

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

**Estabilização de um rejeito de mineração de ouro por meio da
álcali-ativação de cal de carbureto e cinza do bagaço de cana-de-
açúcar**

Carolina Pereira dos Santos

Porto Alegre
2021

CAROLINA PEREIRA DOS SANTOS

**ESTABILIZAÇÃO DE UM REJEITO DE MINERAÇÃO DE
OURO POR MEIO DA ÁLCALI-ATIVAÇÃO DE CAL DE
CARBURETO E CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

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

2021

CIP - Catalogação na Publicação

dos Santos, Carolina Pereira

Estabilização de um rejeito de mineração de ouro por meio da álcali-ativação de cal de carbureto e cinza do bagaço de cana-de-açúcar / Carolina Pereira dos Santos. -- 2021.

162 f.

Orientador: Nilo Cesar Consoli.

Coorientador: João Rodrigo Guerreiro Mattos.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. Rejeito de mineração. 2. Álcali-ativação. 3. Comportamento mecânico. 4. Lixiviação. 5. Ligante alternativo. I. Consoli, Nilo Cesar, orient. II. Mattos, João Rodrigo Guerreiro, coorient. III. Título.

CAROLINA PEREIRA DOS SANTOS

**ESTABILIZAÇÃO DE UM REJEITO DE MINERAÇÃO DE
OURO POR MEIO DA ÁLCALI-ATIVAÇÃO DE CAL DE
CARBURETO E CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil, Área de Concentração Geotecnia, e aprovada pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 28 de junho de 2021

Prof. Nilo Cesar Consoli
Ph.D. Concordia University,
Canadá
orientador

Prof. João Rodrigo Guerreiro Mattos
Dr. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
co-orientador

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Dr. Rodrigo Beck Saldanha
Dr. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

**Prof. Nuno Miguel Cordeiro Cristelo
(UTAD)**
Dr. pela Newcastle University

Dr. Sérgio Filipe Veloso Marques
Dr. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais Ana e Nilo, por todo apoio,
incentivo e amor ao longo de minha trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente aos meus pais, Ana e Nilo, por todo apoio, incentivo, amor e carinho. Vocês foram primordiais para que eu chegasse até aqui. Obrigada. Amo vocês.

Agradeço também ao meu orientador, professor Nilo Cesar Consoli, por toda disponibilidade, dedicação, assessoria e troca de conhecimentos ao longa da pesquisa. E a todos professores que contribuíram para minha formação.

Agradeço também ao meu parceiro de laboratório e grande amigo Giovani Bruschi. Obrigada pelas discussões, por todas as risadas, pelos surtos compartilhados e por sempre deixar os dias mais leves. A sua ajuda e, principalmente, a sua amizade foram essenciais.

A minha mineira favorita, Mariana Tonini, por proporcionar as melhores pausas para o café e por estar sempre pronta para ajudar. A Camila Martinatto, minha parceira de lágrimas, obrigada por todas as trocas que tivemos. A Suellen Ferrazo, por ser a calma no meio de nosso grupo turbulento e barulhento e a voz da razão quando preciso.

Agradeço a Bruna Hoch, por todas as noites compartilhadas no LEGG, todas as conversas e por estar sempre disposta a ajudar. A Marina Secco e a Débora Mesavilla por todas as tardes e finais de semana de estudo e pela parceria.

Por fim, agradeço a todos amigos e colegas da pós que de alguma forma contribuíram para a realização dessa pesquisa.

RESUMO

SANTOS, C. P. **Estabilização de rejeito de mineração de ouro por meio da álcali-ativação de cal de carbureto e cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A indústria da mineração é responsável diretamente por cerca de 35 milhões de empregos no mundo. Em virtude, de sua importância para a economia, o avanço tecnológico é constante e com ele amplia-se cada vez mais a capacidade de minerar substâncias com baixo teor mineral, exacerbando a produção de rejeitos de mineração, dentre esses resíduos, um que se destaca é o rejeito de mineração de ouro. Devido a sua toxicidade esses rejeitos demandam extensas medidas mitigadoras. O que torna fundamental o desenvolvimento de estudos de novas tecnologias e metodologias mais econômicas e sustentáveis. Nesse contexto, surgem os ligantes álcali-ativados como uma alternativa para a estabilização e reutilização desses rejeitos. Assim, o objetivo da presente pesquisa é avaliar a viabilidade de se utilizar um cimento álcali-ativado com hidróxido de sódio a base de cal de carbureto e cinza do bagaço de cana-de-açúcar para estabilização de um rejeito de mineração de ouro, por meio de ensaios de resistência, rigidez, durabilidade e lixiviação. Para fins de comparação, o mesmo planejamento experimental foi reproduzido com cimento Portland de alta resistência inicial. Os resultados evidenciam que o ligante álcali-ativado é uma satisfatória alternativa para estabilização do rejeito de mineração de ouro. Além disso, o índice η/Biv mostrou-se adequado como metodologia de dosagem para previsão do comportamento mecânico do rejeito álcali-ativado.

Palavras-chave: *Rejeito de mineração de ouro; álcali-ativação; ligante alternativo; comportamento mecânico; lixiviação.*

ABSTRACT

SANTOS, C. P. **Stabilization of gold tailings through alkali-activation of carbide lime and sugar cane bagasse ash.** 2021. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

The mining industry is directly responsible for around 35 million jobs worldwide. The capacity to mine substances with low mineral content increasing every day due to technological development, increasing the production of tailings. Among these residues, one that stands out is gold tailings. Due to their toxicity, these tailings require extensive mitigation measures. Thus, it is essential to develop new technologies and methodologies that are more economical and sustainable. In this context, alkali-activated binders appear as an alternative for the stabilization and reuse of these tailings. The objective of this research is to evaluate the viability of using an alkali-activated binder of sodium hydroxide, carbide lime and sugarcane bagasse ash to stabilize a gold mining tailing, through strength, stiffness, durability and leaching tests. For comparison purposes, the same experimental design was reproduced with high initial strength Portland cement. Results show that the alkali-activated binder is a suitable alternative for stabilizing gold tailings. In addition, the η/Biv index proved to be appropriate as a dosage methodology for predicting the mechanical behavior of alkali-activated tailings.

Key-words: *gold tailing; alkali-activation; alternative binder; mechanical behavior; leaching tests.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Participação das Principais Substâncias Metálicas no Valor da Produção Mineral Comercializada (adaptado de ANM, 2019).....	28
Figura 2.2: Fluxograma típico de tratamento de minério (adaptado de Luz, Sampaio e França, 2010).....	31
Figura 2.3: Curvas granulométricas características do rejeito de minério de ouro (adaptado de Vick, 1983).....	33
Figura 2.4: Etapas de hidratação do cimento tempo (adaptado de Mindess e Young, 1981)...	40
Figura 2.5: Variação da resistência a compressão simples com o aumento da quantidade de pozolana (adaptado de Consoli, Dalla Rosa e Saldanha, 2011).	43
Figura 2.6: Variação da resistência a compressão simples em função da porosidade – solo-cal (adaptado de Consoli, Lopes Jr. et al. 2009).	45
Figura 2.7: Variação da resistência a compressão simples em função da porosidade – solo-cimento (adaptado de Consoli, Lopes Jr. et al. 2009).	45
Figura 2.8: Resistência a compressão simples de um solo melhorado com cimento para diferentes γ_d (adaptado de Horpibulsuk, Rachan, et al., 2010).....	46
Figura 2.9: Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal (adaptado de Ingles e Metcalf, 1972).	47
Figura 2.10: Variação da resistência para diferentes tempos de cura (adaptado de Consoli, Dalla Rosa e Saldanha, 2011).	48
Figura 2.11: Relação vazios/cimento <i>versus</i> resistência a compressão simples (adaptado de Lanarch, 1960).....	49
Figura 2.12: Relação vazios/cimento expresso em termos de porosidade e teor volumétrico de cimento (adaptado de Consoli, Foppa et al, 2007).....	51

Figura 2.13: Relação vazios/cal expresso em termos de porosidade e teor volumétrico de cimento (adaptado de Lopes Junior, 2007).....	52
Figura 2.14: Classificação dos materiais álcali-ativados (adaptado de van Deventer, Duxson et al. 2010).....	55
Figura 2.15: Representação dos sistemas álcali-ativados (adaptado de Provis e van Deventer, 2014).....	56
Figura 2.16: Modelo de polimerização proposto por Glukhosky (adaptado de Duxson, Fernández-Jiménez, <i>et al.</i> 2007).....	57
Figura 3.1: Curva granulométrica do rejeito de mineração de ouro (elaborado pela autora, 2021).	65
Figura 3.2: Ensaio de compactação do rejeito de mineração de ouro (elaborado pela autora, 2021).....	66
Figura 3.3: Difração de Raio-X Rejeito (elaborado pela autora, 2021).	67
Figura 3.4: Distribuição granulométrica cal de carbureto (elaborado pela autora, 2021).	69
Figura 3.5: Difração de Raios-X cal de carbureto (elaborado pela autora, 2021).....	70
Figura 3.6: Distribuição granulométrica CBCA (elaborado pela autora, 2021).....	72
Figura 3.7: Difração de Raio-X CBCA (elaborado pela autora, 2021).	73
Figura 3.8: Fluxograma do ensaio de lixiviação NBR 10.005 (elaborado pela autora, 2021). 81	
Figura 3.9: Permeâmetro de Parede Flexível (elaborado pela autora, 2021)	83
Figura 4.1: Resistência a compressão simples dos sistemas álcali-ativados (elaborado pela autora, 2021).....	85
Figura 4.2: Curvas de compactação com ligante (elaborado pela autora, 2021).....	86

Figura 4.3: Resultados médios de resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	87
Figura 4.4: Gráficos de Pareto da resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	88
Figura 4.5: Efeitos principais resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	90
Figura 4.6: Interações resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	91
Figura 4.7: Relação entre a resistência à compressão simples e o índice (a) η/B_{iv} ligante álcali-ativado e (b) η/C_{iv} cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).	93
Figura 4.8: Resistência à compressão simples normalizada para ambos tempos de cura (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).	95
Figura 4.9: Medidas de sucção matricial (elaborado pela autora, 2021).....	96
Figura 4.10: Resultados médios de resistência à tração por compressão diametral (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).	97
Figura 4.11: Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e o índice (a) η/B_{iv} ligante álcali-ativado e (b) η/C_{iv} cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	98
Figura 4.12: Resultados médios do módulo cisalhante inicial (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	100
Figura 4.13: Gráficos de Pareto da rigidez (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).	101
Figura 4.14: Efeitos principais rigidez (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021)	102
Figura 4.15: Interações rigidez (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	103

Figura 4.16: Relação entre a rigidez e o índice (a) η/B_{iv} ligante álcali-ativado e (b) η/C_{iv} cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	104
Figura 4.17: Rigidez normalizada para ambos tempos de cura (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	107
Figura 4.18: Rigidez pela resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	108
Figura 4.19: Perda de massa individual (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).	109
Figura 4.20: Perda de massa acumulada (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).	110
Figura 4.21: Relação entre a perda de massa acumulada ao longo dos ciclos e o (a) η/B_{iv} ligante álcali-ativado e (b) η/C_{iv} cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).	112
Figura 4.22: Módulo cisalhante inicial ao longo dos ciclos de durabilidade (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021)	114
Figura 4.23: Relação entre a rigidez ao longo dos ciclos de durabilidade e o (a) η/B_{iv} ligante álcali-ativado e (b) η/C_{iv} cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).	115
Figura 4.24: Variação de pH das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).	120
Figura 4.25: Concentração de alumínio das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	121
Figura 4.26: Concentração de arsênio das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	123
Figura 4.27: Concentração de bário das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	124

Figura 4.28: Concentração de cádmio das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	126
Figura 4.29: Concentração de chumbo das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	128
Figura 4.30: Concentração de cobre das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	129
Figura 4.31: Concentração de cromo das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	131
Figura 4.32: Concentração de ferro das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	133
Figura 4.33: Concentração de manganês das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	134
Figura 4.34: Concentração de mercúrio das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	136
Figura 4.35: Concentração de selênio das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	137
Figura 4.36: Concentração de zinco das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Outorgas de títulos minerários – 2017 (adaptado de ANM, 2019)	29
Tabela 2.2: Produção Bruta – 2017 (adaptado de ANM, 2019).....	30
Tabela 2.3: Valores de massa específica real dos grãos de resíduos de mineração de ouro	34
Tabela 2.4: Valores típicos de coeficiente de permeabilidade para solos sedimentares usuais (Fernandes, 2016).....	35
Tabela 2.5: Condutividade hidráulica de rejeitos de mineração (adaptada de Vick, 1983).	35
Tabela 3.1: Experimento Fatorial Completo 2^3 ensaios de RCS e G_0	63
Tabela 3.2: Experimento Fatorial Completo 2^2 ensaios de tração por compressão diametral, de durabilidade, de rigidez ao longo dos ciclos.....	63
Tabela 3.3: Fatores controláveis e constantes experimento fatorial completo 2^3	64
Tabela 3.4: Fatores controláveis e constantes experimento fatorial completo 2^2	64
Tabela 3.5: Propriedades físicas do rejeito de mineração de ouro	66
Tabela 3.6: Espectrometria de Fluorescência de Raios-X rejeito.....	68
Tabela 3.7: Elementos traços rejeito.....	68
Tabela 3.8: Propriedades físicas cal de carbureto.....	69
Tabela 3.9: Espectrometria de Fluorescência de Raios-X CC	71
Tabela 3.10: Propriedades físicas CBCA	72
Tabela 3.11: Espectrometria de Fluorescência de Raios-X CBCA.....	73
Tabela 3.12: Elementos traços CBCA.....	74
Tabela 3.13: Limites de gradiente hidráulico em função da condutividade hidráulica.....	84

Tabela 4.1: Agrupamento dos sistemas álcali-ativados pelo método de Tukey	86
Tabela 4.2: Perda de massa individual média.....	110
Tabela 4.3: Perda de massa acumulada	111
Tabela 4.4: Resultados ensaio de lixiviação do rejeito de ouro NBR 10.005 (ABNT, 2004b)	117
Tabela 4.5: Resultados ensaio de solubilização do rejeito de ouro NBR 10.006 (ABNT, 2004c).	118
Tabela 4.6: Resultados ensaio de lixiviação da cinza do bagaço de cana-de-açúcar NBR 10.005 (ABNT, 2004b).....	119
Tabela 4.7: Resultados ensaio de solubilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar NBR 10.006 (ABNT, 2004c).....	119
Tabela 4.8: Concentração de alumínio das amostras com ligante álcali-ativado	122
Tabela 4.9: Concentração de alumínio das amostras com cimento Portland	122
Tabela 4.10: Concentração de arsênio das amostras com ligante álcali-ativado.....	123
Tabela 4.11: Concentração de arsênio das amostras com cimento Portland.....	123
Tabela 4.12: Concentração de bário das amostras com ligante álcali-ativado	125
Tabela 4.13: Concentração de bário das amostras com cimento Portland	125
Tabela 4.14: Concentração de cádmio das amostras com ligante álcali-ativado.....	126
Tabela 4.15: Concentração de cádmio das amostras com cimento Portland.....	127
Tabela 4.16: Concentração de chumbo das amostras com ligante álcali-ativado	128
Tabela 4.17: Concentração de chumbo das amostras com cimento Portland.....	128
Tabela 4.18: Concentração de cobre das amostras com ligante álcali-ativado	130
Tabela 4.19: Concentração de cobre das amostras com cimento Portland.....	130

Tabela 4.20: Concentração de cromo das amostras com ligante álcali-ativado	131
Tabela 4.21: Concentração de cromo das amostras com cimento Portland	132
Tabela 4.22: Concentração de ferro das amostras com ligante álcali-ativado.....	133
Tabela 4.23: Concentração de ferro das amostras com cimento Portland.....	133
Tabela 4.24: Concentração de manganês das amostras com ligante álcali-ativado	135
Tabela 4.25: Concentração de manganês das amostras com cimento Portland	135
Tabela 4.26: Concentração de mercúrio das amostras com ligante álcali-ativado.....	136
Tabela 4.27: Concentração de mercúrio das amostras com cimento Portland	136
Tabela 4.28: Concentração de selênio das amostras com ligante álcali-ativado.....	138
Tabela 4.29: Concentração de selênio das amostras com cimento Portland	138
Tabela 4.30: Concentração de zinco das amostras com ligante álcali-ativado.....	139
Tabela 4.31: Concentração de zinco das amostras com cimento Portland.....	139

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANM – Agência Nacional de Mineração

ANOVA – Análise de Variância

APHA – *American Public Health Association*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

AWWA – *American Water Works Association*

C-A-H – Aluminato Hidratado de Cálcio

C-S-H – Silicato Hidratado de Cálcio

C-A-S-H – Silicato de Cálcio Modificado com Alumínio

CBCA – Cinza Bagaço de Cana-de-Açúcar

CC – Cal de Carbureto

CP – Corpo de Prova

DRX – Difractometria de Raios-X

EPA – *Environmental Protection Agency*

FRX – Espectrometria de Fluorescência de Raios-X

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

ICDD – *International Centre for Diffraction Data*

IP – Índice de Plasticidade

LL – Limite de Liquidez

LOI – *Loss on Ignition*

LP – Limite de Plasticidade

N-A-S-H – Aluminossilicatos de Sódio Hidratado

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

pH – potencial Hidrogênico

ppm – Parte por Milhão

PVC – Poli Cloreto de Vinila

RCS – Resistência a Compressão Simples

rpm – Rotação por Minuto

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos

WEF – *Water Environment Federation*

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$ – Graus Celsius

ρ_s – Massa Específica dos Grãos

μm – Micrometro

γ_d – Peso Específico Aparente Seco

η – Porosidade

η/B_{iv} – Relação da porosidade e teor volumétrico de ligante

η/C_{iv} – Relação da porosidade e teor volumétrico de cimento

η/L_{iv} – Relação da porosidade e teor volumétrico de cal

2^k – Projeto de Experimentos Fatorial

Al – Alumínio

As – Arsênio

Ba – Bário

B_{iv} – Teor Volumétrico de Ligante

Ca – Cálcio

Cd – Cádmió

C_{iv} – Teor Volumétrico de Cimento

CO_2 – Dióxido de Carbono

Cr – Cromo

Cu – Cobre

Fe – Ferro

G_0 – Módulo Cisalhante Inicial

GPa – Giga Pascal

Hg – Mercúrio

H₂O – Molécula de Água

i – Gradiente Hidráulico

k – Condutividade Hidráulica ou coeficiente de permeabilidade

kPa – Quilo Pascal

kN/m³ – Quilo Newton por metro cúbico

L_{iv} – Teor Volumétrico de Cal

m/s – Metros por segundo

min – Minutos

mm – Milímetros

Mn – Manganês

MPa – Mega Pascal

NaCN – Cianeto de Sódio

NaOH – Hidróxido de Sódio

Na₂O – Óxido de Sódio

Pb – Chumbo

q – Taxa de Fluxo

R^2 – Coeficiente de Determinação

Se – Selênio

Si – Silício

t_p – Onda de Compressão

t_s – Onda de Cisalhamento

V_{ci} – Volume de Cimento

V_p – Velocidade de Compressão

V_s – Velocidade de Cisalhamento

V_t – Volume total da amostra

V_v – Volume de Vazios

Zn – Zinco

SÚMARIO

1. INTRODUÇÃO	24
1.1. RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	24
1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA	26
1.2.1 Objetivo Geral	26
1.2.2 Objetivos Específicos	26
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1. REJEITOS DE MINERAÇÃO.....	28
2.1.1. Mineração de ouro.....	30
2.1.1.1. Composição mineralógica	32
2.1.1.2. Caracterização geotécnica básica	32
2.1.1.3. Permeabilidade	34
2.2. MELHORAMENTO DE SOLOS	37
2.2.1. Reações Pozolânicas	38
2.2.2. Solo-cimento	39
2.2.3. Solo-cal	41
2.3. VARIÁVEIS DETERMINANTES NO COMPORTAMENTO DE SOLOS MELHORADOS	42
2.3.1. Efeito do ligante	42
2.3.2. Efeito do teor de cimento	44
2.3.3. Efeito da porosidade.....	44
2.3.4. Efeito do tempo de cura	46
2.3.5. Efeito da relação entre porosidade e o teor volumétrico de ligante	48
2.4. ÁLCALI ATIVAÇÃO.....	53
2.4.1. Ligantes Alkali-ativados.....	55
2.4.2. Polimerização	56
2.4.3. Precursores	58
2.4.3.1. Cal de Carbureto.....	58

2.4.3.2. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar	59
2.4.4. Ativadores	60
2.4.5. Fatores que influenciam na polimerização	60
3. MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL	62
3.1.1 Projeto de Experimentos	62
3.3.1. Etapas do programa experimental	63
3.2. MATERIAIS	65
3.2.1. Preparação das amostras.....	65
3.2.2. Rejeito de Mineração de Ouro	65
3.2.3. Cal de carbureto	69
3.2.4. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar.....	71
3.2.5. Ativador.....	74
3.2.6. Cimento Portland	74
3.3. MÉTODOS.....	75
3.3.1. Delimitação dos fatores controláveis	75
3.3.1.1 Resistência a compressão simples do ligante	75
3.3.1.2 Ensaio de compactação ligante-rejeito	75
3.3.1.3 Ensaio de resistência a compressão simples ligante-rejeito.....	76
3.3.2. Dosagem, Moldagem e Cura dos corpos de prova RCS, RCD, G0, Durabilidade e Lixiviação..	76
3.3.3. Ensaio de pulso ultrassônico.....	77
3.3.4. Ensaio de resistência a compressão simples	78
3.3.5. Resistência a Tração por Compressão Diametral.....	78
3.3.6. Ensaio de sucção	78
3.3.7. Ensaio de durabilidade por molhagem, secagem e escovação.....	79
3.3.8. Ensaio de lixiviação e solubilização	80
3.3.8.1. Ensaio de lixiviação	80
3.3.8.2. Ensaio de Solubilização	82
3.3.8.3. Ensaio de lixiviação com permeâmetro.....	82
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	85
4.1. RESULTADOS ENSAIOS PRELIMINARES	85
4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	87
4.2.1. Relações com os índices η/Biv e η/Civ	92

4.3. SUCCÃO MATRICIAL.....	96
4.4. RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	96
4.4.1. Relações com os índices η/Biv e η/Civ	98
4.5. MÓDULO CISALHANTE INICIAL.....	99
4.5.1. Relações com os índices η/Biv e η/Civ	104
4.5.2. Relações com a resistência à compressão simples	108
4.6. DURABILIDADE	109
4.6.1. Relações com os índices η/Biv e η/Civ	111
4.7. MÓDULO CISALHANTE INICIAL AO LONGO DOS CICLOS DE DURABILIDADE	114
4.7.1. Relações com os índices η/Biv e η/Civ	115
4.8. LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO	117
4.8.1. Caracterização – lixiviação e solubilização.....	117
4.8.2. Lixiviação dinâmica – lixiviação com permeâmetro	120
4.8.2.1. Alumínio	121
4.8.2.2. Arsênio	122
4.8.2.3. Bário.....	124
4.8.2.4. Cádmio	126
4.8.2.5. Chumbo	127
4.8.2.6. Cobre.....	129
4.8.2.7. Cromo.....	131
4.8.2.8. Ferro	132
4.8.2.9. Manganês	134
4.8.2.10. Mercúrio	135
4.8.2.11. Selênio.....	137
4.8.2.12. Zinco	138
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	141
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147
APÊNDICE – Tratamentos de resistência e rigidez.....	161

1. INTRODUÇÃO

1.1. RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A indústria da mineração é responsável diretamente por cerca de 35 milhões de empregos no mundo (NISHIJIMA e ROCHA, 2020). Os registros acerca da mineração de substâncias metálicas no Brasil remontam dos tempos de Colônia, que se deu inicialmente pelos bandeirantes em buscas de minérios de ouro. Conforme aumentou a ocupação do território e o conhecimento geológico novos depósitos foram encontrados, gerando impacto na economia nacional e potencializando o processo de industrialização brasileiro (ANM, 2017).

Com o avanço tecnológico, a capacidade de minerar substâncias com baixo teor mineral cresceu, exacerbando a produção de rejeitos de mineração. No entanto, as práticas de disposição de rejeitos permaneceram inalteradas, não comportando mais as quantidades de rejeito produzidas (IBRAM, 2016).

Segundo estudo realizado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012) sobre resíduos sólidos da atividade de mineração, a produção anual de rejeitos de mineração no Brasil aumentou de 290 milhões toneladas em 2005 para 348 milhões de toneladas em 2010, com uma estimativa de 684 milhões de toneladas para o ano de 2030. Sendo que muitos desses rejeitos contêm metais pesados, ácidos e produtos químicos resultantes do processo de beneficiamento dos minérios, demandando extensas medidas preventivas para mitigação de riscos (SEIDALINOVA, 2014; PANDA, JAIN, *et al.*, 2017).

De acordo com a lei número 12.305/10, que elabora a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a destinação dos rejeitos deve ser realizada de maneira adequada, de modo a assegurar a estabilidade das estruturas de contenção além de reduzir os impactos ambientais (IPEA, 2012). Além dessa lei, novas leis e normativas rigorosas devem ser cada vez mais implementadas devido aos sucessivos grandes desastres ocorridos nos últimos anos (TOLEDO FILHO, KOENDERS, *et al.*, 2013). Ainda, Duarte (2008) atenta para o fato de que os rejeitos apresentam características geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas, por vezes, bastante distintas devido aos diferentes processos de tratamento e beneficiamento adotados e que essa variabilidade precisa ser considerada.

Desastres como os acontecidos em Mariana, em 2015 e em Brumadinho, em 2019, evidenciam a necessidade de se compreender o comportamento dos rejeitos de mineração, bem como de elucidar os problemas dos sistemas de contenção/disposição existentes. Ademais, é inegável que o beneficiamento de minérios pode vir a gerar quantidades consideráveis de poluição, em função disso, nos últimos anos há uma pressão constante para que os rejeitos sejam usados para outros fins como substituição a brita em bases de estradas e restauração de áreas mineradas (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010; ZHANG, AHMARI e ZHANG, 2011).

Nesse contexto, Bedin, Schnaid, *et al.* (2012) e Nierwinski (2019) buscaram entender o comportamento de rejeitos de mineração de ouro a baixas tensões de carregamento, enquanto Festugato, Fourie e Consoli (2013) analisaram o comportamento de um rejeito de mineração de ouro artificialmente cimentado e reforçado com fibras para possível utilização em ferrovias de alta velocidade, rodovias, aerovias, aterro de resíduo de mineração e fundações *offshore* e Tomasi (2018) avaliou a possibilidade de melhorar as características de um rejeito de mineração de ouro com adição de cimento Portland.

A utilização de agentes cimentantes como cal e cimento Portland é amplamente retratada na literatura para modificação das propriedades intrínsecas dos solos naturais, e mais recentemente de rejeitos de mineração, a fim de obter-se um material estável e eficiente para diversos usos da construção civil (*e.g.* bases e sub-bases de pavimentos, proteção de taludes, camadas melhoradas para assentamento de fundações).

No entanto, devido as altas taxas de emissões sólidas e gasosas, especialmente a emissão de dióxido de carbono (CO₂), e o alto consumo de energia para produção de materiais primas, alternativas aos agentes cimentantes comuns atualmente comercializados fazem-se cada vez mais necessárias (PACHECO-TORGAL, CASTRO-GOMES e JALALI, 2008; SCRIVENER e KIRKPATRICK, 2007). De 1850 a 2018 foi observado um aumento de mais de 30% de liberação de gás carbônico, ainda, estima-se que 35 bilhões de toneladas são liberadas na atmosfera todos os anos e que o setor da indústria mineral é um dos principais contribuindo para esse aumento (KIRK e LUND, 2018).

Com o propósito de reduzir as emissões de dióxido de carbono geradas pela produção dos agentes cimentantes convencionais, como também de melhorar propriedades mecânicas e encapsular metais pesados, surgem os cimentos álcali-ativados, desenvolvidos principalmente a partir de distintos resíduos industriais. Esses sistemas álcali-ativados possuem melhor

durabilidade comparados ao cimento Portland quando dosados corretamente, além de apresentarem elevada resistência mecânica e resistência a ataques químicos, como também capacidade de encapsular contaminantes em sua estrutura (DUXSON, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, *et al.*, 2007).

Nesse contexto, é fundamental o desenvolvimento de estudos visando novas tecnologias e metodologias mais econômicas e sustentáveis, que busquem também a mitigação dos impactos ambientais. Assim, a presente pesquisa busca avaliar a viabilidade de se utilizar um cimento álcali-ativado com hidróxido de sódio a base de cal de carbureto e cinza do bagaço de cana-de-açúcar para estabilização de um rejeito de mineração de ouro, além de identificar os fatores determinantes no melhoramento do rejeito e verificar a eficiência do ligante para encapsulamento de contaminantes.

1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa é a estabilização e solidificação de um rejeito de mineração de ouro, por meio da utilização de um ligante álcali-ativado, desenvolvido a partir de diferentes resíduos industriais como precursores.

1.2.2 Objetivos Específicos

A partir do objetivo geral da presente pesquisa, foram delimitados os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o comportamento mecânico do rejeito de mineração de ouro melhorado;
- Quantificar estatisticamente os fatores controláveis pesquisados quanto a sua influência isolada e conjunta nas variáveis respostas;
- Verificar a viabilidade de correlacionar as variáveis resposta (resistência a compressão simples, resistência a tração por compressão diametral, rigidez e durabilidade) com o índice porosidade/teor volumétrico de ligante;

- Classificar o resíduo de mineração de ouro e a cinza do bagaço de cana-de-açúcar quanto a sua toxicidade;
- Analisar o encapsulamento de possíveis elementos traço no rejeito de mineração melhorado;

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho foi organizada em cinco capítulos, como o intuito de melhor apresentar o conteúdo nele contido. No Capítulo 1 é realizada uma breve introdução acerca do tema da pesquisa e de sua justificativa e relevância, e os objetivos geral e específicos.

Ao passo que no Capítulo 2 é desenvolvida uma contextualização mais ampla a respeito dos resíduos de mineração de ouro e de solos melhorados, assim como aspectos relevantes a respeito dos efeitos de algumas variáveis no comportamento mecânico de solos melhorados e a técnica de álcali-ativação para desenvolvimento de ligantes alternativos.

No Capítulo 3 o programa experimental e os materiais utilizados na pesquisa são evidenciados, como também os fatores controláveis e constantes e a descrição dos métodos utilizados para atingir os objetivos estabelecidos.

Ainda, no Capítulo 4 são exibidos os resultados e preliminares e os resultados dos ensaios apresentados no Capítulo 3 com suas respectivas análises e discussão dos resultados. Por fim, no Capítulo 5, são apontadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. REJEITOS DE MINERAÇÃO

Mineração entende-se como uma série de atividades que buscam pesquisar, extrair, tratar ou beneficiar e transformar recursos minerais em insumos para a indústria. O Brasil produz ao todo cerca de 100 substâncias minerais em escala industrial. Porém, a maior parte dessa produção é de minérios metálicos (IBRAM, 2016). Em 2015 a geração desses minérios correspondia a, aproximadamente, 76% da carga mineral comercializada. Já em 2017 essa geração equivalia a 80% da produção total (ANM, 2017; IBRAM, 2017).

Dessas substâncias metálicas, 11 se destacam e representam 99,6% da comercialização dessa categoria, que são: alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco (ANM, 2019). Na Figura 2.1 apresenta-se a participação das principais substâncias metálicas no valor total da produção mineral comercializada no ano de 2017.

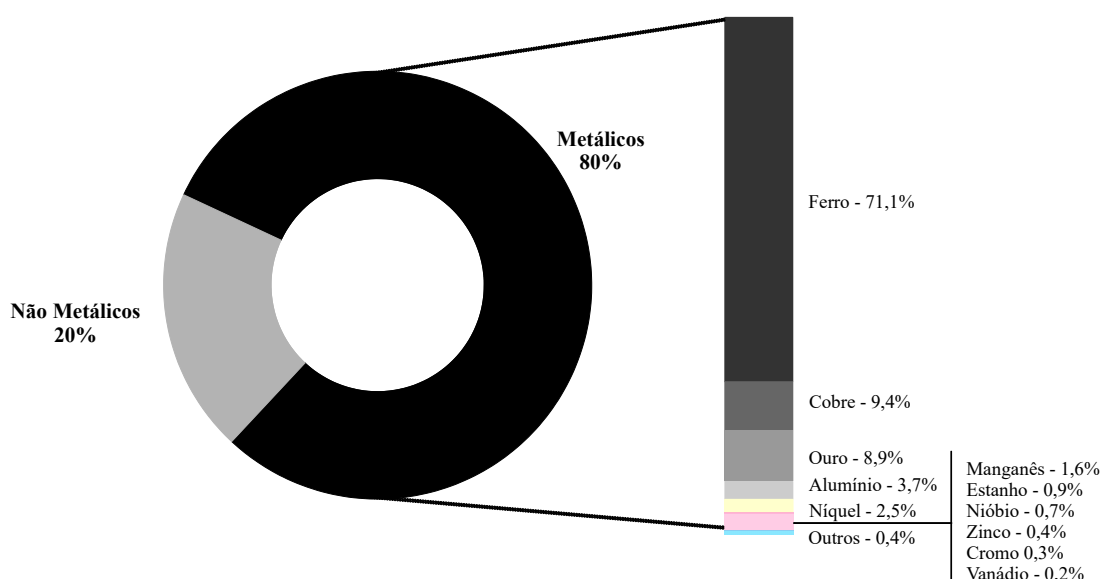


Figura 2.1: Participação das Principais Substâncias Metálicas no Valor da Produção Mineral Comercializada (adaptado de ANM, 2019).

De acordo com Melfi et al. (2016), a geologia do Brasil é bastante semelhante à de países como Austrália e Canadá, entretanto, diferente do que ocorre nesses países que tem sua produção voltada para a geração de metais preciosos, o Brasil explorou, principalmente, seu potencial em Ferro (Fe), Manganês (Mn), Alumínio (Al), Estanho (Sn) e Nióbio (Nb). Todavia, o anuário

mineral brasileiro (ANM, 2019) traz dados relevantes sobre a outorga de novos títulos minerários, como demonstrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Outorgas de títulos minerários – 2017 (adaptado de ANM, 2019)

Substância	Autorização de Pesquisa	Concessão de Lavra	Permissão de Lavra Garimpeira ¹
Alumínio	42	-	-
Cobre	413	-	-
Cromo	2	1	-
Estanho	99	-	7
Ferro	371	4	-
Manganês	160	3	-
Nióbio	39	1	1
Níquel	195	-	-
Ouro	1.423	14	203
Vanádio	6	-	-
Zinco	388	-	-
Total	3.138	23	211

Pelos dados apresentados na Tabela 2.1. é possível observar um maior número de concessões para pesquisa de minas de cobre, ouro e zinco, o ouro tendo se destacado também pelo grande número de concessões para lavra.

A indústria de mineração apresentou crescimento nos últimos anos, segundo dados da Agência Nacional de Mineração (2019), e atualmente é responsável por cerca de 4% do produto interno bruto (PIB). No entanto, o processo de mineração gera grandes quantidades de materiais inertes (não aproveitáveis) e de rejeitos (IBRAM, 2016).

Os materiais inertes são provenientes das fases de escavação e extração (lavra) de solo e matéria orgânica que se encontra em cima da rocha da qual se pretende extrair o minério. Ao passo que os rejeitos são formados nas etapas de tratamento ou beneficiamento que visam a retirada dos minerais sem valor econômico e o aumento da qualidade, da pureza e do teor de extração do

¹ Aproveitamento imediato de jazidas de minerais garimpáveis, independentemente de trabalhos prévios de Pesquisa.

mineral de interesse (IPEA, 2012). A mineração de minérios não metálicos gera maiores volumes de materiais inertes enquanto a mineração de minérios metálicos produz em maior quantidade os rejeitos (IBRAM, 2016). Na Tabela 2.2 apresenta-se os dados da produção bruta do ano base de 2017 das principais substâncias metálicas produzidas no Brasil.

Tabela 2.2: Produção Bruta – 2017 (adaptado de ANM, 2019)

Substância	Quantidade de Minério Bruto (t)	Contido Mineral de interesse (t)	Teor (%)
Alumínio	49.714.940	23.529.698	47,33
Cobre	111.340.233	616.934	0,55
Cromo	1.445.137	245.165	16,96
Estanho	20.759.504	17.196	0,08
Ferro	585.337.085	318.587.105	54,43
Manganês	5.805.557	1.934.237	33,32
Nióbio	23.575.307	142.324	0,60
Níquel	7.253.656	111.970	1,54
Ouro	92.206.502	59	6,5x10 ⁵
Vanádio	1.165.950	19.143	1,64
Zinco	2.510.582	198.835	7,92

Como evidenciado na Tabela 2.2 os minérios de cobre, ferro e ouro são os maiores geradores de minério bruto e de rejeitos, no entanto, apesar da quantidade superior de produção de ferro, o montante de rejeito das três substâncias apontadas é semelhante, isto se dá pelo baixo teor de mineral aproveitável do cobre e do ouro.

2.1.1. Mineração de ouro

Os minérios em seu estado bruto não são suficientemente puros e aptos para utilização como insumos da indústria, logo, após o processo de lavra eles precisam ser submetidos a procedimentos para extração do mineral de interesse (MUNIZ e OLIVEIRA-FILHO, 2006). Então, realizada a lavra, dá-se prosseguimento ao processo de mineração pela britagem, peneiramento e moagem do minério. Feito isso, realiza-se uma classificação para determinar se os minerais estão fisicamente liberados, ou seja, que tenham idealmente partículas de uma única

espécie mineralógica, podendo variar de centímetros até micrometros dependendo do mineral (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

Por fim, faz-se a separação das espécies minerais concentradas, por métodos gravíticos, magnéticos, eletrostáticos ou de flotação. A determinação do método para a etapa de concentração depende de fatores como a mineralogia do mineral de interesse e dos minerais de ganga (minerais não aproveitados), o tipo de padrão de liberação dos minerais e o tamanho da partícula (LINS, 2000). Na Figura 2.2 é expresso um fluxograma de um tratamento de minério típico com reaproveitamento de água.

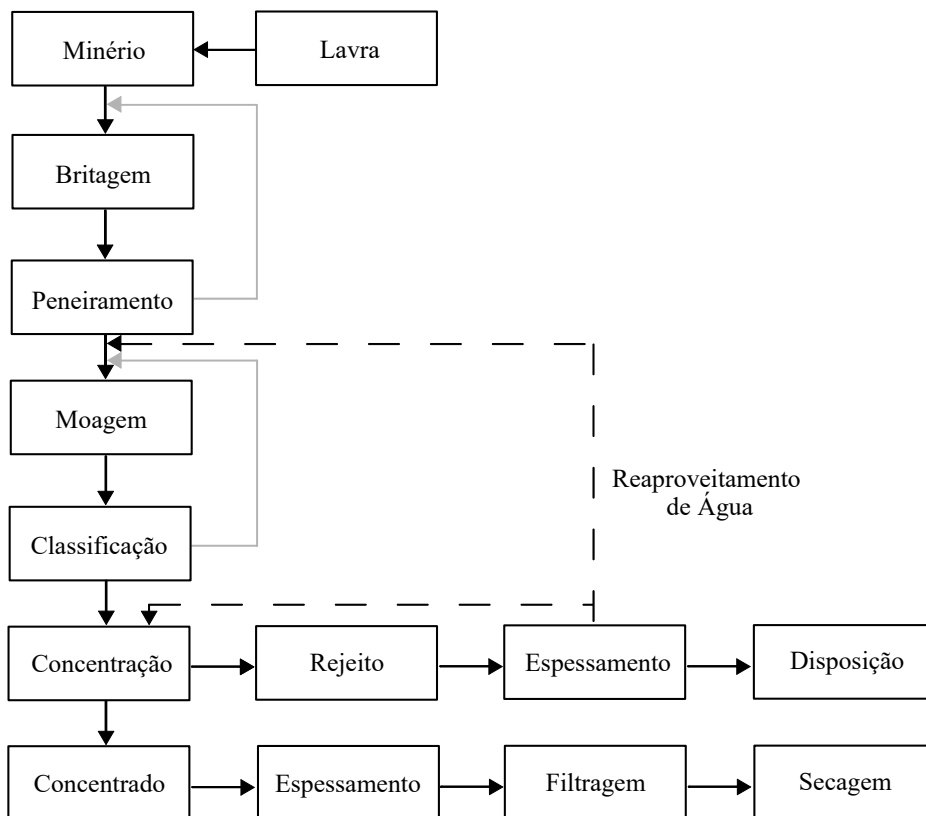


Figura 2.2: Fluxograma típico de tratamento de minério (adaptado de Luz, Sampaio e França, 2010).

Como expresso na Figura 2.2 a etapa de concentração separa o rejeito do concentrado de minerais de interesse. Tanto o concentrado quanto o rejeito saem desse processo com alta saturação, assim seguem para o espessamento para redução da quantidade de água. O rejeito depois de espessado segue geralmente para disposição, enquanto o concentrado passa por mais duas etapas antes da obtenção do produto final: a filtragem e a secagem.

A mineração de ouro, especificamente, acontece de maneira semelhante ao processo apresentado na Figura 2.2. O processo de concentração dessa substância, de modo geral, ocorre por métodos gravíticos quando as partículas livres de ouro exibem tamanhos maiores que 200 μm e por flotação quando o ouro está associado a sulfetos (TRINDADE e BARBOSA FILHO, 2002). Além disso, durante a etapa de concentração, diferente do que comumente é feito com outros minérios, é realizado um processo de adsorção por cianetação (NaCN) para que haja a liberação do mineral de ouro dos minerais de canga (sem valor econômico) (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

2.1.1.1. Composição mineralógica

Cerca de 80 por cento das reservas auríferas do Brasil é proveniente de rochas do éons Arqueano (4 bilhões de anos atrás) e Proterozoico (3,7 bilhões de anos atrás), 15 por cento da era Mesozoica (65,5 milhões de anos atrás), e 5 por cento de depósitos da era Cenozóica (era geológica atual), dessa era provem quase que totalmente a produção garimpeira (TRINDADE e BARBOSA FILHO, 2002).

Bedin (2010) salienta que ao analisar rejeitos de mineração deve-se sempre considerar que cada rejeito tem suas características físicas, químicas e mineralógicas próprias, assim como outras particularidades provenientes do seu processo de tratamento ou beneficiamento. Os principais minerais geralmente encontrados nos rejeitos de mineração de ouro são: quartzo, albita, clorita e sulfetados (pirita, arsenopirita, pirrotita e calcopirita). A presença ou não desses minerais, assim como a proporção deles no rejeito vai depender da rocha mãe da qual foram extraídos.

Rejeitos oriundos da oxidação de minerais sulfetados são extremamente solúveis e ácidos, o que os torna facilmente dissolvidos na fase líquida, acidificando o meio. Esses baixos valores de pH (na ordem de 3 ou menos) propiciam a liberação de elementos tóxicos como alumínio, arsênio, cádmio, chumbo, cobre, magnésio, manganês, mercúrio e zinco se disponíveis no rejeito, podendo ser absorvidos pelo meio ambiente em níveis acima do permitido por norma (MELLO e ABRAHÃO, 1998).

2.1.1.2. Caracterização geotécnica básica

O comportamento dos rejeitos de mineração pode ser previsto considerando os princípios básicos de mecânica dos solos. No entanto, as características geotécnicas dos rejeitos são distintas, com propriedades e comportamento, frequentemente, diferentes dos apresentados por

solos naturais (JEWELL, 1998). Isso decorre de variáveis como o tipo de minério extraído e o método de tratamento ou beneficiamento realizado (NIERWINSKI, 2019).

Por esse motivo, ao estudar as propriedades geotécnicas de resíduos de mineração é preciso se atentar que eles são resultantes de uma série de processos físicos e químicos e que suas características (e.g. granulometria, composição química) não necessariamente são provenientes de sua composição mineralógica como ocorre com solos naturais, em função dos processamentos aos quais eles passam. Tanto a composição química e a estrutura cristalina quanto a superfície específica são de extrema influência no comportamento geotécnico (BEDIN, 2010).

