

Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil:
Construção e Infraestrutura



ESCOLA DE ENGENHARIA
UFRGS

Juliane Rodrigues Falcão

Influência do resíduo dregs na reação álcali-agregado: análise comparativa entre diversos cimentos



PPGCI

Porto Alegre
2024

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e
Infraestrutura**

Juliane Rodrigues Falcão

**Influência do resíduo dregs na reação álcali-agregado:
análise comparativa entre diversos cimentos**

Porto Alegre

2024

JULIANE RODRIGUES FALCÃO

**INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DREGS NA REAÇÃO ÁLCALI-
AGREGADO: análise comparativa entre diversos cimentos**

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

Profa. Angela Borges Masuero

Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Brasil

Orientadora

**Profa. Denise Carpena Coitinho Dal
Molin**

Dra. pela Universidade de São Paulo,
Brasil

Orientadora

Porto Alegre
2024

JULIANE RODRIGUES FALCÃO

INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DREGS NA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: análise comparativa entre diversos cimentos

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, área de pesquisa Tecnologia dos Materiais e Sistemas Construtivos, e aprovada em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 25 de abril de 2024.

Prof. Angela Borges Masuero

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Orientadora

Prof. Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Dra. pela Universidade de São Paulo, Brasil

Orientadora

Prof. Ana Carolina Badalotti Passuello
Coordenadora PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Daniel Tregnago Pagnussat (UFRGS)

Doutor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Nicole Pagan Hasparyk (ELETROBRAS Furnas)

Doutora, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Alexandre Silva de Vargas (UFSM)

Doutor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Aos meus pais, Rosângela e
Paulo e a minha irmã, Patricia.

AGRADECIMENTOS

As Profas. Dras. Angela Masuero e Denise Dal Molin, pela orientação dedicada durante todo processo de elaboração desta dissertação, por todas as contribuições, apoio constante, incentivo e por serem fonte de inspiração.

À empresa CMPC, pelo fornecimento das amostras do resíduo e dados essenciais para a realização desse trabalho.

Ao PPGCI, NORIE e LAMTAC por terem me proporcionado a oportunidade de fazer mestrado. Aos laboratórios LINCE, LACER, LAPOL, LACOR e CMM pelo auxílio na realização dos ensaios de caracterização dos materiais.

Aos amigos do LAMTAC/NORIE que compartilharam comigo seus materiais, possibilitando o início imediato desta pesquisa. Aos bolsistas do LAMTAC, pelo auxílio na realização das atividades laboratoriais.

Aos professores Alexandr, Francieli, Nicole e Daniel por todas as contribuições feitas na qualificação e defesa final. Aos técnicos Airton e Ari por todo o apoio na realização dos ensaios laboratoriais, pelas conversas e palavras de conforto. Ao técnico Juliano pela troca da resistência do banho térmico quando tudo parecia que não ia dar certo. A Denise (secretária) por todos os cafés, chás e conversas.

Aos meus pais, Rosângela e Paulo, por tornarem possível a realização deste mestrado, por não medirem esforços para entender a minha pesquisa, pelo apoio, sabedoria e amor, essenciais ao longo desta jornada acadêmica. A minha irmã Patricia, colega de profissão, que, mesmo não sendo da mesma área, sempre que pôde contribuiu de forma representativa na leitura e análise de dados, pelas conversas de apoio e conforto, pelo exemplo de profissional e pessoa. Amo vocês!

Ao grupo de materiais do NORIE, representado por Júlia, Rodrigo, Thainá, Gabrieli, Marciele, Victor, Ludimilla e Leonardo, pela amizade, companheirismo e momentos de descontração que foram como fôlego para a continuidade deste trabalho. Em especial ao Rodrigo, pela parceria, conversas, apoio, por todas as discussões técnicas, por ouvir minhas reclamações, ajudar a resolver problemas e como ele mesmo diz, ser um “pai” para esse trabalho. Vocês são pessoas incríveis!

A Deus por tudo!

“Tu te tornas eternamente responsável por aquilo
que cativas.”

(Antoine de Saint-Exupéry)

RESUMO

FALCÃO, J. R. **Influência do resíduo dregs na reação álcali-agregado: análise comparativa entre diversos cimentos.** 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

Devido à grande utilização de materiais cimentícios, a construção civil é responsável por diversos impactos ambientais negativos, tais como a exploração de matérias-primas naturais e a emissão de gases poluentes para a atmosfera. A fim de reduzir esses impactos, várias alternativas têm sido estudadas, incluindo a reutilização e/ou reciclagem de resíduos na indústria cimenteira ou em concreteiras. Nesse contexto, em 2022, o Brasil produziu cerca de 25 milhões de toneladas de celulose. Através disso, está a grande geração de resíduos sólidos a partir do processo *Kraft*, muito adotado pelas indústrias. Estima-se que a geração do resíduo dregs, proveniente do processo de clarificação do licor verde, é em média de 25 quilogramas por tonelada de celulose produzida, o que representa um grande desafio para sua utilização frente à grande produção de celulose. Considerando que o dregs possui, em sua composição um teor considerável de $\text{Na}_2(\text{OH})_2$ equivalente, sua viabilidade na indústria da construção civil, deve passar pela verificação da influência do resíduo na reação álcali-agregado (RAA). Nesse viés, esse trabalho visa analisar o efeito da adição de dregs como fíler em diferentes porcentagens (5, 10 e 15%), em relação à massa do cimento na RAA. Inicialmente, foi realizada a caracterização do resíduo, a partir de amostras de diferentes períodos de geração na indústria para verificação da sua homogeneidade. O dregs foi moído mecanicamente por meio de um moinho de bolas por duas horas. No trabalho, são abordados diferentes tipos de cimento (CP V-ARI, CP V-ARI RS, CP V-ARI com a adição de 10% de sílica ativa, CP II-Z, CP II-F, CP IV e CP III) a fim de analisar o potencial mitigador das expansões da reação álcali-agregado. A RAA foi avaliada por meio do ensaio de barras de argamassa pelo método acelerado da NBR 15577-4 (ABNT, 2018). A resistência à compressão foi analisada a partir da NBR 7215 (ABNT, 2018), esse ensaio foi adotado como parâmetro de controle da qualidade dos cimentos. A análise da microestrutura das argamassas foi conduzida por meio do microscópio eletrônico de varredura com acoplamento da sonda de energia dispersiva de raios-X. Os resultados demonstram que, conforme o aumento no teor de adição do resíduo dregs, há um aumento nas expansões. Dentre todos os cimentos utilizados, o CP III e o CP IV foram os que desempenharam melhor o papel de inibidor da RAA. Ainda, nota-se uma redução, em geral, na resistência à compressão dos corpos de prova que continham a adição de dregs. A análise por microscopia permitiu a identificação do gel sílico alcalino na maior parte das amostras. Em conclusão, apesar da incorporação de dregs promover um aumento das expansões por reação álcali-agregado, é possível fazer a utilização do resíduo na presença dos cimentos já conhecidamente mitigadores.

Palavras-chave: Dregs. Adição. Reação álcali-agregado.

ABSTRACT

FALCÃO, J. R. **Influence of dregs residue on the alkali-aggregate reaction: comparative analysis among various cements.** 2024. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, Engineering School, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

Due to the extensive use of cementitious materials, the construction industry is responsible for several negative environmental impacts, such as the exploitation of natural raw materials and the emission of polluting gases into the atmosphere. Various alternatives have been studied to reduce these impacts, including the reuse and/or recycling of waste in the cement industry or concrete plants. In this context, in 2022, Brazil produced approximately 25 million tons of cellulose. Coupled with this is the significant generation of solid waste from the Kraft process, which is widely adopted by industries. It is estimated that the generation of dregs waste from the green liquor clarification process averages 25 kilograms per ton of cellulose produced, which represents a significant challenge for its utilization given the large production of cellulose. Considering that dregs have a considerable equivalent $\text{Na}_2(\text{OH})_2$ content in their composition, their viability in the construction industry must be verified through the influence of the waste on the alkali-aggregate reaction (AAR). This work aims to analyze the effect of adding dregs as filler in different percentages (5%, 10%, and 15%) relative to the cement mass in AAR. Initially, the waste was characterized using samples from different periods of generation in the industry to verify its homogeneity. The dregs were mechanically ground using a ball mill for two hours. The research addresses different types of cement (CP V-ARI, CP V-ARI RS, CP V-ARI with the addition of 10% silica fume, CP II-Z, CP II-F, CP IV, and CP III) to analyze the potential for mitigating the expansions of the alkali-aggregate reaction. AAR was evaluated through the mortar bar test using the accelerated method of NBR 15577-4 (ABNT, 2018). Compressive strength was analyzed according to NBR 7215 (ABNT, 2018), with this test being adopted as a quality control parameter for the types of cement. The microstructure analysis of the mortars was conducted using a scanning electron microscope with an energy-dispersive X-ray probe. The results demonstrate that, as the proportion of dregs addition increases, expansions also increase. Among all the types of cement used, CP III and CP IV performed the best in inhibiting AAR. Additionally, there is generally a reduction in the compressive strength of the specimens containing dregs. Microscopy analysis allowed the identification of alkali-silica gel in most of the samples. In conclusion, although the incorporation of dregs promotes an increase in expansions due to the alkali-aggregate reaction, it is possible to utilize the waste in the presence of cements that are already known as mitigators.

Keywords: Dregs. Addition. Alkali-aggregate reaction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo <i>Kraft</i>	27
Figura 2 – Planta de recuperação dos regentes do processo <i>Kraft</i>	28
Figura 3 – Maiores produtores mundiais de celulose em 2022 (em toneladas)	29
Figura 4 - Mapeamento das maiores indústrias de celulose do Brasil	30
Figura 5 - Porcentagem de produção de celulose de cada indústria em relação ao todo.	31
Figura 6 - Esquema da hipótese da nucleação	35
Figura 7 - Exemplificação da reação álcali-agregado.....	43
Figura 8 - Potencial reativo de agregados miúdos e graúdos do Brasil	45
Figura 9 - Localização dos agregados testados por Tiecher (2006).....	45
Figura 10 - Fissuração de um bloco de fundação afetado pela RAA	46
Figura 11 - Fissuras provenientes da reação álcali-agregado na fundação da ponte Paulo Guerra.....	46
Figura 12 - Influência dos agregados na RAA: (a) tamanho das partículas e (b) módulo de finura.....	47
Figura 13 - Expansão das amostras com diferentes granulometrias.....	48
Figura 14 - Influência da forma do agregado na reação álcali-agregado	48
Figura 15 - Influência do teor de ar incorporado na RAA	50
Figura 16 - Influência da umidade na reação álcali-agregado.....	52
Figura 17 - Influência da temperatura na reação álcali-agregado	52
Figura 18 - Capacidade mitigadora de diferentes cimentos frente a agregados do sul do Brasil	54
Figura 19 - Potencial mitigador do CP IV em relação ao CP II-F	54
Figura 20 - Potencial mitigados dos cimentos CP II-Z e CP IV	55
Figura 21 - Estudos preliminares.....	58
Figura 22 - Fluxograma do programa experimental da pesquisa	60
Figura 23 - Diferença temporal entre as amostras	61
Figura 24 - Localização das principais fábricas do Brasil.....	61
Figura 25 - Preparação do resíduo dregs para utilização na pesquisa	62
Figura 26 – Caracterização ambiental do dregs: lixiviação, solubilização, diluição e análises realizadas por ICP.....	64
Figura 27 - Curvas de termogravimetria obtidas para as diferentes amostras de Dregs.....	67
Figura 28 - Difratogramas das amostras de dregs (C: Calcita e N: nitratina).....	68
Figura 29 - Termogravimetrias dos cimentos: (a) CP V-ARI RS; (b) CP V-ARI; (c) CP II-Z; (d) CP II-F; (e) CP IV e (f) CPIII	70

Figura 30 – Sílica ativa: micrografia eletrônica de varredura por elétrons secundários (10.000X).....	73
Figura 31 - Exemplificação dos procedimentos de ensaio da RAA.....	75
Figura 32 - Representação esquemática das amostras dispostas em banho térmico com água.....	76
Figura 33 - Ilustração dos corpos de prova alocados no banho térmico: (a) vista superior; (b) corte.....	77
Figura 34 - Exemplificação do processo de amostragem para a MEV.....	78
Figura 35 - Exemplificação do procedimento do ensaio de resistência à compressão: moldagem, desforma, cura e ruptura.....	78
Figura 36 - Expansão obtida para os diferentes cimentos: (a) CP V ARI – RS, (b) CP V – ARI, (c) CP V + 10%SA, (d) CP II-Z, (e) CP II -F, (f) CP IV, (g) CP III.....	79
Figura 37 - Expansões médias e classificações sobre o grau de reatividade aos 30 dias.....	81
Figura 38 - Efeito isolado do tipo de cimento na expansão.....	85
Figura 39 – Efeito isolado do teor de adição de dregs na expansão.....	85
Figura 40 - Comparação múltipla de médias: (a) CP V-ARI, (b) CP V+10%SA, (c) CP IV e (d) CP III.....	86
Figura 41 - Comparação entre o teor de álcalis e a expansão.....	87
Figura 42 - Mitigação da reação álcali-agregado em relação (a) CP V-ARI e (b) CP II-F.....	88
Figura 43 - Expansão aos 30 e 63 dias para todos os cimentos: (a) REF, (b) 5D, (c) 10D e (d) 15D.....	90
Figura 44 - Grau de reatividade das amostras aos 63 dias.....	91
Figura 45 - Expansão obtida para a combinação de areia britada, cimento CP II-F e dregs.....	92
Figura 46 - Expansão obtida para a combinação de areia britada, cimento CP IV e dregs.....	92
Figura 47 - Comparativo entre areia reativa e não reativa com cimento CP II-F: (a) 0% de adição e (b) 10% de adição.....	93
Figura 48 - Comparativo entre areia reativa e não reativa com cimento CP IV: (a) 0% de adição e (b) 10% de adição.....	94
Figura 49 - Resistência à compressão das argamassas com diferentes cimentos, aos 28 dias.....	94
Figura 50 - Efeito isolado do teor de adição de dregs na resistência à compressão.....	96
Figura 51 - Efeito da interação entre o tipo de cimento e do teor de adições na expansão.....	96
Figura 52 – Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP V-ARI RS sem dregs: (a) 500x e (b) 1000x.....	99

Figura 53 – Análise por EDS do CPV ARI-RS sem dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3.....	99
Figura 54 - Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP V-ARI RS com dregs: (a) 500x e (b) 1000x.....	100
Figura 55 – Análise por EDS do CPV ARI-RS com dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3.....	100
Figura 56 - Presença de etringita e gel álcali-sílica em um poro.....	100
Figura 57 - Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP V-ARI sem dregs: (a) 100x e (b) 500x.....	101
Figura 58 – Análise por EDS do CPV ARI sem dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3.....	101
Figura 59 – Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP V-ARI com dregs: (a) 500x e (b) 1000x.....	102
Figura 60 – Análise por EDS do CPV ARI com dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3.....	102
Figura 61 – Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP V-ARI +10%SA sem dregs: (a) 500x e (b) 1000x.....	103
Figura 62 – Análise por EDS do CPV ARI + 10%SA sem dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3	103
Figura 63 – Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP V-ARI+10%SA com dregs: (a) 500x e (b) 1000x.....	103
Figura 64 – Análise por EDS do CPV ARI + 10%SA com dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3	104
Figura 65 – Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP II-Z sem dregs: (a) 100x e (b) 500x.....	104
Figura 66 – Análise por EDS do CP II-F sem dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3.....	105
Figura 67 – Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP II-Z com dregs: (a) 500x e (b) 1000x.....	105
Figura 68 – Análise por EDS do CP II-Z com dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3.....	105
Figura 69 – Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP II-F sem dregs: (a) 1000x e (b) 2000x.....	106
Figura 70 – Análise por EDS do CP II-F sem dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3.....	106
Figura 71 – Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP II-F com dregs: (a) 500x e (b) 2000x.....	107
Figura 72 – Análise por EDS do CP II-F com dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3.....	107
Figura 73 - Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP IV sem dregs: (a) 500x e (b) 1000x.....	108

Figura 74 – Análise por EDS do CP IV sem dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3	108
Figura 75 - Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP IV com dregs: (a) 1000x e (b) 4000x	108
Figura 76 – Análise por EDS do CP IV com dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Geração de dregs.....	29
Tabela 2 – Composição química do dregs por FRX (continua).....	31
Tabela 3 - Teor de umidade e de matéria orgânica das amostras	62
Tabela 4 - Resultados e limites para o ensaio de lixiviação (em mg/L).....	65
Tabela 5 - Resultados e limites para o ensaio de solubilização (em mg/L).....	65
Tabela 6 - Caracterização química das amostras de dregs por fluorescência de raios - X.....	66
Tabela 7 – Perda de massa do carbonato de cálcio nas amostras de dregs	67
Tabela 8 - Parâmetros físicos do dregs.....	68
Tabela 9 - Elementos maiores dos cimentos utilizados obtidos por FRX (continua) .	69
Tabela 10 - Perdas de massa dos produtos presentes das amostras de cimento	71
Tabela 11 - Características físicas dos cimentos utilizados	72
Tabela 12 - Concentração de elementos maiores da sílica ativa (PF: perda ao fogo; EA: equivalente alcalino).....	72
Tabela 13 - Características físicas da sílica ativa.....	73
Tabela 14 - Granulometria requerida pela NBR 15577 – 4 (ABNT, 2018)	74
Tabela 15 - Quantidades, em massa, dos insumos utilizados para as misturas	76
Tabela 16 - Expansões médias e classificação em relação ao potencial reativo aos 30 dias (DRM: desvio relativo máximo; CV: coeficiente de variação)	81
Tabela 17 - Análise de variância da RAA.....	84
Tabela 18 - <i>One-way</i> anova para a reação álcali-agregado.....	86
Tabela 19 - ANOVA da RAA com agregado britado.....	93
Tabela 20 - Análise de variância dos fatores combinados para a resistência à compressão.....	95
Tabela 21 - <i>One-way</i> ANOVA da resistência à compressão.....	97
Tabela 22 – Comparação múltipla de médias para a resistência à compressão: (a) CP V-ARI RS, (b) CP V+10%SA, (c) CP V-ARI, (d) CP II-Z, (e) CP II-F	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fases cristalinas presentes no dregs determinadas por DRX.....	32
Quadro 2 - Características físicas do dregs	33
Quadro 3 - Preparação do resíduo conforme a bibliografia (continua).....	33
Quadro 4 - Utilização de dregs em matrizes cimentícias conforme a bibliografia (continua)	37
Quadro 5 - Influência dos aditivos químicos na reação álcali-agregado	51
Quadro 6 - Requisitos para os materiais inibidores da RAA	53

LISTA DAS PRINCIPAIS ABREVIATURAS E SIGLAS

CP: Cimento Portland

CO₂: dióxido de carbono

UNFCCC: Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

ODS: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU: Organização das Nações Unidas

LAMTAC: Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

LINCE: Laboratório de Inovação em Cimentos Ecoeficientes

LACER: Laboratório de Materiais Cerâmicos

LACOR: Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais

CMM: Centro de Microscopia e Microanálise

NORIE: Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

FRX: fluorescência de raios – X

DRX: difração de raios – X

TG: termogravimetria

BET: área superficial

d₁₀: diâmetro pelo qual passam 10% das partículas

d₅₀: diâmetro pelo qual passam 50% das partículas

d₉₀: diâmetro pelo qual passam 90% das partículas

g: gramas

ton: toneladas

REF: referência

5D: 5% de dregs

10D: 10% de dregs

15D: 15% de dregs

CP V-ARI: cimento Portland de alta resistência inicial tipo V

CP V-ARI RS: cimento Portland de alta resistência inicial tipo V resistente a sulfatos

CP V+10%SA: cimento Portland tipo V com adição de 10% de sílica ativa

CP II-Z: cimento Portland tipo II com adição de material pozolânico

CP II-F: cimento Portland tipo II com adição de material carbonático

CP IV: cimento Portland com adição de material pozolânico tipo IV

CP III: cimento Portland com adição de escória granulada de alto forno tipo III

PF: perda ao fogo

EA: equivalente alcalino

NaOH: hidróxido de sódio

Na₂O: sulfeto de sódio

CaO: óxido de cálcio

MgO: óxido de magnésio

SiO₂: dióxido de silício

K₂O: óxido de potássio

CaCO₃: carbonato de cálcio

NaNO₃: nitrato de sódio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVA.....	23
1.2	OBJETIVOS	25
1.2.1	Objetivo geral	25
1.2.2	Objetivos específicos	25
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	PROCESSO <i>KRAFT</i>	27
2.2	RESÍDUO DREGS	28
2.2.1	Características químicas do dregs.....	31
2.2.2	Características físicas do dregs	32
2.3	ADIÇÕES MINERAIS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS.....	34
2.4	USO DO RESÍDUO DREGS	36
2.4.1	Uso de dregs em matrizes cimentícias	37
2.5	REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.....	41
2.5.1	Reação álcali-sílica	42
2.5.2	Fatores influentes	46
2.5.2.1	<i>Agregado</i>	47
2.5.2.2	<i>Cimento.....</i>	49
2.5.2.3	<i>Água e aditivos.....</i>	49
2.5.2.4	<i>Condições ambientais e tempo de exposição.....</i>	51
2.5.3	Principais medidas de mitigação da RAA.....	53
2.5.3.1	<i>Materiais alternativos para a mitigação da RAA.....</i>	56
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	58
3.1	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	59
3.1.1	Variáveis de resposta	59
3.1.2	Fatores controláveis	59
3.1.3	Fatores constantes	59
3.2	PREPARAÇÃO DO RESÍDUO.....	61
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	63
3.3.1	Dregs.....	64
3.3.1.1	<i>Caracterização ambiental</i>	64
3.3.1.2	<i>Caracterização química</i>	66

3.3.1.3	<i>Caracterização física</i>	68
3.3.2	Cimentos	69
3.3.2.1	<i>Caracterização química</i>	69
3.3.2.2	<i>Caracterização física</i>	72
3.3.3	Sílica ativa	72
3.3.3.1	<i>Caracterização química</i>	72
3.3.3.2	<i>Caracterização física</i>	72
3.3.4	Agregados	73
3.3.4.1	<i>Areia natural</i>	74
3.3.4.2	<i>Areia britada</i>	74
3.3.5	Água	74
3.4	MÉTODOS	75
3.4.1	Reação álcali-agregado	75
3.4.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDS)	77
3.4.3	Resistência à compressão	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
4.1	COMPORTAMENTO EXPANSIVO	79
4.1.1	Análise estatística dos resultados	84
4.1.2	Avaliação do efeito do teor de álcalis em relação à expansão	87
4.1.3	Influência dos diferentes cimentos utilizados	88
4.1.3.1	<i>Comparação entre as idades de 30 e 63 dias</i>	89
4.1.4	Areia britada potencialmente inócua	91
4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	94
4.2.1	Análise de variância	95
4.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ESPECTROMETRIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X (EDS)	98
5	CONCLUSÕES	110
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
7	REFERÊNCIAS	113
	APÊNDICE A – ESTUDO DE MOAGEM	125
	APÊNDICE B – SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CP II – F POR DREGS EM ARGAMASSAS	127

APÊNDICE C – SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CP II – Z POR DREGS EM ARGAMASSAS 129
APÊNDICE D – ADIÇÕES DE 7,5 E 15% DE DREGS EM ARGAMASSAS..... 131

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das principais indústrias do mundo e responsável por um grande uso de recursos naturais e geração de materiais poluentes. Nesse contexto, o cimento Portland (CP), muito utilizado em argamassas e concretos, emite uma ampla quantidade de gases de efeito estufa durante sua produção, sendo atribuído por aproximadamente 8% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) (CHATHAM HOUSE, 2018).

Diversas ações visam incentivar o desenvolvimento e adoção de tecnologias e materiais mais sustentáveis na construção civil, como, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU que incluem o objetivo de promover uma construção sustentável e infraestrutura resiliente (ONU, 2023). Outro exemplo está relacionado ao Acordo de Paris que, por sua vez, estabelece metas globais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (UNCC, 2015). Assim, a busca por alternativas mais sustentáveis ao cimento Portland convencional é uma forma de contribuir para o cumprimento dessas metas.

No cenário atual, a utilização de materiais cimentícios suplementares (MCS) tem-se apresentado como principal alternativa ao desenvolvimento de cimentos com reduzidos teores de clínquer (HE *et al.*, 2022; JUENGER; SNELLINGS; BERNAL, 2019; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). O uso de MCS residuais, como cinza volante, sílica ativa e escória granulada de alto forno já é amplamente adotado pela indústria cimenteira. A NBR 16697 (ABNT, 2018) permite a substituição parcial do clínquer por até 75% de escória de alto forno e até 50% de material pozzolânico. No entanto, conforme destacado por Scrivener, John e Gartner (2018) até 2050 esses recursos poderão atender menos de 20% da demanda global, havendo espaço para o desenvolvimento de novas pesquisas que busquem por materiais alternativos potenciais para a produção de cimento.

A indústria do cimento tem adotado a adição de pó de calcário como fíler a partir da substituição parcial do clínquer, promovendo uma redução na emissão de poluentes (SCRIVENER, KAREN L.; JOHN; GARTNER, 2018). Além de ser uma alternativa mais sustentável, o cimento com fíler calcário pode refinar a microestrutura e reduzir a porosidade dos materiais cimentícios (WANG, DEHUI *et al.*, 2018). Estudos

também demonstram que o calcário pode reagir, no processo de hidratação do cimento com a alumina e formar compostos carboaluminatos que, por sua vez, contribuem para a resistência e durabilidade (LOTHENBACH *et al.*, 2008; MATSCHEI; LOTHENBACH; GLASSER, 2007).

A utilização de resíduos industriais também tem sido foco de estudo pela comunidade científica. Os materiais podem ser finamente moídos e utilizados como fíler, desde que apresentem uma composição química adequada. Os filers podem ser adicionados ao concreto, sobre a massa do cimento, desempenhando o papel de preencher os vazios e criar pontos de nucleação, dessa forma, promovendo uma melhoria nas propriedades mecânicas e na durabilidade (LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2003).

Essa abordagem pode reduzir o impacto ambiental e promover uma maior sustentabilidade na indústria da construção por meio de uma diminuição do consumo de clínquer e utilização de resíduos sem reaproveitamento definido. Entre esses resíduos, estão os gerados a partir da produção de celulose.

O Brasil ocupa segundo colocado no *ranking* dos maiores produtores de celulose do mundo em 2022, produzindo cerca de 25 milhões de toneladas anualmente (IBÁ, 2022). Com base na grande produção, existe uma geração considerável de resíduos sólidos da indústria, os principais são a lama de cal, o dregs e o grits. Cabe, no entanto, ressaltar que a lama de cal já possui sua utilização dentro do próprio processo de recuperação de reagentes da indústria. Já o dregs e o grits não possuem uso dentro dos processos adotados.

O resíduo dregs é gerado a partir do processo de clarificação do licor verde (composto por carbonato de sódio e sulfeto de sódio), que consiste na remoção, por decantação, dos sólidos suspensos e lavagem do material, para remoção da soda residual (MARTINS, 2006). O grits é um resíduo proveniente do hidratador, sendo classificado como uma cal não calcinada, removida do fundo do apagador (TORRES, 2016). Estima-se que, a partir da produção nacional de celulose pelo processo *Kraft*, tem-se a geração aproximada de dregs e grits, respectivamente, 196 e 28 milhões de toneladas. É notável que esses resíduos apresentam uma geração representativa e sinalizam possibilidade e necessidade de reaproveitamento.

O dregs foi selecionado para ser estudado nesta pesquisa devido as suas características físicas e químicas e maior quantidade gerada. A fim de promover o beneficiamento, o resíduo já foi o objeto de pesquisa em diversos trabalhos. Martínez-Lage *et al.* (2016) analisaram as propriedades mecânicas de argamassas e concretos a partir da substituição do cimento por dregs. Srivastava *et al.* (2024) e Torres *et al.* (2017) avaliaram o potencial de utilização do resíduo na produção de clínquer. Menezes (2022) e Oliveira (2022) promoveram a substituição da cal hidratada por dregs em argamassas. Entretanto, por meio da composição química do resíduo apresentada por diversos trabalhos, verifica-se a presença de óxido de sódio (Na_2O) em teor representativo (FARAGE *et al.*, 2019; MARTÍNEZ-LAGE *et al.*, 2016; MYMRIN *et al.*, 2020; SANTOS *et al.*, 2019), sendo esse, possivelmente, o principal desafio para o aproveitamento do dregs em concretos e argamassas e ainda não abordado pela bibliografia.

Com isso, foi desenvolvido um programa experimental voltado à avaliação da reação álcali-agregado pelo método acelerado de barras de argamassa. Complementarmente, é analisada a microestrutura e a resistência mecânica das argamassas.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

O crescimento populacional e o aumento na demanda por produtos de todos os tipos têm levado a um esgotamento acelerado dos recursos naturais do planeta. No Brasil, em 2023, por exemplo, os recursos foram esgotados em agosto, indicando que o consumo ultrapassou a capacidade de renovação desses (GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2023). Esta, infelizmente, é uma realidade global que exige uma mudança nos padrões de produção e consumo.

Nesse contexto, o cimento Portland convencional, amplamente utilizado na construção civil, é responsável por uma grande emissão de gases poluentes. Isso ocorre porque a sua produção requer altas temperaturas, o que consome grande quantidade de energia e gera emissões de CO_2 (MADDALENA; ROBERTS; HAMILTON, 2018; SCRIVENER, KAREN L.; JOHN; GARTNER, 2018). Além disso, impactos ambientais representativos são gerados a partir da extração de matéria-prima para utilização na produção do cimento.

Dessa forma, tem havido uma grande necessidade de soluções que promovam uma diminuição na emissão de gases poluentes e necessidade de materiais naturais para a produção do cimento. Uma das alternativas é o uso de adições minerais, como o metacaulim, a escória de alto-forno e as cinzas volantes que podem substituir o clínquer parcialmente no processo de produção (SCRIVENER, KAREN L.; JOHN; GARTNER, 2018). Outra alternativa é a adoção do efeito fíler em materiais cimentícios, podendo, assim, diminuir o consumo de clínquer e elevar a resistência e a durabilidade.

Com isso, a fim de reduzir o impacto ambiental da extração de matéria-prima e do descarte, os resíduos podem ser uma opção viável para a utilização na construção civil, desde que preencham os requisitos mínimos para seu uso. São exemplos, os resíduos de construção e demolição, de mineração e industriais.

Nesse viés, a indústria de celulose é um setor que tem apresentado um crescimento representativo nos últimos anos, impulsionado pelo aumento da demanda por papel e outros produtos derivados da celulose. Tendo em vista a significativa quantidade de resíduos gerada pela indústria, fazer o uso desses pode contribuir substancialmente para um aumento na sustentabilidade da indústria de celulose a partir de uma redução nos impactos ambientais gerados pelo descarte em aterros. Junto a isso, está a oportunidade do uso de materiais sem destinação adequada como fíler em matrizes cimentícias.

O resíduo dregs ainda é pouco estudado pela bibliografia em matrizes cimentícias. Alguns trabalhos já desenvolvidos demonstram seu potencial como fíler, em argamassas e concretos (ALVARENGA *et al.*, 2021; FALCÃO *et al.*, 2023; MARTÍNEZ-LAGE *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2017; TORRES, SAMANTA *et al.*, 2017). Seu potencial como substituto ao clínquer também já foi abordado (SRIVASTAVA *et al.*, 2024; TORRES, *et al.*, 2020). Entretanto, nenhuma abordagem em relação à reação álcali-agregado ainda foi estudada, apesar de ser relatada a expressiva quantidade de álcalis na composição química do resíduo.

A reação álcali-agregado é deletéria a concretos endurecidos, proporcionando fissuras, deslocamentos diferenciais, lascamentos, aumento da permeabilidade e diminuição da resistência mecânica devido às características expansivas (Hasparyk,

1999; 2005). Tendo em vista os efeitos negativos desencadeados pela RAA, torna-se fundamental um estudo acerca do impacto gerado pela introdução do resíduo em matrizes cimentícias, bem como a análise de alternativas para a mitigação desses efeitos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo avaliar a reação álcali-agregado em argamassas produzidas com diferentes tipos de cimento Portland, com a adição do resíduo dregs, em quatro diferentes teores (0, 5, 10 e 15%) em relação à massa do cimento, na presença de duas areias, uma potencialmente inerte e outra potencialmente reativa.

1.2.2 Objetivos específicos

Foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) avaliar a influência do teor de adição de dregs na expansão por reação álcali-agregado;
- b) promover uma comparação do potencial mitigador dos diferentes cimentos utilizados;
- c) analisar o comportamento expansivo das argamassas com a utilização de duas areias, uma potencialmente inócua e outra potencialmente reativa;
- d) avaliar a influência dos diferentes teores de adição, no desempenho mecânico das argamassas.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está estruturado em cinco capítulos. O primeiro capítulo abrange a introdução, a contextualização do tema e as justificativas para a realização da pesquisa, além dos objetivos almejados. No segundo capítulo, é realizada uma revisão bibliográfica que fornece informações fundamentais sobre o uso de adições

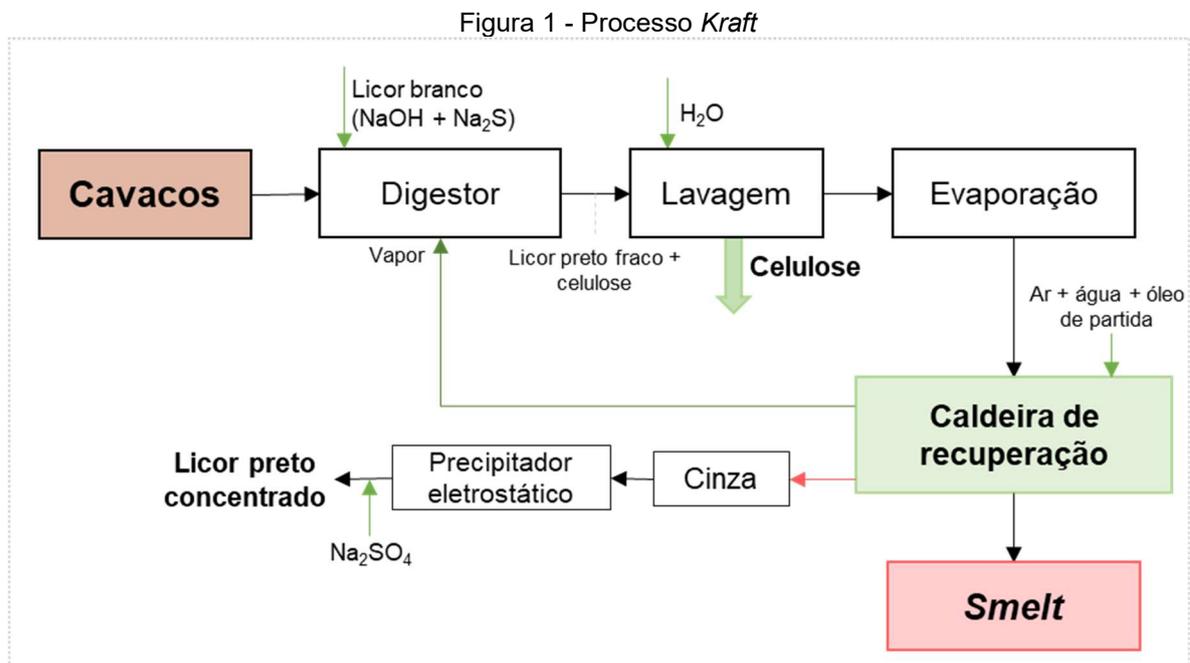
em geral e a utilização do resíduo dregs em matrizes cimentícias. O terceiro capítulo detalha o programa experimental adotado. O quarto capítulo expõe os resultados obtidos e por fim, o quinto capítulo apresenta as considerações finais do trabalho e o sexto capítulo apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO KRAFT

O processo *Kraft* é um dos métodos mais adotados para a produção da celulose. Estima-se que, compreende 80% dentre os procedimentos utilizados pela indústria nos Estados Unidos (CHEREMISINOFF; ROSENFELD, 2010). Globalmente, aproximadamente 130 milhões de toneladas provenientes do processo *Kraft* são produzidas anualmente (MATHEW *et al.*, 2018).

