdade (GL)	Somas ajustadas dos quadrados (SQ)	Quadrados médios ajustados (MQ)	Valor-F	Valor-p
Molaridade	5	499171	99834,2	311,98	0,000
CBCA/CC*Molaridade	40	1122368	28059,2	87,68	0,000
Erro	54	17280	320,0		
Total	107	2233738			

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

A ANOVA revelou que todos os fatores controláveis, bem como sua interação, influenciam significativamente a resistência a compressão das amostras, dentro do intervalo de níveis avaliados, com 95% de confiança. Por sua vez, o valor-F indica que o fator que mais teve influência sobre a variável resposta foi a molaridade (311,98), seguido da relação CBCA/CC (232,39) e por fim, sua interação (87,68).

Tendo em vista que os fatores controláveis e sua interação apresentam uma influência significativa na variável resposta, o próximo passo da análise estatística consistiu em uma comparação múltipla de médias dos diferentes tratamentos. Essa comparação teve como objetivo encontrar os níveis dos fatores controláveis que otimizassem a resposta mecânica das amostras em termos de resistência à compressão simples.

A comparação múltipla de médias foi realizada pelo Método de Tukey. Esse método é utilizado em análises ANOVA de modo a criar intervalos de confiança para todas as diferenças pareadas entre as médias dos níveis dos fatores, controlando a taxa de erro global para um nível de significância especificado. A Tabela 4.15 apresenta os resultados da comparação múltipla de médias frente à resistência a compressão das amostras analisadas.

Tabela 4.15: Comparação múltipla de médias pelo Método de Tukey

Interação CBCA/CC*Molaridade	Repetições	Média	Agrupamento <sup>1</sup>
2,33 1,0	2	593,835	A
1,50 2,0	2	524,003	A
4,00 1,0	2	426,299	B
1,00 4,0	2	412,388	B
1,00 2,0	2	357,502	B C
1,50 1,0	2	320,705	C
0,67 6,0	2	313,312	C D
0,67 2,0	2	303,118	C D E
4,00 0,5	2	286,899	C D E F
2,33 2,0	2	243,021	D E F G
2,33 0,5	2	231,054	E F G
1,00 6,0	2	221,019	F G H
0,43 8,0	2	210,514	F G H I
0,67 4,0	2	205,179	G H I J
9,00 1,0	2	199,210	G H I J

Interação CBCA/CC*Molaridade	Repetições	Média	Agrupamento <sup>1</sup>
0,43 2,0	2	189,939	G H I J K
4,00 2,0	2	187,226	G H I J K
1,50 4,0	2	171,535	G H I J K L
1,00 1,0	2	170,093	G H I J K L
1,50 0,5	2	154,192	H I J K L M
9,00 0,5	2	151,464	H I J K L M
9,00 2,0	2	134,693	I J K L M N
0,43 4,0	2	129,839	J K L M N
0,43 6,0	2	117,097	K L M N O
2,33 4,0	2	105,962	L M N O P
1,00 0,5	2	99,882	L M N O P
0,67 1,0	2	91,399	M N O P Q
0,67 8,0	2	87,592	M N O P Q
0,25 2,0	2	83,348	M N O P Q R
0,43 1,0	2	66,801	N O P Q R S
1,50 6,0	2	59,831	N O P Q R S
0,67 0,5	2	51,625	O P Q R S
4,00 4,0	2	51,340	O P Q R S
0,25 1,0	2	50,730	O P Q R S
1,00 8,0	2	48,695	O P Q R S
0,11 2,0	2	41,447	O P Q R S
0,43 0,5	2	36,875	P Q R S
1,50 8,0	2	16,728	Q R S
9,00 4,0	2	15,686	Q R S
0,25 0,5	2	8,824	R S
0,11 8,0	2	0,000	S
2,33 8,0	2	0,000	S
4,00 8,0	2	0,000	S
9,00 6,0	2	0,000	S
2,33 6,0	2	0,000	S
0,11 0,5	2	0,000	S
4,00 6,0	2	0,000	S
0,11 1,0	2	-0,000	S
0,25 6,0	2	-0,000	S
0,11 4,0	2	-0,000	S
0,11 6,0	2	-0,000	S
0,25 8,0	2	-0,000	S
0,25 4,0	2	-0,000	S
9,00 8,0	2	-0,000	S

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

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Os resultados do Teste de Tukey permitem visualizar o agrupamento dos 54 tratamentos realizados, segregando as amostras cujas médias de resistência são estatisticamente iguais em diferentes grupos, à um nível de significância de 5% e de confiabilidade de 95%. Médias que compartilham uma letra são estatisticamente iguais, enquanto médias que não compartilham uma letra são estatisticamente diferentes.

Nesta pesquisa a resistência é uma variável resposta do tipo maior-é-melhor e, portanto, é necessário identificar o tratamento que apresente o maior valor de resistência. A partir da

análise dos dados apresentados na Tabela 4.15, é possível constatar um empate técnico entre dois tratamentos, agrupados na letra A. Os tratamentos que compõem o grupo A são: (i) CBCA/CC = 2,33 e Molaridade = 1 (3,68% Na<sub>2</sub>O); e (ii) CBCA/CC = 1,50 e Molaridade = 2 (7,16% Na<sub>2</sub>O).

O agrupamento de dois tratamentos no maior nível da variável resposta, indica que estatisticamente, ambos levam à otimização da resistência à compressão do ligante álcali-ativado. O critério de desempate entre os dois tratamentos consistiu na menor quantidade de ativador necessária no processo. Assim, o tratamento escolhido foi o de CBCA/CC = 2,33 (que corresponde a uma relação de 70/30 de CBCA/CC) e concentração molar de 1M (3,68% Na<sub>2</sub>O). Esses valores foram fixados para todos os ensaios mecânicos.

Uma vez determinadas as relações do ligante álcali-ativado, foi possível transpor a dosagem ótima do ligante para os ensaios de resistência à compressão simples, resistência à compressão por tração diametral, rigidez e durabilidade das misturas rejeito-ligante.

## 4.2 RESISTÊNCIA, RIGIDEZ E DURABILIDADE

Esta seção busca apresentar os resultados do projeto de experimentos no que concerne os ensaios de resistência à compressão simples, resistência à compressão por tração diametral, sucção matricial, rigidez e durabilidade, bem como suas respectivas análises estatísticas.

### 4.2.1 Resistência

Os tratamentos estatísticos executados para os ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral, tanto para o ligante alternativo quanto para o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), são apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Tratamento estatístico ensaios de compressão simples e pulso ultrassônico

Tratamento	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Ligante (%)	Tempo de cura (dias)
1	13	15	7
2	13	15	28
3	13	30	7
4	13	30	28
5	15	15	7
6	15	15	28
7	15	30	7
8	15	30	28
9	14	22,5	17,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)



#### 4.2.1.1 Resistência à compressão simples

Os resultados dos tratamentos estatísticos para a resistência à compressão simples são apresentados na Figura 4.7. Vale destacar que esses valores foram obtidos a partir da média simples das amostras executadas em cada tratamento. Por sua vez, os resultados dos ensaios individuais são expostos no apêndice A e as tabelas ANOVA no apêndice B.

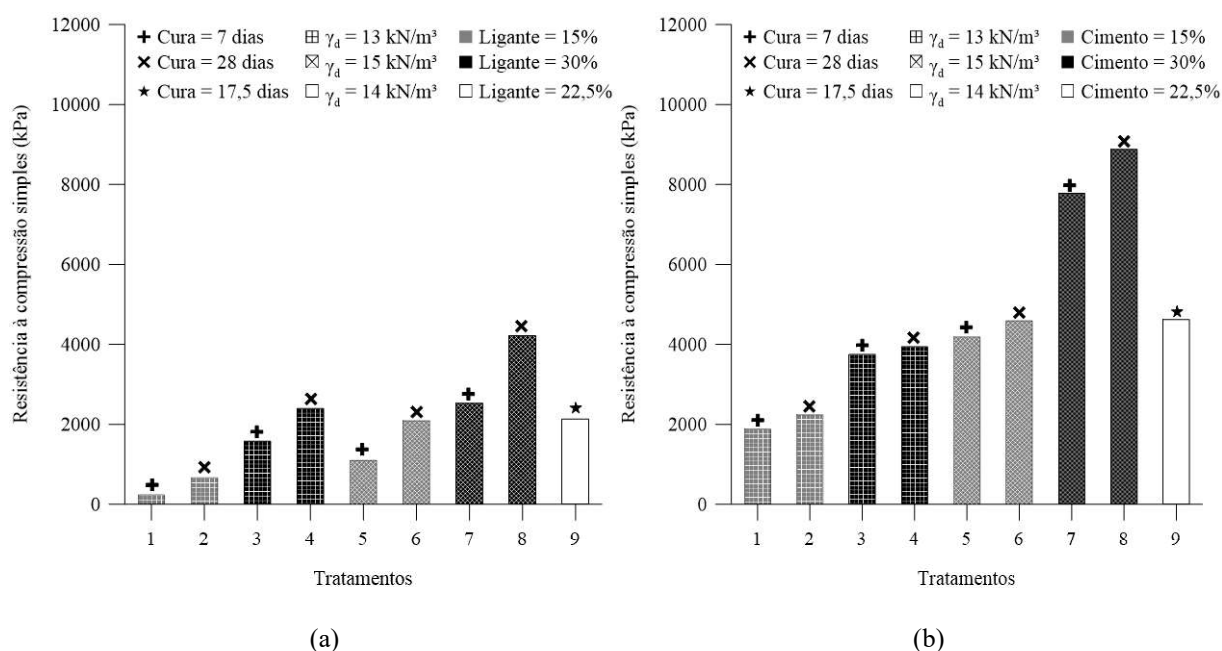


Figura 4.7: Resultados médios resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

De maneira geral foi possível notar que o aumento no nível dos fatores controláveis levou ao aumento da resistência à compressão simples para ambos o ligante álcali-ativado e o CPV-ARI. Além disso, os tratamentos realizados com cimento resultaram em maiores valores de resistência quando comparados com o ligante álcali-ativado.

Para cimentos convencionais, como o caso do CPV-ARI, as quantias a serem adicionadas dependem diretamente das propriedades desejadas e do tipo de solo. O conteúdo de cimento pode variar de 2% a 16% do peso seco do solo. Geralmente à medida que a porção argilosa do solo aumenta, a quantidade de cimento também é acrescida. Considerando que para os fins de comparação desta pesquisa a menor quantia de CPV-ARI foi de 15%, era esperado que os tratamentos realizados com o cimento convencional apresentassem resistências superiores. Entretanto, ao analisar a variável resposta frente ao contraste dos níveis dos fatores estudados, foi possível notar que o aumento de resistência foi mais expressivo para o grupo dos tratamentos álcali-ativados.

A partir desses resultados, foi possível executar uma análise de significância dos fatores controláveis e suas interações, por meio do gráfico de Pareto, como mostra a Figura 4.8.

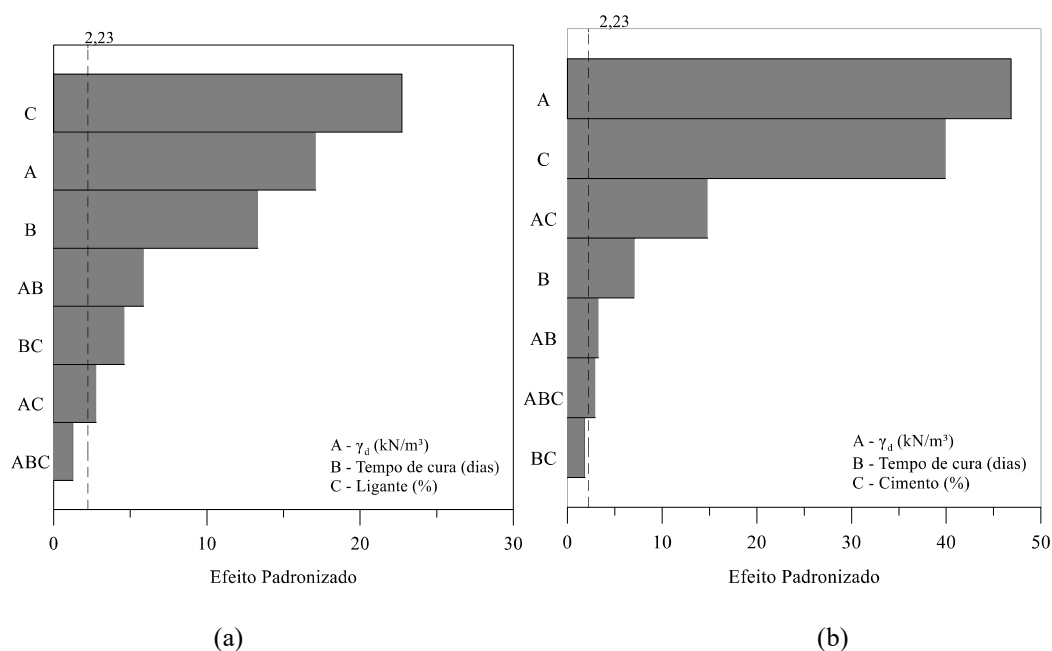


Figura 4.8: Gráficos de Pareto da resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

Os dados da Figura 4.8 (a) indicam que para o ensaio de resistência à compressão simples do ligante álcali-ativado, todos os fatores principais A, B e C, bem como as interações de segunda ordem AB, BC e AC influenciam significativamente na variável resposta. Por outro lado, a interação de terceira ordem ABC não afeta a variável resposta de forma significativa. No que tange a magnitude da influência dos fatores considerados significativos, o teor de ligante (C) se apresentou como o mais influente, seguido pelo peso específico aparente seco (A), tempo de cura (B), interação entre o peso específico aparente seco e o tempo de cura (AB), interação entre o tempo de cura e o teor de ligante (BC) e, por fim, interação entre o peso específico aparente seco e o teor de ligante (AC).

O teor de ligante (C) se apresentou como o fator de maior influência na análise da Figura 4.8 (a). Essa constatação é justificada com base na maior quantidade de reações pozolânicas geradas com o aumento do teor do ligante na mistura, o que contribui diretamente para o acréscimo de resistência relatado. O grau de influência do peso específico aparente seco (A) na variável resposta é explicado pela maior área de contato entre as partículas da mistura, devido à menor porosidade, o que resulta na potencialização de seu intertravamento e consequente aumento de resistência devido à maior mobilização de atrito entre as partículas.

Pesquisas com foco em estabilização química convencional de materiais geotécnicos (CONSOLI *et al.*, 2009, 2020a, 2020b; FESTUGATO *et al.*, 2018; LEMOS *et al.*, 2020) têm relatado que o peso específico aparente seco apresenta uma magnitude de influência maior na resistência, quando comparado ao teor de ligante, denotando um comportamento oposto ao encontrado nesta pesquisa. Entretanto, o ligante aqui estudado consiste em um composto álcali-ativado, onde as condições para o desenvolvimento das reações cimentícias são intensificadas e, portanto, aceleradas. Assim, é plausível presumir que em virtude do processo de álcali-ativação aplicado, a magnitude da influência do teor de ligante nas misturas ultrapasse a magnitude do peso específico aparente seco.

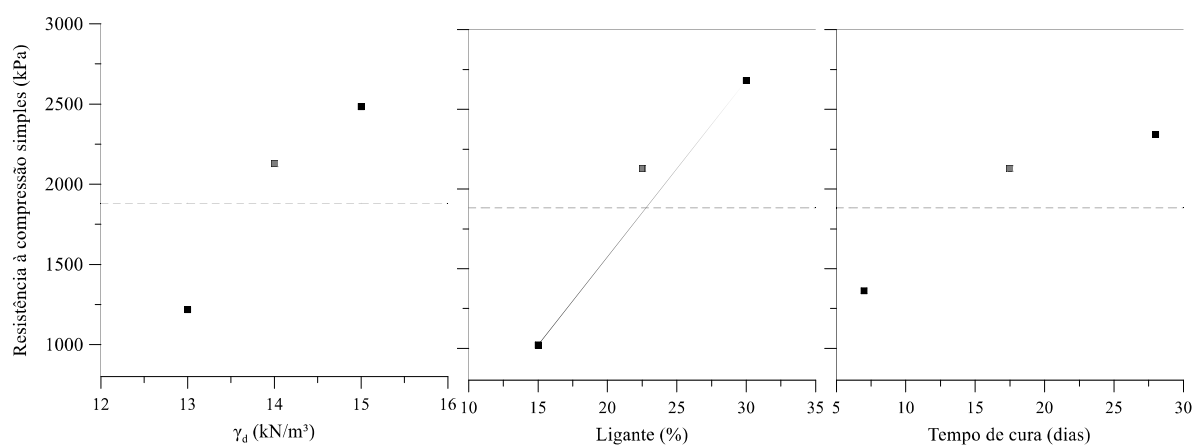
Por fim, constatou-se que a menor magnitude de influência entre os fatores principais foi apresentada pelo fator tempo de cura (B). Conforme mencionado anteriormente, o processo de álcali-ativação busca acelerar as reações cimentícias de modo a otimizar o tempo necessário para o aferimento de uma certa resistência. Com isso, apesar de ser significativo na variável resposta em virtude do tempo necessário para que ocorram as reações cimentícias, o grau de influência do tempo cura foi menor.

Por sua vez, a Figura 4.8 (b) demonstrou que para o ensaio de resistência à compressão simples do grupo de tratamentos com CPV-ARI todos os fatores principais A, B e C, as interações de segunda ordem AB e AC, bem como a interação de terceira ordem ABC influenciam significativamente na variável resposta. Por outro lado, a interação de segunda ordem BC não afeta a variável resposta de forma significativa. No que diz respeito a magnitude da influência dos fatores considerados significativos, o peso específico aparente seco (A) se apresentou como o mais influente, seguido pelo teor de ligante (C), interação entre o peso específico aparente seco e o teor de cimento (AC), tempo de cura (B), interação entre o peso específico aparente seco e o tempo de cura (AB) e, por fim, a interação de terceira ordem (ABC).

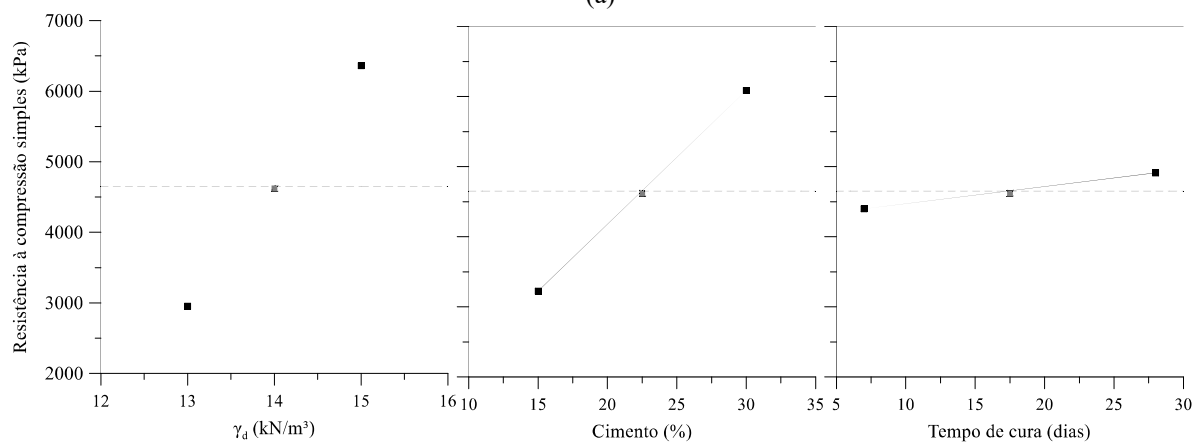
Dentre os fatores significativos principais dos tratamentos com CPV-ARI, os de maior magnitude foram o fator A e C, respectivamente. Conforme mencionado anteriormente, o peso específico aparente seco (A) e o teor de cimento (C) apresentam uma forte influência nos valores de resistência de misturas solo-cimento. O aumento do peso específico (A) resulta em uma maior área de contato entre as partículas, mobilizando o atrito e potencializando o intertravamento, aumentando a resistência. Já o aumento no teor de cimento (C) leva a um acréscimo na quantidade de reações cimentícias e conseqüentemente à uma maior resistência. O fator tempo de cura (B) apresentou a menor magnitude dentre os fatores principais, esse fato é alicerçado na premissa de que o CPV-ARI desenvolve em torno de 80% de sua resistência

nos primeiros 7 dias e, portanto, era esperado que esse fator não apresentasse grande magnitude na variável resposta.

A partir do conhecimento da significância dos resultados, foi possível estudar a influência dos fatores principais isolados e, também, de sua interação. As Figura 4.9 e Figura 4.10 apresentam a análise dos fatores que foram considerados significativos na variável resposta.

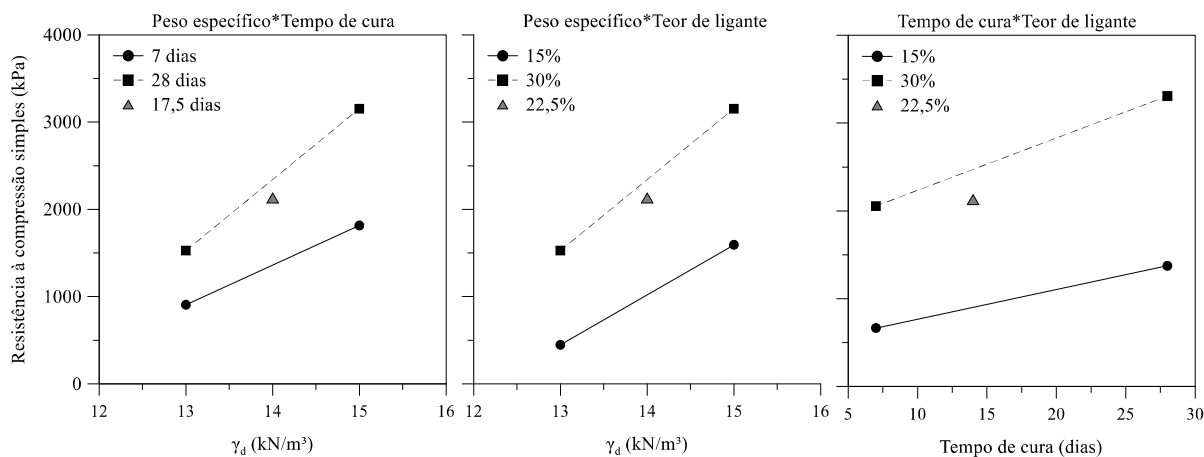


(a)

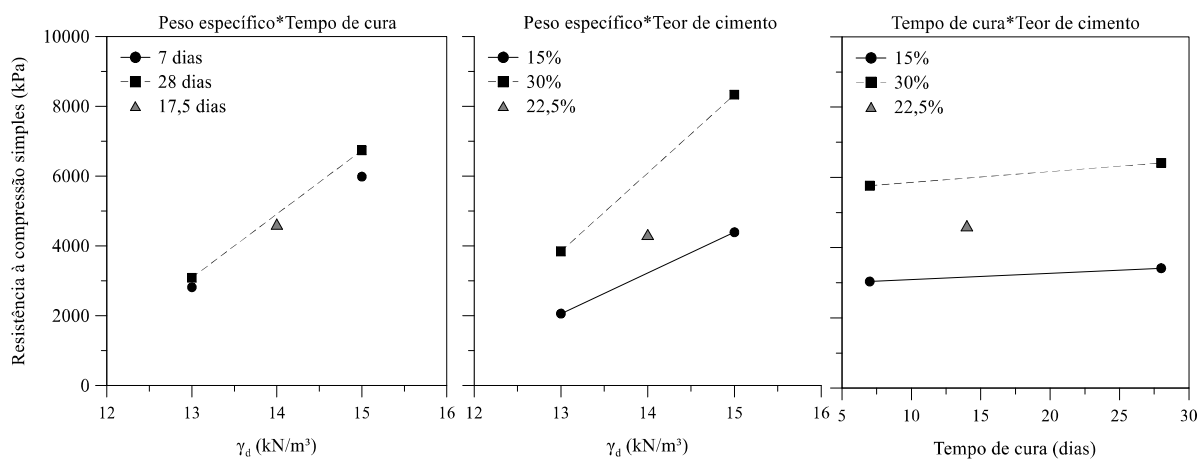


(b)

Figura 4.9: Efeitos principais resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)



(a)



(b)

Figura 4.10: Interações resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

De maneira geral pôde ser observado que todos os fatores principais (A, B e C), bem como suas interações (AB, AC e BC) geraram um efeito positivo, ou seja, o aumento dos níveis dos fatores resultou no acréscimo da variável resposta tanto para o ligante álcali-ativado, quanto para o CPV-ARI.