Jewell (1998) aponta que o tamanho dos grãos de rejeito de mineração depende das características do minério e do processo de moagem usado. Por esse motivo a curva granulométrica dos rejeitos é repleta de incertezas (VICK, 1983). O tamanho do grão pode variar de areia média a silte ou argila (ZARDARI, 2010). Essa variabilidade pode ser constatada por ensaios de granulometria apresentados por Vick (1983) para rejeitos de mineração de ouro na Figura 2.3.

Os rejeitos auríferos manifestam, principalmente, características de solos arenosos, com pouca ou nenhuma fração de argila e costumam apresentar baixa ou nenhuma plasticidade.

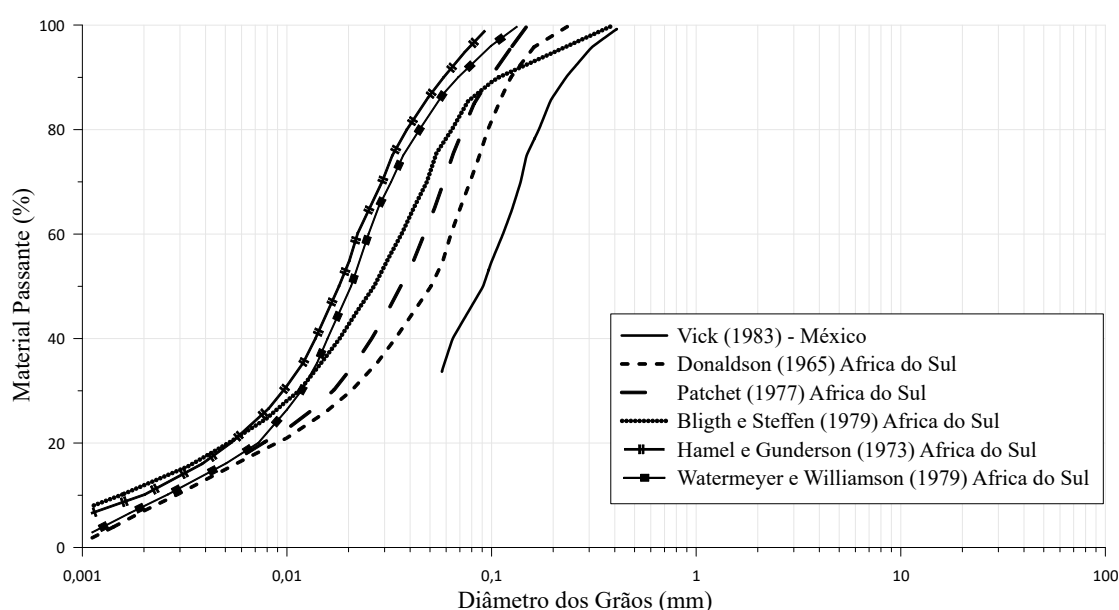


Figura 2.3: Curvas granulométricas características do rejeito de minério de ouro (adaptado de Vick, 1983)

Para materiais com finos, normas de análise granulométrica nacionais (ABNT, 2018) e internacionais (ASTM, 2017) indicam a realização do ensaio de granulometria com o uso de um agente dispersor, no entanto, pode ocorrer interferências devido as substâncias químicas presente no rejeito do seu processo de tratamento ou beneficiamento.

Jedari, Palomino *et al.* (2017) ao compararem ensaios de granulometria realizados por sedimentação e por granulometria a laser constataram que a análise por sedimentação subestima a fração mais fina (siltes e argilas), possivelmente por efeito de aglutinação das partículas formada por interações entre o defloculante e os elementos químicos do rejeito.

Os valores de massa específica real dos grãos (ρ_s), assim como as faixas de granulometria, exibem grande variabilidade em virtude da rocha mãe, da quantidade de partículas de argila e, acima de tudo, do teor de elementos metálicos existentes. Quanto maior o número de elementos metálicos maior o valor da massa específica (VILLAR, 2002). Na Tabela 2.3 são evidenciados alguns valores de massa específica real dos grãos encontrados na literatura.

Tabela 2.3: Valores de massa específica real dos grãos de resíduos de mineração de ouro

Autores	ρ_s (g/cm ³)
Hamel e Gundeson (1973)	2,6 – 2,7
Costa Filho, Santos e Palma (2002)	2,89 – 2,93
Barbosa e Santos (2003)	2,9
McPhal, Noble et al. (2004)	3,4 – 3,6
Bedin (2012)	3,0
Festugato, Fourie e Consoli (2013)	2,72
Tomasi (2018)	2,77
Nierwinski (2019)	2,86

2.1.1.3. Permeabilidade

A permeabilidade é um parâmetro muito importante, visto que ela está relacionada a diversos problemas de engenharia. Os principais fatores que interferem no coeficiente de condutividade hidráulica (k), que determina a permeabilidade dos solos, são: granulometria, índice de vazios, estrutura e composição mineralógica e grau de saturação (FERNANDES, 2016). A Tabela 2.4 apresenta valores típicos de coeficientes de permeabilidade de solos sedimentares.

Tabela 2.4: Valores típicos de coeficiente de permeabilidade para solos sedimentares usuais (Fernandes, 2016)

Tipo de Solo	k (m/s)
Pedregulhos	$> 10^{-2}$
Areia Grossa	10^{-2} a 10^{-3}
Areia Média	10^{-3} a 10^{-4}
Areia Fina	10^{-4} a 10^{-5}
Areia Siltosa	10^{-5} a 10^{-6}
Siltes	10^{-6} a 10^{-8}
Argilas	10^{-8} a 10^{-10}

A condutividade hidráulica representa a velocidade com que um fluido se desloca por um meio poroso. Deste modo, quanto maior o valor de k , maior é o grau de permeabilidade, ou seja, mais rápido é o deslocamento do fluido pelo meio (REICHARDT, 1996). Como visto na Tabela 2.4 os pedregulhos e as areias possuem maior grau de permeabilidade enquanto as argilas apresentam menor grau, por diversas vezes sendo consideradas impermeáveis.

É difícil expressar a condutividade hidráulica de rejeitos em termos de valores genéricos, pois como supracitado este parâmetro é influenciado pelas características próprias de cada material (distribuição granulométrica, quantidade de finos, forma e textura das partículas, composição mineralógica, índice de plasticidade) e pelo arranjo estrutural (índice de vazios e grau de saturação), fatores esses que são de grande variabilidade nos rejeitos de mineração, além disso, no caso dos rejeitos há também a influência dos métodos de disposição, entretanto, na Tabela 2.5 são apontados valores característicos de condutividade hidráulica para resíduos de mineração (VICK, 1983).

Tabela 2.5: Condutividade hidráulica de rejeitos de mineração (adaptada de Vick, 1983).

Tipo de Solo	k (m/s)
Rejeito arenoso grosso, menos de 15 % de finos	10^{-4} a 10^{-5}
Rejeito arenoso com mais de 30% de finos	10^{-5} a 5×10^{-6}
Rejeito de baixa plasticidade ou não plástico	10^{-7} a 5×10^{-9}
Rejeito de alta plasticidade	10^{-6} a 10^{-10}

A determinação da condutividade pode ser realizada por ensaios de campo ou de laboratório. Os ensaios de laboratório podem manifestar problemas de escala, devido a heterogeneidade dos solos e o volume menor de material, no entanto, os resultados dos ensaios de campo são interpretados por modelos empíricos ou semiempíricos, dado a complexidade das condições de contorno (FERNANDES, 2016). Os ensaios de laboratório são realizados geralmente por permeâmetros de parede rígida, permeâmetros de parede flexível ou por triaxiais.

De acordo com Head e Epps (2011) os testes de laboratório para determinação direta da condutividade hidráulica podem ser executados de duas maneiras, são elas:

- Teste de carga constante: para solos de alta permeabilidade, como areias
- Teste de carga decrescentes: para solos de permeabilidade intermediária e baixa, como siltes e argilas.

As propriedades de fluxo da água foram investigadas pela primeira vez por H. Darcy em Dijon, França no ano de 1856. Darcy descobriu que com a aplicação de fluxo através de camadas de areia de várias espessuras e sob várias pressões, a taxa de fluxo (q) era sempre proporcional ao gradiente hidráulico (i), ou seja, à perda de carga hidráulica (ΔH) pelo comprimento da camada de areia (L). Este princípio, conhecido como lei de Darcy, é geralmente válido para o fluxo de água nos solos, exceto quando ocorre turbulência devido a altas velocidades (HEAD e EPPS, 2011). A Equação 2.1 expressa a lei de Darcy, onde A é área da seção transversal perpendicular ao fluxo.

$$q = k i A = k \frac{\Delta H}{L} A \quad \text{Equação 2.1}$$

Outra maneira de expressar a Lei de Darcy, pode ser observada na Equação 2.2, onde: K é a permeabilidade intrínseca do solo, γ é o peso específico do líquido permeante e μ é a viscosidade do líquido permeante.

$$q = K \frac{\gamma}{\mu} \frac{\Delta H}{L} A \quad \text{Equação 2.2}$$

A permeabilidade intrínseca do solo é a permeabilidade dada em função apenas das propriedades do material poroso, independente da natureza do fluido permeante. A Equação 2.3 apresenta o cálculo da permeabilidade intrínseca. Em que, η representa a viscosidade dinâmica, ρ a massa específica do fluido e g a gravidade.

$$K = \frac{k \eta_w}{\rho_w g} \quad \text{Equação 2.3}$$

2.2. MELHORAMENTO DE SOLOS

O solo é um dos principais materiais utilizados em obras de engenharia civil, uma vez que é encontrado em todos os empreendimentos, no entanto, ele frequentemente não atende as exigências de projeto. Ingles e Metcalf (1972) afirmam que há três alternativas distintas quando isso ocorre, são elas:

- Substituição do material inadequado por outro mais resistente;
- Aceitar o solo natural e adaptar o projeto as características do material;
- Modificar e melhorar as propriedades do solo.

Consoli, Foppa *et al.* (2007) expressam que, usualmente, não é viável economicamente realizar a substituição do material inadequado ou adaptar o projeto as características do material, eles citam, por exemplo, a impossibilidade de substituição por um material granular mais resistente quando o local de empréstimo é longe e a utilização de fundações profundas (com custos incompatíveis ao orçamento do empreendimento) quando o solo possui baixa capacidade de carga.

Isto posto, Basha, Hashim *et al.* (2005) apontam a estabilização de solos como uma alternativa com melhor custo-benefício para melhorar as propriedades do solo natural. Ainda segundo os

autores, em consequência da heterogeneidade do solo, as técnicas utilizadas são diversas, as mais comuns são: estabilização química, mecânica e térmica.

Ingles e Metcalf (1972) salientam que a escolha da técnica a ser usada deve atentar para as propriedades as quais se deseja melhorar, dentre as propriedades mais relevantes de projeto cita-se: a resistência, a rigidez, a permeabilidade e a durabilidade.

Os métodos de estabilização térmica e mecânica buscam melhorar o solo (sem a adição de outros materiais) pela redução da porosidade, a estabilização mecânica com compactação por pressão, vibração ou impacto e a estabilização térmica pelo aumento ou diminuição da temperatura, por reações de hidratação através de processos de evaporação e de adsorção e por indução de calor ou eletricidade no solo (KIRSCH e BELL, 2013).

A estabilização química, ao contrária das estabilizações térmica e mecânica, consiste na adição de materiais distintos (*e.g.* solos naturais, cimento Portland, cal, pozalanas, fibras, substâncias químicas, derivados de petróleo) ao solo natural (HOSSAIN, 2010; INGLES e METCALF, 1972).

Termos como solo melhorado, solo modificado e solo tratado seguidamente são encontrados na literatura conforme o nível de alterações que a adição gera ao solo, todavia, os processos são basicamente os mesmos e consistem na alteração das propriedades do solo por meio da adição de materiais que geram reações físico-químicas entre o agregado e o material adicionado.

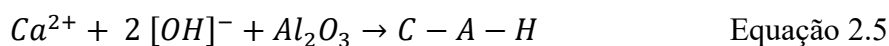
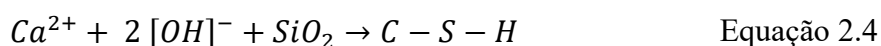
2.2.1. Reações Pozolânicas

Saldanha, Reddy e Consoli (2019) discorrem sobre o problema que é a geração de resíduos industriais, no entanto, segundo eles alguns desses resíduos industriais possuem pozolanicidade e podem ser reutilizados pois, usualmente, apresentam características físico-químicas favoráveis a muitas aplicações de engenharia civil.

Essas pozolanas são, basicamente, materiais inorgânicos sílico-aluminosos (mineraiis) capazes de provocar alterações físicas e químicas melhorando o desempenho de solos-cal, além de proporcionar benefícios econômicos e ambientais. Ademais, podem ser divididas em dois grupos: naturais, de origem vulcânica ou sedimentar, e artificiais, provenientes de processos industriais, tratamentos térmicos ou queimas para geração de energia. Tanto as pozolanas naturais quanto as artificiais apresentam capacidade de reagir com o óxido ou hidróxido de cálcio hidratado,

gerando compostos estáveis de propriedades cimentícias (CORDEIRO, TOLEDO FILHO, *et al.*, 2008).

Isso ocorre devido a facilidade que possuem de se solubilizar em meio alcalino e reagir com os ions de Ca^{2+} para formar silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), demonstrado na Equação 2.4, e aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H), apresentado na Equação 2.5 (MASSAZA, 2004).



Onde: C = CaO (óxido de cálcio), S = SiO₂ (Sílica), A = Al₂O₃ (Alumina) e H = H₂O (molécula de água).

Mateos (1961) salienta que outros compostos além dos supracitados podem ser formados, visto que substâncias diferentes dos silicatos e aluminatos podem estar presentes na pozolona como ferro, álcalis, entre outros.

A pozalinidade, capacidade de reagir em meio alcalino, desses materiais pode ser determinada por métodos indiretos, NBR 5751 (ABNT, 2015), e diretos, ensaio Chappelle modificado (ABNT, 2010). Pelo método indireto a pozolanidade é obtida pela razão da resistência a compressão simples (RCS) dos corpos de prova moldados com areia, pozalana e hidróxido de cálcio pelo índice de atividade pozolânica (IAP). Ao passo que o método direto de Chappelle é mais criterioso e realizado apenas por centros especializados em virtude da necessidade de equipamentos específicos.

2.2.2. Solo-cimento

Como descrito na NBR 12253 (ABNT, 2012), os solos-cimentos são produtos endurecidos provenientes da cura de misturas compactadas de solo, cimento e água. Fatores como a densidade e resistência das ligações entre as partículas, natureza e quantidade do agente

cimentante, tensão de confinamento, distribuição granulométrica e forma dos grãos são relevantes para estudo do comportamento dos solos-cimentados (CLOUGH, 1981).

Os cimentos são produzidos a partir de misturas de clínquer (obtido a partir da calcinação de calcário, argila e de substâncias como silício, alumínio e ferro que elevadas a altas temperaturas endurecem).

Diversos estudos vêm analisando o efeito da cimentação na Resistência a Compressão Simples (CONSOLI, FERREIRA, *et al.*, 2017; VIANA DA FONSECA, CRUZ e CONSOLI, 2009), nos parâmetros coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ') (CONSOLI, FONSECA, *et al.*, 2009; CONSOLI, FOPPA, *et al.*, 2007), na durabilidade (CONSOLI, NIERWINSKI, *et al.*, 2018a), na rigidez (CONSOLI, SAMANIEGO, *et al.*, 2018b) e na resistência a tração por compressão diametral (CONSOLI, 2014; FESTUGATO, SILVA, *et al.*, 2018).

Segundo Ingles e Metcalf (1972) o cimento pode ser utilizado para estabilizar diversos tipos de solos, desde materiais argilosos a materiais granulares. As reações do cimento independem do tipo de minerais do solo e são originadas pelo contato do cimento com o ar e/ou a água (processo de hidratação) (SHERWOOD, 1993). Na Figura 2.4 pode-se observar o processo de hidratação do cimento descrito por Mindess e Young (1981).

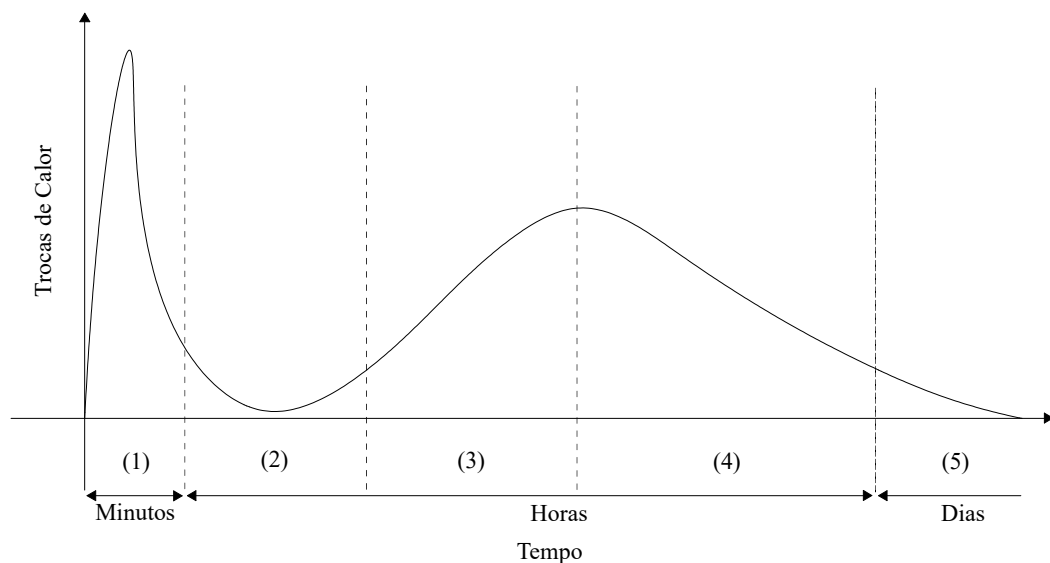


Figura 2.4: Etapas de hidratação do cimento tempo (adaptado de Mindess e Young, 1981).

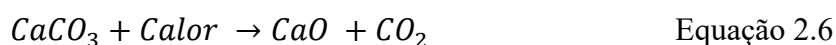
A primeira etapa representa as reações de hidratação e dissolução do cimento com a adição da água, nessa fase ocorre a liberação de íons de Ca^{2+} , Al^{+3} , SiO^- , então segue-se para a segunda etapa, a de indução, onde inicia-se a produção de compostos hidratados (C-S-H) e o endurecimento. Na terceira etapa há a aceleração das reações, que acarretam o aumento da resistência e crescimento dos produtos de hidratação.

Por fim, na quarta etapa dá-se a desaceleração do crescimento da hidratação e início do desenvolvimento da microestrutura que, na quinta etapa, é densificada, nesta etapa também há a geração dos compostos definitivos da hidratação, esse processo pode avançar por anos.

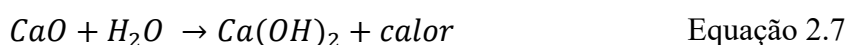
Os solos arenosos são os mais indicados para a estabilização com cimento. Além disso, o solo precisa ter um teor mínimo de 20% de finos em consequência da resistência inicial do solo-cimento se dar pela fração fina do material e por propiciar uma melhor compactação (ISAIA, 2007).

2.2.3. Solo-cal

A cal viva, também chamada de óxido de cálcio e cal virgem, é um dos aglomerantes mais antigo, bastante conhecida pela sua utilização em argamassas e, mais recentemente, pela sua aplicação em solos, é obtida pela calcinação de rochas sedimentares calcárias compostas por minerais de carbonato de cálcio (CaCO_3), conforme representado na Equação 2.6 (INGLES e METCALF, 1972).



No entanto, a cal viva não é a geralmente a principal escolha para o melhoramento de solos, assim, a cal aplicada em melhoramentos é adquirida pela hidratação do óxido de cálcio, reação expressa na Equação 2.7, denominada cal hidratada [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] (BAUER, 1987).



O solo-cal é resultante da mistura de solo, cal e água. O emprego da cal se dá em solos que tenham suficiente fração de argila ou pela sua utilização concomitantemente a de pozolanas (CONSOLI, DALLA ROSA e SALDANHA, 2011; CONSOLI, FESTUGATO, *et al.*, 2020; CONSOLI, LOPES JUNIOR, *et al.*, 2009; CONSOLI, PRIETTO, *et al.*, 2001).

A adição de cal ao solo com água, propicia a liberação de Ca^{2+} iniciando um processo de troca catiônica, que é a substituição dos cátions de Ca^{2+} , K^+ , Na^+ e Mg^{2+} encontrados nas partículas de solo pelos cátions de Ca^{2+} da cal. Essa troca catiônica favorece a adsorção dos cátions da cal ao solo e resulta na formação de agregados de maior dimensão (processo de floculação) (HERRIN e MITCHELL, 1961).

Ainda, Mateos (1961) aponta que quando a cal é adicionada ao solo, após a floculação, parte dos íons Ca^{2+} reagem com o dióxido de carbono (CO_2) presente nos vazios do material e parte com a sílica e alumina disponíveis do próprio solo ou de pozolanas adicionadas, formando os compostos cimentantes (a partir das reações pozolânicas) C-S-H e C-A-H, conforme expresso nas Equação 2.4 e Equação 2.5 no Item 2.2.1.

2.3. VARIÁVEIS DETERMINANTES NO COMPORTAMENTO DE SOLOS MELHORADOS

O comportamento mecânico de solos estabilizados pode ser apresentado por uma série de fatores como: resistência a compressão simples, resistência a tração por compressão diametral, pela rigidez inicial, pela durabilidade, entre outros. Esses fatores são controlados por diferentes condições como: quantidade de ligante, porosidade da amostra, tempo de cura, entre outras coisas.

2.3.1. Efeito do ligante

A adição de pequenas quantidades de cal e pozolanas ao solo já proporciona melhoras no índice de plasticidade que tende a reduzir devido ao aumento do limite de plasticidade e diminuição do limite de liquidez, melhorando a trabalhabilidade do solo e ampliando o limite de contração (HERRIN e MITCHELL, 1961).

A longo prazo, partindo do pressuposto que a quantidade de cal e cinza adicionadas foi suficiente para geração das reações pozolânicas, o solo-cal-pozolana (solo-ligante) obtém aumentos de resistência, rigidez e durabilidade, assim como redução da permeabilidade para

solos granulares e aumento para solos argilosos (CAPUTO, CAPUTO e RODRIGUES, 2015; INGLES e METCALF, 1972).

Consoli, Prietto *et al.* (2001) em pesquisa realizada com solo-cal-cinza apontaram que a cal melhora significativamente as propriedades de resistência e rigidez do solo, mas que a utilização da pozolana melhora ainda mais o comportamento do material, dada a maior quantidade de reações pozolánicas em um menor período.

Isso ficou evidente também em estudo realizado por Consoli, Dalla Rosa e Saldanha (2011) para misturas de solo-cal-pozolana onde com o aumento da quantidade de material pozolánico aumentou a resistência (Figura 2.5). Esse crescimento da resistência deu-se devido a maior formação de produtos provenientes das reações pozolánicas, que foram intensificadas em função da maior quantidade de sílica e alumina disponíveis no meio para reagir com a cal.

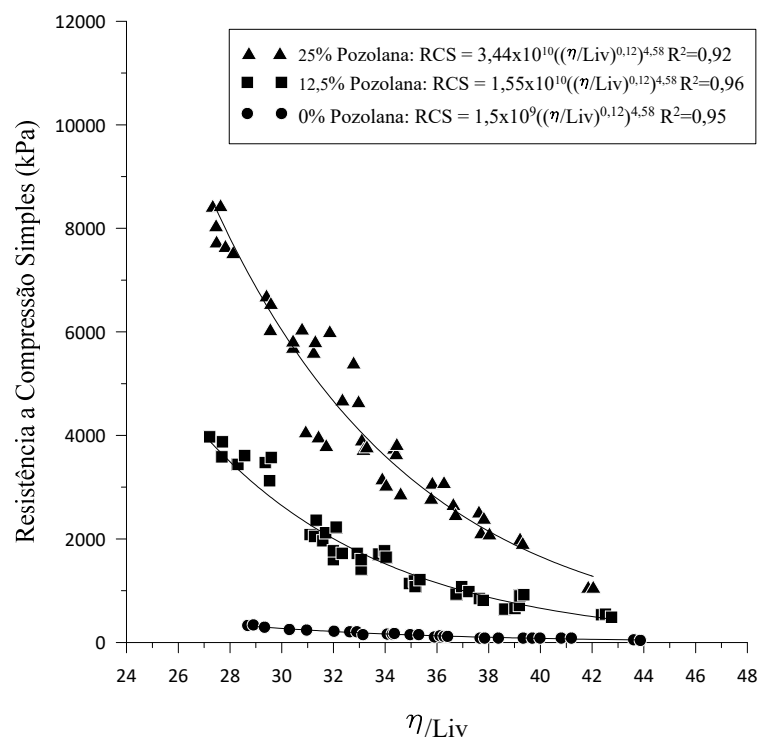


Figura 2.5: Variação da resistência a compressão simples com o aumento da quantidade de pozolana (adaptado de Consoli, Dalla Rosa e Saldanha, 2011).

2.3.2. Efeito do teor de cimento

Adições de até 2% de cimento ao solo geram pequenas alterações, enquanto quantidades superiores incidem em grandes modificações. Com a adição de pequenas quantidades de cimento o que se observa é o aumento do tamanho das partículas, a redução da capacidade de retenção de água e a redução no índice de plasticidade, enquanto, incrementos maiores levam ao crescimento da capacidade de carga e da durabilidade, assim como a redução da tendência à expansão de solos argilosos (INGLES e METCALF, 1972).

Em geral, os efeitos do cimento são os mesmo ocasionados por adições de cal-pozolana (Item 2.3.1), visto que as reações do cimento com o solo (Item 2.2.2) geram compostos semelhantes aos ocasionados pelo acréscimo de ligante (Item 2.2.3).

2.3.3. Efeito da porosidade

A redução do número de vazios (porosidade) proporciona o aumento do contato entre os grãos de solo, gerando um maior intertravamento. Com essa redução da porosidade, a resistência dos solos aumenta e a permeabilidade reduz até um valor mínimo e depois passa a ampliar novamente (INGLES e METCALF, 1972).

Ainda, Felt (1955) constatou, após diversos ensaios em areias, argilas e siltes, que a redução da porosidade é benéfica também para a redução da perda de massa em ensaios de durabilidade, em particular para solos siltosos e argilosos.

De modo geral, com a redução da porosidade, ou melhor, aumento do peso específico aparente seco da mistura, há aumento da resistência a compressão simples, como demonstrado na Figura 2.6 e na Figura 2.7.

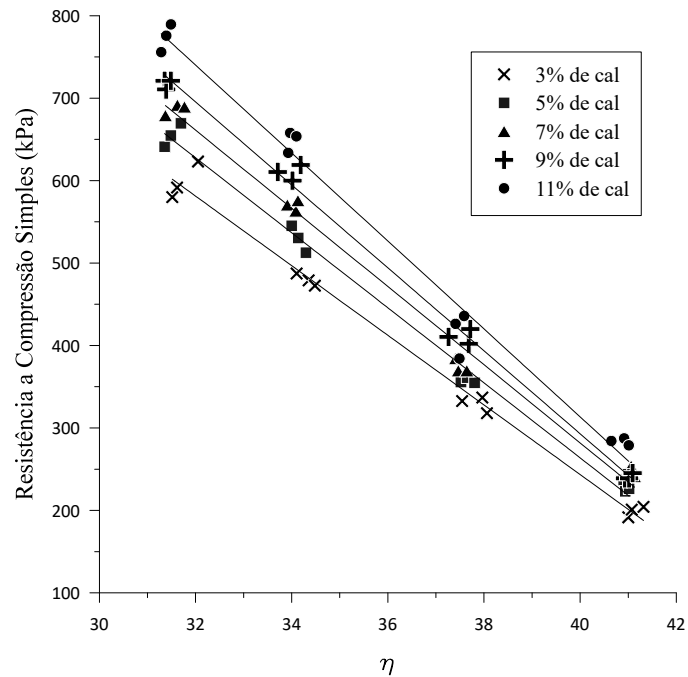


Figura 2.6: Variação da resistência a compressão simples em função da porosidade – solo-cal (adaptado de Consoli, Lopes Jr. et al. 2009).

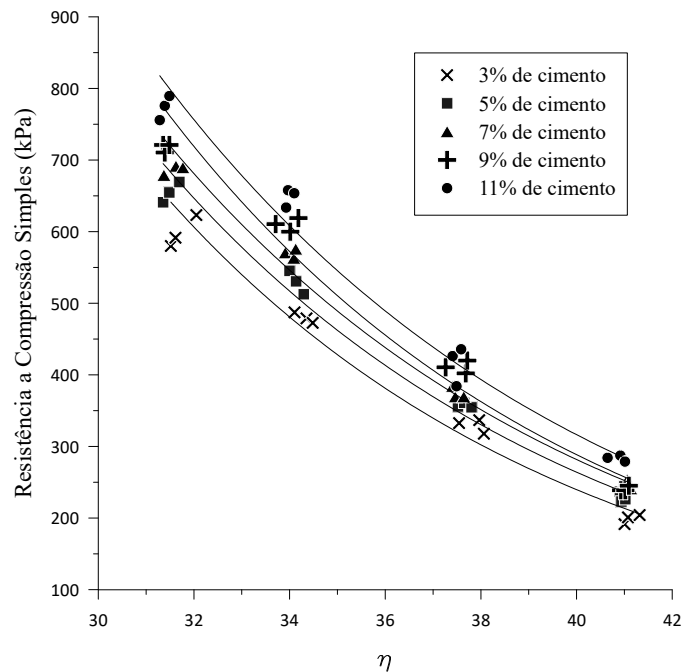


Figura 2.7: Variação da resistência a compressão simples em função da porosidade – solo-cimento (adaptado de Consoli, Lopes Jr. et al. 2009).

A variação da resistência a compressão simples das misturas solo-cal é linear com a redução da porosidade, enquanto, para os solos-cimentos é exponencial. Além disso, é evidente que as misturas solo-cimento apresentam grande aumento de resistência com o aumento do peso

específico aparente seco, em contrapartida, o aumento da resistência dos solos-cal com o aumento do peso específico não foi tão pronunciado. Isso indica que a redução da porosidade é mais eficaz em misturas de solo-cimento do que em misturas solo-cal (CONSOLI, LOPES JUNIOR, *et al.*, 2009).

Horpibulsuk, Rachan *et al.* (2010) analisaram o comportamento de uma argila siltosa de alta plasticidade (índice de plasticidade igual a 47%) com diferentes teores de cimento, para dois pesos específicos aparente secos (Figura 2.8). Esses pesos específicos foram obtidos pelo ensaio de compactação a energia normal e a energia modificada, a partir do ensaio foi determinado também as umidades ótimas de cada curva, a qual moldou-se os corpos de prova.

Como o estudo foi possível concluir que o peso específico aparente seco, assim como a energia de compactação, são importantes no desenvolvimento da resistência, ou seja, quanto menor a porosidade, maior a resistência.

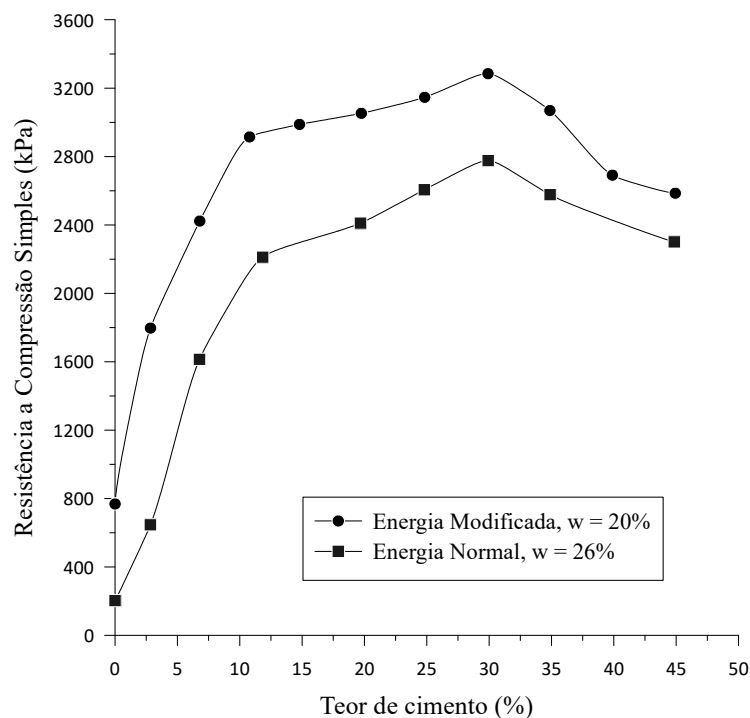


Figura 2.8: Resistência a compressão simples de um solo melhorado com cimento para diferentes γ_d (adaptado de Horpibulsuk, Rachan, *et al.*, 2010).

2.3.4. Efeito do tempo de cura

Solos melhorados quimicamente, são afetados diretamente pelo tempo de cura das misturas, posto que esse fator influencia extremamente nas reações pozolanicas. Reações essas que

controlam o grau de cimentação das misturas, alterando as propriedades mecânicas e hidráulicas do material cimentado (MATEOS, 1961).

Ingles e Metcalf (1972) em estudo realizado em diferentes tipos de solo, analisou a influência do tempo de cura na variação de resistência a compressão simples de misturas com cal, expresso na Figura 2.9, e observou ganhos de resistência para todos os solos estudados, mas principalmente para pedregulhos arenosos.

Consoli, Dalla Rosa e Saldanha (2011) ao analisarem uma areia siltosa melhorada com cal e cinza volante observaram ganhos de resistência significativos até 90 dias de cura, como apresentado na Figura 2.10. Ao passo que Consoli, Samaniego e Villalba (2016) ao melhorarem uma argila dispersiva com cal hidratada obtiveram resultados já com 7 dias de cura e considerável aumento para 28 e 60 dias.

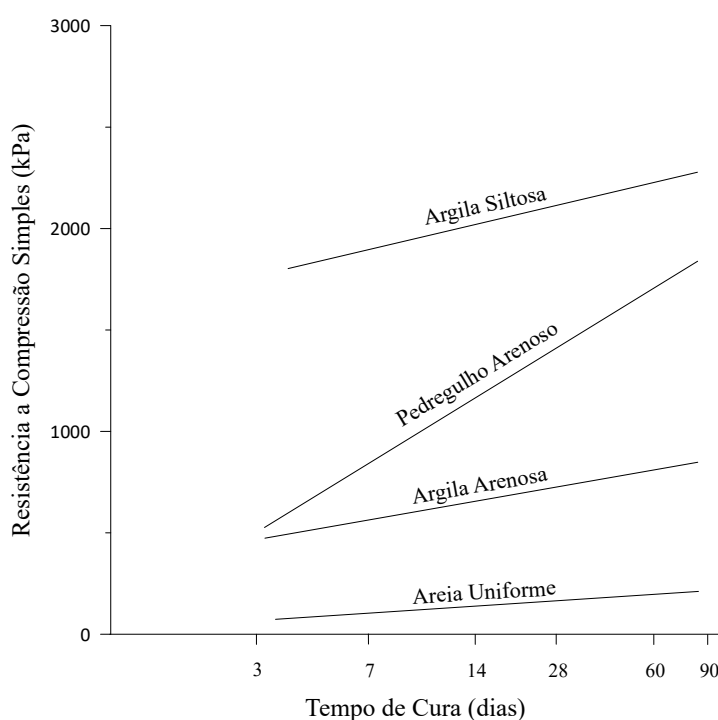


Figura 2.9: Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal (adaptado de Ingles e Metcalf, 1972).

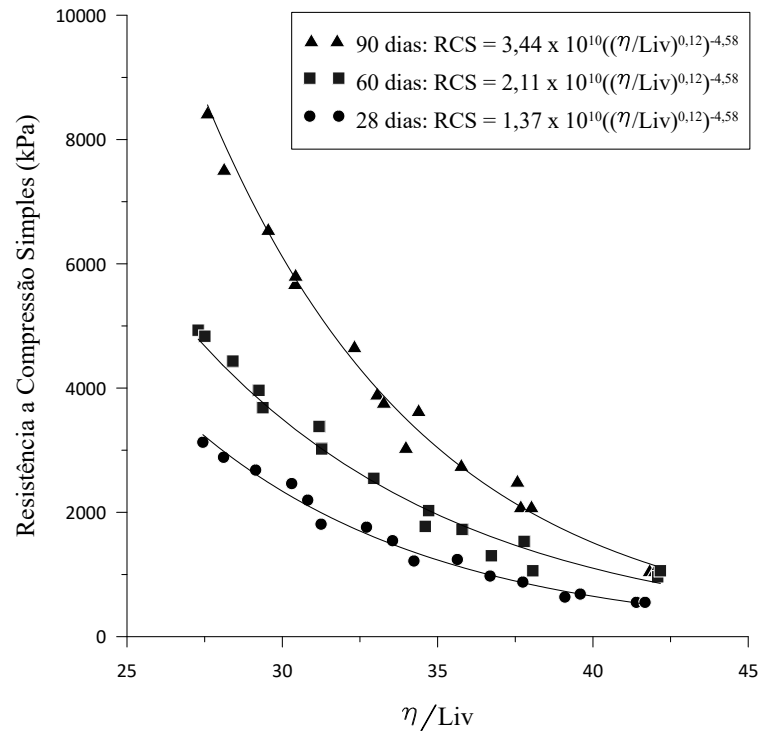


Figura 2.10: Variação da resistência para diferentes tempos de cura (adaptado de Consoli, Dalla Rosa e Saldanha, 2011).

Segundo Massaza (2004) tempos maiores de cura propiciam a formação de C-S-H e C-A-H, em virtude da natureza das reações pozolânicas que, frequentemente, ocorrem de maneira lenta. A velocidade dessas reações depende da disponibilidade de hidróxido de cálcio livre, sílica e alumina, como também das condições do meio para o processo de hidratação, assim enquanto houver disponibilidade dessas substâncias no sistema continuará aumentando a resistência.

2.3.5. Efeito da relação entre porosidade e o teor volumétrico de ligante

A compactação do solo-cimento, solo-cal ou solo-ligante não promove a expulsão completa de ar do sistema pelo preenchimento dos vazios existentes com água como ocorre com argamassas e concretos tradicionais. Por esse motivo a resistência dos solos melhorados não pode ser correlacionada ao fator água/cimento (LARNACH, 1960).

Os solos melhorados quimicamente apresentam comportamento complexo, afetado por muitos fatores (*e.g.* quantidade de cimento, porosidade, teor de umidade), assim, diversos estudos foram desenvolvidos a fim de estabelecer uma relação para os solo-cimento que estabelecesse a quantidade mínima de cimento para atender às propriedades pretendidas em termos de resistência e durabilidade (CLOUGH, 1981).

Em sua pesquisa, Lanarch (1960) analisou a resistência de uma areia fina misturada com uma argila e melhorada com cimento (5,3%, 11,1% e 17,7%) por ensaios de compressão simples e flexão de vigotas. Nesse estudo, o autor propôs a utilização de uma relação, Equação 2.8, para dosagem e controle de execução das misturas em campo.

$$\frac{V_v}{V_{ci}} = \frac{\text{Volume de vazios (ar+água)}}{\text{Volume de cimento}} \quad \text{Equação 2.8}$$

Na Figura 2.11 são apresentados os resultados obtidos pelo autor para amostras curadas a 7 dias e a diferentes pesos específicos aparente secos, auferidos das curvas de compactação do solo com os distintos teores de cimento da pesquisa. Observa-se pelo gráfico um bom ajuste dos resultados para a relação volume de vazios/volume de cimento.

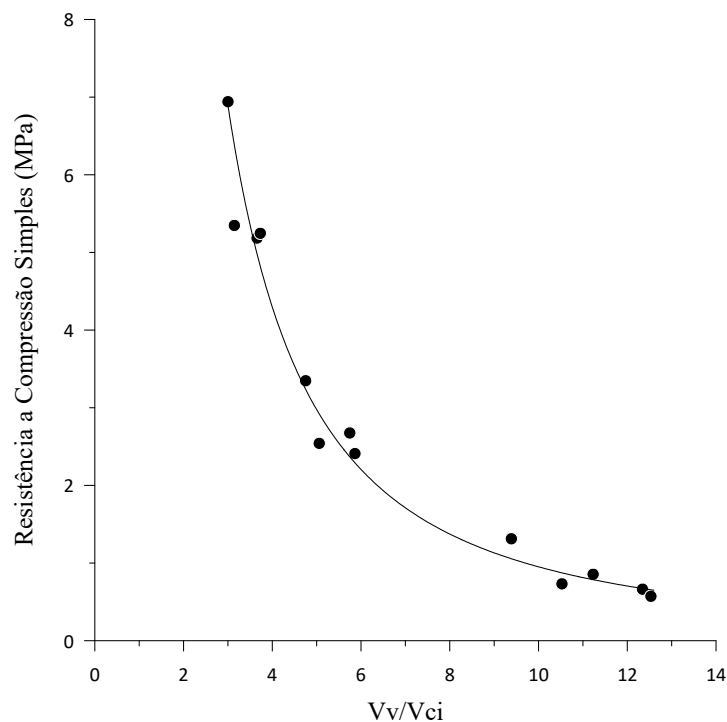


Figura 2.11: Relação vazios/cimento *versus* resistência a compressão simples (adaptado de Lanarch, 1960).

Posteriormente, Consoli, Foppa *et al.* (2007) investigaram o comportamento de misturas solo-cimento, a fim de quantificar a influência da quantidade de cimento, do teor de umidade e da porosidade na resistência de uma areia argilosa cimentada artificialmente. Neste estudo também, os autores avaliaram a possibilidade de utilização de uma relação água/cimento e de uma relação vazios/cimento para mensurar a resistência a compressão simples.

A partir da relação sugerida por Lanarch e dos resultados do seu estudo, Consoli, Foppa *et al.* (2007) propuseram um método de dosagem, semelhante ao fator água/cimento para concretos, o índice porosidade/teor volumétrico do cimento (η/C_{iv}), que relaciona os vazios da amostra (η) ao o teor volumétrico de cimento (C_{iv}), expresso na Equação 2.9, possibilitando a previsão do comportamento mecânico de solo-cimento.

$$\frac{V_v}{V_{ci}} = \frac{V_v/V_t}{V_{ci}/V_t} = \frac{\eta}{C_{iv}} \quad \text{Equação 2.9}$$

Na Figura 2.12 são expostos os resultados de resistência a compressão simples obtidos no estudo supramencionado, por um expoente de 0,28, utilizado para um melhor ajuste dos resultados, verificado pelo coeficiente de determinação (R^2). Esse ajuste se dá em função do tipo de solo e dos materiais usados no melhoramento, para uma areia silto-argilosa, Consoli, Dalla Rosa e Saldanha (2011) encontraram um expoente de 0,12.

Consoli, Viana da Fonseca *et al.* (2011), ao pesquisarem a resposta mecânica de três solos distintos (Areia de Osório, Areia argilosa Botucatu e Areia Siltosa do Porto) melhorados, encontraram 2 expoentes diferentes para o η/C_{iv} . Para a Areia de Osório não foi necessário o uso de um expoente, para a Areia argilosa o melhor R^2 deu-se pelo expoente 0,28 já mencionado e, para a areia siltosa, definiu-se o ajuste de 0,21.

De modo geral, pode-se dizer que se a influência da porosidade for maior que a do teor de cimento sobre a resistência o valor do expoente é inferior a 1, do contrário o expoente é superior a 1. Além disso, se o efeito da porosidade e do teor de cimento foram semelhantes, o expoente é igual a 1.