A matéria-prima para a produção de celulose é a madeira, composta por carboidratos e lignina (CASTRO *et al.*, 2009). No processo *Kraft*, a dissolução da lignina é atingida no digestor, por meio de agentes químicos, como o hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S) (MATHEW *et al.*, 2018; YOUNG; KUNDROT; TILLMAN, 2003). Ao final do cozimento, o licor negro resultante, que contém lignina dissolvida é encaminhado para o processo de recuperação química, justificado por razões econômicas e ambientais (MARQUES, 2013). A primeira etapa do processo *Kraft* pode ser visualizada através da Figura 1.



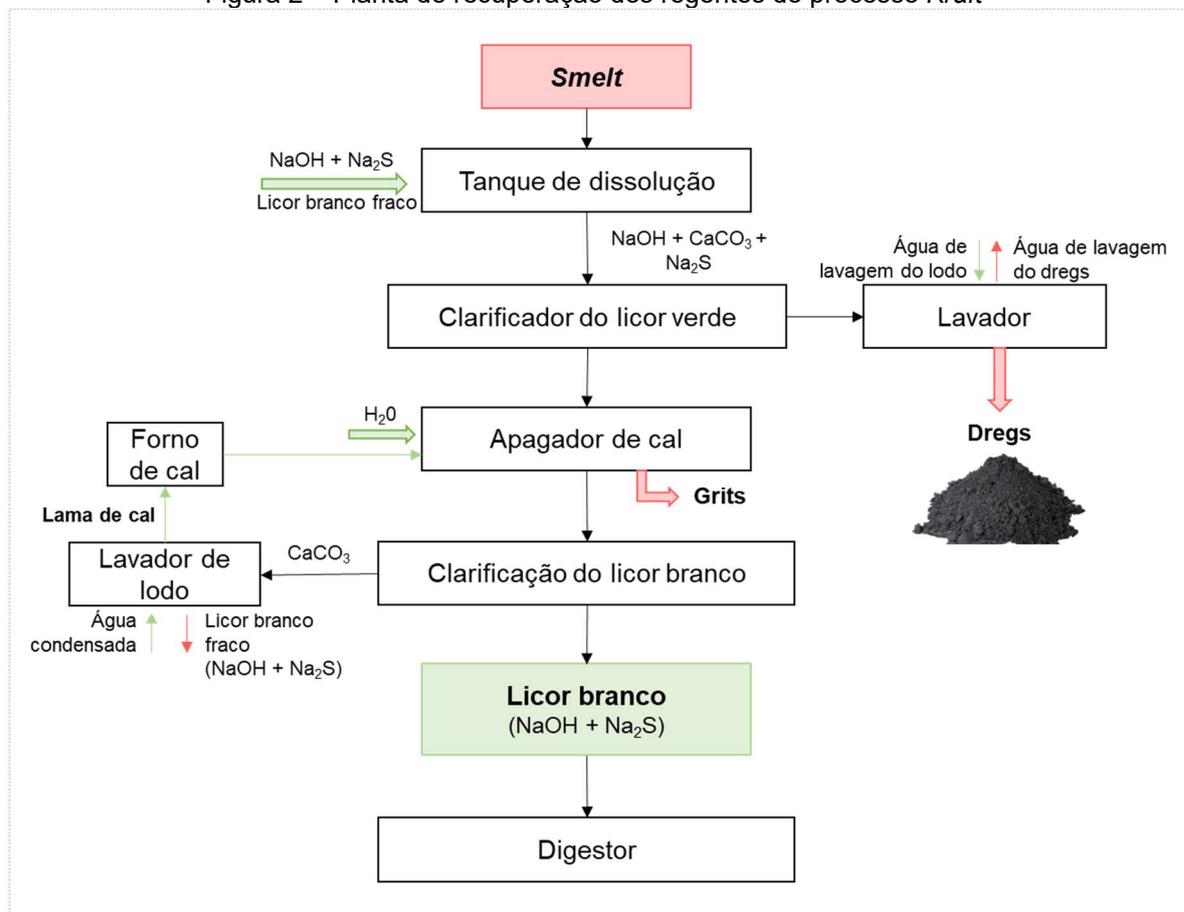
Fonte: adaptado de Martins (2006).

Com isso, a recuperação dos reagentes é iniciada com a dissolução do *smelt* (mistura de sais fundidos provenientes da caldeira) em água obtendo o licor verde (MARTINS, 2006). Esses processos são realizados na planta de recuperação, sendo também capaz de gerar energia elétrica tornando a indústria autossuficiente (CHEREMISINOFF; ROSENFELD, 2010).

2.2 RESÍDUO DREGS

A Figura 2 apresenta a Etapa 2 do processo *Kraft*, responsável pela recuperação dos reagentes e geração de resíduos.

Figura 2 – Planta de recuperação dos reagentes do processo *Kraft*



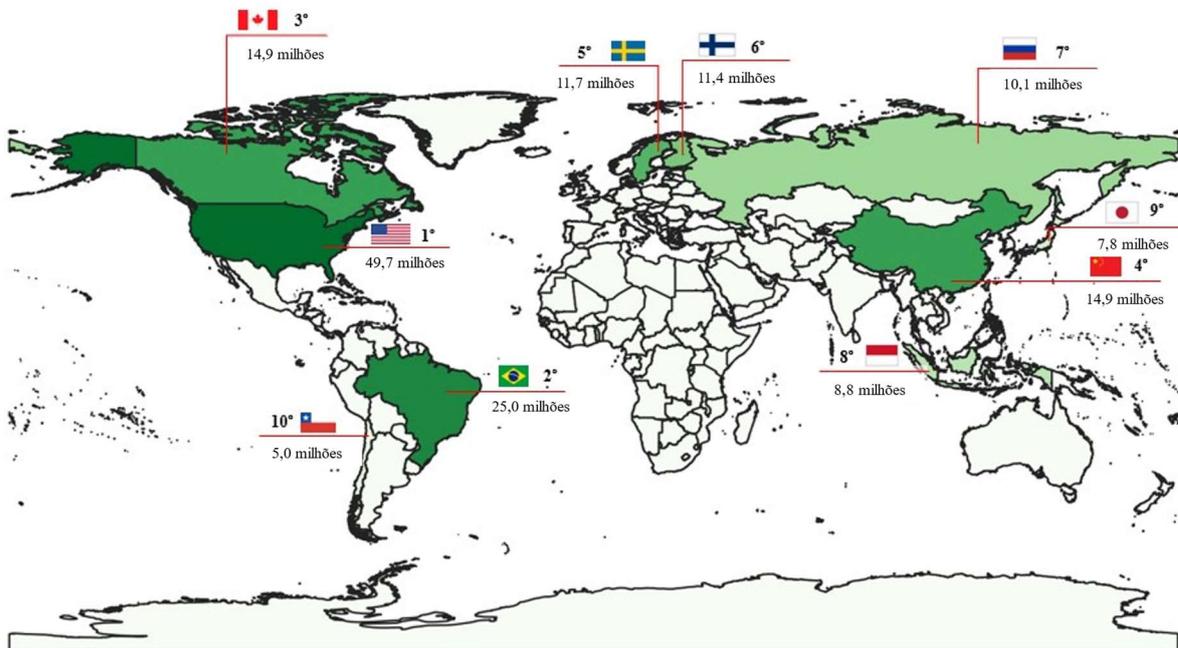
Fonte: adaptado de Martins (2006).

O resíduo dregs é gerado a partir do processo de clarificação do licor verde, que consiste na remoção, por decantação, dos sólidos suspensos, e lavagem, para remoção da soda residual (MARTINS, 2006). Os dregs são os sólidos mais pesados e não queimados (MARTÍNEZ-LAGE *et al.*, 2016).

Conforme Marques (2013), os dregs “são constituídos por carbonatos de cálcio e sódio, carvão da combustão incompleta na caldeira de recuperação, sílica, sulfuretos e outros sais provenientes da caldeira”. Após o processo de clarificação, o resíduo é bombeado para um filtro rotativo de vácuo, onde são lavados com água quente e espessados (MARQUES, 2013).

A Figura 3 apresenta os 10 maiores produtores de celulose no ano de 2022. No *ranking*, o Brasil encontra-se como segundo colocado, com uma produção de cerca de 21 milhões de toneladas de celulose.

Figura 3 – Maiores produtores mundiais de celulose em 2022 (em toneladas)



Fonte: produzido a partir de IBÁ (2022) e FAO (2022).

Nesse contexto, a Tabela 1 apresenta a geração do resíduo com base em dados disponibilizados por fábricas brasileiras. Nota-se que a geração varia entre 11,34 e 54,32 quilogramas por tonelada de celulose produzida.

Tabela 1 – Geração de dregs

Empresa	Produção de celulose (ton/ano)	Dregs (kg/ton)
Bracell (2021)	1250000	11,34
Eldorado (2021)	1700000	12,20
Indústria do Sul (2023)	1900000	54,32

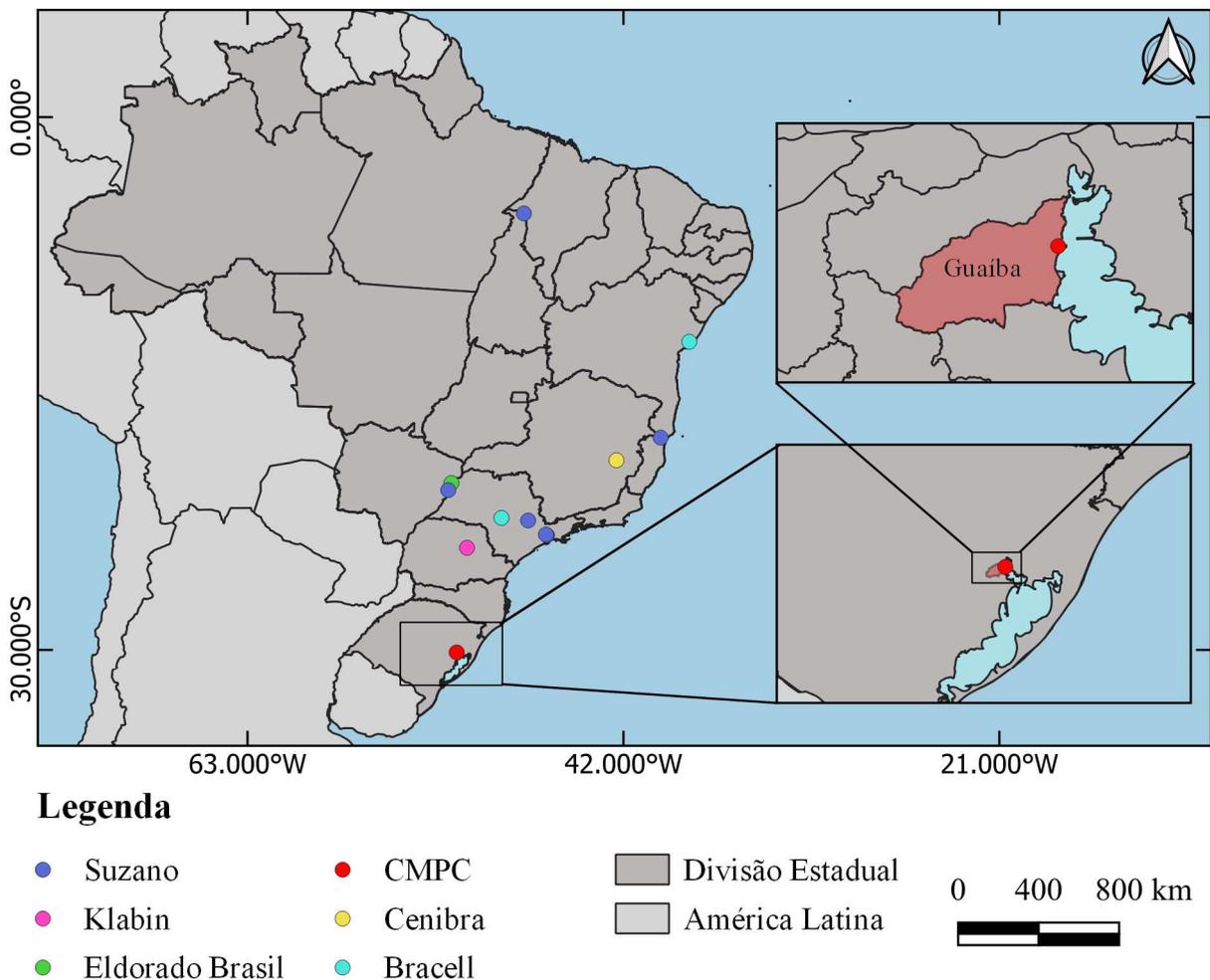
Fonte: relatórios de sustentabilidade das fábricas a exceção da indústria do Sul.

Dados disponibilizados por uma indústria do sul do Brasil, a qual foram coletadas as amostras, demonstram uma geração média mensal de dregs de 9339,51 toneladas,

dessa forma, considerando a capacidade de produção de celulose, estima-se uma média de 54,32 kg por tonelada de celulose produzida. Essa taxa de geração supera as quantidades apresentadas pelas indústrias Bracell e Eldorado, conforme destacado pela Tabela 1.

A Figura 4 apresenta um mapeamento das maiores indústrias produtoras de celulose do Brasil. A partir disso, nota-se que há uma maior concentração de indústrias na região sudeste do país. Sendo a CMPC, a maior indústria do Rio Grande do Sul localizada na cidade de Guaíba.

Figura 4 - Mapeamento das maiores indústrias de celulose do Brasil

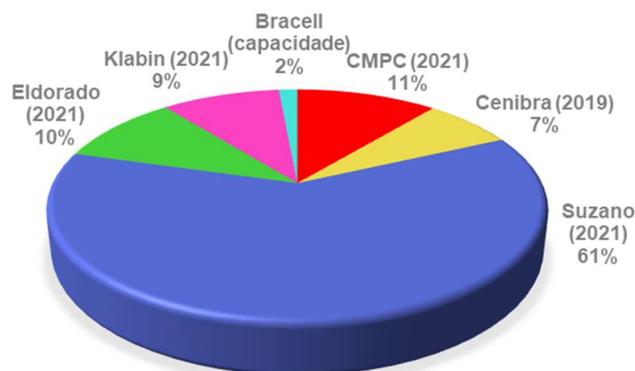


Fonte: elaborado pela autora.

A produção de celulose de cada indústria em relação ao todo é apresentada pela Figura 5. A partir disso, nota-se que a Suzano lidera como maior produtora do Brasil, resultado coerente com a quantidade de fábricas presentes no Brasil, conforme

destacado pela Figura 4. Em sequência, tem-se a CMPC, com apenas uma fábrica no país.

Figura 5 - Porcentagem de produção de celulose de cada indústria em relação ao todo.



Fonte: elaborado pela autora.

A partir desse mapeamento nacional, chega-se a uma quantidade aproximada de celulose produzida pelo processo *Kraft* de cerca de 17,3 milhões de tonelada/ano. Com isso, pode-se estimar, utilizando a menor geração disponibilizada pelas indústrias (Tabela 1), que a geração de dregs pode ser de 196 milhões de toneladas. Extrapolando para a produção mundial de 130 milhões de toneladas (MATHEW *et al.*, 2018), a geração do resíduo pode ser de 1474 milhões de toneladas.

2.2.1 Características químicas do dregs

A Tabela 2 demonstra uma compilação dos dados da composição química do resíduo, a partir da técnica de fluorescência de raios – X (FRX), de indústrias brasileiras gerado a partir do processo *Kraft*.

Tabela 2 – Composição química do dregs por FRX (continua)

Componente	Oliveira (2022)	Mymrin <i>et al.</i> (2020)	Santos <i>et al.</i> (2019)	Rodrigues <i>et al.</i> (2019)	Martínez-Lage <i>et al.</i> (2016)
CaO	58,68	37,4	33	32,6	46,2
MgO	1,23	5,1	4,65	5,85	3,3
SiO ₂	4,95	2,8	2,35	3,01	1,3
Al ₂ O ₃	0,34	0,5	0,69	0,71	0,43
F ₂ O ₃	0,37	0,5	0,65	0,45	0,8
Na ₂ O	4,63	4,5	11,7	8,34	3,4
K ₂ O	0,21	0,3	1,03	0,21	0,28

(conclusão)

P ₂ O ₅	-	0,2	0,33	0,51	3,3
TiO ₂	0,98	-	<0,10	<0,05	<0,03
SrO	0,36	-	<0,10	0,16	0,14
nO	0,20	0,3	0,37	0,29	0,41
SO ₃	2,11	1,6	2,82	4,53	1,4
Cr ₂ O ₃	-	-	-	0,34	-
Perda ao fogo	39,2	46,8	42,1	42,8	38,5

Fonte: elaborado pela autora.

Observa-se que, conforme a bibliografia, o resíduo é composto majoritariamente por óxido de cálcio (CaO), com porcentagens menores de óxido de magnésio (MgO) e dióxido de silício (SiO₂). A composição química, ainda, demonstra a presença de álcalis, como o óxido de sódio (Na₂O) e o óxido de potássio (K₂O).

O Quadro 1 apresenta os principais compostos químicos identificados através da técnica de difração de raios – X. Nota-se que, corroborando com a FRX, que apresentou maior concentração de CaO, no DRX identifica-se o CaCO₃ como principal componente. Outros compostos também foram detectados, como: cesanita, pirssonita, e carbonato de sódio.

Quadro 1 – Fases cristalinas presentes no dregs determinadas por DRX

Componente	Torres <i>et al.</i> (2020)	Santos <i>et al.</i> (2019)	Novais <i>et al.</i> (2019)	Martínez-Lage <i>et al.</i> (2016)
Calcita (CaCO ₃)	x	x	x	x
Quartzo (SiO ₂)		x		
Dolomita (CaMg (CO ₃) ₂)		x		x
Cesanita (Ca ₂ Na ₃ (SO ₄) ₃ (OH))		x		x
Carbonato de sódio (Na ₂ CO ₃)		x		
Pirssonite (CaNa ₂ (CO ₃) ₂ .2H ₂ O)	x		x	
Óxido de magnésio (MgO)			x	
Hidróxido de cálcio Ca(OH) ₂	x			
Óxido de Ferro (FeO)	x			
Thernadite (Na ₂ SO ₄)				x

Fonte: elaborado pela autora.

2.2.2 Características físicas do dregs

O Quadro 2 apresenta o diâmetro, área superficial, massa específica e massa unitária das partículas de dregs. Em relação ao diâmetro das partículas, nota-se que muitos trabalhos não trazem essa informação, sendo, na maior parte das vezes o

material apenas peneirado. No restante, o diâmetro médio varia de 12,45 a 21,02 μm . A área superficial demonstra-se variável, com valores de 1,03 a 20,95 m^2/g .

Quadro 2 - Características físicas do dregs

REF	Diâmetro das partículas	Área superficial	Massa específica	Massa unitária
Martínez-Lage <i>et al.</i> (2016)	-	6,4 m^2/g (BET)	-	-
Santos <i>et al.</i> (2017)	Peneirado (0,85 mm)	-	-	-
Torres <i>et al.</i> (2017)	Peneirado (75 μm)	1,03 m^2/g (Blaine/ NM 23)	2,44 g/cm^3	-
Santos <i>et al.</i> (2018)	Peneirado (0,85 mm)	-	-	-
Torres <i>et al.</i> (2020)	Peneirado (75 μm)	1,03 m^2/g	2,44 g/cm^3	-
Mymrin <i>et al.</i> (2020)	Aproximadamente 0,020 mm	-	1,370 g/cm^3 (Chapman)	-
Dias (2021)	-	-	2,41 g/cm^3 (NBR 16916)	-
Menezes (2022)	17,8 μm (D_{50})	-	2,47 g/cm^3 (Le Chatelier)	-
Oliveira (2022a)	Aproximadamente 75 mm	-	2,45 g/cm^3	0,55 g/cm^3
Souza (2022)	12,45 μm (diâmetro médio)	6,17 m^2/g	2,58 g/cm^3	-
Oliveira (2022b)	21,02 μm (D_{50})	20,95 m^2/g (BET)	2,45 g/cm^3	-

Fonte: elaborado pela autora.

No Quadro 3 são apresentados os métodos de tratamento do resíduo adotados pela bibliografia.

Quadro 3 - Preparação do resíduo conforme a bibliografia (continua)

REF	Preparação do resíduo
Santos <i>et al.</i> (2017)	30 minutos em moinho de bolas e peneirado em malha 0,85mm
Torres <i>et al.</i> (2017)	Secos a 100°C por 24 horas e moído em moinho de bolas. Após, foi macerado e peneirado em malha 75 μm
Santos <i>et al.</i> (2018)	30 minutos em moinho de bolas e peneirado em malha 0,85mm
Torres <i>et al.</i> (2020)	Secos a 100°C por 24 horas, moídos em moinho de bolas Pavitest, desagregados em moedor Pulvereisett 24 Fritc e triturados até passarem por peneira de 75 μm
Dias (2021)	Secagem por 7 dias a 105°C e peneiramento em malha 4,8 mm
Menezes (2022)	Secagem a 105°C por 24 horas, destorroado e passado em peneira 75 μm

(conclusão)

Oliveira (2022a)	Secagem a 105°C por 24 horas e moagem por 5 horas em moinho de bolas cerâmicas
Oliveira (2022b)	Secagem a 100°C por 24 horas, moagem em moinho de abrasão Los Angeles por 150 minutos e passagem na peneira 75 µm.

Fonte: elaborado pela autora.

2.3 ADIÇÕES MINERAIS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

As adições minerais são amplamente utilizadas para melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade de materiais cimentícios. Conforme Dal Molin (2005), podem ser classificadas em três diferentes grupos distintos: materiais pozolânicos, cimentantes e fíler. Alguns exemplos de adições incluem cinzas volantes, metacaulim, cinza de casca de arroz, sílica ativa e o fíler calcário. Cada tipo de adição possui características específicas e, através de uma análise do seu melhor potencial de aplicação podem promover diversos benefícios ao concreto.

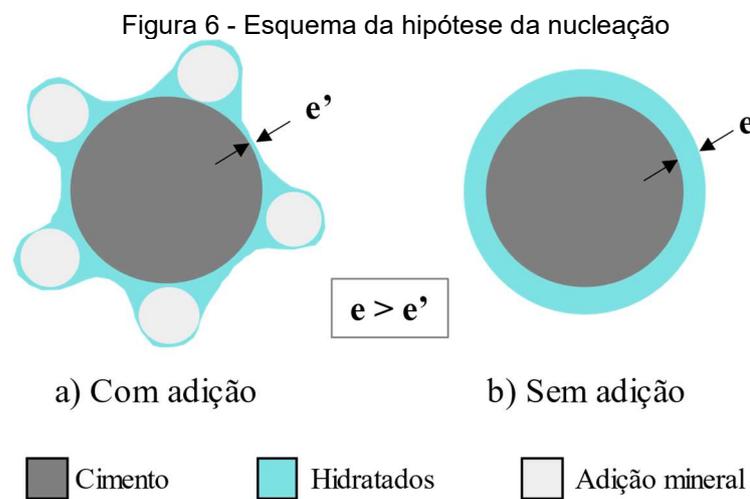
Dentre os benefícios da utilização das adições minerais estão, o refinamento dos poros, redução do calor de hidratação, fortalecimento da zona de transição, aumento da resistência mecânica e de fatores intrínsecos à durabilidade, como migração de cloretos, ataque por sulfatos e reação álcali-agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os materiais pozolânicos têm potencial de substituir parcialmente o cimento e o clínquer, como já utilizado pela indústria. Isso ocorre porque eles têm a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio, formando o composto C-S-H, que é o principal responsável pela resistência mecânica dos compósitos cimentícios. Já os materiais cimentantes, possuem características semelhantes ao cimento Portland, promovendo a hidratação, porém, de forma lenta, sendo inviável sua utilização como substituto total ao ligante.

Os chamados fílers são materiais finamente moídos, com uma granulometria inferior ou semelhante à do cimento Portland. Quando adicionados ao concreto, podem promover efeitos físicos que contribuem para a formação de uma matriz mais densa e resistente, são exemplos: um melhor empacotamento e a criação de pontos de nucleação. O empacotamento das partículas é melhorado devido a finura dos grãos

da adição utilizada, essa preenche os vazios e provoca uma redução da porosidade (LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2003).

A nucleação ocorre por meio de partículas bem finas, essas se alojam próximas das partículas de cimento, aumentando o contato desse com o meio aquoso, dessa forma, acelerando as reações de hidratação (LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2003). A Figura 6 apresenta um esquema da hipótese da nucleação, nota-se que a espessura de água (e') ao redor do grão de cimento com adições (a) é inferior a (b) que não possui nenhuma adição.



Fonte: adaptado de Lawrence, Cyr e Ringot (2003).

Para Lawrence, Cyr e Ringot (2003) um fator importante em relação a nucleação é a natureza e a afinidade do fíler com os hidratos de cimento. Os fílers, que são ricos em carbonato de cálcio, aumentam a disponibilidade de íons de cálcio na solução; esses íons reagem com os aluminatos, resultando na conversão de monossulfoaluminato em hemicarbonatoaluminato, que, posteriormente é transformado em monocarboaluminato (MATSCHEI; LOTHENBACH; GLASSER, 2007).

Um dos principais fatores que influenciam na utilização do fíler calcário está associado à sua finura, uma vez que afeta diretamente a hidratação do cimento, assim, quanto mais fino for o material mais intensificados serão os efeitos (OEY *et al.*, 2013). Vance *et al.* (2013) relatam que o uso de um fíler calcário com granulometria grosseira reduz os parâmetros reológicos, enquanto o uso do pó de calcário fino resulta em um maior limite de escoamento e viscosidade plástica.

2.4 USO DO RESÍDUO DREGS

O uso de resíduos está condicionado as suas características físicas e química, e o risco ambiental que pode promover. A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos como:

- a. Resíduos Classe I – Perigosos;
- b. Resíduos Classe II – Não perigosos;
 - i. Resíduos Classe II A – Não inertes;
 - ii. Resíduos Classe II B – Inertes.

Os resíduos passíveis de reciclagem na construção civil, normalmente, são os Classe II – Não perigosos. Os resíduos Classe II A são não inertes podem apresentar solubilidade em água, combustibilidade e biodegradabilidade. Já os resíduos Classe II B são inertes, assim, não possuem nenhum elemento que solubilize em concentrações superiores ao permitido pela NBR 10006 (ABNT, 2004). Conforme Torres (2016), grande parte dos resíduos gerados pela indústria de celulose são classe II A.

Nesse contexto, o reaproveitamento do dregs é um assunto que vem sendo abordado em trabalhos acadêmicos de diversas áreas, são exemplos: agricultura e construção civil. Na agricultura o seu uso está relacionado a fertilização e correção da acidez do solo (SIMÃO *et al.*, 2018).

Em relação à construção civil, Rodrigues *et al.* (2019) estudaram a viabilidade da utilização do resíduo dregs como matéria-prima alternativa para aplicação em cerâmica vermelha. Foram moldados corpos de prova com adições de até 40% de resíduo e sintetizados a 850 e 950°C. Os resultados demonstraram que a incorporação de até 20% em massa de dregs não interferiu na resistência à flexão, uma das principais propriedades das cerâmicas.

Novais *et al.* (2018) avaliaram a viabilidade do uso de dregs como fíler na produção de argamassas geopoliméricas à base de biomassa. Os resultados demonstraram que a incorporação de dregs não afetou negativamente o processo de geopolimerização, sugerindo que, nessas condições são não reativos ou apresentam pouca reatividade. Observou-se que a trabalhabilidade das argamassas

sofreu grande redução com o aumento do teor de dregs, contudo, apresentaram um aumento na resistência à compressão e à tração.

Novais *et al.* (2019) promoveram um estudo em relação ao desempenho mecânico a longo prazo e o comportamento de lixiviação de metais pesados em argamassas geopoliméricas que continham dregs. Conforme os autores, as amostras apresentaram excelente desempenho mecânico ao longo do tempo, aumentando a resistência continuamente até o 270º dia, não sendo detectados sinais de formação de eflorescência.

Zanella *et al.* (2019) buscaram avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do uso do composto dregs-grits como substituto parcial do agregado miúdo na produção de argamassas de revestimento. As argamassas demonstraram potencial de uso em porcentagens de substituição até 20%. Para a resistência à compressão, todos os traços apresentaram valores inferiores à referência (5,22 MPa), sendo 10% (3,51 MPa), 20% (2,78 MPa), 30% (2,30 MPa) e 40% (1,58 MPa). Para resistência de aderência, a substituição de 10% e 20% apresentaram resultados superiores à referência, e a argamassa com 30% demonstrou resistência inferior (a substituição de 40% não foi testada nesse quesito).

A aplicação de dregs também é estudada em matrizes cimentícias, conforme apresentado de forma detalhada pelo item 2.4.1.

2.4.1 Uso de dregs em matrizes cimentícias

O Quadro 4 apresenta trabalhos recentes que utilizaram o resíduo dregs em matrizes cimentícias.

Quadro 4 - Utilização de dregs em matrizes cimentícias conforme a bibliografia (continua)

REF	Metodologia	Resultados
Martínez-Lage <i>et al.</i> (2016)	Foram confeccionadas argamassas com substituição de 10, 20 e 30% do cimento pelo resíduo. Foram avaliadas propriedades como, resistência à flexão e à compressão.	Para a resistência à tração na flexão, com 10% de substituição, a argamassa com resíduo apresentou resultado semelhante à referência de 8,5 MPa, para compressão apresentou resultado superior ao referência (47,7 MPa). Para ambos os ensaios, conforme o aumento da porcentagem as resistências demonstraram diminuições.

(continuação)

Martínez-Lage <i>et al.</i> (2016)	Foram confeccionados concretos com substituição de 10 e 20% do cimento pelo resíduo. Foram avaliadas propriedades como, densidade de massa, resistência à compressão, módulo de elasticidade e compressão diametral.	A resistência à compressão decresceu em relação à referência cerca de 20 e 35% para as substituições de 10% (37 MPa) e 20% (29,5 MPa). Para compressão diametral os valores foram inferiores, cerca de 18% e 23% para as substituições de 10 e 20%. Observa-se também que o módulo de elasticidade diminuiu, em menor escala, conforme o aumento de resíduo. A densidade de massa de todos os concretos é semelhante.
Santos <i>et al.</i> (2017)	Foram confeccionadas argamassas com substituição da cal hidratada em porcentagens variáveis entre 7 e 14% pelo resíduo. Foram avaliadas propriedades como, resistência à compressão, à tração na flexão e absorção de água.	Observou-se que é possível utilizar pequenas quantidades de dregs nas argamassas. Quantidades maiores, como também da areia, reduziram a resistência mecânica e aumentam a absorção de água.
Torres <i>et al.</i> (2017)	Foi realizada a substituição ao clínquer pelo resíduo nas porcentagens de 2,5%, 5% e 7,5%. Foram avaliadas propriedades como, resistência à compressão e módulo de elasticidade elástico.	As substituições demonstraram-se viáveis para a produção de cimento Portland comum com adição (CP I- S). A incorporação de ambos ao clínquer atendeu os limites mínimos para o ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade estabelecidos pela norma brasileira.
Santos <i>et al.</i> (2018)	Foram feitas adições do resíduo, entre 7 e 14%, em relação ao total, em argamassas. Dentre as propriedades avaliadas estão: resistência à tração na flexão, à compressão, densidade de massa aparente e absorção de água por capilaridade.	A partir dos resultados, foi possível a geração de equações de correlação entre os materiais para os ensaios realizados. Observou-se que o aumento na utilização do resíduo provoca uma queda na resistência à compressão e um aumento da absorção de água. Ainda, a densidade de massa, com a utilização do resíduo, foi reduzida.
Torres <i>et al.</i> (2020)	Foi realizada a substituição ao clínquer, nas porcentagens de 2,5; 5; 7,5; 10 e 15% pelo resíduo. Dentre as propriedades testadas estão: massa específica, área específica, finura, resistência à compressão e módulo de elasticidade.	Os resultados demonstraram que as adições dos resíduos até 10% foram satisfatórias, por estarem dentro dos limites estabelecidos nas normas NBR 5732 (ABNT, 1991) e NBR 11578 (ABNR, 1991) referentes a porcentagem máxima de material carbonático.

(continuação)

Mymrin <i>et al.</i> (2020)	Em pastas, foi feita a utilização de dregs em uma combinação com outros resíduos, nas porcentagens de 15, 20 e 25%. Dentre as propriedades testadas estão: resistência à compressão e absorção de água.	Os resultados demonstraram que a aplicação dos resíduos é possível como principais componentes para a produção de diferentes tipos de materiais de construção civil, atingindo resistência aos 28 dias de 8,75 MPa.
Dias Jr. (2021)	Em argamassas, foi realizada a substituição à areia pelo resíduo, nas porcentagens de 5, 10, 20 e 30%. Alguns ensaios realizados foram: absorção de água por imersão, módulo de elasticidade dinâmico e resistência à compressão.	O resíduo utilizado apresenta características diferentes a bibliografia, como, tamanho médio dos grãos e massa específica elevadas. Notou-se um aumento na quantidade de água e uma redução na resistência à compressão conforme o aumento na quantidade de resíduo.
Menezes (2022)	Foi realizada a substituição de 100% da cal hidratada em argamassas. Dentre as propriedades testadas estão: resistência à compressão, à tração por compressão diametral, de aderência, à tração na flexão e absorção de água.	A cura submersa apresentou melhores resultados em relação a variabilidade. A argamassa com dregs demandou uma maior quantidade de água para manter a consistência desejada. Além disso, apresentou um maior tempo de pega (180 minutos) e aumento na densidade de massa e teor de ar incorporado. Os resultados de resistência à compressão demonstraram valores superiores à referência. A partir das técnicas analíticas relaciona-se o aumento de resistência pelo efeito fíler causado pelo resíduo fino, comprovado pela redução da porosidade.
Oliveira (2022)	Foi feita substituição da cal hidratada nos teores de 10, 15, 20 e 30% em argamassas. Algumas propriedades testadas foram: absorção de água por imersão, e por capilaridade, resistência à tração na flexão, à compressão, e de aderência e envelhecimento acelerado.	O MEV indicou que a presença do dregs não alterou o mecanismo de formação dos cristais de C-S-H. Indicativo que o dregs atua de forma semelhante a cal hidratada. Há similaridade entre as argamassas estudadas. Argamassas com dregs apresentaram maior coeficiente de capilaridade.
Oliveira (2022)	O estudo em pastas foi realizado a partir da substituição do cimento nas porcentagens de 5, 10, 20 e 30% pelo resíduo. Dentre os ensaios realizados estão: calorimetria isotérmica, termogravimetria e difração de raios – X.	Em termos do calor total acumulado, pode-se perceber a redução deste em função do aumento do teor de substituição do cimento. Para as pastas D5 e D10 houve o aumento da taxa de aceleração da hidratação, o que pode estar relacionado a elevada área superficial específica. Entretanto, para maiores teores de substituição, o efeito de diluição possivelmente sobressaiu. De modo geral, as pastas produzidas com dregs apresentaram aumento no período de indução em relação a referência.