Uma análise de regressão linear foi executada aos resultados, onde foi possível determinar equações de previsão de resistência para o ligante alternativo (Equação (4.1) para o CPV-ARI (Equação (4.2) em função dos efeitos principais e suas interações. Cabe ressaltar que só são incorporados nos modelos os fatores e/ou interações que exercem influência significativa na variável resposta e que a regressão linear é apenas válida para o intervalo de valores estudados.

$$\text{RCS (kPa)} = -852 + 28A - 224B - 72C + 15,9AB + 10,11AC - 0,22BC + 240,9 \quad (4.1)$$

$$\text{RCS (kPa)} = -5701 + 427A + 276B - 495C - 19,3AB + 47,92AC + 1,366ABC - 33,2 \quad (4.2)$$

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) das Equações 4.1 e 4.2 foi 0,9649 e 0,9913, respectivamente. Ou seja, as equações foram capazes de explicar 96,49% e 99,13% da variabilidade dos dados experimentais com relação ao ajuste linear.

#### 4.2.1.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados dos tratamentos estatísticos para a resistência à tração por compressão diametral são apresentados na Figura 4.11. Cabe destacar que esses valores foram obtidos a partir da média simples das amostras executadas em cada tratamento. Como anteriormente, os resultados dos ensaios individuais são expostos no apêndice A e as tabelas ANOVA no apêndice B.

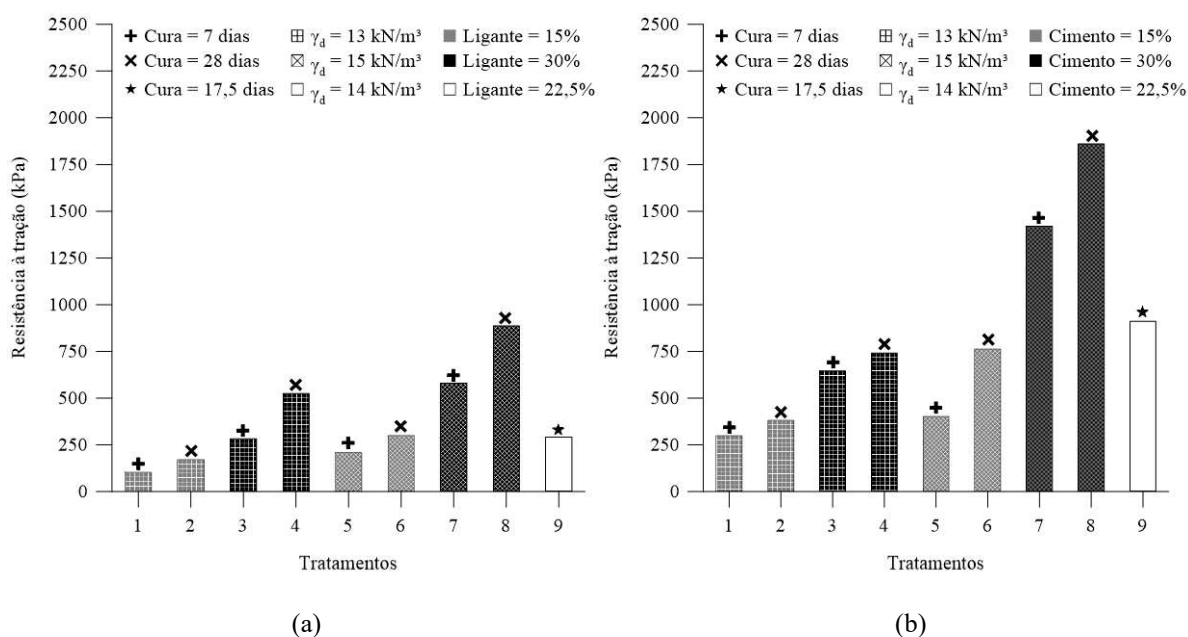


Figura 4.11: Resultados médios resistência à tração por compressão diametral (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

O comportamento da resistência à tração por compressão diametral fez alusão direta aos resultados de resistência à compressão simples, onde foi possível notar que o aumento no nível dos fatores controláveis levou ao aumento da variável resposta para ambos o ligante álcali-ativado e o CPV-ARI. Além disso, os tratamentos realizados com CPV-ARI resultaram em maiores valores de resistência quando comparados com o ligante álcali-ativado.

Com alicerce na mesma premissa exposta no item 4.2.1.1, era esperado que os tratamentos realizados com o cimento convencional apresentassem resistências superiores. Entretanto, destaca-se que, apesar de inferiores, os valores encontrados para o ligante álcali-ativado ainda assim foram expressivos.

A partir desses resultados, foi possível executar uma análise de significância dos fatores controláveis e suas interações, por meio do gráfico de Pareto, como mostra a Figura 4.24.

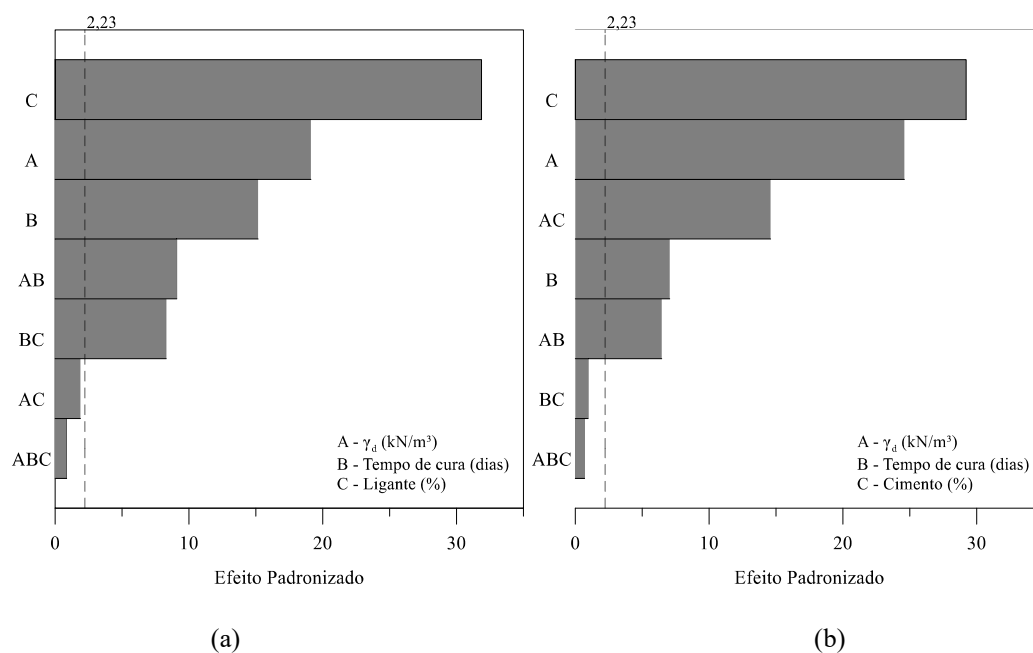


Figura 4.12: Gráficos de Pareto resistência à tração por compressão diametral (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

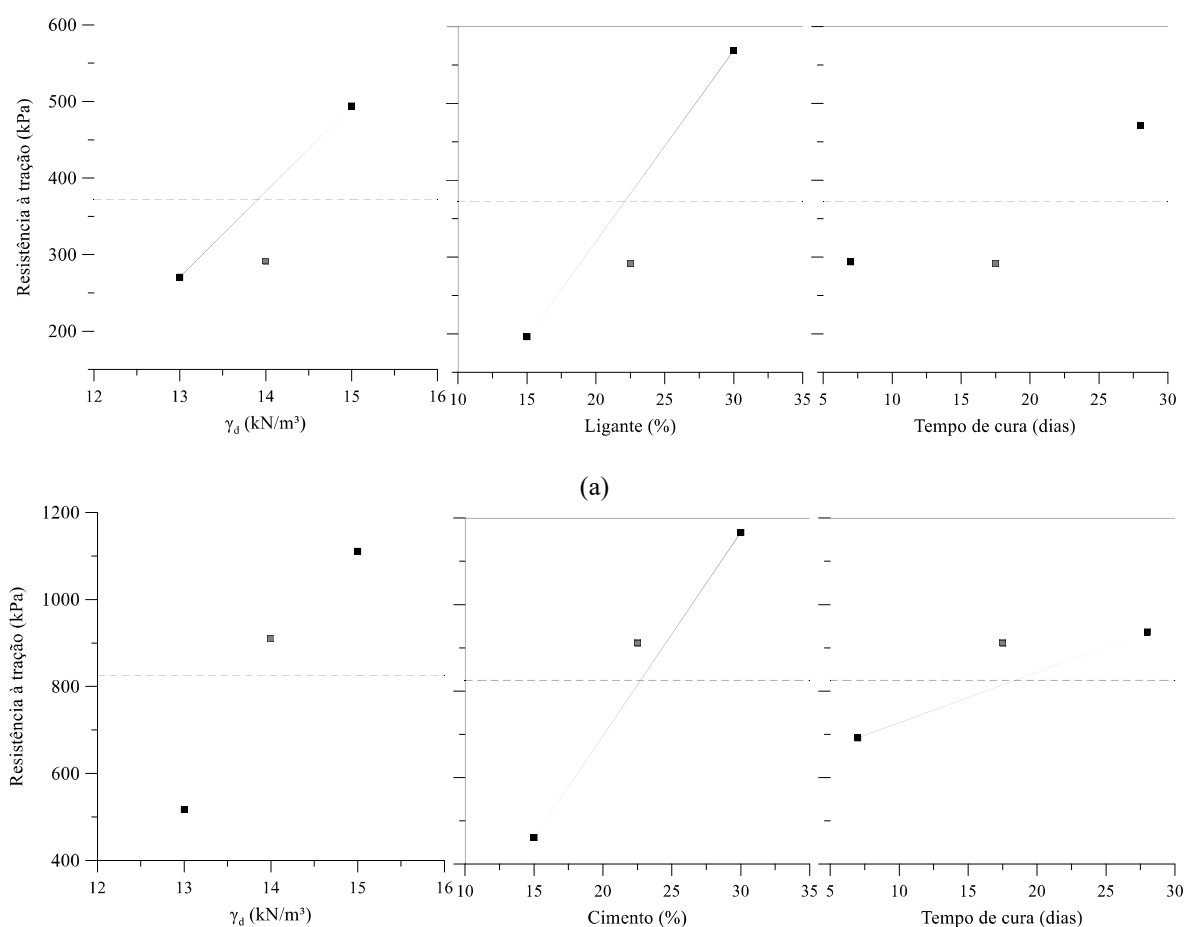
Os dados da Figura 4.12 (a) denotam um comportamento muito similar ao encontrado para os ensaios de resistência à compressão simples, onde todos os fatores principais A, B e C, bem como as interações de segunda ordem AB e BC influenciam significativamente na variável resposta. Por outro lado, a interação de segunda ordem AC e a de terceira ordem ABC não afetam a variável resposta de forma significativa. No que diz respeito a magnitude da influência dos fatores considerados significativos, o teor de ligante (C) se apresentou como o mais influente, seguido pelo peso específico aparente seco (A), tempo de cura (B), interação entre o peso específico aparente seco e o tempo de cura (AB) e, por fim, interação entre o tempo de cura e o teor de ligante (BC). A magnitude de influência dos fatores significativos tem como base as mesmas justificativas apresentadas no item 4.2.1.1.

No tocante a Figura 4.12 (b), os resultados demonstraram que todos os fatores principais A, B e C e as interações de segunda ordem AB e AC influenciam significativamente a variável

resposta. Por outro lado, a interação de segunda ordem BC e a de terceira ordem ABC não afetam a variável resposta de forma significativa. No que diz respeito a magnitude da influência dos fatores considerados significativos, o teor de ligante (C) se apresentou como o mais influente, seguido pelo peso específico aparente seco (A), interação entre o peso específico aparente seco e o teor de cimento (AC), tempo de cura (B) e interação entre o peso específico aparente seco e o tempo de cura (AB).

Entre os fatores significativos principais, os de maior magnitude foram o fator C e A, respectivamente. De acordo com o exposto anteriormente, o peso específico aparente seco (A) e o teor de cimento (C) apresentam uma forte influência nos valores de resistência de misturas solo-cimento (CONSOLI *et al.*, 2009, 2020a, 2020b; FESTUGATO *et al.*, 2018; LEMOS *et al.*, 2020). Novamente, o fator tempo de cura (B) apresentou a menor magnitude dentre os fatores principais, devido ao rápido desenvolvimento da resistência para o CPV-ARI.

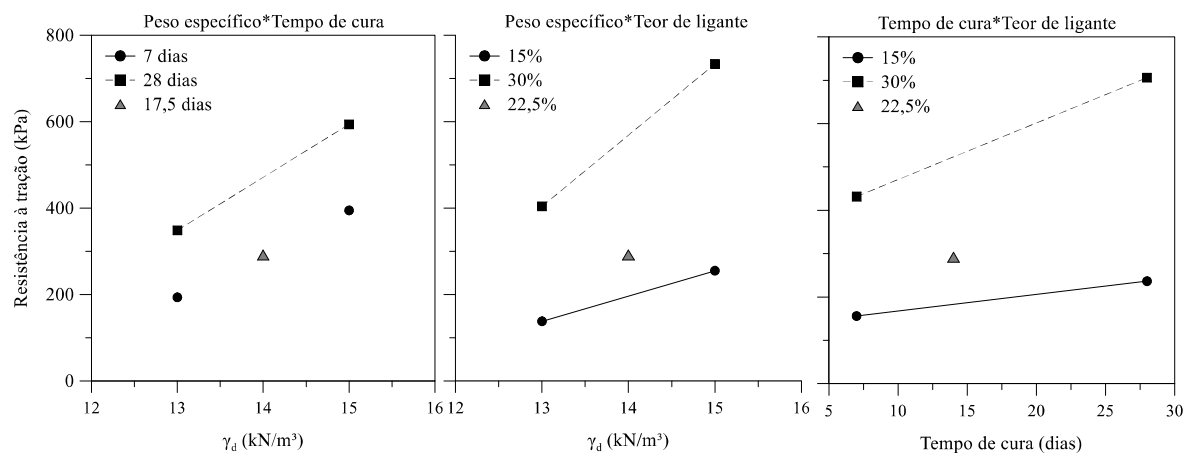
Fundamentado na análise da significância dos resultados, foi possível estudar a influência dos fatores principais isolados e de suas interações, como demonstram as Figura 4.13 e Figura 4.14.



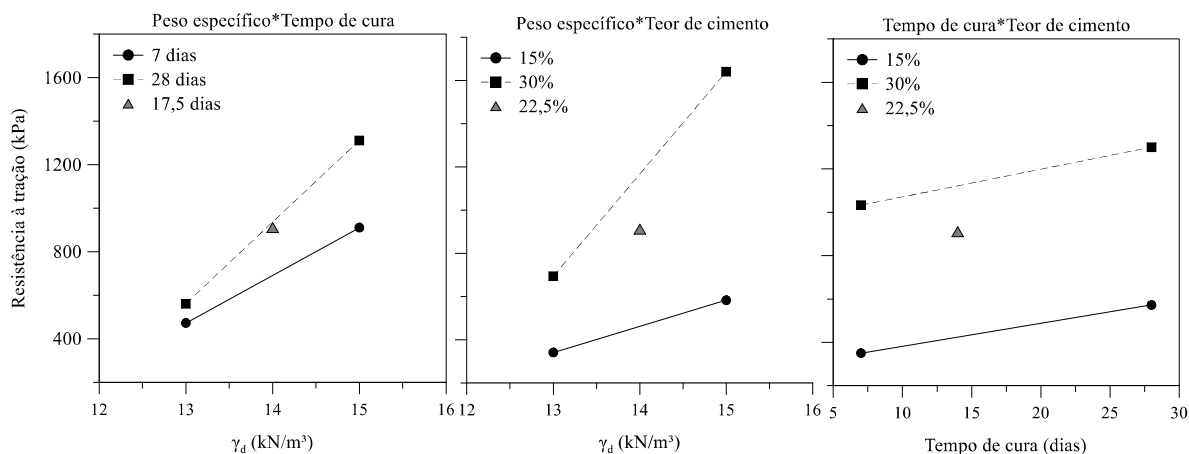


(b)

Figura 4.13: Efeitos principais resistência à tração por compressão diametral (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)



(a)



(b)

Figura 4.14: Interações resistência à tração por compressão diametral (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

Como para o ensaio de resistência à compressão simples, todos os fatores principais (A, B e C), bem como suas interações (AB, AC e BC) geraram um efeito positivo na resistência à compressão por tração diametral, ou seja, o aumento dos níveis dos fatores resultou no acréscimo da variável resposta tanto para o ligante álcali-ativado, quanto para o CPV-ARI.

A partir da análise estatística também foi possível executar uma análise de regressão linear, para determinar uma equação de previsão da variável resposta. Essa regressão incorpora apenas fatores e/ou interações que que exercem um impacto significativo na variável resposta e, além

disso, é apenas válida para o grupo de dados estudados. As Equações (4.3) e (4.4)(4.8) representam a previsão de resistência para o ligante alternativo e o CPV-ARI, respectivamente.

$$\text{RCD (kPa)} = -1071 + 93,3A - 6,31B - 519C + 44,6AC - 2,23BC - 91 \quad (4.3)$$

$$\text{RCD (kPa)} = 4078 - 319,1A - 62B - 285,1C + 5,03AB + 21,61AC + 96,9 \quad (4.4)$$

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) das Equações (4.3) e (4.4) foi 0,9837 e 0,9838, respectivamente. Ou seja, as equações foram capazes de explicar 98,37% e 98,38% da variabilidade dos dados experimentais com relação ao ajuste linear.

#### 4.2.1.3 Sucção Matricial

Com base na premissa de que os corpos de prova do programa experimental se encontravam em uma condição não-saturada, é esperado que um certo nível de sucção esteja presente nas amostras. A Tabela 4.17 apresenta os resultados médios da sucção matricial. Os resultados dos ensaios individuais são expostos no apêndice C.

Tabela 4.17: Ensaio de sucção matricial

	Amostra*	Saturação inicial (%)	Saturação final (%)	Sucção (kPa)	Sucção/Resistência (%)
Ligante alternativo	CP_13_7_15	60,24	84,79	56,20	20,72
	CP_13_7_30	62,96	92,18	197,07	12,35
	CP_13_28_15	60,91	87,00	50,84	7,79
	CP_13_28_30	62,62	92,70	62,63	2,62
	CP_15_7_15	79,83	84,75	214,76	19,71
	CP_15_7_30	80,59	87,29	40,03	1,57
	CP_15_28_15	80,79	87,65	165,36	7,54
	CP_15_28_30	83,58	91,24	74,64	1,77
	CP_14_17,5_22,5	71,22	88,35	279,49	13,26
CPV-ARI	CP_13_7_15	60,24	87,07	89,53	4,74
	CP_13_7_30	62,92	91,31	357,29	9,52
	CP_13_28_15	60,91	86,83	53,85	2,41
	CP_13_28_30	62,62	90,83	59,70	1,52
	CP_15_7_15	79,83	88,17	478,39	11,44
	CP_15_7_30	80,59	91,60	57,70	0,74
	CP_15_28_15	80,79	88,44	87,74	1,95
	CP_15_28_30	83,58	92,49	67,63	0,76
	CP_14_17,5_22,5	71,22	89,77	60,69	1,31

\*CP W X Y Z: Corpo de prova; Peso específico aparente seco; Tempo de cura; Teor de ligante

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

A partir dos dados apresentados na Tabela 4.17, foi possível verificar um intervalo de variação de aproximadamente 60% a 84% na saturação inicial das amostras. Após o período de imersão de 24 horas, o intervalo de saturação foi reduzido para aproximadamente 85% a 93%. Esse

comportamento denota que o processo de imersão agiu de maneira satisfatória no aumento e homogeneização da saturação das amostras, atenuando a interferência da sucção na resistência.

Solos compactados próximos ao teor ótimo de umidade normalmente apresentam graus de saturação entre 70% e 90%, com valores de sucção compreendendo o intervalo de 0kPa e 1000kPa (ROSA, 2009; SALDANHA, 2014), corroborando os resultados encontrados nesta pesquisa.

No que concerne a relação entre a sucção e resistência das amostras, nota-se que a influência da sucção variou de 0,74 a 20,72%. Em média, essa influência não ultrapassou 10% da resistência em questão, indicando a uniformização dos resultados. Assim, devido ao comportamento satisfatório inerente ao processo de imersão, foi possível desconsiderar a sucção como uma das variáveis investigadas.

#### 4.2.2 Módulo cisalhante inicial

Por tratar-se de um ensaio não-destrutivo, os tratamentos estatísticos executados para os ensaios de módulo cisalhante inicial, tanto para o ligante alternativo quanto para o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), seguiram o mesmo projeto apresentado na Tabela 4.16.

Os resultados dos tratamentos estatísticos para o módulo cisalhante inicial são apresentados na Figura 4.15. Novamente, os valores foram obtidos a partir da média simples das amostras executadas em cada tratamento. Os resultados dos ensaios individuais são expostos no apêndice A e as tabelas ANOVA no apêndice B.

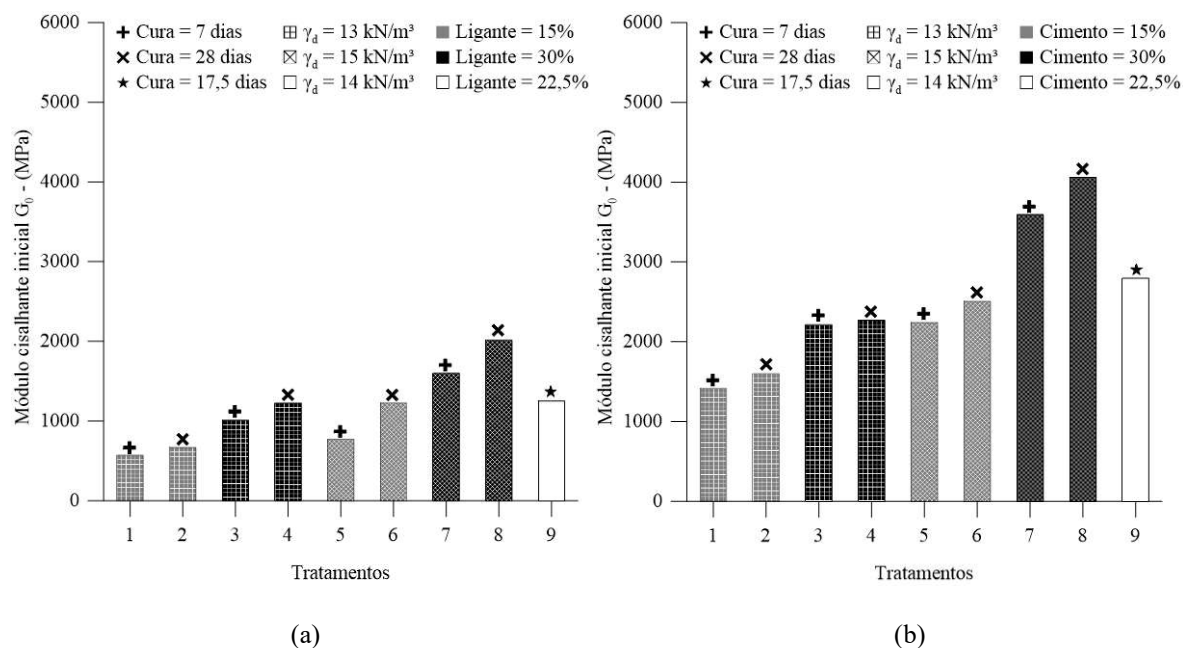


Figura 4.15: Resultados médios módulo cisalhante inicial (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

As médias dos tratamentos para o ensaio de módulo cisalhante inicial apresentaram um comportamento similar ao encontrado para os ensaios de resistência, onde o aumento no nível dos fatores controláveis levou ao aumento da variável resposta para ambos o ligante álcali-ativado e o CPV-ARI. Novamente, os tratamentos realizados com CPV-ARI resultaram em maiores valores de rigidez quando comparados com o ligante álcali-ativado.

A partir desses resultados, foi possível executar uma análise de significância dos fatores controláveis e suas interações, por meio do gráfico de Pareto, como mostra a Figura 4.16.