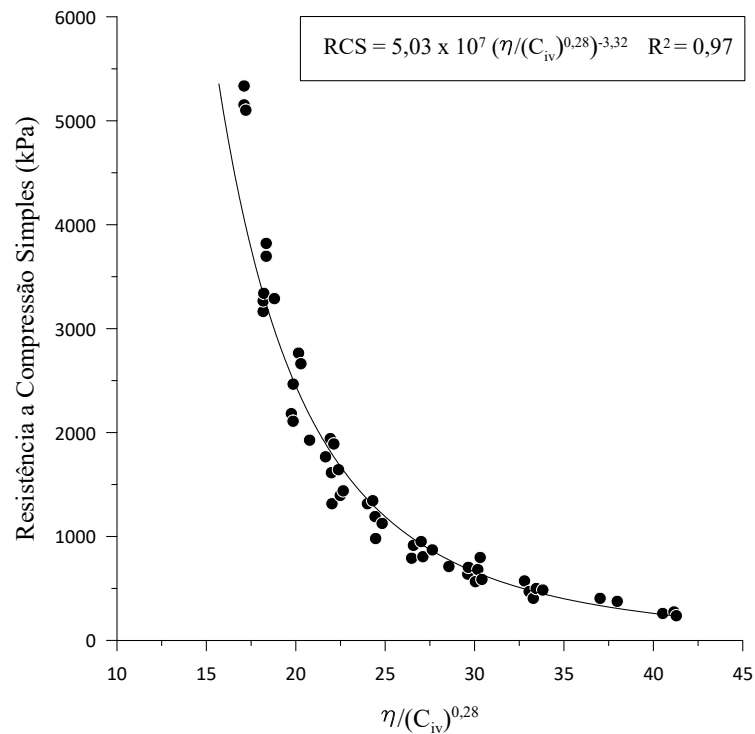


Figura 2.12: Relação vazios/cimento expresso em termos de porosidade e teor volumétrico de cimento (adaptado de Consoli, Foppa *et al.*, 2007).

O índice porosidade/teor volumétrico é um fator importante a ser considerado para a previsão da resistência de solo-cimentados quando ajustado para o tipo de solo estudado, podendo ser utilizado como metodologia de dosagem (CONSOLI, FOPPA, *et al.*, 2007; CONSOLI, VIANA DA FONSECA, *et al.*, 2011).

Isso também foi constatado quando verificado a influência do índice para um solo estabilizado com cal. Na Figura 2.13 os resultados de compressão simples obtidos por Lopes Junior (2007) para amostras tratadas com cal curadas por 28 dias.

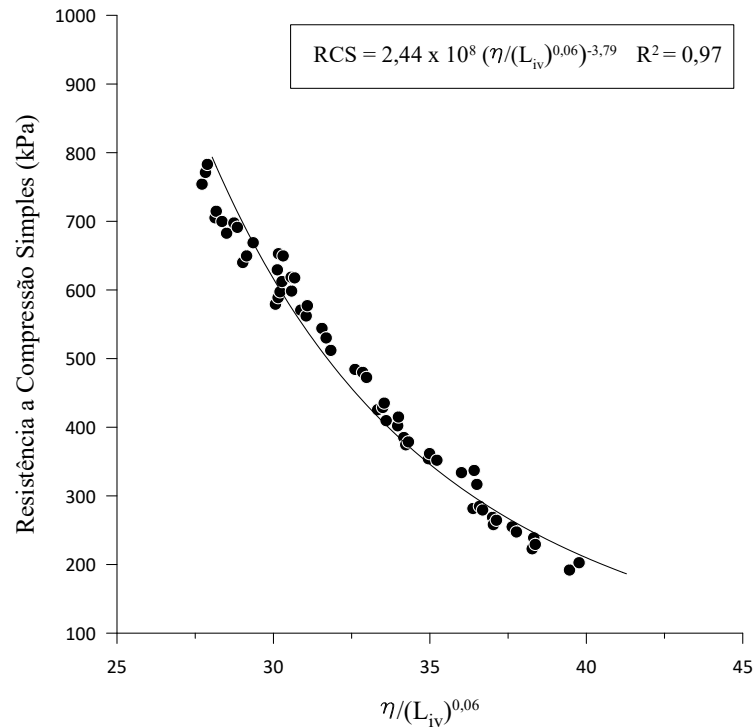


Figura 2.13: Relação vazios/cal expresso em termos de porosidade e teor volumétrico de cimento (adaptado de Lopes Junior, 2007).

Posteriori, Consoli, Winter *et al.* (2018) apresentaram o índice η/B_{iv} , que relaciona os efeitos da porosidade com a combinação do teor volumétrico de cal e do teor volumétrico de pozolana ajustados por um expoente (k) no comportamento mecânico de solos melhorados com ligantes alternativos de modo muito semelhante ao η/C_{iv} .

Na Equação 2.10 é apresentada a porosidade em virtude do peso específico aparente seco, da massa de solo (S), da quantidade de pozolana (P) e da fração de cal (C), sendo que cada material tem seu peso específico natural (γ_{SS} , γ_{SC} e γ_{SP}) considerado também enquanto que na Equação 2.11 é expresso o teor volumétrico de ligante.

$$\eta = 100 - 100 \left\{ \left[\frac{\gamma_d}{\frac{S}{100} + \frac{P}{100} + \frac{C}{100}} \right] \left[\frac{S}{\gamma_{SS}} + \frac{P}{\gamma_{SP}} + \frac{C}{\gamma_{SC}} \right] \right\} \quad \text{Equação 2.10}$$

$$B_{iv} = \frac{V_P + V_C}{V} = \frac{\frac{m_P}{\gamma_{SP}} + \frac{m_C}{\gamma_{SC}}}{V} \quad \text{Equação 2.11}$$

Onde “V_P” e “V_C” representam, respectivamente, o volume de pozolana e cal na amostra e “m_P” e “m_C”, respectivamente, a massa de pozolana e a massa de cal. Por fim, dá-se o ajuste do índice porosidade/teor volumétrico de ligante em função de um expoente (η/B_{iv}^k).

Isto posto, outras pesquisas mostraram que além da efetividade da relação porosidade/teor volumétrico de agente cimentante na compressão simples há também eficácia nos parâmetros coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ') (CONSOLI, FONSECA, *et al.*, 2009; CONSOLI, FOPPA, *et al.*, 2007), na durabilidade (CONSOLI, NIERWINSKI, *et al.*, 2018a; CONSOLI, MARIN, *et al.*, 2019), na rigidez (CONSOLI, SAMANIEGO, *et al.*, 2018b), na resistência a tração por compressão diametral (CONSOLI, 2014; FESTUGATO, SILVA, *et al.*, 2018; CONSOLI, VIANA DA FONSECA, *et al.*, 2011) e no emprego em campo em camadas de pavimento (CONSOLI, MARIN, *et al.*, 2020).

2.4. ÁLCALI ATIVAÇÃO

Há alguns anos já é reconhecido a necessidade de minimizar as emissões de dióxido de carbono (CO₂) geradas pela produção de Cimento Portland, assim como a premência em melhorar a durabilidade dos agentes cimentantes. Desse modo, os ligantes álcali-ativados revelam-se como uma alternativa potencial ao Cimento Portland (AL-SWAIDANI, HAMMOUD e MEZIAB, 2016; PACHECO-TORGAL, CASTRO-GOMES e JALALI, 2008).

Segundo Provis, Duxson e van Deventer (2010) os ligantes álcali-ativados são formados basicamente por uma solução alcalina de silicatos ou hidróxidos de metais alcalinos, ainda que se utilize também carbonatos, com um material sólido composto por silicatos e aluminatos. Mais, de acordo com Duxson *et al.* (2007) esses materiais podem proporcionar desempenho semelhante ao do Cimento Portland.

Um dos primeiros registros acerca de ligantes álcali-ativados foi a patente do químico alemão Kühl (1908) que apresentava o processo de ativação de escórias de alto-forno com cal e sulfato de sódio (Na₂SO₄) ou carbonato de sódio (Na₂CO₃). Posteriormente, em 1940 na Bélgica,

Purdon publicou um detalhado estudo da interação de escórias com diferentes ativadores alcalinos, sem a necessidade de clínquer (PROVIS e BERNAL, 2014).

Ainda, o primeiro a pesquisar e analisar os ligantes utilizados nas antigas construções romanas e egípcias foi Glukhovsky, em 1959, que concluiu que eles eram compostos formados de aluminossilicatos de cálcio hidratados semelhantes ao cimento Portland e a fase cristalina da Analcite, uma rocha natural (SHI, ROY e KRIVENKO, 2003).

Baseado nessas investigações, Glukhovsky desenvolveu um cimento alternativo rico em cálcio e álcalis em conjunto com fontes de aluminossilicatos que nomeou de “solo-cimento”, solo por se parecer a uma rocha moída e cimento devido à sua capacidade cimentícia e, em 1965, publicou pela primeira vez com a denominação de “cimentos alcalinos” (ROY, 1999; SHI, ROY e KRIVENKO, 2003).

Em 1979, as pesquisas acerca de ligantes álcali-ativados foram expandidas com a introdução ao termo “geopolímero”, pelo engenheiro francês Davidovits, para uma classe específica de aglutinantes resistentes ao fogo sintetizados pela reação de aluminossilicatos e uma solução alcalina (DAVIDOVITS, 1991; PROVIS e VAN DEVENTER, 2009). O nome geopolímero foi adotado uma vez que essas reações são conhecidas como polimerização.

Independentemente das características macroscópicas dos geopolímeros de diferentes fontes de aluminossilicatos parecerem similares, suas propriedades físicas, mecânicas, químicas e térmicas variam, em grande parte devido a matéria-prima da qual derivam (DUXSON, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, *et al.*, 2007).

De mais a mais, os autores declaram que embora os geopolímeros provenientes de diferentes origens de aluminossilicatos apresentem propriedades distintas, é observado em suas microestruturas as mesmas ligações de silício e alumínio, além do mesmo gel ser encontrado em ambos os sistemas.

Ademais, os geopolímeros, assim elegidos devido a algumas similaridades com os polímeros, também são conhecidos como polímeros inorgânicos. E, após passarem por diversos testes, começaram a ser produzidos em escala industrial e comercializados com o nome de “Pyrament cements” nos Estados Unidos e “Geopolymite binders” na França (DAVIDOVITS, 1991).

No entanto, apesar de frequentemente confundidos, os polímeros inorgânicos são um subconjunto dos ligantes álcali-ativados, formados por uma rede de silicatos desordenada em sua fase de ligação primária que requer um maior grau de conectividade dos silicatos do que o verificado na estrutura química clássica do Cimento Portland, enquanto os geopolímeros são uma porção dos polímeros inorgânicos, formados quase puramente de aluminossilicatos, altamente ordenados em sua fase de ligação (VAN DEVENTER, PROVIS, *et al.*, 2010).

Na Figura 2.14 apresenta-se a classificação dos subgrupos dos materiais álcali-ativados apontada por van Deventer *et al.* (2010), os sombreamentos mais escuros correspondem as maiores quantidades de sódio e/ou potássio.

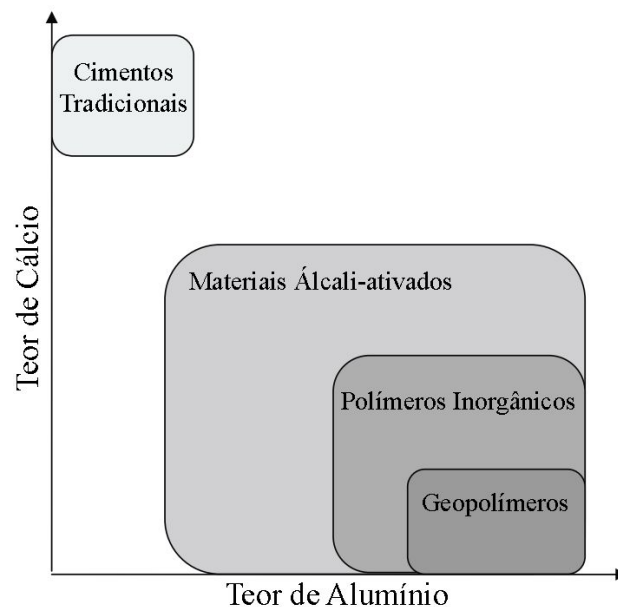


Figura 2.14: Classificação dos materiais álcali-ativados (adaptado de van Deventer, Duxson *et al.* 2010).

2.4.1. Ligantes Álcali-ativados

Em geral, os ligantes álcali-ativados são produtos constituídos por duas fases. A primeira, composta por aluminossilicatos em forma de pó, conhecidos como precursores (responsáveis pelas características do ligante). E, a segunda, formada por uma solução alcalina (aquosa a fim de garantir a homogeneidade da mistura) de elevado potencial hidrogênico (pH).

Palomo, Grutzeck e Blanco 1999 apontam que as duas principais características para caracterização dos sistemas álcali-ativados são: a composição dos precursores e a concentração

do ativador. Dividindo assim os ligantes álcali-ativados em dois grupos, o primeiro composto por sistemas com baixo teor de cálcio e altos teores de aluminossilicatos e o segundo com alto teor de cálcio e sílicatos, mas com menores quantidades de aluminatos.

Sendo os sistemas com baixo teor de cálcio ativados com soluções com maior concentração de ativador e os sistemas com alto teor de cálcio ativados com menor concentração de ativador. Na Figura 2.15 é apresentado esquematicamente a classificação química dos sistemas de cimentação proposta por Provis e van Deventer (2014).

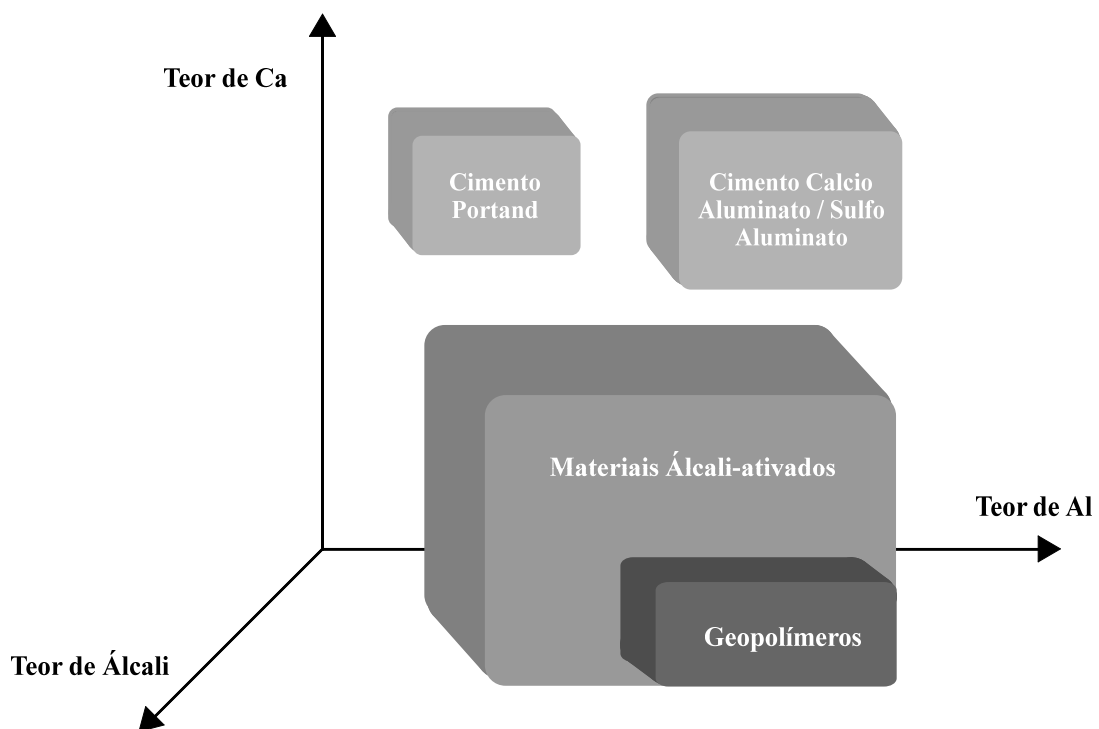


Figura 2.15: Representação dos sistemas álcali-ativados (adaptado de Provis e van Deventer, 2014).

2.4.2. Polimerização

Muitas são as incógnitas ainda sobre os mecanismos de formação dos sistemas álcali-ativados, no entanto, existem alguns modelos, dentre eles o modelo de Glukhosvky, principal modelo utilizado para explicar o processo de polimerização. Na Figura 2.16 é exposto o modelo de Glukhosvky, detalhado por Duxson, Ferández-Jiménez, *et al.* (2007). O processo é dividido basicamente em três etapas: destruição-coagulação, coagulação-condensação e condensação-cristalização.

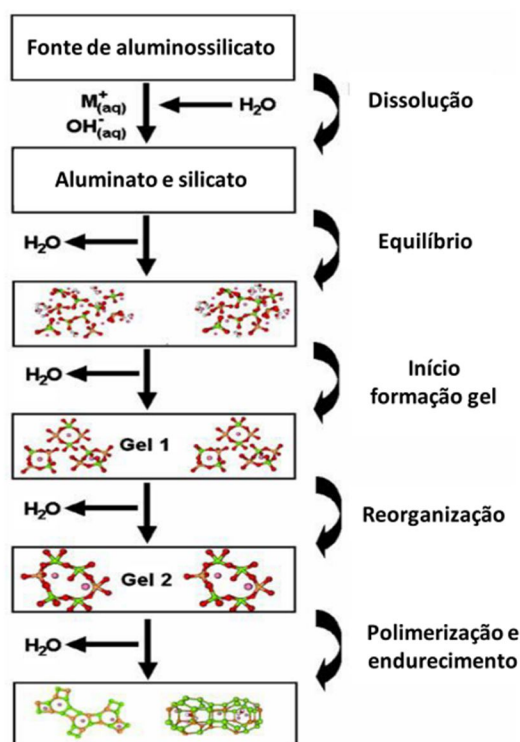


Figura 2.16: Modelo de polimerização proposto por Glukhosky (adaptado de Duxson, Fernández-Jiménez, *et al.* 2007).

A primeira etapa consiste na degradação das ligações (Ca-O, Si-O-Si, Al-O-Al e Al-O-Si) dos precursores. Esse processo varia conforme as características específicas do sólido e do grau de saturação da fase líquida, sendo que para essa dissolução ocorrer são necessários meios fortemente alcalinos, proporcionados pelo uso de soluções alcalinas simples ou combinadas (VAN JAARRVELD, VAN DEVENTER e LORENZEN, 1997).

Para que aconteça o equilíbrio do sistema, alguns fatores precisam ser considerados visto que esses proporcionaram a continuação do processo de polimerização. Assim, pode se mencionar fatores como: a concentração dos ativadores, a velocidade da mistura, o tamanho da partícula, a área superficial e a composição dos precursores, fontes de Al-Si. A dissolução e equilíbrio desses aluminossilicatos levará, posteriormente, a formação de géis (gelificação) (DUXSON, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, *et al.*, 2007).

A gelificação faz parte da etapa de coagulação-condensação e consiste na formação de uma estrutura condensada. Após essa fase, o sistema continua a se rearranjar e organizar favorecendo

cada vez mais as reações de condensação devido a expulsão da dos poros, formando uma rede tridimensional (DUXSON, PROVIS, *et al.*, 2005).

Ainda segundo os autores, o processo final de endurecimento e cristalização só vira a ocorrer quando dar-se a evaporação da água e a quantidade de gel ser pequena e ele estiver completamente condensado, de maneira que os poros se encontrem distribuídos e uniformes.

Os principais produtos gerados pelo mecanismo de polimerização são os géis C-A-S-H (silicato de cálcio modificado com alumínio) e N-A-S-H (aluminosilicato de sódio hidratado). O C-A-S-H possui uma estrutura cristalina desordenada, análoga ao gel gerado pela hidratação do cimento (C-S-H), enquanto o N-A-S-H possui estrutura amorfa ou semi-cristalina com maior alcalinidade e não possui cal (PUERTAS, PALACIOS, *et al.*, 2011; GARCIA-LODEIRO, PALOMO e FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

2.4.3. Precursores

Os precursores podem ser desde pozolanas, fontes de silício e alumínio a materiais ricos em CaO como as cinzas pesadas, as escórias de alto-forno e a cal. Os mais retratados na literatura são: a cinza volante, a escória de alto-forno e o metacaulim (REPETTE, 2010). O metacaulim apresenta maior facilidade de controle da razão Si/Al, mas possui elevado custo. Deste modo a cinza volante e a escória, assim como outras pozolanas, entram como uma alternativa mais econômica (HARDJITO e RANGAN, 2005). Outra possibilidade é a utilização de mais de um precursor concomitantemente, por exemplo, alguma cinza rica em sílica ou alumina, mas sem presença de CaO com um material rico em CaO ou alumina.

2.4.3.1. Cal de Carbureto

A cal de carbureto (CC) é um subproduto gerado durante a produção comercial de gás acetileno. Devido a sua composição química, principalmente, a quantidade de óxido de cálcio livre (Ca(OH)_2) em sua composição, a cal de carbureto pode ser empregada de maneira eficaz como subproduto em distintos setores. Sendo composta por, principalmente, hidróxido de cálcio e pequenas quantidades de carbonato de cálcio, dependendo da exposição ao ar (SALDANHA, SCHEUERMANN FILHO, *et al.*, 2018).

Por ano, no mundo todo, são descartadas 1.400.000 toneladas de cal de carbureto e, apenas no Brasil, são geradas 17.000 toneladas ao ano, a disposição desse material ocorre, geralmente, em

lagoas de decantação em forma de pasta. Os custos altos para tratamento e redução do pH, assim como a pouca aplicação desse material para usos comerciais, resultam na pouca reutilização da cal como subproduto (SALDANHA, SCHEUERMANN FILHO, *et al.*, 2018; KAMPALA e HORPIBULSUK, 2013).

De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia (MME, 2009), a indústria produtora da cal convencional está entre as indústrias mais poluidoras, em função do seu processo de produção. Estima-se que o processo todo (da extração ao transporte) gere cerca de 1,1 tonelada de CO₂ por tonelada de cal virgem fabricada.

Assim, a utilização da cal de carbureto em substituição a cal convencional entra como uma alternativa mais sustentável e, possivelmente, econômica, propiciando a redução de emissões de gás carbônico em virtude da não utilização da cal convencional e a redução de gastos com tratamento de resíduos ao possibilitar a utilização de um material que do contrário seria descartado em aterros.

2.4.3.2. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e seus derivados (açúcar e etanol), sua produção sendo de extrema importância para a economia brasileira (POGGIALI, BEZERRA, *et al.*, 2012). A estimativa é que sejam colhidos 628,1 milhões de toneladas de cana-de-açúcar no Brasil na safra de 2021/22 (CONAB, 2021).

Durante a extração do caldo de cana, 30% da cana moída vira bagaço. Ainda, cerca de 95% de todo bagaço gerado no Brasil são queimados em caldeiras para geração de vapor (FERNANDES, TASHIMA, *et al.*, 2015). Visto que a cinza de bagaço de cana-de-açúcar não possui valor comercial, um grande problema enfrentado atualmente pelas usinas é a disposição desse material.

Além disso, diversos estudos demonstram que a cinza é um subproduto viável para incorporação como material pozolânico na indústria da construção civil, sendo formada, geralmente, por teores maiores de 60% de sílica amorfa (CORDEIRO, TOLEDO FILHO, *et al.*, 2008). Portanto, a utilização da CBCA como precursor em sistemas álcali-ativados apresenta um alto potencial como uma pozolana, além de apresentar uma nova possibilidade de disposição e de redução dos custos inerentes ao processo de tratamento e descarte.

2.4.4. Ativadores

Os ativadores são compostos químicos utilizados para ativar os precursores, gerando compostos cimentantes. Podem ser hidróxidos de sódio, de cálcio ou potássio, silicatos de sódio ou potássio, carbonatos ou sulfatos (PROVIS e BERNAL, 2014). Os mais utilizados são os hidróxidos e silicatos (CRIADO, PALOMO e FERNANDEZ-JIMENEZ, 2005). De acordo com Lima e Thaumaturgo (2005), os silicatos proporcionam uma fonte adicional de sílica ao sistema, enquanto os hidróxidos asseguram alta alcalinidade as misturas.

Pinto (2004) aponta que os hidróxidos de sódio, de potássio ou de cálcio possuem a função de dissolver as matérias-primas garantindo as reações ao passo que os silicatos têm a finalidade de agir como ligante. De acordo com García-Lodeiro, Palomo e Fernández-Jiménez (2015) estes ativadores podem ser classificados em dois tipos: simples, constituídos de hidróxido (de Na^+ , Ca^{2+} e K^+) ou compostos, constituídos por hidróxidos e silicatos.

O uso de hidróxido de sódio é amplamente difundido para diversos tipos de precursores dado o seu baixo custo e ampla disponibilidade (PINTO, 2004). No entanto o excesso de ativador pode levar a carbonatação em contato com o ar (DUXSON, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, et al., 2007).

2.4.5. Fatores que influenciam na polimerização

A granulometria é um fator muito importante, se as partículas forem de dimensões maiores ao entrarem em contato com o ativador podem não reagir, visto que o processo de polimerização é relativamente rápido. Isso se dá porque a solução alcalina não consegue penetrar as partículas maiores e chegar as partículas menores devido ao endurecimento entre elas, levando a uma redução do crescimento da resistência (SANTA, BERNARDIN, *et al.*, 2013).

A temperatura e o tempo de cura também precisam ser observados na álcali-ativação. O aumento da temperatura acelera as reações, levando a maior polimerização e, conseqüentemente, aumento da resistência mecânica dos cimentos alcalinos (HUSEIEN, JAHANGIR, *et al.*, 2016). Criado, Palomo e Fernandez-Jimenez mencionam que a temperatura influencia também na durabilidade.

Do mesmo modo, o aumento do tempo de cura proporciona o crescimento dessas mesmas reações de polimerização entre os aluminossilicatos e, como resultado, levam ao aumento da

resistência (PINTO, 2004). Pinto menciona ainda que o tempo de cura de extrema importância para o transporte dos materiais cimentantes e para a formação da estrutura.

Ainda, de acordo com Lemougna, Wang, *et al.* (2016) diversos autores têm demonstrado que a presença de óxidos de cálcio a temperatura ambiente com outros ativadores alcalinos propicia aumento da resistência mecânica, enquanto outros relatam o contrário, afirmando que a cal diminui a resistência e afeta no tempo de cura dos cimentos alcalinos.

Komnitsas e Zaharaki (2007) menciona que a adição de cálcio pode favorecer o aumento da resistência desde que realizada em pequenas quantidades. Vagas, Dal Molin, *et al.* (2011) expõe que a utilização de grandes quantidades de cal ou a utilização de cal associada ao hidróxido como ativadores gera reações deletérias as estruturas dos materiais álcali-ativados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de contribuir para a ampliação do conhecimento de resíduos de mineração melhorados com ligantes álcali-ativados foi concebido um programa experimental que favorecesse a análise do comportamento mecânico e químico desse material estabilizado.

Assim, neste capítulo são apresentados os materiais da presente pesquisa e os métodos utilizados para caracterização deles, bem como os métodos definidos para análise do comportamento do rejeito estabilizado com o ligante proposto e com um cimento convencional, para fins de comparação.

1.3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste item são apresentados os fatores constantes e os fatores controláveis da pesquisa com seus níveis de estudo, assim como as variáveis resposta e os tratamentos realizados em cada etapa do desenvolvimento da pesquisa.

3.1.1 Projeto de Experimentos

Para avaliar o efeito das variáveis controláveis estabelecidas (Teor de Agente Cimentante, Peso Específico Aparente Seco e Tempo de cura) sobre as variáveis respostas estabelecidas (resistência a compressão simples, resistência a compressão por tração diametral, módulo cisalhante inicial, durabilidade e a avaliação do módulo cisalhante inicial ao longo de ciclos de durabilidade) foi desenvolvido dois experimentos fatoriais 2^k (onde k é o número de fatores controláveis).

O primeiro projeto de experimento, desenvolvido para os ensaios de resistência à compressão simples e módulo cisalhante inicial, foi criado com três fatores controláveis (A – Teor de Agente Cimentante, B – Peso Específico Aparente Seco e C – Tempo de cura) e dois níveis [Inferior (-1) e Superior (+1)], duas réplicas e 3 pontos centrais. Assim, o projeto final é composto por 9 tratamentos (2^3 + ponto central), conforme Tabela 3.1.

Para realização dos ensaios de tração por compressão diametral, de durabilidade e de módulo cisalhante inicial optou-se por um projeto de experimentos fatorial 2^2 com dois fatores e dois níveis, fixando o tempo de cura para estes ensaios por uma questão de economia de material, vide Tabela 3.2. Ainda, os ensaios de tração foram realizados com duplicatas.

Tabela 3.1: Experimento Fatorial Completo 2^3 ensaios de RCS e G₀

Tratamento	Ordem de Ensaio	Tempo de Cura	Peso Esp. Apa. Seco	Ligante
1	3, 11	-1	+1	-1
2	4, 12	-1	+1	+1
3	1, 9	-1	-1	-1
4	2, 10	-1	-1	+1
5	7, 15	+1	+1	-1
6	8, 16	+1	+1	+1
7	5, 13	+1	-1	-1
8	6, 14	+1	-1	+1
9	17, 18, 19	0	0	0

Tabela 3.2: Experimento Fatorial Completo 2^2 ensaios de tração por compressão diametral, de durabilidade, de rigidez ao longo dos ciclos.

Tratamento	Ordem de Ensaio	Peso Esp. Apa. Seco	Ligante
1	4, 6	+1	-1
2	1, 3	+1	+1
3	2, 8	-1	-1
4	5, 7	-1	+1

3.1.2. Etapas do programa experimental

O programa experimental foi dividido em 5 fases distintas:

- Fase 1: Ensaios de caracterização dos materiais da pesquisa: Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP), Análise Granulométrica (Peneiramento e Sedimentação), Massa Específica Real dos Grãos (ρ_S), Ensaio de Compactação e Análise Química (Espectrometria de Fluorescência de Raios-X e Difractometria de Raios-X).
- Fase 2: Ensaios de compressão simples de sistemas álcali-ativados (pastas) com diferentes molaridades e diferentes relações entre os precursores para fixação da relação cal-cinza e do teor ótimo de álcali. Ensaios de compressão simples com o rejeito melhorado com o ligante e com cimento Portland para determinação das relações rejeito-agente cimentante. E, por fim, ensaios de compactação das misturas com o ligante proposto para delimitação dos pesos específicos aparente secos da pesquisa e da umidade.
- Fase 3: Ensaios de Resistência a Compressão Simples, de Resistência a Tração por Compressão Diametral e de Rigidez com os agentes cimentantes propostos (ligante álcali-ativado e cimento Portland de alta resistência inicial) de modo a comparar o

ligante álcali-ativado desenvolvido a um agente cimentante comum. Na Tabela 3.3 são exibidos os fatores controláveis e constantes referentes aos ensaios de RCS e G0 e na Tabela 3.4 os fatores referentes ao ensaio de RCD.

Tabela 3.3: Fatores controláveis e constantes experimento fatorial completo 2^3

Tipo dos Fatores	Fatores	Nível dos Fatores
Fatores Controláveis	Peso Esp. Aparente Seco	14,5 kN/m ³ e 16,5 kN/m ³
	Quantidade de Agente Cimentante	15% e 30%
	Tempo de Cura	7 dias e 28 dias
Fatores Constantes	Teor de Umidade	14,5%
	Temperatura de Cura	23° C
	Relação Cal-Cinza	30-70
	Teor de Álcalis	3,68%
	Ativador Alcalino	NaOH

Tabela 3.4: Fatores controláveis e constantes experimento fatorial completo 2^2

Tipo dos Fatores	Fatores	Nível dos Fatores
Fatores Controláveis	Peso Esp. Aparente Seco	14,5 kN/m ³ e 16,5 kN/m ³
	Quantidade de Agente Cimentante	15% e 30%
Fatores Constantes	Tempo de Cura	7 dias
	Teor de Umidade	14,5%
	Temperatura de Cura	23° C
	Relação Cal-Cinza	30-70
	Teor de Álcalis	3,68%
	Ativador Alcalino	NaOH

- Fase 4: Ensaios de durabilidade de perda de massa por molhagem e secagem do rejeito com um ligante álcali-ativado e com cimento Portland e avaliação do módulo cisalhante inicial ao longo dos ciclos de molhagem e secagem, para os fatores controláveis e constantes listados na Tabela 3.4.
- Fase 5: Ensaios de lixiviação e solubilização do rejeito e da cinza pela normatização brasileira, assim como ensaios de lixiviação dinâmico com sucessivas extrações do rejeito melhorado com o ligante proposto e com cimento Portland, bem como do rejeito e da cinza não melhorados. Os fatores controláveis e constantes para o ensaio de lixiviação dinâmico para as amostras melhoradas com ligante são os descritos na Tabela

3.3, já para as amostras melhoradas com cimento Portland os fatores são os apresentados na Tabela 3.4.

3.1. MATERIAIS

3.2.1. Preparação das amostras

A preparação das amostras dos materiais da presente pesquisa (secagem, destorroamento e peneiramento) para os ensaios de caracterização e para moldagem dos corpos de prova foi realizada conforme preconizado pela (ABNT, 2016a).

3.2.2. Rejeito de Mineração de Ouro

O processo de mineração do ouro, do qual advém o rejeito estudado, se dá pela moagem, hidratação e oxidação de rochas de conglomerados de quartzo-arsenopirita que, posteriormente, passam por um procedimento de lixiviação por cianeto. Esses processos ocasionam a liberação de arsênio, ácido sulfúrico e cianeto, elementos altamente tóxicos. Na Figura 3.1 é apresentada a curva granulométrica do rejeito de mineração de ouro por sedimentação e peneiramento conforme NBR 7181 (ABNT, 2018) e na Tabela 3.5 são apresentadas as propriedades físicas do rejeito.

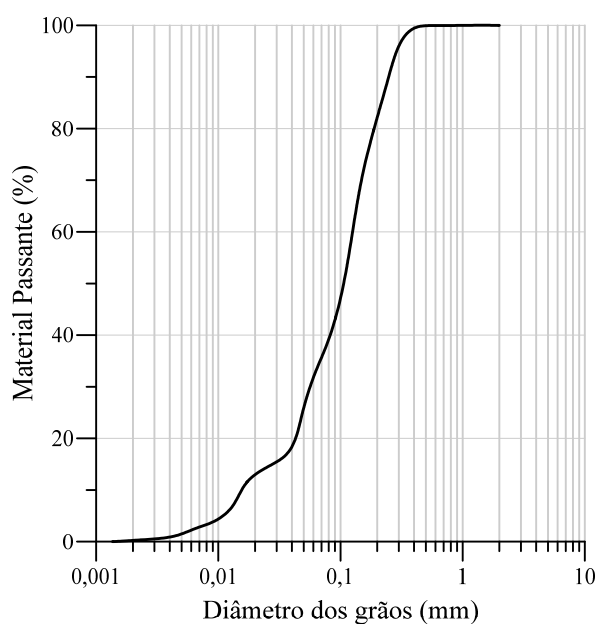


Figura 3.1: Curva granulométrica do rejeito de mineração de ouro (elaborado pela autora, 2021).

Tabela 3.5: Propriedades físicas do rejeito de mineração de ouro

Propriedades físicas	Rejeito	Norma Técnica
Limite de Liquidez (LL)	-	NBR 6459 (ABNT, 2016b)
Limite de Plasticidade (LP)	-	NBR 7180 (ABNT, 2016c)
Índice de Plasticidade (IP)	Não plástico	
Massa Específica dos Grãos (ρ_s)	2,71	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Areia Grossa (%) – $0,6 \leq d < 2$ mm	0,05	
Areia Média (%) – $0,2 \leq d < 0,6$ mm	9,65	
Areia Fina (%) – $0,06 \leq d < 0,2$ mm	56,34	NBR 6502 (ABNT, 1995)
Silte (%) – $0,002 \leq d < 0,06$ mm	33,62	
Argila (%) – $d < 0,002$ mm	0,34	
Classificação SUCS	SM	D 2487 (ASTM, 2017)

Ainda, de acordo com a classificação indicada no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), referido na norma americana D 2487 (ASTM, 2017), o rejeito estudado se enquadra como areia siltosa (SM).

O peso específico aparente seco máximo do material, para a energia de compactação modificada, é $18,3 \text{ kN/m}^3$ e a umidade ótima $14,5$, de acordo com o ensaio de compactação normalizado pela NBR 7182 (ABNT, 2016d) e apresentado na Figura 3.2.

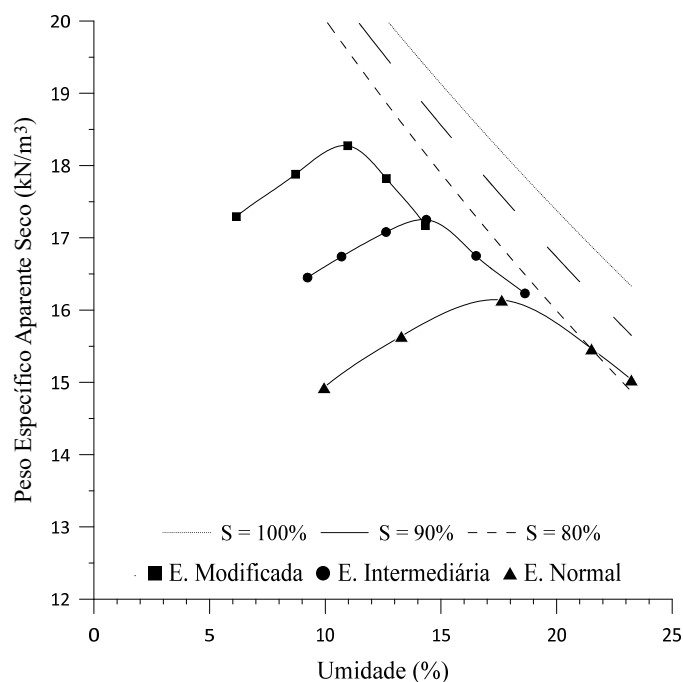


Figura 3.2: Ensaio de compactação do rejeito de mineração de ouro (elaborado pela autora, 2021).

O ensaio por difração de raios X foi executado em um difratômetro de raios X da marca Siemens, modelo D-5000, 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.

Para realização do ensaio as amostras em pó são pulverizadas ou desagregadas e depositadas em um amostrador específico para pó, de modo a preservar a desorientação das partículas para análise dos minerais ou estruturas cristalinas.

Esses minerais e/ou estruturas cristalinas são identificados através das distâncias interplanares e das intensidades relativas dos picos no difratogramas, com base no banco de dados ICDD – *International Centre for Diffraction Data*. Na Figura 3.3 apresenta-se o gráfico do ensaio, nele é possível observar a presença de quartzo (SiO_2) e que não há material amorfo.

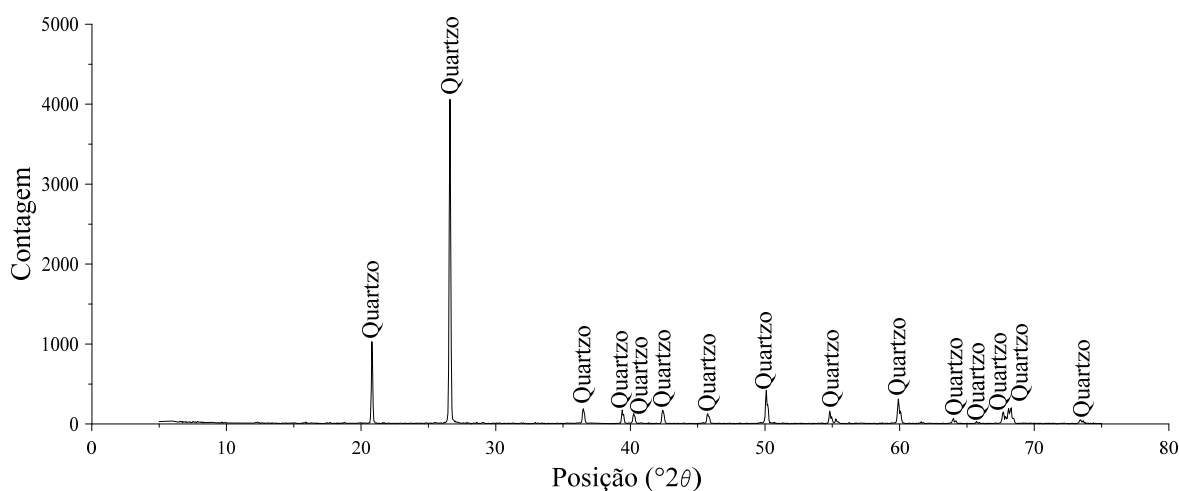


Figura 3.3: Difração de Raio-X Rejeito (elaborado pela autora, 2021).

Na Tabela 3.6 consta os valores obtidos pelo ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X, pelo método da pastilha prensada e a análise quantitativa dos elementos se deu com curva de calibração a partir de padrões de rocha tabelados da *Geostandards*. Os elementos identificados foram: dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), dióxido de titânio (TiO_2), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de magnésio (MgO), óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O).

Tabela 3.6: Espectrometria de Fluorescência de Raios-X rejeito

Elemento Químico	% Peso de amostra
SiO ₂	93,89
Al ₂ O ₃	1,2
TiO ₂	0,21
Fe ₂ O ₃	2,21
MgO	0,37
Na ₂ O	0,22
K ₂ O	0,36
LOI	1,54

O termo LOI encontrado na Tabela 3.6, representa a perda dos elementos voláteis que ocorreu na preparação do ensaio por ignição, essa perda é dada pela diferença entre o peso total dos óxidos e o peso da amostra.

A presença de materiais voláteis na amostra foi analisada por meio de técnicas gravimétricas e pode ser observada na Tabela 3.7 em ppm, os elementos presentes são: Chumbo (Pb), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Estrôncio (Sr), Zircônio (Zr), Zinco (Zn), Nióbio (Nb), Rubídio (Rb), Crômio (Cr) e Bário (Ba).

Tabela 3.7: Elementos traços rejeito

Elemento Químico	Elementos traço
Pb	6,9
Ni	19
Cu	5,7
Sr	32,6
Zr	183,3
Zn	68,1
Nb	2,4
Rb	10,7
Cr	175,1
Ba	10,5

3.2.3. Cal de carbureto

A cal de carbureto, resíduo do processo produtivo do gás acetileno e proveniente da empresa White Martins Gases Industriais S.A. da unidade de Sapucaia do Sul/RS, foi a definida para a pesquisa, visto que por ano a empresa gera cerca de 2160 toneladas da cal de carbureto.

Na Tabela 3.8 são apresentadas as propriedades físicas da cal e na Figura 3.4 a análise granulométrica, por difração de raios laser em analisador de tamanho de partículas Cilas, modelo 1064.

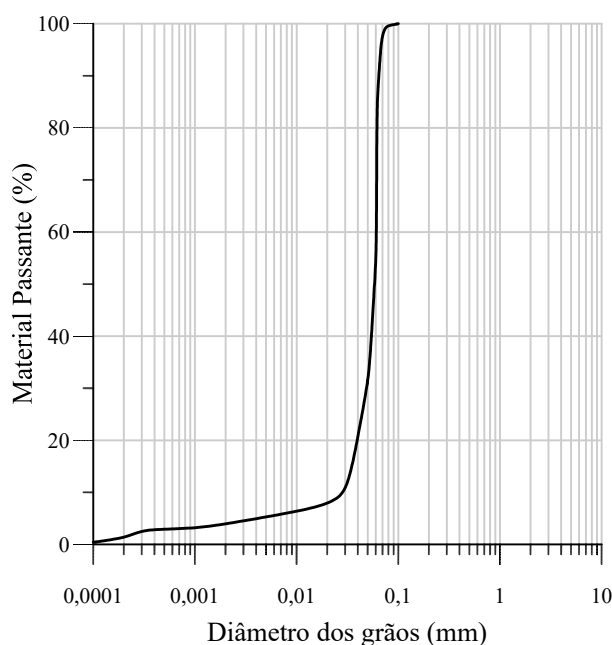


Figura 3.4: Distribuição granulométrica cal de carbureto (elaborado pela autora, 2021).

Tabela 3.8: Propriedades físicas cal de carbureto

Propriedades físicas	Cal Carbureto	Norma Técnica
Limite de Liquidez (LL)	-	NBR 6459 (ABNT, 2016b)
Limite de Plasticidade (LP)	-	NBR 7180 (ABNT, 2016c)
Índice de Plasticidade (IP)	Não plástica	
Massa Específica dos Grãos	2,17	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Areia Grossa (%) – $0,6 \leq d < 2$ mm	-	
Areia Média (%) – $0,2 \leq d < 0,6$ mm	-	
Areia Fina (%) – $0,06 \leq d < 0,2$ mm	12,6	NBR 6502 (ABNT, 1995)
Silte (%) – $0,002 \leq d < 0,06$ mm	86	
Argila (%) – $d < 0,002$ mm	1,4	

Na Figura 3.5 afigura-se os minerais portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] e calcita (CaCO_3), encontrados pelo ensaio de difração de raios-X, executado em um difratômetro de raios X da marca Siemens, modelo D-5000, 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. 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).