(conclusão)

Oliveira (2022)	Em argamassas, foi realizada a substituição ao cimento, nas porcentagens de 5, 10, 20 e 30% pelo resíduo. Alguns ensaios realizados foram resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, absorção de água e índice de vazios.	Observou-se uma diminuição do índice de consistência e teor de ar incorporado conforme o aumento da substituição. O teor do resíduo não exerceu influência significativa na absorção por imersão Em relação a absorção de água, o acréscimo no teor de substituição promoveu o aumento da capacidade de absorção. A presença de dregs propiciou uma redução no módulo de elasticidade dinâmico e na resistência à compressão em relação à argamassa de referência. Entretanto, mesmo com essa redução, as argamassas estudadas atingem as classes de resistência dos cimentos Portland disponíveis comercialmente no Brasil.
Srivastava <i>et al.</i> , (2024)	Foi realizada a substituição do calcário nas porcentagens de 5, 10, 15 e 20% por Dregs na produção de clínquer.	Observa-se que, conforme o aumento no teor de Dregs, a análise por TGA indica que há uma ligeira redução na temperatura de decomposição e uma pequena alteração nas temperaturas de formação do C ₂ S e C ₃ S. Em comparação com as composições calculadas por Bogue, a fase C ₄ AF demonstra-se significativamente mais alta, já o C ₃ A é significativamente mais baixa e o C ₃ S e C ₂ S são ligeiramente mais baixos. Além disso, o ensaio de lixiviação demonstrou resultados dentro dos limites estabelecidos pela EN 12457-2. A partir disso, os autores concluem que a utilização do resíduo dregs pode trazer impactos positivos do ponto de vista da sustentabilidade, desde uma redução da extração de matéria-prima, até a quantidade de CO ₂ reduzida no transporte.

Fonte: elaborado pela autora.

Nota-se que, muitos trabalhos exploram o potencial do resíduo como fíler, entretanto, muitos destacam perda de resistência e aumento na absorção de água por capilaridade. Cabe, no entanto, ressaltar que em muitos casos o dregs não possui um diâmetro médio ideal para ser utilizado como fíler, como demonstrado pelo Quadro 2. Para Oliveira *et al.*, (2024), para promover o efeito físico é importante que as adições possuam dimensões inferiores a 75 µm. Isso acontece devido ao resíduo não ser submetido a um tratamento que proporcione uma redução no tamanho das partículas, sendo, em grande parte das vezes, apenas peneirado.

A cinética de hidratação e o empacotamento das partículas são diretamente influenciados pela distribuição granulométrica (BENTZ *et al.*, 1999). Dessa forma, já se espera que devido a remoção do ligante da mistura e introdução de um material

não pozolânico com partículas maiores às do cimento, se tenha uma queda na resistência, uma vez que os efeitos físicos não compensam a atividade química do cimento substituído (ROJO-LÓPEZ *et al.*, 2022).

2.5 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado (RAA) é desencadeada pela interação de hidróxidos alcalinos (presentes no cimento, água de amassamento, aditivos químicos e adições) com determinados minerais presentes nos agregados (HASPARYK, 1999; KIHARA, 1988; TIECHER, 2006). A RAA pode ser deletéria a concretos endurecidos, proporcionando fissuras, deslocamentos diferenciais, lascamentos, aumento da permeabilidade e diminuição da resistência mecânica devido as características expansivas (HASPARYK, 2005). Conforme Kihara e Scandiuzzi (1993), essa fissuração pode ser associada a formação de um gel expansivo ao redor dos agregados, a intensidade depende da quantidade de álcalis disponíveis (solúveis), características intrínsecas aos agregados e condições do meio (umidade e temperatura).

Dessa forma, pode ser subdividida em dois principais grupos, a reação álcali-carbonato e a reação álcali-sílica (ABNT, 2018):

- A NBR 15577-1 (ABNT, 2018) descreve a reação álcali-carbonato (RAC) como a influência mútua entre hidróxidos alcalinos e certos tipos de agregados que contenham calcários dolomíticos argilosos. Essa reação, quando ocorre em condições específicas pode causar expansão deletéria do concreto ou argamassa, devido ao processo de desdolomitização. Conforme Tiecher (2006), a ocorrência de fissuras mapeadas e o deslocamento de elementos da estrutura são as principais manifestações da RAC, contudo, nessa reação não ocorre a formação do gel alcalino.
- Já a reação álcali-sílica (RAS) é definida como a interação entre certas rochas silicosas ou minerais silicosos e hidróxidos de sódio que pode causar expansão anormal e fissuração do material cimentício, resultado da formação do gel álcali-sílica (ABNT, 2018).

Este estudo se propõe a investigar a influência dos hidróxidos alcalinos presentes no resíduo Dregs na RAA na presença de agregados silicosos. Nesse contexto, este capítulo se concentra na reação álcali-sílica e explora mecanismos de mitigação associados a essa reação.

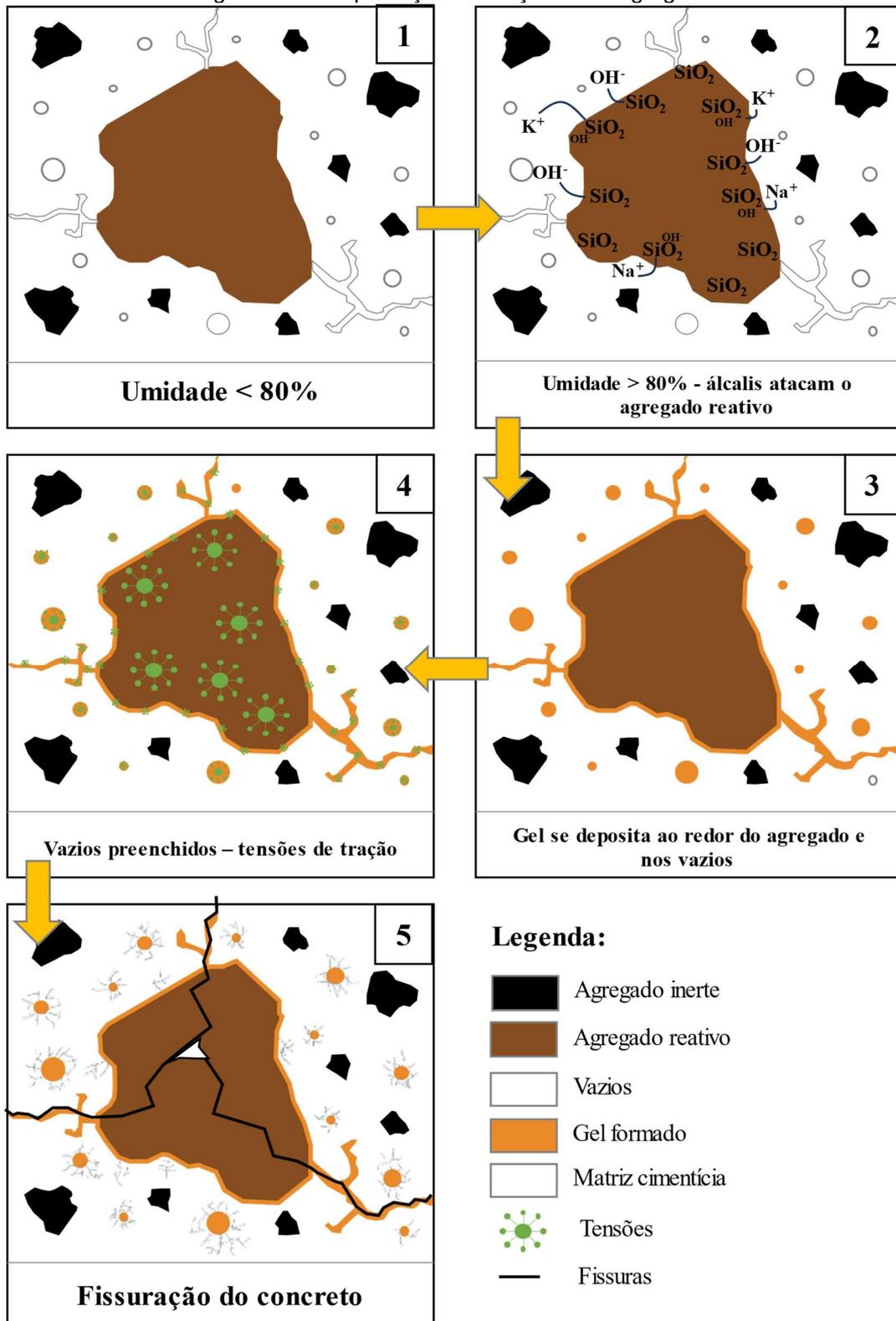
2.5.1 Reação álcali-sílica

A reação álcali-sílica é considerada a mais comum em relação à reação álcali-carbonato pela bibliografia. O processo de reação envolve a formação de um gel expansivo, conhecido como gel álcali-sílica. A formação desse gel ocorre essencialmente a partir de uma reação ácido-base devido a presença de agregados silicosos pobremente cristalinos que permitem a entrada de hidróxidos alcalinos no seu interior; para agregados com sílica bem cristalizada a reação ocorre apenas na superfície (TIECHER, 2010). O gel álcali-sílica é potencializado a partir do contato com a água (TIECHER, 2010).

A ocorrência da reação requer condições específicas, que englobam: agregados reativos ou potencialmente reativos, presença de álcalis na pasta de cimento e umidade suficiente. Essa umidade pode ser proveniente do contato direto com a água ou em ambientes com umidade relativa do ar acima de 80% (CARASEK; CASCUDO; CAETANO, 2016). Além disso, a temperatura e o consumo de cimento são fatores proporcionais a velocidade e magnitude da RAA, quanto mais elevados esses fatores, mais intensas são as reações.

A Figura 7 exemplifica os processos da reação álcali-agregado.

Figura 7 - Exemplificação da reação álcali-agregado



Fonte: Carasek, Cascudo e Caetano (2016).

Para Carasek, Cascudo e Caetano (2016), a estabilidade dos minerais está intrinsecamente relacionada ao processo de origem das rochas, e as modificações

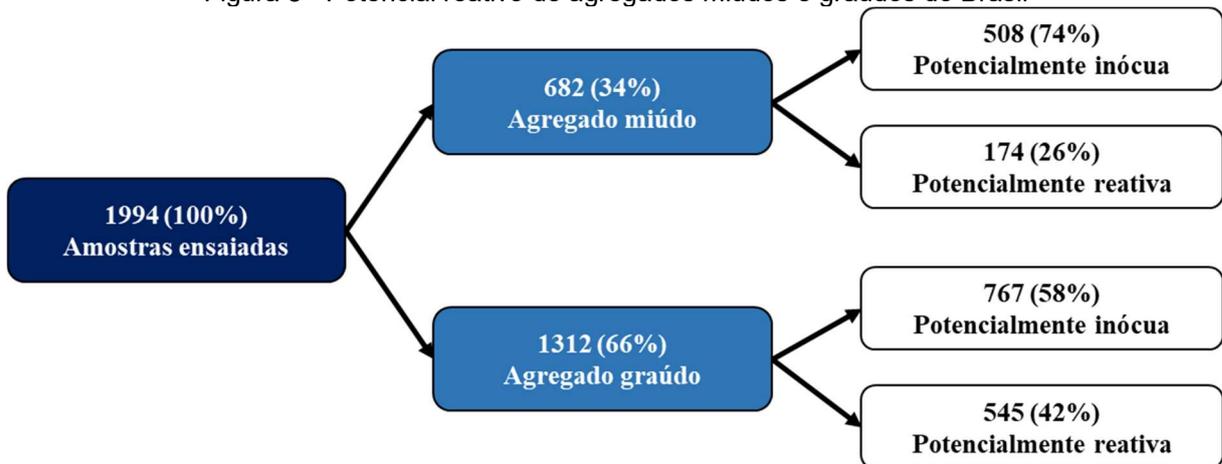
podem influenciar o potencial alcalino de reatividade de um determinado agregado, aumentando ou diminuindo esse potencial. A reatividade dos agregados está principalmente relacionada aos tipos de minerais presentes na estrutura. Alguns exemplos de sílica reativa são: opala, calcedônia, tridimita, cristobalita e vidro vulcânico (CARASEK; CASCUDO; CAETANO, 2016).

A presença de umidade desempenha um papel fundamental no desenvolvimento da RAS. Primeiramente, a água tem função de ionizar e transportar íons alcalinos e hidroxila através dos poros da matriz, onde eles interagem com os agregados, resultando na formação do gel sílico-alcalino; em sequência, a umidade facilita a expansão do concreto devido a absorção de água pelo gel formado (CARASEK; CASCUDO; CAETANO, 2016).

A porosidade do concreto é também um fator influente, entende-se que, quanto menor a porosidade, menor será o transporte dos reagentes até os agregados. Ao contrário, concretos com alta porosidade tendem a possuir um maior espaço para o armazenamento da água intersticial, assim, podendo facilitar o acontecimento do fenômeno, entretanto, é importante ressaltar que em função da maior quantidade de espaços disponíveis, o gel pode ser acomodado e retardar as manifestações patológicas (CARASEK; CASCUDO; CAETANO, 2016).

Battagin *et al.* (2016) ressaltam a crescente preocupação das construtoras em geral em relação à RAA, com isso, a partir de 1993 amostras de agregados de todo o Brasil, a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) constatou que as expansões variam de potencialmente inócuas à potencialmente reativas grau 3 quando testados com o ensaio de prismas de argamassa, conforme ilustrado pela Figura 8.

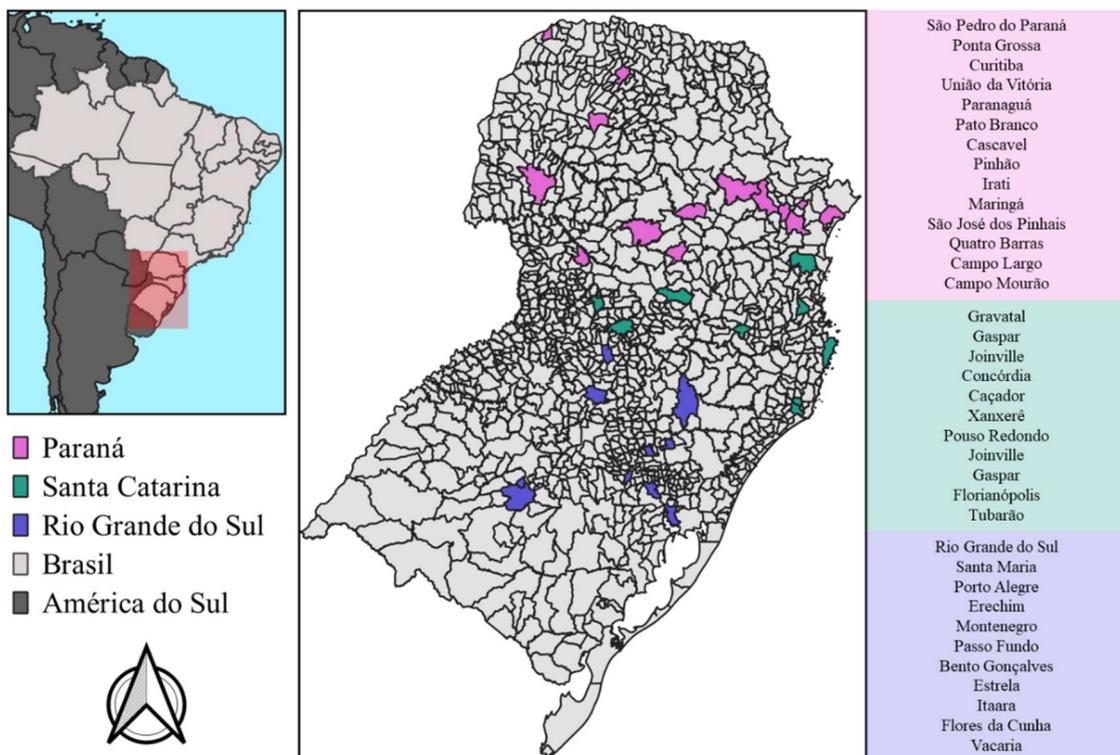
Figura 8 - Potencial reativo de agregados miúdos e graúdos do Brasil



Fonte: Battagin *et al.* (2016).

Em um estudo com uma variada gama de agregados provenientes de diversos locais do sul do Brasil, Tiecher (2006), constatou que todos os agregados se demonstraram potencialmente reativos quando analisados através do ensaio acelerado em prismas de argamassa. A Figura 9 apresenta a localização das amostras ensaiadas.

Figura 9 - Localização dos agregados testados por Tiecher (2006)



Fonte adaptado de Tiecher (2006).

A RAS pode levar à expansão do material, e conseqüentemente, a fissuras, trincas, rachaduras e deformações no concreto ou argamassa (Figura 10 e Figura 11). Essas fissuras não apenas comprometem a estética e durabilidade das estruturas, mas também podem afetar a integridade estrutural.

Figura 10 - Fissuração de um bloco de fundação afetado pela RAA



Fonte: Copetti *et al.*, 2020.

Figura 11 - Fissuras provenientes da reação álcali-agregado na fundação da ponte Paulo Guerra



Fonte: Helene, Carvalho e Pacheco (2017).

2.5.2 Fatores influentes

Diversos fatores podem influenciar na reação álcali-agregado. A presença desses está inteiramente ligada a velocidade e intensidade a qual será provocada a reação, bem como a ação conjunta pode desencadear danos complexos aos materiais

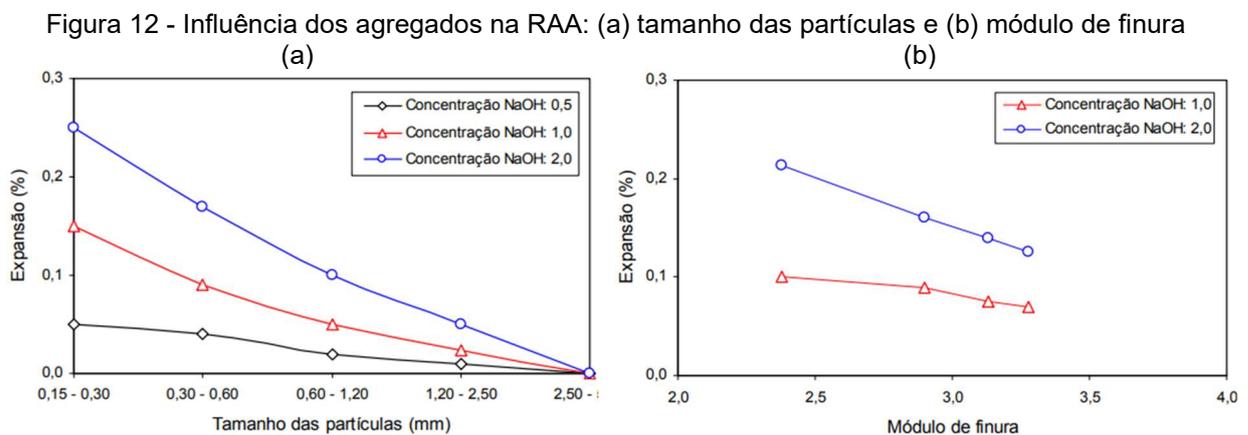
(HASPARYK, 2022). Nesse sentido, são apresentados os principais fatores influentes para geração da reação álcali-agregado nos tópicos seguintes.

2.5.2.1 Agregado

Em relação aos agregados utilizados nos compósitos cimentícios, estão dentre as principais características influentes: textura, mineralogia, tamanho e forma do grão.

Agregados com estruturas desorganizadas e instáveis tendem a provocar fases mais reativas (HASPARYK, 2022). Da mesma forma, quanto mais finas as partículas dos agregados, maior será a superfície disponível para reagir, portanto, maior será a reatividade da fase (COUTO, 2008; HASPARYK, 2022).

Kuroda *et al.*, (2004) demonstram que maiores serão as expansões conforme menor o tamanho das partículas e do módulo de finura. A Figura 12 apresenta a influência desses fatores.

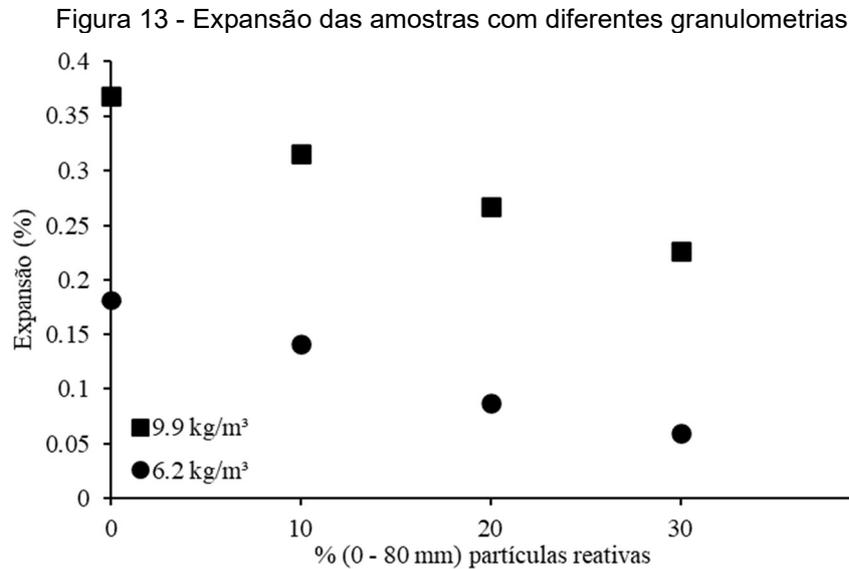


Fonte: Kuroda *et al.* (2004).

Joo e Takahashi (2021) desenvolveram um modelo para estimar a expansão devido a RAA, levando em consideração o efeito do tamanho do agregado. Os resultados das análises demonstram que à medida que o tamanho do agregado aumenta, a expansão diminui.

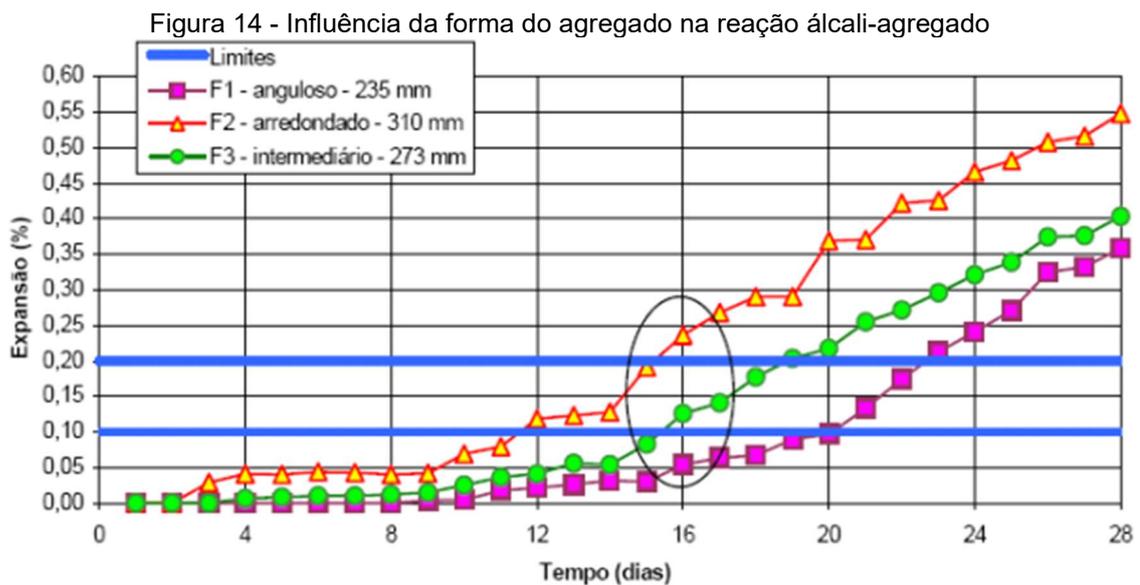
Multon *et al.* (2010) analisaram a influência da dimensão e concentração de álcalis dos agregados na reação álcali-agregado (Figura 13). Os autores destacam que o tamanho das partículas tem um impacto significativo na RAA. Partículas maiores possuem uma área superficial reduzida, portanto, as expansões são menores devido à menor exposição. Em contraste, as partículas menores têm uma área de superfície

maior, promovendo uma reação mais intensa devido a maior exposição à solução alcalina.



Fonte: Multon *et al.* (2010).

Valduga *et al.* (2005) investigaram como a forma dos grãos influencia na RAA. Sendo assim, a partir da britagem de uma rocha basáltica reativa, foram obtidos agregados angulosos, arredondados e intermediários. Os resultados demonstram notável diferença entre a forma dos grãos, conforme demonstrado pela Figura 14, a expansão é menor para o agregado angular e maior para o arredondado.



Fonte: Valduga *et al.* (2005).

2.5.2.2 Cimento

Conforme Hasparyk (2022), os álcalis presentes nos cimentos podem ser classificados em duas categorias: solúveis e insolúveis. Os álcalis solúveis são provenientes dos sulfatos, já os álcalis insolúveis fazem parte das fases sólidas presentes no clínquer, são eles, os silicatos e aluminatos (HASPARYK, 2022).

Glasser e Kataoka (1981) destacam que os álcalis solúveis contribuem mais rapidamente para a reação, em contraste, os álcalis insolúveis têm sua participação conforme a hidratação acontece. Contudo, o autor enfatiza que, dado o caráter gradual da RAA, todos os álcalis podem eventualmente participar do processo.

Nesse sentido, a presença de álcalis no cimento promove uma elevação de pH nos poros e conseqüente aumento na concentração de íons hidroxila (OH^-), responsáveis pela reação (HASPARYK, 2022).

No que tange ao teor de álcalis no cimento, ainda há discussões sobre a sua influência na reação. Alguns autores acreditam que, em ensaios acelerados, devido a sua geometria e quantidade de álcalis oferecidos de forma externa, o teor de álcalis não tem efeito significativos (HASPARYK, 2022). Tiecher (2006) a partir da análise do potencial reativo de diversos agregados da região sul frente a uma variada gama de cimentos observa que os resultados de expansão obtidos não são diretamente ligados ao teor de álcalis presentes no cimento, na pesquisa foi utilizado o ensaio acelerado de barras de argamassa. Entretanto, Hapasryk *et al.* (2007) observam que há diferença significativa entre os diferentes teores.

2.5.2.3 Água e aditivos

Os aditivos e quantidade de água são fatores que influenciam diretamente na permeabilidade e porosidade dos materiais cimentícios.

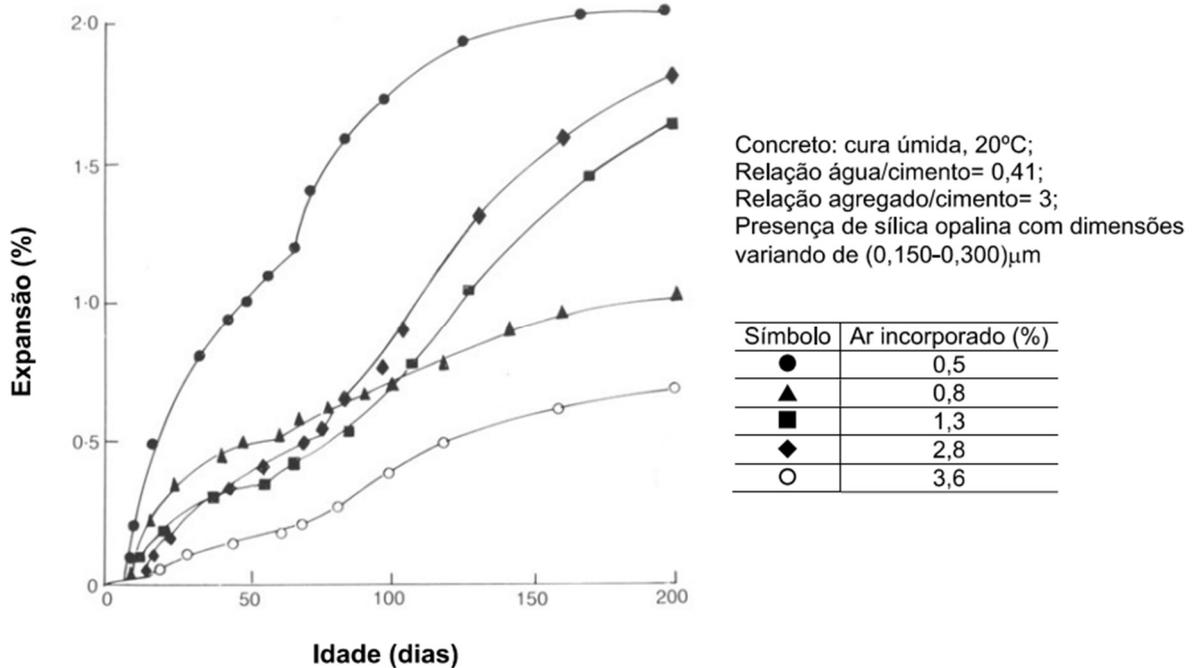
A água ou umidade (acima de 80%) podem contribuir de duas formas distintas para a reação: primeiro, ao criar um ambiente propício para o desencadeamento da reação e segundo, atuando diretamente no produto já formado, produzindo conseqüentes expansões (HASPARYK, 2022).

Dessa forma, Fournier e Bérubé (2000) destacam que quanto menor a relação água/cimento adotada, melhores serão as propriedades mecânicas, menor será o teor de água livre, e, portanto, menor a chance de ingresso de água no interior.

Para Valduga *et al.* (2005), argamassas com uma maior relação água/cimento podem promover menores expansões, isso se dá devido a possibilidade dos produtos acomodarem-se nos poros, entretanto, não se sabe até quando os poros serão capazes de acomodar o gel álcali-sílica, podendo esse saturar e gerar elevadas tensões e consequentes impactos negativos nas propriedades.

Estudos também demonstram (Figura 15) que aditivos incorporadores de ar são capazes de reduzir as expansões, porém não é capaz de prevenir a ocorrência de fissuração ao longo do tempo (HOOBS, 1988¹ apud TIECHER, 2006).

Figura 15 - Influência do teor de ar incorporado na RAA



Fonte: Hobbs, 1998 adaptado por Tiecher (2006).

O Quadro 5 apresenta os resultados obtidos por alguns trabalhos sobre a influência de aditivos químicos na reação álcali-agregado. A partir disso, nota-se que a maior

¹ HOOBS, D. W. Alkali-silica reaction in concrete. London: Ed. Thomas Telford Ltda, 1988.

parte dos aditivos e seus respectivos teores acabaram contribuindo para maiores expansões.

Quadro 5 - Influência dos aditivos químicos na reação álcali-agregado

Referência	Aditivo químico	Teor	Adição	Conclusão
Tosun, Felekoglu e Baradan (2007)	Naftaleno	0,4%, 1% e 1,5%	-	Maior expansão
	Policarboxilato	0,4%, 1,2% e 1,6%	-	Maior expansão, exceto para 1,6% que apresentou redução na expansão
Leemann, Lothenbach e Thalmann (2011)	Naftaleno	0,6%	-	Maior expansão
	Policarboxilato	0,2% e 0,4%	-	Maior expansão
Farias, Hasparyk e Andrade (2007)	Naftaleno	0,7%	-	Maior expansão
	Policarboxilato	0,5%	-	Menor expansão
	Melamina	0,6%	-	Maior expansão
	Melamina	0,6%	Sílica ativa	Igual
	Policarboxilato	0,5%	Sílica ativa	Igual
Silva (2015)	Policarboxilato	0,4%, 0,8% e 1,2%	Sílica ativa	Expansão maior apenas para 0,8%
	Melamina	0,5%, 1% e 1,5%	Sílica ativa	Expansão menor apenas para 0,5%
	Lignosulfonato	0,6%, 0,8% e 1%	Sílica ativa	Expansão maior
	Naftaleno	0,6%, 0,8% e 1,5%	Sílica ativa	Expansão maior apenas para 0,6%
	Policarboxilato	0,4%, 0,7% e 1,2%	Metacaulim	Expansão maior
	Melamina	0,5%, 1% e 1,5%	Metacaulim	Expansão maior apenas para 1%
	Lignosulfonato	0,6%, 0,8% e 1%	Metacaulim	Expansão menor apenas para 0,6%
	Naftaleno	0,6%, 0,8% e 1,5%	Metacaulim	Expansão menor apenas para 0,6%

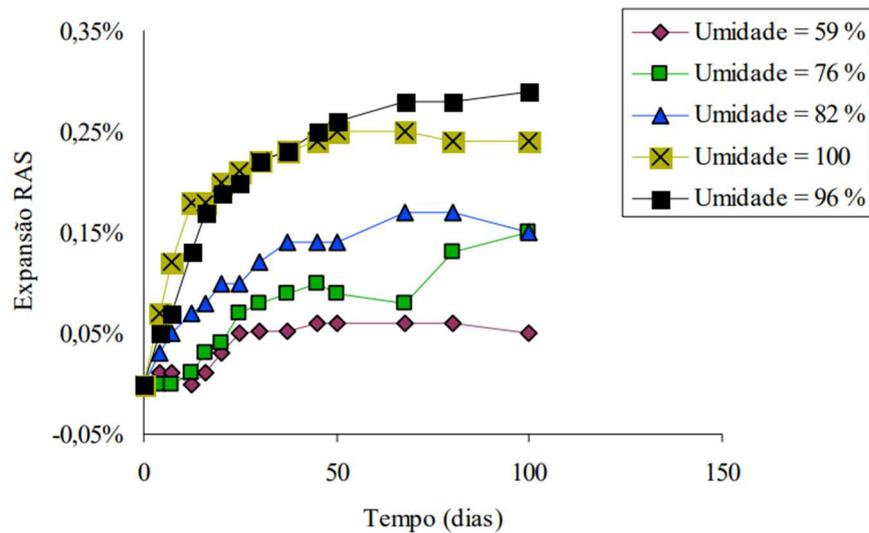
Fonte: adaptado de Silva (2015).

2.5.2.4 Condições ambientais e tempo de exposição

As condições ambientais, como: ciclos de molhagem e secagem, exposição ao sol, chuva, vento e maresia podem intensificar a RAA. A presença desses fenômenos pode causar fissuras e deixar as estruturas suscetíveis a entrada de agentes agressivos (HASPARYK, 2022).

A Figura 16 demonstra a influência da umidade na reação álcali-agregado. Observa-se que menores umidades proporcionam reduções na reação, já maior umidade tende a potencializar o processo.