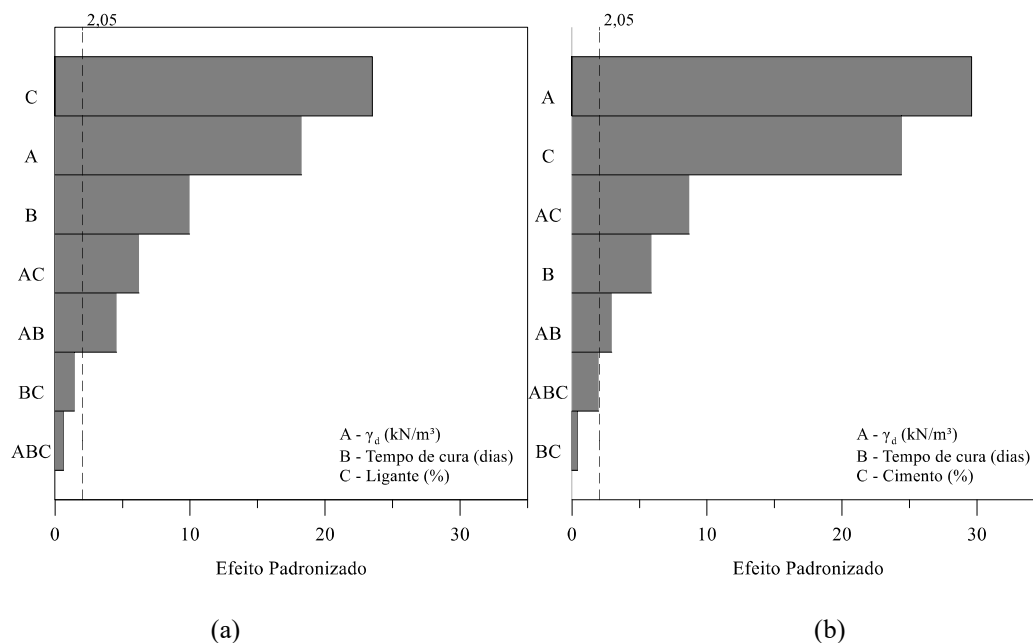


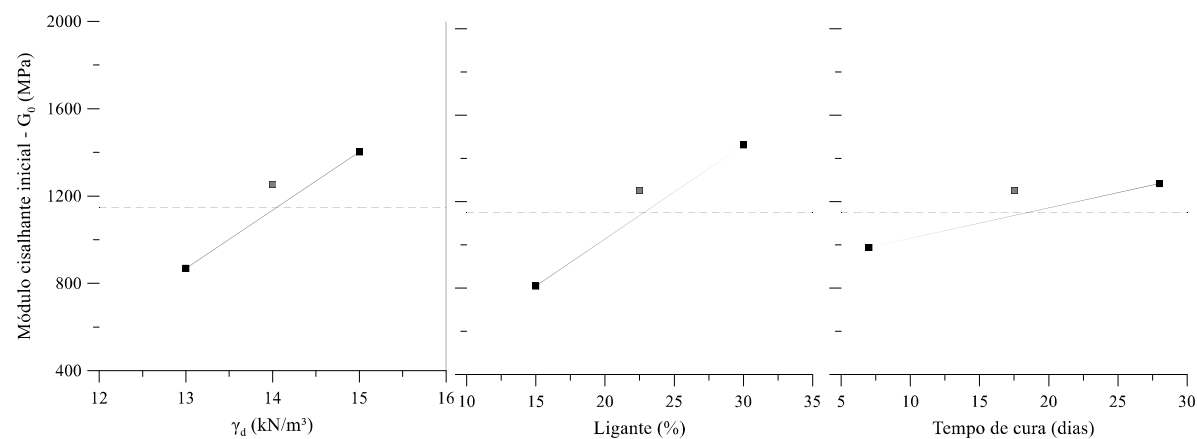
Figura 4.16: Gráficos de Pareto resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

O comportamento dos efeitos padronizados da rigidez foi idêntico ao encontrado para os ensaios de resistência à compressão simples. Com isso, esse comportamento foi justificado com base nas mesmas premissas apresentadas no item 4.2.1.1.

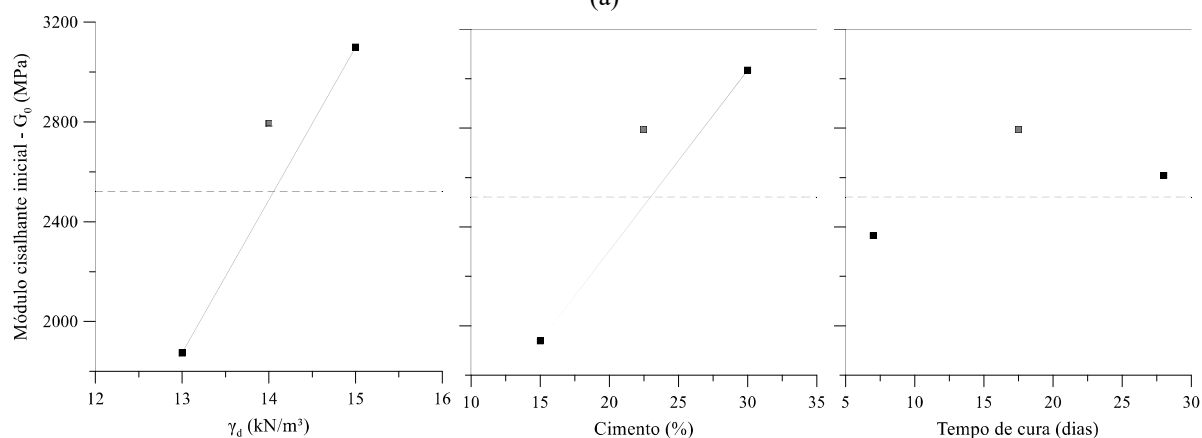
Para tratamentos realizados com o ligante álcali-ativado, todos os fatores principais A, B e C, bem como as interações de segunda ordem AB e BC influenciam significativamente na variável resposta. Por outro lado, a interação de segunda ordem AC e a de terceira ordem ABC não afetam a variável resposta de forma significativa. No que tange a magnitude da influência dos fatores considerados significativos, o teor de ligante (C) se apresentou como o mais influente, seguido pelo peso específico aparente seco (A), tempo de cura (B), interação entre o peso específico aparente seco e o tempo de cura (AB) e, por fim, interação entre o tempo de cura e o teor de ligante (BC).

Para tratamentos realizados com o CPV-ARI, todos os fatores principais A, B e C, as interações de segunda ordem AB e AC bem como a interação de terceira ordem ABC influenciam significativamente na variável resposta. Por outro lado, a interação de segunda ordem BC não afeta a variável resposta de forma significativa. No que diz respeito a magnitude da influência dos fatores considerados significativos, o peso específico aparente seco (A) se apresentou como o mais influente, seguido pelo teor de ligante (C), interação entre o peso específico aparente seco e o teor de cimento (AC), tempo de cura (B), interação entre o peso específico aparente seco e o tempo de cura (AB) e, por fim, a interação de terceira ordem (ABC).

A partir do conhecimento da significância dos resultados, foi possível estudar a influência dos fatores principais isolados e, também, de sua interação. As Figura 4.17 e Figura 4.18 apresentam a análise dos fatores que foram considerados significativos na variável resposta.



(a)



(b)

Figura 4.17: Efeitos principais resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

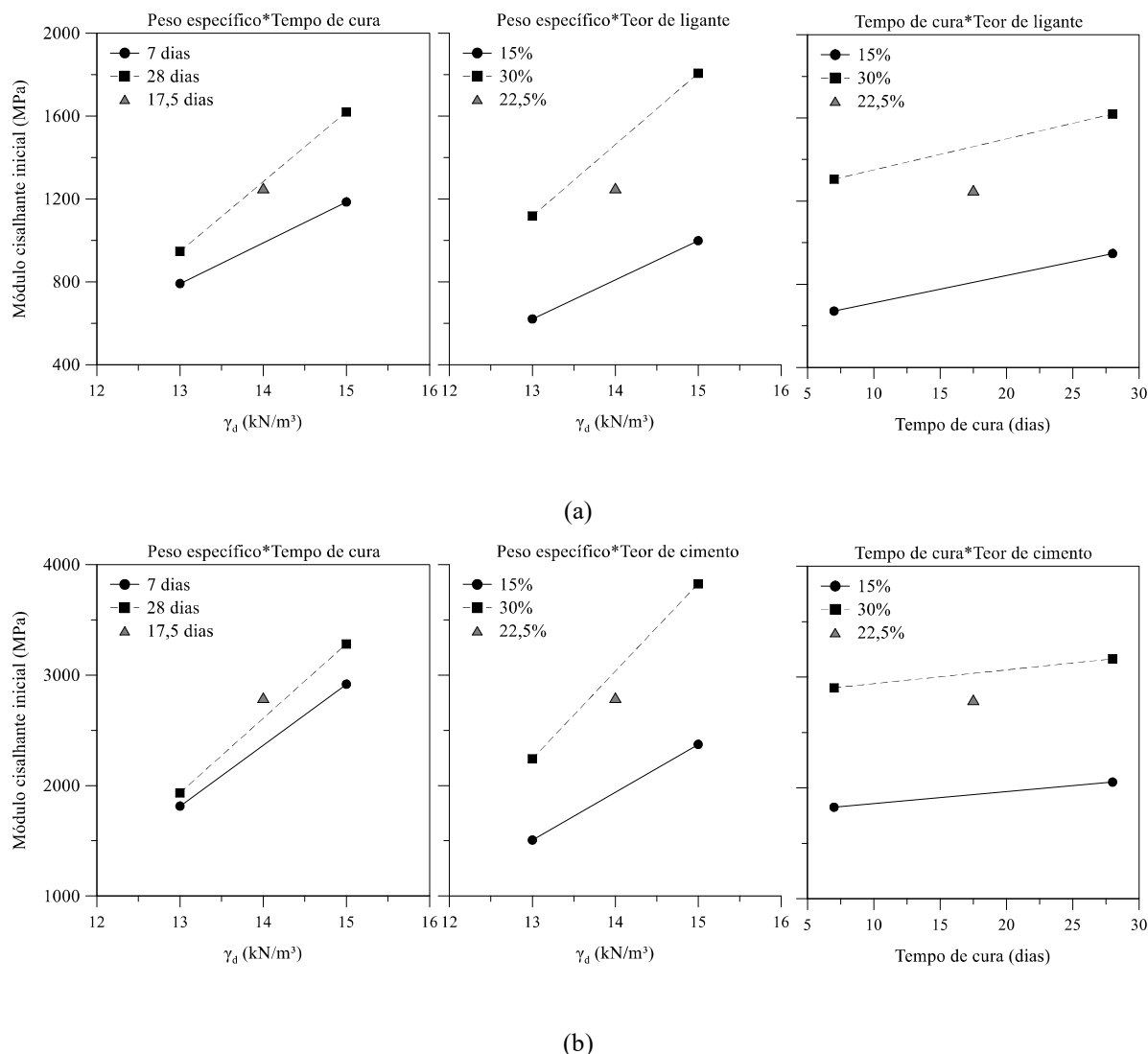


Figura 4.18: Interações resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

Todos os fatores principais (A, B e C), bem como suas interações (AB, AC e BC) geraram um efeito positivo, ou seja, o aumento dos níveis dos fatores resultou no acréscimo da variável resposta tanto para o ligante álcali-ativado, quanto para o CPV-ARI.

Uma análise de regressão linear foi executada aos resultados, onde foi possível determinar equações de previsão de rigidez para o ligante alternativo (Equação (4.5)(4.1) para o CPV-ARI (Equação (4.6) em função dos efeitos principais e suas interações. Cabe ressaltar que só são incorporados nos modelos os fatores e/ou interações que exercem um impacto significativo na variável resposta e que a regressão linear é apenas válida para o grupo de dados estudados.

$$G_0 \text{ (MPa)} = 2204 - 158,6A - 114,8B - 153,6C + 8,75AB + 13,86AC + 120,5 \quad (4.5)$$

$$G_0 \text{ (MPa)} = -1765 + 175A + 90,5B - 138C - 5,82AB + 14,96AC + 0,517ABC + 308,4 \quad (4.6)$$

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) das Equações 4.1 e 4.2 foi 0,9545 e 0,9726, respectivamente. Ou seja, as equações foram capazes de explicar 95,45% e 97,26% da variabilidade dos dados experimentais com relação ao ajuste linear.

### 4.2.3 Durabilidade

Por se tratar de um procedimento onde são necessárias elevadas quantidades de material, os tratamentos aplicados para o ensaio de durabilidade foram reduzidos, de modo a respeitar as limitações desta pesquisa. Com isso, foram utilizados dois pesos específicos aparentes secos ( $13\text{kN/m}^3$  e  $15\text{kN/m}^3$ ) juntamente com duas quantias de ligante (15% e 30%) em um tempo de cura fixo de 7 dias, para ambos agentes cimentantes estudados.

Os resultados do ensaio de durabilidade foram segregados em termos de perda de massa individual por ciclo (PMI) e perda de massa acumulados dos ciclos (PMA). A Figura 4.19 apresenta os resultados de PMI.

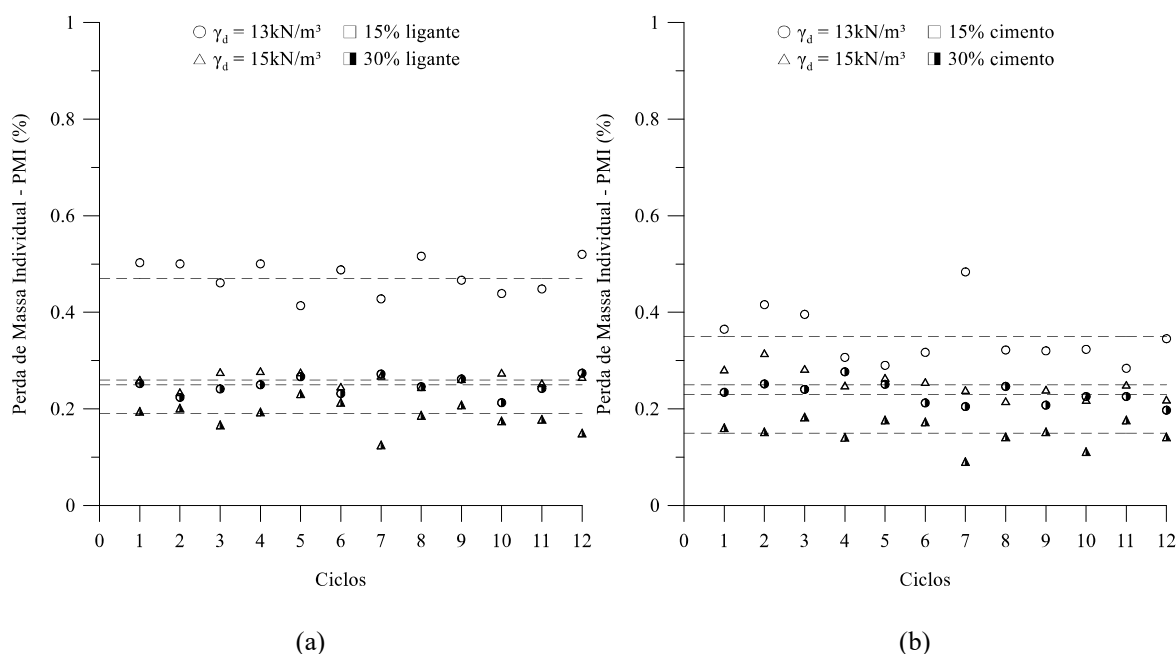


Figura 4.19: Perda de massa individual (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

A partir da análise dos dados apresentados na Figura 4.19 (a), é possível notar que a perda de massa individual (PMI) das amostras álcali-ativadas se deu de forma regular e gradual. O mesmo comportamento é denotado para as amostras tratadas com cimento Portland de alta resistência inicial (vide Figura 4.20 (b)), onde foram encontradas pequenas variações de



PMI a cada ciclo analisado, confirmando a qualidade de execução do ensaio. De modo a facilitar a visualização, a Tabela 4.18 apresenta os resultados médios de PMI.

Tabela 4.18: Perda de massa individual média

$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Ligante (%)	Tipo de ligante	PMI (%)
13	15	Álcali-ativado	0,47
13	30		0,25
15	15		0,26
15	30		0,19
13	15	Convencional	0,35
13	30		0,23
15	15		0,25
15	30		0,15

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

De maneira geral, os valores médios de PMI não ultrapassaram a marca de 0,50% em todas as amostras estudadas, independentemente do tipo de ligante analisado. Além disso, o comportamento entre os ligantes deu-se de maneira semelhante, onde as maiores PMI médias ocorreram nas amostras de peso específico 13kN/m<sup>3</sup> e 15% de ligante e as menores nas amostras de peso específico 15kN/m<sup>3</sup> e 30% de ligante.

No que tange a grandeza da PMI média entre os ligantes estudados, como para os ensaios de resistência e rigidez, os tratamentos de durabilidade realizados com CPV-ARI apresentaram um melhor comportamento mecânico. Apesar do desempenho superior, cabe destacar que, os resultados das amostras tratadas com o ligante álcali-ativado foram muito similares aos das amostras tratadas com CPV-ARI, apresentando uma diferença média entre os ciclos de apenas 16%.

A Figura 4.20, apresenta os resultados da perda de massa acumulada (PMA) para o ligante álcali-ativado (a) e o cimento Portland de alta resistência inicial (b).

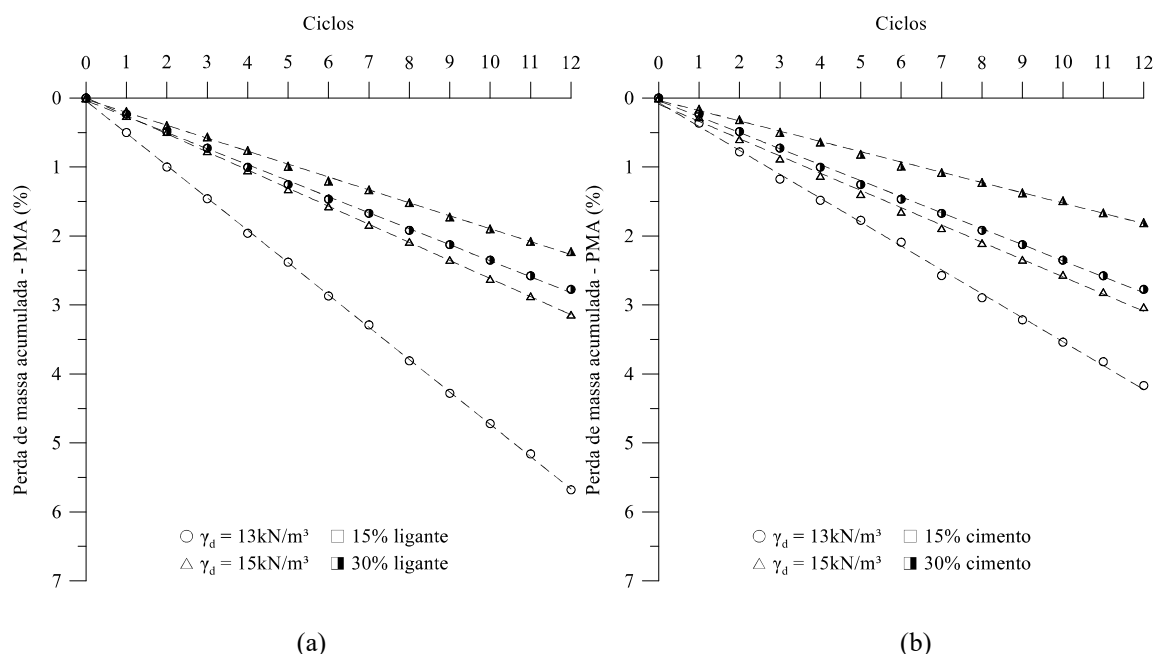


Figura 4.20: Perda de massa acumulada (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

Com base nos resultados apresentados na Figura 4.20, nota-se uma grande influência tanto do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) como da quantidade de ligante sobre a PMA dos tratamentos analisados. Analogamente ao evidenciado nos ensaios de resistência e rigidez, a influência do  $\gamma_d$  é explicada pela maior área de contato entre as partículas da mistura, devido à menor porosidade, o que resulta na potencialização de seu intertravamento e consequente aumento de resistência devido à maior mobilização de atrito entre as partículas. Por sua vez, a influência da quantidade de ligante tem como justificativa a maior quantidade de reações geradas com o aumento do teor do agente cimentante na mistura, o que contribui diretamente para o acréscimo de durabilidade relatado. O mesmo comportamento foi evidenciado para diferentes materiais geotécnicos na literatura vigente (CONSOLI et al., 2017b, 2018a, 2018b; CONSOLI; SAMANIEGO; VILLALBA, 2016; CONSOLI; TOMASI, 2018; PALOMO; LÓPEZ DELA FUENTE, 2003).

Os resultados de PMA demonstraram que os tratamentos realizados com cimento Portland de alta resistência inicial apresentaram um melhor comportamento mecânico quando comparado aos tratamentos executados com o ligante álcali-ativado, como demonstrado na Tabela 4.19.

Tabela 4.19: Perda de massa acumulada

$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Ligante (%)	Tipo de ligante	PMA (%)
13	15	Álcali-ativado	5,68
13	30		2,97

$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Ligante (%)	Tipo de ligante	PMA (%)
15	15		3,14
15	30		2,23
13	15		4,17
13	30	Convencional	2,77
15	15		3,03
15	30		1,81

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Os tratamentos realizados com o ligante álcali-ativado apresentaram uma PMA máxima de 5,68% e uma mínima de 2,23%. Por outro lado, as amostras estabilizadas com CPV-ARI resultaram em uma PMA máxima de 4,17% e uma mínima de 1,81%. Novamente, cabe destacar que, apesar de apresentarem valores inferiores os resultados dos tratamentos realizados com o ligante álcali-ativado foram muito similares aos das amostras tratadas com CPV-ARI, apresentando uma diferença média entre os resultados de apenas 16%. Ao comparar os dados dos ligantes álcali-ativado e convencional, é evidenciado um comportamento extremamente similar, onde os maiores valores de PMA ocorreram nas amostras de peso específico 13kN/m<sup>3</sup> e 15% de ligante e os menores nas amostras de peso específico 15kN/m<sup>3</sup> e 30%.

De acordo com os requisitos mínimos de durabilidade apresentados pela PCA (1992), a PMA após 12 ciclos de molhagem e secagem possui um limite de 10% para siltes com baixo índice de plasticidade, como no caso do rejeito de mineração de bauxita. Fato posto, os dados apresentados na Tabela 4.19 indicam que todas as amostras de ambos ligantes estudados cumpriram esse requisito mínimo, comprovando a eficácia da estabilização proposta.

A Figura 4.21 apresenta o estado físico das amostras de ambos agentes cimentantes no ciclo inicial (a) e final (b) do ensaio de durabilidade. Foi possível visualizar a influência do peso específico aparente seco e percentagem de ligante, onde amostras de menores porosidades e maiores quantidades de ligante apresentam uma maior integridade geral. Esse aspecto físico faz alusão direta a PMA do ensaio de durabilidade, onde amostras que sofreram maiores perdas de massa apresentaram também alterações de volume mais significativas. Além disso, evidenciou-se o aparecimento gradual de pequenas trincas e fissuras, decorrentes dos sucessivos períodos de molhagem, secagem e abrasão pela escova metálica.

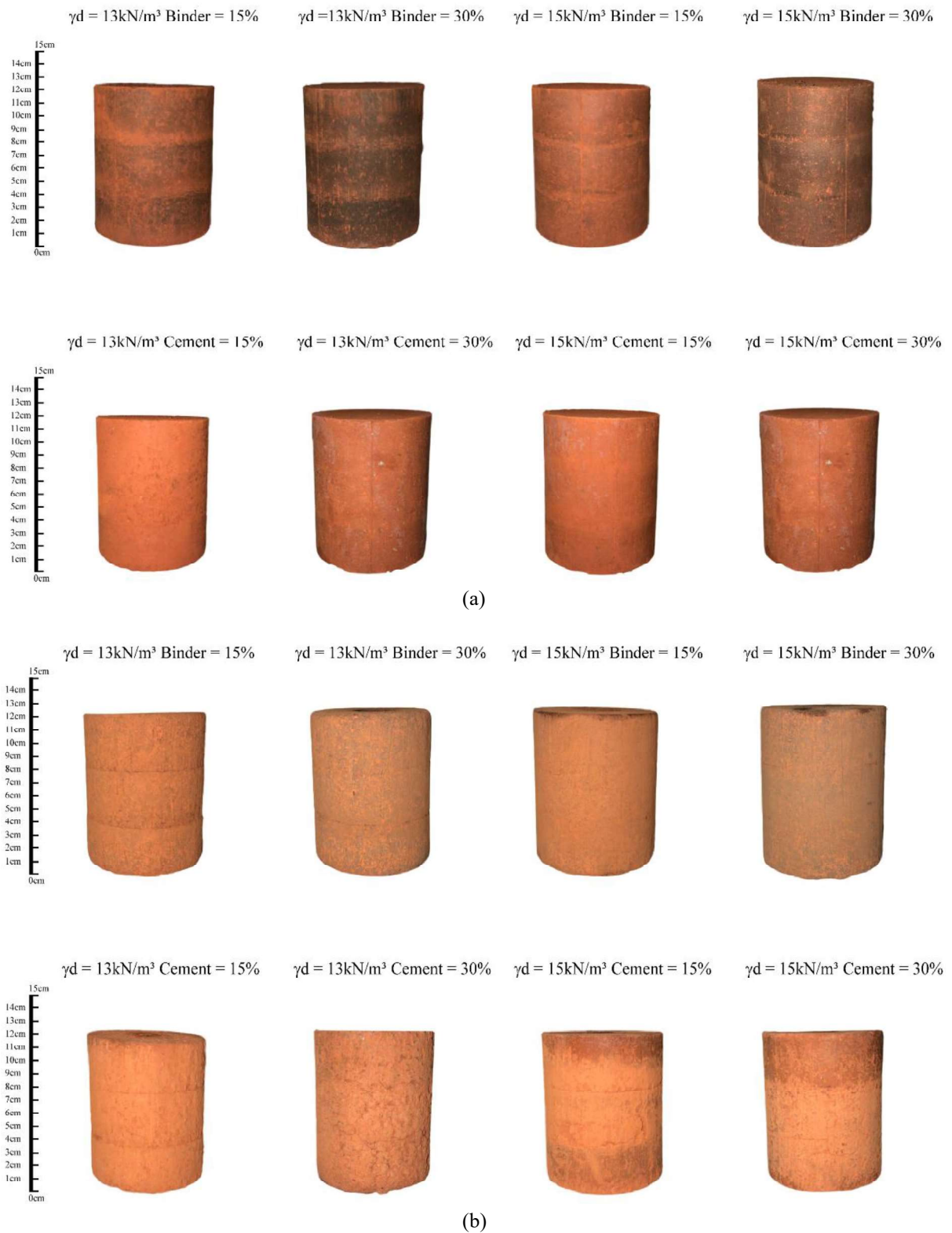


Figura 4.21: Ciclos de molhagem e secagem (a) ciclo 0 (b) ciclo 12

#### 4.2.3.1 Módulo cisalhante inicial ao longo dos ciclos de durabilidade

A Figura 4.22 apresenta os resultados do módulo cisalhante inicial ao longo dos ciclos de molhagem e secagem do ensaio de durabilidade, para ambos agentes cimentantes estudados.