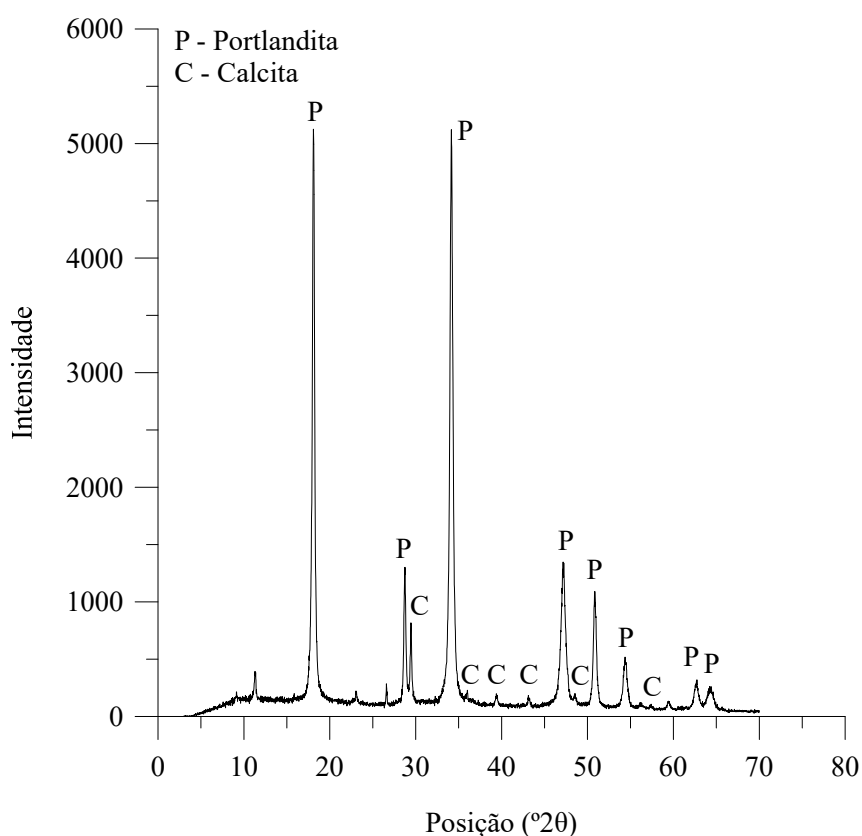


Figura 3.5: Difração de Raios-X cal de carbureto (elaborado pela autora, 2021).

Através da análise semiquantitativa da amostra de cal de carbureto, foi possível obter a porcentagem da quantidade dos minerais identificados na amostra pelo DRX, sendo que o material é composto por 87.2% de Portlandita, correspondente a fase cristalina do hidróxido de cálcio, e 12.8% de Calcita, proveniente do processo de carbonatação do hidróxido de cálcio. Entretanto, a porcentagem de carbonato de cálcio em relação ao hidróxido de cálcio é desprezível.

Na Tabela 3.9 consta os valores obtidos pelo ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X, pelo método da pastilha prensada e a análise quantitativa dos elementos se deu com curva de calibração a partir de padrões de rocha tabelados da Geostandards. Os elementos identificados foram: dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), dióxido de titânio (TiO_2), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de magnésio (MgO), óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O).

Tabela 3.9: Espectrometria de Fluorescência de Raios-X CC

Elemento Químico	% Peso de amostra
SiO_2	1,47
Al_2O_3	0,35
Fe_2O_3	0,13
SO_3	0,40
MgO	0,2
CaO	72
Na_2O	0,01
K_2O	-
LOI	25,2

O termo LOI encontrado na Tabela 3.9, representa a perda dos elementos voláteis que ocorreu na preparação do ensaio por ignição, essa perda é dada pela diferença entre o peso total dos óxidos e o peso da amostra.

3.2.4. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar

A cinza utilizada é oriunda da queima do bagaço de cana-de-açúcar para produção de energia da usina Coopercana de Porto Xavier/RS, na Tabela 3.10 consta suas propriedades físicas e na Figura 3.6 a análise granulométrica por difração de raios laser em analisador de tamanho de partículas Cilas, modelo 1064.

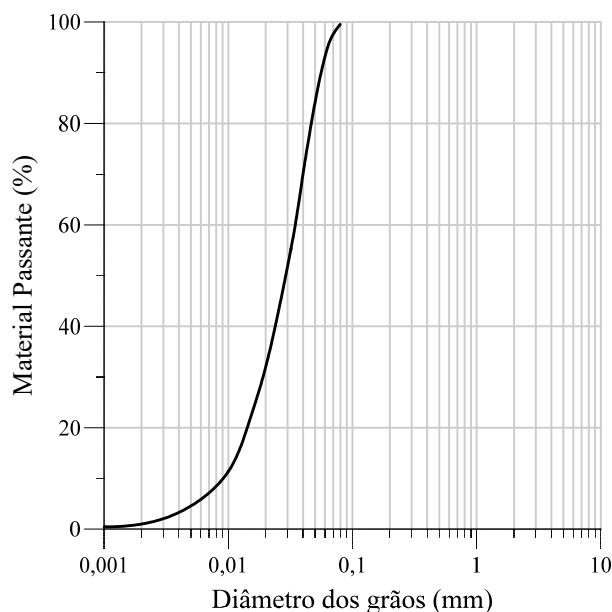


Figura 3.6: Distribuição granulométrica CBCA (elaborado pela autora, 2021).

Tabela 3.10: Propriedades físicas CBCA

Propriedades físicas	Valores	Norma Técnica
Limite de Liquidez (LL)	-	NBR 6459 (ABNT, 2016b)
Limite de Plasticidade (LP)	-	NBR 7180 (ABNT, 2016c)
Índice de Plasticidade (IP)	Não plástica	
Massa Específica dos Grãos	2,08	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Areia Grossa (%) – $0,6 \leq d < 2$ mm	-	
Areia Média (%) – $0,2 \leq d < 0,6$ mm	-	
Areia Fina (%) – $0,06 \leq d < 0,2$ mm	6,7	NBR 6502 (ABNT, 1995)
Silte (%) – $0,002 \leq d < 0,06$ mm	90,7	
Argila (%) – $d < 0,002$ mm	2,6	

Ademais, na Figura 3.7 expressa-se o gráfico do ensaio de difração de raio X, realizado com um difratômetro de raios X da marca Siemens, modelo D-5000, 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. 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). Pelo ensaio de DRX observou-se a existência dos minerais quartzo (SiO_2) e hematita (Fe_2O_3) na cinza, assim como material em fase amorfa.

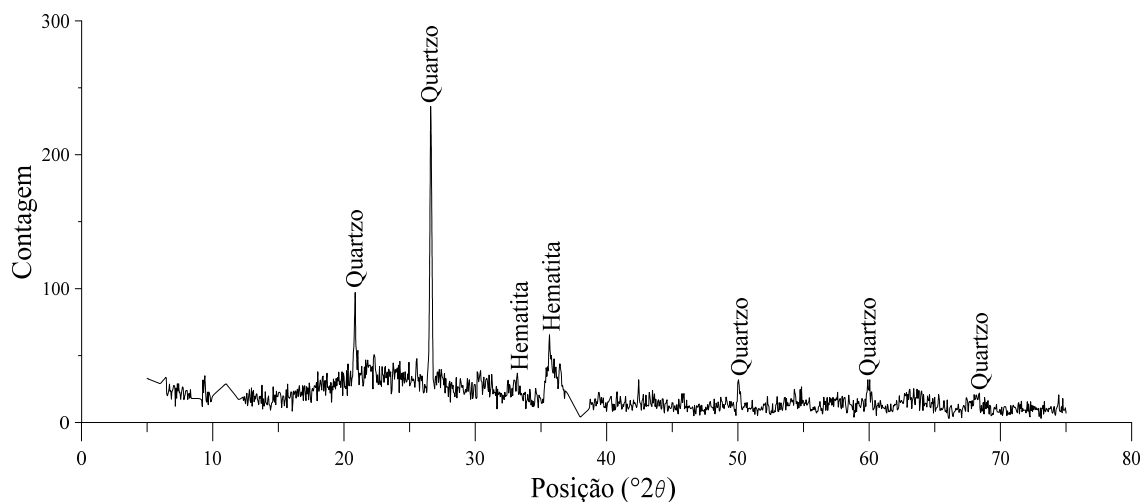


Figura 3.7: Difração de Raio-X CBCA (elaborado pela autora, 2021).

Por fim, a Tabela 3.11 contém os dados adquiridos pelo ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X, pelo método da pastilha prensada. Os elementos identificados foram: dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), dióxido de titânio (TiO_2), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de manganês (MnO), óxido de magnésio (MgO), óxido de cálcio (CaO), óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O) e pentóxido de fósforo (P_2O_5).

Tabela 3.11: Espectrometria de Fluorescência de Raios-X CBCA

Elemento Químico	% Peso de amostra
SiO_2	60,65
Al_2O_3	5,76
TiO_2	4,14
Fe_2O_3	13,87
MnO	0,45
MgO	1,97
CaO	1,40
Na_2O	0,22
K_2O	2,90
P_2O_5	1,26
LOI	7,39

O termo LOI encontrado na Tabela 3.11, representa a perda dos elementos voláteis que ocorreu na preparação do ensaio por ignição, essa perda é dada pela diferença entre o peso total dos óxidos e o peso da amostra.

A presença desses materiais na amostra foi analisada por meio de técnicas gravimétricas e pode ser vista na Tabela 3.12 em ppm, os elementos presentes são: Ítrio (Y), Chumbo (Pb), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Estrôncio (Sr), Zircônio (Zr), Zinco (Zn), Nióbio (Nb), Rubídio (Rb), Crômio (Cr) e Bário (Ba).

Tabela 3.12: Elementos traços CBCA

Elemento Químico	Elementos traço
Y	26,5
Pb	18,6
Ni	48,0
Cu	189,6
Sr	66,5
Zr	249,4
Zn	343,1
Nb	31,1
Rb	67,0
Cr	100,9
Ba	260,2

3.2.5. Ativador

Como ativador foi optado pela utilização do hidróxido de sódio (NaOH) do laboratório Dinâmica Química Contemporânea Ltda, obtido através da empresa RF Química, localizada na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. De acordo com o fabricante o material se apresenta como um sólido branco, cristalino, altamente tóxico e corrosivo, com ponto de fusão igual a 318°C e pureza analítica de 98%.

3.2.6. Cimento Portland

Para avaliação do ligante álcali-ativado proposto, foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) como grupo de controle, por ser um agente cimentante

convencional, amplamente estudado, e em virtude de seu acelerado ganho de resistência à baixos tempos de cura. Ainda, a massa específica do cimento utilizado é de 3,15 g/cm³.

3.2. MÉTODOS

3.3.1. Delimitação dos fatores controláveis

3.3.1.1 Resistência a compressão simples do ligante

A fim de se obter uma relação cal de carbureto-cinza bagaço de cana-de-açúcar ótima que pudesse ser fixada na pesquisa, assim como o teor de álcalis ideal para a potencialização da álcali-ativação dos precursores delimitados fez-se diferentes relações de CBCA/CC com hidróxido de sódio variando as proporções de cal de carbureto e cinza de bagaço de cana-de-açúcar e variando as concentrações de álcalis (% Na₂O em relação a massa total de precursor).

Os teores de CC-CBCA variaram de 10-90 % à 90-10 %, para as molaridades (mols de soluto por litro de solvente) de NaOH 0,5 mol/L, 1 mol/L, 2 mols/L, 4 mols/L e 6 mols/L, ou melhor dizendo, para os teores de álcali de, respectivamente, 1,88%, 3,68%, 7,16%, 13,44% e 18,4%.

A relação solução/precursor das pastas foi determinada em função da mínima quantidade de solução necessária para preservar a trababilidade das diferentes pastas. Essa relação foi fixada em 1. O tempo de cura e a temperatura, nessa ordem, 7 dias e 23 °C (± 2 °C).

Os moldes usados eram de plástico Poli Cloreto de Vinila (PVC) com 37 mm de diâmetro e 74 mm de altura, após moldados os corpos de prova (CPs) eram acondicionados em sacos herméticos, ainda no molde, por 6 dias, então desmoldados, imersos por 24h e ensaiados.

As pastas foram ensaiadas a compressão simples e a delimitação dos fatores controláveis, relação cal-cinza e teor de álcali, se deu pela pasta que apresentou a maior resistência a compressão simples.

3.3.1.2 Ensaios de compactação ligante-rejeito

O ensaio de compactação do rejeito com ligante foi realizado segundo a NBR 7182 (ABNT, 2016d) com energia modificada para os teores de ligante 5%, 15% e 30% a fim de delimitar os pesos específicos aparente secos do estudo, bem como a umidade.

3.3.1.3 Ensaio de resistência a compressão simples ligante-rejeito

Ensaio de resistência a compressão simples do rejeito foram realizados com diferentes quantidades de ligante (5%, 15% e 30%), com a finalidade de definir os teores de agente cimentante da presente pesquisa.

A moldagem dos corpos de prova ocorreu com uma umidade de 14,5% e peso específico aparente seco intermediário de 15,5 kN/m³. Ainda, moldou-se também CPs com cimento Portland CPV – ARI (5 e 15%) para posterior comparação com as amostras estabilizadas com o ligante alternativo. Para tanto, fez-se uso de moldes tripartidos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura.

3.3.2. Dosagem, Moldagem e Cura dos corpos de prova RCS, RCD, Go, Durabilidade e Lixiviação

A dosagem dos corpos de prova deu-se por substituição, isto é, o ligante era adicionado a mistura em substituição ao rejeito nos teores definidos. A quantidade de solução de hidróxido de sódio era calculada em relação a quantidade de material seco, sendo que o teor de álcali da solução é calculado em função da quantidade de precursor.

A pesagem dos materiais passou-se em balança com precisão de 0,01g. Inicialmente, realizou-se a homogeneização dos materiais secos e, posteriormente, adicionou-se a solução de hidróxido de sódio. Para preparação da solução utilizou-se água destilada.

Sem demora, pesava-se e dividia-se a mistura em três frações iguais, então transferia-se o material para recipientes com tampa de modo a preservar a umidade. Ademais, era retirado material em 3 capsulas para conferência da umidade de moldagem.

Para os ensaios de pulso ultrassônico, de resistência a compressão simples, de resistência a tração por compressão diametral e de lixiviação foi utilizado um molde cilíndrico tripartido com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, já para os ensaios de durabilidade usou-se um molde de 100 mm de diâmetro e 127 mm de altura.

Após a moldagem, pesava-se e aferia-se as medidas dos corpos de prova e, em seguida, acondicionava-os em sacos herméticos e os armazenava para cura, 24 horas antes da realização dos ensaios de pulso ultrassônico, de resistência a compressão simples e de resistência a tração por compressão diametral imergia-se os CPs em um recipiente com água para satura-lo e

minimizar os efeitos de sucção. O ensaio de pulso ultrassônico não é destrutivo, portanto, ele foi realizado nos corpos de prova que, posteriormente, foram ensaiados a compressão simples.

Os corpos de prova eram considerados aptos para serem ensaiados quando atendiam aos seguintes critérios:

- Grau de compactação: entre 99% e 101%
- Teor de umidade: $\pm 0,5$ do calculado
- Diâmetro e altura: $\pm 1\%$

3.3.3. Ensaaios de pulso ultrassônico

Os ensaios de pulso ultrassônico visam a aquisição de medidas de rigidez dos corpos de prova, em outras palavras, com o ensaio é possível a obtenção do módulo cisalhante inicial (G_0). O G_0 é dado pela relação entre a tensão cisalhante aplicada e a deformação cisalhante resultante.

Assim, partindo do pressuposto que a amostra ensaiada é um material elástico, homogêneo, contínuo e isotrópico a pequenas deformações, com a massa específica da amostra (ρ_s) e a velocidade de propagação da onda cisalhante (V_s) é viável o cálculo do módulo cisalhante inicial, conforme demonstrado na Equação 3.1, sendo que a velocidade é dada pela razão entre a altura (H) e o tempo de propagação da onda cisalhante (t_s) como expresso na Equação 3.2.

$$G_0 = \rho_s \times V_s^2 \quad \text{Equação 3.1}$$

$$V_s = \frac{H}{t_s} \quad \text{Equação 3.2}$$

O ensaio foi realizado com um *Pundit Lab* da empresa Proceq S.A., por ele é possível a leitura de ondas ultrassônicas longitudinais (compressão) e transversais (cisalhamento) que viabilizam a estimativa do tempo de propagação das ondas de compressão e cisalhamento. A onda de compressão é induzida pela vibração de transdutores a uma frequência de 54 kHz e a de cisalhamento por outros transdutores a uma frequência de 250 kHz.

3.3.4. Ensaio de resistência a compressão simples

Para os ensaios de resistência a compressão simples utilizou-se uma prensa automática com uma célula de carga com capacidade máxima de 20 kN ou com anel dinamométrico de 50 kN. O ensaio foi realizado de acordo com o estabelecido na norma americana D 5102 (ASTM, 2009), por deslocamento controlado a uma taxa constante de 1,14 mm/min.

Ademais, estipulou-se como critério de aceitação que os corpos de prova ensaiados que obtivessem resistências superior ou inferior a 10% da média do conjunto (duplicata), seriam descartados e o processo de moldagem refeito.

3.3.5. Resistência a Tração por Compressão Diametral

Para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, ensaio brasileiro, utilizou-se uma prensa automática com uma célula de carga com capacidade máxima de 20 kN ou com anel dinamométrico de 50 kN.

O ensaio foi realizado de acordo com o preconizado na norma brasileira NBR 7222 (ABNT, 2011), com deslocamento controlado a uma taxa constante de 1,14 mm/min. Por fim, o mesmo critério de aceitação para os corpos de prova, em relação a resistência, determinado para amostras ensaiadas a compressão simples foi adotado neste ensaio.

3.3.6. Ensaio de sucção

Em sua umidade de moldagem os corpos de prova não se encontravam saturados, logo, um certo nível de sucção poderia estar presente, mesmo imergindo-se o CP 24 horas antes do ensaio, superestimando a resistência a compressão simples e/ou a resistência à tração por compressão diametral. Diante disso, depois de realizados os ensaios de compressão simples, realizou-se a extração de amostras dos CPs rompidos para verificação da magnitude da sucção matricial e se esta era significativa.

A técnica utilizada para medição da sucção foi a do papel filtro elaborada por Chandler, Crilly e Montgomery-Smith (1992) e o papel filtro utilizado foi o Whatman N° 42. O procedimento consiste na retirada de uma amostra cilíndrica de aproximadamente 5 cm de diâmetro por 2,5 cm de altura do corpo de prova ensaiado a compressão simples. Em seguida, dois pedaços de papel filtro de aproximadamente 2 cm² eram posicionados lado a lado sobre a amostra, de modo que não ficassem sobrepostos.

Por fim, o conjunto (amostra + papel filtro) era envolto por plástico PVC e acondicionado em uma caixa de isopor por 7 dias para alcance do equilíbrio de sucção, transcorrido o tempo de equilíbrio os papéis filtros eram pesados, secados em estufa a 60 °C por 48 horas e pesados novamente para obtenção da umidade dos papéis.

A Equação 3.3 apresenta a expressão de calibração para medidas de umidades do papel filtro maior que 47% e a Equação 3.4 para umidades menores ou iguais a 47%.

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(6,05-2,48 \log w)} \quad \text{Equação 3.3}$$

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,84-0,0622w)} \quad \text{Equação 3.4}$$

3.3.7. Ensaios de durabilidade por molhagem, secagem e escovação

Para avaliação da durabilidade do rejeito de mineração de ouro estabilizado com os agentes cimentantes propostos nessa pesquisa, fez-se o ensaio de durabilidade por molhagem, secagem e escovação, que prevê a durabilidade através da perda de massa, conforme preconizado na norma americana D 559 (ASTM, 2015). O ensaio tem o objetivo de simular algumas das condições ambientais extremas que o material pode vir a sofrer.

À vista disso, transcorrido o tempo de cura, os corpos de prova são imersos em água por 5 horas, encerrado esse tempo eles são transferidos a uma estufa a 71 °C (± 3 °C) por 48 horas e, seguidamente, retirados da estufa, pesados e, passado 1 hora, escovados com uma escova com cerdas metálicas e então pesados novamente para determinação da perda de massa. Ao todos são realizadas 24 escovações por CP, 20 escovações ao logo da circunferência do corpo de prova e 4 no topo e na base. Todo esse processo representa um ciclo, esse procedimento foi realizado mais 11 vezes, concluindo 12 ciclos.

Além disso, entre os ciclos foram realizados ensaios de pulso ultrassônico, método descrito no Item 3.3.3, para avaliação da evolução da rigidez frente as condições simuladas pelo ensaio de durabilidade.

3.3.8. Ensaio de lixiviação e solubilização

Rejeitos de mineração de ouro, dado seu processo de extração, com frequência apresentam substâncias tóxicas em sua composição. O mesmo, por vezes, ocorre com as cinzas provenientes de queimas. Assim sendo, foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização para caracterização do rejeito natural e da cinza do bagaço de cana de açúcar, como também ensaios de lixiviação dinâmica do rejeito melhorado com os agentes cimentantes estudados, do rejeito natural e da cinza pura para verificação da toxicidade do rejeito e da cinza, bem como do efeito do ligante e do cimento Portland na lixiviação dos contaminantes presentes nos materiais pesquisados.

Para isso, os resultados obtidos pelos ensaios de lixiviação e de solubilização foram comparados com o anexo F e o anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004a) que classifica os materiais quanto a sua periculosidade. Quanto ao ensaio de lixiviação dinâmica, seus resultados foram comparados com os limites estabelecidos pelas normas CONAMA 460 (CONAMA, 2013), EPA (USEPA, 2021) e Lista Holandesa (VROM, 2000). Além disso, para a determinação do efeito dos agentes cimentantes, fez-se comparações entre os dados auferidos das proporções de contaminantes no rejeito natural e melhorado.

3.3.8.1. Ensaio de lixiviação

O procedimento adotado para o ensaio de lixiviação foi o descrito na NBR 10.005 (ABNT, 2004b) e pode ser observado pelo fluxograma apresentado na Figura 3.8. Inicialmente reserva-se no mínimo 100g ($\pm 0,1$) de material passante na peneira com abertura de 9,5 mm para então encaminhá-lo para a etapa de extração.

O próximo passo é a agitação, para isso adiciona-se água deionizada a amostra na proporção de 16:1. A agitação mecânica é realizada por pás giratórias com controle de velocidade durante 5 minutos. Em seguida mede-se o pH, se ele for menor ou igual a 5, utiliza-se a solução de extração 1 (solução de ácido acético glacial e hidróxido de sódio em proporções estequiométricas informadas na norma, o pH desta solução deve ser $4,93 \pm 0,05$).

Se as amostras apresentarem pH maior que 5 adiciona-se 3,5 mL de ácido clorídrico (HCl), aquece-se a solução a 50°C por 10 min, esfria-se a temperatura ambiente e mede-se o pH novamente, se apresentar pH menor ou igual a 5 usa-se a solução de extração 1 e se exibir pH

maior que 5 aplica-se a solução de extração 2 (solução de ácido acético glacial, o pH desta solução deve ser $2,88 \pm 0,05$).

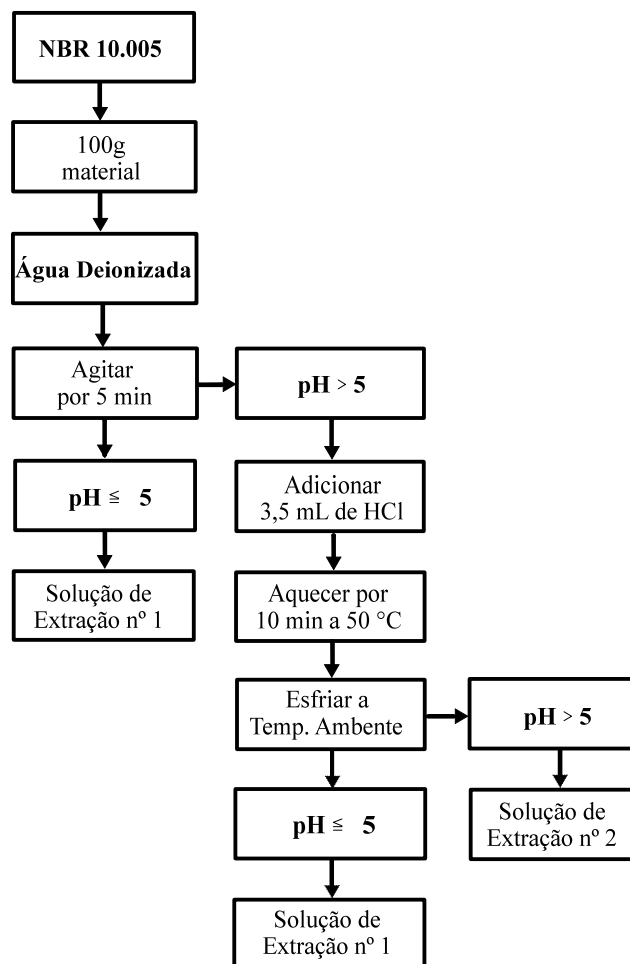


Figura 3.8: Fluxograma do ensaio de lixiviação NBR 10.005 (elaborado pela autora, 2021).

Posteriormente a adição da solução de extração, leva-se o frasco para agitação por $18 (\pm 2)$ horas a temperatura de até 25°C com uma rotação de $30 (\pm 2)$ rpm no agitador rotatório. Transcorrido este tempo, filtra-se a amostra em filtros lavados com solução de ácido nítrico (HNO_3).

O filtrado obtido é denominado extrato lixiviado. Após obtenção do extrato lixiviado, determina-se o pH, retira-se alíquotas e preserva-as para analisar. 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, o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA e WEF, 2012), como indicado na NBR 10.005 (ABNT, 2004b).

3.3.8.2. Ensaio de Solubilização

Para identificação da solubilização do rejeito realizou-se o ensaio de solubilidade detalhado na NBR 10.006 (ABNT, 2004c). Inicialmente, coloca-se 250 g do material seco passante na peneira com abertura de 9,5 mm em um recipiente de 1500 mL. Logo após, adiciona-se 1000 mL de água deionizada e agita-se por 5 minutos em baixa velocidade.

Transcorrido o tempo de agitação, cobre-se o frasco com filme de PVC e deixa-se em repouso por 7 dias em temperatura de até 25°C. Então filtra-se a solução e determina-se o pH do extrato lixiviado (filtrado obtido). E, por fim, reservar-se as alíquotas para análise.

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, o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA e WEF, 2012).

3.3.8.3. Ensaio de lixiviação com permeâmetro

Para avaliar se houve encapsulamento dos contaminantes do rejeito pelo melhoramento com os agentes cimentantes propostos, ensaios de lixiviação dinâmicos com sucessivas extrações foram realizados. Em virtude de os elementos metálicos possuírem diferentes tempos de dissolução a temperatura constante, pré-determinou-se a realização de 3 coletas por corpo de prova, as duas primeiras com 5 vezes o volume de vazios da amostra (V_v) e a última com 10 vezes o V_v . A realização do ensaio deu-se em um permeâmetro de parede flexível, Figura 3.9.

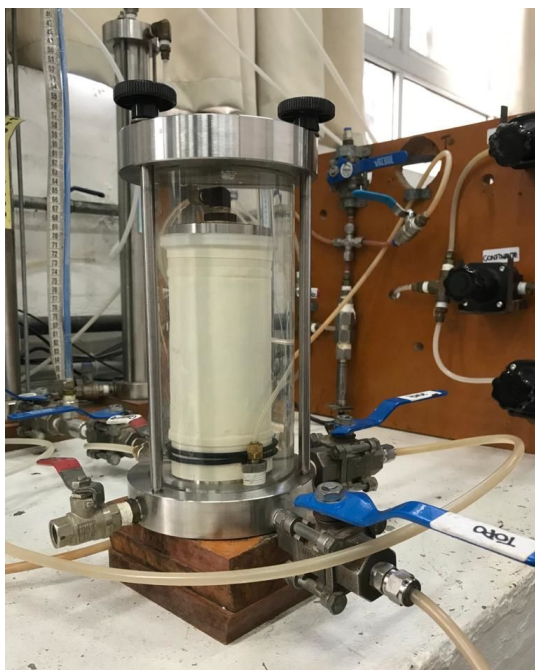


Figura 3.9: Permeâmetro de Parede Flexível (elaborado pela autora, 2021)

Dado que não existe norma que regulamente o ensaio com o permeâmetro, fez-se uso da norma americana D 4874 (ASTM, 2014) que regula o ensaio em equipamento de lixiviação em coluna, visto que o procedimento em ambos aparelhos é muito semelhante.

Também foram utilizadas as normas americanas D 2434 (ASTM, 2019), que regulamenta ensaios de permeabilidade em materiais granulares (Constante de Head) e D 5084 (ASTM, 2016), que especifica o ensaio de determinação da condutividade hidráulica de materiais porosos saturados usando um permeâmetro de parede flexível.

O ensaio, tanto no equipamento de lixiviação em coluna quanto no permeâmetro, consiste simplesmente na aplicação de um fluxo ascendente no corpo de prova. Em virtude das especificidades do programa experimental a realização do ensaio deu-se analogamente ao Método D – Vazão Constante, especificado na norma D 5084 (ASTM, 2016).

Assim, o ensaio foi realizado continuamente a temperatura ambiente e uma vazão constante de $1,8 \times 10^{-8}$ m³/s, a vazão foi definida de modo a respeitar o gradiente máximo apresentado na Tabela 3.13, visto que gradientes excessivos devem ser evitados porque altas pressões podem consolidar o material. O gradiente hidráulico estabelecido foi 10.

Tabela 3.13: Limites de gradiente hidráulico em função da condutividade hidráulica

Condutividade Hidráulica (m/s)	Gradiente Hidráulico Máx. Recomendado
1×10^{-5} a 1×10^{-6}	2
1×10^{-6} a 1×10^{-7}	5
1×10^{-7} a 1×10^{-8}	10
1×10^{-8} a 1×10^{-9}	20
menor que 1×10^{-9}	30

A partir do preconizado para o método de vazão constante da norma D 5084 (ASTM, 2016), delimitou-se que a variação da vazão não poderia exceder 35% da vazão constante para mais ou para menos ao longo de todo ensaio.

Após efetuada as coletas, as amostras são congeladas e posteriormente analisadas pela Técnica de Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-AES) para os componentes metálicos e para as demais substâncias (voláteis) pelo Método Padrão de Análise da Água e Esgoto, o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA e WEF, 2012), como indicado na NBR 10.005 (ABNT, 2004b).

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. RESULTADOS ENSAIOS PRELIMINARES

Na Figura 4.1 são apresentados os resultados de resistência a compressão simples dos sistemas álcali-ativados mencionados no Item 3.3.1.1., como é possível observar o comportamento apresentado pelo sistema é variável para cada molaridade de solução de hidróxido de sódio.

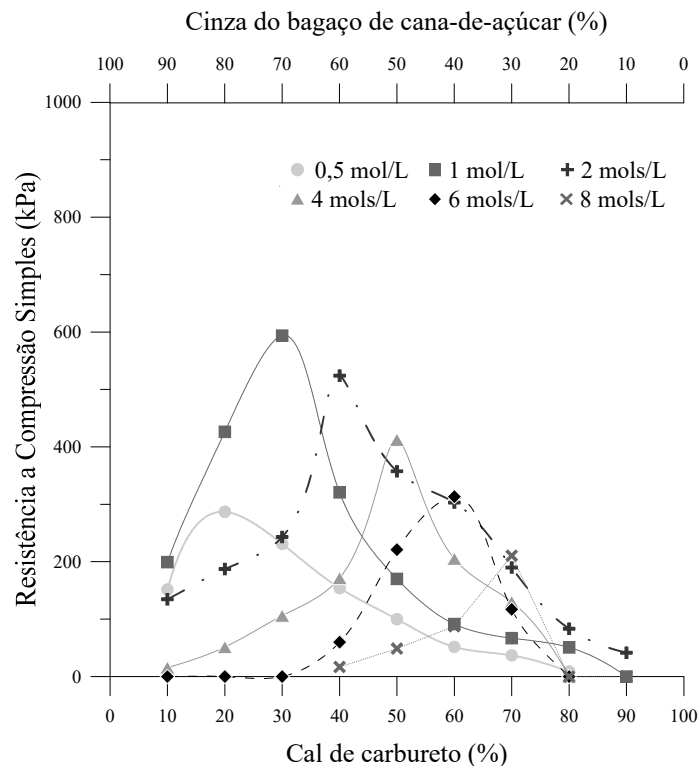


Figura 4.1: Resistência a compressão simples dos sistemas álcali-ativados (elaborado pela autora, 2021).

Na Tabela 4.1 são expressos os 2 principais agrupamentos obtidos pelo método de Tukey, para análise do melhor ajuste das pastas álcali-ativadas a fim de se alcançar as melhores resistências.

Tabela 4.1: Agrupamento dos sistemas álcali-ativados pelo método de Tukey

Molaridade (mol/L)	Relação CC-CBCA (%)	Média	Agrupamento
1	30-70	593,84	A
2	40-60	524,00	A
1	20-80	426,30	B
4	50-50	412,39	B
2	50-50	357,50	B

Pelos dados da Tabela 4.1 fica evidente que os sistemas álcali-ativados com molaridades de 1 mol/L e 2 mols/L e relação de cal de carbureto-cinza de bagaço de cana-de-açúcar de, respectivamente, 30-70% e 40-60% são estatisticamente iguais.

Dado que tanto a cal de carbureto quanto a cinza de bagaço de cana-de-açúcar são resíduos e o hidróxido de sódio é vendido comercialmente, para os ensaios seguintes, fixou-se a relação CC-CBCA 30-70% e o teor de álcali de 3,68%, obtido pela razão da massa de Na_2O pela massa de precursor da amostra.

Pelas curvas de compactação expostas na Figura 4.2, foi determinado os pesos específicos aparentes secos $16,5 \text{ kN/m}^3$, maior γ_d alcançado pela curva de compactação com 30% de ligante e $14,5 \text{ kN/m}^3$, dois pontos unitários abaixo do máximo γ_d .

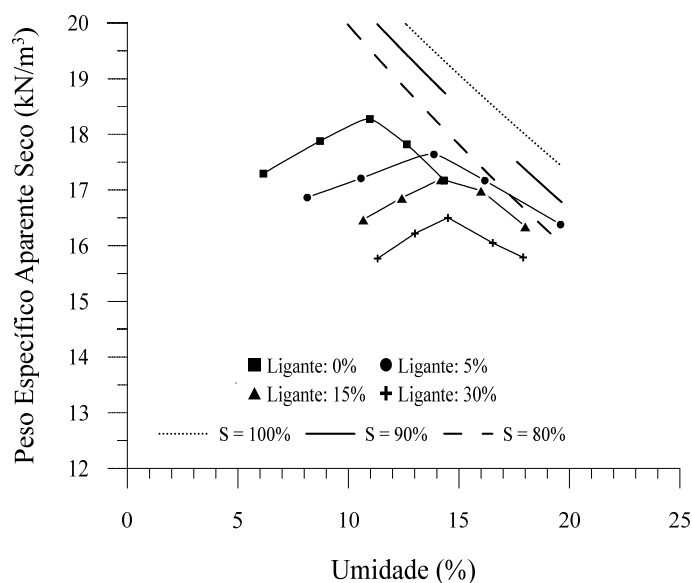


Figura 4.2: Curvas de compactação com ligante (elaborado pela autora, 2021).

Os corpos de prova ensaiados a resistência a compressão simples com 5% de ligante e de cimento não resistiram a imersão, mostrando-se ineficientes para a estabilização do rejeito. Deste modo, fixou-se os teores de 15% e 30% de agente cimentante.

4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Na Figura 4.3 são expostos os resultados dos tratamentos estatísticos para a resistência a compressão simples das amostras moldadas com o ligante proposto e o cimento Portland. Esses resultados foram obtidos a partir da média simples dos corpos-de-prova executados em cada tratamento. A execução dos ensaios ocorreu conforme apresentado na Tabela 3.1.

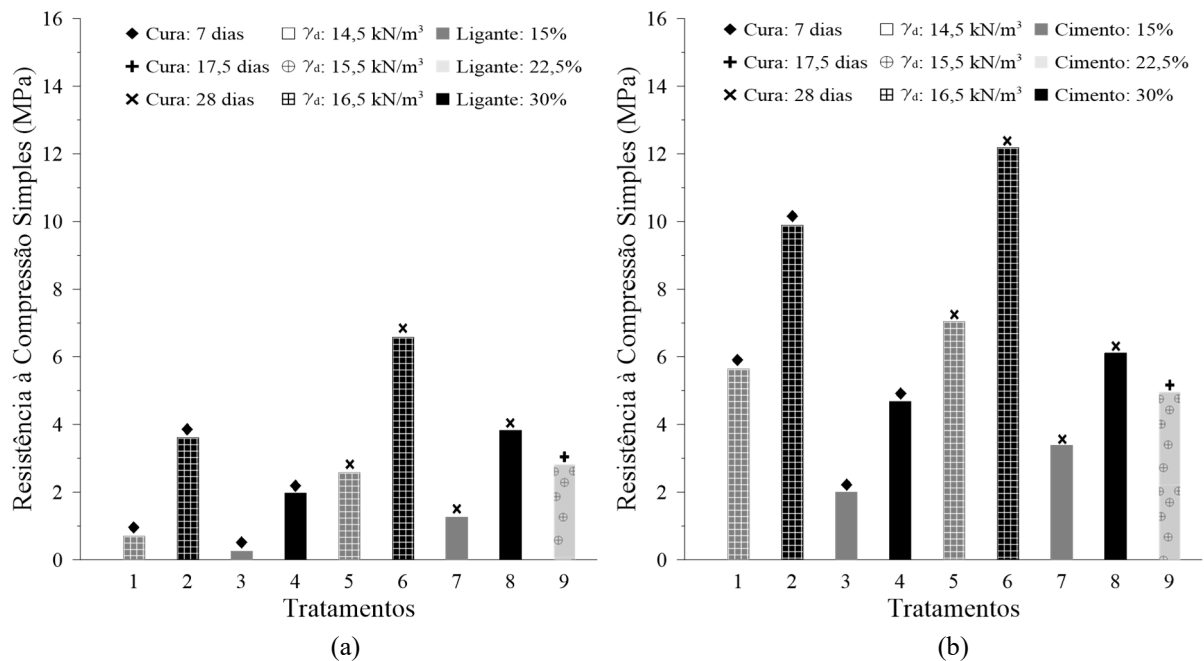


Figura 4.3: Resultados médios de resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

A partir dos tratamentos é viável dizer que o aumento nos níveis dos fatores controláveis, tanto para as amostras com ligante quanto para as amostras com Cimento Portland de alta resistência inicial, gerou aumento na resistência. Os corpos de provas moldados com CPV-ARI demonstraram resistências maiores em relação aos moldados com ligante.

Para fins de comparação direta, definiu-se que as porcentagens a serem usadas para as amostras com cimento seriam as mesmas que para as amostras com ligante (15% e 30%). No entanto, comumente, quando se trabalha com cimentos convencionais mantem-se as dosagens entre 2% e 14%, podendo variar ligeiramente, para mais ou para menos, em função das especificações de projeto. Assim, considerando-se as porcentagens superiores utilizadas nessa pesquisa às habituais para o CPV-ARI, resistência maiores eram esperadas para o cimento Portland.

Com os resultados obtidos foi possível evidenciar os efeitos de cada fator controlável, bem como das interações de segunda ordem, de forma quantitativa, nos gráficos de Pareto exibidos na Figura 4.4.

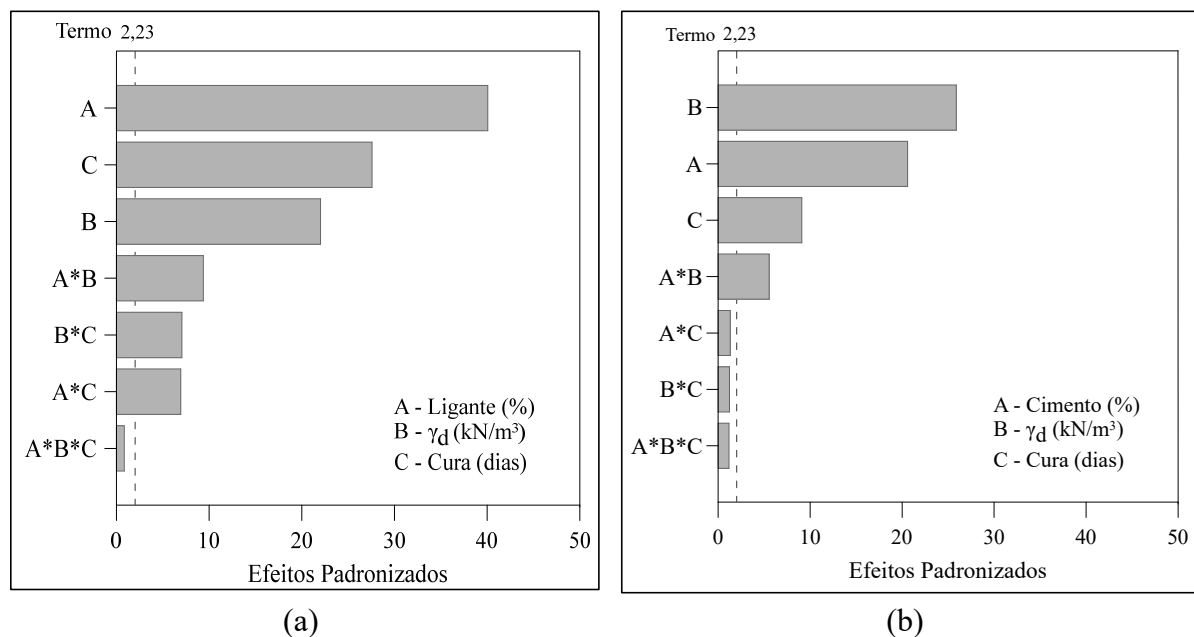


Figura 4.4: Gráficos de Pareto da resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

A partir do gráfico de Pareto da Figura 4.4 (a) constata-se que todos os fatores principais (A – Teor de Ligante, B – Peso Especifico Aparente Seco e C – Tempo de Cura) são estatisticamente significativos para a resistência à compressão simples das amostras com o ligante álcali-ativado, assim como as interações de segunda ordem A*B (Teor de Ligante*Peso Especifico Aparente Seco), A*C (Teor de Ligante*Tempo de Cura) e B*C (Peso Especifico Aparente Seco* Tempo de Cura). A interação de terceira ordem A*B*C (Teor de Ligante*Peso Especifico Aparente Seco*Tempo de Cura) não mostrou influência significativa sobre a variável resposta.

Ainda, o teor de ligante mostrou-se o mais significativo, seguido pelo tempo de cura, pelo peso específico aparente seco, pelas interações A*B, B*C e A*C, respectivamente. Com o aumento da porcentagem de ligante a um grande crescimento da quantidade de reações pozolânicas, o que justifica o teor de ligante ser o de maior significância para a variável resposta em questão.

Por outro lado, o tempo de cura se revelou o segundo fator mais significativo, o que não era esperado visto que o processo de álcali-ativação busca acelerar as reações cimentícias. Contudo, enquanto houver hidróxido de cálcio e aluminossilicatos disponíveis no sistema as reações pozolânicas continuaram ocorrendo e, conseqüentemente, melhorando a resistência.

Finalizando, o último fator de maior influência na resistência a compressão simples, o peso específico aparente seco, gera aumento da resistência em função da maior área de contato entre os grãos, ocasionada pela redução da porosidade, que resulta em um melhor intertravamento entre as partículas e em uma maior mobilização de atrito, que leva ao aumento da resistência.

Todavia, essa melhora no intertravamento com a redução da porosidade não é infinita e nem linear, a distribuição granulométrica do material estabilizado e do ligante a ser adicionado influencia na redução da porosidade e, dependendo do tamanho das partículas, pode potencializar de maneira expressiva ou não na mobilização de atrito em função da movimentação entre os grãos. O que pode justificar sua menor significância sobre a variável resposta.