Figura 16 - Influência da umidade na reação álcali-agregado

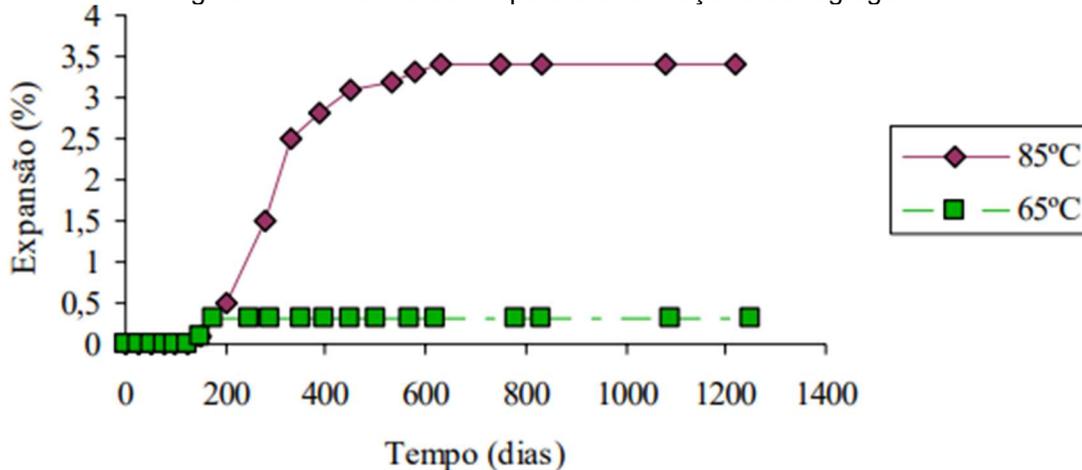


Fonte: Foray *et al.* (2004), adaptado por Silva (2007).

Hasparyk (2022) esclarece que a reação álcali-agregado irá ocorrer até que se esgote um dos agentes condicionantes (fases mineralógicas dos agregados considerados reativos, hidróxidos alcalinos e umidade), ainda, quanto mais o material estiver exposto a certas condições mais significativas serão as expansões.

A reação álcali-agregado é afetada pela temperatura, com isso, com o aumento dessa ocorre também um aumento na expansão (HASPARYK, 2022). A Figura 17 exemplifica a influência da temperatura no processo.

Figura 17 - Influência da temperatura na reação álcali-agregado



Fonte: Shayan; Xu (2004), adaptado por Silva (2007).

2.5.3 Principais medidas de mitigação da RAA

A NBR 15577-1 (ABNT, 2018) descreve algumas medidas mitigadoras que podem ser adotadas para a reação álcali-agregado. A adoção dessas medidas se dá, conforme a norma, de acordo com o grau de intensidade da reação. O grau de intensidade é determinado a partir de fatores estipulados, são eles: classe de estrutura e o risco de ocorrência (baseado no grau de reatividade do agregado e condições de exposição dos elementos de concreto).

As principais opções de medidas mitigatórias estão relacionadas a (ABNT, 2018):

- limitar do teor de álcalis no concreto (valores inferiores a 2,4 kg/m³ de Na₂O equivalente);
- utilizar cimentos com pozolana em sua composição, são exemplos: CP II-E, CP II-Z, CP III e CP IV;
- fazer uso de materiais que possuem a capacidade de inibir a reação.

Ainda, são especificados os requisitos de composição dos materiais inibidores, conforme descrito pelo Quadro 6:

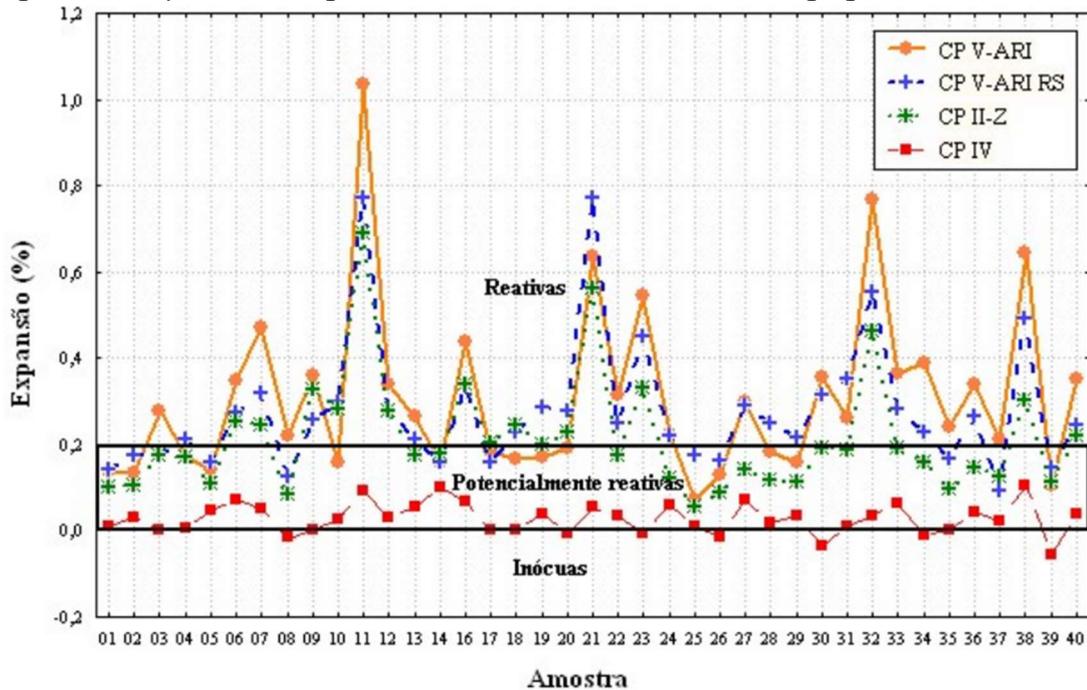
Quadro 6 - Requisitos para os materiais inibidores da RAA

Material inibidor	Requisitos da Composição
Cimento Portland tipo CP II-E e CP III	Cimentos Portland com teores de escória granulada de alto-forno suficientes para mitigar as expansões de argamassas com agregados potencialmente reativos a níveis inferiores a 0,19 % aos 30 dias, quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-5, ou menores que 0,04 % em dois anos, quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-6.
Cimento Portland tipo CP II-Z e CP IV	Cimentos Portland com teores de materiais pozolânicos suficientes para mitigar as expansões de argamassas com agregados potencialmente reativos a níveis inferiores a 0,19 % aos 30 dias, quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-5, ou menores que 0,04 % em dois anos, quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-6.
Sílica ativa e metacaulim ou outros materiais pozolânicos em combinação com qualquer tipo de cimento Portland	Sílica ativa, metacaulim e materiais pozolânicos, com composição que atenda, respectivamente, às ABNT NBR 13956-1, ABNT NBR 15894-1 e ABNT NBR 12653. Os teores necessários dessas adições normalizadas devem ser suficientes para promover a mitigação das expansões a níveis inferiores a 0,19 % aos 30 dias, quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-5, ou menores que 0,04 %, em dois anos, quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-6

Fonte: ABNT (2018).

O estudo de Tiecher (2006) mostra que o cimento com maior capacidade mitigadora foi o CP IV (capaz de inibir 80% das expansões deletérias), seguido do CP II-Z. A pesquisa analisou cerca de 40 agregados do sul do Brasil. A Figura 18 demonstra a capacidade mitigadora dos cimentos.

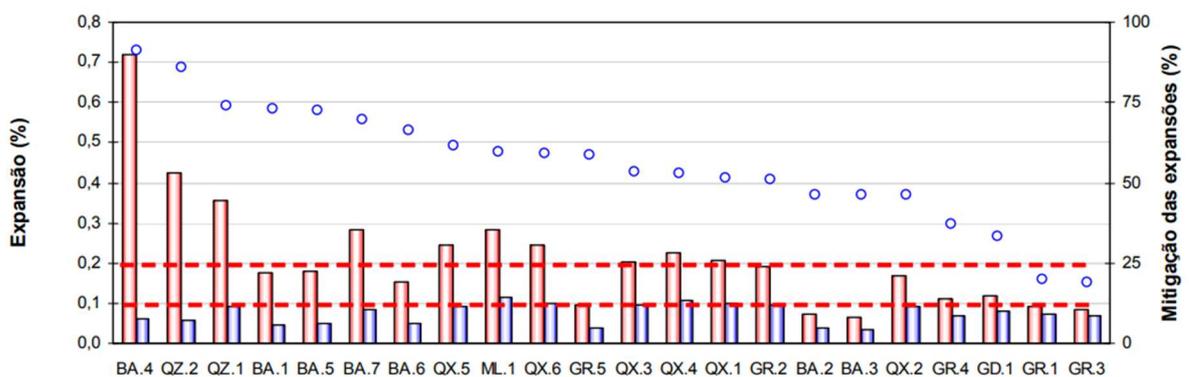
Figura 18 - Capacidade mitigadora de diferentes cimentos frente a agregados do sul do Brasil



Fonte: Tiecher (2006).

Couto (2008) também demonstra o efeito benéfico do cimento CP IV na mitigação das expansões. O autor conduziu um estudo com 22 amostras de agregados do estado de Goiás. A Figura 19 demonstra que o potencial mitigatório do Cimento B (CP IV-32) em relação ao Cimento A (CP II-F-32).

Figura 19 - Potencial mitigador do CP IV em relação ao CP II-F



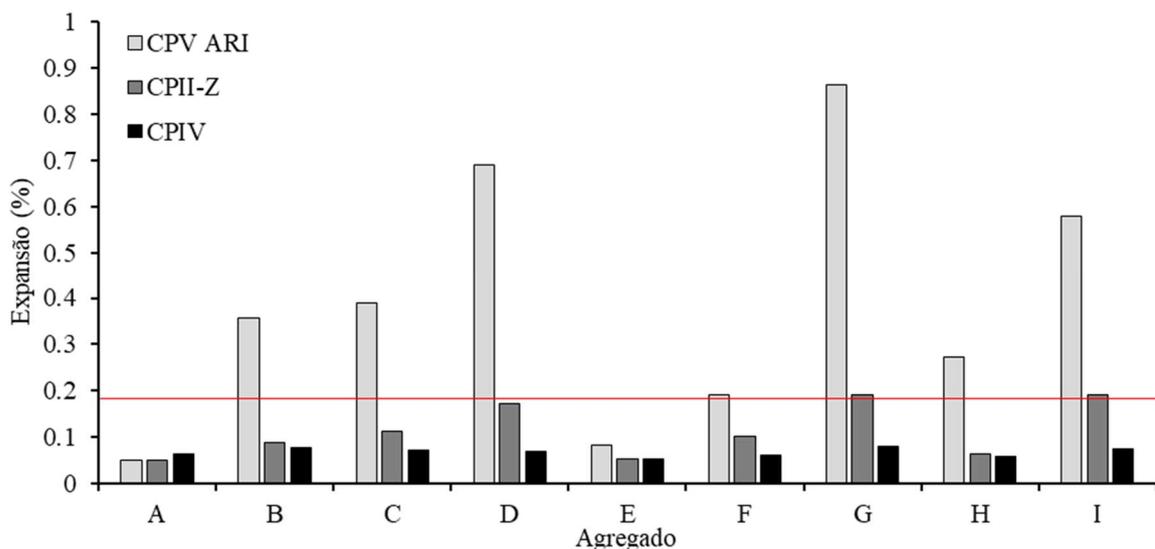
Fonte: Couto (2008).

Santana, Brasileiro e Cabral (2020) utilizaram diferentes cimentos (cimento padrão, CP II-E 32 RS, CP III 40 RS, CP II-Z 32 RS e CP IV 32 RS) buscando analisar o potencial mitigatório. O agregado natural foi substituído por vidro temperado Durelex a fim de garantir a RAA. Os autores concluem que a reação tende a diminuir conforme o aumento de pozolana ou escória de alto forno presente no cimento, sendo assim, destaca-se o CP IV e o CP III como os de melhor desempenho.

Dutra (2018) desenvolveu uma pesquisa a partir da caracterização de diferentes agregados da região sudoeste do Rio Grande do Sul, a exceção do agregado A, utilizado como referência. Para cada agregado foram utilizados três tipos de cimento (CP V-ARI, CP II-Z e CP IV). Com a utilização do CP V ARI, sete dos nove agregados foram considerados potencialmente reativos. O CP II-Z demonstra um bom potencial inibidor da reação, sendo apenas três agregados considerados com potencialmente reativos. Já com o emprego do CP IV nota-se que todos os agregados são considerados potencialmente inócuos.

A Figura 20 apresenta as diferenças obtidas na expansão das argamassas com o emprego dos diferentes cimentos, conforme Dutra (2018). Portanto, conclui-se que a porcentagem de pozolana presente no CP II-Z não foi suficiente para a mitigação da reação para todos os agregados, em contraste, o CP IV, que possui uma quantidade maior de pozolana, foi capaz de mitigar por completo a reação.

Figura 20 - Potencial mitigados dos cimentos CP II-Z e CP IV



Fonte: produzido a partir de Dutra (2018).

2.5.3.1 Materiais alternativos para a mitigação da RAA

Macedo *et al.* (2023) buscaram analisar o potencial inibidor da cinza do bagaço de cana quando adicionado em diferentes porcentagens ao concreto. Os materiais utilizados foram: cimento CP V-ARI, agregado miúdo artificial e aditivo superplastificante nas argamassas com adição da cinza. Dentre as porcentagens utilizadas (0, 10, 20 e 25%), observa-se que conforme o aumento no teor, a exceção da adição de 10%, menor é a expansão encontrada. Assim, a adição de 25% é capaz de promover valores de expansão inferiores aos limites estabelecidos por norma, classificando as amostras como não reativas.

Guillante *et al.* (2019) conduziram um estudo sobre a utilização de cinza de casca de arroz e de cerâmica vermelha com foco na mitigação da reação álcali-agregado com uma taxa de substituição de 20% de cimento pelo material pozolânico. Os resultados demonstraram que a cinza de casca de arroz teve um impacto negativo para a RAA, mesmo quando empregada com agregado não reativo. Já o resíduo de cerâmica vermelha demonstrou eficácia na redução da reação, mesmo quando empregado em conjunto com a cinza.

Wang *et al.* (2023) objetivaram investigar a influência de impurezas alcalinas e teor de sílica da cinza de casca de arroz na reação álcali-sílica. O estudo aborda três tipos de cinza com diferentes teores de álcalis e sílica amorfa. Observou-se maiores expansões na utilização das três cinzas em relação à referência. Foram identificados dois tipos de RAA nas partículas de cinza de casca de arroz: a primeira, em que o SiO_2 na cinza reage com seus próprios íons de potássio e íons alcalinos da solução de poros, resultando em expansão significativa; e a segunda, em que os íons de sódio e potássio dissociados do cimento e da solução alcalina externa reagem com o SiO_2 da cinza para formar o gel de sílica alcalina.

Khanapur *et al.* (2023) analisaram a substituição do pó de sílica pelo pó de vidro (azul e verde) em relação à reação álcali-agregado. Os resultados mostram que a expansão é reduzida quando 100% do pó de sílica foi substituído pelo pó de vidro. A expansão inicial nas amostras de vidro verde e azul foi maior em comparação com a referência (com pó de sílica). No entanto, aos 14 dias, a expansão foi de 94% e 86%

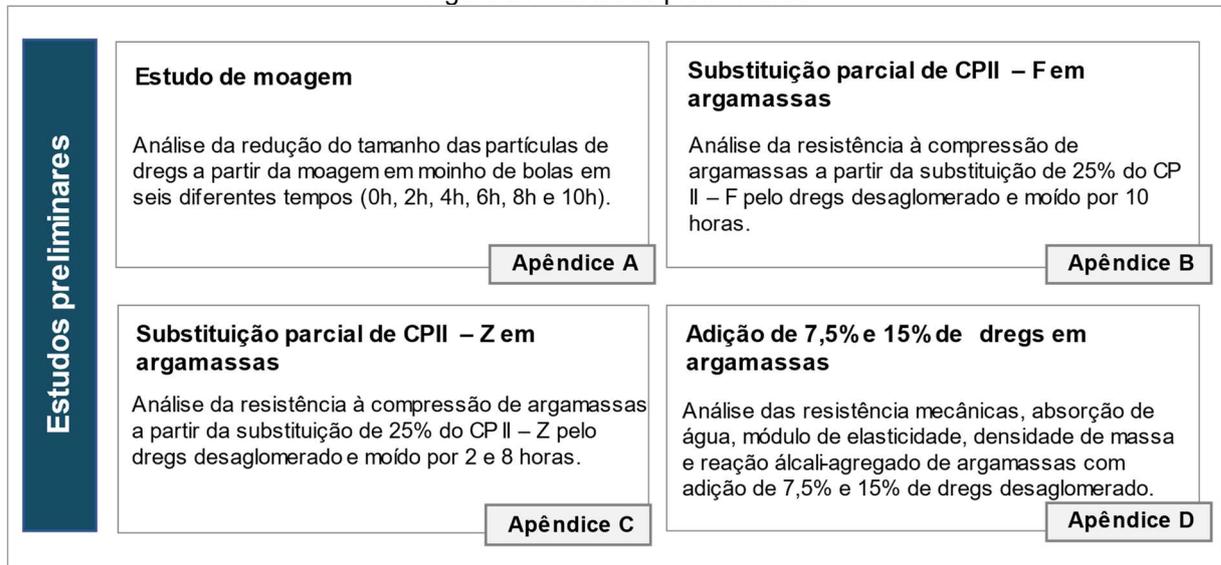
menor do que na amostra de referência, para o vidro verde e azul, respectivamente. Aos 28 dias, a expansão foi menor do que na amostra de referência na ordem de 95% e 85%. Sendo assim, os autores concluem que o uso de pó de vidro como substituto parcial ao cimento na produção de argamassa pode reduzir significativamente o impacto ambiental em comparação ao uso de pó de sílica. Além disso, o estudo mostrou que pode reduzir a expansão induzida pela reação álcali-sílica, sendo uma alternativa sustentável e viável para a indústria da construção civil.

Souza, Zolett e Carrazedo (2016) estudaram o potencial inibidor da escória de aciaria elétrica, pozolana não convencional, na RAA. Foram utilizados teores de 10, 20 e 30% como substituição ao cimento. Os resultados demonstram que a escória foi capaz de proporcionar uma redução nas expansões quando utilizada nas porcentagens de 10 e 20%. Os agregados eram reativos de origem basáltica com vidro vulcânico disseminado na matriz.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi desenvolvido com base em quatro estudos preliminares (Apêndices A, B, C e D), demonstrados pela Figura 21.

Figura 21 - Estudos preliminares



Fonte: elaborado pela autora.

O estudo de moagem demonstra que dentre os tempos adotados, com 2 horas obteve-se uma satisfatória redução no tamanho das partículas. Nos períodos subsequentes, observou-se uma redução pequena, sugerindo que o incremento no tempo não compensaria a energia despendida para a granulometria obtida.

Os estudos preliminares realizados (Apêndice B e C) apontaram que a substituição parcial do cimento pelo resíduo não apresentou resultados favoráveis na maior parte dos casos em relação à resistência à compressão. No entanto, quando o resíduo foi utilizado como adição (Apêndice D) observou-se que pode ser uma estratégia promissora, visto que várias das propriedades analisadas foram melhoradas, contudo, a partir desse estudo observa-se que a reação álcali-agregado pode ser um dos maiores desafios para o beneficiamento do resíduo. A partir disso, foi definido o programa experimental da pesquisa.

Todos os ensaios foram realizados na Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelos laboratórios LAMTAC/NORIE (Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído), LINCE (Laboratório de Inovação em Cimentos Ecoeficientes), LACER (Laboratório de Materiais Cerâmicos); LAPOL (Laboratório de Materiais

poliméricos), LACOR (Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais), CMM (Centro de Microscopia e Microanálise) e Laboratório de Geoquímica.

3.1 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

No planejamento dos experimentos foram consideradas três tipos de variáveis, sendo elas: variáveis de resposta, fatores controláveis e fatores constantes.

3.1.1 Variáveis de resposta

As variáveis dependentes definidas para o presente estudo foram:

- resistência à compressão;
- expansão por reação álcali-agregado.

3.1.2 Fatores controláveis

Os fatores controláveis definidos foram:

- percentual de adição do resíduo em relação à massa do cimento (0, 5, 10 e 15%);
- tipos de cimentos (CP V-ARI RS, CP V-ARI, CP V com adição de 10% de sílica ativa, CP II-Z, CP II-F, CP IV e CP III).

3.1.3 Fatores constantes

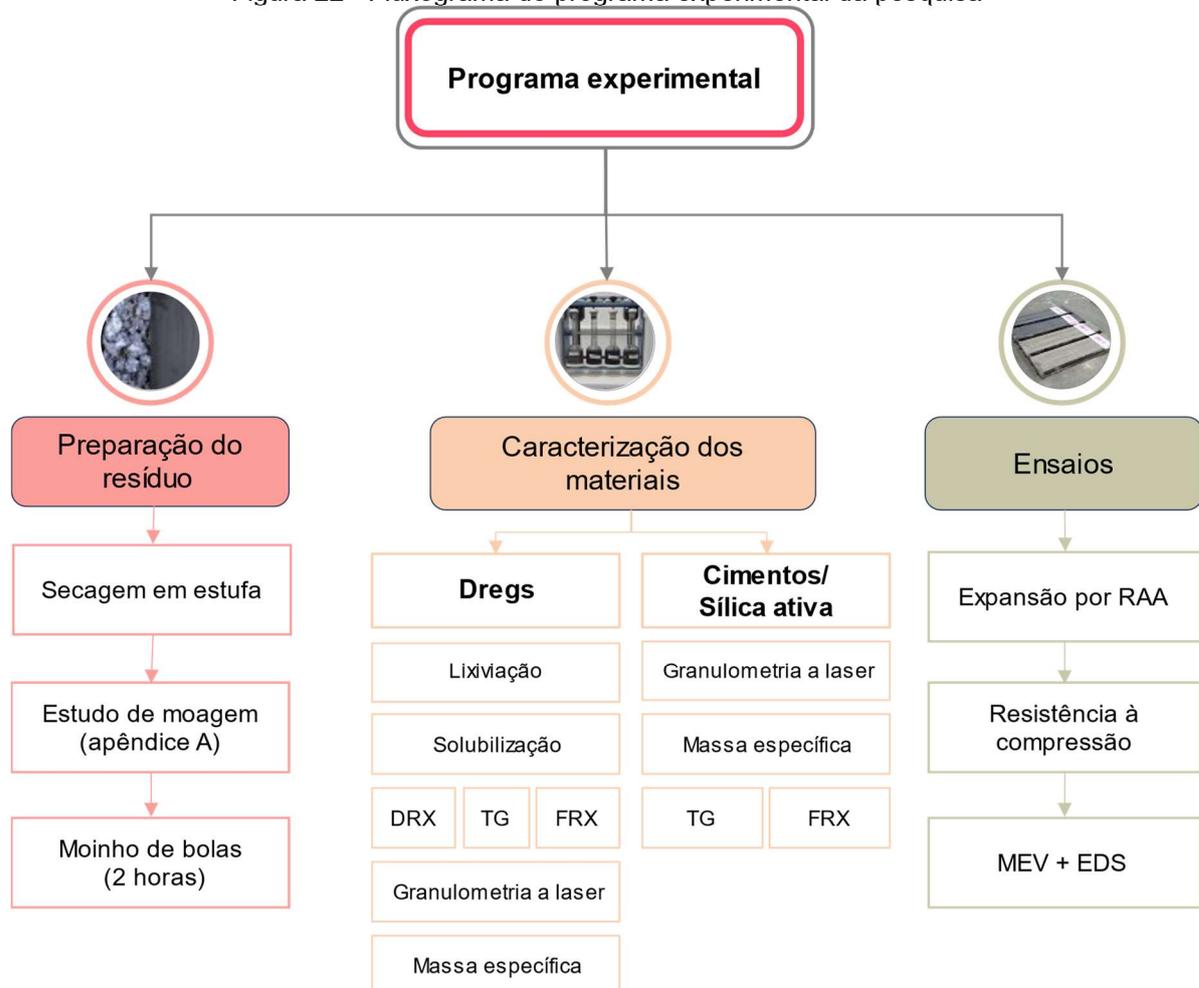
As variáveis mantidas constantes no trabalho são:

- características dos agregados;
- características do dregs;
- temperatura do banho térmico;
- procedimento de cura para resistência à compressão;
- procedimento de moagem do resíduo.

A fim de verificar o potencial reativo do resíduo combinado com os agregados e os diferentes tipos de cimento foi adotado o ensaio de barras de argamassa acelerado regido pela NBR 15577-4 (ABNT, 2018). Para isso, foram adotadas adições de 5, 10 e 15% sobre a massa de cimento a partir de resultados positivos encontrados no estudo preliminar presente no apêndice D. Tais adoções corroboram com Dal Molin (2022) que destaca que adições utilizadas como fíler são capazes de promover melhorias nas propriedades dos concretos em porcentagens de até 15%.

A Figura 22 apresenta um fluxograma das etapas do programa experimental do trabalho.

Figura 22 - Fluxograma do programa experimental da pesquisa



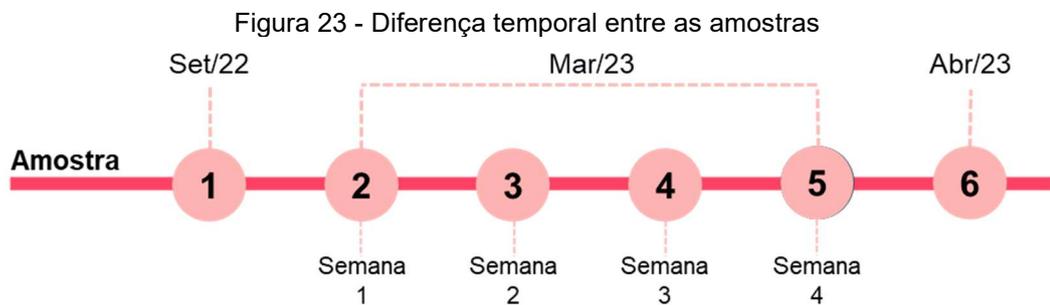
Fonte: elaborado pela autora.

Foram definidos 6 diferentes tipos de cimento, sendo eles: o CP V-ARI RS, CP V-ARI, CP II-F, CP II-Z, CP IV e CP III, além disso, foi adotada a composição de CP V-ARI com adição de 10% de sílica ativa (CP V+10%SA). Esses foram selecionados a fim de analisar o seu comportamento e potencial de mitigação frente ao ensaio de

reação álcali-agregado. Os cimentos utilizados são provenientes do comércio local e foram adquiridos em sacos para aproximar-se do comumente utilizado em obras de construção civil.

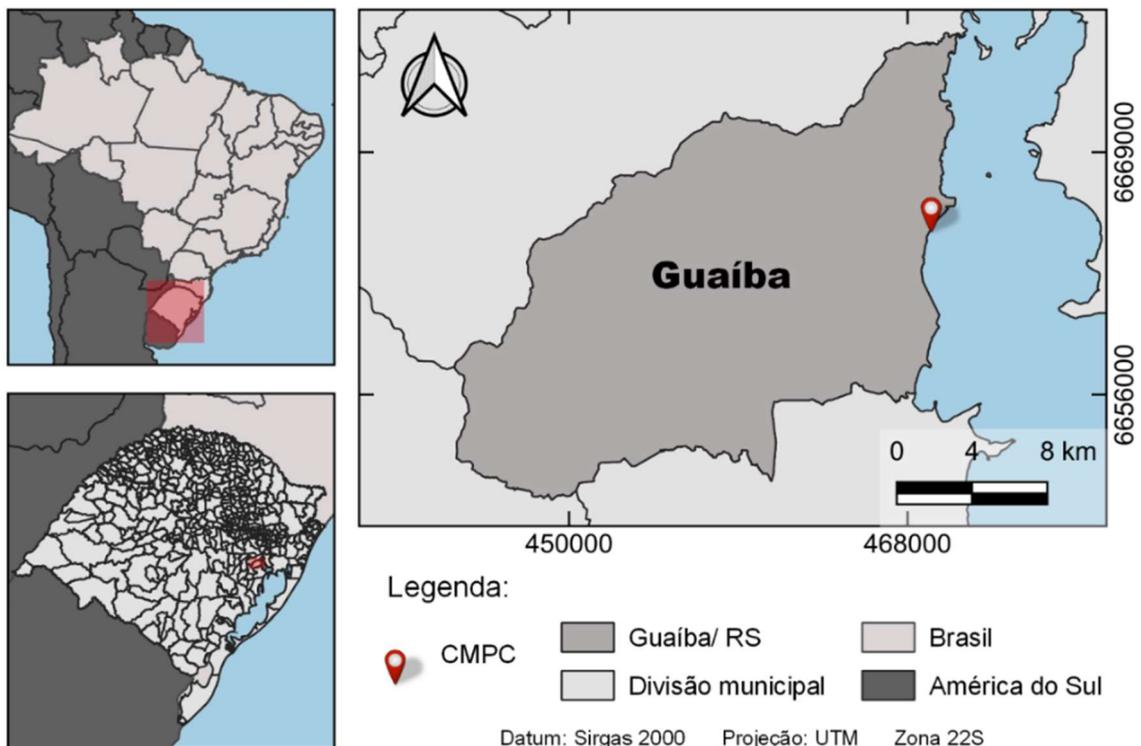
3.2 PREPARAÇÃO DO RESÍDUO

Foram coletadas seis amostras em diferentes datas (Figura 23) com o objetivo de verificar a sua homogeneidade ao longo do tempo. O resíduo utilizado nessa pesquisa é proveniente da fábrica de celulose CMPC localizada no município de Guaíba, Rio Grande do Sul (Figura 24).



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 24 - Localização das principais fábricas do Brasil



Fonte: elaborado pela autora.

Após a coleta, realizada pelos funcionários da fábrica e armazenada em sacos plásticos, as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC) do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE), onde os teores de umidade, matéria orgânica e pH foram aferidos (Tabela 3). O teor de umidade foi calculado a partir da diferença de massa antes e após a secagem. O teor de matéria orgânica foi estimado conforme recomendações da CEMP 120 (2022), foi adotada a temperatura de calcinação de 950 °C e um patamar de 2 horas. O pH foi medido conforme as recomendações do item 5.1.3 da NBR 10005 (ABNT, 2004).

A Tabela 3 mostra que o teor de matéria orgânica e o pH entre as amostras é semelhante, variando de 8,44% a 10,54% e 10,61 a 11,26, respectivamente. Já o teor de umidade apresenta uma maior variabilidade, principalmente a amostra 1, que possui uma maior variação temporal, em relação as demais.

Tabela 3 - Teor de umidade e de matéria orgânica das amostras

Amostra	Teor de umidade (%)	Teor de matéria orgânica (%)	pH
1	5,55	10,54	10,61
2	8,95	8,44	11,06
3	10,64	10,02	11,02
4	14,92	10,47	11,11
5	11,84	10,35	11,14
6	9,67	10,35	11,26

Fonte: elaborado pela autora.

A amostra final utilizada para a moldagem das argamassas foi constituída de quantidades variáveis das diferentes amostras coletadas, sendo previamente quarteadas e misturadas, garantindo a homogeneização da amostra que passou pelos processos de preparação (Figura 25).



Fonte: elaborado pela autora.

Inicialmente, foram submetidas à secagem ($T: 100 \pm 5^{\circ}\text{C}$) e breve desaglomeração com pistilo e almofariz de porcelana. Esse processo foi realizado devido à aglomeração gerada na secagem do material em consequência do teor de umidade

vindo de fábrica. Posteriormente, o resíduo foi moído em um moinho de bolas por 2 horas. Esse tempo foi definido através do estudo de moagem (Apêndice A), por apresentar uma redução das partículas satisfatória para o resíduo ser utilizado como fíler. A proporção de resíduo para as bolas de porcelana foi de 1:1, e as bolas selecionadas foram de diferentes tamanhos a fim de preencher os vazios entre elas.

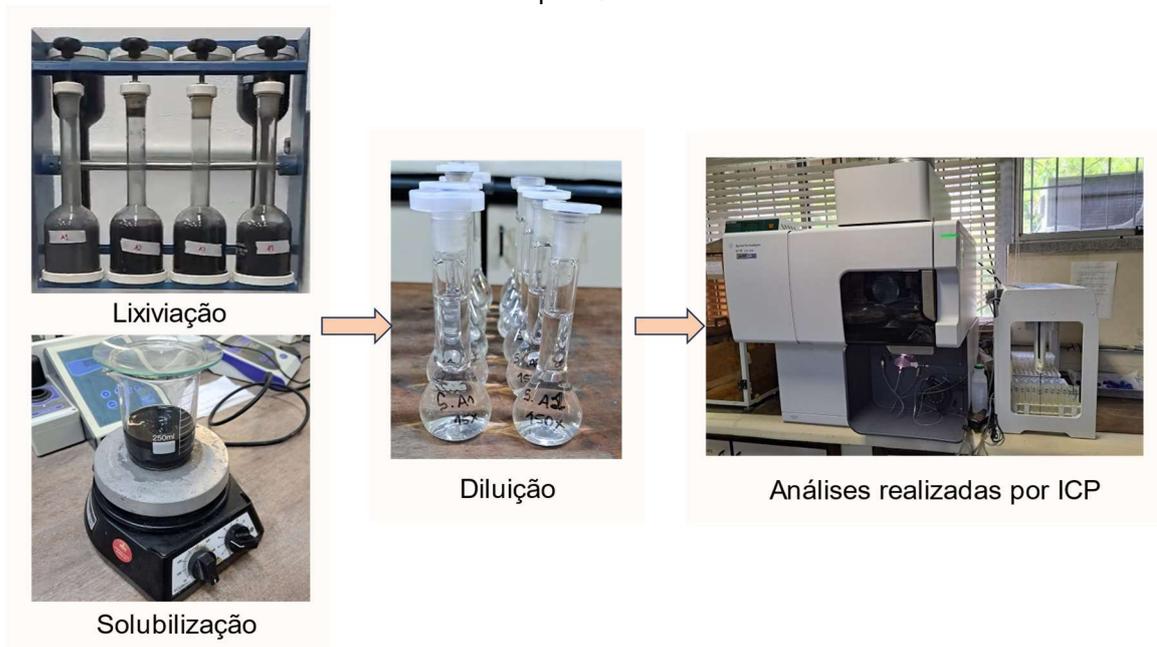
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A composição química das amostras (cimentos, dregs e sílica ativa) foi quantificada por meio da técnica de Fluorescência de Raios – X para elementos maiores no Laboratório de Geoquímica. A análise mineralógica das amostras foi realizada por meio da Difração de Raios – X, com o difratômetro de raios – X, marca Philips, modelo X'Pert MDP (tubo de raios – X com radiação Cu) na faixa de 5 – 80° no LACER. A análise foi realizada a partir do *software X'Pert High Score*.

A classificação do resíduo foi obtida por meio dos ensaios de lixiviação e solubilização, realizados a partir das diretrizes da NBR 10005 (ABNT, 2004) e NBR 10006 (ABNT, 2004), respectivamente. Os ensaios foram realizados para as seis amostras de dregs. Os elementos presentes nos extratos lixiviados e solubilizados foram analisados com o ICP (Plasma por Acoplamento Indutivo) no LACOR, para isso, foram conduzidas diluições de 15x e 150x.

As diluições foram realizadas devido à disparidade nas concentrações dos elementos, com alguns deles encontrando-se em menores proporções do que outros, ou seja, apenas uma diluição não seria capaz de abranger todos os elementos almejados. Com isso, os resultados obtidos foram comparados com o estipulado pela NBR 10004 (ABNT, 2004). A Figura 26 exemplifica os procedimentos adotados para os ensaios.

Figura 26 – Caracterização ambiental do dregs: lixiviação, solubilização, diluição e análises realizadas por ICP



Fonte: elaborado pela autora.

A granulometria à laser foi realizada com o equipamento PSA 1090 L Anton – Paar, faixa de leitura dos grãos entre 40nm - 500 μ m e método via úmido em álcool isopropílico no LINCE.