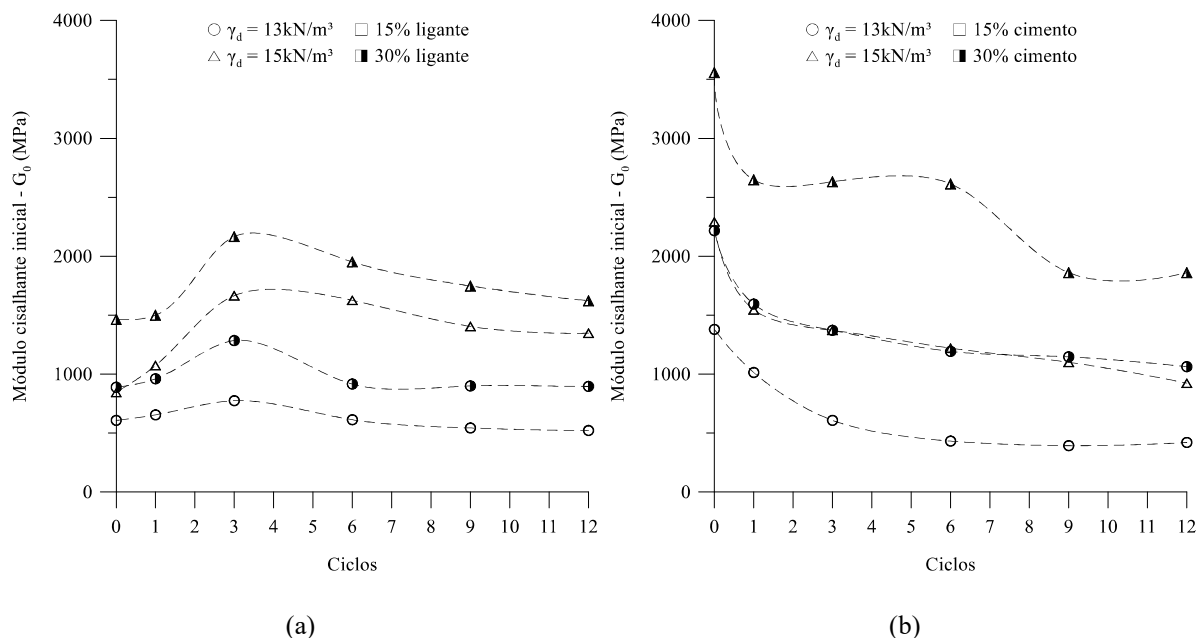


Figura 4.22: Módulo cisalhante inicial ao longo dos ciclos de durabilidade (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

Nas amostras estabilizadas com o uso do ligante álcali-ativado, a rigidez apresentou um comportamento crescente até o ciclo de número três e, a partir desse marco, a mesma decresceu com o aumento dos ciclos. Sabe-se que a ação abrasiva do procedimento de escovação em conjunção com a ação intempestiva dos ciclos de molhagem e secagem do ensaio de durabilidade, resultam na perda de massa e degradação da rigidez das amostras. Entretanto, como evidenciado pelo comportamento dos ensaios de resistência, em um período de cura de apenas 7 dias as reações do ligante álcali-ativado ainda não ocorreram de forma completa. Se por um lado os procedimentos do ensaio de durabilidade deterioram as amostras, por outro a exposição à elevadas temperaturas e a disponibilidade de água contribuem para catálise das reações que ainda estão ocorrendo. Assim, até o ciclo de número três, o efeito positivo tem um peso maior que o negativo e a partir desse limite o comportamento oposto é evidenciado, levando ao decréscimo da resistência.

Para o caso das amostras tratadas com o cimento de alta resistência inicial, a rigidez e integridade das amostras apenas diminui com o decorrer dos ciclos de durabilidade. Esse

comportamento ocorre de forma distinta ao visto para as amostras álcali-ativadas, pois, a maior parte das reações cimentícias do CPV-ARI já ocorrem nos primeiros 7 dias de cura.

### 4.3 RELAÇÕES COM O ÍNDICE $\eta/B_{iv}$

Esta seção busca discutir e validar a metodologia de dosagem racional proposta por Consoli *et al.* (2018b), para os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à compressão por tração diametral, durabilidade e pulso ultrassônico. Desse modo, as variáveis resposta foram relacionadas com o índice porosidade/teor volumétrico de ligante ( $\eta/B_{iv}$ ) e, assim, relações matemáticas únicas no formato das Equações (2.2) e (2.3) foram estabelecidas.

Além disso, com o intuito de compatibilizar os efeitos da compactidade e teor de ligante, um expoente de 0,28 foi aplicado ao parâmetro  $B_{iv}$ . O valor escolhido consistiu no melhor ajuste aos resultados analisados e vai de encontro com a literatura vigente (CONSOLI *et al.*, 2007, 2018a, 2020b).

#### 4.3.1 Resistência à compressão simples

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples são exibidos na Figura 4.23.

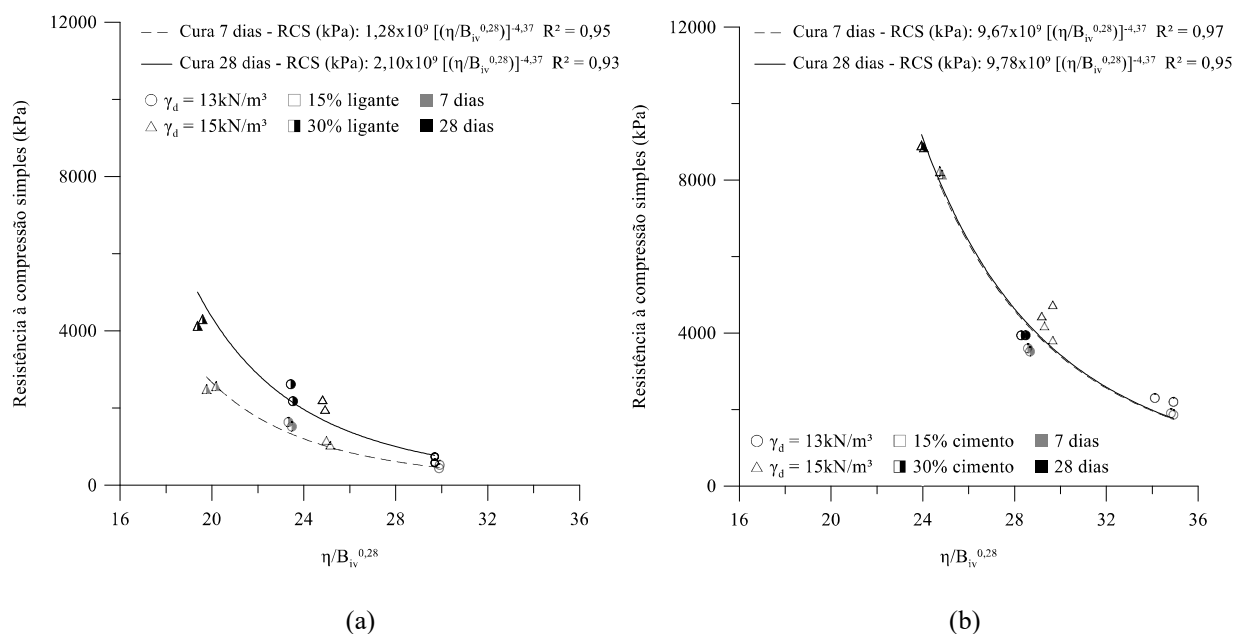


Figura 4.23: Relação entre a resistência à compressão simples e o índice  $\eta/B_{iv}$  (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

De maneira geral, é possível notar que a redução da relação entre a porosidade e o ligante cimentício leva à um aumento na resistência à compressão simples. Esse comportamento é

atribuído a maior área de contato entre as partículas da mistura, o que resulta na potencialização de seu intertravamento em virtude da maior mobilização de atrito. Além disso, o aumento no teor de ligante gera uma maior precipitação de compostos cimentícios, o que contribui diretamente para o aumento da resistência. Ao comparar as curvas de 7 e 28 dias de cura do ligante álcali-ativado e do CPV-ARI, nota-se que o cimento alternativo leva à um aumento de resistência muito mais expressivo. Esse comportamento indica que os produtos de reação da álcali-ativação continuaram a reagir durante os 28 dias de cura. Por sua vez, o CPV-ARI desenvolveu mais de 80% de sua resistência nos primeiros 7 dias.

As relações entre os dados experimentais e o índice  $\eta/B_{iv}$  apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) extremamente elevados. Para o ligante álcali-ativado, os valores foram de 95% e 93% nas amostras de 7 e 28 dias de cura, respectivamente. Por outro lado, para o CPV-ARI, os coeficientes foram de 97% para 7 dias de cura e 95% para 28 dias de cura. Os elevados coeficientes de determinação indicam a viabilidade do índice para a previsão da resistência à compressão simples para ambos cimentos. As Equações (4.7) e (4.8) representam as relações encontradas para o ligante álcali-ativado e as Equações (4.9) e (4.10) para o CPV-ARI.

$$RCS \text{ (kPa)}_{7\text{dias}} = 1,28 \times 10^9 \left[ \left( \eta / B_{iv} \right)^{0,28} \right]^{-4,37} \quad (4.7)$$

$$RCS \text{ (kPa)}_{28\text{dias}} = 2,10 \times 10^9 \left[ \left( \eta / B_{iv} \right)^{0,28} \right]^{-4,37} \quad (4.8)$$

$$RCS \text{ (kPa)}_{7\text{dias}} = 9,67 \times 10^9 \left[ \left( \eta / B_{iv} \right)^{0,28} \right]^{-4,37} \quad (4.9)$$

$$RCS \text{ (kPa)}_{28\text{dias}} = 9,78 \times 10^9 \left[ \left( \eta / B_{iv} \right)^{0,28} \right]^{-4,37} \quad (4.10)$$

A partir da análise das Equações (4.7), (4.8), (4.9) e (4.10) nota-se que os expoentes externos de todas as equações são iguais, entretanto, as constantes iniciais apresentam valores distintos. Consoli *et al.* (2018b), propuseram que o comportamento mecânico de misturas solo-cimento, onde utiliza-se o mesmo ligante, pode ser normalizado frente à diversas variáveis pré-estabelecidas (*e.g.* tempo de cura, temperatura). Assim, faz-se concebível a geração de uma única correlação matemática para a previsão do comportamento mecânico do material estabilizado para cada um dos ligantes estudados.

A Figura 4.24 apresenta a normalização dos valores de resistência à compressão simples para cada tempo de cura analisado. Para o ligante álcali-ativado, a normalização foi concebida por meio da divisão dos resultados por um valor fixo de resistência,  $\eta/B_{iv}^{0,28} = 24$ , escolhido por ser

um valor central comum a ambas as curvas. Já para o CPV-ARI, os resultados foram divididos por um  $\eta/B_{iv}^{0,28} = 28$ , pelo mesmo motivo supracitado.

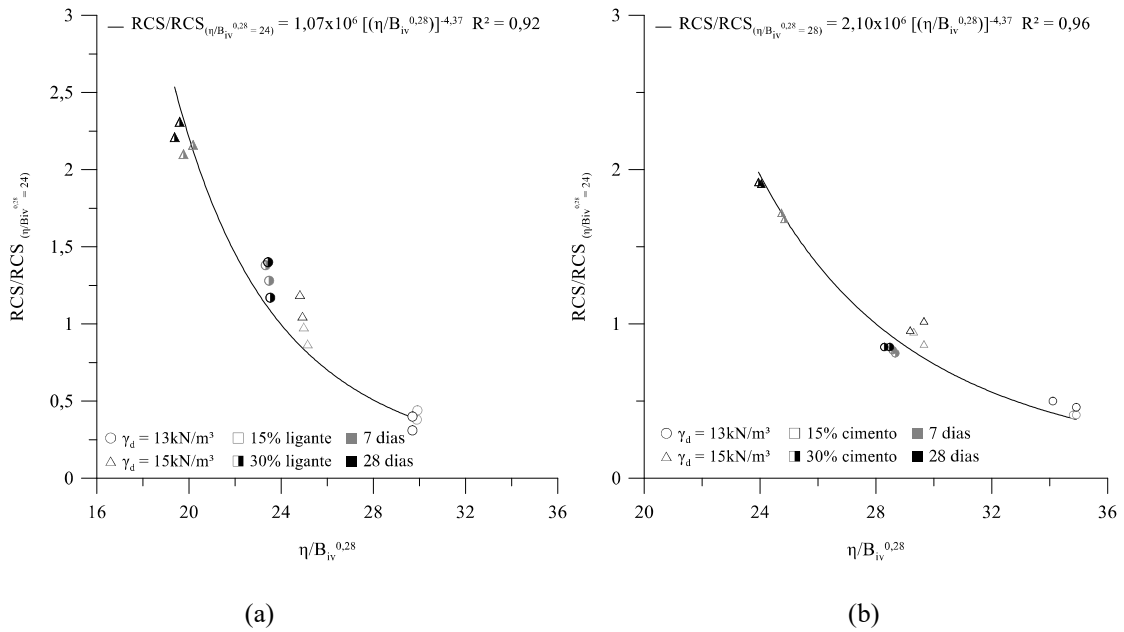


Figura 4.24: Resistência à compressão simples normalizada para ambos tempos de cura (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

Com isso, obteve-se uma relação única entre a resistência normalizada e o índice porosidade/teor volumétrico de ligante para os dois tipos de cimento, independentemente do tempo de cura. A Equação (4.11) representa o ligante álcali-ativado e a Equação (4.12) representa o CPV-ARI.

$$RCS/RCS_{\left(\eta/B_{iv}^{0,28} = 24\right)} = 1,07 \times 10^6 \left[ \left( \eta/B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{-4,37} \quad (4.11)$$

$$RCS/RCS_{\left(\eta/B_{iv}^{0,28} = 28\right)} = 2,10 \times 10^6 \left[ \left( \eta/B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{-4,37} \quad (4.12)$$

O coeficiente de determinação encontrado nas Equações (4.11) e (4.12) foi de 92% e 96% respectivamente, o que denota a possibilidade de normalização dos resultados de ambos os cimentos para a variável pré-definida utilizada (tempo de cura). Além disso, os elevados valores de  $R^2$  indicam a grande representatividade das equações para a previsão da resistência à compressão simples das misturas analisadas.



### 4.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, para ambos agentes cimentantes estudados, são exibidos na Figura 4.25.

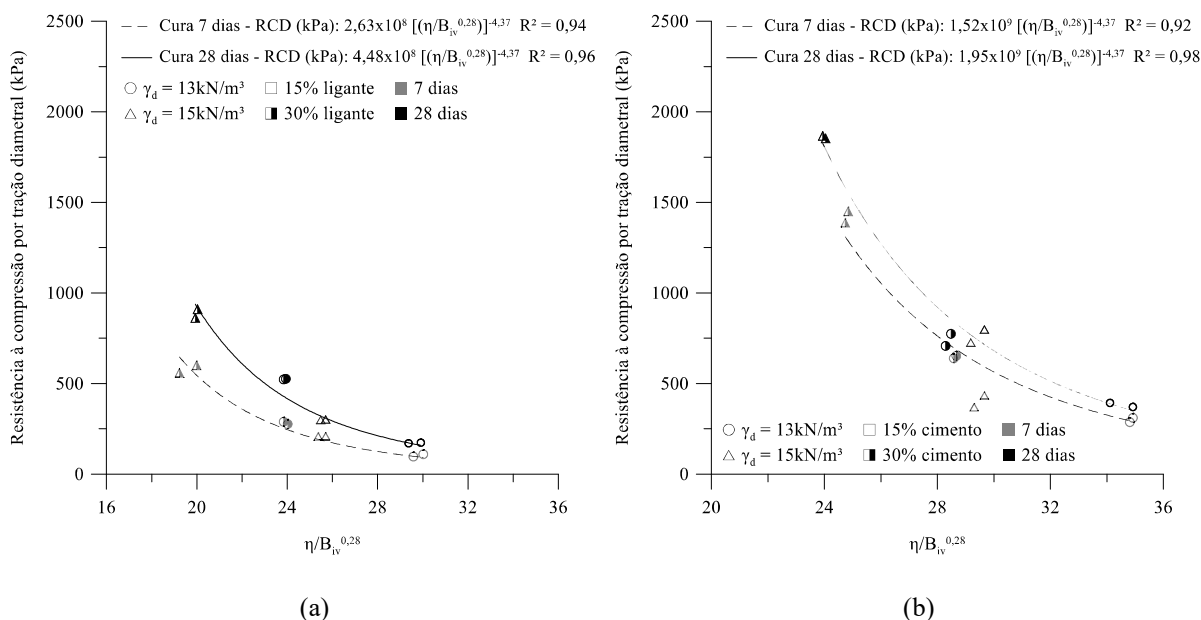


Figura 4.25: Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e o índice  $\eta/B_{iv}$  (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

O comportamento da resistência à tração por compressão diametral foi muito similar ao encontrado para a resistência à compressão simples, onde a redução da relação entre a porosidade e o ligante cimentício levou a um aumento na resistência. Novamente, esse comportamento é associado a maior mobilização de atrito, oriunda da maior área de contato entre as partículas da mistura. A percentagem de ligante, por sua vez, resulta em uma maior precipitação de compostos cimentícios, o que contribui para o aumento da resistência.

Outra vez, a partir da comparação entre as curvas de 7 e 28 dias de tempo de cura, foi possível notar que o agente cimentante alternativo conduziu a um aumento de resistência à tração por compressão diametral mais vultoso quando confrontado com o cimento tradicional. Esse comportamento indica que os produtos de reação do agente cimentante álcali-ativado continuaram a reagir no delongar de ambos tempos de cura estudados. Por sua vez, o CPV-ARI desenvolveu a maior parte de sua resistência nos primeiros 7 dias.

No que diz respeito as equações de previsão de resistência, que relacionam os dados experimentais e o índice  $\eta/B_{iv}$ , foram encontrados coeficientes de determinação ( $R^2$ ) extremamente elevados. As equações do ligante álcali-ativado apresentaram coeficientes de

determinação de 94% e 96% nas amostras de 7 e 28 dias de cura, respectivamente. Para as misturas tratadas com CPV-ARI, foram obtidos valores de 92% para 7 dias de cura e 98% para 28 dias de cura. Novamente, os elevados valores de  $R^2$  indicam a viabilidade do índice para a previsão da resistência para ambos cimentos. As Equações (4.13) e (4.14) representam as relações encontradas para as amostras tratadas com o ligante álcali-ativado e as Equações (4.21) e (4.22) para as amostras tratadas com CPV-ARI.

$$\text{RCD (kPa)}_{7\text{dias}} = 2,63 \times 10^8 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}} \right)^{0,28} \right]^{-4,37} \quad (4.13)$$

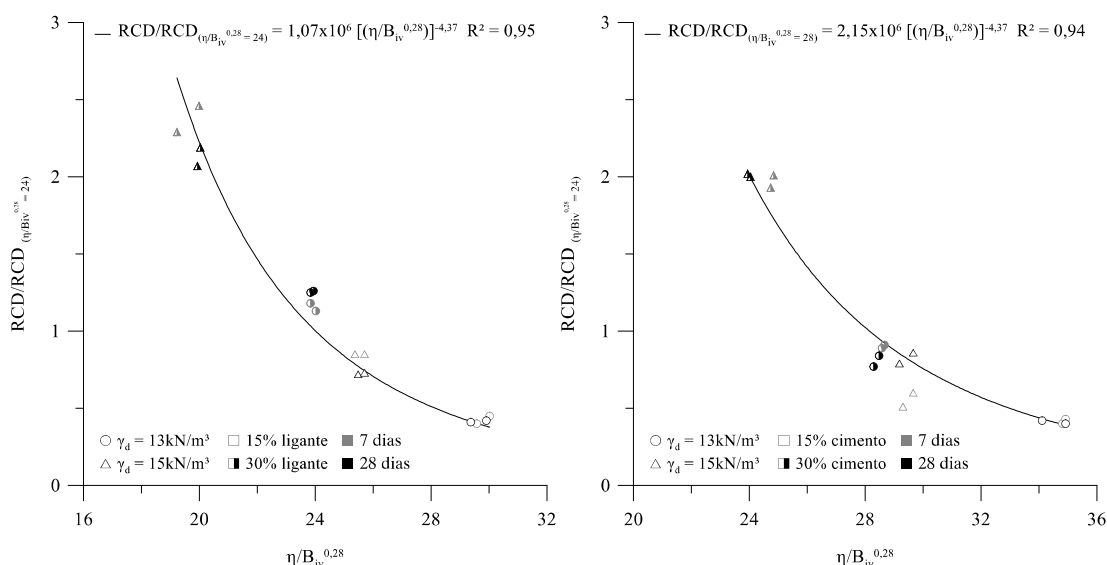
$$\text{RCD (kPa)}_{28\text{dias}} = 4,48 \times 10^8 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}} \right)^{0,28} \right]^{-4,37} \quad (4.14)$$

$$\text{RCD (kPa)}_{7\text{dias}} = 1,52 \times 10^9 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}} \right)^{0,28} \right]^{-4,37} \quad (4.15)$$

$$\text{RCD (kPa)}_{28\text{dias}} = 1,95 \times 10^9 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}} \right)^{0,28} \right]^{-4,37} \quad (4.16)$$

Cabe destacar que as Equações (4.13) a (4.22) apresentaram expoentes externos iguais (lê-se: -4,37) e constantes iniciais distintas. Novamente, como existiam equações distintas para a previsão da resistência a diferentes tempos de cura, foi proposta a normalização dos resultados de modo a gerar uma relação única para os dados estudados.

A Figura 4.24 apresenta os resultados de resistência à tração por compressão diametral normalizados frente ao tempo de cura. A normalização foi criada por meio da divisão dos resultados por um valor fixo de resistência,  $\eta/B_{iv}^{0,28} = 24$  para o ligante álcali-ativado e  $\eta/B_{iv}^{0,28} = 28$  para o CPV-ARI, escolhido por ser um valor central comum a ambas as curvas.



(a) (b)  
 Figura 4.26: Resistência à tração por compressão diametral normalizada para ambos tempos de cura (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

Desta forma, fez-se concebível a obtenção de uma relação única, para cada ligante cimentício estudado, entre a resistência à tração por compressão diametral normalizada e o índice porosidade/teor volumétrico de ligante, independentemente do tempo de cura. As Equações (4.19) e (4.20) representam as amostras tratadas com o ligante álcali-ativado e o com o CPV-ARI, respectivamente.

$$\text{RCD/RCD}_{\left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} = 24\right)} = 1,07 \times 10^6 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-4,37} \quad (4.17)$$

$$\text{RCD/RCD}_{\left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} = 28\right)} = 2,15 \times 10^6 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-4,37} \quad (4.18)$$

O coeficiente de determinação encontrado na Equação (4.19) foi de 95% e o da Equação (4.20) foi de 94%, indicando a possibilidade de normalização dos resultados de ambos os cimentos no que diz respeito ao tempo de cura. Ademais, os elevados valores de coeficientes de determinação indicam a grande representatividade das equações para a previsão da resistência à tração por compressão diametral das misturas analisadas.