Na Figura 4.4 (b) observa-se que para o ensaio de resistência a compressão simples com as amostras cimentos com CPV-ARI todos os fatores principais (A – Teor de Cimento, B – Peso Específico Aparente Seco e C – Tempo de Cura) foram significativos, assim como a interação de segunda ordem A*B (Teor de Ligante*Peso Específico Aparente Seco). As interações de segunda ordem A*C (Teor de Ligante*Tempo de Cura) e B*C (Peso Específico Aparente Seco*Tempo de Cura), como também a interação de terceira ordem A*B*C (Teor de Ligante*Peso Específico Aparente Seco*Tempo de Cura), não se demonstraram significativas.

Para as amostras com CPV-ARI, o efeito que demonstrou maior influência foi o peso específico aparente seco, como supracitado, o aumento do peso específico – redução da porosidade, pode proporcionar uma maior área de contato entre as partículas que resulta em maior mobilização de atrito entre as partículas e desenvolvimento da resistência como identificado em diversas

pesquisas com cimento Portland (CONSOLI, NIERWINSKI, *et al.*, 2018a; CONSOLI, SAMANIEGO, *et al.*, 2018b; FESTUGATO, FOURIE e CONSOLI, 2013; TOMASI, 2018).

Em seguida, o fator de maior influência foi o teor de cimento, o que é justificado pela forte influência que o cimento, junto com o peso específico aparente seco, possuem sobre a resistência de solos-cimentos. Por fim, dentre os três fatores principais, o que menor manifestou influência sobre a variável resposta foi o tempo de cura, o que se explica pelo fato de o CPV-ARI exibir cerca de 80% de sua resistência nos primeiros 7 dias.

Com base na análise estatística fez-se a avaliação da influência dos fatores principais isolados e, também, de suas interações. Na Figura 4.5 é apresentado a análise dos efeitos principais significativos na variável resposta e na Figura 4.6 a análise das interações.

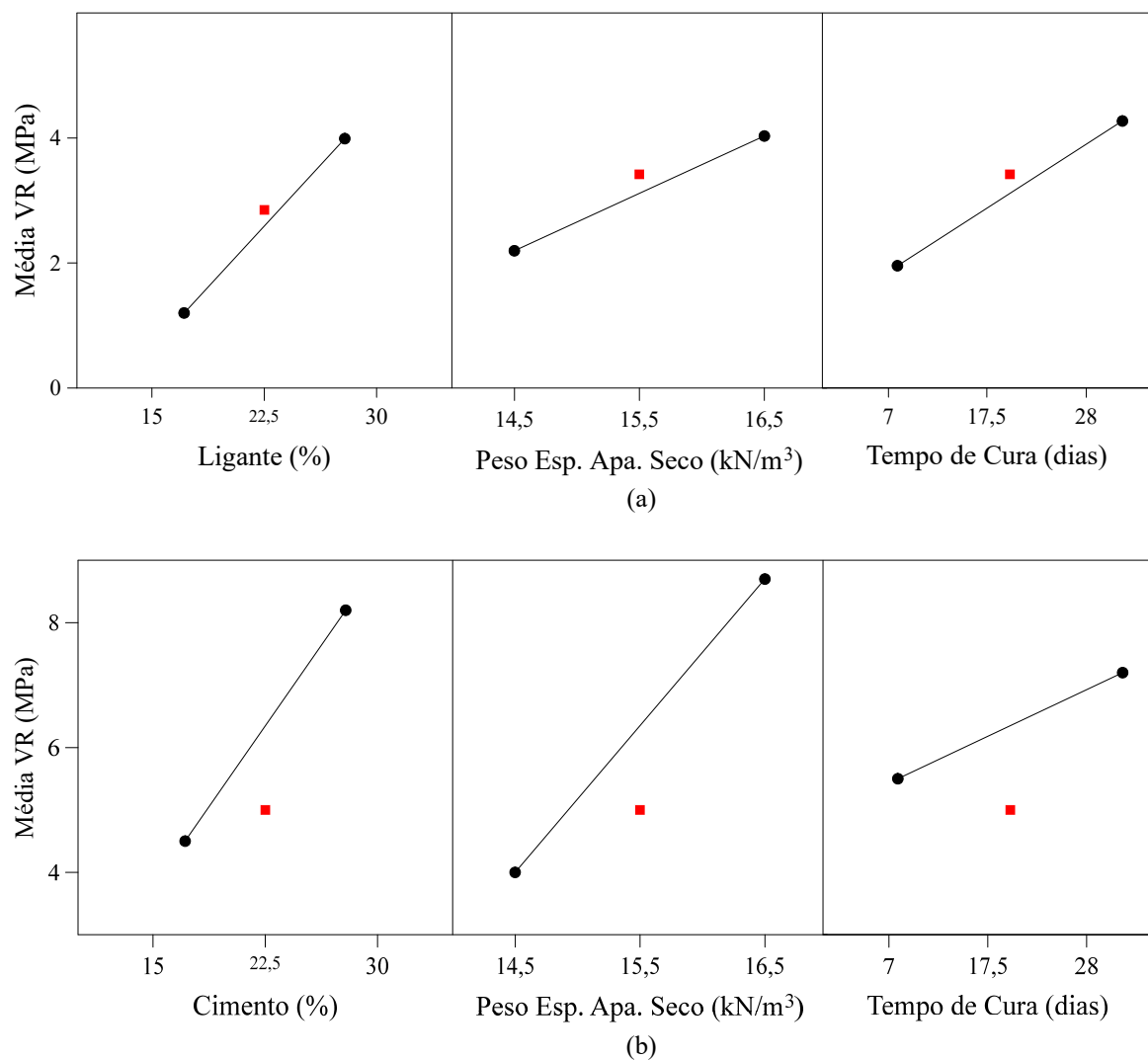


Figura 4.5: Efeitos principais resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021)

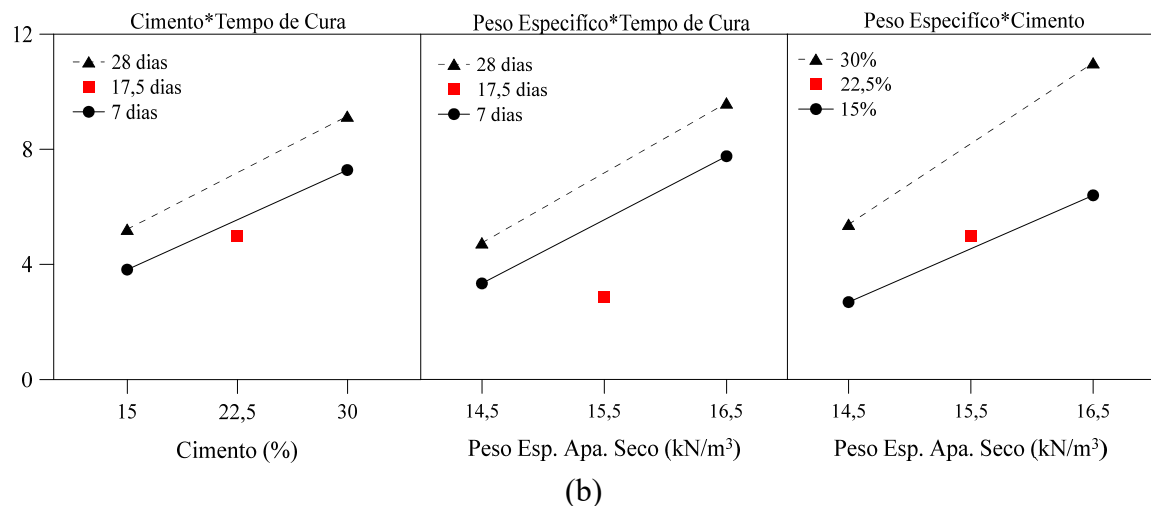
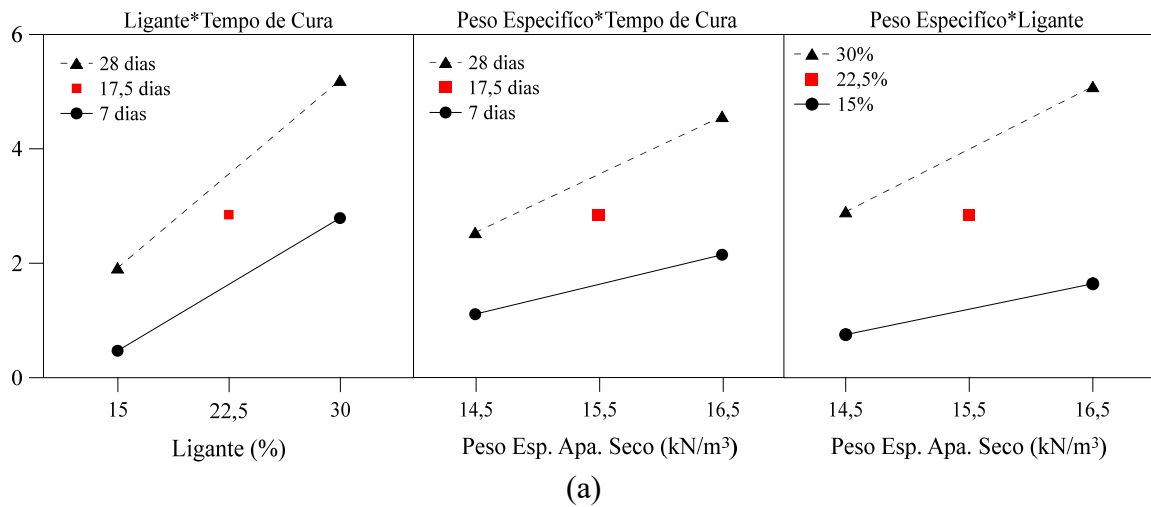


Figura 4.6: Interações resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021)

Resumidamente, com os resultados expressos na Figura 4.5 e na Figura 4.6, nota-se que todos os fatores principais, assim como as interações que se mostraram significativas, ocasionam aumento da resistência, tanto para as amostras com o ligante álcali-ativado quanto para as amostras com cimento Portland, com o aumento dos seus níveis.

Os resultados de resistência à compressão simples foram correlacionados aos fatores controláveis e, através de uma regressão linear, foi possível determinar equações de previsão de resistência para o ligante (Equação 4.1) e para o cimento Portland (Equação 4.2). Ainda, foram incorporados ao modelo de regressão linear apenas os fatores e interações que exercem maior impacto na variável resposta.

$$\text{RCS (MPa)} = 5,38 - 0,441A - 0,476B - 0,210C + 0,03705AB - 0,00280 AC + 0,0150 BC + 0,000379 + 0,2507 \quad \text{Equação 4.1}$$

$$\text{RCS (MPa)} = - 18,18 - 0,443A + 1,176B + 0,350C + 0,0428AB - 1,365 \quad \text{Equação 4.2}$$

Os coeficientes de determinação das equações são, respectivamente, 0,9941 e 0,9857. Ou melhor dizendo, as equações estabelecidas são capazes de expender 99,41% e 98,57% da variação dos dados com relação ao modelo de regressão utilizado.

4.2.1. Relações com os índices η/B_{iv} e η/C_{iv}

Os resultados de resistência a compressão simples das amostras ensaiadas com o ligante álcali-ativado e com o CPV-ARI foram traçados pelo índice porosidade/teor volumétrico de ligante e pelo índice porosidade/teor volumétrico de cimento, respectivamente, e encontram-se na Figura 4.7.

Os índices η/B_{iv} e η/C_{iv} são metodologias propostas por Consoli *et al.* (2007; 2018) para a dosagem racional de solos-cimentos. Os dois parâmetros representam, basicamente, a mesma coisa, o que os diferencia são algumas considerações a mais que são feitas no índice η/B_{iv} em função do ligante ser formado por diferentes resíduos, conforme melhor explicado no Item 2.3.5.

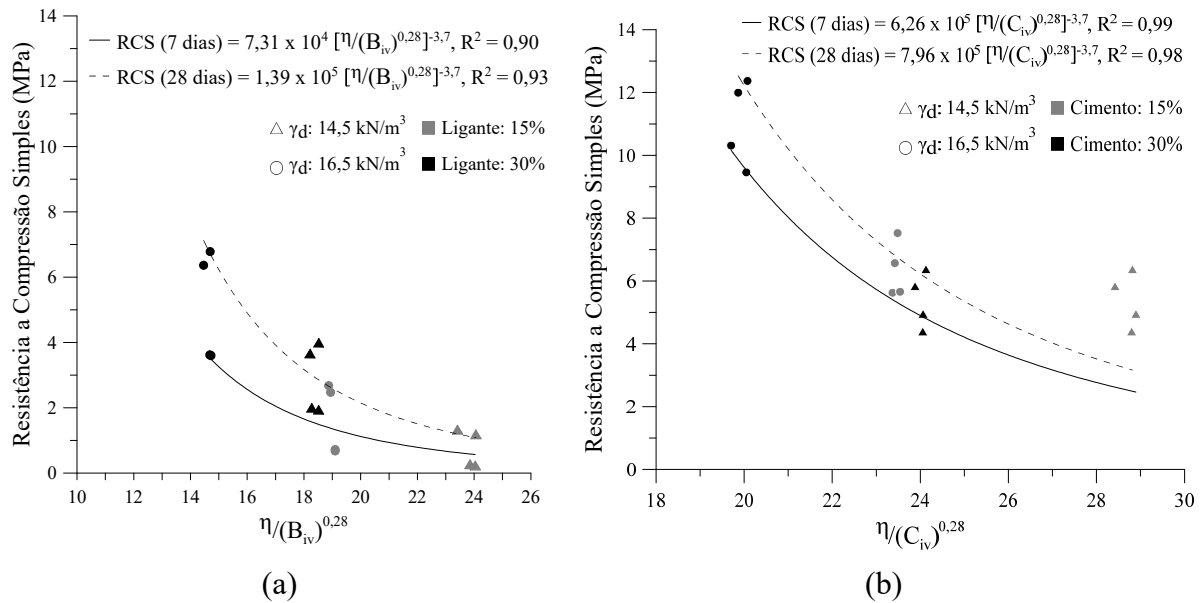


Figura 4.7: Relação entre a resistência à compressão simples e o índice (a) η/B_{iv} ligante álcali-ativado e (b) η/C_{iv} cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Sucintamente, o aumento da resistência à compressão simples das amostras deu-se concomitantemente a redução do índice porosidade/teor volumétrico de ligante-cimento e o aumento do tempo de cura. A redução dos índices propicia, essencialmente, uma maior mobilização de atrito entre as partículas, além de gerar uma maior precipitação de compostos cimentícios.

De modo geral, ao comparar as curvas de 7 e 28 dias nota-se que as amostras com CPV-ARI tiveram um aumento menor de sua resistência com o tempo de cura do que as amostras com o ligante álcali-ativado. Os CPs com cimento desenvolveram cerca de 80% da sua resistência inicial aos 7 dias, já os CPs com ligante aos 7 dias obtiveram entre 20 e 50% da resistência, indicando que os produtos das reações continuaram a se formar ao longo dos 28 dias de cura.

As amostras com maiores índices porosidade/teor volumétrico de ligante foram as que apresentaram uma menor resistência inicial (em média 20%), enquanto as com menores índices porosidade/teor volumétrico de ligante expressaram maior resistência aos 7 dias (em média 50%), validando a capacidade do índice η/B_{iv} de expressar o comportamento de materiais estabilizados com cimentos alternativos.

As curvas de resistência a compressão simples pelos índices porosidade/teor volumétrico de ligante e porosidade/teor volumétrico de cimento exibiram ótimos coeficiente de determinação (R^2). Para as amostras com ligante, os valores foram de 90% e 93% para 7 e 28 dias,

respectivamente. Os coeficientes para as amostras com cimento foram 99% e 98%, para 7 e 28 dias, na ordem.

Os coeficientes de determinação dos CPs com CPV-ARI expressaram valores superiores aos do ligante, o que era esperado visto que o cimento é produzido industrialmente com alto controle tecnológico enquanto o ligante é produzido a partir de resíduos industriais. A Equação 4.3 e a Equação 4.4 exibem as relações encontradas para o ligante álcali-ativado e a Equação 4.5 e a Equação 4.6 as relações referentes ao cimento Portland.

$$RCS (MPa)_{7 \text{ dias}} = 7,31 \times 10^4 \left[\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,7} \quad \text{Equação 4.3}$$

$$RCS (MPa)_{28 \text{ dias}} = 1,39 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,7} \quad \text{Equação 4.4}$$

$$RCS (MPa)_{7 \text{ dias}} = 6,26 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,7} \quad \text{Equação 4.5}$$

$$RCS (MPa)_{28 \text{ dias}} = 7,96 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,7} \quad \text{Equação 4.6}$$

A partir da Equação 4.3, Equação 4.4, Equação 4.5, e Equação 4.6 é evidente que apesar dos expoentes externos das equações serem iguais, suas constantes iniciais são distintas. Assim, Consoli *et al.* (2018b) indicaram que o comportamento mecânico de misturas com um mesmo ligante poderia ser normalizado, tornando possível a geração de uma relação única para a previsão do comportamento, independente das distintas variáveis consideradas.

A normalização é dada pela razão dos resultados resistência à compressão simples por um valor fixo de resistência, para um dado valor pré-estabelecido de $\eta/B_{iv}^{0,28}$ igual a 19 e de $\eta/C_{iv}^{0,28}$ igual

a 24, por serem valores centrais nas duas curvas. Assim, na Figura 4.8 são expostas as curvas de resistência a compressão simples normalizadas para as amostras álcali-ativadas e cimentadas para ambos os tempos de cura.

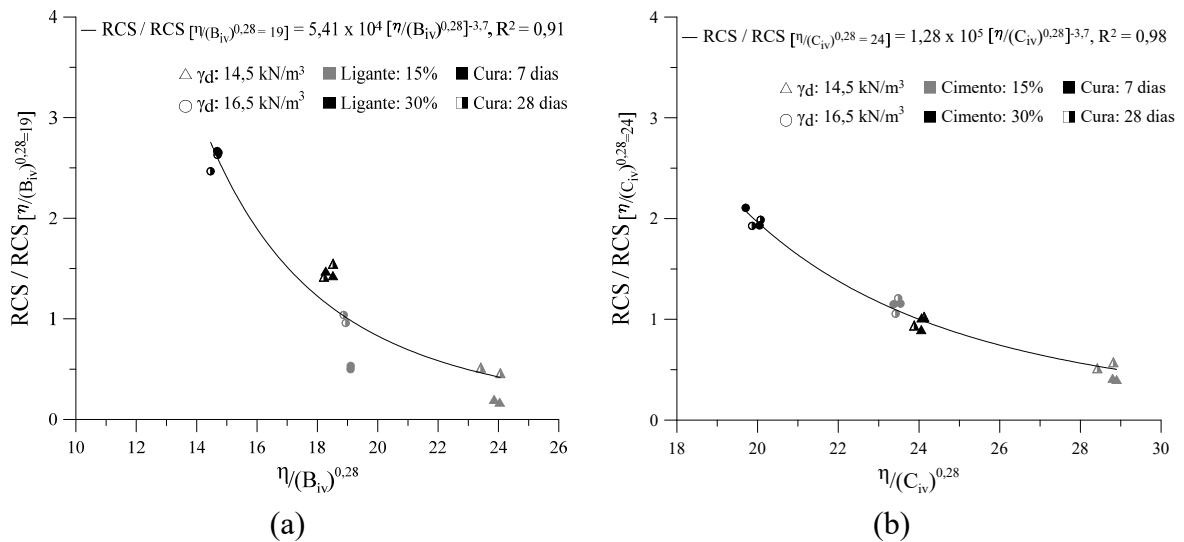


Figura 4.8: Resistência à compressão simples normalizada para ambos tempos de cura (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Deste modo foi possível obter uma relação única entre a resistência a compressão simples e os índices porosidade/teor volumétrico de ligante e porosidade/teor volumétrico de cimento para as amostras com ligante e com cimento. Na Equação 4.7 é exibida a relação obtida para o ligante e na Equação 4.8 a relação obtida para o cimento.

$$\frac{RCS}{RCS_{(\eta/B_{iv}=19)}} = 5,41 \times 10^4 \left[\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,7} \quad \text{Equação 4.7}$$

$$\frac{RCS}{RCS_{(\eta/C_{iv}=24)}} = 1,28 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,7} \quad \text{Equação 4.8}$$

Os coeficientes de determinação das equações da resistência à compressão simples normalizadas foram 91% e 98%, respectivamente, para o ligante e para o cimento. Os R^2 demonstram a efetividade da normalização com diferentes tempos de cura e a possibilidade de utilizar essas equações para previsão da resistência a compressão simples.

4.3. SUCCÃO MATRICIAL

Na Figura 4.9 apresenta-se os resultados de medidas de sucção matricial das amostras ensaiadas a compressão simples para 7 e 28 dias. Como pode ser observado, a influência da sucção sobre a resistência a compressão simples, majoritariamente, não ultrapassa 4%, com exceção de um único ponto isolado que, possivelmente, sofreu problema no procedimento experimental.

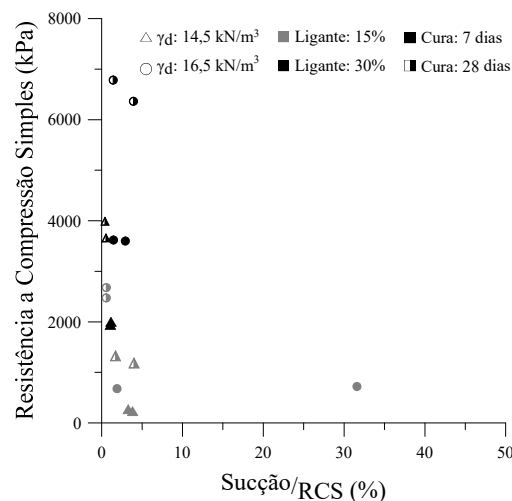


Figura 4.9: Medidas de sucção matricial (elaborado pela autora, 2021).

Logo, como grandes variações de sucção não foram constatadas, comprovando a saturação dos corpos de prova, pode-se descartar a sucção como um fator de influência na variável resposta. Ainda, para as amostras dos demais ensaios, descartou-se a necessidade do ensaio de sucção.

4.4. RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Na Figura 4.10 são expostos os resultados dos tratamentos estatísticos para a resistência a tração por compressão diametral das amostras moldadas os agentes cimentantes propostos. Esses resultados foram obtidos a partir da média simples das amostras executadas em cada tratamento. A execução dos ensaios ocorreu conforme apresentado na Tabela 3.2.

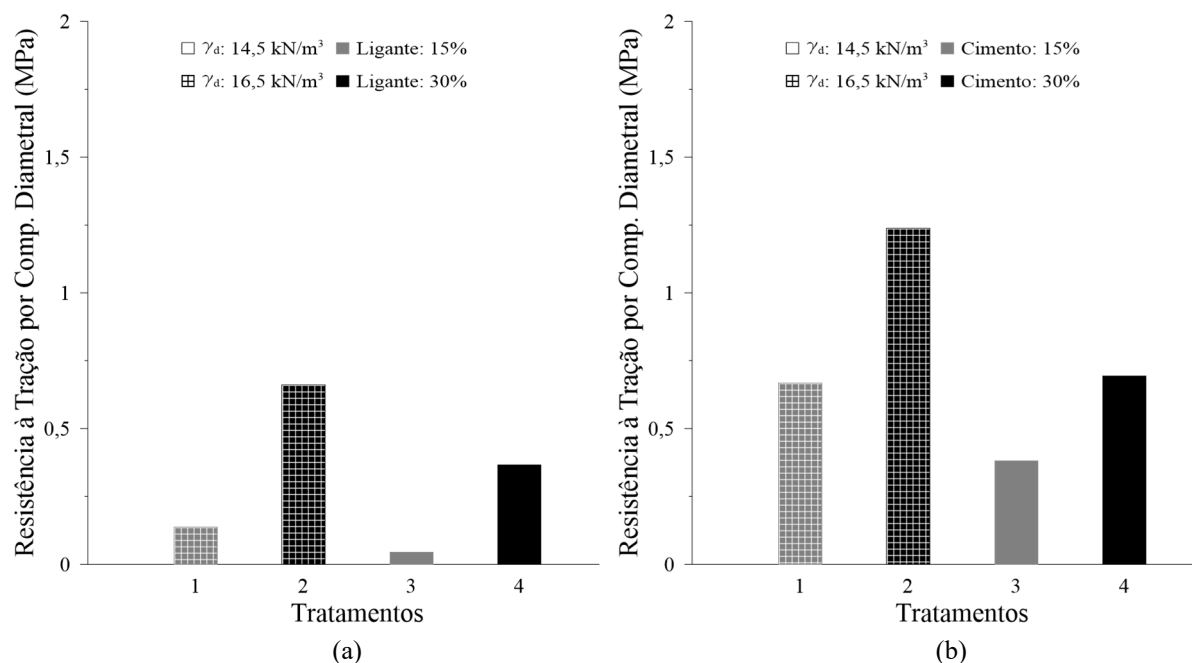


Figura 4.10: Resultados médios de resistência à tração por compressão diametral (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

A partir dos tratamentos pode-se dizer que o aumento nos níveis dos fatores controláveis, tanto para as amostras com ligante quanto para as amostras com Cimento Portland de alta resistência inicial, gerou aumento na resistência a tração. Os corpos de provas moldados com CPV-ARI demonstraram resistências maiores em relação aos moldados com ligante.

Como supramencionado, para fins de comparação direta, definiu-se que as porcentagens a serem usadas para as amostras com cimento seriam as mesmas que para as amostras com ligante (15% e 30%). Novamente, geralmente, quando se utiliza cimento Portland mantem-se as dosagens entre 2% e 14%, podendo variar ligeiramente, para mais ou para menos, em função das propriedades almejadas. De novo, considerando-se as porcentagens superiores utilizadas nessa pesquisa às habituais para o CPV-ARI, resistências maiores eram esperadas para o cimento Portland.

Os resultados obtidos para as amostras ensaiadas a resistência a tração por compressão diametral apresentaram-se similar aos resultados obtidos para as amostras ensaiadas a resistência à compressão simples. Com o aumento da porcentagem de ligante a um grande crescimento da quantidade de reações pozolânicas e, por conseguinte, da resistência a tração.

Uma vez mais, o peso específico aparente seco, como já mencionado, gera aumento da resistência em função da maior área de contato entre os grãos, ocasionada pela redução da porosidade, que resulta em um melhor intertravamento entre as partículas e em uma maior mobilização de atrito, que leva ao aumento da resistência, como identificado em diversas pesquisas com solos melhorados (CONSOLI, NIERWINSKI, *et al.*, 2018a; CONSOLI, SAMANIEGO, *et al.*, 2018b; FESTUGATO, FOURIE e CONSOLI, 2013; TOMASI, 2018; CONSOLI, MARIN, *et al.*, 2020).

4.4.1. Relações com os índices η/B_{iv} e η/C_{iv}

Os resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral das amostras ensaiadas com o ligante álcali-ativado e com o CPV-ARI traçados pelo índice porosidade/teor volumétrico de ligante e pelo índice porosidade/teor volumétrico de cimento, respectivamente, e encontram-se na Figura 4.11.

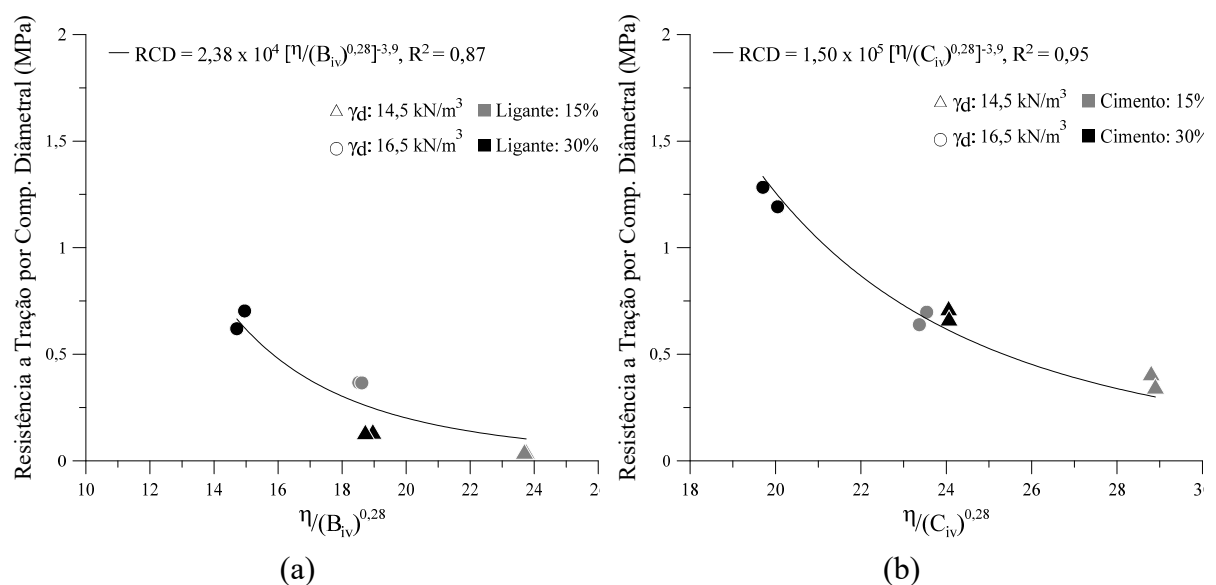


Figura 4.11: Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e o índice (a) η/B_{iv} ligante álcali-ativado e (b) η/C_{iv} cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

O aumento da resistência à tração por compressão diametral das amostras, assim como o aumento para as amostras ensaiadas a RCS, deu-se simultaneamente a redução do índice porosidade/teor volumétrico de ligante-cimento e o aumento do tempo de cura. Como supramencionado, a redução dos índices propicia, essencialmente, uma maior mobilização de

atrito entre as partículas, além de gerar uma maior precipitação de compostos cimentícios, levando ao aumento da resistência como resultado.

As curvas de resistência à tração por compressão diametral pelos índices porosidade/teor volumétrico de ligante e porosidade/teor volumétrico de cimento exibiram altos coeficientes de determinação (R^2). Para as amostras com ligante o valor foi de 87% e para as amostras com cimento o valor foi de 95%.

Novamente, os coeficientes de determinação dos CPs com CPV-ARI expressaram valores superiores aos do ligante, o esperado visto que o cimento é produzido industrialmente com alto controle tecnológico enquanto o ligante é produzido a partir de resíduos industriais. A Equação 4.9 exibe a relação encontrada para o ligante álcali-ativado e a Equação 4.10 e a relação referente ao cimento Portland.

$$RCD (MPa) = 2,38 \times 10^4 \left[\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,9} \quad \text{Equação 4.9}$$

$$RCD (MPa) = 1,50 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,9} \quad \text{Equação 4.10}$$

4.5. MÓDULO CISALHANTE INICIAL

Na Figura 4.12 são expostos os resultados dos tratamentos estatísticos realizados para o ensaio de pulso ultrassônico para as amostras moldadas com o ligante proposto e o cimento Portland. Esses resultados foram obtidos a partir da média simples das amostras ensaiadas em cada tratamento. A execução dos ensaios ocorreu conforme apresentado na Tabela 3.1.

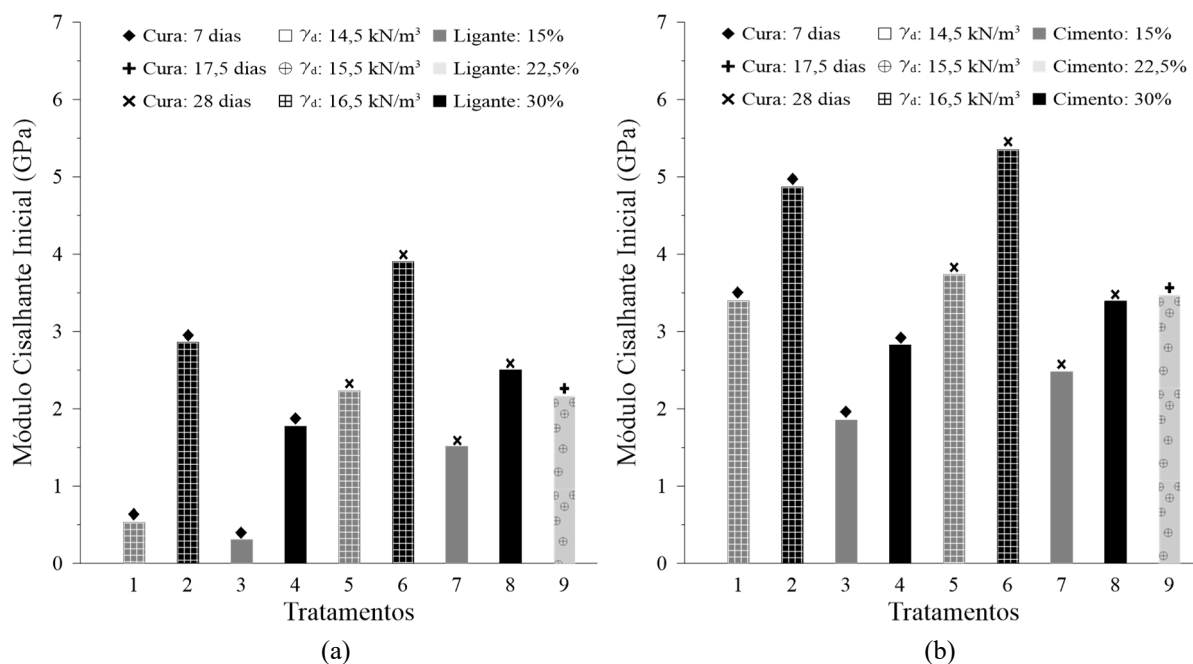


Figura 4.12: Resultados médios do módulo cisalhante inicial (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

A partir dos tratamentos é possível constatar que o aumento nos níveis dos fatores controláveis, tanto para as amostras com ligante quanto para as amostras com Cimento Portland de alta resistência inicial, gerou aumento na resistência, comportamento semelhante ao visto anteriormente para RCS e RCD. E, outra vez, as amostras com CPV-ARI demonstraram melhores resultados em relação as amostras com ligante, entretanto essa diferença de magnitude foi significativamente menor do que nos resultados obtidos de resistência a compressão simples e resistência a tração.

Com os resultados obtidos foi possível evidenciar os efeitos de cada fator controlável, bem como das interações de segunda ordem, de forma quantitativa, nos gráficos de Pareto exibidos na Figura 4.13.

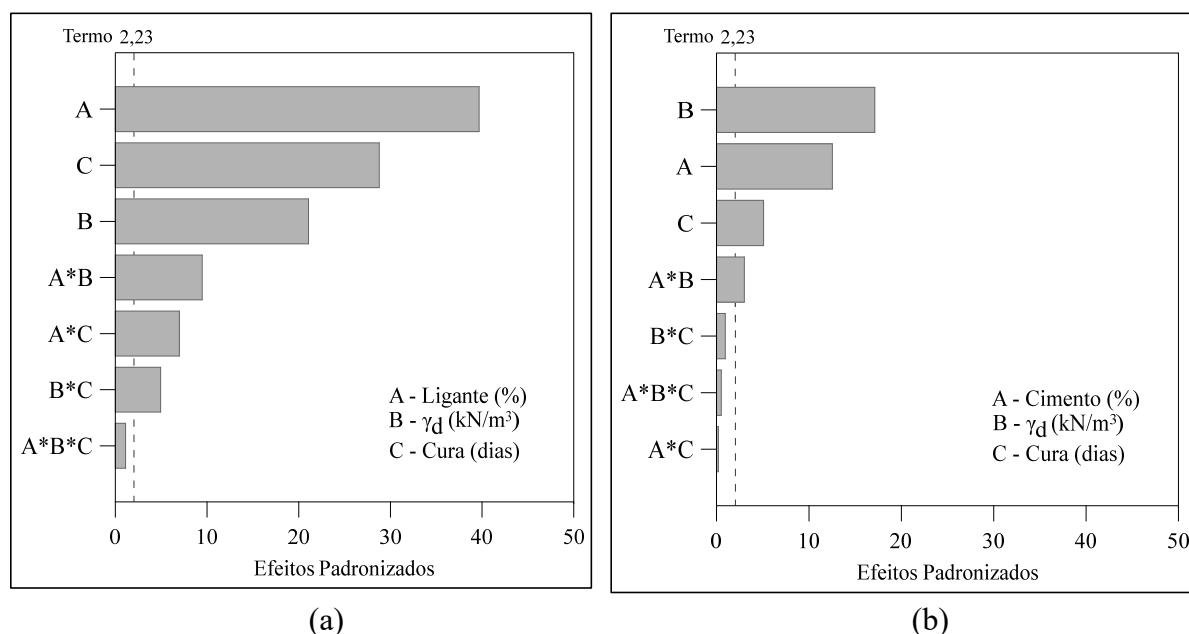


Figura 4.13: Gráficos de Pareto da rigidez (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Como constata-se na Figura 4.13 (a), todos os fatores principais (A – Teor de Ligante, B – Peso Específico Aparente Seco e C – Tempo de Cura) são estatisticamente significativos para a rigidez das amostras com o ligante álcali-ativado, assim como as interações de segunda ordem A*B, A*C e B*C. A interação de terceira ordem A*B*C não mostrou influência significativa sobre a variável resposta. Ainda, o teor de ligante mostrou-se o mais significativo, seguido pelo tempo de cura, pelo peso específico aparente seco e pelas interações A*B, A*C e B*C, respectivamente.

Na Figura 4.13 (b) observa-se que para a rigidez das amostras cimentos com CPV-ARI, todos os fatores principais (A – Teor de Cimento, B – Peso Específico Aparente Seco e C – Tempo de Cura) foram significativos, assim como a interação de segunda ordem A*B. As interações de segunda ordem A*C e B*C, como também a interação de terceira ordem A*B*C, não se demonstraram significativas.

O comportamento dos efeitos padronizados encontrados na Figura 4.13 foi o mesmo já observado para a Resistência a Compressão Simples. Podendo, deste modo, explicá-lo com base nos mesmos pressupostos apontados no Item 4.2. Com base na análise estatística fez-se a avaliação da influência dos fatores principais isolados e, também, de suas interações. Na Figura

4.14 é apresentado a análise dos efeitos principais significativos na variável resposta e na Figura 4.15 a análise das interações.

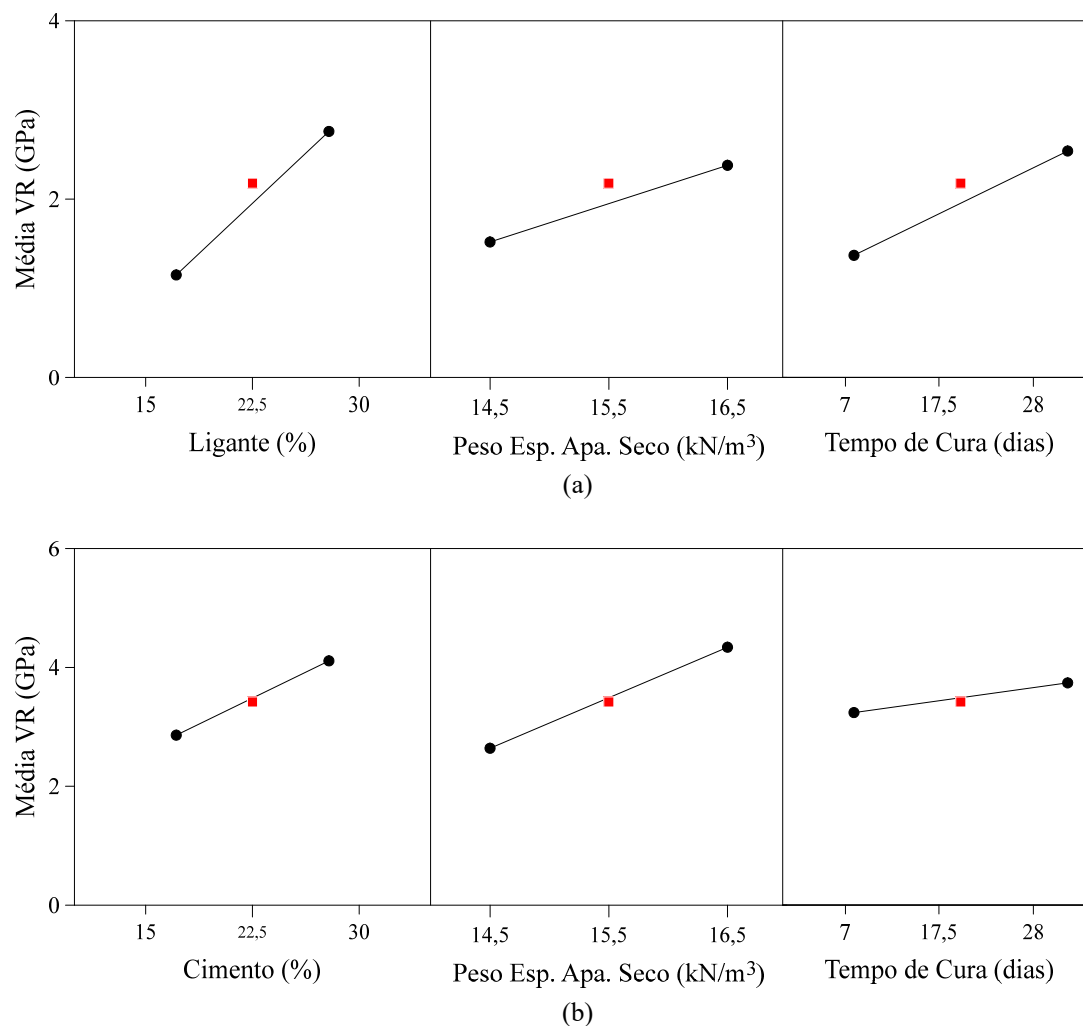


Figura 4.14: Efeitos principais rigidez (a) ligante álcali- ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021)

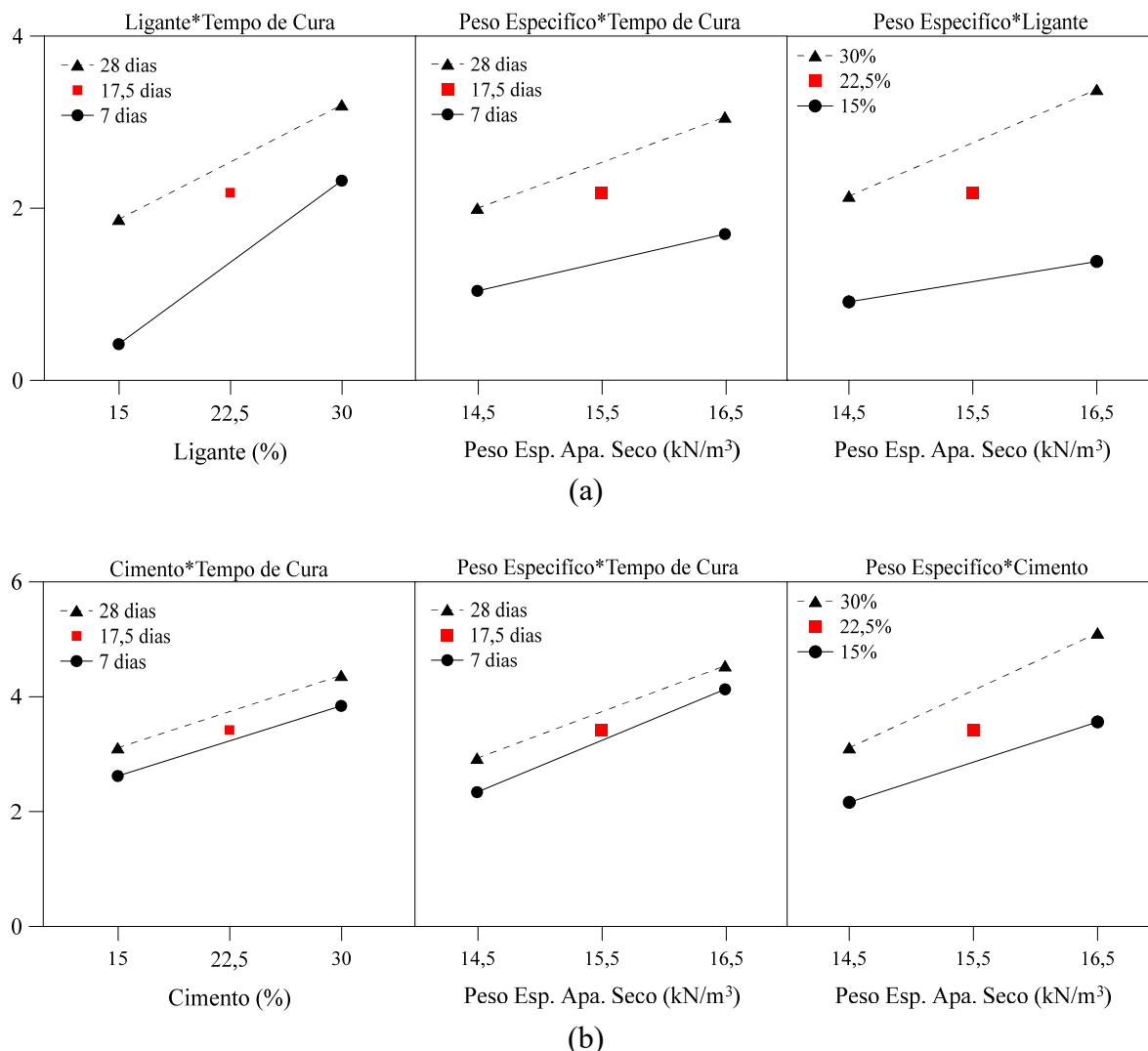


Figura 4.15: Interações rigidez (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021)

Basicamente, com os resultados expressos na Figura 4.14 e na Figura 4.15, percebe-se que todos os fatores principais, assim como as interações que se mostraram significativas, levaram ao aumento da resistência, tanto para as amostras com o ligante álcali-ativado quanto para as amostras com cimento Portland, com o aumento dos seus níveis.