A determinação de perda de massa foi realizada por termogravimetria foi realizado com o equipamento modelo TGA – 50 (Shimadzu) com cadinho de platina, utilizando taxa de aquecimento padrão de 10°C/min entre temperatura ambiente a 1000°C no LINCE.

A massa específica dos materiais foi conduzida conforme as diretrizes da NBR 16605 (ABNT, 2017).

3.3.1 Dregs

3.3.1.1 Caracterização ambiental

A classificação ambiental do resíduo conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004) foi obtida a partir dos ensaios de lixiviação (ABNT NBR 10005: 2004) e solubilização (ABNT 10006: 2004). A classificação dos resíduos entre perigosos e não perigosos se dá a partir do ensaio de lixiviação. Já a diferenciação entre inertes e não inertes ocorre a

parir do ensaio de solubilização. Os resultados são apresentados pelas Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4 - Resultados e limites para o ensaio de lixiviação (em mg/L)

Elemento	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Amostra 4		Amostra 5		Amostra 6		Limites NBR 10004
	15x	150x	15x	150x	15x	150x	15x	150x	15x	150x	15x	150x	
Cálcio	121.62	128.44	1.89	4.29	1.52	4.36	2.88	3.66	3.18	7.59	122.3	163.8	-
Magnésio	115.19	116.12	38	39.74	18.02	17.58	17.01	10.59	54.38	57.47	189.2	232	-
Alumínio	0	0	0.2	0	0	0	0.06	0	0.03	0	0	0	-
Sódio	2100	2231	3313	3655	4471	4878	6137	5849	3411	3656	1613	1948	-
Cobre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
Manganês	0.03	0.08	0.01	0	0	0	0	0.02	0	0	0.02	0.08	-
Cromo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Bário	0.21	1.52	0.15	1.98	0.18	1.77	0.17	1.67	0.18	1.9	0.32	2.02	70
Chumbo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Nota: 15x e 150x refere-se as diluições realizadas.

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 5 - Resultados e limites para o ensaio de solubilização (em mg/L)

Elemento	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Amostra 4		Amostra 5		Amostra 6		Limites NBR 10004
	15x	150x	15x	150x	15x	150x	15x	150x	15x	150x	15x	150x	
Cálcio	0.87	1.82	0.69	1.47	3.44	4.5	1.44	4.4	1.01	1.55	0.9	1.37	-
Magnésio	0.17	0	0.08	0	0.93	0.36	0.3	0.13	0.1	0	0.86	0.32	-
Alumínio	0.87	0	1.21	0	0.57	0	0.15	0	0.71	0	0.05	0	0.2
Sódio	3807.8	4288	8321	10376	12487	17261	11460	16040	8668	10657	2073	2102	200
Cobre	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	2
Manganês	0	0	0	0	0	0.01	0	0.04	0.01	0.03	0.01	0.01	0.1
Cromo	0.08	0	0.04	0	0.1	0	0	0	0.05	0		0	0.05
Bário	0.17	1.73	0.16	1.66	0.16	1.58	0.15	1.81	0.16	1.53	0.17	1.71	0.7
Chumbo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01

Nota: 15x e 150x refere-se as diluições realizadas.

Fonte: elaborado pela autora.

Visto que no ensaio de lixiviação os resultados não ultrapassam o estabelecido pela NBR 10004 (ABNT, 2004), o dregs é caracterizado como não perigoso. Entretanto, no ensaio de solubilização, os elementos alumínio, sódio, cromo e bário apresentam valores acima dos limites estabelecido pela norma, dessa forma, são caracterizados como não inertes. A classificação final do resíduo é não-inerte classe II A.

O teor elevado de sódio evidenciado nas amostras pelo ensaio de solubilização (Tabela 6) é um aspecto de importante relevância a ser considerado. A elevada

presença desse mineral pode ser um indicativo de condições propícias para a ocorrência da reação álcali-agregado.

3.3.1.2 Caracterização química

Na Tabela 6 é apresentada a caracterização das amostras de dregs por meio da análise por fluorescência de raios-X. O equivalente alcalino foi calculado conforme a Equação 1.

$$Na_2O_{eq} = Na_2O + 0,658K_2O \quad (1)$$

Tabela 6 - Caracterização química das amostras de dregs por fluorescência de raios - X

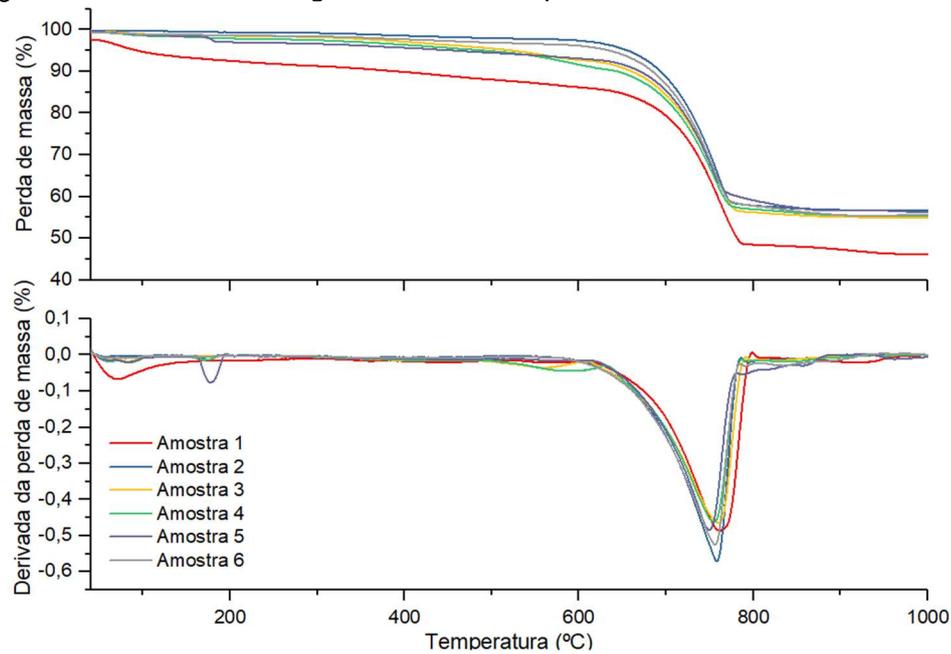
Elementos maiores (%)	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
SiO ₂	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	-	-	0,074	-	-	-
TiO ₂	0,138	0,303	0,044	0,104	0,109	0,124
Fe ₂ O ₃	1,919	1,849	2,894	2,268	1,467	0,117
MnO	0,246	0,223	0,349	0,279	0,195	0,143
CaO	49,127	47,356	43,791	41,836	48,846	51,804
MgO	4,052	3,689	5,392	5,168	3,499	2,526
K ₂ O	0,050	0,113	0,135	0,142	0,087	0,066
Na ₂ O	4,187	6,122	6,922	9,870	5,438	3,697
P ₂ O ₅	0,281	0,345	0,400	0,333	0,360	0,522
Equivalente alcalino (Na ₂ Oeq)	4,219	6,196	7,010	9,963	5,495	3,740

Fonte: elaborado pela autora.

A NBR 15577-1 (ABNT, 2018) sugere, como primeira medida mitigatória a ser adotada, a limitação do teor de álcalis do concreto a valores inferiores a 2,4 kg/m³ de Na₂O. Diante disso, novamente chama atenção o possível impacto que a introdução do resíduo pode causar nos materiais cimentícios, considerando o elevado equivalente alcalino verificado em todas as amostras de dregs.

A partir do ensaio de termogravimetria (Figura 27), nota-se que em todas as curvas há uma expressiva perda de massa entre 600 e 800°C, sendo essa, provavelmente, relacionada à decomposição do carbonato de cálcio (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENCACH, 2016).

Figura 27 - Curvas de termogravimetria obtidas para as diferentes amostras de Dregs



Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 7 apresenta as porcentagens de perda de massa obtidas para os produtos presentes nas amostras de dregs. Nota-se resultados semelhantes, sem mudanças representativas entre as amostras.

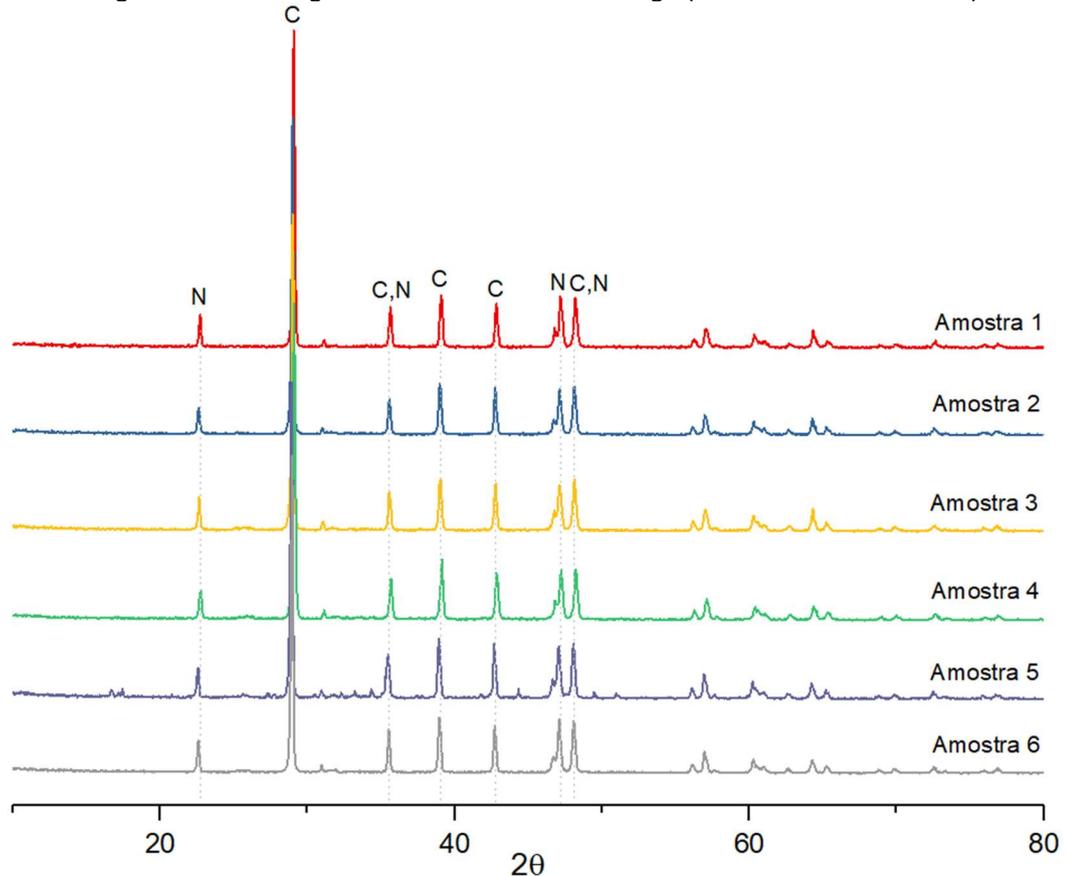
Tabela 7 – Perda de massa do carbonato de cálcio nas amostras de dregs

Composto	Amostra					
	1	2	3	4	5	6
CaCO₃ (%)	85,56	82,44	75,64	74,60	86,99	86,77

Fonte: elaborado pela autora.

A Figura 28 apresenta os difratogramas das diferentes amostras de resíduo dregs. É possível observar grande semelhança na posição e intensidade dos picos. Em consonância com a bibliografia (Quadro 1), as amostras demonstram ser majoritariamente compostas por carbonato de cálcio na forma de calcita (CaCO₃). Ainda, constata-se a presença de nitrato de sódio na forma de nitratina (NaNO₃).

Figura 28 - Difratogramas das amostras de dregs (C: Calcita e N: nitratina)



Fonte: elaborado pela autora.

3.3.1.3 Caracterização física

Os parâmetros físicos determinados para a amostra final de dregs, após a moagem, são apresentados pela Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros físicos do dregs

Parâmetro		Dregs
Massa específica (g/cm ³)		2,45
Granulometria a laser	D ₁₀ (μm)	3,29
	D ₅₀ (μm)	12,26
	D ₉₀ (μm)	29,92
	D _{médio} (μm)	15,25

Fonte: elaborado pela autora.

A massa específica, em geral, é semelhante à observada pela bibliografia, que varia de 2,41 a 2,58 g/cm³ (DIAS, 2021; OLIVEIRA, 2022; SOUZA, 2022; TORRES *et al.*, 2020), conforme observado no Quadro 2. No que tange o tamanho das partículas é, em sua maioria, inferior às granulometrias encontradas na literatura. É importante

destacar que, conforme discutido no item 2.2.2, muitos estudos limitam-se ao peneiramento do resíduo, sem fornecer a dimensão dos grãos. No entanto, a dimensão obtida neste trabalho é ainda menor que a relatada por Souza (2022) e Oliveira (2022), os quais encontraram diâmetros (D_{50}) de 17,8 μm e 21,02 μm , respectivamente.

3.3.2 Cimentos

Com base nas informações trazidas pela Tabela 2 da NBR 16697 (ABNT, 2018), que apresenta os limites de composição do cimento Portland, os diferentes tipos de cimento foram escolhidos a partir dos seguintes requisitos:

- a) CP V-ARI: escolhido devido ao baixo teor de adições;
- b) CP V-ARI RS: selecionado devido à possível presença de adições de escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos que podem auxiliar na mitigação da RAA, visto que promove resistência a sulfatos;
- c) CP II-Z-32: escolhido devido a porcentagem de adição de material pozolânico;
- d) CP II-F-40: adotado devido a sua crescente utilização na construção civil e ausência de adições pozolânicas;
- e) CP IV-32: selecionado devido as altas porcentagens de material pozolânico e por ser amplamente utilizado no Sul do Brasil;
- f) CP III-RS-40: escolhido com base nas altas adições de escória granulada de alto-forno que pode auxiliar na mitigação da RAA.

3.3.2.1 Caracterização química

A Tabela 9 apresenta a composição química de todos os cimentos utilizados na pesquisa.

Tabela 9 - Elementos maiores dos cimentos utilizados obtidos por FRX (continua)

%	CP V-ARI RS	NBR 16697	CP V-ARI	NBR 16697	CP II-Z	NBR 16697	CP II-F	NBR 16697	CP IV	NBR 16697	CP III	NBR 16697
SiO ₂	13,35		18,43		7,54		14,21		35,81		14,79	
Al ₂ O ₃	10,38		3,53		8,09		3,75		10,17		11,15	
TiO ₂	0,52		0,24		0,56		0,26		0,54		0,77	
Fe ₂ O ₃	4,73		2,76		4,05		2,63		3,59		4,67	

(conclusão)

MnO	0,16		0,04		0,11		0,06		0,05		0,32	
MgO	11,28		2,80	6,5	10,78		4,62		4,39		10,51	
CaO	54,66		63,18		49,23		63,12		36,16		50,66	
Na ₂ O	-		n.a.		0,10				0,15		0,11	
K ₂ O	1,23		0,86		0,87		1,11		1,33		0,40	
P ₂ O ₅	0,20		0,12		0,17				0,06		0,132	
SO ₃	n.a.	4,5	n.a.	4,5	n.a.	4,5	4,24	4,5	n.a.	4,5	n.a.	4,5
PF	n.a.	6,5	3,60	6,5	n.a.	8,5	5,68	12,5	3,4	6,5	n.a.	6,5
EA (Na ₂ O eq)	0,80		1,52		0,66		0,73		1,02		0,47	

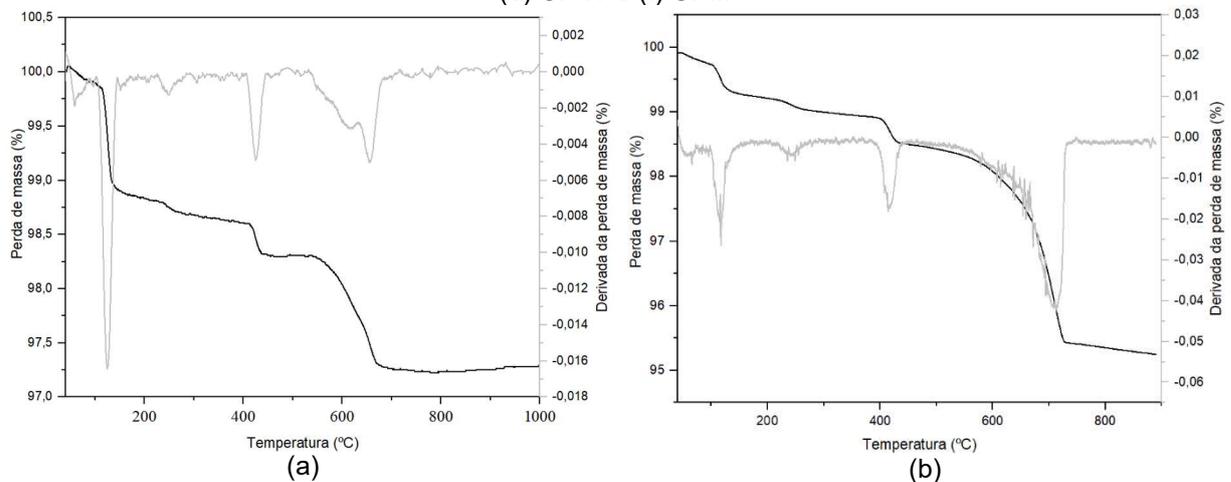
n.a.: não analisado

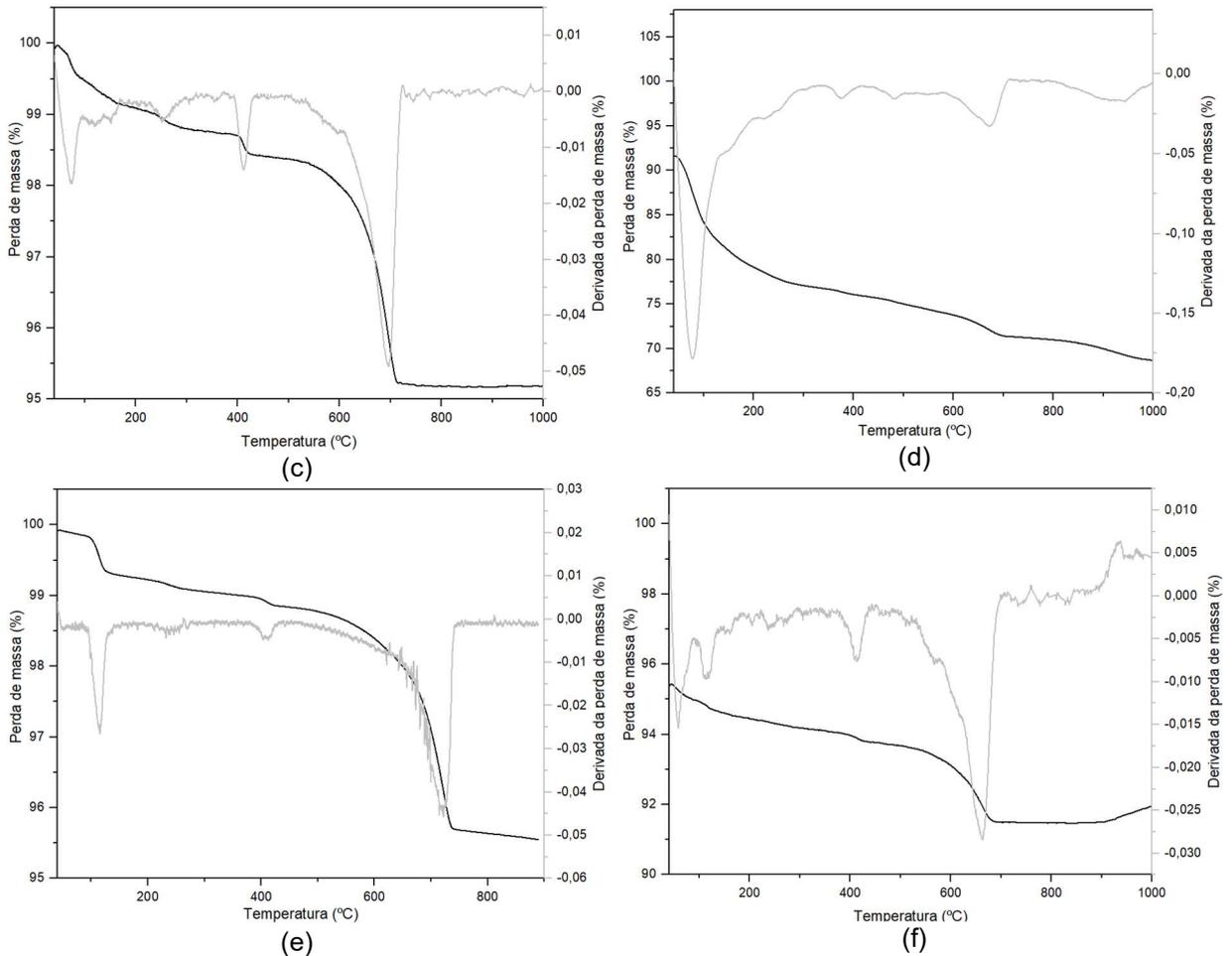
Fonte: elaborado pela autora.

Os resultados obtidos demonstram conformidade com os requisitos químicos estabelecidos para os cimentos Portland, conforme especificado pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

As análises termogravimétricas são apresentadas pela Figura 29. Em geral, observa-se picos exotérmicos até 200°C para todos os cimentos, essa perda de massa pode ser relacionada com a água livre e combinada presente nas amostras. Além disso, identificam-se outros dois picos de grande intensidade próximos a 400°C e 650°C. O pico próximo a 400°C pode ser correlacionado com a decomposição da Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Já o pico em torno de 650°C pode ser atribuído à decomposição do Carbonato de Cálcio (CaCO_3).

Figura 29 - Termogravimetrias dos cimentos: (a) CP V-ARI RS; (b) CP V-ARI; (c) CP II-Z; (d) CP II-F; (e) CP IV e (f) CP III





Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 10 apresenta as porcentagens de perda de massa obtidas para os produtos presentes nas amostras de cimento.

Tabela 10 - Perdas de massa dos produtos presentes das amostras de cimento

Cimento	Perda de massa (%)		
	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	Total
CP V-ARI RS	1,23	4,23	5,47
CP V-ARI	1,73	12,25	13,98
CP II-Z	1,19	11,35	12,54
CP II-F	1,73	11,06	12,79
CP IV	0,58	11,06	11,63
CP III	1,23	7,40	8,63

Fonte: elaborado pela autora.

Observa-se que a maior perda de massa é obtida no cimento CP V-ARI (13,98%), sendo essa principalmente relacionada a decomposição do CaCO₃ (12,25%). Em contraste, a menor perda de massa está relacionada ao CP V-ARI RS (5,47%), essa reduzida perda de massa está em concordância com a baixa porcentagem de Carbonato de Cálcio (4,23%). Além disso, é relevante ressaltar a presença pequena

de Portlandita no CP IV, representando 0,58%. A baixa porcentagem desse composto na composição do cimento CP IV pode ter implicações nas propriedades finais da argamassa, sugerindo variações na sua resistência mecânica e características térmicas.

3.3.2.2 Caracterização física

A Tabela 11 apresenta as características físicas dos cimentos utilizados.

Tabela 11 - Características físicas dos cimentos utilizados

Parâmetro	CP V-ARI RS	CP V-ARI	CP II-Z	CP II-F	CP IV	CP III	
Massa específica (g/cm ³)	3,02	3,01	2,95	3,07	2,67	2,96	
Granulometria a laser	D ₁₀ (µm)	2,53	2,50	1,99	2,27	3,48	2,022
	D ₅₀ (µm)	12,37	11,31	11,54	12,00	15,95	11,99
	D ₉₀ (µm)	31,11	20,84	28,52	29,98	43,86	29,01
	D _{médio} (µm)	15,48	12,00	14,16	14,89	21,13	14,50

Fonte: elaborado pela autora.

3.3.3 Sílica ativa

3.3.3.1 Caracterização química

A Tabela 12 apresenta a composição química da sílica ativa em porcentagem.

Tabela 12 - Concentração de elementos maiores da sílica ativa (PF: perda ao fogo; EA: equivalente alcalino)

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	PF	EA
Sílica ativa	89,49	-	0,04	2,36	0,1	0,51	0,79	2,53	1,19	0,08	2,93	2,85
NBR 13956-1	≥85,0										≤6,0	

Fonte: elaborado pela autora.

A sílica ativa atende aos requisitos químicos exigidos pela NBR 13956-1 (ABNT: 2012). A partir da concentração de elementos maiores, nota-se um alto equivalente alcalino de 2,85.

3.3.3.2 Caracterização física

Conforme a Tabela 13, observa-se um elevado tamanho das partículas, sendo o D_{médio} de 34,00 µm e massa específica de 2,20 g/cm³.

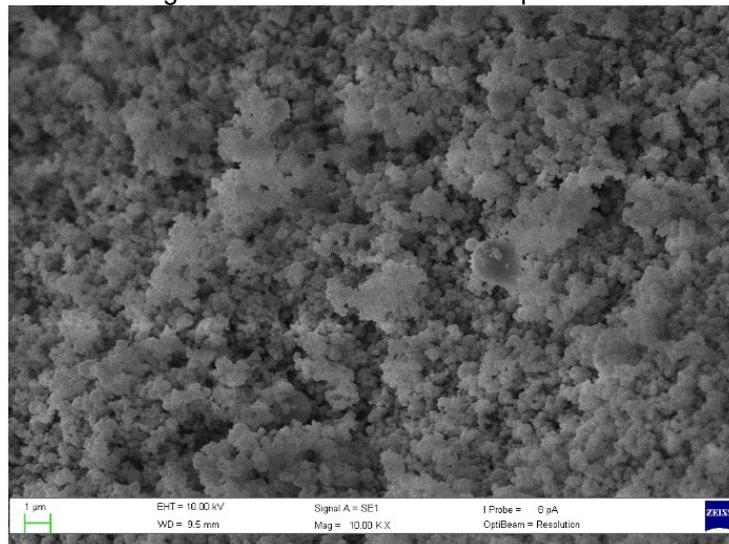
Tabela 13 - Características físicas da sílica ativa

Parâmetro		Sílica ativa
Massa específica (g/cm ³)		2,20
Granulometria a laser	D ₁₀ (μm)	8,82
	D ₅₀ (μm)	25,01
	D ₉₀ (μm)	69,63
	D _{médio} (μm)	34,00

Fonte: elaborado pela autora.

Conforme a literatura, o tamanho médio das partículas de sílica ativa é de 0,1 μm (ABD, 2018; KALANTARI; PRASAD; HUAT, 2013; SHANMUGA PRIYA, 2017; SRIVASTAVA, VIKAS; AGARWAL; KUMAR, 2012; VIJAY *et al.*, 2016). Isso sugere que a sílica ativa utilizada nesse trabalho estava aglomerada, o que foi confirmado por meio da análise por microscopia eletrônica de varredura. Na micrografia (Figura 30), observa-se claramente a presença de aglomerados. No entanto, é interessante notar que as partículas individuais apresentam um tamanho inferior a 1 μm.

Figura 30 – Sílica ativa: micrografia eletrônica de varredura por elétrons secundários (10.000X)



Fonte: a autora.

3.3.4 Agregados

Foram utilizados dois tipos de agregados na pesquisa, o principal, proveniente de extração natural e o complementar proveniente de britagem.

Os agregados utilizados foram separados nas diferentes frações granulométricas (2,36, 1,18, 0,6, 0,3 e 0,15 mm) exigidas pela NBR 15577-4 (ABNT, 2018). Este processo de separação granulométrica garante a conformidade com os padrões

estabelecidos e a adequação das características físicas do agregado ao ensaio. A porcentagem retida de cada fração é apresentada pela Tabela 14.

Tabela 14 - Granulometria requerida pela NBR 15577 – 4 (ABNT, 2018)

Abertura de malha (mm)	Porcentagem de material retida (%)
2,36	10
1,18	25
0,6	25
0,3	25
0,15	15

Fonte: elaborado pela autora.

3.3.4.1 Areia natural

O principal agregado utilizado é proveniente de extração natural do Rio Guaíba/ Porto Alegre/ RS. Conforme Tiecher (2006), a areia é majoritariamente composta por quartzo, bastante fraturados, com a presença de feldspato alcalino, plagioclásio e zircão. Ainda, o quartzo apresenta extinção ondulante elevada e forma arredondada.

3.3.4.2 Areia britada

De forma complementar, foi utilizada uma areia britada classificada como potencialmente inerte em trabalho anterior (MELO; HASPARYK; TIECHER, 2023). A classificação do agregado miúdo foi obtida pelos autores com o emprego do cimento CP V-ARI por meio do ensaio de reação álcali-agregado acelerado com barras de argamassa. Essa areia foi adotada a fim de verificar a influência do tipo de agregado em conjunto com o resíduo dregs em relação à expansão por RAA. Conforme Schovanz (2019), o agregado é de origem granítica, composta majoritariamente por feldspato, com a presença de plagioclásio, quartzo (irregulares, bem desenvolvidos e com baixa extinção ondulante), biotita e sericita.

3.3.5 Água

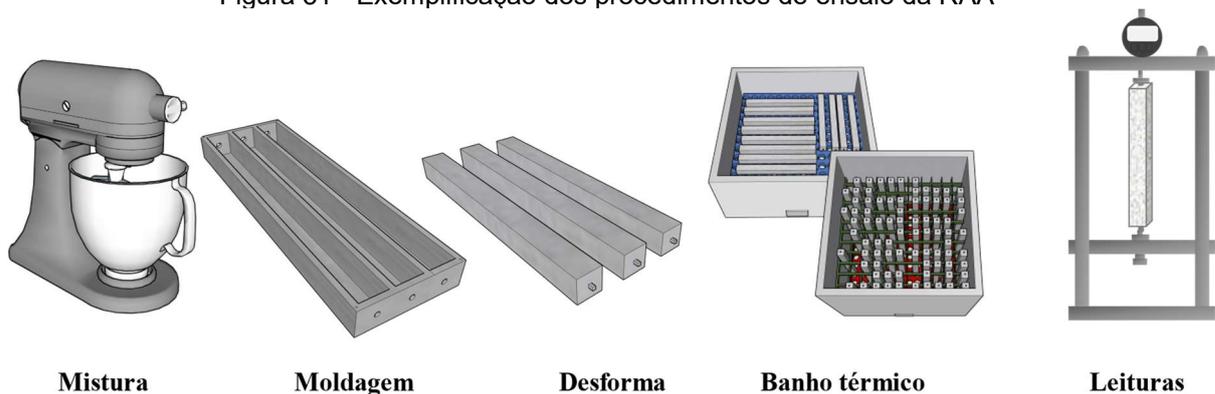
Conforme requisitado pela NBR 15577 – 4, a água utilizada passou por um processo desionização, no qual íons, como íons de sais minerais, foram removidos.

3.4 MÉTODOS

3.4.1 Reação álcali-agregado

O ensaio de reação álcali-agregado foi conduzido conforme a NBR 15577-4 (ABNT: 2018) no LAMTAC/NORIE, conforme a Figura 31 exemplifica os procedimentos. Trata-se de um ensaio com prismas de argamassa pelo método acelerado. Esse método foi selecionado devido ao período disponível para a conclusão do trabalho. A escolha desse ensaio baseou-se na presença de álcalis (Na_2O e K_2O) no resíduo, conforme demonstrado pela caracterização química por FRX (Tabela 6) e pelo ensaio de solubilização (Tabela 5). Bem como, devido ao estudo preliminar (APÊNDICE D) demonstrar potencial reativo na combinação de agregados naturais, CP V-ARI e dregs.

Figura 31 - Exemplificação dos procedimentos de ensaio da RAA



Fonte: elaborado pela autora.

Para cada cimento foram adotadas 4 porcentagens de adição. A primeira com 0% de adição foi denominada REF, ou seja, os resultados de expansão para essas composições devem ser unicamente relacionados à ação concomitante do cimento e do agregado. Em sequência, foram utilizadas outras três porcentagens de adição de Dregs, sendo elas: 5% (5D), 10% (10D) e 15% (15D). A partir das adições almeja-se analisar a influência do aumento dos teores nas matrizes cimentícias, como também, o potencial de mitigação dos diferentes cimentos utilizados. Foram realizadas 24 composições utilizando agregado natural e 4 composições utilizando agregado britado.

O traço utilizado foi de 1:2,25 com relação água/cimento de 0,47, conforme especificações da NBR 15577-4 (ABNT, 2018). Os teores de adição foram calculados em relação à massa do cimento. A quantidade de água permaneceu constante e não foi feito o uso de aditivos para padronização da consistência. Essa medida foi tomada para a redução de variáveis nos resultados. A Tabela 15 apresenta as quantidades dos materiais, em massa, utilizados nas misturas.

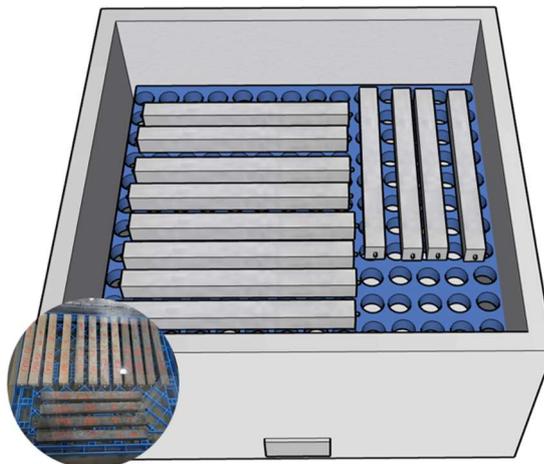
Tabela 15 - Quantidades, em massa, dos insumos utilizados para as misturas

Composição	Teor de adição	Cimento (g)	Agregado (g)	Sílica Ativa (g)	Dregs (g)	Água (g)
CP V-ARI, CP V-ARI RS, CP II-Z, CP II-F, CP IV e CP III	0%	440	990	0	0	206,8
	5%	440	990	0	22	206,8
	10%	440	990	0	44	206,8
	15%	440	990	0	66	206,8
CP V+10%SA	0%	440	990	44	0	206,8
	5%	440	990	44	22	206,8
	10%	440	990	44	44	206,8
	15%	440	990	44	66	206,8

Fonte: elaborado pela autora.

Após a moldagem, os corpos de prova foram alocados em câmara úmida com umidade de 100% e temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. Após, foram desmoldados, identificados e submergidos em água em um banho térmico aquecido até a temperatura de 80°C , a qual manteve-se constante durante 24 horas. Devido à limitação de banhos térmicos, nessa etapa, os corpos de prova foram mantidos de forma horizontal apoiados sobre uma grade de plástico vazada (Figura 32).

Figura 32 - Representação esquemática das amostras dispostas em banho térmico com água

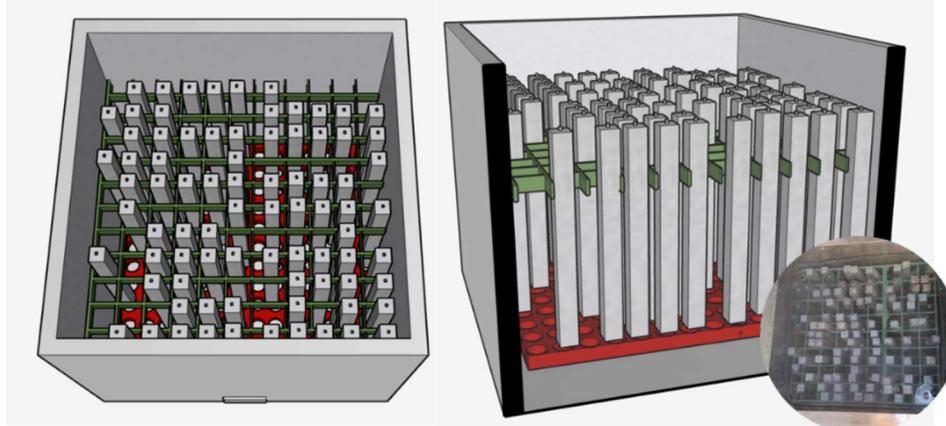


Fonte: elaborado pela autora.