### 4.3.3 Rigidez

Os resultados do ensaio de pulso ultrassônico foram correlacionados com o parâmetro ajustado  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , de forma análoga ao exposto nos resultados de resistência à compressão simples e resistência à compressão diametral, como mostra a Figura 4.27.

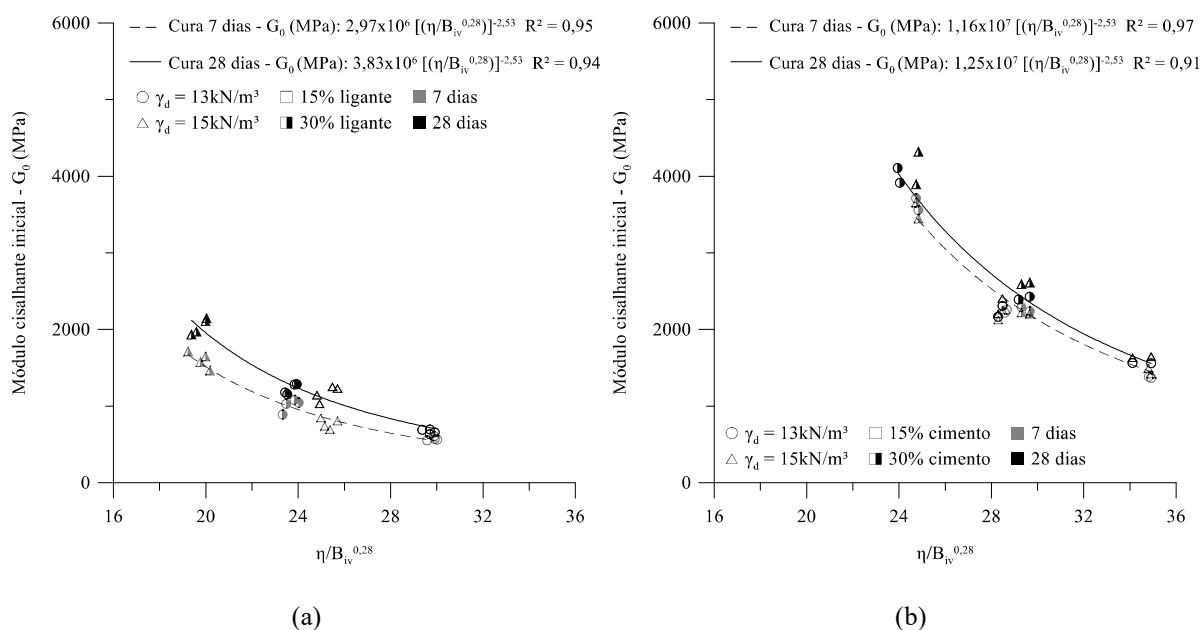


Figura 4.27: Relação entre a rigidez e o índice  $\eta/B_{iv}$  (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

O comportamento da rigidez fez alusão direta ao evidenciado nos ensaios de resistência, onde a redução da relação entre a porosidade e o ligante cimentício levou a um aumento na variável resposta. A redução da porosidade resulta em uma maior área de contato entre as partículas, mobilizando atrito e potencializando o seu intertravamento o que leva ao aumento da rigidez. Por sua vez, o aumento no teor de ligante gera uma maior precipitação de compostos cimentícios, o que também contribui diretamente para o aumento da rigidez.

A comparação das curvas de 7 e 28 dias de cura do ligante álcali-ativado e do CPV-ARI atesta que o cimento alternativo resulta em um aumento de rigidez mais expressivo. Como visto anteriormente, esse comportamento indica que os produtos de reação da álcali-ativação continuaram a reagir durante o período do tempo de cura.

As relações entre os dados experimentais e o índice  $\eta/B_{iv}^{0.28}$  apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) extremamente elevados. No que diz respeito ao ligante álcali-ativado, os valores foram de 95% para as amostras de 7 dias e 94% para as amostras de 28 dias. Por sua vez, para os tratamentos realizados com CPV-ARI os coeficientes foram de 97% e 91% para 7 dias e 28 dias de cura, respectivamente. O alto valor de todos coeficientes de determinação denota a capacidade do índice  $\eta/B_{iv}^{0.28}$  em prever a rigidez inicial das misturas para ambos agentes cimentantes estudados. As Equações (4.19) e (4.20) representam as relações encontradas para o ligante álcali-ativado e as Equações (4.21) e (4.22) para o CPV-ARI.

$$G_0 \text{ (MPa)}_{7\text{dias}} = 2,97 \times 10^6 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}} \right)^{0,28} \right]^{-2,53} \quad (4.19)$$

$$G_0 \text{ (MPa)}_{28\text{dias}} = 3,83 \times 10^6 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}} \right)^{0,28} \right]^{-2,53} \quad (4.20)$$

$$G_0 \text{ (MPa)}_{28\text{dias}} = 1,16 \times 10^7 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}} \right)^{0,28} \right]^{-2,53} \quad (4.21)$$

$$G_0 \text{ (MPa)}_{28\text{dias}} = 1,25 \times 10^7 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}} \right)^{0,28} \right]^{-2,53} \quad (4.22)$$

Novamente, as equações de rigidez para cada ligante apresentaram expoentes externos iguais, possuindo apenas constantes iniciais diferentes. Assim, o comportamento mecânico das misturas analisadas pode ser normalizado no que diz respeito seu tempo de cura, criando uma correlação matemática única.

A Figura 4.28 apresenta os resultados de rigidez inicial normalizados frente a variável pré-estabelecida. Na análise das misturas álcali-ativadas, a normalização foi concebida por meio da divisão dos resultados por um valor fixo de resistência,  $\eta/B_{iv}^{0,28} = 24$ , escolhido por ser um valor central comum a ambas as curvas. Por outro lado, para as misturas com o cimento convencional, os resultados foram divididos por um  $\eta/B_{iv}^{0,28} = 28$ , pelo mesmo motivo supracitado.

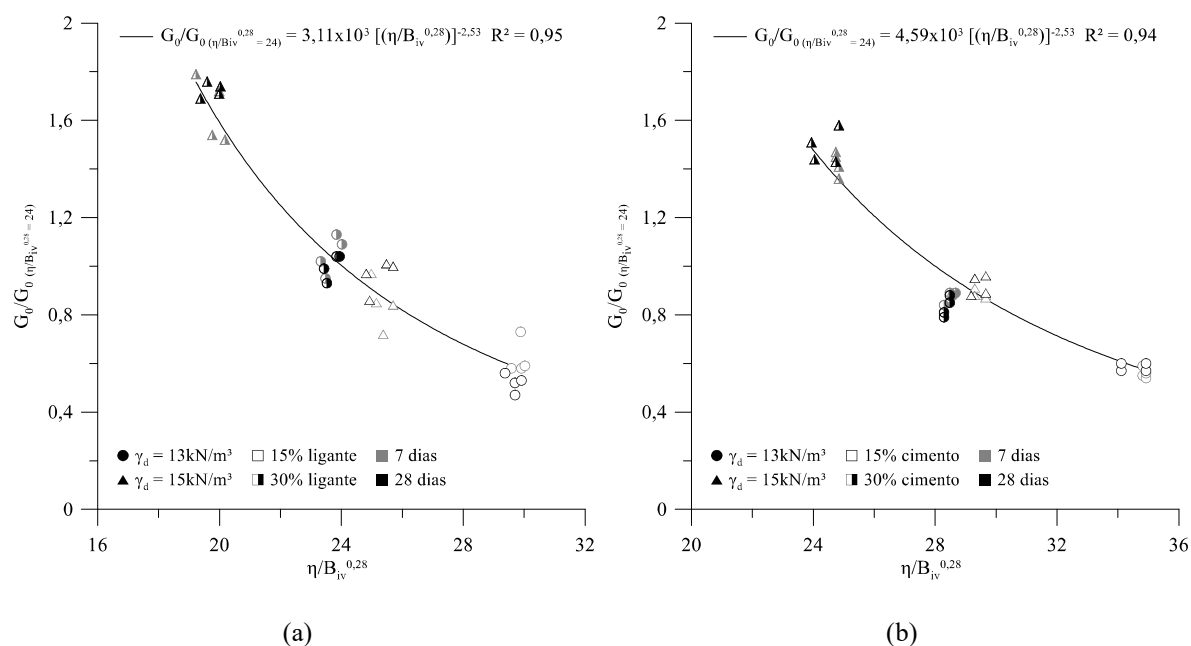


Figura 4.28: Rigidez inicial normalizada para ambos tempos de cura (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

Fazendo alusão as análises realizadas para os ensaios de resistência, foi criada uma relação única entre a rigidez normalizada e o índice porosidade/teor volumétrico de ligante para os dois tipos de cimento, independentemente do tempo de cura. A Equação (4.23) descrever o comportamento do ligante álcali-ativado e a Equação (4.24) do CPV-ARI

$$G_0/G_0\left(\eta/B_{iv}^{0,28} = 24\right) = 3,11 \times 10^3 \left[ \left( \eta/B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{-2,53} \quad (4.23)$$

$$G_0/G_0\left(\eta/B_{iv}^{0,28} = 28\right) = 4,59 \times 10^3 \left[ \left( \eta/B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{-2,53} \quad (4.24)$$

As Equações (4.23) e (4.24) apresentaram coeficientes de determinação de 95% e 94% respectivamente, indicando a possibilidade de normalização dos resultados de ambos os cimentos, para a variável tempo de cura. Por fim, os elevados valores de coeficientes de determinação indicam a grande representatividade das equações para a previsão da rigidez inicial das misturas analisadas.

#### 4.3.4 Durabilidade

Os resultados de perda de massa acumulada (PMA) dos ciclos 1, 3, 6, 9 e 12 do ensaio de durabilidade foram correlacionados com o parâmetro ajustado  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ , de forma semelhante ao exposto nos resultados de resistência e rigidez, como mostra a Figura 4.29.

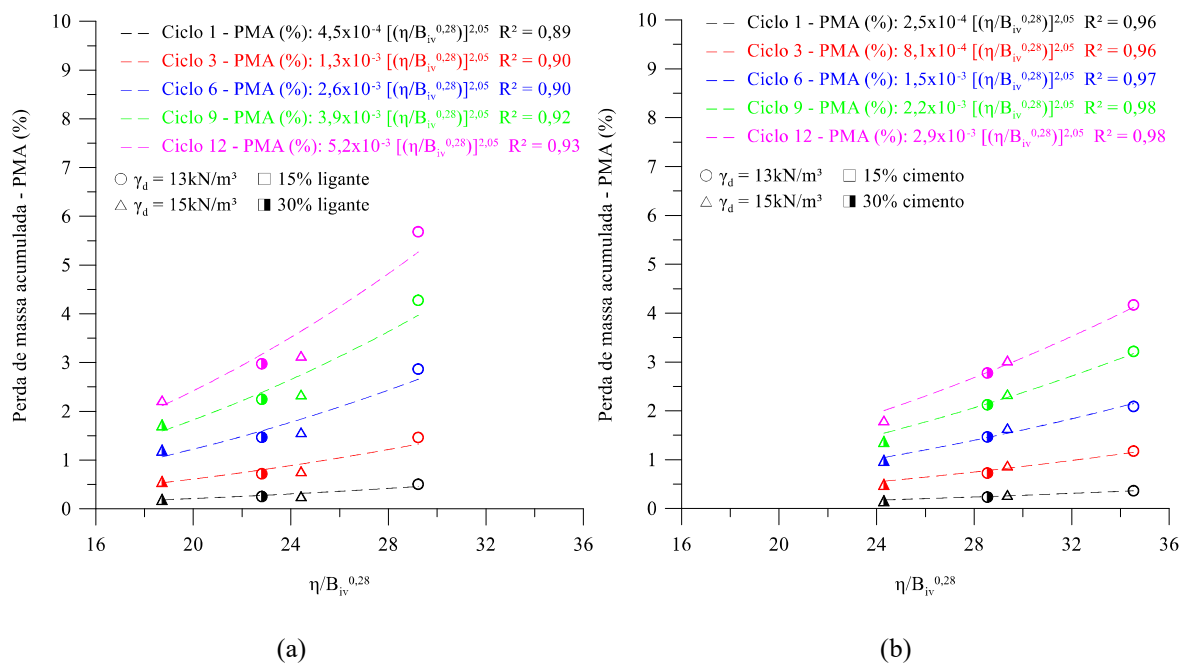


Figura 4.29: Relação entre a perda de massa acumulada ao longo dos ciclos e o índice  $\eta/B_{iv}$  (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

Mais uma vez, foi possível notar que a redução da relação entre a porosidade e o ligante cimentício levou à melhora do comportamento mecânico das misturas, com a redução na PMA. A redução na porosidade resulta em uma maior área de contato entre as partículas da mistura, o que resulta na potencialização de seu intertravamento em virtude da maior mobilização de atrito. Por sua vez, o aumento no teor de ligante resulta em uma maior precipitação de reações cimentícias, contribuindo para a melhora do comportamento mecânico.

As Equações (4.25) a (4.29) representam as relações encontradas para o ligante álcali-ativado e as Equações (4.30) a (4.34) para o CPV-ARI. Cabe destacar que as equações de durabilidade para cada ligante apresentaram expoentes externos iguais, possuindo apenas distintas constantes iniciais.

$$PMA_{\text{ciclo } 1}(\%) = 4,5 \times 10^{-4} \left[ \left( \eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{2,05} \quad (4.25)$$

$$PMA_{\text{ciclo } 3}(\%) = 1,3 \times 10^{-3} \left[ \left( \eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{2,05} \quad (4.26)$$

$$PMA_{\text{ciclo } 6}(\%) = 2,6 \times 10^{-3} \left[ \left( \eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{2,05} \quad (4.27)$$

$$\text{PMA}_{\text{ciclo } 9}(\%) = 3,9 \times 10^{-3} \left[ \left( \eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{2,05} \quad (4.28)$$

$$\text{PMA}_{\text{ciclo } 12}(\%) = 5,2 \times 10^{-3} \left[ \left( \eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{2,05} \quad (4.29)$$

$$\text{PMA}_{\text{ciclo } 1}(\%) = 2,5 \times 10^{-4} \left[ \left( \eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{2,05} \quad (4.30)$$

$$\text{PMA}_{\text{ciclo } 3}(\%) = 8,1 \times 10^{-4} \left[ \left( \eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{2,05} \quad (4.31)$$

$$\text{PMA}_{\text{ciclo } 6}(\%) = 1,5 \times 10^{-3} \left[ \left( \eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{2,05} \quad (4.32)$$

$$\text{PMA}_{\text{ciclo } 9}(\%) = 2,2 \times 10^{-3} \left[ \left( \eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{2,05} \quad (4.33)$$

$$\text{PMA}_{\text{ciclo } 12}(\%) = 2,9 \times 10^{-3} \left[ \left( \eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{2,05} \quad (4.34)$$

As relações entre os dados experimentais e o índice  $\eta/B_{iv}$  apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) extremamente elevados, sendo o menor deles de 0,89. Os altos coeficientes de determinação indicam a viabilidade do índice para a previsão da PMA no decorrer dos ciclos para ambos agentes cimentantes estudados.

Como destacado no item 4.2.3, a PMA após 12 ciclos de molhagem e secagem possui um limite de 10% para siltes com baixo índice de plasticidade, como no caso do rejeito de mineração de bauxita. No caso do ligante álcali-ativado, um valor de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  de 38 seria capaz de suprir as exigências normativas da PCA (1992) e para o cimento Portland convencional um valor de  $\eta/B_{iv}^{0,28}$  de 50 já seria o suficiente.

#### 4.3.4.1 Módulo cisalhante inicial ao longo dos ciclos de durabilidade

Para a análise do módulo cisalhante inicial ao longo dos ciclos de durabilidade, fez-se o uso da mesma abordagem empregada aos ensaios que analisaram a perda de massa. Com isso, foi possível representar a degradação da rigidez das amostras ensaiadas em função da relação porosidade/teor volumétrico de ligante, em consonância com a Figura 4.30.



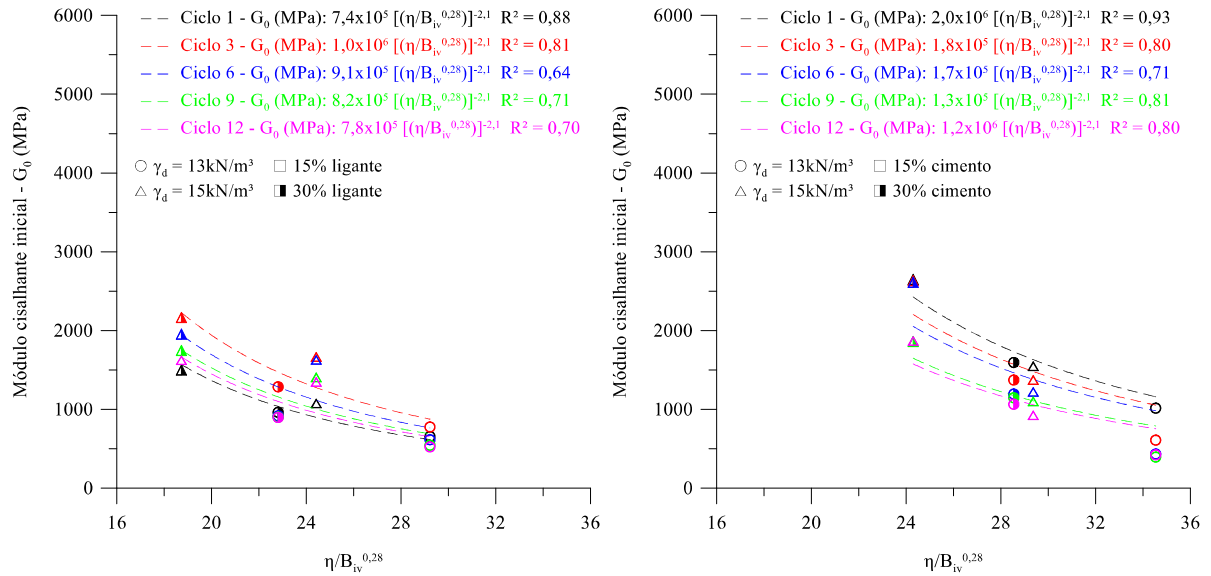


Figura 4.30: Relação entre o módulo cisalhante inicial ao longo dos ciclos e o índice  $\eta/B_{iv}$  (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland de alta resistência inicial (Elaborado pelo Autor, 2020)

De maneira correlata ao exposto nos ensaios de resistência e rigidez, a redução da relação entre a porosidade e o ligante cimentício levou à melhora do comportamento mecânico das misturas, para todos os ciclos analisados. Além disso, foram encontradas equações que delineiam o comportamento das misturas, no que tange seus módulos cisalhantes iniciais. As Equações (4.35) a (4.39) representam as relações encontradas para o ligante álcali-ativado e as Equações (4.40) a (4.44) para o CPV-ARI. Novamente, as equações para cada ligante apresentaram expoentes externos iguais, possuindo apenas constantes iniciais diferentes.

$$G_{0\text{ciclo } 1}(\text{MPa}) = 7,4 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-2,1} \quad (4.35)$$

$$G_{0\text{ciclo } 3}(\text{MPa}) = 1,0 \times 10^6 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-2,1} \quad (4.36)$$

$$G_{0\text{ciclo } 6}(\text{MPa}) = 9,1 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-2,1} \quad (4.37)$$

$$G_{0\text{ciclo } 9}(\text{MPa}) = 8,2 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-2,1} \quad (4.38)$$

$$G_{0\text{ciclo } 12}(\text{MPa}) = 7,8 \times 10^5 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-2,1} \quad (4.39)$$

$$G_{0\text{ciclo } 1}(\text{MPa}) = 2,0 \times 10^6 \left[ \left( \frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right) \right]^{-2,1} \quad (4.40)$$

$$G_{0_{\text{ciclo } 3}}(\text{MPa}) = 1,8 \times 10^5 \left[ \left( \eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{-2,1} \quad (4.41)$$

$$G_{0_{\text{ciclo } 6}}(\text{MPa}) = 1,7 \times 10^5 \left[ \left( \eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{-2,1} \quad (4.42)$$

$$G_{0_{\text{ciclo } 9}}(\text{MPa}) = 1,3 \times 10^5 \left[ \left( \eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{-2,1} \quad (4.43)$$

$$G_{0_{\text{ciclo } 12}}(\text{MPa}) = 1,2 \times 10^5 \left[ \left( \eta / B_{iv}^{0,28} \right) \right]^{-2,1} \quad (4.44)$$

Apesar de uma certa dispersão dos dados, oriunda de trincas e fissuras internas presentes nas amostras durante o ensaio de durabilidade, as relações entre os dados experimentais e o índice  $\eta/B_{iv}$  apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) consideráveis. Assim, faz-se possível a utilização do índice para a previsão do módulo cisalhante inicial das amostras no decorrer dos ciclos de durabilidade, para ambos agentes cimentantes estudados.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos ensaios e análises realizados, as seguintes considerações finais foram aferidas:

- a) No estudo do ligante álcali-ativado, os maiores valores de resistência foram evidenciados para as amostras compostas por 70% de CBCA e 30% de CC, com concentração molar de 1M de NaOH e concentração de álcalis de 3,86%. Esse comportamento foi associado à fraca solubilidade da portlandita em meios fortemente alcalinos.
- b) A análise estatística revelou que, para os ensaios de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral das amostras tratadas com o ligante álcali-ativado, todos os fatores principais A, B e C, bem como as interações AB e BC influenciam significativamente na variável resposta. Por outro lado, as interações AC e ABC não afetaram a variável resposta de forma significativa. No que tange a magnitude da influência dos fatores considerados significativos, o teor de ligante (C) se apresentou como o mais influente, seguido pelo peso específico aparente seco (A), tempo de cura (B), interação entre o peso específico aparente seco e o tempo de cura (AB) e, por fim, interação entre o tempo de cura e o teor de ligante (BC). O alto grau de influência do teor de ligante (C) na variável resposta é justificado com base na maior quantidade de reações pozolânicas geradas com o aumento do teor do ligante na mistura, o que contribui diretamente para o acréscimo de resistência relatado. Por sua vez, o grau de influência do peso específico aparente seco (A) na variável resposta é explicado pela maior área de contato entre as partículas da mistura, devido à menor porosidade, o que resulta na potencialização de seu intertravamento e consequente aumento de resistência. Por fim, constatou-se que a menor magnitude de influência entre os fatores principais foi apresentada pelo fator tempo de cura (B), devido à aceleração das reações cimentícias e consequente otimização do tempo necessário para o aferimento de uma certa resistência, assim, apesar de ser significativo na variável resposta, o grau de influência do tempo cura foi menor.
- c) Para os ensaios de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral do grupo de tratamentos do cimento Portland de alta resistência inicial, todos os fatores principais A, B e C, as interações de segunda ordem AB e AC, bem como a interação de terceira ordem ABC influenciam significativamente na variável resposta. Por outro

lado, a interação de segunda ordem BC não afeta a variável resposta de forma significativa. No que diz respeito a magnitude da influência dos fatores considerados significativos, o peso específico aparente seco (A) se apresentou como o mais influente, seguido pelo teor de ligante (C), interação entre o peso específico aparente seco e o teor de cimento (AC), tempo de cura (B), interação entre o peso específico aparente seco e o tempo de cura (AB) e, por fim, a interação de terceira ordem (ABC). Dentre os fatores significativos principais dos tratamentos com CPV-ARI, os de maior magnitude foram o fator A e C, respectivamente. Conforme mencionado anteriormente, o peso específico aparente seco (A) e o teor de cimento (C) apresentam uma forte influência nos valores de resistência de misturas solo-cimento. O aumento do peso específico (A) resulta em uma maior área de contato entre as partículas, mobilizando o atrito e potencializando o intertravamento, aumentando a resistência. Já o aumento no teor de cimento (C) leva a um acréscimo na quantidade de reações cimentícias e consequentemente à uma maior resistência. O fator tempo de cura (B) apresentou a menor magnitude dentre os fatores principais, esse fato é alicerçado na premissa de que o CPV-ARI desenvolve em torno de 80% de sua resistência nos primeiros 7 dias e, portanto, era esperado que esse fator não apresentasse grande magnitude na variável resposta.