Os resultados de rigidez também foram correlacionados aos fatores controláveis e, através de uma regressão linear, foi possível determinar equações de previsão da rigidez para o ligante (Equação 4.11) e para o cimento Portland (Equação 4.12). Ainda, foram incorporados ao modelo de regressão linear apenas os fatores e interações que exercem maior impacto na variável resposta.

$$G_0 \text{ (GPa)} = 4,51 - 0,3369A - 0,430B - 0,1517C + 0,03071AB + 0,00263AC + 0,01600BC + 0,2243 \quad \text{Equação 4.11}$$

$$G_0 \text{ (GPa)} = -8,15 - 0,141A + 0,607B + 0,202C + 0,0143 AB - 0,072 \quad \text{Equação 4.12}$$

Os coeficientes de determinação das equações são, respectivamente, 0,9941 e 0,9638. Ou melhor dizendo, as equações estabelecidas são capazes de explicar 99,41% e 96,38% da variação dos dados com relação ao modelo de regressão utilizado.

4.5.1. Relações com os índices η/B_{iv} e η/C_{iv}

Novamente, os resultados de rigidez das amostras ensaiadas com o ligante álcali-ativado e com o CPV-ARI foram traçados pelo índice porosidade/teor volumétrico de ligante e pelo índice porosidade/teor volumétrico de cimento, respectivamente, e encontram-se na Figura 4.16.

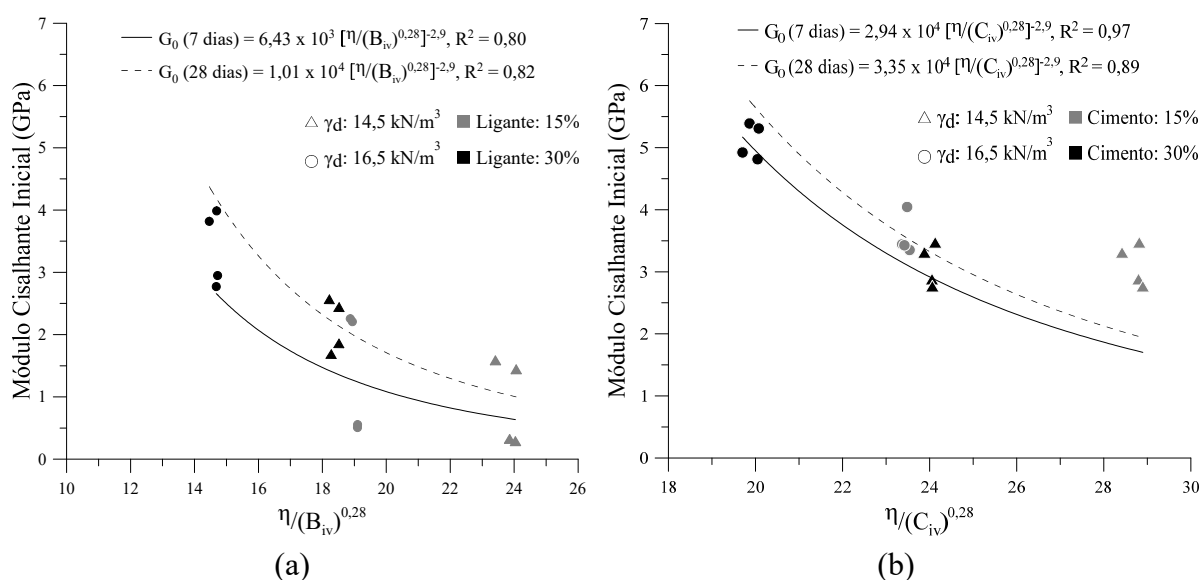


Figura 4.16: Relação entre a rigidez e o índice (a) η/B_{iv} ligante álcali-ativado e (b) η/C_{iv} cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

De maneira geral, o aumento da rigidez das amostras deu-se concomitantemente a redução do índice porosidade/teor volumétrico de ligante-cimento e o aumento do tempo de cura. A

redução dos índices propicia, basicamente, como supracitado, uma maior mobilização de atrito entre as partículas, além de gerar uma maior precipitação de compostos cimentícios.

Ao comparar as curvas das amostras com ligante e com cimento percebe-se que o aumento de rigidez com o cimento alternativo foi mais expressivo e que as amostras com ligante apresentaram rigidezes bem próximas das amostras com cimento Portland. Isto se dá pelo fato de que o aumento expressivo do teor de cimento não gera a mesma magnitude de aumento da rigidez, a partir de aproximadamente 14% (limite máximo, comumente, utilizado de teor de cimento), o aumento da rigidez passa a menor, enquanto com o ligante álcali-ativado isso não ocorre.

Além disso, as amostras com CPV-ARI tiveram um aumento menor de sua rigidez com o tempo de cura do que as amostras com o ligante álcali-ativado, certamente, como visto anteriormente, devido aos produtos das reações da cal com os aluminossilicatos continuaram a se formar ao longo dos 28 dias de cura.

As curvas de rigidez pelos índices porosidade/teor volumétrico de ligante e porosidade/teor volumétrico de cimento exibiram bons coeficiente de determinação (R^2), considerando que, usualmente, as relações do G_0 com os índices η/B_{iv} e η/C_{iv} , são menores quando comparados com as relações de RCS e RCD com os índices. Para as amostras com ligante, os valores foram de 80% e 82% para 7 e 28 dias, respectivamente. Os coeficientes para as amostras com cimento foram 97% e 89%, para 7 e 28 dias, na ordem.

Os coeficientes de determinação dos CPs com CPV-ARI expressaram valores superiores aos do ligante novamente, o esperado, devido ao alto controle tecnológico com que o cimento é produzido, diferente do ligante alternativo, que é produzido a partir de resíduos industriais. A Equação 4.13 e a Equação 4.14 exibem as relações encontradas para o ligante álcali-ativado e a Equação 4.15 e a Equação 4.16 as relações referentes ao cimento Portland.

$$G_0 (GPa)_{7 \text{ dias}} = 6,43 \times 10^3 \left[\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right]^{-2,9} \quad \text{Equação 4.13}$$

$$G_0 \text{ (GPa)}_{28 \text{ dias}} = 1,01 \times 10^4 \left[\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right]^{-2,9} \quad \text{Equação 4.14}$$

$$G_0 \text{ (GPa)}_{7 \text{ dias}} = 2,94 \times 10^4 \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{-2,9} \quad \text{Equação 4.15}$$

$$G_0 \text{ (GPa)}_{28 \text{ dias}} = 3,35 \times 10^4 \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{-2,9} \quad \text{Equação 4.16}$$

A partir da Equação 4.13, da Equação 4.14, da Equação 4.15 e da Equação 4.16 é visível que apesar dos expoentes externos das equações serem iguais, suas constantes iniciais são distintas. Assim, o comportamento mecânico de misturas foi normalizado, tornando possível a geração de uma relação única para a previsão do comportamento, independente das distintas variáveis consideradas, neste caso especificamente, o tempo de cura.

A normalização é dada pela razão dos resultados resistência à compressão simples por um valor fixo de resistência, para um dado valor pré-estabelecido de $\eta/B_{iv}^{0,28}$ igual a 19 e de $\eta/C_{iv}^{0,28}$ igual a 24, por serem valores centrais nas duas curvas. Assim, na Figura 4.17 são expostas as curvas de rigidez normalizadas para as amostras álcali-ativadas e cimentadas para ambos os tempos de cura.

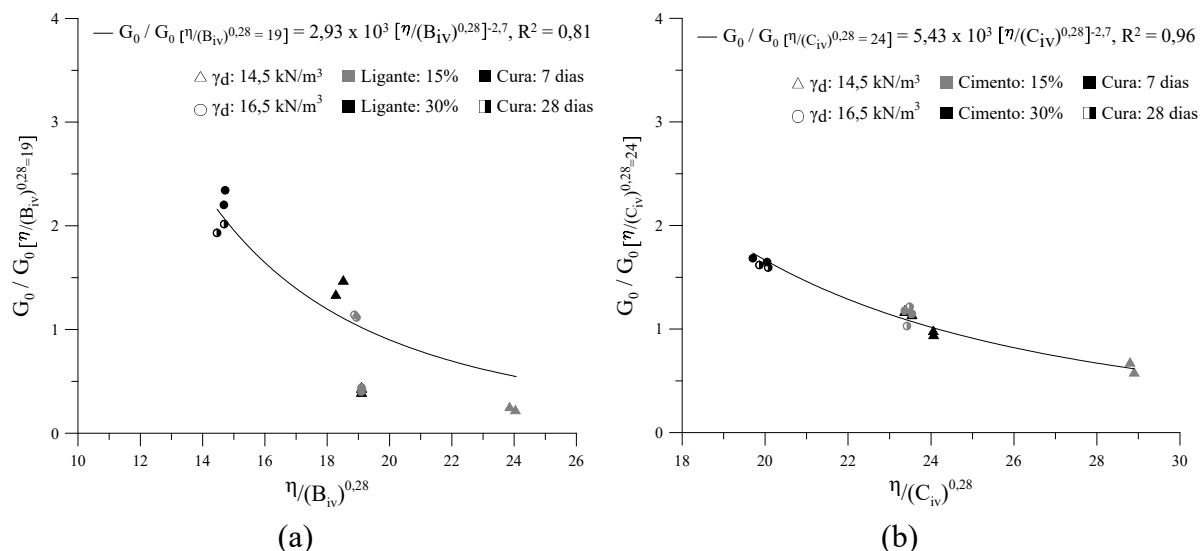


Figura 4.17: Rigidez normalizada para ambos tempos de cura (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Deste modo foi possível obter uma relação única entre a rigidez e os índices porosidade/teor volumétrico de ligante e porosidade/teor volumétrico de cimento para as amostras com ligante e com cimento. Na Equação 4.17 é exibida a relação obtida para o ligante e na Equação 4.18 a relação obtida para o cimento.

$$\frac{G_0}{G_0(\eta/B_{iv}=19)} = 2,93 \times 10^3 \left[\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right]^{-2,7} \quad \text{Equação 4.17}$$

$$\frac{G_0}{G_0(\eta/B_{iv}=24)} = 5,43 \times 10^3 \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{-2,7} \quad \text{Equação 4.18}$$

Os coeficientes de determinação das equações da rigidez normalizadas foram 81% e 96%, respectivamente, para o ligante e para o cimento. Os R^2 demonstram a viabilidade da normalização com diferentes tempos de cura e a possibilidade de utilizar essas equações para previsão da rigidez.

4.5.2. Relações com a resistência à compressão simples

Na Figura 4.18 são apresentados os resultados de rigidez pelos resultados de resistência à compressão simples das amostras ensaiadas com ligante e cimento Portland. O coeficiente de determinação das retas foi de 93% e 98%, respectivamente, para as amostras com ligante e para as amostras com cimento Portland.

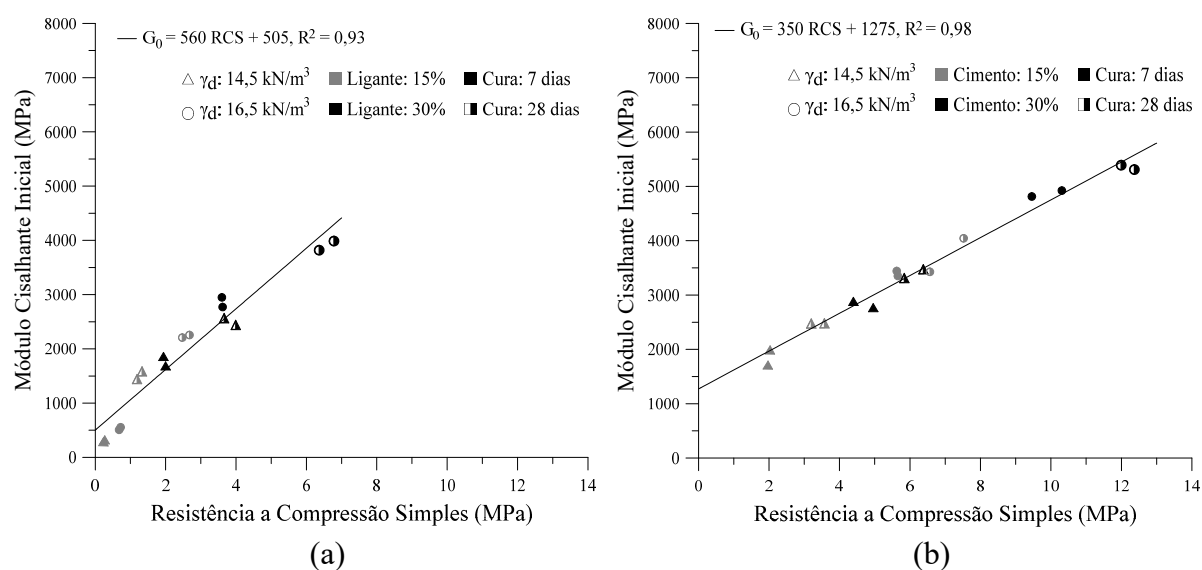


Figura 4.18: Rigidez pela resistência à compressão simples (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Pelos dados expressos no gráfico infere-se que o aumento da rigidez é linear ao aumento da resistência a compressão simples e a mesma pode ser obtida pela Equação 4.19 para o ligante alternativo e pela Equação 4.20 para o CPV-ARI. Novamente, pelas retas apresentadas, nota-se que o aumento da rigidez com o aumento da RCS é mais expressivo para as amostras com ligante do que para as amostras com cimento.

$$G_{0\text{ligante}} = 560RCS + 505 \quad \text{Equação 4.19}$$

$$G_{0\text{cimento}} = 350RCS + 505 \quad \text{Equação 4.20}$$

A normalização da rigidez pela resistência a compressão simples, com base nos R^2 encontrados nas retas da Figura 4.18, demonstrou-se viável para determinação do módulo de cisalhamento inicial. Assim, com a Equação 4.19, para o ligante alternativo, e a Equação 4.20, o CPV-ARI, é possível prever a rigidez a partir de um dado valor de resistência.

4.6. DURABILIDADE

Os resultados do ensaio de durabilidade foram decompostos em termos de perda de massa individual por ciclo (PMI) e perda de massa acumulada dos ciclos (PMA). Na Figura 4.19 são expostos os resultados de perda de massa individual.

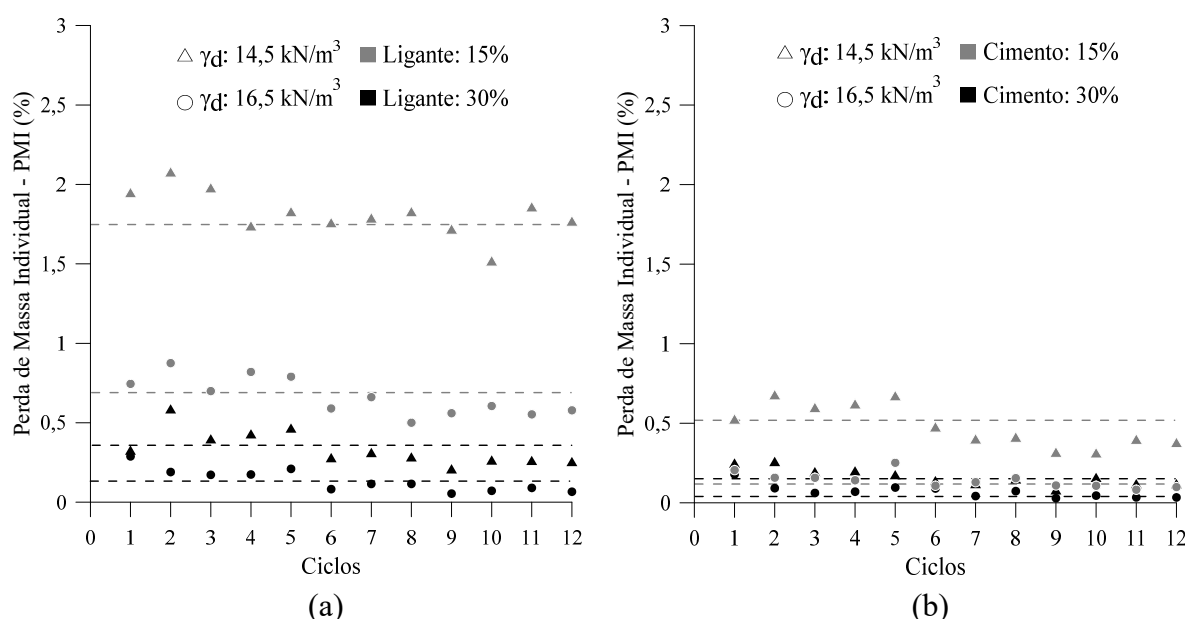


Figura 4.19: Perda de massa individual (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Conforme demonstrado na Figura 4.19 a perda de massa individual das amostras álcali-ativas e das amostras com cimento Portland ocorre, preponderantemente, de maneira contínua e gradativa com algumas pequenas variações, possivelmente, em consequência de alguma perturbação sofrida pelas amostras durante o procedimento experimental. Assim, de modo geral, o ensaio apresentou bons resultados e pequena dispersão. Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados médios da perda de massa individual.

Tabela 4.2: Perda de massa individual média

Peso Esp. Apa. Seco (kN/m ³)	Ligante (%)	Agente Cimentante	PMI (%)
16,5	15	Ligante Álcali-ativado	0,66
16,5	30		0,14
14,5	15		1,82
14,5	30		0,34
16,5	15	Cimento Portland	0,14
16,5	30		0,07
14,5	15		0,48
14,5	30		0,16

A PMI das amostras com o ligante álcali ativado, de modo geral, não exibiu perdas maiores que 2%, enquanto a PMI das amostras com cimento Portland não ultrapassou nem 0,5%. Para os dois agentes cimentantes, o ponto com peso específico aparente seco de 14,5kN/m³ e 15% de ligante/cimento, expressou perda elevada em relação aos outros pontos.

Assim como para os ensaios de resistência e rigidez, no ensaio de durabilidade o cimento demonstrou melhor comportamento mecânico. Contudo, a durabilidade dos CPs com o ligante álcali-ativado, em alguns pontos (com maior porcentagem de agente cimentante), apresentou comportamento próximo ao do cimento Portland. A Figura 4.20 traz os resultados de perda de massa acumulada para o ligante álcali-ativado e para o cimento Portland.

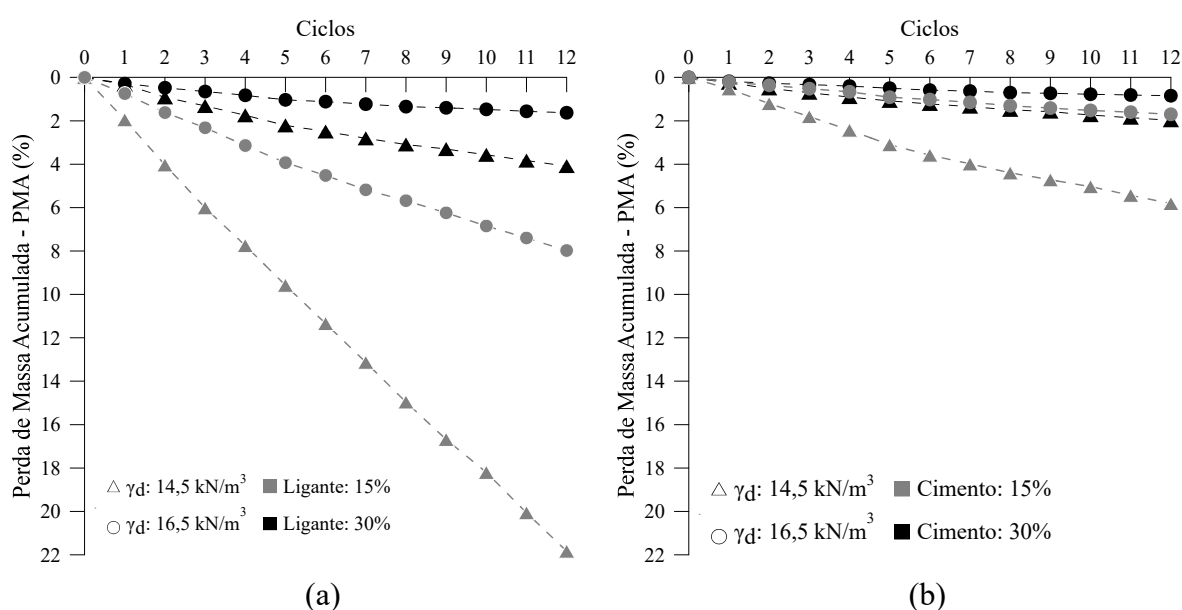


Figura 4.20: Perda de massa acumulada (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

A partir dos resultados apresentados na Figura 4.20, percebe-se que o agente cimentante e o peso específico aparente seco exercem grande influência sobre a durabilidade. Ainda, é visível que para as amostras de ligante o agente cimentante desempenha maior influência sobre a durabilidade e que para as amostras de cimento o peso específico é mais relevante

Como explicado anteriormente, nos ensaios de resistência e de rigidez, a influência do peso específico se dá pela maior área de contato entre os grãos da amostra, devido à menor porosidade, resultando, por conseguinte, no aumento de resistência devido à maior mobilização de atrito entre as partículas. Enquanto a influência do teor de ligante é justificada pela maior quantidade de reações ocasionadas pelo acréscimo de agente cimentante. Na Tabela 4.3 apresentam-se os resultados da perda de massa acumulada ao final dos doze ciclos.

Tabela 4.3: Perda de massa acumulada

Peso Esp. Apa. Seco (kN/m ³)	Ligante (%)	Agente Cimentante	PMA (%)
16,5	15		7,98
16,5	30	Ligante	1,63
14,5	15	Álcali-ativado	21,83
14,5	30		4,09
16,5	15		1,70
16,5	30	Cimento Portland	0,84
14,5	15		5,81
14,5	30		1,98

As perdas de massa acumulada máxima e mínima para o ligante proposto foram, respectivamente, 21,83% e 1,63%, uma diferença significativa, de mais de 20%. Em contrapartida, as perdas máxima e mínima para o CPV-ARI resultaram em, na ordem, 0,84% e 1,98%, uma disparidade de pouco mais de 1% apenas.

4.6.1. Relações com os índices η/B_{iv} e η/C_{iv}

Os resultados de perda de massa acumulada (PMA) dos ciclos 1, 3, 6, 9 e 12 do ensaio de durabilidade foram correlacionados com os índices η/B_{iv} e η/C_{iv} , conforme Figura 4.21.

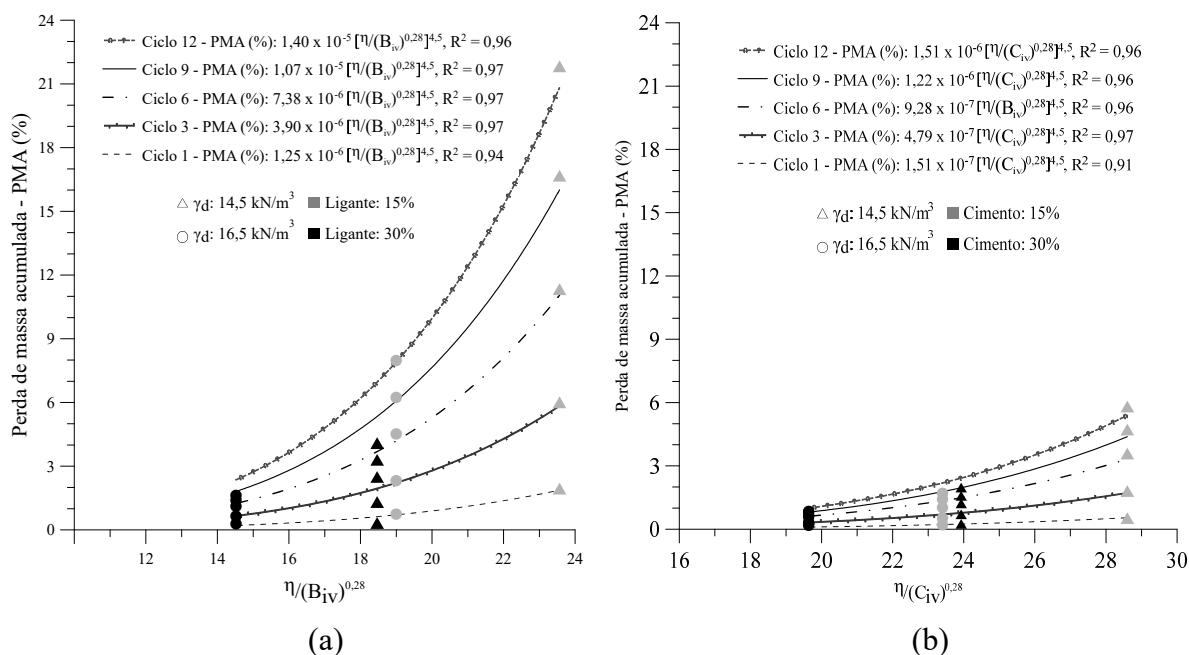


Figura 4.21: Relação entre a perda de massa acumulada ao longo dos ciclos e o (a) η/B_{iv} ligante álcali-ativado e (b) η/C_{iv} cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Como evidenciado para as resistências a compressão e tração e para a rigidez, a redução da relação entre a porosidade e o agente cimentante é eficaz para melhora das propriedades mecânicas do rejeito estabilizado. A redução da porosidade, como já mencionado, leva a um melhor intertravamento entre as partículas e mobilização de atrito e, por consequência, a um aumento da durabilidade. Enquanto o aumento do agente cimentante contribui para a melhora da durabilidade com o aumento das reações pozolânicas.

Nas Equação 4.21, Equação 4.22, Equação 4.23, Equação 4.24 e Equação 4.25 são apresentadas as expressões matemáticas para as curvas de perda de massa acumulada das amostras com ligante e nas Equação 4.26, Equação 4.27, Equação 4.28, Equação 4.29 e Equação 4.30 das amostras com cimento Portland.

$$PMA_{Ciclo\ 1}(\%) = 1,25 \times 10^{-6} \left[\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right]^{4,5} \quad \text{Equação 4.21}$$

$$PMA_{Ciclo\ 3}(\%) = 3,90 \times 10^{-6} \left[\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right]^{4,5} \quad \text{Equação 4.22}$$

$$PMA_{Ciclo\ 6}(\%) = 7,38 \times 10^{-6} \left[\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right]^{4,5} \quad \text{Equação 4.23}$$

$$PMA_{Ciclo\ 9}(\%) = 1,07 \times 10^{-5} \left[\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right]^{4,5} \quad \text{Equação 4.24}$$

$$PMA_{Ciclo\ 12}(\%) = 1,40 \times 10^{-5} \left[\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right]^{4,5} \quad \text{Equação 4.25}$$

$$PMA_{Ciclo\ 1}(\%) = 1,51 \times 10^{-7} \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{4,5} \quad \text{Equação 4.26}$$

$$PMA_{Ciclo\ 3}(\%) = 4,79 \times 10^{-7} \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{4,5} \quad \text{Equação 4.27}$$

$$PMA_{Ciclo\ 6}(\%) = 9,28 \times 10^{-7} \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{4,5} \quad \text{Equação 4.28}$$

$$PMA_{Ciclo\ 9}(\%) = 1,22 \times 10^{-6} \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{4,5} \quad \text{Equação 4.29}$$

$$PMA_{Ciclo\ 12}(\%) = 1,51 \times 10^{-6} \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{4,5} \quad \text{Equação 4.30}$$

As relações entre a perda de massa ao longo dos ciclos de durabilidade e os índices η/B_{iv} e η/C_{iv} obtiveram coeficientes de determinação elevados, o menor sendo 91%, demonstrando a

viabilidade de utilizar os índices η/B_{iv} e η/C_{iv} como metodologia de dosagem para ambos agentes cimentantes.

4.7. MÓDULO CISALHANTE INICIAL AO LONGO DOS CICLOS DE DURABILIDADE

A Figura 4.22 expõe os resultados de rigidez dos ciclos de molhagem e secagem do ensaio de durabilidade, para ambos agentes cimentantes propostos.

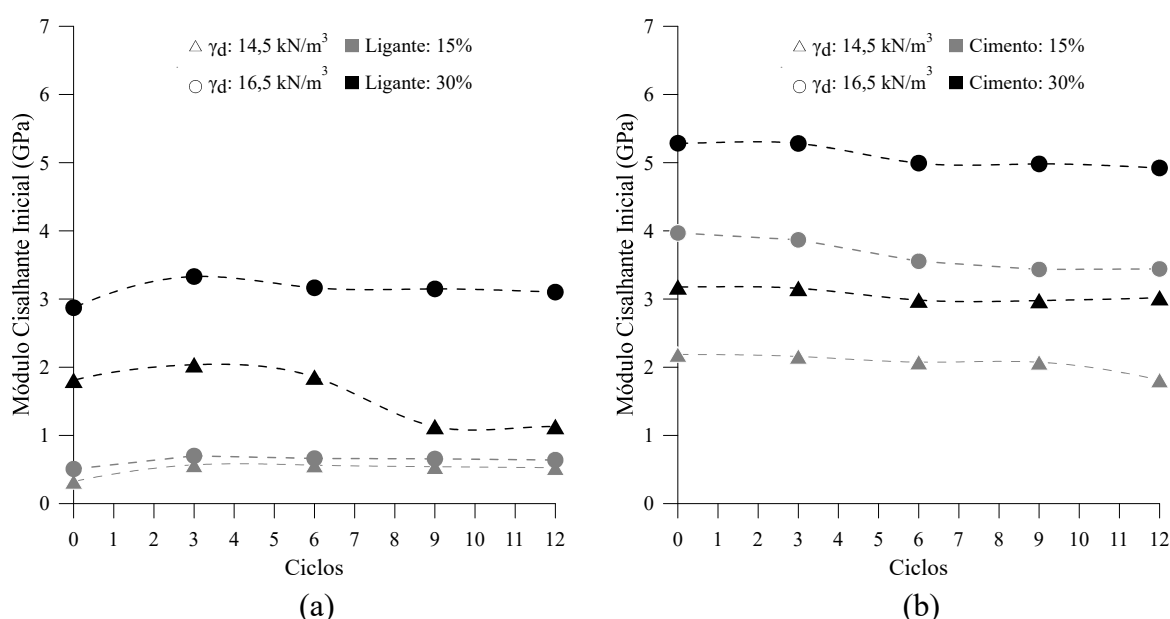


Figura 4.22: Módulo cisalhante inicial ao longo dos ciclos de durabilidade (a) ligante álcali-ativado (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021)

Nas amostras estabilizadas com o ligante álcali-ativado, a rigidez apresentou um pequeno aumento ao longo dos três primeiros ciclos de molhagem e secagem e, a partir desse estágio, passou a decrescer nos próximos ciclos.

A ação abrasiva da escova em conjunto com os ciclos de molhagem e secagem do ensaio de durabilidade, causam perda de massa e degradação da rigidez das amostras. Entretanto, inicialmente houve um acréscimo de rigidez, possivelmente, pelo procedimento do ensaio, que submete as amostras a imersão em água e, então, a altas temperaturas. Esse processo propicia a aceleração das reações que não ocorreram nos 7 dias de cura das amostras e, pelo menos a princípio, esse efeito positivo foi maior que a degradação gerada pela escovação.

Fato este que não ocorreu com as amostras estabilizadas com o cimento Portland, certamente, pelo fato de o CPV-ARI desenvolver cerca de 80% da sua resistência e rigidez nos primeiros 7 dias. Assim, transcorrido, os 7 dias de cura, poucas reações ainda estão por ocorrer, não sendo suficientes para neutralizar ou superar o efeito negativo da escovação.

4.7.1. Relações com os índices η/B_{iv} e η/C_{iv}

Na Figura 4.23 são expressos os resultados da degradação da rigidez ao longo dos ciclos 0, 3, 6, 9 e 12 do ensaio de durabilidade correlacionados aos os índices η/B_{iv} e η/C_{iv} .

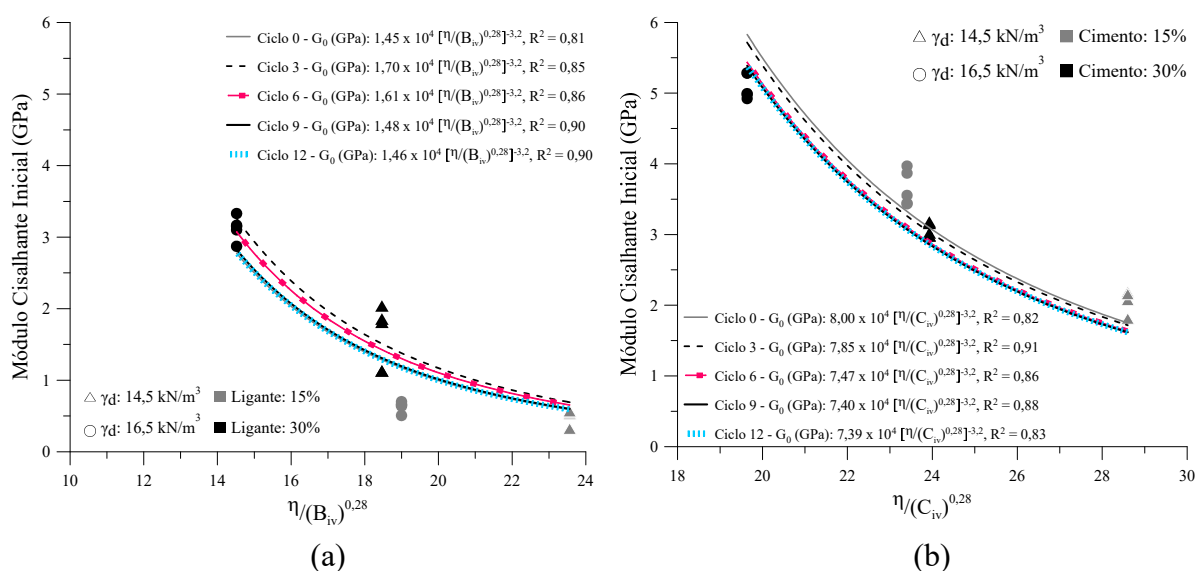


Figura 4.23: Relação entre a rigidez ao longo dos ciclos de durabilidade e o (a) η/B_{iv} ligante álcali-ativado e (b) η/C_{iv} cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Similar ao observado para os ensaios de resistência e rigidez, a redução do índice porosidade/teor volumétrico de agente cimentante para as amostras ensaiadas a rigidez ao longo dos ciclos de durabilidade proporcionou a melhora do comportamento mecânico dessas misturas. Por fim, nas Equação 4.31, Equação 4.32, Equação 4.33, Equação 4.34 e Equação 4.35 são apresentadas as expressões matemáticas para as curvas de perda de massa acumulada das amostras com ligante e nas Equação 4.36, Equação 4.37, Equação 4.38, Equação 4.39 e Equação 4.40 das amostras com cimento Portland.

$$PMA_{Ciclo\ 0}(\%) = 1,45 \times 10^4 \left[\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,2} \quad \text{Equação 4.31}$$

$$PMA_{Ciclo\ 3}(\%) = 1,70 \times 10^4 \left[\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,2} \quad \text{Equação 4.32}$$

$$PMA_{Ciclo\ 6}(\%) = 1,61 \times 10^4 \left[\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,2} \quad \text{Equação 4.33}$$

$$PMA_{Ciclo\ 9}(\%) = 1,48 \times 10^4 \left[\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,2} \quad \text{Equação 4.34}$$

$$PMA_{Ciclo\ 12}(\%) = 1,46 \times 10^4 \left[\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,2} \quad \text{Equação 4.35}$$

$$PMA_{Ciclo\ 0}(\%) = 8,00 \times 10^4 \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,2} \quad \text{Equação 4.36}$$

$$PMA_{Ciclo\ 3}(\%) = 7,85 \times 10^4 \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,2} \quad \text{Equação 4.37}$$

$$PMA_{Ciclo\ 6}(\%) = 7,47 \times 10^4 \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,2} \quad \text{Equação 4.38}$$

$$PMA_{Ciclo\ 9}(\%) = 7,40 \times 10^4 \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,2} \quad \text{Equação 4.39}$$

$$PMA_{Ciclo\ 12}(\%) = 7,39 \times 10^4 \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{-3,2} \quad \text{Equação 4.40}$$

As relações entre a degradação da rigidez ao longo dos ciclos de durabilidade e os índices η/B_{iv} e η/C_{iv} alcançaram expressivos valores de coeficiente de determinação, o menor sendo 81%, demonstrando a viabilidade de utilizar os índices η/B_{iv} e η/C_{iv} para previsão da rigidez ao decorrer dos ciclos de durabilidade para ambos agentes cimentantes.

4.8. LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO

Neste Item são apresentados resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização (ensaios NBR 10.005 (ABNT, 2004b) e NBR 10.006 (ABNT, 2004c)) realizados na presente pesquisa para caracterização dos materiais e, então, os dados do ensaio lixiviação dinâmica (ensaio com permeâmetro) para melhor compreensão dos dados expostos.

4.8.1. Caracterização – lixiviação e solubilização

Na Tabela 4.4 são apresentados os elementos contidos no extrato lixiviado do rejeito de mineração de ouro e os limites máximos de cada componente estabelecidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a) para caracterizar a periculosidade de um resíduo. Os elementos contidos no extrato lixiviado foram: Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cromo, Mercúrio, Prata e Selênio. O único a apresentar valores superiores aos indicados pelo anexo F da norma foi o Mercúrio.

Tabela 4.4: Resultados ensaio de lixiviação do rejeito de ouro NBR 10.005 (ABNT, 2004b)

Elemento	Limite estabelecido (mg/L)	Contido no lixiviado (mg/L)
Arsênio	1,000	0,104
Bário	70,00	0,041
Cádmio	0,500	0,005
Chumbo	1,000	0,034
Cromo	5,000	0,198
Mercúrio	0,100	0,322*
Prata	5,000	<0,010
Selênio	1,000	0,095

*Valores superiores ao indicado pelo anexo F, NBR 10.004 (ABNT, 2004a).

Na Tabela 4.5 encontram-se os elementos contidos no extrato solubilizado do rejeito de ouro e os limites máximos estabelecidos no anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004a). Os elementos encontrados são: Alumínio, Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cloreto, Cobre, Cromo, Ferro,

Manganês, Mercúrio, Nitrato, Prata, Selênio, Sódio e Zinco. Assim, de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004a) o resíduo é classificado como Classe 1 – Perigoso.

Tabela 4.5: Resultados ensaio de solubilização do rejeito de ouro NBR 10.006 (ABNT, 2004c).

Elemento	Limite estabelecido (mg/L)	Contido no Solubilizado (mg/L)
Alumínio	0,200	20,20*
Arsênio	0,010	0,063*
Bário	0,700	0,162
Cádmio	0,005	0,038*
Chumbo	0,010	> 0,090*
Cloreto	250,0	2,310
Cobre	2,000	0,478
Cromo	0,050	1,050*
Ferro	0,300	> 2,000*
Manganês	0,100	2,390*
Mercúrio	0,001	1,470*
Nitrato	10,00	8,040
Prata	0,050	< 0,010
Selênio	0,010	> 0,050*
Sódio	200,0	< 0,200
Surfactantes	0,500	**
Zinco	5,000	4,040

*Valores superiores ao indicado pelo anexo G, NBR 10.004 (ABNT, 2004a).

**presença não detectada no extrato solubilizado

Dos elementos contidos no extrato solubilizado os que apresentaram valores maiores dos que os estipulados pela norma supramencionada foram: Alumínio, Arsênio, Cádmio, Chumbo, Cromo, Ferro, Manganês, Mercúrio e Selênio.

Na Tabela 4.6 são expostos os resultados da análise do extrato lixiviado da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Assim como o rejeito de mineração de ouro, a cinza apresentou valor de Mercúrio acima do estabelecido pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a).

Tabela 4.6: Resultados ensaio de lixiviação da cinza do bagaço de cana-de-açúcar NBR 10.005 (ABNT, 2004b).

Elemento	Limite estabelecido (mg/L)	Contido no Solubilizado (mg/L)
Arsênio	1,000	0,130
Bário	70,00	0,660
Cádmio	0,500	0,030
Chumbo	1,000	0,220
Cromo	5,000	0,130
Mercúrio	0,100	0,140*
Prata	5,000	0,120
Selênio	1,000	0,670

*Valores superiores ao indicado pelo anexo F, NBR 10.004 (ABNT, 2004a).

Na Tabela 4.7 exibe-se os resultados do extrato solubilizado, os elementos contidos acima dos valores de referência da norma supramencionada foram: Alumínio, Arsênio, Cádmio, Chumbo, Cromo, Ferro, Mercúrio, Prata e Selênio.

A partir desses resultados a cinza de bagaço de cana-de-açúcar foi classificada, com base no anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004a), como um resíduo da Classe I – Perigoso.

Tabela 4.7: Resultados ensaio de solubilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar NBR 10.006 (ABNT, 2004c).

Elemento	Limite estabelecido (mg/L)	Contido no Solubilizado (mg/L)
Alumínio	0,200	4,220*
Arsênio	0,010	0,090*
Bário	0,700	**
Cádmio	0,005	0,023*
Chumbo	0,010	0,170*
Cloreto	250,0	6,290
Cobre	2,000	0,120
Cromo	0,050	0,090*
Ferro	0,300	0,710*
Manganês	0,100	**
Mercúrio	0,001	0,100*
Prata	0,050	0,120*
Selênio	0,010	0,390*
Sódio	200,0	11,85

Estabilização de um rejeito de mineração de ouro por meio da álcali-ativação de cal de carbureto e cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Elemento	Limite estabelecido (mg/L)	Contido no Solubilizado (mg/L)
Surfactantes	0,500	**
Zinco	5,000	0,020

*Valores superiores ao indicado pelo anexo G, NBR 10.004 (ABNT, 2004a).

**presença não detectada no extrato solubilizado

4.8.2. Lixiviação dinâmica – lixiviação com permeâmetro

Na Figura 4.24 são exibidos os valores de pH encontrados para as amostras com ligante álcali-ativado e com cimento Portland ao longo das coletas do ensaio de lixiviação. As coletas de lixiviado do rejeito apresentaram pH ácido de, na ordem: 1,84; 4,0 e 5,22 e as coletas da cinza do bagaço da cana-de-açúcar pH neutro a levemente alcalino de, respectivamente: 7,48; 6,98 e 8,93.