Após a permanência dos corpos de prova em água, foram realizadas as leituras iniciais e em sequência dispostos em um banho térmico com solução de hidróxido

de sódio e temperatura de $80 \pm 2^\circ\text{C}$. Nessa etapa, os corpos de prova foram mantidos de forma vertical, e conforme recomendado pela norma, sem que fossem apoiados pelos pinos (Figura 33).

Figura 33 - Ilustração dos corpos de prova alocados no banho térmico: (a) vista superior; (b) corte



Fonte: elaborado pela autora.

(a)

(b)

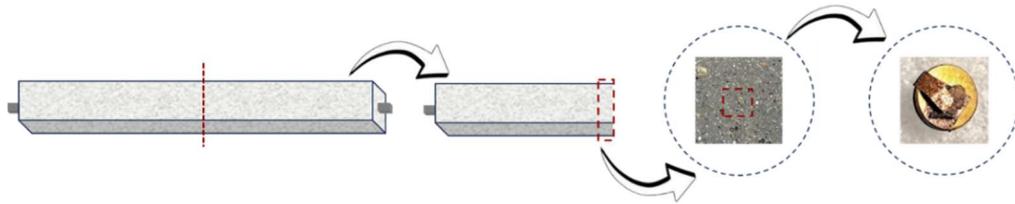
Foram realizadas leituras periódicas dos corpos de prova até a idade de 63 dias a fim de verificar possíveis comportamentos expansivos tardios.

3.4.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDS)

Após os 63 dias, as amostras que estavam condicionadas em banho térmico com solução de hidróxido de sódio foram fraturadas. Com isso, pequenos pedaços foram selecionados e passaram pelo processo de parada de hidratação, com álcool isopropílico, seguindo as recomendações de Scrivener, Snellings e Lothencach (2016). Foram utilizados apenas fragmentos das argamassas que continham agregado natural em sua composição e apresentaram expansão superior ao limite estabelecido pela NBR 15577-1 (ABNT, 2018).

As amostras foram posicionadas em suportes (*stubs*) e submetidas à metalização com ouro para a realização da análise. Foi selecionada uma amostra para cada composição com 0 e 10% de adição, retirada preferencialmente do centro dos corpos de prova, conforme demonstrado pela Figura 34. O ensaio foi realizado no CMM. Essa escolha foi motivada pela capacidade do ensaio permitir uma análise visual da formação do gel da RAA.

Figura 34 - Exemplificação do processo de amostragem para a MEV



Fonte: elaborado pela autora.

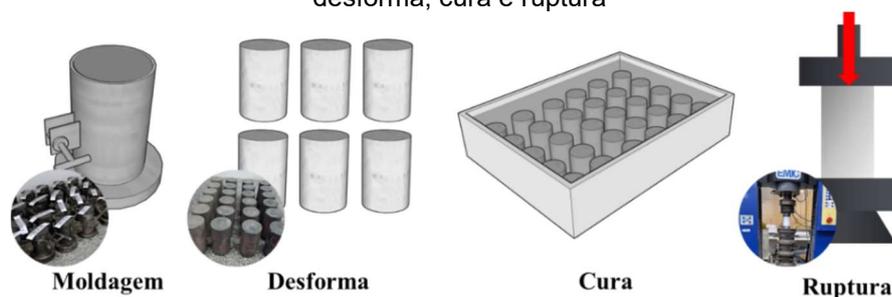
Após a preparação das amostras, a MEV foi realizada por elétrons secundários. A espectrometria de energia dispersiva (EDS) foi empregada para distinção dos compostos nas amostras, assim, possibilitando a confirmação da presença do gel álcali-silica. Foi utilizado o microscópio de varredura convencional de filamento de tungstênio, MEV Zeiss EVO 10, que opera com tensões de 0,2 kV até 30 kV, equipado com detectores de elétrons secundários de câmara (SEI, INCA system version 5.03).

3.4.3 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi utilizado como um parâmetro de controle em relação às argamassas testadas para reação álcali-agregado. Os traços e procedimento de mistura foram idênticos ao utilizado para a RAA. A moldagem e cura seguiram as diretrizes da NBR 7215 (ABNT, 2018). Foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos (5 x 10 cm) para cada mistura, totalizando 144 exemplares. Para a resistência à compressão foram utilizadas apenas as misturas que continham agregado reativo.

Os corpos de prova permaneceram, em câmara úmida, imersos em água saturada com cal durante 28 dias, idade em que foi realizada a ruptura à compressão. A Figura 35 exemplifica os processos do ensaio.

Figura 35 - Exemplificação do procedimento do ensaio de resistência à compressão: moldagem, desforma, cura e ruptura



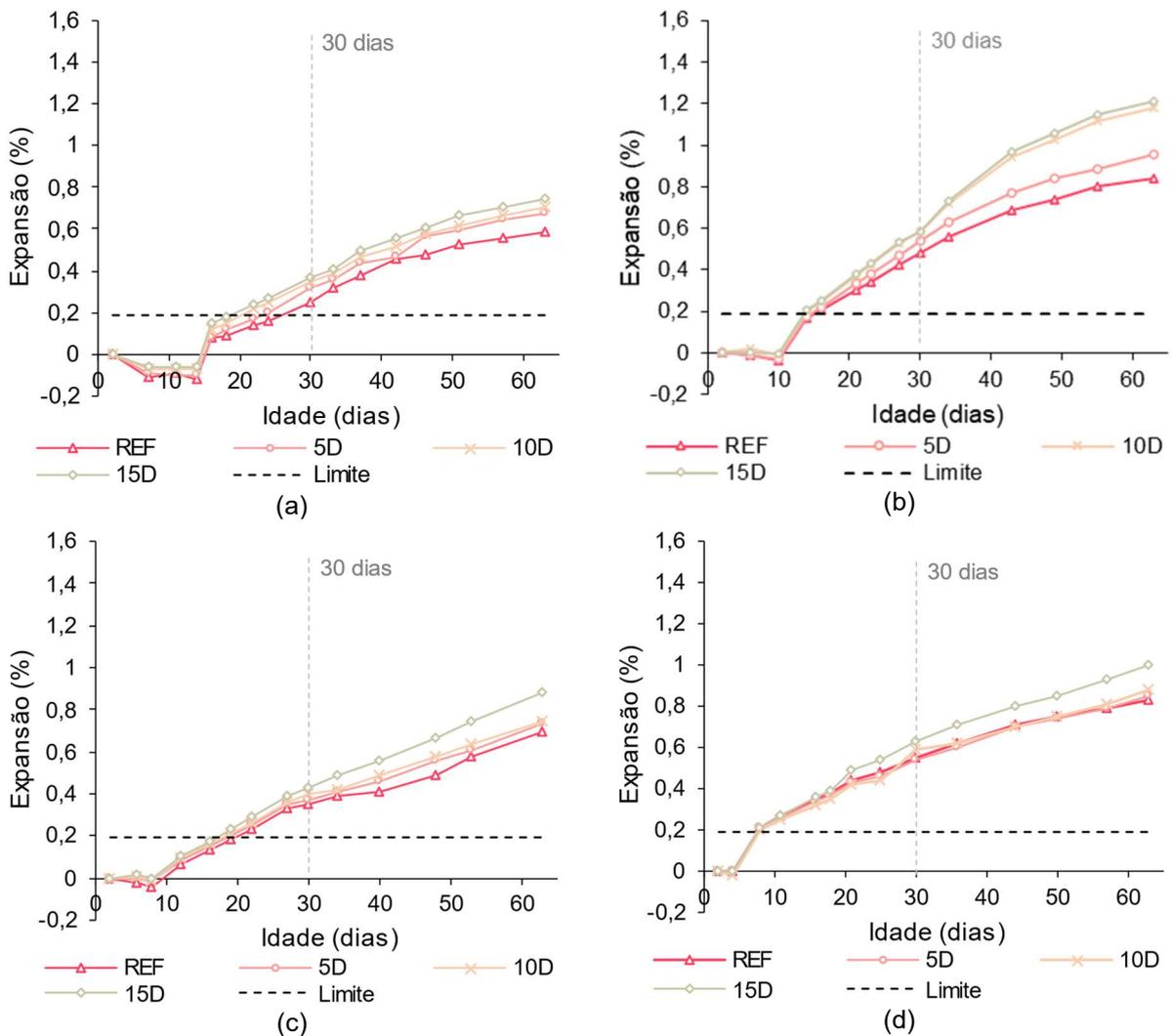
Fonte: elaborado pela autora.

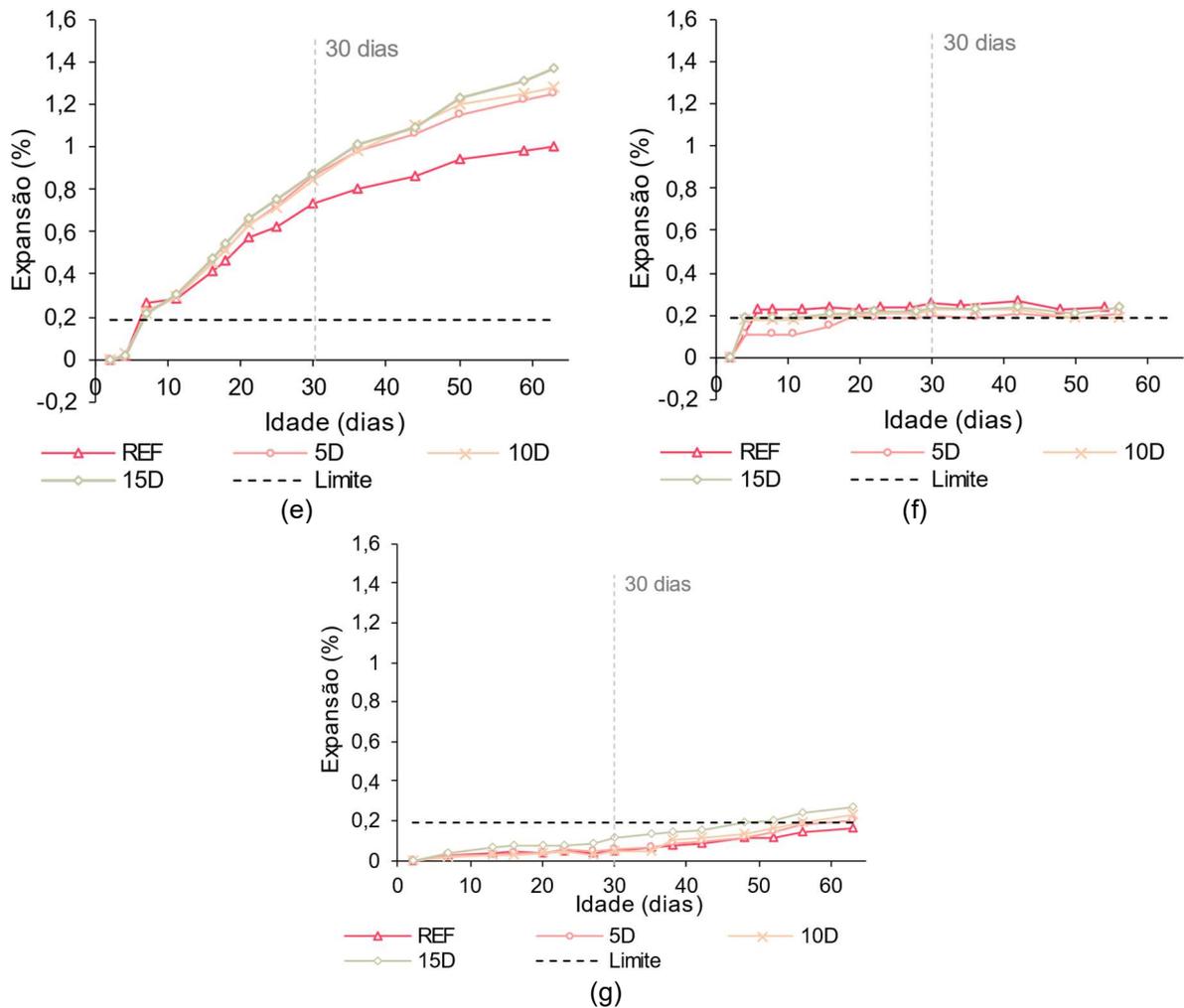
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 COMPORTAMENTO EXPANSIVO

Os resultados de expansão por reação álcali-agregado dos diferentes cimentos utilizados referem-se ao método acelerado dos prismas de argamassa. A Figura 36 apresenta os resultados de expansão para todos os cimentos utilizados.

Figura 36 - Expansão obtida para os diferentes cimentos: (a) CP V ARI – RS, (b) CP V – ARI, (c) CP V + 10%SA, (d) CP II-Z, (e) CP II -F, (f) CP IV, (g) CP III





Fonte: elaborado pela autora.

A exceção do CP IV e CP III, observa-se que as expansões nos demais cimentos comportam-se de maneira semelhante, crescente sem indício de estabilização até a finalização do ensaio aos 63 dias, sendo que a adição de dregs normalmente resultou em um aumento das expansões.

A Tabela 16 apresenta as expansões médias obtidas para os cimentos e seus respectivos teores de adição aos 30 dias de ensaio. Os resultados são classificados como potencialmente inócuos grau R0 (menor que 0,19%) e potencialmente reativas grau R1 (entre 0,19 e 0,40%), R2 (entre 0,41 e 0,60%) e R3 (maior que 0,60%). As classificações são padronizadas pela Tabela 2 da NBR 15577-1 (ABNT, 2018). É importante ressaltar que essas classificações se referem a argamassas produzidas com cimento padrão. Contudo, para essa pesquisa, serão também utilizadas para classificar os diferentes cimentos e teores de adição de dregs utilizados de forma a promover um padrão comparativo entre as composições.

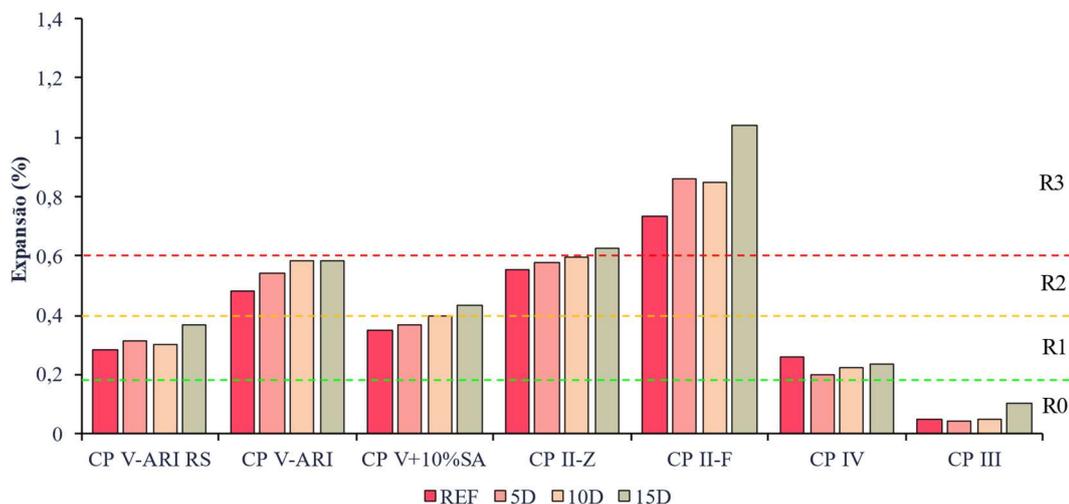
Tabela 16 - Expansões médias e classificação em relação ao potencial reativo aos 30 dias (DRM: desvio relativo máximo; CV: coeficiente de variação)

Tipo de cimento	Adição (%)	Expansão média (%)	DRM	CV (%)	R0	R1	R2	R3
CP V-ARI RS	0	0,28	6,4	22,6		x		
	5	0,32	2,3	7,4		x		
	10	0,35	0,1	0,4		x		
	15	0,36	7,5	20,7		x		
CP V-ARI	0	0,48	2,1	4,3			x	
	5	0,54	2,9	5,3			x	
	10	0,58	4,6	8,0			x	
	15	0,59	0,4	0,7			x	
CP V+10%SA	0	0,35	9,7	27,8		x		
	5	0,37	2,8	7,7		x		
	10	0,40	2,1	5,3		x		
	15	0,43	3,7	8,6			x	
CPII-Z	0	0,55	0,9	1,7			x	
	5	0,54	8,7	16,1			x	
	10	0,60	16,7	28,1			x	
	15	0,63	2,7	4,3				x
CPII-F	0	0,74	1,1	1,5				x
	5	0,86	1,7	2,0				x
	10	0,86	4,0	4,7				x
	15	0,87	0,8	1,0				x
CP IV	0	0,26	2,4	9,0		x		
	5	0,20	8,0	40,4		x		
	10	0,22	4,3	19,1		x		
	15	0,24	6,5	27,5		x		
CP III	0	0,05	4,1	90,3	x			
	5	0,04	15,1	356,0	x			
	10	0,05	18,9	372,0	x			
	15	0,10	5,7	55,1	x			

Fonte: elaborado pela autora.

Graficamente as expansões médias são apresentadas pela Figura 37.

Figura 37 - Expansões médias e classificações sobre o grau de reatividade aos 30 dias



Fonte: elaborado pela autora.

A partir do exposto, verifica-se que apenas para o cimento CP III as argamassas são categorizadas como potencialmente inócuas. Conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018), o CP III é composto por escória granulada de alto forno na faixa de 35 a 75%. A escória é caracterizada como um material cimentante resultado de um resfriamento brusco que não permite a formação de cristais, tornando-a amorfa e altamente reativa (DAL MOLIN, 2022). Diversos estudos têm evidenciado que a introdução de escória granulada de alto forno em matrizes cimentícias resulta em uma diminuição da concentração de hidróxidos alcalinos na solução dos poros. Isso, por sua vez, promove efetivamente a atenuação das expansões pela reação álcali-agregado (ANGULO-RAMÍREZ; MEJÍA DE GUTIÉRREZ; MEDEIROS, 2018; TAPAS *et al.*, 2023; THOMAS, 2011), contudo, nesse trabalho constatou-se que também foi eficaz na mitigação dos possíveis impactos negativos gerados pelos álcalis presentes no resíduo.

De semelhante modo, o CP IV apresenta potencial de mitigação com valores próximos ao limite, mas ainda assim, as amostras são classificadas como reativas grau 1. Assim como o CP III, o CP IV é reconhecido por suas propriedades mitigadoras da RAA, isso se dá devido à porcentagem elevada de adição de até 50% de material pozzolânico (ABNT NBR 16697: 2018).

O CP V–ARI é o cimento com um menor teor de adições quimicamente ativas dentre os cimentos adotados. Com isso, observa-se que as argamassas atingem grau de reatividade 2. Esse comportamento é esperado devido à ausência de adições que auxiliem na mitigação da RAA (SCHOVANZ; COSTA; BONSEMBIANTE, 2019; TIECHER, 2006). Nesse contexto, diversos trabalhos constatarem vantagens representativas na expansão ao incorporar adições pozzolânicas, em contraste de um cimento sem adição (ANGULO-RAMÍREZ; GUTIÉRREZ; MEDEIROS, 2018; MENÉNDEZ *et al.*, 2021; OWSIAK; CZAPIK; ZAPAŁA-SŁAWETA, 2022; SAHA *et al.*, 2018; TAPAS *et al.*, 2023).

A composição do CP V com adição de 10% de sílica ativa (CP V+10%SA) demonstra que, embora a sílica ativa seja considerada uma superpozzolana, nesse caso, não apresentou a eficácia esperada na mitigação da RAA. Esse comportamento pode ser resultado do alto equivalente alcalino (2,85) e o tamanho

considerável das partículas da sílica ativa ($D_{50} = 25,01 \mu\text{m}$), possivelmente resultado da aglomeração dos grãos.

Devido a dificuldades no transporte, muitos produtores promovem a densificação da sílica ativa (MAAS; IDEKER; JUENGER, 2007; ROMANO *et al.*, 2008). Durante o processo de mistura do material cimentício, espera-se que essas partículas se desaglomerem, o que nem sempre ocorre, especialmente na ausência de aditivo superplastificante (MAAS; IDEKER; JUENGER, 2007). Em consequência disso, estudos indicam que a utilização de sílica ativa densificada pode resultar em representativa perda de desempenho (BONEN; DIAMOND, 1992; MAAS; IDEKER; JUENGER, 2007; ROMANO *et al.*, 2008). Dessa forma, as argamassas são classificativas como potencialmente reativas grau 1, com exceção da argamassa com 15% de adição de dregs que se apresenta como R2.

A utilização do CP V-ARI RS apresenta vantagens em relação ao CP V. As argamassas com esse cimento são classificadas como R1, dessa forma, atingiram expansões menores que para o CP V-ARI. A NBR 16697 (2018) não define teores de adição para esse tipo de cimento, contudo, indica que podem ser feitas adições de escórias de alto-forno ou materiais pozolânicos. Com isso, relaciona-se esse comportamento à presença de adições no cimento, entretanto, não em quantidade necessária para inibir a reação.

Já o CP II-Z, cimento composto com material pozolânico na faixa de 6 a 14% (ABNT NBR 16697:2018), demonstrou elevadas expansões, indicando que esses teores de adição não foram capazes de mitigar a reação gerada nas argamassas. Contrário ao esperado, a ordem de grandeza dos resultados assemelha-se ao obtido para o CP V-ARI. Com exceção do teor de adição de 15% de dregs, que é classificado como R3, as demais são potencialmente reativas grau 2.

Dentre todos os cimentos utilizados, consta-se que o pior desempenho obtido está relacionado à utilização do CP II-F, esse cimento não possui a adição de materiais pozolânicos, contudo, conta com a adição de 11 a 25% de material carbonático. O desempenho da adição de material carbonático está majoritariamente ligado ao efeito físico. Sendo assim, as expansões superam as encontradas para os demais

cimentos utilizados, inclusive para o CP V-ARI. Todas as composições são classificadas como R3.

4.1.1 Análise estatística dos resultados

A fim de avaliar se os diferentes fatores causam diferenças estatisticamente significativas para a RAA, realizou-se a análise de variância (ANOVA), apresentada pela Tabela 17. Todas as análises ANOVA, com intervalo de confiança de 95%, foram conduzidas para os 30 dias, tempo final do ensaio conforme a NBR 15577-4 (ABNT, 2018). A comparação múltipla de médias foi realizada por meio do teste de Tukey.

Tabela 17 - Análise de variância da RAA

	Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	F	p
Tipo de cimento	4.21446	6	0.70241	176,547	0.000000
Adição	0.06898	3	0.02299	5,779	0.001703
Tipo de cimento * adição	0.04880	18	0.00271	0.681	0.813372
Erro	0.21087	53	0.00398		

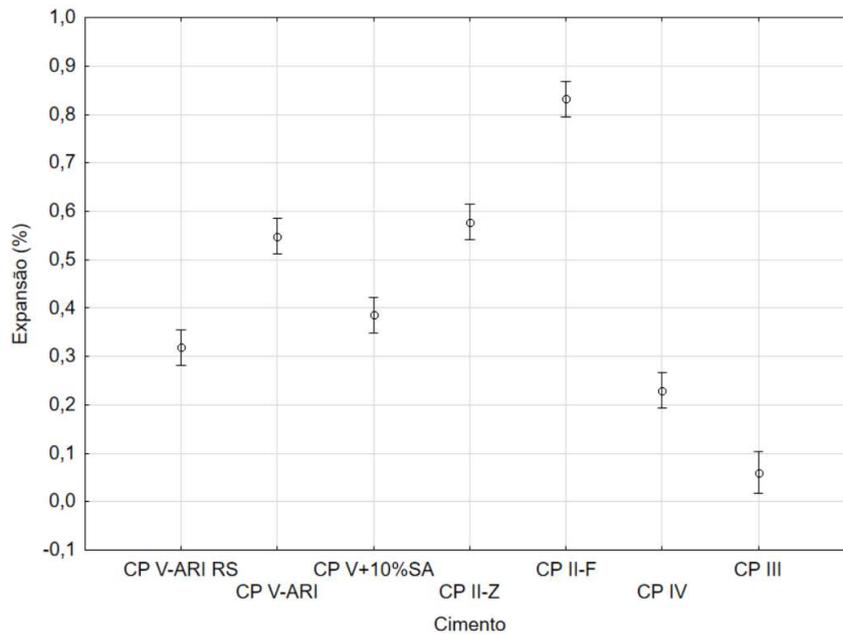
Fonte: elaborado pela autora.

Através da análise de variância é possível identificar que todos os fatores controláveis (adição e tipo de cimento) são estatisticamente significativos quando analisados individualmente em relação a variável de resposta (reação álcali-agregado). A interação entre os fatores controláveis não se demonstra significativa.

A partir da Figura 38 fica claro que o cimento que desencadeia uma maior expansão é o CP II-F, seguido do CP II-Z e CP V-ARI. Ainda a menor expansão ocorre com a utilização dos cimentos CP III, CP IV e CP V-RS, respectivamente.

Em consonância com os resultados obtidos nesse trabalho, Tiecher (2006), por meio da utilização de diferentes cimentos e agregados, observou que, cimentos com adições pozolânicas são capazes de promover uma redução na RAA. Dentre os cimentos utilizados, o CP IV demonstra uma capacidade mitigadora maior que do cimento CP II-Z, como resultado tem-se que a porcentagem de adição do CP II-Z não é capaz de inibir as expansões deletérias na maior parte das amostras analisadas.

Figura 38 - Efeito isolado do tipo de cimento na expansão

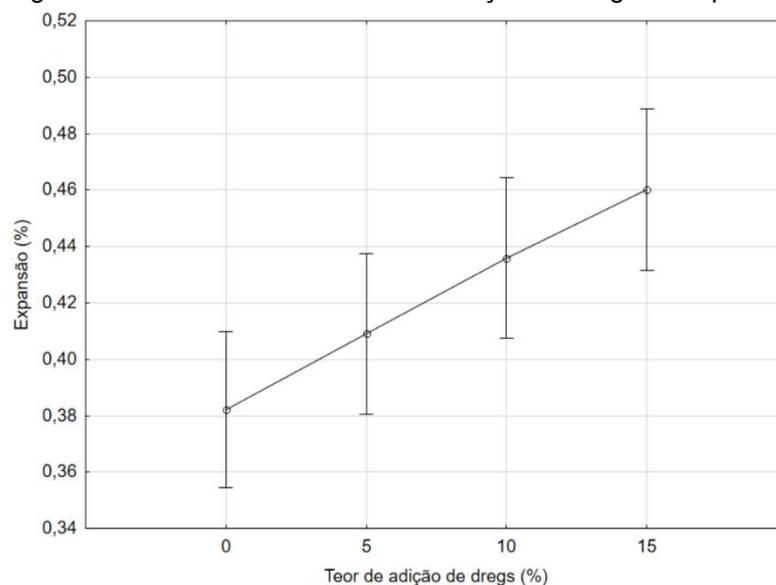


Fonte: elaborado pela autora.

Um estudo realizado por Couto (2008) demonstra efeitos positivos do CP IV para a mitigação da RAA em comparação a utilização do cimento CP II-F, que apresenta expansões com uma ordem maior. Dutra (2018) e Santana, Brasileiro e Cabral (2020) também obtiveram resultados positivos quando cimentos com alta porcentagem de adição foram utilizados (CP IV e CP III).

A Figura 39 demonstra que, em geral, conforme o aumento na porcentagem de adição de dregs maior é a expansão obtida nas barras de argamassa.

Figura 39 – Efeito isolado do teor de adição de dregs na expansão



Fonte: elaborado pela autora.

Os resultados da análise de variância dos cimentos, considerando apenas as porcentagens de adição, são apresentados na Tabela 18.

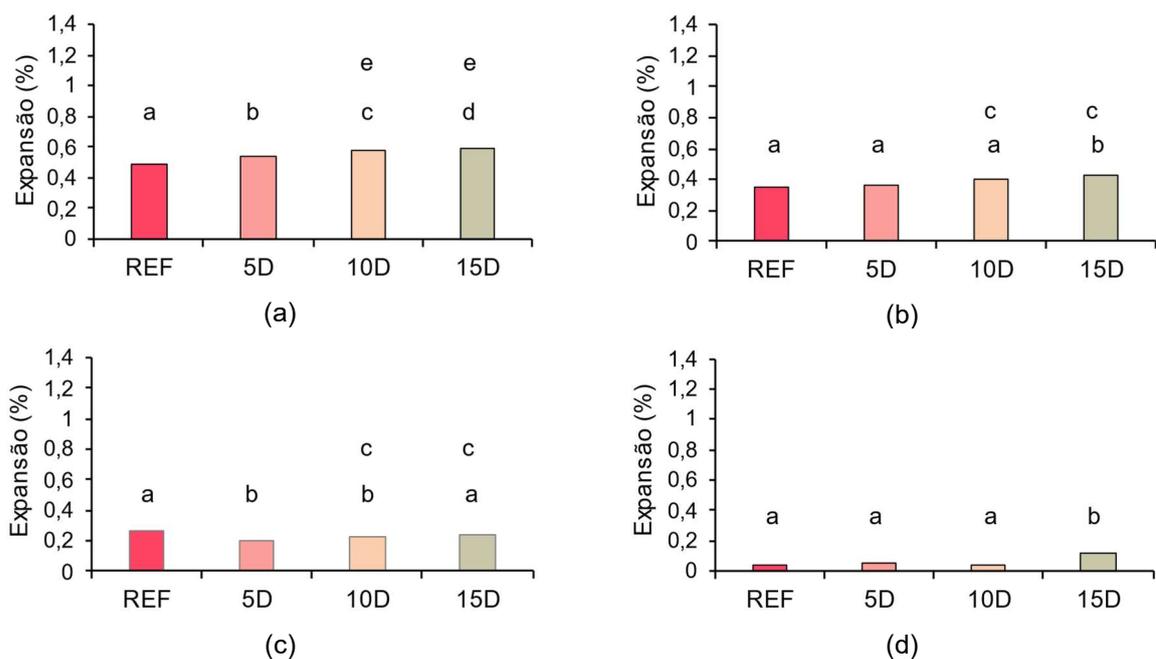
Tabela 18 - *One-way* anova para a reação álcali-agregado

		Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	F	p
CP V-ARI RS	%dregs	0,0238	3	0,007948	3,1602	0,086
	Erro	0,0201	8	0,002515		
CP V-ARI	%dregs	0,0205	3	0,006843	29,84	0,000
	Erro	0,0018	8	0,000229		
CP V+10%SA	%dregs	0,0114	3	0,003809	10,407	0,004
	Erro	0,0029	8	0,000366		
CP II-Z	%dregs	0,0148	3	0,004938	1,996	0,193
	Erro	0,0198	8	0,002473		
CP II-F	%dregs	0,0358	3	0,011942	0,5764	0,647
	Erro	0,0207	8	0,020719		
CP IV	%dregs	0,0063	3	0,002102	17,339	0,001
	Erro	0,001	8	0,000121		
CP III	%dregs	0,005036	3	0,001679	24,6842	0,002
	Erro	0,000340	5	0,000068		

Fonte: elaborado pela autora.

A ANOVA demonstra que há diferença significativa entre as porcentagens de adição para os cimentos CP V-ARI, CP V+10%SA, CP IV e CP III. A comparação múltipla de médias (Figura 40) destaca entre quais teores ocorre a diferença.

Figura 40 - Comparação múltipla de médias: (a) CP V-ARI, (b) CP V+10%SA, (c) CP IV e (d) CP III



Fonte: elaborado pela autora.

A comparação múltipla de médias pelo teste de Tukey demonstra que, para o CP V-ARI, a diferença significativa apenas não está relacionada às porcentagens de 10% e 15%, que se demonstram estatisticamente iguais. Para a composição do CP V-ARI com 10% de sílica ativa a diferença significativa ocorre entre o 15D e os demais teores, ressalta-se que, quando comparados o 10D com o 15D esses são considerados equivalentes.

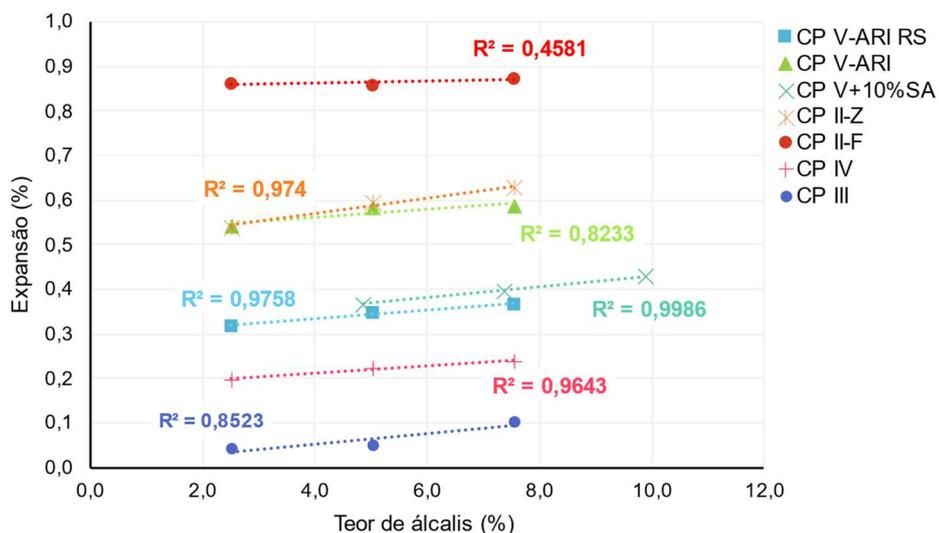
Com o CP IV consta-se que não há diferença significativa entre a REF e 15D, entre 5D e 10D e entre 10D e 15D. No cimento CP III a diferença significativa está ligada ao 15D em relação aos demais teores.

Por meio da Figura 40, verifica-se que, com exceção do CP V-ARI, em todos os cimentos tem-se teores de dregs estatisticamente equivalentes à referência. Isso sugere que o uso de dregs como adição em matrizes cimentícias está condicionado à combinação adequada do teor de resíduo e do tipo de cimento.

4.1.2 Avaliação do efeito do teor de álcalis em relação à expansão

Para cada composição foram somados os equivalentes alcalinos das adições, considerando as porcentagens de incorporação, para a análise do efeito do teor de álcalis nas argamassas em relação à expansão aos 30 dias. A Figura 41 apresenta os resultados de regressão linear para todos os cimentos e adições de dregs.

Figura 41 – Influência do teor de álcalis na expansão por reação álcali-agregado



Fonte: elaborado pela autora.

Grande parte dos cimentos demonstra uma forte regressão linear entre o teor de álcalis e a expansão, embora a força dessa relação varie conforme indicado pelos diferentes valores de R^2 . Composições com os cimentos CP V-ARI RS, CP V-ARI, CP V+10%SA e CP IV parecem ter uma grande relação linear com o teor de álcalis. CP II-F, por outro lado, não mostra praticamente nenhuma correlação linear significativa com o teor de álcalis.