- d) O comportamento dos efeitos padronizados da rigidez do ligante álcali-ativado foi idêntico ao encontrado para os ensaios de resistência das misturas tratadas com o mesmo ligante. Para tratamentos de módulo cisalhante inicial, todos os fatores principais A, B e C, bem como as interações de segunda ordem AB e BC influenciam significativamente na variável resposta. Por outro lado, a interação de segunda ordem AC e a de terceira ordem ABC não afetam a variável resposta de forma significativa. No que tange a magnitude da influência dos fatores considerados significativos, o teor de ligante (C) se apresentou como o mais influente, seguido pelo peso específico aparente seco (A), tempo de cura (B), interação entre o peso específico aparente seco e o tempo de cura (AB) e, por fim, interação entre o tempo de cura e o teor de ligante (BC).
- e) O mesmo comportamento foi demonstrado para tratamentos realizados com o CPV-ARI, onde todos os fatores principais A, B e C, as interações de segunda ordem AB e AC bem como a interação de terceira ordem ABC influenciam significativamente na variável resposta. Por outro lado, a interação de segunda ordem BC não afeta a variável resposta de forma significativa. No que diz respeito a magnitude da influência dos fatores considerados significativos, o peso específico aparente seco (A) se apresentou

como o mais influente, seguido pelo teor de ligante (C), interação entre o peso específico aparente seco e o teor de cimento (AC), tempo de cura (B), interação entre o peso específico aparente seco e o tempo de cura (AB) e, por fim, a interação de terceira ordem (ABC).

- f) No que concerne a relação entre a sucção e resistência das amostras, nota-se que a influência da sucção variou de 0,74 a 20,72%. Em média, essa influência não ultrapassou 10% da resistência em questão, indicando a uniformização dos resultados.
- g) A perda de massa individual (PMI) das amostras, para ambos agentes cimentantes estudados, se deu de forma regular e gradual, apresentando apenas pequenas variações e, assim, confirmando a qualidade de execução do ensaio. Os valores médios de PMI não ultrapassaram a marca de 0,50% em todas as amostras estudadas, independentemente do tipo de ligante analisado. Além disso, o comportamento entre os ligantes deu-se de maneira semelhante, onde as maiores PMI médias ocorreram nas amostras de peso específico 13kN/m<sup>3</sup> e 15% de ligante e as menores nas amostras de peso específico 15kN/m<sup>3</sup> e 30% de ligante. No que tange a grandeza da PMI média entre os ligantes estudados, como para os ensaios de resistência e rigidez, os tratamentos de durabilidade realizados com CPV-ARI apresentaram um melhor comportamento mecânico. Apesar do desempenho superior, cabe destacar que, os resultados das amostras tratadas com o ligante álcali-ativado foram muito similares aos das amostras tratadas com CPV-ARI.
- h) Foi possível distinguir uma grande influência tanto do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) como da quantidade de ligante sobre a perda de massa acumulada do ensaio de durabilidade para ambos ligantes. Analogamente ao evidenciado nos ensaios de resistência e rigidez, a influência do  $\gamma_d$  é explicada pela maior área de contato entre as partículas da mistura, devido à menor porosidade, o que resulta na potencialização de seu intertravamento e consequente aumento de resistência devido à maior mobilização de atrito entre as partículas. Por sua vez, a influência da quantidade de ligante tem como justificativa a maior quantidade de reações geradas com o aumento do teor do agente cimentante na mistura, o que contribui diretamente para o acréscimo de durabilidade relatado.
- i) Os resultados de perda de massa acumulada (PMA) demonstraram que os tratamentos realizados com cimento Portland de alta resistência inicial apresentaram um melhor

comportamento mecânico quando comparado aos tratamentos executados com o ligante álcali-ativado. Os tratamentos realizados com o ligante álcali-ativado apresentaram uma PMA máxima de 5,68% e uma mínima de 2,23%. Por outro lado, as amostras estabilizadas com CPV-ARI resultaram em uma PMA máxima de 4,17% e uma mínima de 1,81%. Novamente, cabe destacar que, apesar de apresentarem valores inferiores os resultados dos tratamentos realizados com o ligante álcali-ativado foram muito similares aos das amostras tratadas com CPV-ARI, apresentando uma diferença média entre os resultados de apenas 16%. Ao comparar os dados dos ligantes álcali-ativado e convencional, é evidenciado um comportamento extremamente similar, onde os maiores valores de PMA ocorreram nas amostras de peso específico 13kN/m<sup>3</sup> e 15% de ligante e os menores nas amostras de peso específico 15kN/m<sup>3</sup> e 30%.

- j) Todas amostras do ensaio de durabilidade, tanto do cimento alternativo, quanto do cimento convencional, cumpriram os requisitos mínimos normativos de perda de massa acumulada, comprovando a eficácia da estabilização proposta.
- k) No que diz respeito a inspeção visual realizada nas amostras de durabilidade, foi possível perceber a influência do peso específico aparente seco e percentagem de ligante, onde amostras de menores porosidades e maiores quantidades de ligante apresentam uma maior integridade geral. Esse aspecto físico faz alusão direta a PMA do ensaio de durabilidade, onde amostras que sofreram maiores perdas de massa apresentaram também alterações de volume mais significativas. Além disso, evidenciou-se o aparecimento gradual de pequenas trincas e fissuras, decorrentes dos sucessivos períodos de molhagem, secagem e abrasão pela escova metálica.
- l) Os resultados do módulo cisalhante inicial ao longo dos ciclos de molhagem e secagem do ensaio de durabilidade para o ligante álcali-ativado, revelaram que a rigidez apresentou um comportamento crescente até o ciclo de número três e, a partir desse marco, a mesma decresceu com o aumento dos ciclos. Sabe-se que a ação abrasiva do procedimento de escovação em conjunção com a ação intempestiva dos ciclos de molhagem e secagem do ensaio de durabilidade, resultam na perda de massa e degradação da rigidez das amostras. Entretanto, como evidenciado pelo comportamento dos ensaios de resistência, em um período de cura de apenas 7 dias as reações do ligante álcali-ativado ainda não ocorreram de forma completa. Se por um lado os procedimentos do ensaio de durabilidade deterioram as amostras, por outro a exposição à elevadas temperaturas e a disponibilidade de água contribuem para catálise das reações que ainda

estão ocorrendo. Assim, até o ciclo de número três, o efeito positivo tem um peso maior que o negativo e a partir desse limite o comportamento oposto é evidenciado, levando ao decréscimo da resistência.

- m) Para o caso das amostras tratadas com o cimento de alta resistência inicial, a rigidez e integridade das amostras apenas diminui com o decorrer dos ciclos de durabilidade. Esse comportamento ocorre de forma distinta ao visto para as amostras álcali-ativadas, pois, a maior parte das reações cimentícias do CPV-ARI já ocorreram nos primeiros 7 dias de cura.
- n) De maneira geral, a redução da relação entre a porosidade e o ligante cimentício ( $\eta/B_{iv}^{0,28}$ ) promoveu um aumento nas propriedades mecânicas de resistência à compressão simples, resistência à compressão por tração diametral, módulo cisalhante inicial e durabilidade das misturas.
- o) Quanto a relação ajustada entre porosidade e teor volumétrico de ligante, foi possível o estabelecimento de relações únicas, para ambos agentes cimentantes estudados, entre as variáveis resposta resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo cisalhante inicial e durabilidade e o índice  $\eta/B_{iv}^{0,28}$ .
- p) O comportamento dos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e rigidez foi normalizado frente a variável tempo de cura. Com isso, fez-se concebível a geração de uma única correlação matemática para a previsão dos comportamentos mecânicos dos materiais estabilizados para cada um dos ligantes estudados.
- q) Todas as relações apresentaram coeficientes de determinação satisfatórios, o que indica que a metodologia de dosagem aplicada nesta pesquisa é adequada para a previsão do comportamento mecânico do rejeito de mineração de bauxita para as condições experimentais propostas. A partir desta metodologia de dosagem racional, faz-se possível a escolha da quantidade de ligante e esforço de compactação adequados para aplicações geotécnicas específicas.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De maneira a complementar e dar um prosseguimento ao trabalho realizado nesta pesquisa, ampliando o conhecimento sobre durabilidade, rigidez, lixiviação e previsão de parâmetros de resistência, o autor sugere os seguintes tópicos de pesquisa:

- a) Estudar outros tipos de precursores e ativadores para a aplicação em rejeitos de mineração de bauxita;
- b) Estudar diferentes tipos de rejeitos de mineração e seu comportamento frente a estabilização por meio da técnica de álcali-ativação;
- c) Avaliar o impacto de diferentes temperaturas de cura na estabilização de rejeitos de mineração;
- d) Avaliar o impacto ambiental, social e econômico do ligante álcali-ativado por meio de uma Análise de Ciclo de Vida (ACV);
- e) Avaliar as condições microestruturais do ligante álcali-ativado por meio de ensaios de DRX, FRX e MEV;
- f) Realizar a classificação ambiental das misturas estudadas;
- g) Analisar a resposta cisalhante cíclica por meio de ensaios triaxiais e *simple shear*, sob diferentes condições de deformação e de tensão cisalhante controlada.



## REFERÊNCIAS

ABAL, I. B. de A. **Trabalho da CBA de restauração florestal em áreas mineradas é destaque internacional**. 2020. Disponível em: <abal.org.br>. Acesso em: 10 jan. 2020.

ABNT. NBR NM 52: Agregados miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, [s. l.], 2009.

ABNT. NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, [s. l.], 2011.

ABNT. NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, [s. l.], 2016.

ABNT. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, [s. l.], 2017. a.

ABNT. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**, 2017. b.

ABNT. NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, [s. l.], 2018. a.

ABNT. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, [s. l.], 2018. b.

ABNT. NBR 7182: Solo - Ensaio de Compactação. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, [s. l.], 2020.

ABU BAKAR, B. H.; RAMADHANSYAH, P. J.; MEGAT AZMI, M. J. Effect of rice husk ash fineness on the chemical and physical properties of concrete. **Magazine of Concrete Research**, [s. l.], v. 63, n. 5, p. 313–320, 2011. Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/mac.10.00019>>

AGATZINI-LEONARDOU, S. et al. Titanium leaching from red mud by diluted sulfuric acid at atmospheric pressure. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 157, n. 2–3, p. 579–586, 2008.

AHMARI, S.; ZHANG, L.; ZHANG, J. Effects of activator type/concentration and curing temperature on alkali-activated binder based on copper mine tailings. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 47, n. 16, p. 5933–5945, 2012. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10853-012-6497-9>>

ÅHNBERG, H. On yield stresses and the influence of curing stresses on stress paths and strength measured in triaxial testing of stabilized soils. **Canadian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 54–66, 2007. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/t06-096>>

AKINWUMI, I. I. et al. Investigation of calcium carbide residue as a stabilizer for tropical sand used as pavement material. **WIT Transactions on The Built Environment**, [s. l.], v. 182, p. 285–294, 2019.

AL-TABBAA, A.; EVANS, C. W. Laboratory-scale soil mixing of a contaminated site. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement**, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 119–134, 1999. Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/gi.1999.030303>>

ALAM, S.; DAS, S. K.; RAO, B. H. Strength and durability characteristic of alkali activated GGBS stabilized red mud as geo-material. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 211, p. 932–942, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.261>>

ALCOA. **Minimize Impacts. Maximize Value.** 2020. Disponível em: <<https://www.alcoa.com/sustainability/en/default.asp>>. Acesso em: 26 fev. 2020.

ALEVA, G. J. J. Essential differences between the bauxite deposits along the southern and northern edges of the Guiana Shield, South America. **Economic Geology**, [s. l.], v. 76, n. 5, p. 1142–1152, 1981. Disponível em: <<http://pubs.geoscienceworld.org/economicgeology/article/76/5/1142/19482/Essential-differences-between-the-bauxite-deposits>>

ALMEIDA, E. B. De. **Geology of the bauxite deposits of the pocos de caldas in partial fulfillment of the requirements.** 1977. Stanford University, [s. l.], 1977.

AMPERA, B.; AYDOGMUS, T. Recent Experiences with Cement and Lime – Stabilization of Local Typical Poor Cohesive Soil. In: VERÖFFENTLICHUNGEN DES INSTITUTS FÜR GEOTECHNIK DER TU BERGAKADEMIE FREIBERG PROCEEDINGS 2005, Freiberg, Germany. **Anais...** Freiberg, Germany

AMU, O. O.; ADETUBERU, A. A. Characteristics of bamboo leaf ash stabilization on lateritic soil in highway construction. **International Journal of Engineering and Technology**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 212–219, 2010.

ARMSTRONG, M. et al. Accounting for tailings dam failures in the valuation of mining projects. **Resources Policy**, [s. l.], v. 63, n. May, p. 101461, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101461>>

ASSI, L. N.; EDDIE DEEVER, E.; ZIEHL, P. Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 167, p. 372–380, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.193>>

ASTM. D559/D559M: Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures. **American Society for Testing and Materials**, [s. l.], 2015.

ASTM. D2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). **American Society for Testing and Materials**, [s. l.], p. 1–5, 2017.

ASTM. C977: Standar Specification for Quicklime and Hydrated Lime for Soil Stabilization. **American Society for Testing and Materials**, [s. l.], 2018.

AYTEKIN, M.; NAS, E. Soil stabilization with lime and cement. **Teknik Dergi/Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 471–477, 1998.

AZAPAGIC, A. Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 12, n. 6, p. 639–662, 2004. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652603000751>>

BAHURUDEEN, A. et al. Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 59, p. 77–88, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.004>>

BALDOVINO, J. A. et al. Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 188–194, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.10.001>>

BÁRDOSSY, G. **Karst Bauxites - bauxite deposits on carbonate rocks**. Budapest, Hungary: Elsevier Publishing Company, 1982. v. 14

BÁRDOSSY, G. Carboniferous to Jurassic bauxite deposits as paleoclimatic and paleogeographic indicators. **Pangea: Global Environments and Resources**, [s. l.], v. 17, p. 283–293, 1994.

BEDIN, J.; SCHNAID, F. Piezocone in silty tailing materials. **Studia Geotechnica et Mechanica**, [s. l.], v. 29, n. 1–2, p. 151–162, 2007.

BEDIN, J.; SCHNAID, F. **Estudo das Propriedades Geotécnicas de Resíduos de Mineração através de ensaios de laboratório**. [s.l: s.n.].

BEHIRY, A. E. A. E.-M. Utilization of a new by-product material for soft subgrade soil stabilization. **OALib**, [s. l.], v. 01, n. 03, p. 1–22, 2014. Disponível em: <<http://www.oalib.com/paper/pdf/3098033>>

BELEM, T.; BENZAAZOUA, M. An overview on the use of paste backfill technology as a ground support method in cut-and-fill mines. In: (V. & Potvin, Ed.)5TH INT. SYMP. ON GROUND SUPPORT IN MINING AND UNDERGROUND CONSTRUCTION 2004, Perth. **Anais...** Perth: Tayler & Francis Group, 2004.

BENZA AZOUA, M. et al. Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 330–340, 2008. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892687507003536>>

BERGADO, D.T; ANDERSON, L.R; MIURA, N; BALASUBRAMANIAM, A. . **Soft ground improvement in lowland and other environments-ASCE Publications (1996).pdf**. New York, United States: American Society of Civil Engineers, 1996.

BROMS, B. B. Stabilization of Soil with Lime Columns. In: **Foundation Engineering Handbook**. Boston, MA: Springer US, 1991. p. 833–855.

BRUNORI, C. et al. Reuse of a treated red mud bauxite waste: studies on environmental compatibility. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 117, n. 1, p. 55–63, 2005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389404004741>>

BURRIS, L. E. et al. Alternative cementitious materials: Challenges and opportunities. **American Concrete Institute, ACI Special Publication**, [s. l.], p. 1–10, 2015.

CAI, L. et al. Effect of binding materials on carbide slag based high utilization solid-wastes autoclaved aerated concrete (HUS-AAC): Slurry, physic-mechanical property and hydration products. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 188, p. 221–236, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.115>>

CARVALHO, A. **As bauxitas no Brasil - síntese de um programa de pesquisa**. 1989. Universidade de São Paulo - USP, [s. l.], 1989.

CHAND, S. K.; SUBBARAO, C. Strength and Slake Durability of Lime Stabilized Pond Ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 19, n. 7, p. 601–608, 2007. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282007%2919%3A7%28601%29>>

CHEN, J. et al. Driving factors of global carbon footprint pressure: Based on vegetation carbon sequestration. **Applied Energy**, [s. l.], v. 267, n. January, p. 114914, 2020. a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114914>>

CHEN, S. et al. Urban carbon footprints across scale: Important considerations for choosing system boundaries. **Applied Energy**, [s. l.], v. 259, n. November, p. 114201, 2020. b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114201>>

CONSOLI, N. C. et al. Behavior of Compacted Soil-Fly Ash-Carbide Lime Mixtures. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 127, n. 9, p. 774–782, 2001. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291090-0241%282001%29127%3A9%28774%29>>

CONSOLI, N. C. 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: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291090-0241%282007%29133%3A2%28197%29>>

CONSOLI, N. C. et al. Key parameters dictating strength of lime/cement-treated soils. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 162, n. 2, p. 111–118, 2009. Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geng.2009.162.2.111>>

CONSOLI, N. C. et al. Influence of Molding Moisture Content and Porosity/Cement Index on Stiffness, Strength, and Failure Envelopes of Artificially Cemented Fine-Grained Soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 29, n. 5, p. 04016277, 2017. a. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001819>>

CONSOLI, N. C. et al. Compacted clay-industrial wastes blends: Long term performance under extreme freeze-thaw and wet-dry conditions. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 146, n. February, p. 404–410, 2017. b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2017.06.032>>

CONSOLI, N. C. et al. Durability, strength, and stiffness of compacted gold tailings – cement mixes. **Canadian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 55, n. 4, p. 486–494, 2018. a. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/cgj-2016-0391>>

CONSOLI, N. C. et al. Impact of Severe Climate Conditions on Loss of Mass, Strength, and Stiffness of Compacted Fine-Grained Soils–Portland Cement Blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 30, n. 8, p. 04018174, 2018. b. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002392>>

CONSOLI, N. C. et al. Durability, Strength, and Stiffness of Green Stabilized Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 144, n. 9, p. 04018057, 2018. c. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0001928>>

CONSOLI, N. C. et al. Use of Sustainable Binders in Soil Stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 06018023, 2019. a. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002571>>

CONSOLI, N. C. et al. The effects of curing time and temperature on stiffness, strength and durability of sand-environment friendly binder blends. **Soils and Foundations**, [s. l.], v. 59, n. 5, p. 1428–1439, 2019. b. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038080619301179>>

CONSOLI, N. C. 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. 06019010, 2019. c. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002862>>

CONSOLI, N. C. et al. Behaviour of cement-stabilised silty sands subjected to harsh environmental conditions. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical**

**Engineering**, [s. l.], v. 173, n. 1, p. 40–48, 2020. a. Disponível em:  
<<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/jgeen.18.00243>>

CONSOLI, N. C. et al. Durability Assessment of Soil-Pozzolan-Lime Blends through Ultrasonic-Pulse Velocity Test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 32, n. 8, p. 04020223, 2020. b. Disponível em:  
<<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0003298>>

CONSOLI, N. C.; ROCHA, C. G. Da; SALDANHA, R. B. Coal fly ash–carbide lime bricks: An environment friendly building product. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 69, p. 301–309, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.067>>

CONSOLI, N. C.; ROSA, A. D.; SALDANHA, R. B. Variables Governing Strength of Compacted Soil–Fly Ash–Lime Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 432–440, 2011. Disponível em:  
<<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84881293408&partnerID=tZOtx3y1>>

CONSOLI, N. C.; SAMANIEGO, R. A. Q.; VILLALBA, N. M. K. Durability, Strength, and Stiffness of Dispersive Clay–Lime Blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 28, n. 11, p. 04016124, 2016. Disponível em:  
<<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001632>>

CONSOLI, N. C.; SILVA LOPES, L. Da; HEINECK, K. S. 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: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282009%2921%3A5%28210%29>>

CONSOLI, N. C.; TOMASI, L. F. The impact of dry unit weight and cement content on the durability of sand–cement blends. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement**, [s. l.], v. 171, n. 2, p. 96–102, 2018. Disponível em:  
<<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/jgrim.17.00034>>

CONSTANTINO, V. R. L. et al. Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. **Química Nova**, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 490–498, 2002. Disponível em:  
<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422002000300024&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422002000300024&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt)>

CORDEIRO, G. C. 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: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.005>>

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 23, n. 10, p. 3301–3303, 2009. Disponível em:  
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.013>>

DAVIDOVITS, J. Geopolymers. **Journal of Thermal Analysis**, [s. l.], v. 37, n. 8, p. 1633–1656, 1991. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF01912193>>

DAVIDOVITS, J. **Method for obtaining a geopolymeric binder allowing to stabilize, solidify and consolidate toxic or waste materials**, 5349118, 1994.

DAVIES, M. P. Tailings impoundment failures are geotechnical engineers listening? **Geotechnical News**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 31, 2002.

DENNEN, W. H.; NORTON, H. A. Geology and geochemistry of bauxite deposits in the lower Amazon Basin. **Economic Geology**, [s. l.], v. 72, n. 1, p. 82–89, 1977. Disponível em: <<http://pubs.geoscienceworld.org/economicgeology/article/72/1/82/18896/Geology-and-geochemistry-of-bauxite-deposits-in>>

DESOGUS, P. et al. Stabilization–solidification treatment of mine tailings using Portland cement, potassium dihydrogen phosphate and ferric chloride hexahydrate. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 45, p. 47–54, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2013.01.003>>

DEURSEN, C. M. Van. **Métodos de desagamento e disposição de rejeito da bauxita: estudo de caso e avaliação econômica**. 2016. Universidade de São Paulo - USP, [s. l.], 2016. Disponível em: <[http://waset.org/publications/14223/soil-resistivity-data-computations-single-and-two-layer-soil-resistivity-structure-and-its-implication-on-earthing-design%0Ahttp://www.jo-mo.com/fadoohelp/data/DotNet/Ethical securty.pdf%0Ahttp://link.springer.com/10.10](http://waset.org/publications/14223/soil-resistivity-data-computations-single-and-two-layer-soil-resistivity-structure-and-its-implication-on-earthing-design%0Ahttp://www.jo-mo.com/fadoohelp/data/DotNet/Ethical%20securty.pdf%0Ahttp://link.springer.com/10.10)>

DIAMBRA, A. et al. Theoretical Derivation of Artificially Cemented Granular Soil Strength. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 143, n. 5, p. 04017003, 2017. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0001646>>

DIAMOND, S.; KINTER, E. B. Mechanisms of Soil-Lime Stabilization. In: 44TH ANNUAL MEETING IN HIGHWAY RESEARCH BOARD 1965, Los Angeles, United States. **Anais...** Los Angeles, United States

DNPM, D. N. de P. M. **Sumário Mineral Sumário Mineral 2014**. Brasília, Brasil.

DU, Y. J.; ZHANG, Y. Y.; LIU, S. Y. Investigation of strength and California Bearing Ratio properties of natural soils treated by calcium carbide residue. **Geo-Frontiers**, [s. l.], p. 1237–1244, 2011.

DUCHESNE, J.; DOYE, I. Effectiveness of Covers and Liners Made of Red Mud Bauxite and/or Cement Kiln Dust for Limiting Acid Mine Drainage. **Journal of Environmental Engineering**, [s. l.], v. 131, n. 8, p. 1230–1235, 2005. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9372%282005%29131%3A8%281230%29>>

DUXSON, P. et al. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 269, n. 1–3, p. 47–58, 2005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927775705004966>>

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: <<http://link.springer.com/10.1007/s10853-006-0637-z>>

DUXSON, P.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. Physical evolution of Na-geopolymer derived from metakaolin up to 1000 °C. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 42, n. 9, p. 3044–3054, 2007. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10853-006-0535-4>>

FERENCZI, P. A. **Iron ore, manganese and bauxite deposits of the northern territory Northern Territory Geological Survey - Department of Business Industry & Resource Development**. Darwin, Australia.

FERNANDES, M. D. M. **Mecânica dos solos - conceitos e princípios fundamentais**. 1. ed. São Paulo, Brasil: Oficina de Textos, 2016. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAFBgkAF/mecanica-dos-solos-cefet-rs?part=5>>

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://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S138718110500569X>>

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements☆. **Fuel**, [s. l.], v. 82, n. 18, p. 2259–2265, 2003. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236103001947>>

FESTUGATO, L. et al. Modelling tensile/compressive strength ratio of fibre reinforced cemented soils. **Geotextiles and Geomembranes**, [s. l.], v. 46, n. 2, p. 155–165, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.11.003>>

FILHO, R. D. T. et al. Rio 2016 sustainable construction commitments lead to new developments in recycled aggregate concrete. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering**, [s. l.], v. 166, n. 6, p. 28–35, 2013. Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/cien.13.00010>>

FITZPATRICK, R. et al. Environmental consequences of soil sodicity. **Soil Research**, [s. l.], v. 32, n. 5, p. 1069, 1994. Disponível em: <<http://www.publish.csiro.au/?paper=SR9941069>>

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, [s. l.], 2005.



FRÍAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO, H. 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://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946511000266>>

GARTNER, E. Industrially interesting approaches to “low-CO<sub>2</sub>” cements. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 34, n. 9, p. 1489–1498, 2004. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884604000468>>

GARUD, S. S.; KARIMI, I. A.; KRAFT, M. Design of computer experiments: A review. **Computers & Chemical Engineering**, [s. l.], v. 106, p. 71–95, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.05.010>>

GAZQUEZ, M. J. et al. Evaluation of the use of TiO<sub>2</sub> industry red gypsum waste in cement production. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 76–81, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.12.003>>

GLAVAN, J. J. et al. Adaptive design for systems factorial technology experiments. **Journal of Mathematical Psychology**, [s. l.], v. 92, p. 102278, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmp.2019.102278>>

GOMES, L. E. de O. et al. The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 120, n. 1–2, p. 28–36, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.04.056>>

GORDON, J. N.; PINNOCK, W. R.; MOORE, M. M. A preliminary investigation of strength development in Jamaican red mud composites. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 18, n. 6, p. 371–379, 1996. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946596000273>>

GORE, M. S. **Geotechnical characterization of bauxite residue (red mud)**. 2015. University of Texas, [s. l.], 2015.

GORE, M. S. et al. Geotechnical Characterization of Compacted Bauxite Residue for Use in Levees. In: GEO-CHICAGO 2016 2016, Reston, VA. **Anais...** Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2016. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784480137.030>>

GRUBB, P. L. C. Genesis of bauxite deposits in the lower Amazon Basin and Guianas coastal plain. **Economic Geology**, [s. l.], v. 74, n. 4, p. 735–750, 1979. Disponível em: <<http://pubs.geoscienceworld.org/economicgeology/article/74/4/735/19151/Genesis-of-bauxite-deposits-in-the-lower-Amazon>>

GUO, X.; SHI, H.; DICK, W. A. Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 142–147, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.003>>

GUPTA, V. K.; GUPTA, M.; SHARMA, S. Process development for the removal of lead and chromium from aqueous solutions using red mud—an aluminium industry waste. **Water Research**, [s. l.], v. 35, n. 5, p. 1125–1134, 2001. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135400003894>>

HASAN, H. et al. Remediation of Expansive Soils Using Agricultural Waste Bagasse Ash. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 143, p. 1368–1375, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705816306087>>

HE, C. Thermal stability and pozzolanic activity of raw and calcined mixed-layer mica/smectite. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 17, n. 3–4, p. 141–161, 2000. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169131700000119>>

HERRIN, M. M. H. Lime-soil mixtures. In: 40TH ANNUAL MEETING OF THE HIGHWAY RESEARCH BOARD 1961, Washington DC, United States. **Anais...** Washington DC, United States

HERZOG, A.; MITCHELL, J. K. Reactions accompanying stabilization of clay with cement. **Highway Research Record**, [s. l.], n. 36, p. 146–171, 1963. Disponível em: <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1963/36/36-008.pdf>>

HIND, A. R.; BHARGAVA, S. K.; GROCOTT, S. C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 146, n. 1–3, p. 359–374, 1999. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927775798007985>>

HORPIBULSUK, S. et al. Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 24, n. 10, p. 2011–2021, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.011>>

HORPIBULSUK, S.; RACHAN, R.; SUDDEEPPONG, A. Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 1521–1531, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.08.006>>

HOSSAIN, K. M. A. Development of stabilised soils for construction applications. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement**, [s. l.], v. 163, n. 3, p. 173–185, 2010. Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/grim.2010.163.3.173>>

HOY, M. et al. Recycled asphalt pavement – fly ash geopolymers as a sustainable pavement base material: Strength and toxic leaching investigations. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 573, p. 19–26, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.078>>

HUA, Y.; HEAL, K. V.; FRIESL-HANL, W. The use of red mud as an immobiliser for

metal/metalloid-contaminated soil: A review. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 325, p. 17–30, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.073>>

HUANG, Y. et al. A perspective of stepwise utilisation of Bayer red mud: Step two— Extracting and recovering Ti from Ti-enriched tailing with acid leaching and precipitate flotation. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 307, p. 318–327, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.01.010>>

HUGHES, P.; GLENDINNING, S. Deep dry mix ground improvement of a soft peaty clay using blast furnace slag and red gypsum. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 205–216, 2004. Disponível em: <<http://qjehg.lyellcollection.org/lookup/doi/10.1144/1470-9236/04-003>>

HUGHES, P. N. et al. Use of red gypsum in soil mixing engineering applications. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 164, n. 3, p. 223–234, 2011. Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geng.10.00061>>

IAI, I. A. I. **Fourth Sustainable Bauxite Mining Report**. New York, United States.

ISAH, B. W.; SHARMILA, S. M. R. Soil stabilization using calcium carbide residue and coconut shell ash. **Journal of Basic and Applied Engineering Research**, [s. l.], v. 2, n. 12, p. 1039–1044, 2015.

ISO. ISO 13320: Particle size analysis - Laser diffraction methods. **International Organization for Standardization**, [s. l.], 2020.

JAARSVELD, J. G. S. Van et al. The stabilisation of mine tailings by reactive geopolymerisation. **MINPREX 2000**, [s. l.], n. 9, p. 363–371, 2000.

JEDARI, C. et al. Grain and floc size distribution analysis of fine coal refuse slurry. **ICSMGE 2017 - 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**, [s. l.], n. September, p. 403–406, 2017.

JEGANDAN, S. 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: <<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/grim.2010.163.1.53>>

JHA, A. K.; SIVAPULLAIAH, P. V. Potential of fly ash to suppress the susceptible behavior of lime-treated gypseous soil. **Soils and Foundations**, [s. l.], v. 58, n. 3, p. 654–665, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.02.024>>

KAMPALA, A.; HORPIBULSUK, S. Engineering Properties of silty clay stabilized with calcium carbide residue. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 25, n. 05, p. 632–644, 2013.

KARTHIK, A.; SUDALAIMANI, K.; VIJAYA KUMAR, C. T. Investigation on mechanical

properties of fly ash-ground granulated blast furnace slag based self curing bio-geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 149, p. 338–349, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.139>>

KIM, S. Y. et al. Synthesis of structural binder for red brick production based on red mud and fly ash activated using  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 147, p. 101–116, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.171>>

KIRK, T.; LUND, J. Decarbonization Pathways for Mines: A Headlamp in the Darkness. **Rocky Mountain Institute**, [s. l.], 2018.

KLAHOLD, P. A. **Interpretação de ensaios de campo em solos com permeabilidade intermediária**. 2013. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, [s. l.], 2013.

KLEIN, C. **Manual of Mineral Science**. 22. ed. New York, United States: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

KRIVENKO, P. V.; SHI, C.; ROY, D. **Alkali-activated cements and concrete**. Abingdon, United States: Taylor & Francis, 2006.

KUA, T.-A. et al. Strength assessment of spent coffee grounds-geopolymer cement utilizing slag and fly ash precursors. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 115, p. 565–575, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.021>>

KUMAR, R.; KUMAR, S.; MEHROTRA, S. P. Towards sustainable solutions for fly ash through mechanical activation. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 52, n. 2, p. 157–179, 2007. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344907001437>>

KUMAR, S.; KUMAR, R. Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer. **Ceramics International**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 533–541, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.09.038>>

KUMAR, T. K. et al. Stabilization of expansive soil by using agricultural waste. **IJIRT**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 305–308, 2016.

KUSHWAHA, S. S.; KISHAN, D. Stabilization of Red Mud by Lime and Gypsum and Investigating Its Possible Use in Geoenvironmental Engineering. **Geo-Chicago**, [s. l.], p. 978–988, 2016.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. SI Version ed. New York, United States: John Wiley & Sons, Inc., 1979.

LEMOS, S. G. F. P. et al. Field and Laboratory Investigation of Highly Organic Clay Stabilized with Portland Cement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 04020063, 2020. Disponível em:

<<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0003111>>

LI, L. Y. Properties of Red Mud Tailings Produced under Varying Process Conditions. **Journal of Environmental Engineering**, [s. l.], v. 124, n. 3, p. 254–264, 1998. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9372%281998%29124%3A3%28254%29>>

LI, W.; YI, Y. Use of carbide slag from acetylene industry for activation of ground granulated blast-furnace slag. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 238, p. 117713, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117713>>

LI, Y. et al. Preparation of red mud-based geopolymer materials from MSWI fly ash and red mud by mechanical activation. **Waste Management**, [s. l.], v. 83, p. 202–208, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.019>>

LIU, R.-X.; POON, C.-S. Utilization of red mud derived from bauxite in self-compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 112, p. 384–391, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.049>>

LIU, S. et al. Strength properties of Bayer red mud stabilized by lime-fly ash using orthogonal experiments. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 166, p. 554–563, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.186>>

LIU, Y.; NAIDU, R. Hidden values in bauxite residue (red mud): Recovery of metals. **Waste Management**, [s. l.], v. 34, n. 12, p. 2662–2673, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.003>>

LUMBROSO, D. et al. The potential to reduce the risks posed by tailings dams using satellite-based information. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [s. l.], v. 38, n. March, p. 101209, 2019. a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101209>>

LUMBROSO, D. et al. The potential to reduce the risks posed by tailings dams using satellite-based information. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [s. l.], v. 38, n. January, p. 101209, 2019. b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101209>>

LUMLEY, R. **Fundamentals of aluminium metallurgy**. [s.l.] : Woodhead Publishing Limited, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/book/9781845696542>>

MA, D. et al. Feasible conversion of solid waste bauxite tailings into highly crystalline 4A zeolite with valuable application. **Waste Management**, [s. l.], v. 34, n. 11, p. 2365–2372, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.012>>

MAGALHÃES, R. F.; DANILEVICZ, Â. de M. F.; SAURIN, T. A. Reducing construction waste: A study of urban infrastructure projects. **Waste Management**, [s. l.], v. 67, n. May, p. 265–277, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X17303471>>

MARÍN, E. J. B. **Estudo de campo e laboratório do comportamento mecânico de um solo sulfatado estabilizado com cal**. 2017. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, [s. l.], 2017.

MARTINS, S. V. et al. Banco de sementes como indicador de restauração de uma área degradada por mineração de caulim em Brás Pires, MG. **Revista Árvore**, [s. l.], v. 32, n. 6, p. 1081–1088, 2008. Disponível em:  
<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-67622008000600013&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622008000600013&lng=pt&tlng=pt)>

MÁRTIRES, R. A. C. **Balanço Mineral Brasileiro - Alumínio**. [s.l: s.n.].

MASSALIMOV, I. A.; KIREEVA, M. S.; SANGALOV, Y. A. Structure and Properties of Mechanically Activated Barium Peroxide. **Inorganic Materials**, [s. l.], v. 38, n. 4, p. 363–366, 2002.

MASUED, G. G. Effect of sugar cane bagasse ash on the physical properties of subgrade layer. **Journal of Engineering and Sustainable Development**, [s. l.], v. 21, n. 5, p. 146–158, 2017.

MATEOS, M. **Physical and mineralogical factors in stabilization of Iowa soils with lime and fly ash**. 1961. Iowa State University, [s. l.], 1961.

MCCARTHY, G. J. et al. Mineralogy of western fly ash. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 471–478, 1984. Disponível em:  
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0008884684901212>>

MCLELLAN, B. C. et al. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 19, n. 9–10, p. 1080–1090, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>>

MDEGE, N. D. et al. The 2 × 2 cluster randomized controlled factorial trial design is mainly used for efficiency and to explore intervention interactions: a systematic review. **Journal of Clinical Epidemiology**, [s. l.], v. 67, n. 10, p. 1083–1092, 2014. Disponível em:  
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclinepi.2014.06.004>>

MELFI, A.; CARVALHO, A. Bauxitization of alkaline rocks in southern Brazil. **Sciences Geologiques**, [s. l.], v. 73, p. 161–172, 1983.

MELFI, A. J. et al. **Brazilian Bauxites**. São Paulo, Brazil: USO.ORSTOM - Brésil, 1997.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 9. ed. New York, United States: John Wiley & Sons, Inc., 2017.

MORSY, M. S. et al. Effect of Sodium Silicate to Sodium Hydroxide Ratios on Strength and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Binder. **Arabian Journal for Science and Engineering**, [s. l.], v. 39, n. 6, p. 4333–4339, 2014. Disponível em:

<<http://link.springer.com/10.1007/s13369-014-1093-8>>

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: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2010.12.049>>

NATH, H.; SAHOO, P.; SAHOO, A. Characterization of Red Mud treated under high temperature fluidization. **Powder Technology**, [s. l.], v. 269, p. 233–239, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.09.011>>

NEHDI, M.; TARIQ, A. Stabilization of sulphidic mine tailings for prevention of metal release and acid drainage using cementitious materials : a review. [s. l.], v. 436, n. November, p. 423–436, 2007.

NEWSON, T. et al. Effect of Structure on the Geotechnical Properties of Bauxite Residue. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 132, n. 2, p. 143–151, 2006. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291090-0241%282006%29132%3A2%28143%29>>

NIERWINSKI, H. P. **Caracterização e comportamento geomecânico de rejeitos de mineração**. 2019. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, [s. l.], 2019.

NISHIJIMA, M.; ROCHA, F. F. An economic investigation of the dengue incidence as a result of a tailings dam accident in Brazil. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 253, n. October 2019, p. 109748, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109748>>

NNOCHIRI, E. S.; EMEKA, H. O.; TANIMOLA, M. Geotechnical characteristics of lateritic soil stabilized with sawdust ash-lime mixtures. **Stavební obzor - Civil Engineering Journal**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 66–76, 2017. Disponível em: <[http://www.civilengineeringjournal.cz/archive/issues/2017/2017\\_1/1-2017-0007.pdf](http://www.civilengineeringjournal.cz/archive/issues/2017/2017_1/1-2017-0007.pdf)>

NNOCHIRI, E. S.; OGUNDIPE, O. M. Geotechnical properties of lateritic soil stabilized with ground-nut husk ash. **Civil Engineering Journal**, [s. l.], v. 2, n. 11, p. 568–575, 2016. Disponível em: <<https://civilejournal.org/index.php/cej/article/view/208>>

OBONI, F.; OBONI, C. **Tailings Dam Management for the Twenty-First Century**. Cham: Springer International Publishing, 2020. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-19447-5>>

OGORK, E.-N. N.; ABUBAKAR, A. E.; BAYERO, O. A. U. A study on groundnut husk ash (GHA)–concrete under acid attack. **International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)**, [s. l.], v. 4, n. 7, p. 30–35, 2014. Disponível em: <[http://www.ijmer.com/papers/Vol4\\_Issue7/Version-3/IJMER-47033035.pdf](http://www.ijmer.com/papers/Vol4_Issue7/Version-3/IJMER-47033035.pdf)>

OGUNDIRAN, M. B.; NUGTEREN, H. W.; WITKAMP, G. J. Immobilisation of lead smelting slag within spent aluminate—fly ash based geopolymers. **Journal of Hazardous**

**Materials**, [s. l.], v. 248–249, n. 1, p. 29–36, 2013. Disponível em:  
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.12.040>>

PACHECO-TORGAL, F. et al. **Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes**. [s.l.] : Elsevier, 2015. Disponível em:  
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20130165117>>

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Properties of tungsten mine waste geopolymeric binder. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 1201–1211, 2008. Disponível em:  
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061807000372>>

PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. Alkali-activated fly ashes. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 29, n. 8, p. 1323–1329, 1999. Disponível em:  
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884698002439>>

PALOMO, A.; LÓPEZ DELA FUENTE, J. I. Alkali-activated cementitious materials: Alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 33, n. 2, p. 281–288, 2003. Disponível em:  
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884602009638>>

PANDA, I. et al. Characterization of red mud as a structural fill and embankment material using bioremediation. **International Biodeterioration & Biodegradation**, [s. l.], v. 119, p. 368–376, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.11.026>>

PAREKH, B. K.; GOLDBERGER, W. N. **An assessment of technology for possible utilization of Bayer Process muds**. Cincinnati, United States: Industrial Environmental Research Laboratory - Office of Research and Development, 1976.

PARVEEN et al. Mechanical and microstructural properties of fly ash based geopolymer concrete incorporating alccofine at ambient curing. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 180, n. 2018, p. 298–307, 2018. Disponível em:  
<<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.286>>

PAZ, S. P. A. Da. **Desenvolvimento e otimização de métodos de controle de qualidade e de processo de beneficiamento para bauxitas gibbsíticas tipo-Paragominas**. 2016. Universidade de São Paulo - USP, [s. l.], 2016.

PERA, J.; BOUMAZA, R.; AMBROISE, J. Development of a pozzolanic pigment from red mud. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 27, n. 10, p. 1513–1522, 1997. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884697001622>>

PHUMMIPHAN, I. et al. Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 877–891, 2016. Disponível em:  
<<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2015.1132632>>



PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo, Brasil: Oficina de Textos, 2006.

POGGIALI, F. S. J. et al. Caracterização da cinza de bagaço de cana de açúcar contaminada com quartzo proveniente da lavoura. In: 20º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS 2012, Joinville, Brazil. **Anais...** Joinville, Brazil

POWER, G.; GRÄFE, M.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 108, n. 1–2, p. 33–45, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.006>>

PROVIS, J. L. **Modelling the formation of Geopolymers**. 2006. University of Melbourne, [s. l.], 2006.

PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? **Materials and Structures**, [s. l.], v. 47, n. 1–2, p. 11–25, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1617/s11527-013-0211-5>>

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolymers, structure, processing, properties and industrial applications**. 1. ed. Great Abington: Woodhead Publishing Limited, 2009.

RAI, S. et al. Disposal Practices and Utilization of Red Mud (Bauxite Residue): A Review in Indian Context and Abroad. **Journal of Sustainable Metallurgy**, [s. l.], n. 0123456789, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40831-019-00247-5>>

REDDY, N. G.; RAO, B. H. Evaluation of the Compaction Characteristics of Untreated and Treated Red Mud. In: GEO-CHICAGO 2016 2016, Reston, VA. **Anais...** Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2016. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784480151.003>>

REIG, L. et al. Alkaline Activation of Ceramic Waste Materials. [s. l.], p. 729–736, 2013.

RESTALLACK, G. J. Lateritization and Bauxitization Events. **Economic Geology**, [s. l.], v. 105, n. 3, p. 655–667, 2010. Disponível em: <<https://pubs.geoscienceworld.org/economicgeology/article/105/3/655-667/128205>>

RICHARDSON, I. G. et al. The characterization of hardened alkali-activated blast-furnace slag pastes and the nature of the calcium silicate hydrate (C-S-H) phase. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 24, n. 5, p. 813–829, 1994. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0008884694900027>>

RICHARDSON, I. G.; GROVES, G. W. The structure of the calcium silicate hydrate phases present in hardened pastes of white Portland cement/blast-furnace slag blends. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 32, n. 18, p. 4793–4802, 1997.

ROCHE, C.; THYGESEN, K.; BAKER, E. **Mine Tailings Storage: Safety Is No Accident**.

[s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/:s\\_document/371/original/RRA\\_MineTailings\\_lores.pdf?1510660693](https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/:s_document/371/original/RRA_MineTailings_lores.pdf?1510660693)>

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S. Modification of clay soils using lime. In: PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS - GEOTECHNICAL ENGINEERING 1996, **Anais...** [s.l: s.n.]

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S. Lime Requirement for Stabilization. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s. l.], v. 1721, n. 1, p. 9–18, 2000. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/1721-02>>

ROHRLICH, M. et al. Bauxite mining in Brazil different viewpoints concerning environment and sustainable development. In: VI SMMT/XVIII ENTMH 2001, Rio de Janeiro, Brazil. **Anais...** Rio de Janeiro, Brazil

ROJAS, M. F.; CABRERA, J. The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin–lime–water systems. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 133–138, 2002. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884601006421>>

ROMANO, R. C. O. et al. Hydration of Portland cement with red mud as mineral addition. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [s. l.], v. 131, n. 3, p. 2477–2490, 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10973-017-6794-2>>

ROSA, A. D. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, [s. l.], 2009.

ROUT, S.; SAHOO, T.; DAS, S. Design of tailing dam using red mud. **Open Engineering**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 316–328, 2013. Disponível em: <<http://www.degruyter.com/view/j/eng.2013.3.issue-2/s13531-012-0056-7/s13531-012-0056-7.xml>>

RUBINOS, D.; SPAGNOLI, G.; BARRAL, M. T. Assessment of bauxite refining residue (red mud) as a liner for waste disposal facilities. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, [s. l.], v. 29, n. 6, p. 433–452, 2015. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17480930.2013.830906>>

SAID, J. M.; TAIB, S. N. L. Peat stabilization with carbide lime. **UNIMAS E-Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 3–8, 2009.

SALDANHA, R. B. **Misturas cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples para cura acelerada**. 2014. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, [s. l.], 2014.

SALDANHA, R. B. **Misturas cinza volante, cal de carbureto e cloreto de sódio:**

**comportamento da resistência à compressão simples, durabilidade e lixiviação em coluna.** 2018. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, [s. l.], 2018.

SALDANHA, R. B. et al. Physical–Mineralogical–Chemical Characterization of Carbide Lime: An Environment-Friendly Chemical Additive for Soil Stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 30, n. 6, p. 06018004, 2018. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002283>>

SAMANIEGO, R. Al. Q. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal.** 2015. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, [s. l.], 2015.

SANTINI, T. C. Application of the Rietveld refinement method for quantification of mineral concentrations in bauxite residues (alumina refining tailings). **International Journal of Mineral Processing**, [s. l.], v. 139, p. 1–10, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751615000769>>

SARGENT, P. et al. The use of alkali activated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils. **Engineering Geology**, [s. l.], v. 152, n. 1, p. 96–108, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.10.013>>

SARSBY, R. W. **Environmental Geotechnics.** 2. ed. Westminster, England: ICE Publishing, 2013.

SCHILLING, P. J. et al. Si and Al MAS-NMR of NaOH-Activated Blast-Furnace Slag. **Journal of the American Ceramic Society**, [s. l.], v. 77, n. 9, p. 2363–2380, 1994.

SCHNAID, F. et al. On the Characterization and Classification of Bauxite Tailings. **Soil and Rocks**, [s. l.], v. 37, n. January 2014, p. 277–284, 2014.

SCHNAID, F. et al. On the characterization and classification of bauxite tailings. **Soils and Rocks**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 277–284, 2015.

SCHNAID, F. et al. Effects of test procedure on flat dilatometer test (DMT) results in intermediate soils. **Canadian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 53, n. 8, p. 1270–1280, 2016. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/cgj-2015-0463#.VwKTGfl96Uk>>

SCHNAID, F.; LEHANE, B. M.; FAHEY, M. In situ test characterisation of unusual geomaterials. In: PROCEEDINGS ISC-2 ON GEOTECHNICAL AND GEOPHYSICAL SITE CHARACTERIZATION 2004, Rotterdam, Netherlands. **Anais...** Rotterdam, Netherlands: Millpress, 2004.

SCHULTE, R. F.; FOLEY, N. K. **Compilation of Gallium Resource Data for Bauxite Deposits.** Reston, United States. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/of/2013/1272/pdf/ofr2013-1272.pdf>>.

SEMIENIUK, G.; YAKOVENKO, V. M. Historical evolution of global inequality in carbon

emissions and footprints versus redistributive scenarios. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 264, p. 121420, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121420>>

SENF, D.; MASALA, S.; NIK, R. Comparison of particle size distributions obtained by laser diffraction and sieve-hydrometer methods for oil sand tailings. In: PAN-AM CGS GEOTECHNICAL CONFERENCE 2011, Toronto, Canada. **Anais...** Toronto, Canada: Canadian Geotechnical Society, 2011. Disponível em: <<papers3://publication/uuid/75337D9A-127C-45EF-AFA5-139836D5A326>>

SGARBI, G. N. C. **Petrografia Macroscópica das Rochas Ígnes Sedimentares e Metamórficas**. Belo Horizonte, Brasil.

SGLAVO, V. M. et al. Bauxite ‘red mud’ in the ceramic industry. Part 2: production of clay-based ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 245–252, 2000. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221999001569>>

SHACKELFORD, C. D.; SEVICK, G. W.; EYKHOLT, G. R. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to tailings impoundment solutions. **Geotextiles and Geomembranes**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 149–162, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.10.005>>

SHEHAB, H. K.; EISA, A. S.; WAHBA, A. M. Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 126, p. 560–565, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.059>>

SHEKHAWAT, P.; SHARMA, G.; SINGH, R. M. Strength behavior of alkaline activated eggshell powder and flyash geopolymer cured at ambient temperature. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 223, p. 1112–1122, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.325>>

SHIMOLA, K. A Study on Soil Stabilization using Sugarcane Bagasse Ash. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering**, [s. l.], v. 8, n. 2- S, p. 292–295, 2018.