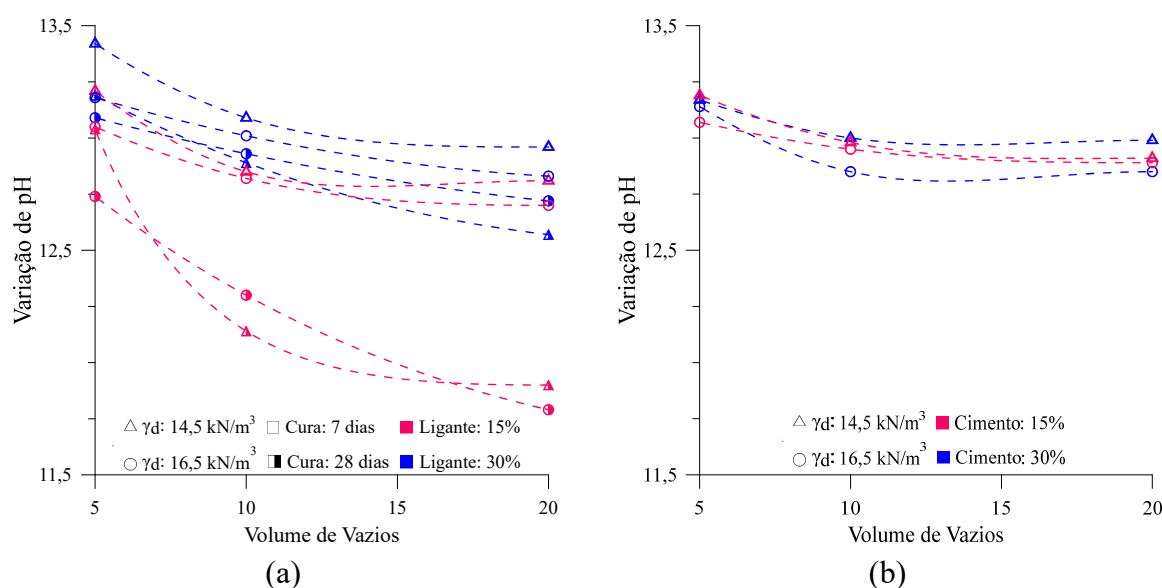


Figura 4.24: Variação de pH das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

A partir dos dados expressos na Figura 4.24 é possível observar que ao longo do ensaio de lixiviação a alcalinidade do lixiviado reduz gradualmente. Além disso, nota-se que, de maneira geral, as amostras com maior teor de agente cimentante exibiram lixiviados mais alcalinos, o que era esperado, visto que quanto maior o teor de agente cimentante maior a quantidade de cálcio e/ou hidróxido de sódio presentes no sistema.

Devido a quantidade de elementos químicos estudados e a grande variedade de tratamentos, os resultados obtidos para o ensaio de lixiviação são apresentados a seguir, separadamente, por contaminante.

4.8.2.1. Alumínio

Na Figura 4.25 encontra-se os resultados das concentrações de alumínio pela quantidade de lixiviado (em termos de volume de vazios) para ambos agentes cimentantes estudados.

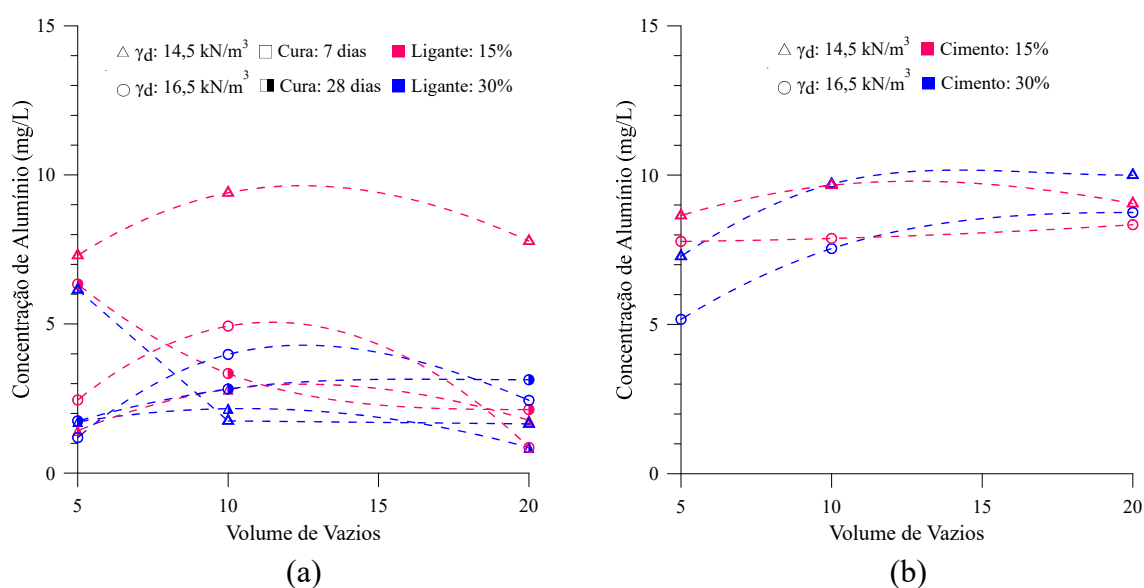


Figura 4.25: Concentração de alumínio das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Na Tabela 4.8 e na Tabela 4.9 são expostas as concentrações de alumínio encontradas por coleta nas amostras, respectivamente, do ligante álcali-ativado e do cimento Portland de alta resistência inicial. As amostras que excedem o limite estabelecido pelo CONAMA 460 (CONAMA, 2013) estão destacadas em **negrito**.

Tabela 4.8: Concentração de alumínio das amostras com ligante álcali-ativado

Materiais puros			Amostras com ligante álcali-ativado								Normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	28 dias	28 dias	28 dias	28 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³			
			15%	30%	15%	30%	15%	30%	15%	30%			
1	348,5	0,575	2,45	1,19	7,30	6,15	1,98	1,75	1,42	1,72			
2	1,43	<1	4,93	3,98	9,40	1,75	3,34	2,82	2,81	2,16	3,5	-	-
3	0,148	<1	0,859	2,44	7,78	1,65	2,13	3,13	1,77	0,858			

Tabela 4.9: Concentração de alumínio das amostras com cimento Portland

Materiais Puros			Cimento Portland				Limites normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³			
			15%	30%	15%	30%			
1	348,5	0,575	7,78	5,17	8,650	7,280			
2	1,43	<1	7,88	7,54	9,66	9,7	3,5	-	-
3	0,148	<1	8,34	8,75	9,05	10			

Nota-se a partir da Figura 4.25, da Tabela 4.8 e da Tabela 4.9 que todos os tratamentos foram eficazes para redução de cerca de 98% da quantidade de alumínio nas amostras cimentadas em relação ao rejeito em seu estado puro. Com relação ao ligante álcali-ativado, todas as amostras com tempo de cura de 28 dias atenderam ao limite estabelecido pelo CONAMA, aos 7 dias nenhuma satisfaz o limite, o que pode se dar em virtude da menor quantidade de composto cimentícios formados aos 7 dias pelo ligante.

Ainda, nenhuma das amostras com cimento Portland foi capaz de reduzir suficientemente a concentração de alumínio para atender o limite estabelecido, possivelmente, devido ao fato de o CPV-ARI ser composto, principalmente, de aluminossilicatos, contribuindo para o aumento de Al.

4.8.2.2. Arsênio

Na Figura 4.26 encontra-se os resultados das concentrações de arsênio pela quantidade de lixiviado (em termos de volume de vazios) para ambos agentes cimentantes estudados.

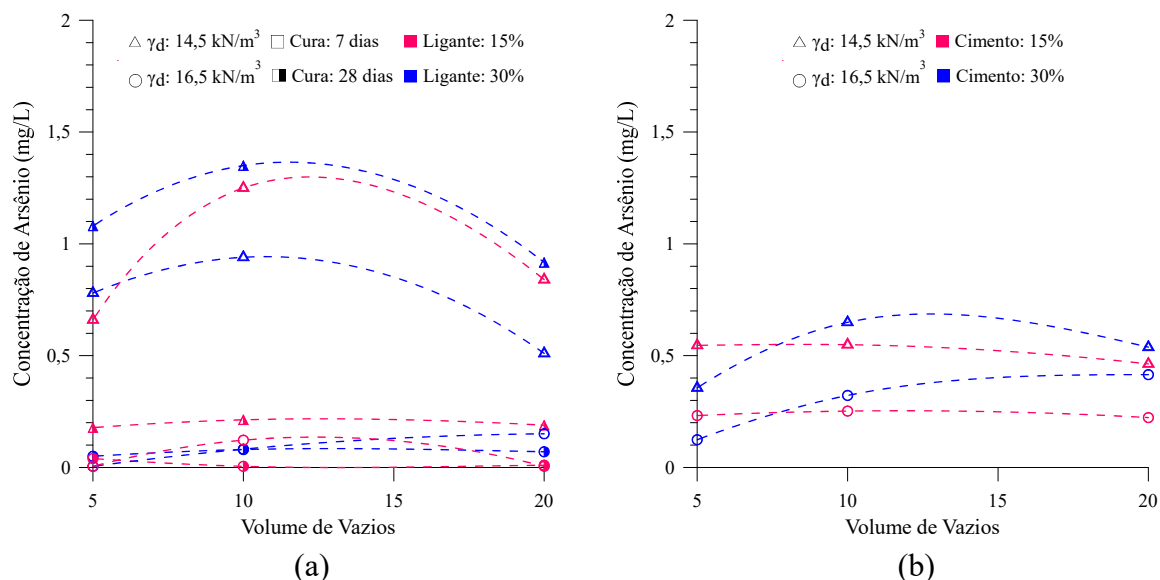


Figura 4.26: Concentração de arsênio das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Na Tabela 4.10 e na Tabela 4.11 são expostas as concentrações de arsênio encontradas por coleta nas amostras, respectivamente, do ligante álcali-ativado e do cimento Portland de alta resistência inicial. As amostras que excedem algum dos limites estabelecidos pelas normas CONAMA 460 (CONAMA, 2013) e Lista Holandesa (VROM, 2000) estão destacadas em **negrito**.

Tabela 4.10: Concentração de arsênio das amostras com ligante álcali-ativado

Materiais puros			Amostras com ligante álcali-ativado								Normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	28 dias	28 dias	28 dias	28 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³			
1	1,3	0,104	<0,005	<0,005	0,66	0,78	0,04	0,05	0,178	1,080			
2	0,0007	<0,005	0,122	0,0818	1,25	0,94	<0,005	0,08	0,213	1,350	0,001	-	0,06
3	<0,005	<0,005	<0,005	0,1505	0,84	0,51	0,01	0,07	0,189	0,917			

Tabela 4.11: Concentração de arsênio das amostras com cimento Portland

Materiais Puros			Cimento Portland				Limites normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³			
1	1,3	0,104	0,232	0,124	0,546	0,356			
2	0,0007	<0,005	0,252	0,322	0,549	0,649	0,001	-	0,06
3	<0,005	<0,005	0,223	0,415	0,463	0,538			

Observando a Figura 4.26, a Tabela 4.10 e a Tabela 4.11 percebe-se que nenhum dos tratamentos foi capaz de atender as normas CONAMA 460 (CONAMA, 2013) e Lista Holandesa (VROM, 2000) em relação a concentração de arsênio, apesar de se mostrarem eficazes para redução de cerca de 75% da quantidade de arsênio nas amostras cimentadas em relação ao rejeito em seu estado puro.

De modo geral, as amostras que mais apresentaram redução de arsênio foram as com ligante álcali-ativado. Comportamento semelhante foi relatado por Dutré e Vandecasteele (1995) em estudo realizado com resíduos industriais contendo arsênio. Neste estudo, os autores utilizaram para estabilização/solidificação do resíduo cimento, cal e materiais pozolânicos e, apesar das amostras com cimento e cal apresentarem valores de pH análogos, as amostras com maior teor de cal demonstraram melhores resultados, a adição de cal parecendo ser o principal fator de redução.

4.8.2.3. Bário

Na Figura 4.27 encontra-se os resultados das concentrações de bário pela quantidade de lixiviado (em termos de volume de vazios) para ambos agentes cimentantes estudados.

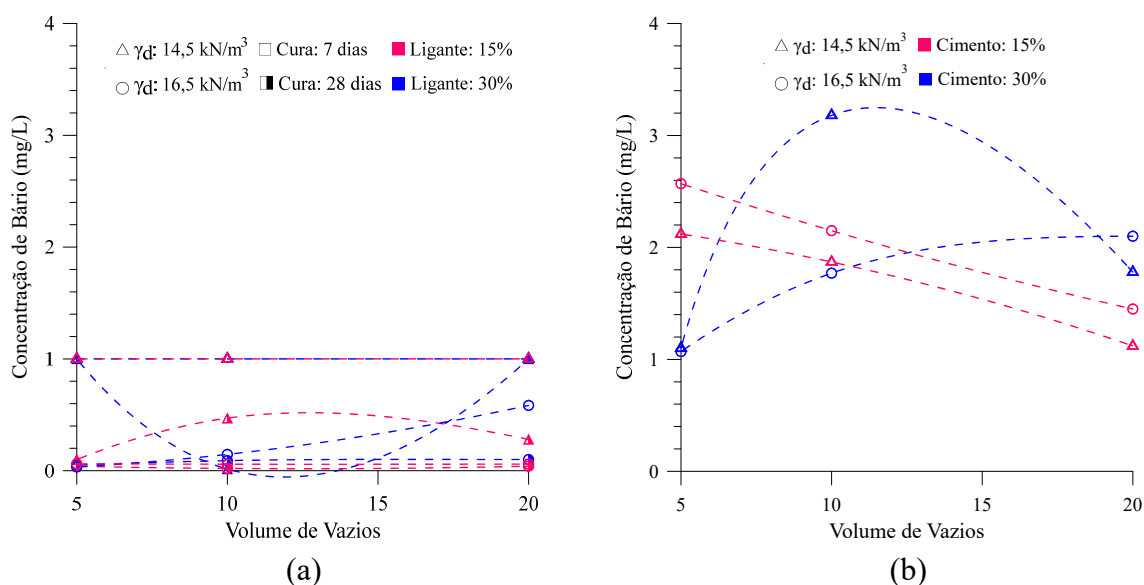


Figura 4.27: Concentração de bário das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Na Tabela 4.12 e na Tabela 4.13 são expostas as concentrações de bário encontradas por coleta nas amostras, respectivamente, do ligante álcali-ativado e do cimento Portland de alta resistência inicial. As amostras que excedem algum dos limites estabelecidos pelas normas CONAMA 460 (CONAMA, 2013), EPA (USEPA, 2021) e Lista Holandesa (VROM, 2000) estão destacadas em **negrito**.

Tabela 4.12: Concentração de bário das amostras com ligante álcali-ativado

Materiais puros			Amostras com ligante álcali-ativado								Normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	28 dias	28 dias	28 dias	28 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³ 15%	16,5 kN/m ³ 30%	14,5 kN/m ³ 15%	14,5 kN/m ³ 30%	16,5 kN/m ³ 15%	16,5 kN/m ³ 30%	14,5 kN/m ³ 15%	14,5 kN/m ³ 30%			
1	2,06	0,137	0,0619	0,0329	<1	<1	0,04	0,05	0,10	<1			
2	<1	<1	0,0581	0,146	<1	<1	0,02	0,09	0,47	0,015	0,7	2	0,625
3	<1	<1	0,059	0,584	<1	<1	0,04	0,10	0,28	<1			

Tabela 4.13: Concentração de bário das amostras com cimento Portland

Materiais Puros			Cimento Portland				Limites normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³ 15%	16,5 kN/m ³ 30%	14,5 kN/m ³ 15%	14,5 kN/m ³ 30%			
1	2,06	0,137	2,57	1,07	2,12	1,10			
2	<1	<1	2,15	1,77	1,87	3,18	0,7	2	0,625
3	<1	<1	1,45	2,1	1,12	1,78			

Todos os tratamentos com o ligante álcali-ativado exibiram redução da quantidade de bário, no entanto, os tratamentos com cimento Portland mostraram-se ineficazes, com pouca ou nenhuma redução e, em alguns casos, até mesmo com aumento da concentração do contaminante.

Com relação ao ligante álcali-ativado, as amostras com maior peso específico obtiveram melhores resultados em relação as com peso específico menor. Ainda, como exposto na Figura 4.25 e na Figura 4.28 para as concentrações de alumínio e arsênio no lixiviado, maiores quantidades de agente cimentante apresentaram concentrações maiores de contaminantes no extrato lixiviado, isso pode se dar devido ao valores de pH das amostras serem mais elevados, assim como os do cimento, o que para esses elementos especificamente pode não ter sido vantajoso.

4.8.2.4. Cádmio

Na Figura 4.29 encontra-se os resultados das concentrações de cádmio pela quantidade de lixiviado (em termos de volume de vazios) para ambos agentes cimentantes estudados.

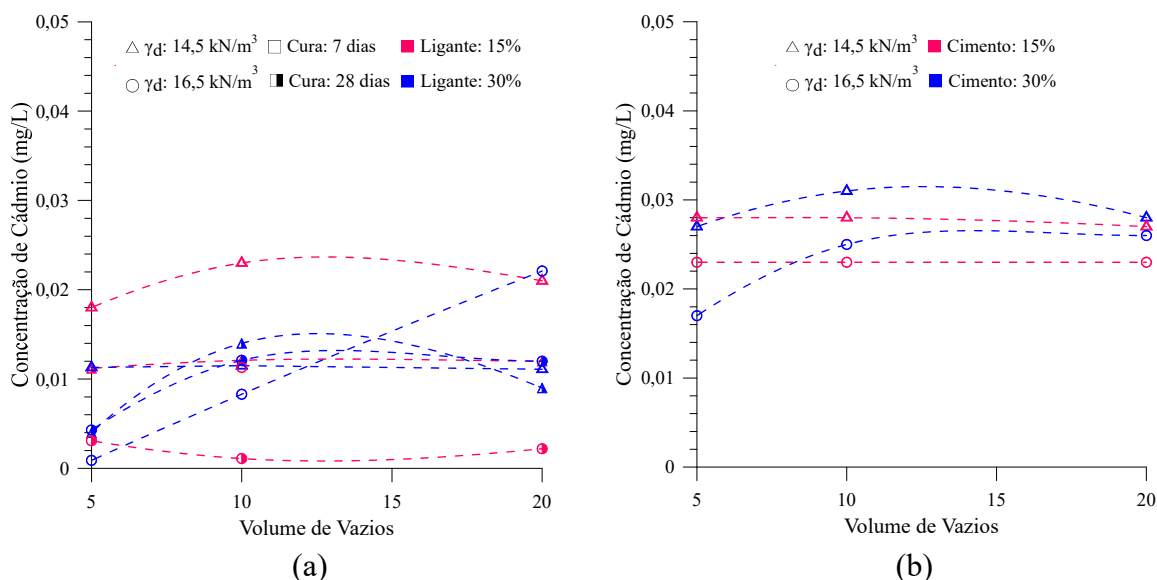


Figura 4.29: Concentração de cadmio das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Na Tabela 4.14 e na Tabela 4.15 são expostas as concentrações de cádmio encontradas por coleta nas amostras, respectivamente, do ligante álcali-ativado e do cimento Portland de alta resistência inicial. As amostras que excedem algum dos limites estabelecidos pelas normas CONAMA 460 (CONAMA, 2013), EPA (USEPA, 2021) e Lista Holandesa (VROM, 2000) estão destacadas em **negrito**.

Tabela 4.14: Concentração de cadmio das amostras com ligante álcali-ativado

Materiais puros			Amostras com ligante álcali-ativado								Normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	28 dias	28 dias	28 dias	28 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³			
			15%	30%	15%	30%	15%	30%	15%	30%			
1	0,46	0,0037	<0,005	0,0009	0,018	0,0113	0,0031	0,0043	0,0112	0,004			
2	0,0023	<0,005	0,0113	0,0083	0,023	0,0115	0,0011	0,0121	0,0121	0,014	0,005	0,005	0,006
3	<0,005	<0,005	<0,005	0,0221	0,021	0,0111	0,0022	0,0120	0,012	0,009			

Tabela 4.15: Concentração de cádmio das amostras com cimento Portland

Coleta	Materiais Puros		Cimento Portland				Limites normas		
	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³ 15%	16,5 kN/m ³ 30%	14,5 kN/m ³ 15%	14,5 kN/m ³ 30%			
1	0,46	0,0037	0,023	0,017	0,028	0,027			
2	0,0023	<0,005	0,023	0,025	0,028	0,031			
3	<0,005	<0,005	0,023	0,026	0,027	0,028	0,005	0,005	0,006

Novamente, nenhum dos tratamentos, tanto para as amostras com ligante álcali-ativado quanto para as amostras com cimento Portland, atendeu as normas CONAMA 460 (CONAMA, 2013), EPA (USEPA, 2021) e Lista Holandesa (VROM, 2000), apesar de exibirem redução de aproximadamente 50% na concentração de Cd no lixiviado.

O mesmo comportamento exposto anteriormente, onde maiores quantidades de agente cimentante geraram maiores concentrações de contaminantes no extrato lixiviado, foi exibido para o cádmio para as amostras com cimento. Já as amostras com ligante tiveram comportamento distinto, sem uma clara tendência entre a redução das concentrações e o peso específico aparente seco e o teor de ligante.

4.8.2.5. Chumbo

Na Figura 4.30 encontra-se os resultados das concentrações de chumbo pela quantidade de lixiviado (em termos de volume de vazios) para ambos agentes cimentantes estudados.

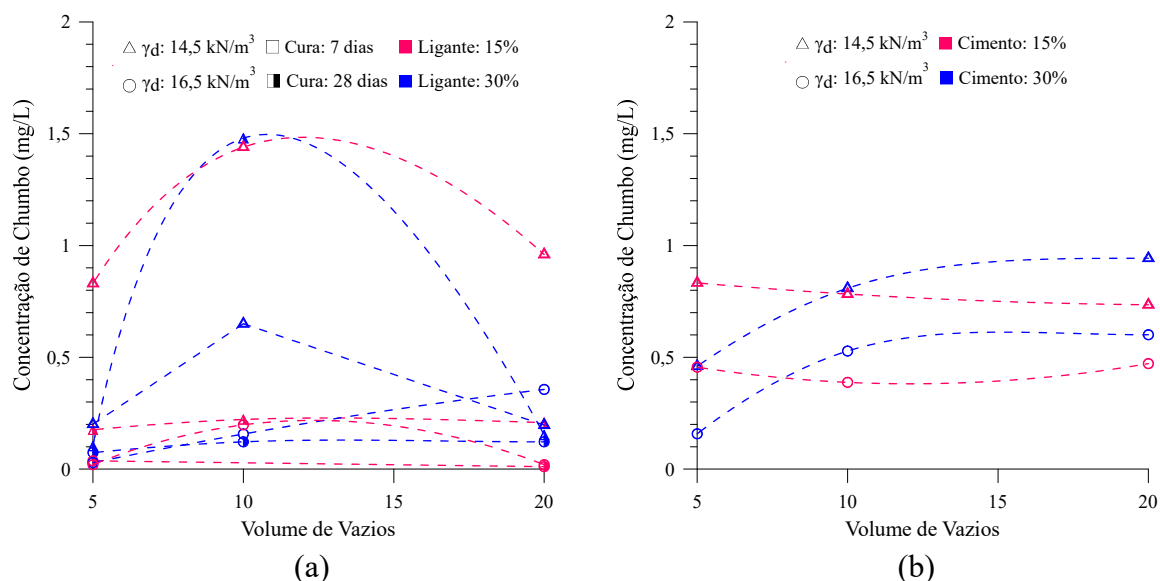


Figura 4.30: Concentração de chumbo das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Na Tabela 4.16 e na Tabela 4.17 são expostas as concentrações de chumbo encontradas por coleta nas amostras, respectivamente, do ligante álcali-ativado e do cimento Portland de alta resistência inicial. As amostras que excedem algum dos limites estabelecidos pelas normas CONAMA 460 (CONAMA, 2013), EPA (USEPA, 2021) e Lista Holandesa (VROM, 2000) estão destacadas em **negrito**.

Tabela 4.16: Concentração de chumbo das amostras com ligante álcali-ativado

Materiais puros			Amostras com ligante álcali-ativado								Normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	28 dias	28 dias	28 dias	28 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³			
			15%	30%	15%	30%	15%	30%	15%	30%			
1	6,05	0,0519	<0,02	0,029	0,83	0,201	0,037	0,074	0,176	0,103			
2	0,075	<0,02	0,198	0,157	1,44	0,65	<0,02	0,122	0,222	1,480	0,010	0,015	0,0750
3	<0,02	<0,02	<0,02	0,3565	0,96	0,197	0,011	0,122	0,208	0,153			

Tabela 4.17: Concentração de chumbo das amostras com cimento Portland

Materiais Puros			Cimento Portland				Limites normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³			
			15%	30%	15%	30%			
1	6,05	0,0519	0,456	0,158	0,833	0,460			
2	0,0749	<0,02	0,388	0,528	0,783	0,809	0,01	0,015	0,075
3	<0,02	<0,02	0,472	0,601	0,735	0,943			

A partir do exposto na Figura 4.30, na Tabela 4.16 e na Tabela 4.17 vê-se uma redução média de 90% da concentração de contaminante das amostras cimentadas em relação ao rejeito puro, no entanto nenhum dos tratamentos atende aos limites estabelecidos. De novo, na maior parte dos casos, as amostras com ligante obtiverem valores menores de concentração do contaminante estudado.

Para ambos os agentes cimentantes, as amostras com menores valores de peso específico aparente seco alcançaram maiores concentrações, comportamento já observado anteriormente. Assim como também já visto, o aumento do teor de ligante não proporcionou melhora das concentrações de contaminante, o que se justifica, possivelmente, pelo maior pH das amostras.

4.8.2.6. Cobre

Na Figura 4.31 encontra-se os resultados das concentrações de cobre pela quantidade de lixiviado (em termos de volume de vazios) para ambos agentes cimentantes estudados.

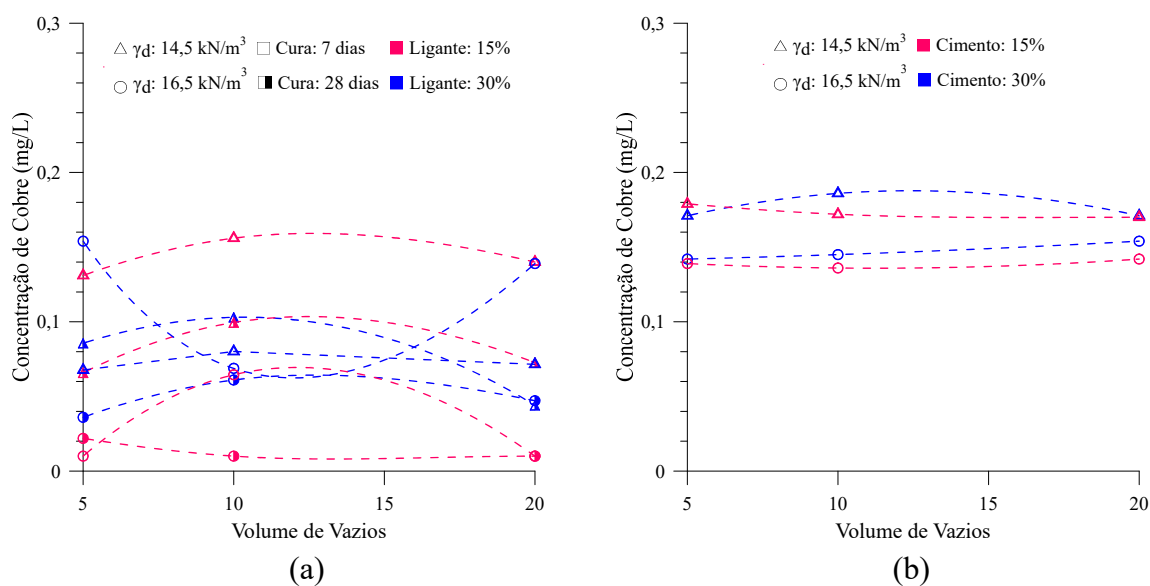


Figura 4.31: Concentração de cobre das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Na Tabela 4.18 e na Tabela 4.19 são expostas as concentrações de cobre encontradas por coleta nas amostras, respectivamente, do ligante álcali-ativado e do cimento Portland de alta resistência inicial. As amostras que excedem os limites estabelecidos pelas normas CONAMA

460 (CONAMA, 2013), EPA (USEPA, 2021) e Lista Holandesa (VROM, 2000) estão destacadas em **negrito**.

Tabela 4.18: Concentração de cobre das amostras com ligante álcali-ativado

Materiais puros			Amostras com ligante álcali-ativado								Normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	28 dias	28 dias	28 dias	28 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³ 15%	16,5 kN/m ³ 30%	14,5 kN/m ³ 15%	14,5 kN/m ³ 30%	16,5 kN/m ³ 15%	16,5 kN/m ³ 30%	14,5 kN/m ³ 15%	14,5 kN/m ³ 30%			
1	13,14	0,0114	<0,01	0,154	0,131	0,0677	0,0219	0,0360	0,0658	0,0856			
2	0,094	<0,01	0,0645	0,0688	0,156	0,0801	<0,01	0,0610	0,0995	0,1030	2	1,3	0,075
3	0,037	<0,01	<0,01	0,139	0,14	0,0715	<0,01	0,0471	0,0726	0,044			

Tabela 4.19: Concentração de cobre das amostras com cimento Portland

Materiais Puros			Cimento Portland				Limites normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³ 15%	16,5 kN/m ³ 30%	14,5 kN/m ³ 15%	14,5 kN/m ³ 30%			
1	13,14	0,0114	0,139	0,142	0,179	0,171			
2	0,094	<0,01	0,136	0,145	0,172	0,186	2	1,3	0,075
3	0,037	<0,01	0,142	0,154	0,170	0,171			

Todos os tratamentos resultaram em redução da quantidade de contaminante no lixiviado, nenhum dos tratamentos realizados para as amostras com cimento Portland atendeu completamente as normativas verificadas. Com relação ao ligante, as amostras com tempo de cura de 28 dias e peso específico aparente seco de 16,5 kN/m³ atenderam a todos os limites estabelecidos, assim como a amostra com 7 dias de cura, peso específico aparente seco de 16,5 kN/m³ e teor de ligante de 15%.

Novamente, o aumento do teor de agente cimentante e, por conseguinte, do pH não se mostrou benéfico. Isso pode ter ocorrido em função dos valores de pH próximos ou superiores a 13 dessas amostras. De modo geral, os elementos possuem tempos de dissolução diferentes, assim como apresentam maior ou menor dissolução em função do pH, o que se pode inferir a partir dos dados exibidos é que a partir de determinado ponto o acréscimo de a gente cimentante, e/ou de pH, deixa de ser vantajoso para a redução dos contaminantes presentes no rejeito de mineração de ouro.

4.8.2.7. Cromo

Na Figura 4.32 encontra-se os resultados das concentrações de cromo pela quantidade de lixiviado (em termos de volume de vazios) para ambos agentes cimentantes estudados.

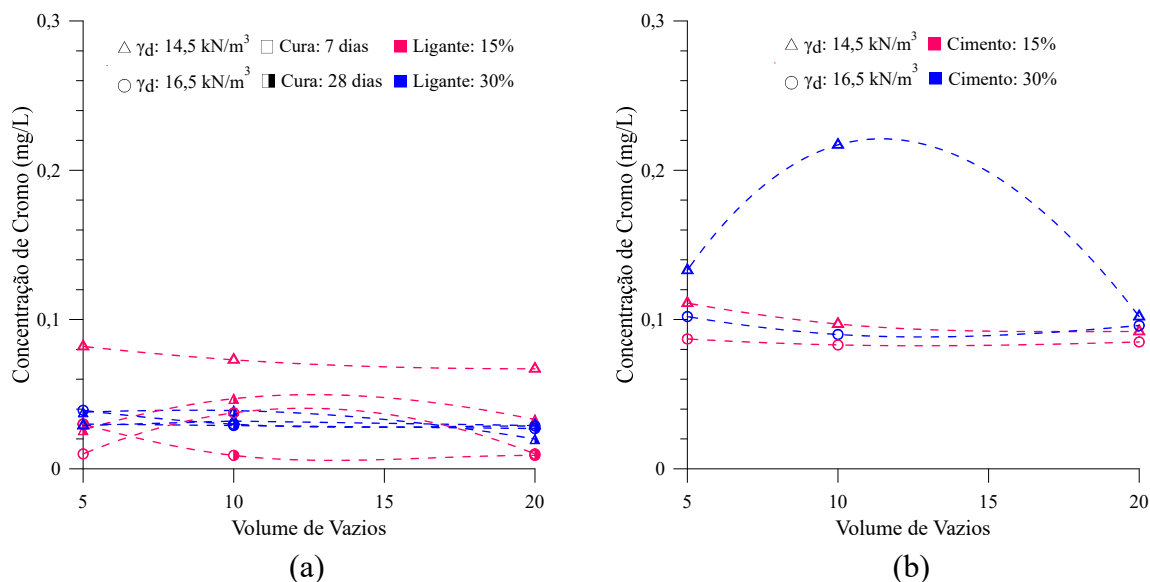


Figura 4.32: Concentração de cromo das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Na Tabela 4.20 e na Tabela 4.21 são expostas as concentrações de cromo encontradas por coleta nas amostras, respectivamente, do ligante álcali-ativado e do cimento Portland de alta resistência inicial. As amostras que excedem os limites estabelecidos pelas normas CONAMA 460 (CONAMA, 2013), EPA (USEPA, 2021) e Lista Holandesa (VROM, 2000) estão destacadas em **negrito**.

Tabela 4.20: Concentração de cromo das amostras com ligante álcali-ativado

Coleta	Materiais puros		Amostras com ligante álcali-ativado								Normas		
	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	28 dias	28 dias	28 dias	28 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³			
			15%	30%	15%	30%	15%	30%	15%	30%			
1	10,5	0,011	<0,01	0,0392	0,082	0,029	0,030	0,030	0,026	0,038			
2	0,01	<0,01	0,0375	0,0299	0,073	0,032	0,009	0,029	0,047	0,039	0,050	0,1	0,03
3	<0,01	<0,01	<0,01	0,0287	0,067	0,029	0,009	0,027	0,033	0,020			

Tabela 4.21: Concentração de cromo das amostras com cimento Portland

Coleta	Materiais Puros		Cimento Portland				Limites normas		
	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³ 15%	16,5 kN/m ³ 30%	14,5 kN/m ³ 15%	14,5 kN/m ³ 30%			
1	10,5	0,011	0,087	0,102	0,111	0,133			
2	0,01	<0,01	0,083	0,090	0,097	0,217	0,050	0,1	0,03
3	<0,01	<0,01	0,085	0,096	0,092	0,102			

Todos os tratamentos foram efetivos para redução do cromo no extrato lixiviado. Amostras com cimento Portland, mais uma vez não se revelaram capazes de reduzir as concentrações suficientemente para respeitar os limites estabelecidos. Com relação ao ligante, as amostras com tempo de cura de 28 dias e peso específico aparente seco de 16,5 kN/m³ respeitaram os limites das normativas CONAMA 460 (CONAMA, 2013), EPA (USEPA, 2021) e Lista Holandesa (VROM, 2000).

As amostras com valores mais expressivos de pH, essencialmente as amostras com maiores teores de ligante para o mesmo peso específico, mostraram melhor resposta referente a concentração de cromo, comportamento contrário ao analisado para as concentrações de alumínio, arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobre e cromo. Resposta semelhante foi obtida por Gomes *et al.* (2017) que verificaram que o Cr apresenta alta solubilidade em faixas de pH de 11,8-12, assim as amostras com pH superiores mostraram mais efetividade no encapsulamento.

Contudo, o cimento Portland, apesar de apresentar as maiores faixas de pH, ocasionou as maiores liberações de cromo, indicando que o pH somente não é responsável pelo comportamento das amostras frente a liberação ou não de contaminantes.

4.8.2.8. Ferro

Na Figura 4.33 encontra-se os resultados das concentrações de ferro pela quantidade de lixiviado (em termos de volume de vazios) para ambos agentes cimentantes estudados.

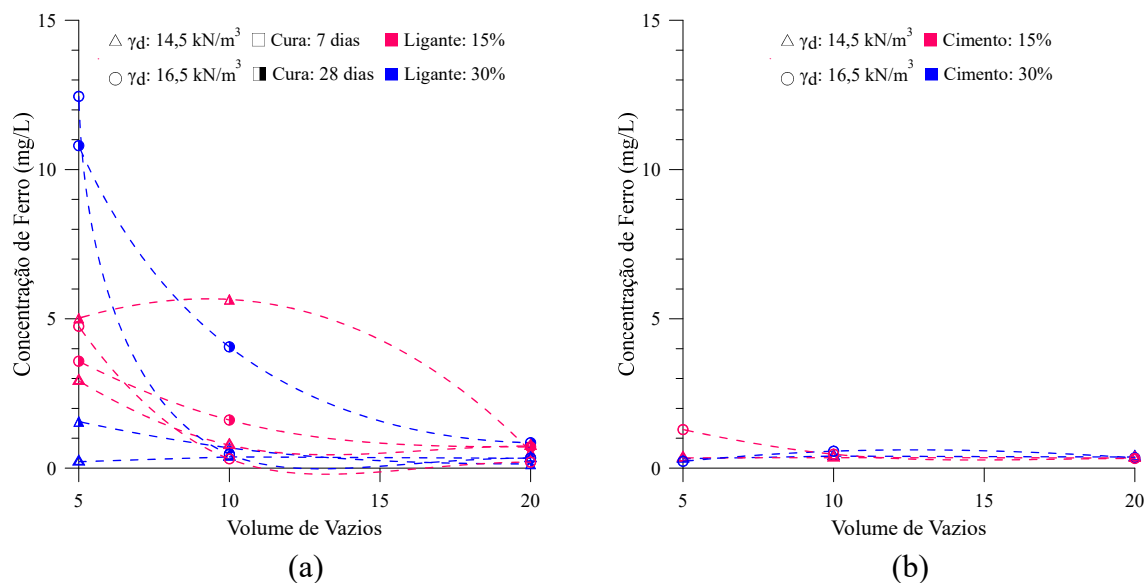


Figura 4.33: Concentração de ferro das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Na Tabela 4.22 e na Tabela 4.23 são expostas as concentrações de ferro encontradas por coleta nas amostras, respectivamente, do ligante álcali-ativado e do cimento Portland de alta resistência inicial. As amostras que excedem os limites estabelecidos pelas normas CONAMA 460 (CONAMA, 2013), EPA (USEPA, 2021) e Lista Holandesa (VROM, 2000) estão destacadas em **negrito**.

Tabela 4.22: Concentração de ferro das amostras com ligante álcali-ativado

Materiais puros			Amostras com ligante álcali-ativado								Normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	28 dias	28 dias	28 dias	28 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³ 15%	16,5 kN/m ³ 30%	14,5 kN/m ³ 15%	14,5 kN/m ³ 30%	16,5 kN/m ³ 15%	16,5 kN/m ³ 30%	14,5 kN/m ³ 15%	14,5 kN/m ³ 30%			
1	9360	0,132	4,75	12,45	2,92	0,213	3,58	10,80	5,020	1,560			
2	7,34	<0,2	0,309	0,464	0,77	0,376	1,61	4,06	5,650	0,679	2,45	-	-
3	0,725	0,163	<0,2	0,335	0,74	0,329	0,71	0,85	0,557	0,14			

Tabela 4.23: Concentração de ferro das amostras com cimento Portland

Materiais Puros			Cimento Portland				Limites normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³ 15%	16,5 kN/m ³ 30%	14,5 kN/m ³ 15%	14,5 kN/m ³ 30%			
1	9360	0,132	1,29	0,226	0,342	0,313			
2	7,34	<0,2	0,466	0,566	0,349	0,401	2,450	-	-
3	0,725	0,163	0,323	0,345	0,336	0,371			

As quantidades presentes de ferro no rejeito, vide Tabela 4.22 ou Tabela 4.23, são extremamente elevadas. Contudo, todos os tratamentos foram capazes de reduzir pelo menos 90% das concentrações de ferro no lixiviado. Diferente do constado para as análises do Al, As, Ba, Cd, Pb e do Cr, para o ferro, os tratamentos com cimento Portland foram mais benéficos, com todas as amostras atendendo ao CONAMA 460 (CONAMA, 2013).

As misturas com CPV-ARI tiveram comportamento constante ao longo das coletas, já as misturas com ligante apresentaram comportamento decrescente. Ainda sobre o ligante, apenas dois pontos foram capazes de encapsular totalmente o Fe, as amostras com peso específico de $14,5 \text{ kN/m}^3$ e 30% de ligante para os tempos de cura de 7 e 28 dias.

4.8.2.9. Manganês

Na Figura 4.34 encontra-se os resultados das concentrações de manganês pela quantidade de lixiviado (em termos de volume de vazios) para ambos agentes cimentantes estudados.

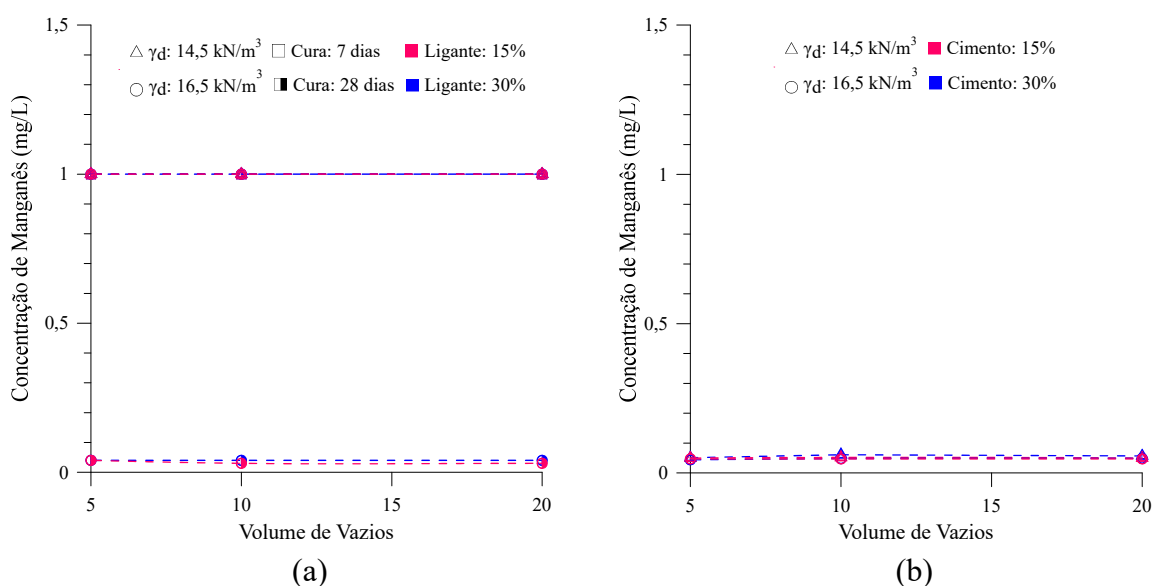


Figura 4.34: Concentração de manganês das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Na Tabela 4.24 e na Tabela 4.25 são expostas as concentrações de manganês encontradas por coleta nas amostras, respectivamente, do ligante álcali-ativado e do cimento Portland de alta

resistência inicial. As amostras que excedem o limite estabelecido pela norma CONAMA 460 (CONAMA, 2013) estão destacadas em **negrito**.

Tabela 4.24: Concentração de manganês das amostras com ligante álcali-ativado

Materiais puros			Amostras com ligante álcali-ativado								Normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	28 dias	28 dias	28 dias	28 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³			
			15%	30%	15%	30%	15%	30%	15%	30%			
1	21,6	<1	<1	<1	<1	<1	0,04	0,04	<1	<1			
2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	0,03	0,04	<1	<1	0,4	-	-
3	<1	<1	<1	<1	<1	<1	0,03	0,04	<1	<1			

Tabela 4.25: Concentração de manganês das amostras com cimento Portland

Materiais Puros			Cimento Portland				Limites normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³			
			15%	30%	15%	30%			
1	21,6	<1	0,047	0,044	0,05	0,051			
2	<1	<1	0,047	0,048	0,052	0,061	0,4	-	-
3	<1	<1	0,047	0,049	0,05	0,057			

Assim como para o Ferro, todos os tratamentos foram capazes de reduzir pelo menos 90% das concentrações de manganês no lixiviado e os tratamentos com cimento Portland foram os mais positivos, com todas as amostras atendendo ao CONAMA 460 (CONAMA, 2013).

As misturas com ambos agentes cimentantes apresentaram comportamento constante ao longo das coletas. Em relação ao ligante, apenas dois pontos foram capazes de encapsular totalmente o Mn, as amostras com peso específico de 16,5 kN/m³ e com 15% e 30% de ligante para o tempo de cura de 7 dias.