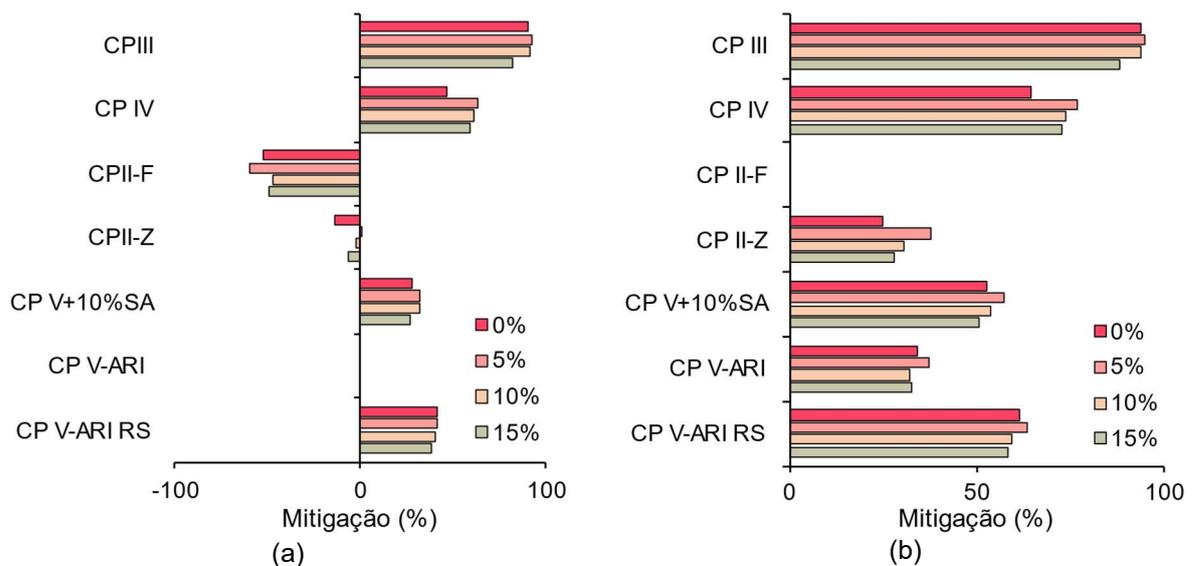
Essa análise indica, conforme já constatado, que o teor de álcalis presentes no resíduo dregs, exerce uma influência representativa nos resultados de expansão.

4.1.3 Influência dos diferentes cimentos utilizados

As porcentagens de mitigação obtidas com a utilização dos diferentes cimentos em relação ao CP V-ARI e CP II-F, calculadas conforme a Equação 2, são apresentadas pela Figura 42. O CP V-ARI e CP II-F foram escolhidos como comparativos pelo fato de possuírem o menor teor de adições quimicamente ativas dentre os cimentos utilizados.

$$\text{Mitigação daa RAA (\%)} = \frac{\text{Expansão da REF} - \text{Expansão da argamassa comparativa}}{\text{Expansão da REF}} \times 100 \quad (2)$$

Figura 42 - Mitigação da reação álcali-agregado em relação (a) CP V-ARI e (b) CP II-F



Fonte: elaborado pela autora.

Fica claro que os cimentos que desempenharam melhor a função de mitigação da reação álcali-agregado são o CP III e CP IV, em ambos os casos, respectivamente.

Comparando o CP III com o CP V-ARI, verifica-se que o CP III atinge altas porcentagens de mitigação, chegando a 92% para a adição de 5% de resíduo. Da mesma forma, a utilização do CP IV em relação ao CP V-ARI apresenta grandes vantagens a partir das elevadas porcentagens de mitigação, sendo, novamente a maior na ordem de 63% para o teor de adição de 5%.

Altas porcentagens de mitigação também são observadas quando comparados os cimentos CP III e CP IV em relação ao CP II-F, que para o 5D atingem 77% e 95%, respectivamente. Essa propriedade está intrinsicamente atrelada a alta porcentagem de adições presentes nos cimentos.

Outros cimentos, como o CP V-ARI RS e CP V+10%SA, que possuem porcentagens menores de adição demonstram-se incapazes de mitigar totalmente a RAA, apesar de apresentarem notáveis reduções em relação ao CP V-ARI e CP II-F.

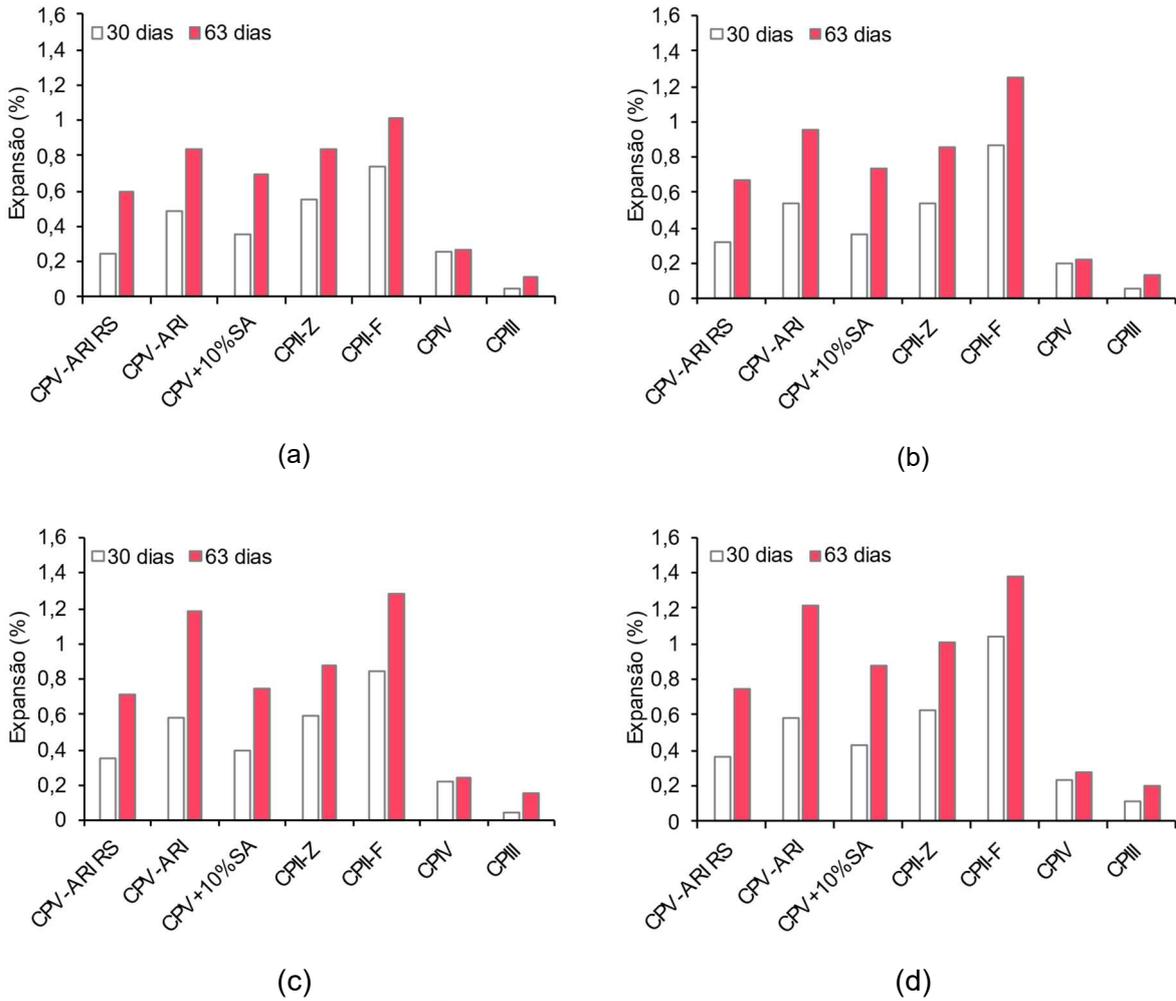
4.1.3.1 Comparação entre as idades de 30 e 63 dias

A NBR 15577-4 (ABNT, 2018) sugere que o ensaio de reação álcali-agregado de barras de argamassa pelo método acelerado seja finalizado aos 30 dias. Nessa idade, o compósito cimentício pode ser classificado como potencialmente inócuo ou potencialmente reativo. Contudo, visando uma análise mais abrangente das expansões após o período inicial de 30 dias neste estudo, o ensaio foi estendido até os 63 dias. Essa prorrogação permite uma avaliação mais completa do comportamento das expansões, considerando possíveis variações além do prazo padrão estabelecido pela norma.

A Figura 43 apresenta uma comparação da expansão entre as idades de 30 e 63 dias para cada cimento e teor de adição.

Na maior parte dos casos, nota-se um considerável aumento na expansão entre as duas idades, isso ocorre devido à continuidade da reação álcali-agregado. Hasparyk (2022) esclarece que a reação álcali-agregado irá ocorrer até que se esgote um dos agentes condicionantes (fases mineralógicas dos agregados considerados reativos, hidróxidos alcalinos e/ou umidade), ainda, quanto mais o material estiver exposto a determinadas condições, mais significativas serão as expansões.

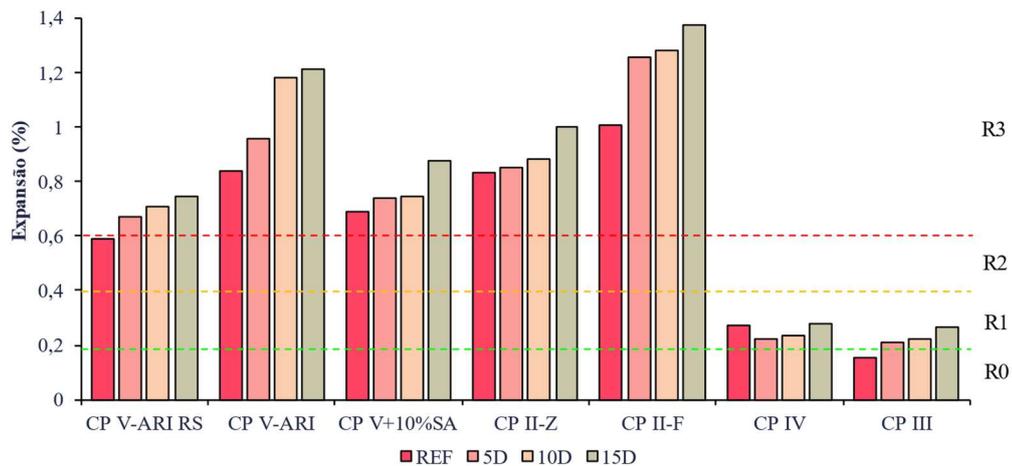
Figura 43 - Expansão aos 30 e 63 dias para todos os cimentos: (a) REF, (b) 5D, (c) 10D e (d) 15D



Fonte: elaborado pela autora.

Ao analisar os resultados obtidos aos 63 dias (Figura 44) quanto ao grau de reatividade, quase todas as amostras são classificadas como grau R3. Uma exceção é a amostra com 0% de adição com CP V-ARI RS (R2), com CP IV (R1) e as amostras com CP III sem adição (R0) e com adição (R1). É importante ressaltar que nesse caso as classificações são adotadas apenas para promover um padrão comparativo com as amostras aos 30 dias, assim, as classificações não são alteradas com a idade.

Figura 44 - Grau de reatividade das amostras aos 63 dias



Fonte: elaborado pela autora.

Contrário ao obtido aos 30 dias, o CP II-Z apresenta taxas de expansão inferiores ao CP V-ARI. A presença de pozolana no CP II-Z (6%-14%) pode influenciar na diminuição da expansão, já que mesmo em quantidades modestas, pode continuar a reagir com os constituintes do cimento ao longo do tempo, contribuindo para a estabilidade dimensional. O mesmo não ocorre para o CP V-ARI que não possui adições pozolânicas.

4.1.4 Areia britada potencialmente inócua

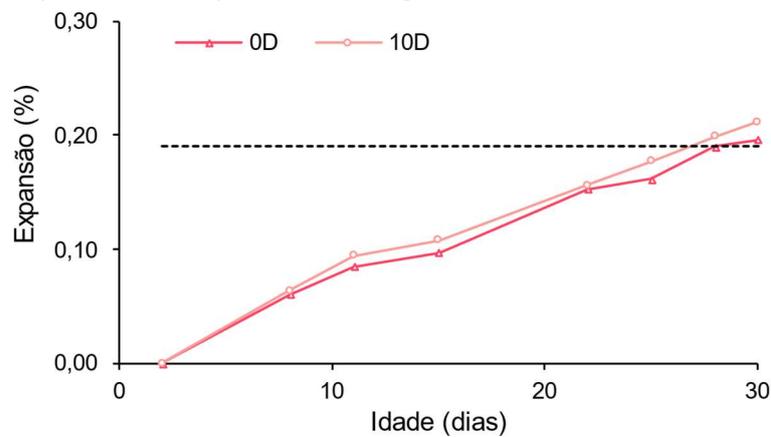
Como anteriormente já destacado, diversos fatores podem influenciar a reação álcali-agregado. Nesse trabalho, o principal objetivo foi analisar a influência dos álcalis presentes no dregs em relação à RAA. Nesse sentido, complementarmente, foi adotado uma areia britada, caracterizada como potencialmente inócua em trabalho anterior (MELO; HASPARYK; TIECHER, 2023). Foram escolhidos os cimentos CP II-F, por apresentar as maiores expansões com a utilização de agregado natural, e o CP IV, devido a sua capacidade mitigadora e por apresentar expansões levemente acima dos limites normalizados aos 30 dias. Com isso, foram adotadas as porcentagens de adição de 0% (referência) e 10% de resíduo dregs (porcentagem potencial para futura adoção em concretos).

Conforme apresentado pela Figura 45, para o CP II-F, aos 30 dias, ambas as porcentagens de adição ultrapassam o limite estabelecido por norma (0,19%). Nota-se que o 10D tem uma expansão superior ao 0D, nesse caso, a ANOVA (Tabela 19) demonstra que essa diferença é estatisticamente significativa. Portanto, já que esse

cimento não possui nenhuma adição quimicamente ativa, ele não é capaz de inibir possíveis reações proporcionadas a partir dos álcalis presentes no resíduo e no cimento.

Conforme também observado por Wang *et al.* (2023), a ocorrência de RAA, mesmo com agregados não reativos, pode estar relacionada a reação entre os próprios álcalis e SiO_2 presentes no cimento e adição, sendo esses intensificados pela solução alcalina externa oferecida pelo ensaio de método acelerado.

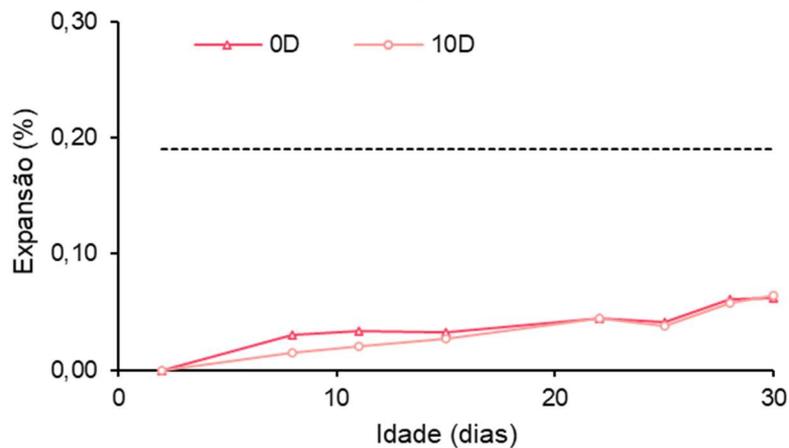
Figura 45 - Expansão obtida para a combinação de areia britada, cimento CP II-F e dregs



Fonte: elaborado pela autora.

Para o cimento CP IV, percebe-se que as expansões são inferiores ao limite (Figura 46). Além disso, as porcentagens obtidas para as adições de 0% e 10% não possuem diferença estatisticamente significativa (Tabela 19), o que sugere que a adição pozolânica presente no CP IV foi totalmente capaz de inibir possíveis efeitos negativos causados pelos álcalis presentes no resíduo.

Figura 46 - Expansão obtida para a combinação de areia britada, cimento CP IV e dregs



Fonte: elaborado pela autora.

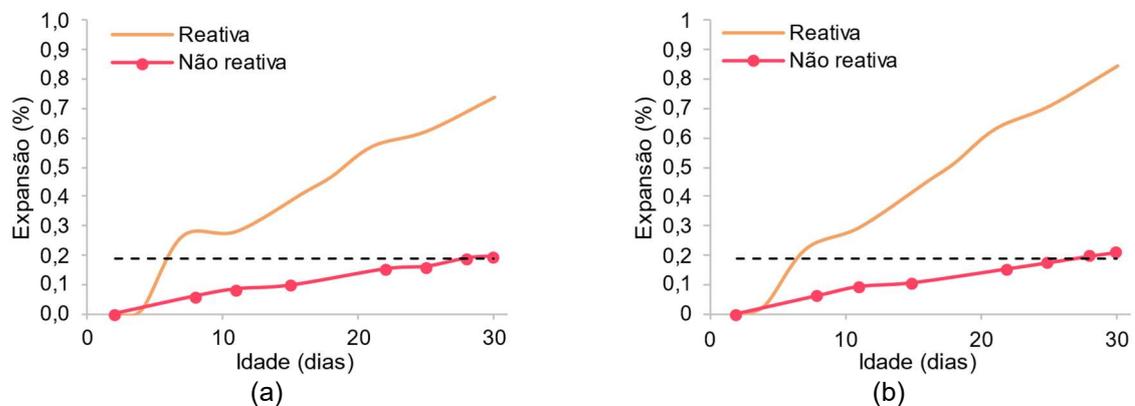
Tabela 19 - ANOVA da RAA com agregado britado

		Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	F	p
CP II-F	%dregs	0,001210	1	0,001210	27,563	0,006297
	Erro	0,000176	4	0,000044		
CP IV	%dregs	0,000017	1	0,000017	0,6607	0,461929
	Erro	0,000101	4	0,000025		

Fonte: elaborado pela autora.

A Figura 47 apresenta um comparativo entre o agregado reativo e não reativo para as adições de 0% e 10% e CP II-F.

Figura 47 - Comparativo entre areia reativa e não reativa com cimento CP II-F: (a) 0% de adição e (b) 10% de adição.

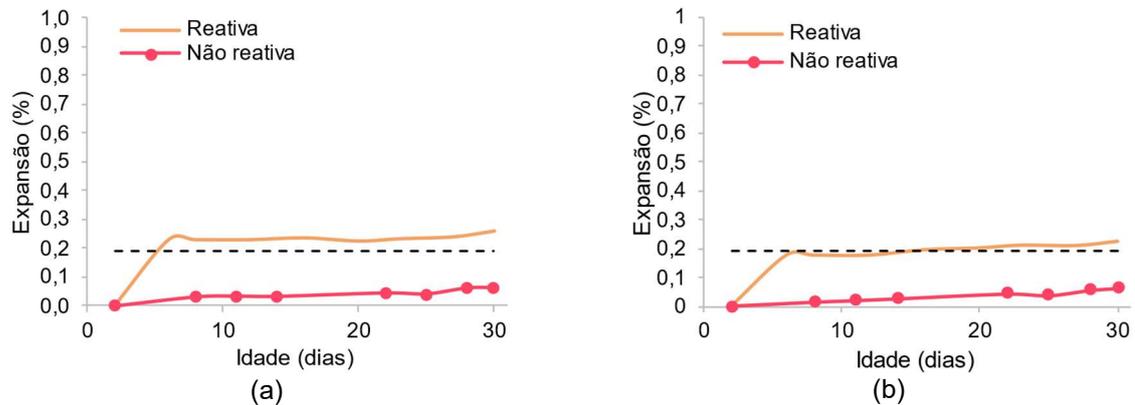


Fonte: elaborado pela autora.

Para ambas as porcentagens de adição é evidente que as maiores expansões estão associadas ao agregado. Observa-se que o teor de álcalis presente no resíduo exerce pouca interferência nos resultados obtidos. Entre a areia reativa e não reativa tem-se porcentagens de mitigação de 73,4% e 75,0% para as adições de 0% e 10%, respectivamente.

Para o cimento CP IV (Figura 48), conclui-se que as adições pozolânicas presentes no cimento são plenamente capazes de inibir possíveis efeitos negativos gerados pelos álcalis no resíduo e/ou cimento, uma vez que as expansões observadas são inferiores às estipuladas pela norma quando utilizado o agregado considerado potencialmente inócuo. As porcentagens de mitigação, entre o agregado reativo e não reativo para as adições de 0% e 10%, representam 76,1% e 71,4%, respectivamente.

Figura 48 - Comparativo entre areia reativa e não reativa com cimento CP IV: (a) 0% de adição e (b) 10% de adição.

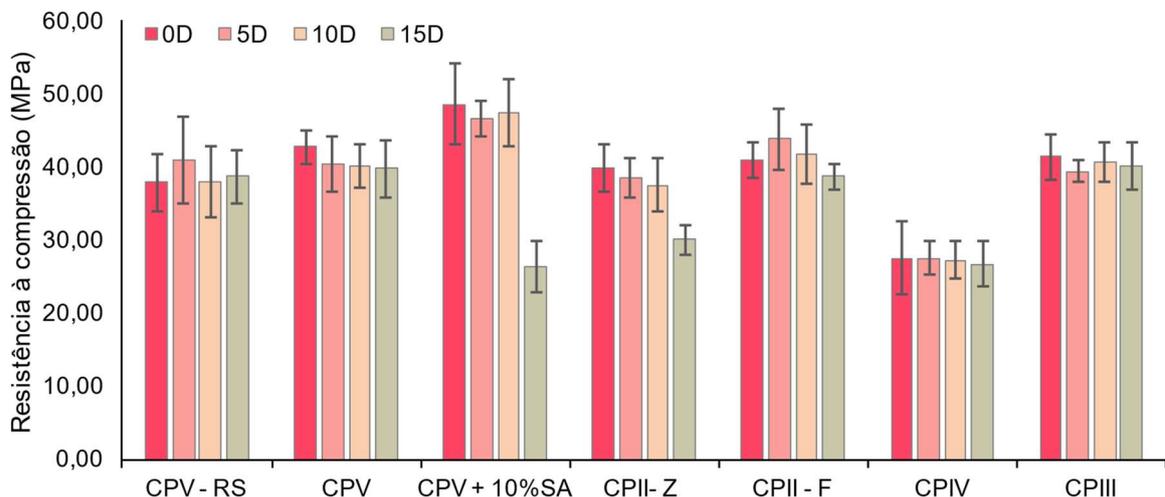


Fonte: elaborado pela autora.

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Figura 49 apresenta os valores médios e os respectivos desvios padrões para as amostras analisadas, de acordo com os critérios estabelecidos pela NBR 7215 (ABNT, 2019).

Figura 49 - Resistência à compressão das argamassas com diferentes cimentos, aos 28 dias



Fonte: elabora pela autora.

Analisando a Figura 49 observa-se que, com a adição de 5% de dregs, algumas argamassas tiveram sua propriedade mecânica melhorada, é o caso dos cimentos: CP V-ARI RS, CP II-F e CP IV. A adição de 15%, principalmente atrelada ao cimento CP II-Z e à composição do CP V+10%SA, demonstra representativa perda de desempenho, indicando que o teor de adição está acima do limite viável. Em geral, tem-se uma perda na resistência à compressão conforme o aumento no teor de adição.

Oliveira (2022), utilizando teores de até 30% de dregs como substituição ao cimento em argamassas, observa que há uma redução da resistência à compressão. Para a autora, o ocorrido está relacionado ao efeito da diluição, já que apesar da relação água/finos ser mantida fixa, ocorre uma redução da relação água/cimento conforme o aumento do teor de resíduo. Ainda, há um aumento de resistência para o teor de 5%, como também observado em alguns casos nesse trabalho.

Martínez-Lage *et al.* (2016) promoveram a substituição do cimento por dregs em argamassas nas porcentagens de 10, 20 e 30%. Os autores observam que para a resistência à compressão, o teor de 10% demonstrou resultados superiores a referência.

Pesquisas já realizadas constataam que teores elevados de substituição do cimento pelo resíduo provocam uma atenuação considerável na resistência à compressão, entretanto, quando utilizado em pequenas quantidades pode tornar-se uma alternativa viável (Martínez-Lage *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2017, 2018).

4.2.1 Análise de variância

A ANOVA (Tabela 20) demonstra que, entre os fatores analisados, há diferença significativa entre os tipos de cimento, teores de adição e a combinação entre o tipo de cimento e a adição.

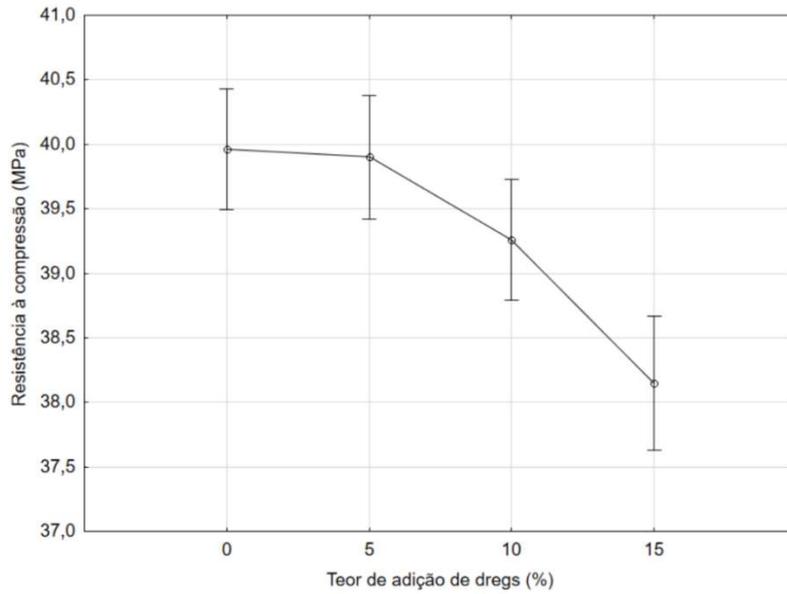
Tabela 20 - Análise de variância dos fatores combinados para a resistência à compressão

	Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	F	p
Tipo de cimento	4641.4	6	773.6	368.2	0.000000
Adição	69.7	3	23.2	11.1	0.000002
Tipo de cimento * adição	123.1	18	6.8	3.3	0.000060
Erro	247.9	118	2.1		

Fonte: elaborado pela autora.

Conforme apresentado na Figura 50, à medida que a porcentagem de dregs aumenta, ocorre uma redução na resistência à compressão, sendo essa mais representativa com 15% de adição.

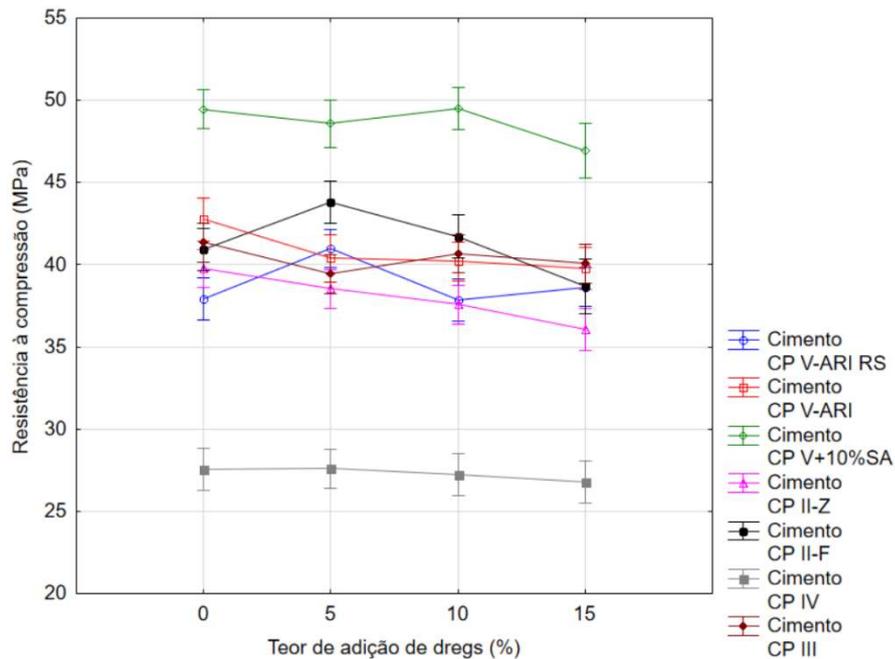
Figura 50 - Efeito isolado do teor de adição de dregs na resistência à compressão



Fonte: elaborado pela autora.

A partir da Figura 51 nota-se que o cimento que atinge maior resistência é a composição do CP V-ARI com 10% de sílica ativa, já o CP IV demonstra menor resistência para todos os teores de adição em relação aos demais.

Figura 51 - Efeito da interação entre o tipo de cimento e do teor de adições na expansão



Fonte: elaborado pela autora.

Nesse contexto, é importante destacar que os cimentos possuem diferentes classes de resistência. Portanto, os resultados podem ser comparados de maneira

representativa apenas dentro do mesmo grupo de cimento, considerando os diferentes teores de adição.

Os resultados da análise de variância, considerando apenas os teores de adição para cada cimento, são apresentados pela Tabela 21.

Tabela 21 - One-way ANOVA da resistência à compressão

		Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	F	p
CP V-ARI RS	% dregs	36,66	3	12,22	7,81	0,001516
	Erro	28,16	20	1,56		
CP V-ARI	% dregs	27,09	3	9,03	11,11	0,000345
	Erro	13	20	0,81		
CP V+10%SA	% dregs	62,73	3	20,91	7,17	0,002889
	Erro	46,69	20	2,92		
CP II-Z	% dregs	32,46	3	10,82	10,19	0,000277
	Erro	21,24	20	1,06		
CP II-F	% dregs	51,6	3	17,2	13,78	0,000184
	Erro	17,47	20	1,25		
CP IV	% dregs	2,13	3	0,71	1,62	0,222144
	Erro	7,49	20	0,44		
CP III	% dregs	12,18	3	4,06	0,552	0,65282
	Erro	147,17	20	7,36		

Fonte: elaborado pela autora.

Para todos os cimentos, a ANOVA constata diferença significativa entre os teores de adição de dregs, a exceção do CP IV e CP III que, conforme visto na Figura 49, possuem valores próximos independente do teor de adição. A partir da comparação múltipla de médias é possível analisar entre quais as amostras estão as diferenças (Tabela 22).

Tabela 22 – Comparação múltipla de médias para a resistência à compressão: (a) CP V-ARI RS, (b) CP V+10%SA, (c) CP V-ARI, (d) CP II-Z, (e) CP II-F

CP V-ARI RS					CP V+10%SA				
Dregs (%)	0	5	10	15	Dregs (%)	0	5	10	15
0		S	NS	NS	0		NS	NS	S
5	S		S	S	5	NS		NS	S
10	NS	S		S	10	NS	NS		S
15	NS	S	NS		15	S	S	S	
(a)					(b)				
zCP V-ARI					CP II-Z				
Dregs (%)	0	5	10	15	Dregs (%)	0	5	10	15
0		S	S	S	0		NS	S	S
5	S		NS	NS	5	NS		NS	S
10	S	NS		NS	10	S	NS		NS
15	S	NS	NS		15	S	S	NS	
(c)					(d)				

CP II-F				
Dregs (%)	0	5	10	15
0		S	NS	NS
5	S		NS	S
10	NS	NS		S
15	NS	S	S	

(e)

Fonte: elaborado pela autora.

Para o CP V–ARI RS, há diferença significativa entre a REF e a adição de 5% de resíduo, entretanto, o resultado da referência é estatisticamente igual aos das adições de 10% e 15%. Ainda, o teor de adição de 5% demonstra diferença significativa de todos os demais, enquanto os valores dos teores de 10% e 15% são estatisticamente equivalentes.

No contexto do CP V-ARI, observa-se que a diferença significativa está apenas relacionada a REF em relação aos demais teores. Quando analisados separadamente, os teores de 5, 10 e 15% são estatisticamente iguais. Com a composição CP V+10%SA, a diferença significativa acontece entre a adição de 15% de resíduo em relação aos demais, que são consideradas equivalentes.

O CP II–Z demonstra uma diminuição das resistências conforme o aumento no teor de adição, contudo, quando comparada a REF com os demais, nota-se que há diferença significativa apenas com as amostras 10D e 15D. Já a 5D apresenta diferença apenas em relação ao 15D. O mesmo acontece com o 10D que é apenas estatisticamente diferente do 15D. Quando analisados os resultados do teor de adição de 15% em relação aos demais, consta-se que é equivalente ao 10D e difere da REF e 5D.

Para o CP II–F a diferença significativa está relacionada à referência com o teor de 5%, ao 5D em relação ao 15D, ao 10D em relação ao 15D e ao 15D em relação ao 5D e 10D. Para o CP IV e CP III não há diferença significativa entre os diferentes teores utilizados.

4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E

ESPECTROMETRIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X (EDS)

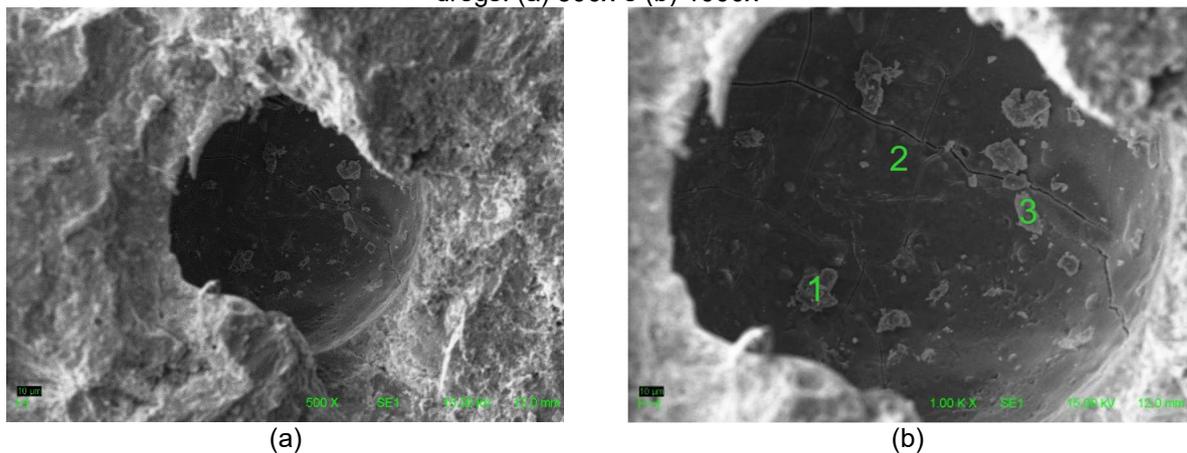
As análises por microscopia eletrônica de varredura foram realizadas por meio de amostras fraturadas submetidas ao ensaio de reação álcali-agregado durante 63

dias. Dentre todas as composições, foram selecionadas as amostras com 0% e 10% de adição de dregs para todos os cimentos utilizados que apresentaram expansão superior ao limite da norma.

Não foram definidas magnificações fixas para obtenção das imagens, isso porque em alguns casos, principalmente nas argamassas onde as expansões foram maiores, o gel demonstrou-se facilmente encontrável, enquanto em outros houve uma maior dificuldade, o que muitas vezes exigiu um maior aumento.