SIGOLO, J. B. **Econômica na região de Lavrinhas.SP e sua viabilidade geologia de depósitos residuais bauxíticos**. 1979. Universidade de São Paulo - USP, [s. l.], 1979.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; MOTTA, M. Da. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 322–338, 2007. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-70762007000200011&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762007000200011&lng=pt&tlng=pt)>

SILVA, R. V.; BRITO, J. De; DHIR, R. K. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 236, p. 117629, 2019. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117629>>

SILVANI, C. **Influência da Temperatura de Cura no Comportamento Mecânico de Misturas Areia-Cinza Volante-Cal.** 2013. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, [s. l.], 2013.

SINGH, M.; UPADHAYAY, S. N.; PRASAD, P. M. Preparation of special cements from red mud. **Waste Management**, [s. l.], v. 16, n. 8, p. 665–670, 1996. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X97000044>>

SNARS, K.; GILKES, R. J. Evaluation of bauxite residues (red muds) of different origins for environmental applications. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 46, n. 1, p. 13–20, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2009.06.014>>

SNYDER, H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, [s. l.], v. 104, n. March, p. 333–339, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>>

SOFI, M. et al. Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 251–257, 2007. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884606002511>>

SORMUNEN, P.; KÄRKI, T. Recycled construction and demolition waste as a possible source of materials for composite manufacturing. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 24, n. March, p. 100742, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100742>>

SOSNOSKI, J. **Interpretação de Ensaios de CPTu e DMT em Solos com Permeabilidade Intermediária.** 2016. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, [s. l.], 2016.

SOUZA VILLAR, L. F. et al. Influence of laboratory techniques on the geotechnical characterization of mining and industrial wastes. In: (M. Hamza et al. (Eds), Ed.) **PROCEEDINGS OF THE 17TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING: THE ACADEMIA AND PRACTICE OF GEOTECHNICAL ENGINEERING 2009**, Alexandria, Egypt. **Anais...** Alexandria, Egypt: IOS Press, 2009.

STINSON, J. M. Correlation of Red Mud Consolidation with Its Soil Properties. In: **Essential Readings in Light Metals**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013. v. 9p. 915–921.

SUKMAK, P.; HORPIBULSUK, S.; SHEN, S.-L. Strength development in clay–fly ash geopolymer. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 40, p. 566–574, 2013. a. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061812008264>>

SUKMAK, P.; HORPIBULSUK, S.; SHEN, S. L. Strength development in clay–fly ash geopolymer. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 40, p. 566–574, 2013. b.

SUTAR, H. et al. Effect of Red Mud (RM) Reinforcement on Physio-Chemical Characteristics of Ordinary Portland Slag Cement (OPSC) Mortar. **Advances in Materials Physics and Chemistry**, [s. l.], v. 06, n. 08, p. 231–238, 2016. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/ampc.2016.68023>>

SWADDLE, T. Silicate complexes of aluminum(III) in aqueous systems. **Coordination Chemistry Reviews**, [s. l.], v. 219–221, p. 665–686, 2001. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010854501003629>>

SWADDLE, T. W.; SALERNO, J.; TREGLOAN, P. A. Aqueous aluminates, silicates, and aluminosilicates. **Chemical Society Reviews**, [s. l.], v. 23, n. 5, p. 319, 1994. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=cs9942300319>>

TALIB, M. K. A.; NORIYUKI, Y. Highly organic soil stabilization by using sugarcane bagasse ssh (SCBA). **ISCEE**, [s. l.], v. 103, p. 1–8, 2017.

TEMUJIN, J.; RIESSEN, A. Van. Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. [s. l.], n. February, 2009.

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://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013609001058>>

TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics**. 8. ed. New York, United States: John Wiley & Sons, Inc., 1943.

THOMÉ, A. **Estudo do comportamento de um solo mole tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais**. 1994. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, [s. l.], 1994.

THOMPSON, M. S. Shear strength and elastic properties of lime-soil mixtures. **Highway engineering series**, [s. l.], v. 20, n. 66, p. 1–14, 1965.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD - NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Lime stabilization – reactions properties, design and construction State of the Art Report 5**. [s. l.: s.n.].

U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summaries 2017**. 1. ed. Reston, United States: U.S Geological Survey, 2017. v. 1

VARAJÃO, C. A. C. **Estudo comparativo das jazidas de bauxita do quadrilátero ferrífero, MG micromorfologia, geoquímica e sensoriamento remoto**. 1988. Universidade de São Paulo - USP, [s. l.], 1988. Disponível em: <<http://icvm.pt/>>

VEIZAGA, F. M. et al. Flood modelling and simulation of urban direct damages caused by a

real tailings dam failure - São Francisco Dam, Mirai, Minas Gerais, Brazil. In: 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN DRAINAGE (ICUD) 2014, Kuching. **Anais...** Kuching

VILLAR, L. F. de S. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita**. 2002. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, [s. l.], 2002.

WANG, P.; LIU, D.-Y. Physical and Chemical Properties of Sintering Red Mud and Bayer Red Mud and the Implications for Beneficial Utilization. **Materials**, [s. l.], v. 5, n. 10, p. 1800–1810, 2012. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1944/5/10/1800>>

WANG, S. et al. Removal of dyes from aqueous solution using fly ash and red mud. **Water Research**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 129–138, 2005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135404004592>>

WEIL, M.; DOMBROWSKI, K.; BUCHWALD, A. Life-cycle analysis of geopolymers. In: **Geopolymers**. [s.l.] : Elsevier, 2009. p. 194–210.

WILKINSON, A.; HAQUE, A.; KODIKARA, J. Stabilisation of clayey soils with industrial by-products: part A. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement**, [s. l.], v. 163, n. 3, p. 149–163, 2010. Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/grim.2010.163.3.149>>

XU, H.; VAN DEVENTER, J. S. J. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. **International Journal of Mineral Processing**, [s. l.], v. 59, n. 3, p. 247–266, 2000. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751699000745>>

XU, H.; VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymerisation of multiple minerals. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 15, n. 12, p. 1131–1139, 2002. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892687502002558>>

XU, J. Z. et al. Study on the factors of affecting the immobilization of heavy metals in fly ash-based geopolymers. **Materials Letters**, [s. l.], v. 60, n. 6, p. 820–822, 2006. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167577X05009869>>

YANG, H. et al. Preparation of double-layer glass-ceramic/ceramic tile from bauxite tailings and red mud. **Journal of the European Ceramic Society**, [s. l.], v. 29, n. 10, p. 1887–1894, 2009. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221909000053>>

YANG, J.; XIAO, B. Development of unsintered construction materials from red mud wastes produced in the sintering alumina process. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 22, n. 12, p. 2299–2307, 2008. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061807002425>>

YOUNGER, P. L.; WOLKERSDORFER, C. Mining Impacts on the Fresh Water Environment: Technical and Managerial Guidelines for Catchment Scale Management. **Mine**

**Water and the Environment**, [s. l.], v. 23, n. S1, p. s2–s80, 2004. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10230-004-0028-0>>

ZAIN, M. F. M. et al. Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 798–805, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.003>>

ZHANG, H. et al. Performance enhancement of porous asphalt pavement using red mud as alternative filler. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 160, p. 707–713, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.105>>

ZHANG, J. et al. Geopolymers for immobilization of Cr<sup>6+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, and Pb<sup>2+</sup>. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 157, n. 2–3, p. 587–598, 2008. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389408000691>>

ZHANG, L.; AHMARI, S.; ZHANG, J. Synthesis and characterization of fly ash modified mine tailings-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 25, n. 9, p. 3773–3781, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.005>>

ZHANG, M. 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: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.017>>



## **APÊNDICE A – Tratamentos de resistência e rigidez**

## Resistência à compressão simples e rigidez amostras ligante alternativo

Amostra*	RCS (kPa)	G <sub>0</sub> (MPa)	η (%)	B <sub>iv</sub> (%)	η/B <sub>iv</sub> 0 <sup>-28</sup>
CP_13_7_15_I	440.24	607.70	55.40	9.07	29.88
CP_13_7_15_II	526.31	568.59	55.44	9.06	29.91
CP_13_7_30_I	1519.84	1028.37	52.79	18.06	23.48
CP_13_7_30_II	1636.32	888.98	52.53	18.16	23.33
CP_13_28_15_I	739.32	694.68	55.15	9.12	29.70
CP_13_28_15_II	673.25	633.33	55.14	9.12	29.69
CP_13_28_30_I	2616.76	1178.37	52.71	18.09	23.43
CP_13_28_30_II	2175.04	1153.20	52.87	18.03	23.53
CP_15_7_15_I	1159.17	844.53	48.27	10.52	24.98
CP_15_7_15_II	1038.08	736.60	48.53	10.46	25.15
CP_15_7_30_I	2491.05	1576.07	46.11	20.62	19.76
CP_15_7_30_II	2570.50	1464.23	46.89	20.32	20.18
CP_15_28_15_I	1964.45	1028.65	48.19	10.53	24.92
CP_15_28_15_II	2215.06	1143.47	48.02	10.57	24.81
CP_15_28_30_I	4306.06	1973.21	45.80	20.74	19.59
CP_15_28_30_II	4131.90	1934.13	45.38	20.90	19.38
CP_14_17,5_22,5_I	2255.36	1116.88	50.81	14.55	24.01
CP_14_17,5_22,5_II	2023.99	1219.79	50.16	14.74	23.62
14_17,5_22,5_III	2106.42	1202.58	50.25	14.71	23.67

\*CP W X Y Z: Corpo de prova; Peso específico aparente seco; Tempo de cura; Teor de ligante; Repetição

## Resistência à compressão simples e rigidez amostras CPV-ARI

Amostra*	RCS (kPa)	G <sub>0</sub> (MPa)	η (%)	B <sub>iv</sub> (%)	η/B <sub>iv</sub> 0 <sup>-28</sup>
CP_13_7_15_I	1902.1	1379.52	57.88	6.15	34.81
CP_13_7_15_II	1861.0	1366.34	58.01	6.13	34.92
CP_13_7_30_I	3706.7	2257.40	57.94	12.33	28.67
CP_13_7_30_II	3788.5	2217.54	57.80	12.37	28.58
CP_13_28_15_I	2318.1	1562.24	57.03	6.27	34.11
CP_13_28_15_II	2153.3	1558.21	58.01	6.13	34.92
CP_13_28_30_I	3941.9	2306.71	57.66	12.42	28.48
CP_13_28_30_II	3938.6	2164.79	57.38	12.50	28.29
CP_15_7_15_I	4373.3	2291.73	50.87	7.17	29.30
CP_15_7_15_II	4004.1	2236.42	51.35	7.10	29.66
CP_15_7_30_I	7681.4	3558.09	52.06	14.06	24.84
CP_15_7_30_II	7877.1	3710.56	51.90	14.11	24.74
CP_15_28_15_I	4743.0	2427.83	51.35	7.10	29.66
CP_15_28_15_II	4441.6	2390.19	50.70	7.19	29.18
CP_15_28_30_I	8909.5	4107.91	50.61	14.48	23.94
CP_15_28_30_II	8855.0	3913.96	50.77	14.44	24.04
CP_14_17,5_22,5_I	4590.1	2643.63	54.36	10.01	28.52
CP_14_17,5_22,5_II	4809.6	2583.80	54.36	10.01	28.52
14_17,5_22,5_III	4468.4	2782.37	54.06	10.08	28.31

\*CP W X Y Z: Corpo de prova; Peso específico aparente seco; Tempo de cura; Teor de ligante; Repetição

Resistência à compressão diametral e rigidez amostras ligante alternativo

Amostra*	RCD (kPa)	G <sub>0</sub> (MPa)	η (%)	B <sub>iv</sub> (%)	η/B <sub>iv</sub> 0 <sup>-28</sup>
CP_13_7_15_I	96.9	551.00	54.99	9.15	29.58
CP_13_7_15_II	110.0	561.20	55.58	9.03	30.02
CP_13_7_30_I	289.0	1078.63	53.42	17.82	23.84
CP_13_7_30_II	276.7	1044.41	53.72	17.71	24.02
CP_13_28_15_I	170.3	689.98	54.70	9.21	29.37
CP_13_28_15_II	173.6	655.80	55.44	9.06	29.91
CP_13_28_30_I	526.4	1285.39	53.57	17.77	23.94
CP_13_28_30_II	522.8	1281.13	53.42	17.82	23.84
CP_15_7_15_I	208.2	693.16	48.87	10.39	25.37
CP_15_7_15_II	209.1	804.90	49.37	10.29	25.70
CP_15_7_30_I	559.5	1712.84	45.11	21.00	19.23
CP_15_7_30_II	601.1	1647.72	46.54	20.45	19.99
CP_15_28_15_I	299.5	1249.66	49.04	10.36	25.48
CP_15_28_15_II	302.2	1232.27	49.37	10.29	25.70
CP_15_28_30_I	910.8	2147.56	46.61	20.43	20.03
CP_15_28_30_II	862.8	2112.44	46.54	20.45	19.99
CP_14_17,5_22,5_I	335.7	1295.71	51.22	14.42	24.26
CP_14_17,5_22,5_II	281.9	1300.42	51.22	14.42	24.26
14_17,5_22,5_III	256.7	1375.63	50.07	14.76	23.56

\*CP W X Y Z: Corpo de prova; Peso específico aparente seco; Tempo de cura; Teor de ligante; Repetição

Resistência à compressão diametral e rigidez amostras CPV-ARI

Amostra*	RCD (kPa)	G <sub>0</sub> (MPa)	η (%)	B <sub>iv</sub> (%)	η/B <sub>iv</sub> 0 <sup>-28</sup>
CP_13_7_15_I	287.2	1492.18	57.88	6.15	34.81
CP_13_7_15_II	310.9	1418.45	58.01	6.13	34.92
CP_13_7_30_I	652.7	2253.45	57.94	12.33	28.67
CP_13_7_30_II	639.4	2122.57	57.80	12.37	28.58
CP_13_28_15_I	392.2	1631.10	57.03	6.27	34.11
CP_13_28_15_II	371.0	1645.03	58.01	6.13	34.92
CP_13_28_30_I	774.8	2406.45	57.66	12.42	28.48
CP_13_28_30_II	707.9	2203.08	57.38	12.50	28.29
CP_15_7_15_I	369.6	2223.72	50.87	7.17	29.30
CP_15_7_15_II	434.3	2205.59	51.35	7.10	29.66
CP_15_7_30_I	1451.1	3450.25	52.06	14.06	24.84
CP_15_7_30_II	1388.3	3658.61	51.90	14.11	24.74
CP_15_28_15_I	798.8	2592.10	51.35	7.10	29.66
CP_15_28_15_II	726.9	2613.58	50.70	7.19	29.18
CP_15_28_30_I	1867.5	4320.61	50.61	14.48	23.94
CP_15_28_30_II	1853.4	3894.73	50.77	14.44	24.04
CP_14_17,5_22,5_I	972.8	2996.83	54.36	10.01	28.52
CP_14_17,5_22,5_II	816.8	2811.05	54.36	10.01	28.52
14_17,5_22,5_III	943.6	2953.91	54.06	10.08	28.31

\*CP W X Y Z: Corpo de prova; Peso específico aparente seco; Tempo de cura; Teor de ligante; Repetição

## **APÊNDICE B – Tabelas ANOVA**

Resistência à compressão simples ligante alternativo

Fonte	GL	SS Ajustado	MS Ajustado	F-Valor	P-Valor
Modelo	8	22158574	2769822	144,91	0,000
Fatores	3	21115869	7038623	368,24	0,000
Peso específico (A)	1	6307627	6307627	330,00	0,000
Tempo de cura (B)	1	3937371	3937371	205,99	0,000
Ligante (C)	1	10870870	10870870	568,73	0,000
Interações de 2ª ordem	3	825155	275052	14,39	0,001
A*B	1	483094	483094	25,27	0,001
A*C	1	69845	69845	3,65	0,085
B*C	1	272216	272216	14,24	0,004
Interações de 3ª ordem	1	30740	30740	1,61	0,233
A*B*C	1	30740	30740	1,61	0,233
Curvatura	1	186810	186810	9,77	0,011
Erro	10	191142	19114	-	-
Total	18	22349716	-	-	-
<b>Resumo do modelo</b>					
Desvio padrão		138,254	R <sup>2</sup>		99,14%
R <sup>2</sup> ajustado		98,46%	R <sup>2</sup> de previsão		96,79%

Resistência à compressão simples CPV-ARI

Fonte	GL	SS Ajustado	MS Ajustado	F-Valor	P-Valor
Modelo	8	85465171	10683146	504,37	0,000
Fatores	3	80330671	26776890	1264,18	0,000
Peso específico (A)	1	46494351	46494351	2195,07	0,000
Tempo de cura (B)	1	1054054	1054054	49,76	0,000
Ligante (C)	1	32782266	32782266	1547,70	0,000
Interações de 2ª ordem	3	4946457	1648819	77,84	0,000
A*B	1	230290	230290	10,87	0,008
A*C	1	4643810	4643810	219,24	0,000
B*C	1	72357	72357	3,42	0,094
Interações de 3ª ordem	1	185254	185254	8,75	0,014
A*B*C	1	185254	185254	8,75	0,014
Curvatura	1	2788	2788	0,13	0,724
Erro	10	211812	21181	-	-
Total	18	85676983	-	-	-
<b>Resumo do modelo</b>					
Desvio padrão		145,538	R <sup>2</sup>		99,75%
R <sup>2</sup> ajustado		99,56%	R <sup>2</sup> de previsão		99,13%

## Resistência à compressão diametral ligante alternativo

Fonte	GL	SS Ajustado	MS Ajustado	F-Valor	P-Valor
Modelo	8	986183	123273	225,90	0,000
Fatores	3	880059	293353	537,58	0,000
Peso específico (A)	1	199660	199660	365,89	0,000
Tempo de cura (B)	1	125669	125669	230,29	0,000
Ligante (C)	1	554730	554730	1016,57	0,000
Interações de 2ª ordem	3	84783	28261	51,79	0,000
A*B	1	1957	1957	3,59	0,088
A*C	1	45271	45271	82,96	0,000
B*C	1	37554	37554	68,82	0,000
Interações de 3ª ordem	1	422	422	0,77	0,400
A*B*C	1	422	422	0,77	0,400
Curvatura	1	20920	20920	38,34	0,000
Erro	10	5457	546	-	-
Total	18	991640	-	-	-
<b>Resumo do modelo</b>					
Desvio padrão	23,36		R <sup>2</sup>		99,45%
R <sup>2</sup> ajustado	99,01%		R <sup>2</sup> de previsão		98,37%

## Resistência à compressão diametral CPV-ARI

Fonte	GL	SS Ajustado	MS Ajustado	F-Valor	P-Valor
Modelo	8	4263512	532939	228,41	0,000
Fatores	3	3643141	1214380	520,47	0,000
Peso específico (A)	1	1412345	1412345	605,31	0,000
Tempo de cura (B)	1	239854	239854	102,80	0,000
Ligante (C)	1	1990943	1990943	853,30	0,000
Interações de 2ª ordem	3	595517	198506	85,08	0,000
A*B	1	97301	97301	41,70	0,000
A*C	1	496074	496074	212,61	0,000
B*C	1	2142	2142	0,92	0,361
Interações de 3ª ordem	1	1127	1127	0,48	0,503
A*B*C	1	1127	1127	0,48	0,503
Curvatura	1	23727	23727	10,17	0,010
Erro	10	23332	2333	-	-
Total	18	4286845	-	-	-
<b>Resumo do modelo</b>					
Desvio padrão	48,30		R <sup>2</sup>		99,46%
R <sup>2</sup> ajustado	99,02%		R <sup>2</sup> de previsão		98,38%

## Módulo cisalhante inicial ligante alternativo

Fonte	GL	SS Ajustado	MS Ajustado	F-Valor	P-Valor
Modelo	8	6997249	874656	132,32	0,000
Fatores	3	6514641	2171547	328,53	0,000
Peso específico (A)	1	2205350	2205350	333,64	0,000
Tempo de cura (B)	1	656756	656756	99,36	0,000
Ligante (C)	1	3652535	3652535	552,58	0,000
Interações de 2ª ordem	3	406761	135587	20,51	0,000
A*B	1	137595	137595	20,82	0,000
A*C	1	255388	255388	38,64	0,000
B*C	1	13779	13779	2,08	0,160
Interações de 3ª ordem	1	2464	2464	0,37	0,546
A*B*C	1	2464	2464	0,37	0,546
Curvatura	1	73383	73383	11,10	0,002
Erro	29	191690	6610	-	-
Total	37	7188939	-	-	-
<b>Resumo do modelo</b>					
Desvio padrão		81,30	R <sup>2</sup>		97,33%
R <sup>2</sup> ajustado		96,60%	R <sup>2</sup> de previsão		95,45%

## Módulo cisalhante inicial CPV-ARI

Fonte	GL	SS Ajustado	MS Ajustado	F-Valor	P-Valor
Modelo	8	23767089	2970886	216,36	0,000
Fatores	3	22076640	7358880	535,92	0,000
Peso específico (A)	1	12018321	12018321	875,24	0,000
Tempo de cura (B)	1	474355	474355	34,55	0,000
Ligante (C)	1	9583965	9583965	697,96	0,000
Interações de 2ª ordem	3	1156924	385641	28,08	0,000
A*B	1	119535	119535	8,71	0,006
A*C	1	1034878	1034878	75,37	0,000
B*C	1	2511	2511	0,18	0,672
Interações de 3ª ordem	1	53093	53093	3,87	0,059
A*B*C	1	53093	53093	3,87	0,059
Curvatura	1	480432	480432	34,99	0,000
Erro	29	398211	13731	-	-
Total	37	24165300	-	-	-
<b>Resumo do modelo</b>					
Desvio padrão		117,18	R <sup>2</sup>		98,35%
R <sup>2</sup> ajustado		97,90%	R <sup>2</sup> de previsão		97,26%

## **APÊNDICE C – Sucção matricial**



## Sucção matricial amostras ligante alternativo

Amostra*	Saturação inicial (%)	Saturação final (%)	Sucção (kPa)	Sucção/Resistência (%)
CP_13_7_15_I	60,28	82,45	57,92	30,23
CP_13_7_15_II	60,19	87,12	39,77	17,33
CP_13_7_30_I	62,63	92,96	131,07	8,62
CP_13_7_30_II	63,29	91,40	263,07	16,08
CP_13_28_15_I	60,90	86,23	53,17	7,19
CP_13_28_15_II	60,92	87,78	48,52	8,38
CP_13_28_30_I	62,82	92,32	66,74	2,55
CP_13_28_30_II	62,42	93,08	58,53	2,69
CP_15_7_15_I	80,24	87,65	195,12	16,83
CP_15_7_15_II	79,42	81,85	234,40	22,58
CP_15_7_30_I	81,86	86,82	22,83	0,92
CP_15_7_30_II	79,32	87,76	57,23	2,23
CP_15_28_15_I	80,51	87,34	27,22	1,39
CP_15_28_15_II	81,06	87,96	303,49	13,70
CP_15_28_30_I	82,89	89,59	79,52	1,85
CP_15_28_30_II	84,28	92,88	69,75	1,69
CP_14_17,5_22,5_I	70,07	87,39	272,58	12,09
CP_14_17,5_22,5_II	71,92	89,48	425,16	21,01
14_17,5_22,5_III	71,67	88,19	140,73	6,68

\*CP W X Y Z: Corpo de prova; Peso específico aparente seco; Tempo de cura; Teor de ligante; Repetição

## Sucção matricial amostras CPV-ARI

Amostra*	Saturação inicial (%)	Saturação final (%)	Sucção (kPa)	Sucção/Resistência (%)
CP_13_7_15_I	60,28	86,93	125,56	6,60
CP_13_7_15_II	60,19	87,22	53,50	2,88
CP_13_7_30_I	62,63	91,24	309,81	8,36
CP_13_7_30_II	63,29	91,38	404,78	10,68
CP_13_28_15_I	60,90	85,84	56,32	2,43
CP_13_28_15_II	60,92	87,82	51,38	2,39
CP_13_28_30_I	62,82	91,03	59,78	1,52
CP_13_28_30_II	62,42	90,64	59,63	1,51
CP_15_7_15_I	80,24	87,90	480,94	11,00
CP_15_7_15_II	79,42	88,43	475,84	11,88
CP_15_7_30_I	81,86	93,06	38,08	0,50
CP_15_7_30_II	79,32	90,13	77,32	0,98
CP_15_28_15_I	80,51	88,90	33,309	0,70
CP_15_28_15_II	81,06	87,99	142,17	3,20
CP_15_28_30_I	82,89	90,18	70,06	0,79
CP_15_28_30_II	84,28	94,81	65,20	0,74
CP_14_17,5_22,5_I	70,07	87,41	65,89	1,44
CP_14_17,5_22,5_II	71,92	91,99	66,56	1,38
14_17,5_22,5_III	71,67	89,92	49,61	1,11

\*CP W X Y Z: Corpo de prova; Peso específico aparente seco; Tempo de cura; Teor de ligante; Repetição