4.8.2.10. Mercúrio

Na Figura 4.35 encontra-se os resultados das concentrações de mercúrio pela quantidade de lixiviado (em termos de volume de vazios) para ambos agentes cimentantes estudados.

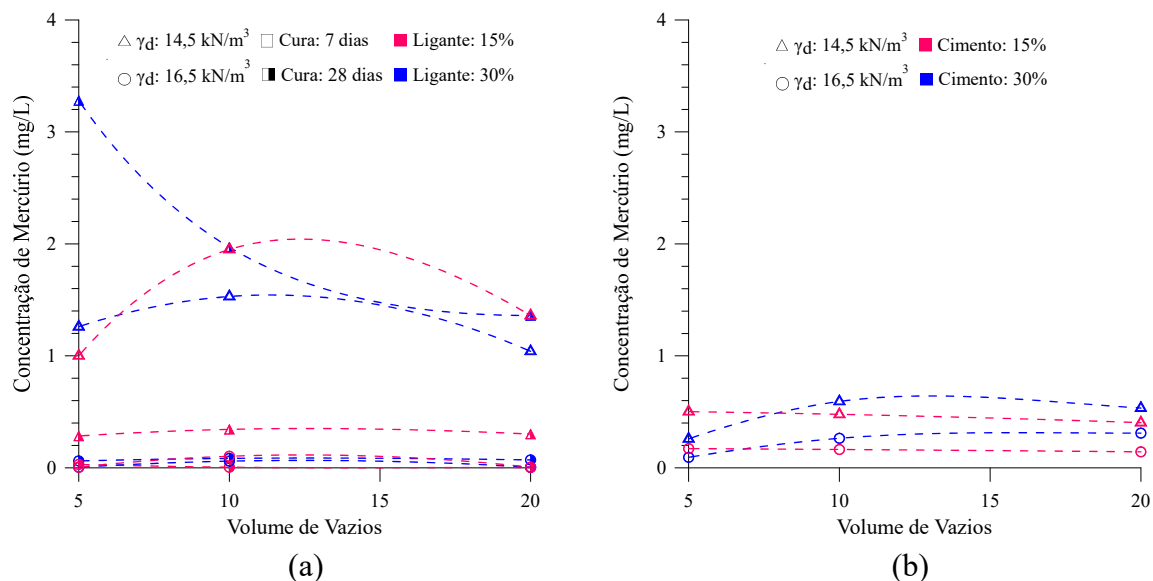


Figura 4.35: Concentração de mercúrio das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Na Tabela 4.26 e na Tabela 4.27 são expostas as concentrações de mercúrio encontradas por coleta nas amostras, respectivamente, do ligante álcali-ativado e do cimento Portland de alta resistência inicial. As amostras que excedem os limites estabelecidos pelas normas CONAMA 460 (CONAMA, 2013), EPA (USEPA, 2021) e Lista Holandesa (VROM, 2000) estão destacadas em **negrito**.

Tabela 4.26: Concentração de mercúrio das amostras com ligante álcali-ativado

Materiais puros			Amostras com ligante álcali-ativado								Normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	28 dias	28 dias	28 dias	28 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³			
			15%	30%	15%	30%	15%	30%	15%	30%			
1	<0,005	0,103	<0,005	<0,005	1,0	1,26	0,03	0,061	0,284	3,280			
2	<0,005	<0,005	0,103	0,0593	1,95	1,53	<0,005	0,084	0,343	1,970	0,001	0,002	0,0003
3	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	1,36	1,04	0,003	0,070	0,301	1,360			

Tabela 4.27: Concentração de mercúrio das amostras com cimento Portland

Materiais Puros			Cimento Portland				Limites normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³			
			15%	30%	15%	30%			
1	<0,005	0,103	0,172	0,094	0,502	0,259			
2	<0,005	<0,005	0,164	0,264	0,478	0,593	0,001	0,002	0,0003
3	<0,005	<0,005	0,143	0,310	0,404	0,534			

Todos os tratamentos das amostras, para ambos agentes cimentantes, apresentaram aumento das concentrações de mercúrio em relação ao rejeito puro. As amostras com peso específico de $16,5 \text{ kN/m}^3$ de ligante obtiveram melhores resultados que as amostras de mesmo peso específico do cimento e as amostras com peso específico de $14,5 \text{ kN/m}^3$ do cimento tiveram melhores resultados que as amostras de mesmo peso específico do ligante.

A cinza de bagaço de cana-de-açúcar lixiviou mercúrio além dos limites estabelecidos, o que poderia justificar o aumento da concentração de Hg nas amostras estabilizadas com ligante. Contudo, o comportamento do cimento foi semelhante.

4.8.2.11. Selênio

Na Figura 4.36 encontra-se os resultados das concentrações de selênio pela quantidade de lixiviado (em termos de volume de vazios) para ambos agentes cimentantes estudados.

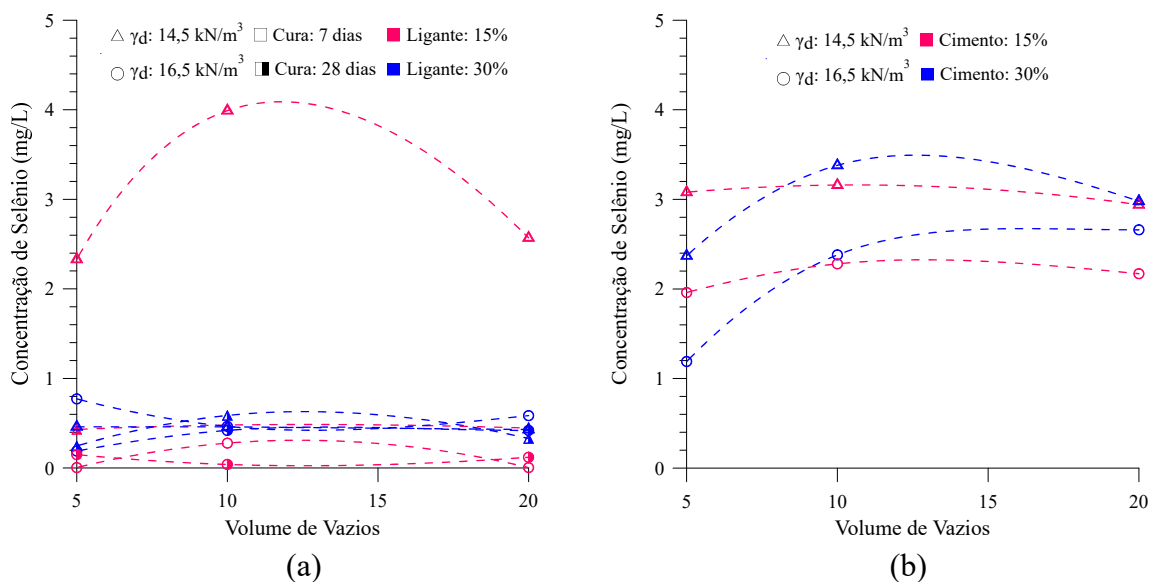


Figura 4.36: Concentração de selênio das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Na Tabela 4.28 e na Tabela 4.29 são expostas as concentrações de selênio encontradas por coleta nas amostras, respectivamente, do ligante álcali-ativado e do cimento Portland de alta resistência inicial. As amostras que excedem os limites estabelecidos pelas normas CONAMA

460 (CONAMA, 2013), EPA (USEPA, 2021) e Lista Holandesa (VROM, 2000) estão destacadas em **negrito**.

Tabela 4.28: Concentração de selênio das amostras com ligante álcali-ativado

Materiais puros			Amostras com ligante álcali-ativado								Normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	28 dias	28 dias	28 dias	28 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³ 15%	16,5 kN/m ³ 30%	14,5 kN/m ³ 15%	14,5 kN/m ³ 30%	16,5 kN/m ³ 15%	16,5 kN/m ³ 30%	14,5 kN/m ³ 15%	14,5 kN/m ³ 30%			
1	14,5	0,204	<0,005	0,772	2,33	0,46	0,15	0,19	0,431	0,246			
2	0,119	<0,005	0,278	0,465	3,99	0,46	0,04	0,42	0,480	0,587	0,01	0,05	0,16
3	<0,005	<0,005	<0,005	0,585	2,57	0,43	0,12	0,42	0,446	0,330			

Tabela 4.29: Concentração de selênio das amostras com cimento Portland

Materiais Puros			Cimento Portland				Limites normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³ 15%	16,5 kN/m ³ 30%	14,5 kN/m ³ 15%	14,5 kN/m ³ 30%			
1	14,5	0,204	1,96	1,19	3,08	2,37			
2	0,119	<0,005	2,28	2,38	3,16	3,38	0,01	0,05	0,16
3	<0,005	<0,005	2,17	2,66	2,94	2,98			

Todos os tratamentos foram efetivos para redução das quantidades de selênio no extrato lixiviado. Entretanto, nenhuma das amostras reduziu as concentrações a níveis inferiores aos limites estabelecidos pelas normas CONAMA 460 (CONAMA, 2013), EPA (USEPA, 2021) e Lista Holandesa (VROM, 2000).

As amostras com ligante, mais uma vez se revelaram superiores as amostras com cimento Portland na redução das concentrações do contaminante estudado e, de novo, o aumento do teor de agente cimentante não se mostrou benéfico. As menores concentrações foram exibidas pelas amostras com peso específico aparente seco de 16,5 kN/m³.

4.8.2.12. Zinco

Na Figura 4.37 encontra-se os resultados das concentrações de zinco pela quantidade de lixiviado (em termos de volume de vazios) para ambos agentes cimentantes estudados.

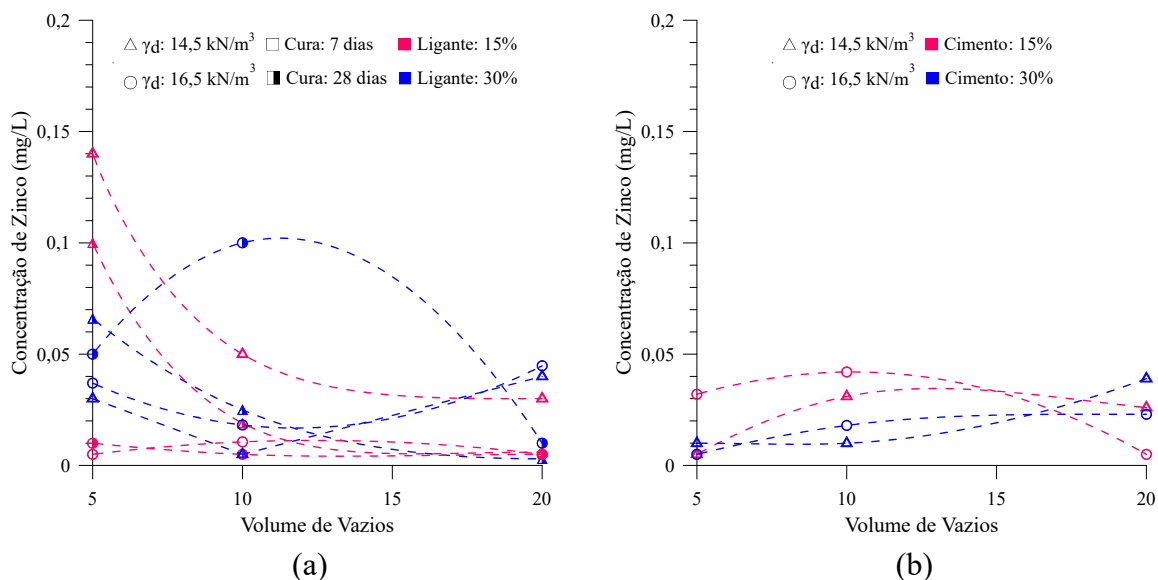


Figura 4.37: Concentração de zinco das amostras com (a) ligante álcali-ativado e (b) cimento Portland (elaborado pela autora, 2021).

Na Tabela 4.30 e na Tabela 4.31 são expostas as concentrações de zinco encontradas por coleta nas amostras, respectivamente, do ligante álcali-ativado e do cimento Portland de alta resistência inicial. As amostras que excedem os limites estabelecidos pelas normas CONAMA 460 (CONAMA, 2013), EPA (USEPA, 2021) e Lista Holandesa (VROM, 2000) estão destacadas em **negrito**.

Tabela 4.30: Concentração de zinco das amostras com ligante álcali-ativado

Materiais puros			Amostras com ligante álcali-ativado								Normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	28 dias	28 dias	28 dias	28 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³			
			15%	30%	15%	30%	15%	30%	15%	30%			
1	30,8	0,0021	<0,005	0,037	0,14	0,03	0,01	0,05	0,1	0,066			
2	0,554	0,0003	0,0106	0,0182	0,05	<0,005	<0,005	0,1	0,019	0,025	1,05	-	0,8
3	0,43	<0,005	<0,005	0,0448	0,03	0,04	<0,005	0,01	0,006	0,003			

Tabela 4.31: Concentração de zinco das amostras com cimento Portland

Materiais Puros			Cimento Portland				Limites normas		
Coleta	Rejeito	CBCA	7 dias	7 dias	7 dias	7 dias	CONAMA 460	EPA	Dutch List
			16,5 kN/m ³	16,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³			
			15%	30%	15%	30%			
1	30,8	0,0021	0,032	<0,005	<0,005	0,01			
2	0,554	0,0003	0,042	0,018	0,031	0,01	1,050	-	0,8
3	0,43	<0,005	<0,005	0,023	0,026	0,039			

Todas as amostras obtiveram redução das concentrações de zinco, além disso, tanto o ligante álcali-ativado quanto o cimento Portland foram capazes de encapsular completamente esse contaminante. O comportamento das amostras de cimento foi, basicamente, constante, enquanto as amostras com o ligante álcali-ativado tiveram um comportamento decrescente das concentrações.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

- a. Com relação as pastas álcali-ativados, as compostas por 70% de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e 30% de cal de carbureto, com teor de álcali de 3,86% revelaram as maiores resistências devido a maior solubilidade do óxido de cálcio em meios alcalinos com 0 a 3 mols/L.
- b. A análise estatística realizada para o ensaio de resistência à compressão simples das amostras com o ligante álcali-ativado proposto demonstrou que todos os fatores principais A, B e C, respectivamente, teor de ligante, peso específico aparente seco e tempo de cura, foram significativos para o aumento da RCS, assim como as interações de segunda ordem A*B (Teor de Ligante*Peso Específico Aparente Seco), B*C (Peso Específico Aparente Seco* Tempo de Cura) e A*C (Teor de Ligante*Tempo de Cura), na ordem. A interação de terceira ordem A*B*C (Teor de Ligante*Peso Específico Aparente Seco*Tempo de Cura) não mostrou influência significativa sobre a variável resposta. Com o aumento da porcentagem de ligante a um grande crescimento da quantidade de reações pozolânicas, o que justifica o teor de ligante ser o de maior significância para a variável resposta em questão. Já a influência do tempo de cura se dá em função da quantidade de hidróxido de cálcio e aluminossilicatos ainda disponíveis no sistema aos 28 dias gerando reações. Finalizando, o peso específico aparente seco, gera aumento da resistência em função da maior área de contato entre os grãos, ocasionada pela redução da porosidade, que resulta em um melhor intertravamento entre as partículas e em uma maior mobilização de atrito, que leva ao aumento da resistência. Todavia, essa melhora no intertravamento com a redução da porosidade não é infinita e nem linear, dependendo da distribuição granulométrica do material e do tamanho das partículas, essa potencialização na mobilização de atrito em função da movimentação entre os grãos pode ser menor ou maior, o que explica sua menor significância sobre a variável resposta.
- c. Para as amostras com cimento Portland de alta resistência inicial, o efeito que demonstrou maior influência foi o peso específico aparente seco, como supracitado, o aumento do peso específico – redução da porosidade, pode proporcionar uma maior área de contato entre as partículas que resulta em maior mobilização de atrito entre as

partículas e desenvolvimento da resistência. Em seguida, o fator de maior influência foi o teor de cimento, o que se justifica pelo aumento das reações cimentícias com o aumento de cimento. Por fim, dentre os três fatores principais, o que menor manifestou influência sobre a variável resposta foi o tempo de cura, o que se explica pelo fato de o CPV-ARI exibir cerca de 80% de sua resistência nos primeiros 7 dias. Ainda, a interação de segunda ordem A*B (Teor de Ligante*Peso Especifico Aparente Seco), também se mostrou significativa, resposta explicada pela forte influência que o cimento, junto com o peso específico aparente seco, possuem sobre a resistência de solos-cimentos. As interações de segunda ordem A*C (Teor de Ligante*Tempo de Cura) e B*C (Peso Especifico Aparente Seco* Tempo de Cura), como também a interação de terceira ordem A*B*C (Teor de Ligante*Peso Especifico Aparente Seco*Tempo de Cura), não foram significativas.

- d. O comportamento apresentado no ensaio de rigidez foi semelhante ao visto para o ensaio de resistência a compressão simples, todos os fatores principais (A – Teor de Ligante, B – Peso Especifico Aparente Seco e C – Tempo de Cura) são estatisticamente significativos para a rigidez das amostras com o ligante álcali-ativado, assim como as interações de segunda ordem A*B, A*C e B*C. A interação de terceira ordem A*B*C não mostrou influência significativa sobre a variável resposta. Ainda, o teor de ligante mostrou-se o mais significativo, seguido pelo tempo de cura, pelo peso específico aparente seco e pelas interações A*B, A*C e B*C, respectivamente. Novamente, o comportamento apresentado no ensaio de rigidez para as amostras com cimento Portland foi semelhante ao visto para o ensaio de resistência a compressão simples, todos os fatores principais (A – Teor de Cimento, B – Peso Especifico Aparente Seco e C – Tempo de Cura) foram significativos, assim como a interação de segunda ordem A*B. As interações de segunda ordem A*C e B*C, como também a interação de terceira ordem A*B*C, não se demonstraram significativas. O fator B apresentou a maior magnitude dentre os fatores principais, seguido pelo fator A, pelo fator C e, por fim, pela interação de segunda ordem A*B.
- e. Quanto a análise da sucção matricial, grandes variações de sucção não foram constatadas. Além disso, a influência da sucção sobre a resistência a compressão simples, majoritariamente, não ultrapassou 4%, comprovando a saturação dos corpos de prova.

- f. Os resultados obtidos para as amostras ensaiadas a resistência a tração por compressão diametral apresentaram-se similar aos resultados obtidos para as amostras ensaiadas a resistência à compressão simples e módulo cisalhante inicial. Com o aumento da porcentagem de ligante a um grande crescimento da quantidade de reações pozolânicas e, por conseguinte, da resistência a tração. Uma vez mais, o peso específico aparente seco, como já mencionado, gera aumento da resistência em função da maior área de contato entre os grãos, ocasionada pela redução da porosidade, que resulta em um melhor intertravamento entre as partículas e em uma maior mobilização de atrito, que leva ao aumento da resistência.
- g. A perda de massa individual das amostras álcali-ativas e das amostras com cimento Portland ocorre, preponderantemente, de maneira contínua e gradativa com algumas pequenas variações, possivelmente, em consequência de alguma perturbação sofrida pelas amostras durante o procedimento experimental. Assim, de modo geral, o ensaio apresentou bons resultados e pequena dispersão. A PMI das amostras com o ligante álcali ativado, de modo geral, não exibiu perdas maiores que 2%, enquanto a PMI das amostras com cimento Portland não ultrapassou nem 0,5%. Para os dois agentes cimentantes, o ponto com peso específico aparente seco de 14,5kN/m³ e 15% de ligante/cimento, expressou perda elevada em relação aos outros pontos.
- h. As perdas de massa acumulada máxima e mínima para o ligante proposto foram, respectivamente, 21,83% e 1,63%, uma diferença significativa, de mais de 20%. Em contrapartida, as perdas máxima e mínima para o CPV-ARI resultaram em, na ordem, 0,84% e 1,98%, uma disparidade de pouco mais de 1% apenas. Assim como para os ensaios de resistência e rigidez, no ensaio de durabilidade o cimento demonstrou melhor comportamento mecânico. Contudo, a durabilidade dos CPs com o ligante álcali-ativado, em alguns pontos (com maior porcentagem de agente cimentante), apresentou comportamento próximo ao do cimento Portland.
- i. Os resultados de PMA evidenciaram a grande influência que o agente cimentante e o peso específico aparente seco exercem sobre a durabilidade, assim como apresentaram sobre as resistências a tração e compressão e a rigidez. Demonstraram também que, para as amostras de ligante, o agente cimentante desempenha maior influência sobre a durabilidade e que, para as amostras de cimento, o peso específico foi mais relevante.

Novamente, a influência do peso específico se dá pela maior área de contato entre os grãos da amostra, devido à menor porosidade, resultando, por conseguinte, no aumento de resistência devido à maior mobilização de atrito entre as partículas. Enquanto a influência do teor de ligante é justificada pela maior quantidade de reações ocasionadas pelo acréscimo de agente cimentante.

- j. Referente aos resultados de rigidez ao longo dos ciclos de durabilidade, foi possível constatar um pequeno aumento da rigidez ao longo dos três primeiros ciclos de molhagem e secagem para as amostras com ligante e, a partir desse estágio, passou a decrescer nos próximos ciclos. A ação abrasiva da escova em conjunto com os ciclos de molhagem e secagem do ensaio de durabilidade, causam perda de massa e degradação da rigidez das amostras. Entretanto, inicialmente houve um acréscimo de rigidez, devido ao procedimento do ensaio, que submete as amostras a imersão em água e, então, a altas temperaturas. Esse processo propicia a aceleração das reações que não ocorreram nos 7 dias de cura das amostras e, pelo menos a princípio, esse efeito positivo é maior que a degradação gerada pela escovação. Este fato, não ocorreu com as amostras estabilizadas com o cimento Portland, pelo fato de o CPV-ARI desenvolver cerca de 80% da sua resistência e rigidez nos primeiros 7 dias. Assim, transcorrido, os 7 dias de cura, poucas reações ainda haviam por ocorrer, não sendo suficientes para neutralizar ou superar o efeito negativo da escovação, por isso, para as amostras com cimento Portland desde o primeiro ciclo houve apenas decréscimo da rigidez.
- k. Em geral, a redução da porosidade em conjunto ao aumento do agente cimentício (redução das relações η/Biv e η/Civ) proporcionou aumento das propriedades mecânicas, ainda, foi possível estabelecer relações únicas para ambos agentes cimentantes entre todas as variáveis respostas (resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo cisalhante inicial e durabilidade) com os índices η/Biv e η/Civ . Além disso, os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e rigidez foram normalizados pelo tempo de cura, tornando viável a previsão dos comportamentos mecânicos com uma única correlação.
- l. Os coeficientes de determinação de todas as relações não apresentaram valores menores que 80%, os resultados de resistência a tração e compressão, assim como os

de durabilidade não exibiram valores menores que 90%, o que demonstra a viabilidade de se utilizar os índices η/Biv e η/Civ como metodologia de dosagem.

- m. De modo geral, as amostras submetidas ao ensaio de lixiviação, para ambos agentes cimentícios, apresentaram redução das concentrações. Comportamento distinto foi exibido apenas para as concentrações de bário nas amostras com cimento e para as concentrações de mercúrio de ambos agentes cimentantes.
- n. As amostras estabilizadas com ligante mostraram-se mais eficazes que as amostras estabilizadas com cimento para as concentrações de Alumínio, Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo e Selênio. Já o cimento apresentou melhores resultados para as concentrações de Ferro e Manganês. Os lixiviados de Mercúrio e de Zinco exibiram valores semelhantes para as amostras com ambos agentes cimentantes.
- o. O único elemento que foi encapsulado por todos os tratamentos foi o zinco. Ainda, as amostras de cimento Portland foram capazes de encapsular completamente o Ferro e o Manganês para todos os níveis estudados.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de complementar e dar prosseguimento ao trabalho desenvolvido na presente pesquisa, sugere-se para trabalhos futuros:

- a. Estudar as outras relações de precursores mencionadas nesta pesquisa, para avaliar se as melhores relações obtidas com as pastas álcali-ativadas se estendem ao comportamento das misturas com o rejeito;
- b. Realizar ensaios triaxiais cíclicos e monotônicos das misturas desenvolvidas;
- c. Estudar a microestrutura do ligante álcali-ativado por meio de ensaios de DRX, FRX e MEV;
- d. Analisar e comparar o impacto ambiental, social e econômico do ligante álcali-ativado e do cimento Portland por meio de uma Análise de Ciclo de Vida (ACV);
- e. Realizar ensaios de campo com alguns dos tratamentos realizados nesta pesquisa.

- f. Ampliar as análises acerca da presença de contaminantes com outros ensaios de lixiviação;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6502 Rochas e Solos**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10.004 Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10.005 Procedimento para obtenção de extrato**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10.006 Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 52 Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15895 Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chapelle modificado**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7222 Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12253 Solo-cimento — Dosagem para emprego como camada de pavimento — Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5751 Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6457 Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6459 Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7180 Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7182 Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16605 Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7181 Solo - análise granulométrica**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2018.

AL-SWAIDANI, A.; HAMMOUD, I.; MEZIAB, A. Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 8, n. 5, p. 714-725, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - ANM. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas**. Brasília: ANM, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - ANM. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas**. Brasília: ANM, 2019.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - ALPHA; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION - AWWA; WATER ENVIRONMENT FEDERATION - WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22. ed. Washington: American Public Health Association, American Water Works Association e Water Environment Federation, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D5102 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures**. Philadelphia: [s.n.], 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard Test Method for Leaching Solid Material in Column Apparatus**. West Conshohocken: ASTM, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D 559 Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures**. Philadelphia: [s.n.], 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D 5084 – Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter**. West Conshohocken: ASTM, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D2487-17 Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)**. West Conshohocken, PA: [s.n.], 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D7928 Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis**. Philadelphia: ASTM, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D 2434 – Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)**. West Conshohocken: ASTM, 2019.

BARBOSA, M. C.; SANTOS, A. C. B. A. Aspectos Geotécnicos e Ambientais Associados a Rejeitos Finos com Elevado Teor de Água Inicial. **n V REGEO**, Porto Alegre, 2003.

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

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 1987.

BEDIN, J. **Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2010. 207 p.

BEDIN, J. et al. Gold tailings liquefaction under critical state soil mechanics. **Geotechnique**, v. 62, n. 3, p. 263-267, 2012.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, J. M. A. **Mecânica de solos e suas aplicações – Fundamentos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v. 1, 2015.

CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers Civil Engineering**, v. 92, n. 1, p. 82-89, 1992.

CLOUGH, W. . S. N. . B. R. C. . R. N. S. C. Cemented sands under static loading. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, New York, v. 107, n. 6, p. 799-817, 1981.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2021/2022**. Brasília: CONAB, v. 8, 2021. 1-56 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução 460. Altera a Resolução no 420, de 28 de dezembro de 2009, do CONAMA, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e dá outras providências**. Brasília, Brasil: CONAMA, 2013.

CONSOLI, N. C. A method proposed for the assessment of failure envelopes of cemented sandy soils. **Engineering Geology**, v. 169, p. 61-68, 2014.

CONSOLI, N. C. et al. Behavior Of Compacted Soil-Fly Ash-Carbide Lime Mixtures. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, n. 9, p. 774-782, 2001.

CONSOLI, N. C. et al. Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133, n. 2, p. 197-205, 2007.

CONSOLI, N. C. et al. Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. **JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING**, v. 133, n. 2, p. 197-205, 2007.

CONSOLI, N. C. et al. Fundamental Parameters for the Stiffness and Strength Control of Artificially Cemented Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 135, n. 9, p. 1347–1353, 2009.

CONSOLI, N. C. et al. Key parameters dictating strength of lime/cement-treated soils. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering**, v. 162, n. 2, p. 111-118, 2009.

CONSOLI, N. C. et al. Voids/Cement Ratio Controlling Tensile Strength of Cement-Treated Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 137, n. 11, p. 1126-1131, Novembro 2011.

CONSOLI, N. C. et al. A unique relationship determining strength of silty/clayey soils – Portland cement mixes. **Soils and Foundations www.sciencedirect.com**, v. 56, n. 6, p. 1082-1088, 2017.

CONSOLI, N. C. et al. Durability, strength, and stiffness of green stabilized sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 144, n. 9, p. 04018057, 2018.

CONSOLI, N. C. et al. Durability and strength of fiber-reinforced compacted gold tailings-cement blends. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 55, n. 4, p. 486-494, 2018a.

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**, v. 30, n. 8, p. 04018174, 2018b.

CONSOLI, N. C. et al. Use of sustainable binders in soil stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 2, p. 1-7, 2019.

CONSOLI, N. C. et al. Durability Assessment of Soil-Pozzolan-Lime Blends through Ultrasonic-Pulse Velocity Test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 8, p. 04020223, 2020.

CONSOLI, N. C. et al. Field and Laboratory Behaviour of Fine-Grained Soil Stabilised with Lime. **Canadian Geotechnical Journal** , v. 57, n. 6, p. 933-938, 2020.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, A.; SALDANHA, R. B. Parameters controlling strength of industrial waste-lime amended soil. **Soils and Foundations**, v. 51, n. 2, p. 265-273, 2011.

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**, v. 28, n. 11, p. 1-11, 2016.

CORDEIRO, G. C. et al. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement & Concrete Composites**, v. 30, p. 410-418, 2008.

CORDEIRO, G. C. et al. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement & Concrete Composites**, v. 30, p. 410-418, 2008.

COSTA FILHO, L. M.; SANTOS, A. C. B.; PALMA, A. **Investigação Geotécnica em Rejeitos de Mineração de Ouro**. Anais do XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, I Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, III Sinpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas. São Paulo: [s.n.]. 2002.

CRIADO, M.; PALOMO, A.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A. **Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products**. [S.l.]: Fuel, v. 84, 2005. 2048-2054 p.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**, v. 37, n. 8, p. 1633-1656, 1991.

DUTRÉ, V.; VANDECASTEELE, C. Solidification/stabilisation of arsenic-containing waste: leach tests and behaviour of arsenic in the leachate. **Waste Management**, v. 15, n. 1, p. 55-62, 1995.

DUARTE, A. P. **CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO**. UFMG: Tese de Doudorado, 2008.

DUXSON, P. et al. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 269, n. 1-3, p. 47-58, 2005.

DUXSON, P. et al. Geopolymer technology: The current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917-2933, 2007.

FELT, E. J. **Factors Influencing Physical Properties of Soil-cement Mixtures**. Bulletin 108: Highway Research Board, 1955. 138 p.

FERNANDES, M. M. **Mecânica dos Solos: Conceitos e Princípios Fundamentais**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, 2016.

FERNANDES, S. E. et al. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade. **Revista Matéria**, v. 20, n. 4, p. 909-923, 2015.

FESTUGATO, L. et al. Modelling tensile/compressive strength ratio of fibre reinforced cemented soils. **Geotextiles and Geomembranes**, 155-165, v. 46, n. 2, 2018.

FESTUGATO, L.; FOURIE, A.; CONSOLI, N. C. Cyclic shear response of fibre-reinforced cemented paste. **Géotechnique Letters**, n. 3, p. 5-12, 2013.

GARCIA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders. In: CHINDAPRASIT, F. P.-T. J. L. C. L. A. P. P. **Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes**. [S.l.]: Woodhead Publishing, v. 1, 2015. p. 19-47.

GOMES, L. E. DE O., CORREA, L. B., SÁ, F., NETO, R. R., AND BERNARDINO, A. F. "The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil". **Marine Pollution Bulletin**, v. 120, p. 1-2, 2017.

HAMEL, J. V.; GUNDESON, J. W.". Shear Strength of Home Stake Slimes Tailings. **Journal of Soil Mech. and Foundations Division**, New York, v. 99, n. 5, p. 427-431, 1973.

HARDJITO, B.; RANGAN, B. V. **Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete**. Perth, Australia. p. 103: Research Report GC1. Faculty of Engineering, Curtin University of Technology., 2005.

HEAD, K. H.; EPPS, R. J. **Manual of Soil Laboratory Testing: Permeability, Shear Strength and Compressibility tests**. 3. ed. Dunbeath: Whittles Publishing, v. 2, 2011.

HERRIN, M.; MITCHELL, H. Lime-soil Mixtures. **Highway Research Board Bulletin**, Washington, v. 304, p. 99-121, 1961.

HORPIBULSUK, S. et al. Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. **Constr. Build. Mater.**, v. 24, n. 10, p. 2011–2021, 2010.

HOSSAIN, K. M. A. Development of stabilized soils for construction applications. **Proc. Inst. Civ. Eng. - Ground Improvement**, v. 163, n. 3, p. 173-185, 2010.

HUSEIEN, G. F. et al. Influence of different curing temperatures and alkali activators on properties of GBFS geopolymer mortars containing fly ash and palm-oil fuel ash. **Construction and Building Materials**, p. 1229-1240, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Brasília: IBRAM, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração**. Brasília: IBRAM, 2017.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization: principles and practices**. Sydney: Butterworths, 1972.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas**. Brasília: [s.n.], v. 1, 2012.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, 2007. 1712 p.

JEDARI, C. et al. **Grain and Floc Size Distribution Analysis of Fine Coal Refuse Slurry**. Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Seoul: [s.n.]. 2017.

JEWELL, J. R. An Introduction to Tailings. In: _____ **Case Studies on Tailings Management**. Ottawa, Canadá: United Nations publications, 1998.

KAMPALA, A.; HORPIBULSUK, S. Engineering Properties of silty clay stabilized with calcium carbide residue. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 5, p. 632-644, 2013.

KIRK, T.; LUND, J. Decarbonization Pathways for Mines: A Headlamp in the Darkness. **Rocky Mountain Institute**, 2018.

KIRSCH, K.; BELL, A. **Ground Improvement**. 3. ed. New York: CRC Press, 2013.

KOMMITSAS, K.; ZAHARAKI, D. Geopolymerisation: A Review and Prospects for the Minerals Industry. **Minerals Engineering**, v. 20, n. 14, p. 1261-1277, 2007.

KÜHL, H. **Slag cement and process of making the same**. U.S. Patent 900,939, 1908.

LARNACH, W. J. Relationship Between Dry Density, Voids/Cement Ratio and Strength of Soil-cement Mixtures. **Civil Engineering and Public Works Reviews**, London, v. 55, n. 648, p. 903-905, 1960.

LEMOUGNA, P. N. et al. Recent developments on inorganic polymers synthesis and applications. **Ceramics International**, v. 42, n. 14, p. 15142-15159, 2016.

LIMA, F. T.; J., S. F.; THAUMATURGO, C. Xanes na borda-k do Si do sistema caulim-metaculim-geopolímero. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, v. 24, n. 2, p. 90-92, 2005.

LINS, F. F. **Flotação de minérios de ouro. (Relatório)**. Brasília: CETEM, 2000.

LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada**. Dissertação de Mestrado. Programa de

Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2007. 147 p.

LUZ, A. B. D.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, v. 1, 2010.

MASSAZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: HEWLETT, P. C. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 4. ed. Amsterdam: Butterworth Heinemann, 2004. p. 471-602.

MATEOS, M. **Physical and mineralogical factors in stabilization of Iowa soils with lime and fly ash**. [S.l.]: Iowa State University of Science and Technology, 1961. 247 p.

MCPHAIL, G. et al. **Development and Implementation of Thickened Tailings Discharge at Osborne Mine, Queensland, Australia**. International Seminar on Paste and Thickened Tailings. [S.l.]. 2004.

MELFI, A. J. et al. **Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016.

MELLO, J. W. V.; ABRAHÃO, W. A. P. G. Geoquímica da drenagem ácida. In: DIAS, L. E.; MELLO, J. W. V. **Recuperação de áreas**. Viçosa: UFV, 1998. p. 45-57.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F. **Concrete**. 1. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1981. 671 p.

MME, M. D. M. E. E. **Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010 - 2030) de geologia, mineração e transformação mineral**. [S.l.]: MME, 2009.

MUNIZ, D. H. D. F.; OLIVEIRA-FILHO, E. C. Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente. **Universitas: Ciências da Saúde**, v. 4, n. 1, p. 83-100, 2006.

NIERWINSKI, H. P. **Caracterização e Comportamento Geomecânico de Rejeitos de Mineração**. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 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**, v. 253, n. 10, p. 109748, 2020.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1305–1314, 2008.

PANDA, I. et al. Characterization of red mud as a structural fill and embankment material using bioremediation. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 119, p. 368-376, 2017.

PINTO, A. T. **Sistemas Ligantes Obtidos por Ativação Alcalina do Metacaulino**. Universidade do Minho, Portugal: Tese Doutorado, 2004.

POGGIALI, F. S. J. et al. **Caracterização da cinza de bagaço de cana de açúcar contaminada com quartzo proveniente da lavoura**. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS 2012. Joinville, Brazil.: [s.n.]. 2012.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Milestones in the analysis of alkali-activated binders. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 4, n. 2, p. 74-84, 2014.

PROVIS, J. L.; DUXSON, P.; VAN DEVENTER, J. S. J. The role of particle technology in developing sustainable construction materials. **Advanced Powder Technology**, v. 21, n. 1, p. 2-7, 2010.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications**. 1. ed. [S.l.]: Woodhead Publishing, v. 1, 2009.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Alkali-Activated Materials. State of the Art Report**. 224-AAM: RILEM TC, 2014.

PUERTAS, F. et al. A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 31, n. 12, p. 2043-2056, 2011.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2. ed. Piracicaba: ESALQ. Depto de Física e Meteorologia, v. 1, 1996. 160 p.

REPETTE, W. L. C. Cimentos Especiais de Base Mineral. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, 2010. p. 825-862.

ROY, D. M. Alkali-activated cements opportunities and challenges. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 249-254, 1999.

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**, v. 30, n. 6, p. 06018004, Agosto 2018.

SALDANHA, R. B.; REDDY, K. R.; CONSOLI, N. C. Influence of sodium chloride on leaching behavior of fly ash stabilized with carbide lime. **Construction and Building Materials journal**, v. 227, p. 116571, 2019.

SANTA, R. A. B. et al. Geopolymer synthesized from bottom coal ash and calcined paper. **Journal of Cleaner Production**, p. 302-307, 2013.

SCRIVENER, K. L.; KIRKPATRICK, R. J. **Innovation in use and research on cementitious material**. 12th International Congress of Chemistry of Cement. Montreal, Canada: [s.n.]. 2007.

SEIDALINOVA, A. **Monotonic and cyclic shear loading response of fine-grained**. The University of British Columbia: M.ASc. thesis, 2014.

SHERWOOD, P. **Soil stabilization with cement and lime**. London: Her Majesty Stationary Office, 1993.

SHI, C.; ROY, D.; KRIVENKO, P. **Alkali-Activated Cements and Concretes**. 1. ed. London: CRC Press, 2003.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. Rio 2016 sustainable construction commitments lead to new developments in recycled aggregate concrete.. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering**, v. 166, n. 6, p. 28-35, 2013.

TOMASI, L. F. **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE RESÍDUO DE MINERAÇÃO ESTABILIZADO COM CIMENTO**. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2018.

TRINDADE, R. D. B. E.; BARBOSA FILHO, O. **Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Ground Water and Drinking Water: National Primary Drinking Water Regulations**. Washington, D.C., United States.: USEPA, 2021.

VAN DEVENTER, J. S. J. et al. Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, n. 1, p. 145-155, 2010.

VAN JAARRSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, L. S. J.; LORENZEN, L. The potencial use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: part I. Theory and applications. **Minerals Engineering**, v. 10, n. 7, p. 659-669, julho 1997.

VARGAS, A. S. et al. The effects of Na₂O/SiO₂molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 6, p. 653-660, jul 2011.

VIANA DA FONSECA, A.; CRUZ, R. C.; CONSOLI, N. C. Strength Properties of Sandy Soil–Cement Admixtures. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 27, n. 6, p. 681-686, 2009.

VICK, S. G. **Planning, Design and Analysis of Tailings Dams**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1983.

VILLAR, L. H. A. E. **Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita**. Tese de doutorado. Pontifica Universidade Católica do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2002. 461 p.

MINISTRY OF HOUSING, SPATIAL PLANNING AND THE ENVIRONMENT - VROM. **Dutch Target and Intervention Values**. Ministerie van Volksuisveting Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. Amsterdã, Holanda.: VROM, 2000.

ZARDARI, M. A. **MECHANICAL PROPERTIES OF FINE GRAINED, SULPHUR RICH, SILTY SOILS**. Luleå University of Technology. Luleå, Suécia, p. 100. 2010.

ZHANG, L.; AHMARI, S.; ZHANG, J. Synthesis and characterization of fly ash modified mine tailings-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 9, p. 3773-3781, 2011.

APÊNDICE – Tratamentos de resistência e rigidez

Resistência á compressão simples e rigidez das amostras com o ligante alternativo

Amostra*	RCS (MPa)	G ₀ (GPa)	η	B _{iv}	$\eta/B_{iv}^{0,28}$
CP I 16.5 7 15	0.78	0.51	37.85	11.50	19.10
CP II 16.5 7 15	0.72	0.55	37.85	11.50	19.10
CP I 16.5 7 30	3.62	2.77	35.32	22.99	14.68
CP II 16.5 7 30	3.60	2.95	35.40	22.96	14.72
CP I 14.5 7 15	0.23	0.29	45.84	10.02	24.04
CP II 14.5 7 15	0.27	0.32	45.55	10.07	23.86
CP I 14.5 7 30	1.94	1.86	43.00	20.26	18.52
CP II 14.5 7 30	2.00	1.69	42.53	20.43	18.28
CP I 16.5 28 15	2.68	2.26	37.46	11.57	18.87
CP II 16.5 28 15	2.47	2.21	37.57	11.55	18.94
CP I 16.5 28 30	6.78	3.99	35.34	22.98	14.69
CP II 16.5 28 30	6.36	3.82	34.86	23.15	14.46
CP I 14.5 28 15	1.19	1.44	45.87	10.02	24.06
CP II 14.5 28 15	1.33	1.59	44.87	10.20	23.41
CP I 14.5 28 30	3.66	2.57	42.42	20.47	18.22
CP II 14.5 28 30	3.99	2.44	43.01	20.26	18.52
CP I 15.5 17.5 22.5	2.82	2.17	39.52	16.45	18.04
CP II 15.5 17.5 22.5	2.95	2.16	40.06	16.30	18.33
CP III 15.5 17.5 22.5	2.76	2.20	39.60	16.43	18.09

*CP_A_B_C_D: Corpo de prova; Repetição; Peso específico aparente seco; Tempo de cura; Teor de ligante.

Resistência á compressão simples e rigidez das amostras com o cimento Portland

Amostra*	RCS (MPa)	G ₀ (GPa)	η	C _{iv}	$\eta/C_{iv}^{0,28}$
CP I 16.5 7 15	5.62	3.44	41.42	7.72	23.37
CP II 16.5 7 15	5.66	3.35	41.67	7.69	23.54
CP I 16.5 7 30	10.31	4.92	42.45	15.50	19.70
CP II 16.5 7 30	9.46	4.81	43.06	15.34	20.05
CP I 14.5 7 15	2.03	1.99	49.08	6.71	28.80
CP II 14.5 7 15	1.97	1.71	49.21	6.69	28.90
CP I 14.5 7 30	4.39	2.88	49.86	13.51	24.06
CP II 14.5 7 30	4.96	2.77	49.87	13.50	24.06
CP I 16.5 28 15	6.57	3.43	41.50	7.71	23.42
CP II 16.5 28 15	7.52	4.04	41.59	7.70	23.48
CP I 16.5 28 30	11.99	5.39	42.73	15.43	19.86
CP II 16.5 28 30	12.37	5.31	43.11	15.33	20.08
CP I 14.5 28 15	3.20	2.48	48.57	6.78	28.42
CP II 14.5 28 15	3.57	2.48	49.10	6.71	28.82
CP I 14.5 28 30	5.84	3.31	49.58	13.58	23.88
CP II 14.5 28 30	6.38	3.47	49.98	13.47	24.13
CP I 15.5 17.5 22.5	5.05	3.64	45.80	10.83	23.50
CP II 15.5 17.5 22.5	4.97	3.47	46.18	10.76	23.74
CP III 15.5 17.5 22.5	4.89	3.13	45.75	10.84	23.47

*CP_A_B_C_D: Corpo de prova; Repetição; Peso específico aparente seco; Tempo de cura; Teor de cimento.