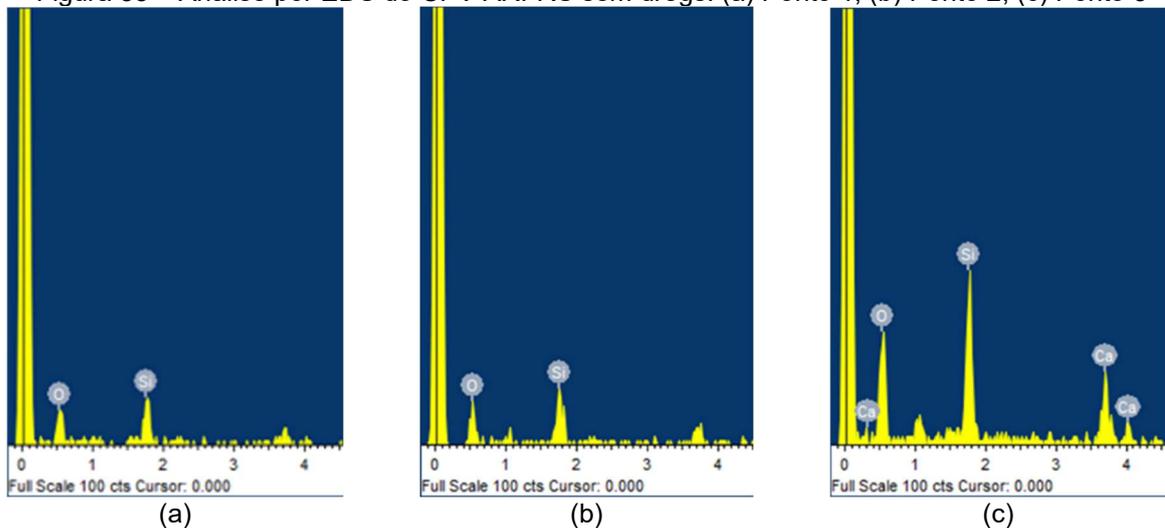
A Figura 52 apresenta as micrografias obtidas para a amostra composta por CP V-ARI RS sem a adição do resíduo dregs. A partir das imagens é possível verificar a presença do gel álcali-agregado de caráter maciço gretado. A análise por EDS (Figura 53) dessa amostra evidenciou a presença representativa de silício em todos os pontos de análise e de cálcio no Ponto 3.

Figura 52 – Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP V-ARI RS sem dregs: (a) 500x e (b) 1000x



Fonte: a autora.

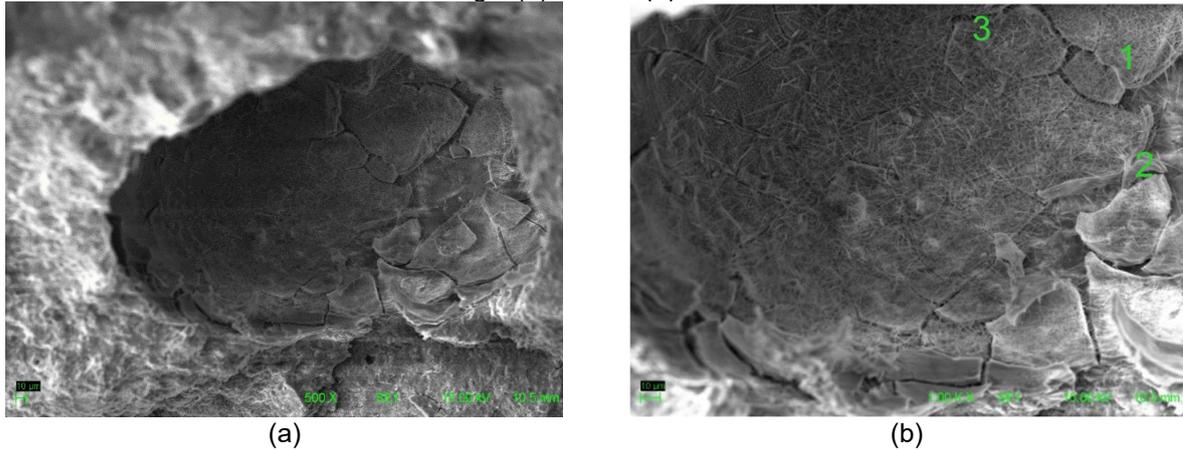
Figura 53 – Análise por EDS do CPV ARI-RS sem dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3



Fonte: a autora.

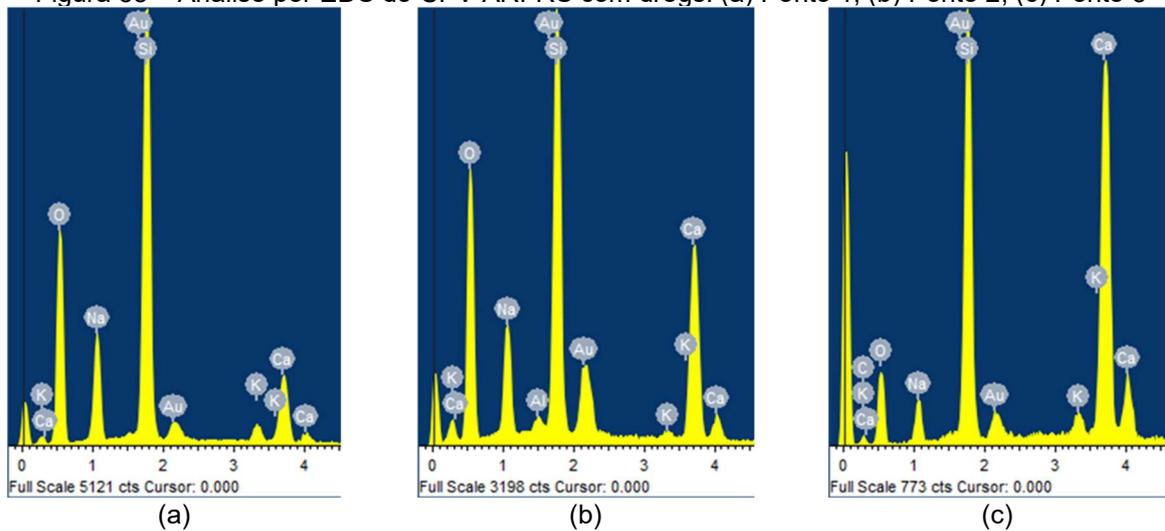
De forma semelhante, observa-se na amostra de CP V-ARI RS, com a adição de dregs (Figura 54), a presença do gel gretado em um poro coberto por produtos sugestivos de etringita, conforme apresentado de forma amplificada pela Figura 56. A análise por EDS (Figura 55) destaca a presença de produtos típicos do gel álcali-agregado: sódio, silício, potássio e cálcio.

Figura 54 - Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP V-ARI RS com dregs: (a) 500x e (b) 1000x



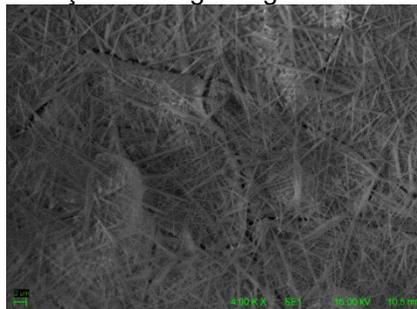
Fonte: a autora.

Figura 55 – Análise por EDS do CPV ARI-RS com dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3



Fonte: a autora.

Figura 56 - Presença de etringita e gel álcali-silica em um poro

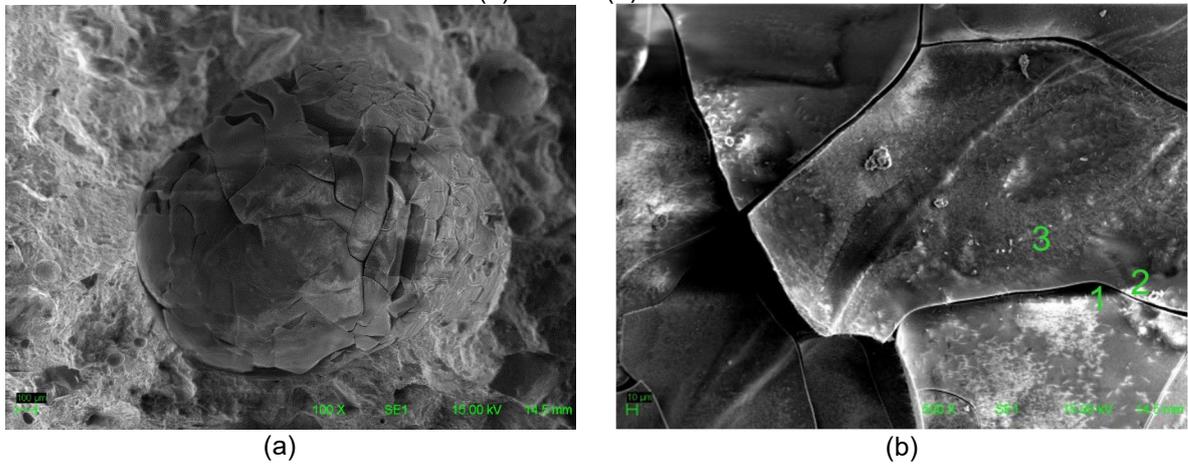


Fonte: a autora.

As características observadas na amostra com CP V-ARI sem dregs (Figura 57) são da formação do gel gretado no poro da pasta. A análise EDS (Figura 58) corrobora com a análise visual, demonstrando, a partir dos pontos selecionados, a presença majoritária de sódio, silício e cálcio.

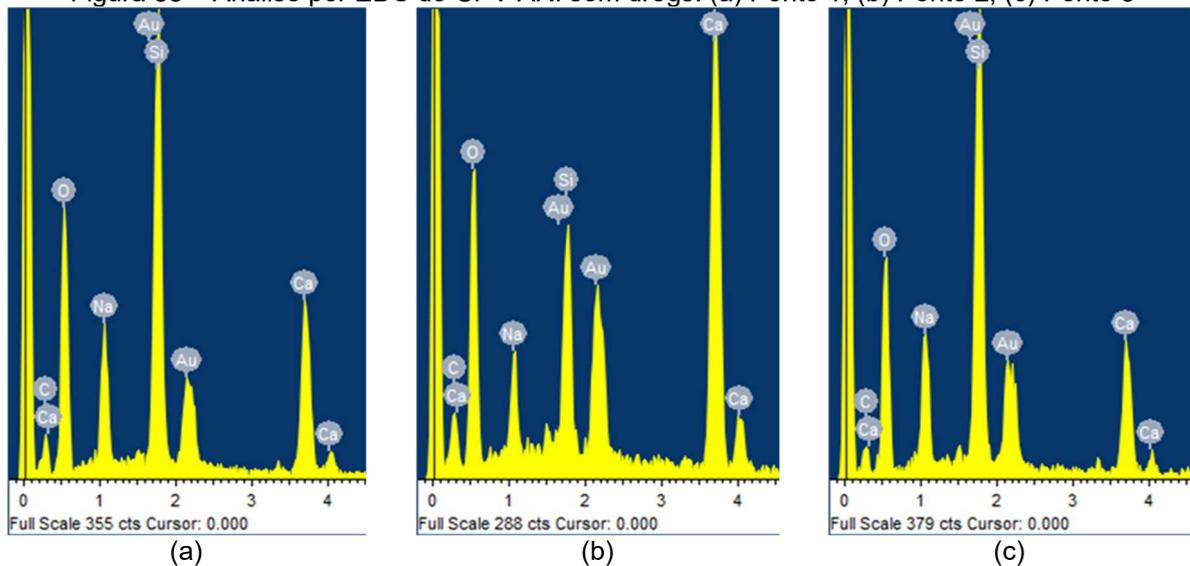
Já para a amostra com o mesmo cimento, mas com a adição de dregs (Figura 59), destaca-se a dificuldade para a análise devido à presença pequena de poros na amostra selecionada. Dessa forma, a partir do EDS (Figura 60) são observados diferentes compostos formados por cálcio com a presença pequena de silício.

Figura 57 - Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP V-ARI sem dregs: (a) 100x e (b) 500x



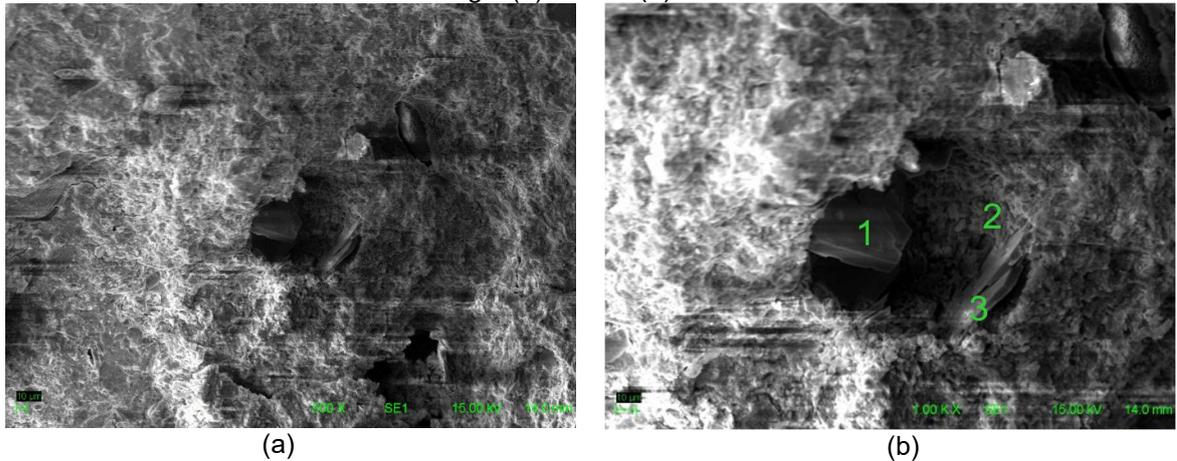
Fonte: a autora.

Figura 58 – Análise por EDS do CPV ARI sem dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3



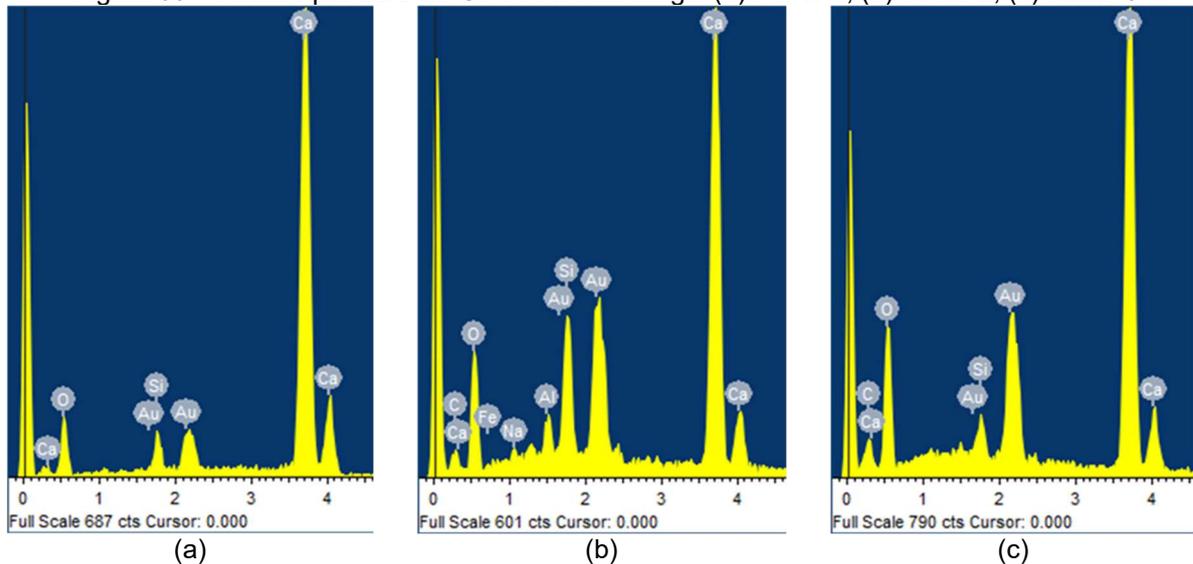
Fonte: a autora.

Figura 59 – Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP V-ARI com dregs: (a) 500x e (b) 1000x



Fonte: a autora.

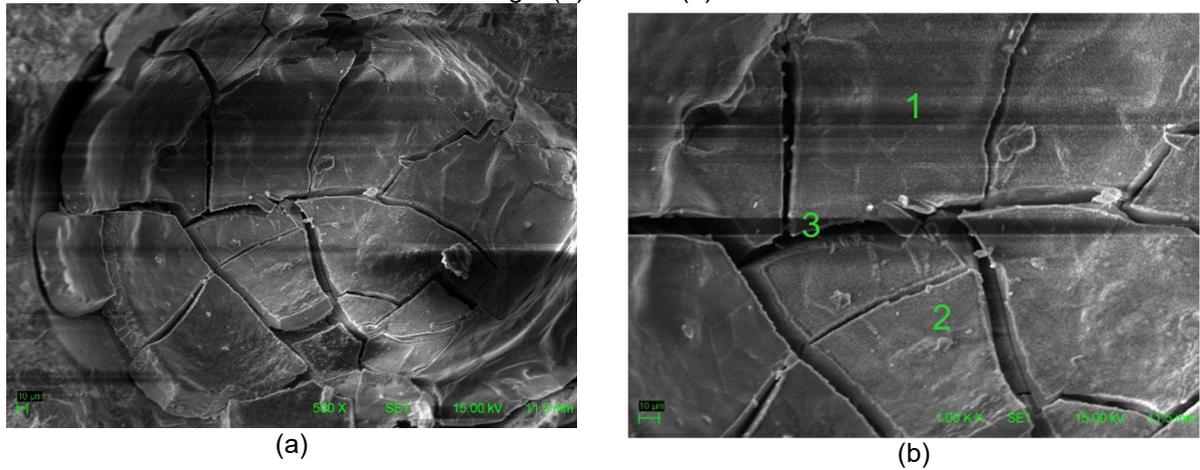
Figura 60 – Análise por EDS do CPV ARI com dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3



Fonte: a autora.

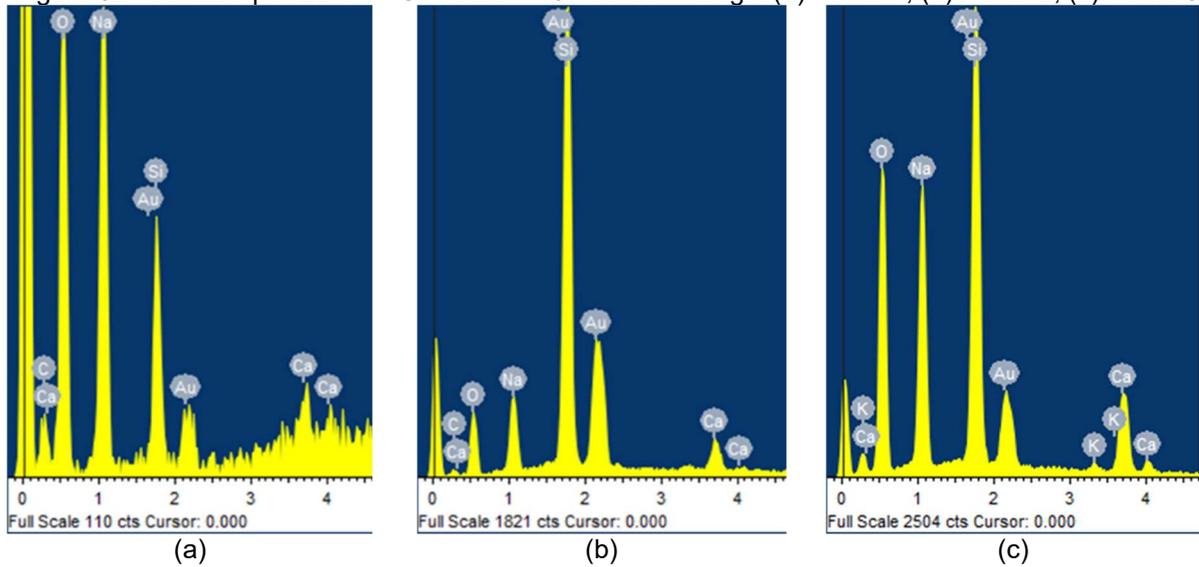
Nas amostras compostas pela combinação de CP V-ARI e sílica ativa (Figura 61) tem-se a presença de gel maciço gretado principalmente evidenciado na amostra sem a adição de resíduo. A presença de potássio é verificada pelo Ponto 3, além da presença representativa de sódio e silício (Figura 62). Já na amostra com a adição de resíduo, observa-se em menor intensidade a presença de gel, portanto, na Figura 63, é observado um poro com a possível presença de gel, além de outros compostos. A análise por EDS (Figura 64) evidencia a presença predominante de oxigênio com a presença dos compostos sódio, silício e cálcio.

Figura 61 – Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP V-ARI +10%SA sem dregs: (a) 500x e (b) 1000x



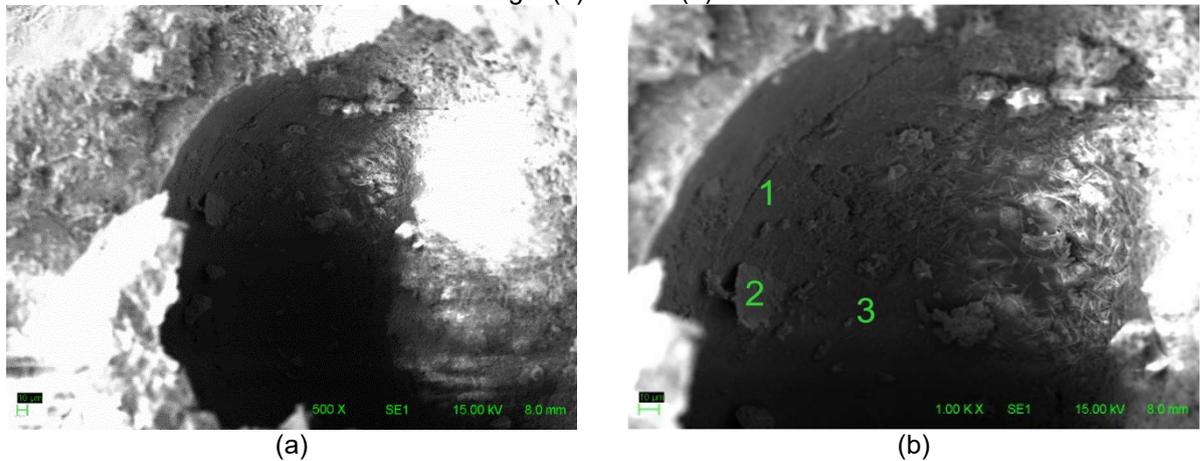
Fonte: a autora.

Figura 62 – Análise por EDS do CPV ARI + 10%SA sem dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3



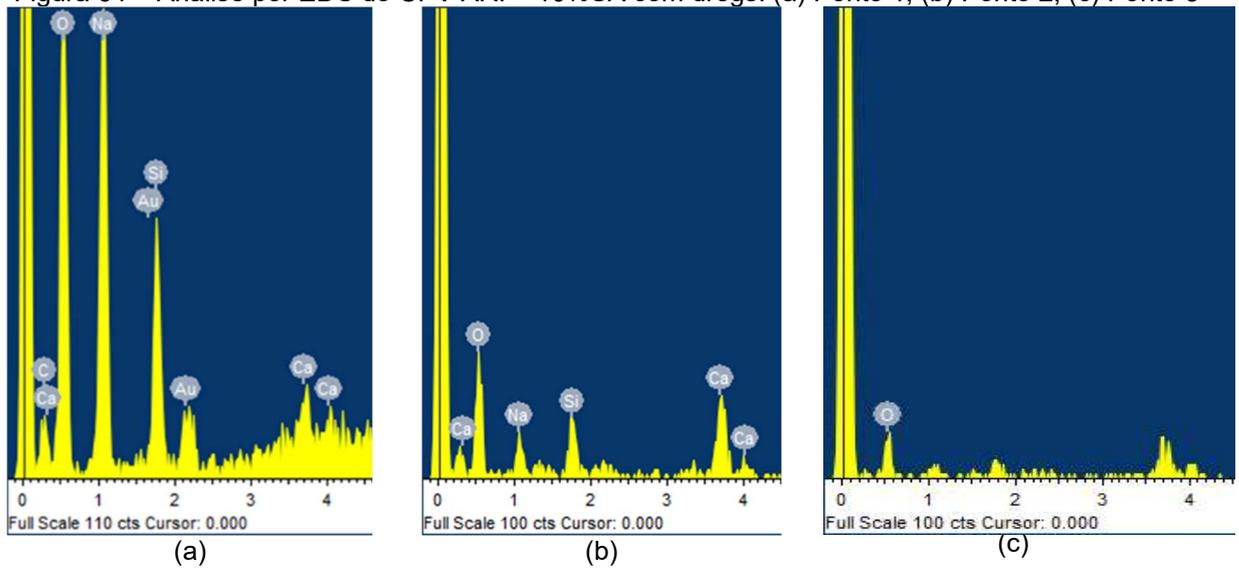
Fonte: a autora.

Figura 63 – Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP V-ARI+10%SA com dregs: (a) 500x e (b) 1000x



Fonte: a autora.

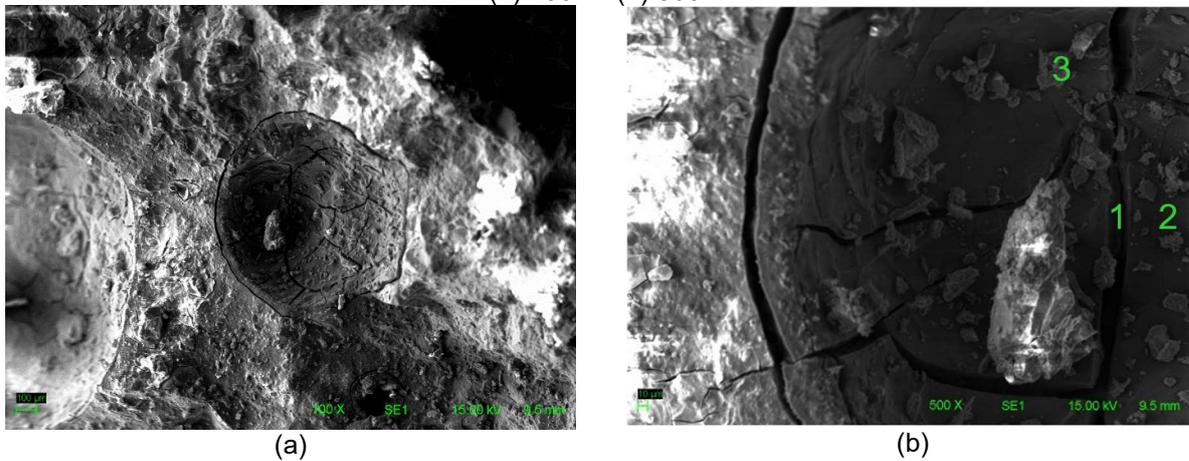
Figura 64 – Análise por EDS do CPV ARI + 10%SA com dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3



Fonte: a autora.

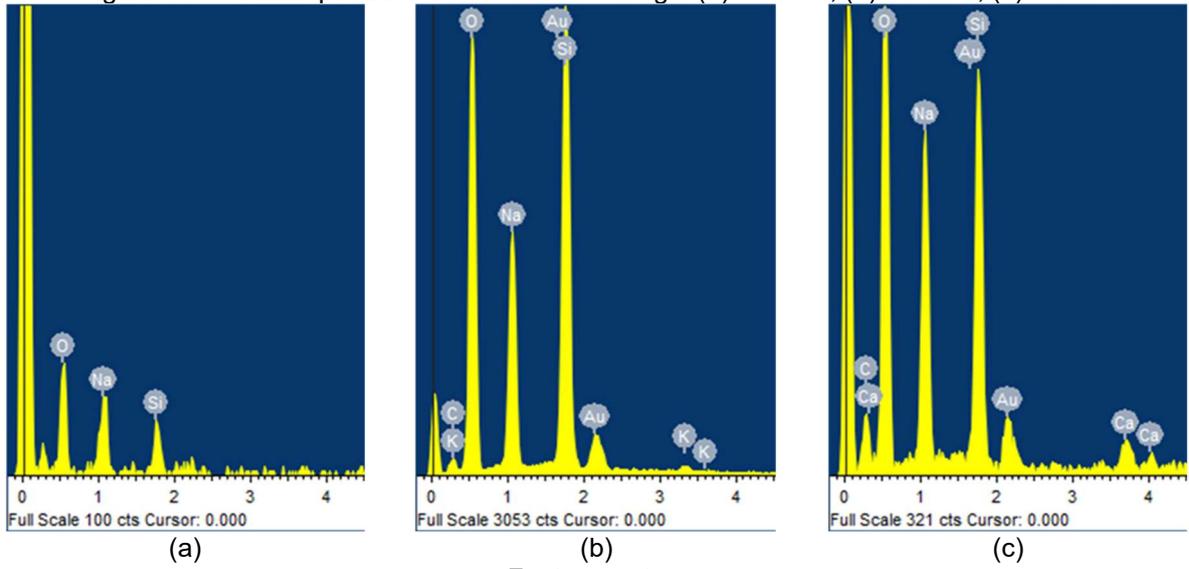
Novamente, verifica-se a presença expressiva de gel, por análise visual, na amostra composta por CP II-Z sem a adição de dregs (Figura 65). Já na amostra com a adição de resíduo, é encontrado em menor intensidade (Figura 67).

Figura 65 – Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP II-Z sem dregs: (a) 100x e (b) 500x



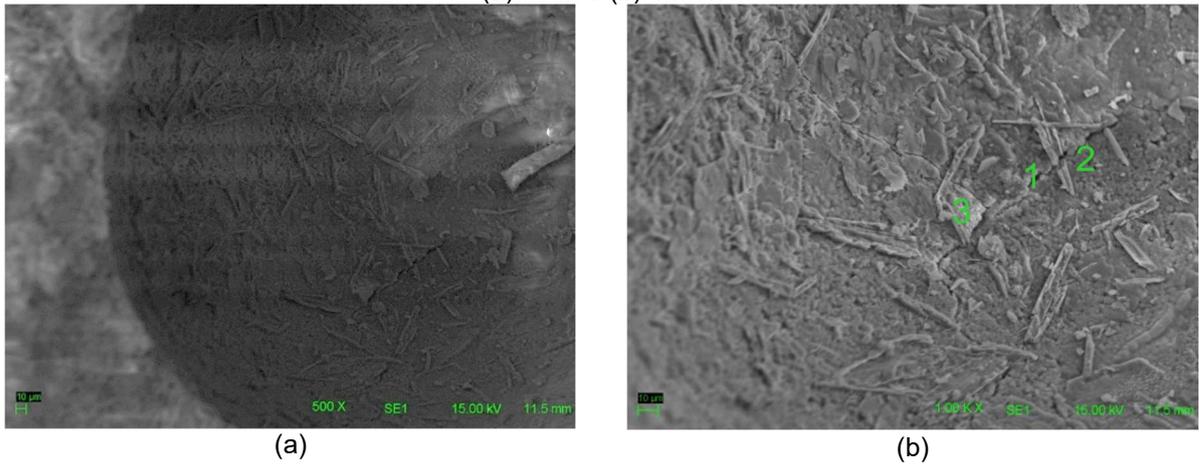
Fonte: a autora.

Figura 66 – Análise por EDS do CP II-F sem dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3



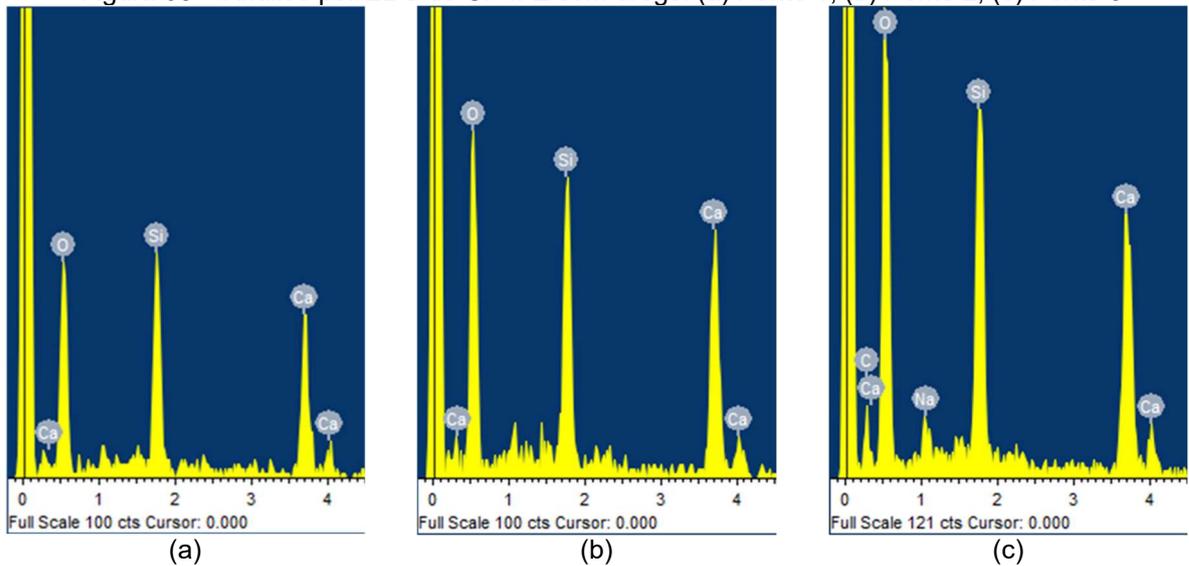
Fonte: a autora.

Figura 67 – Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP II-Z com dregs: (a) 500x e (b) 1000x



Fonte: a autora.

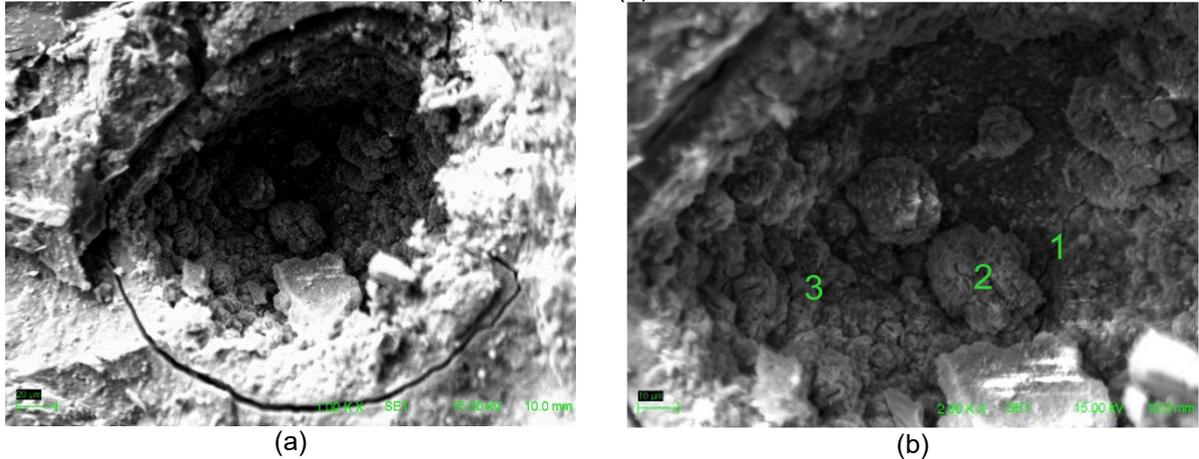
Figura 68 – Análise por EDS do CP II-Z com dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3



Fonte: a autora.

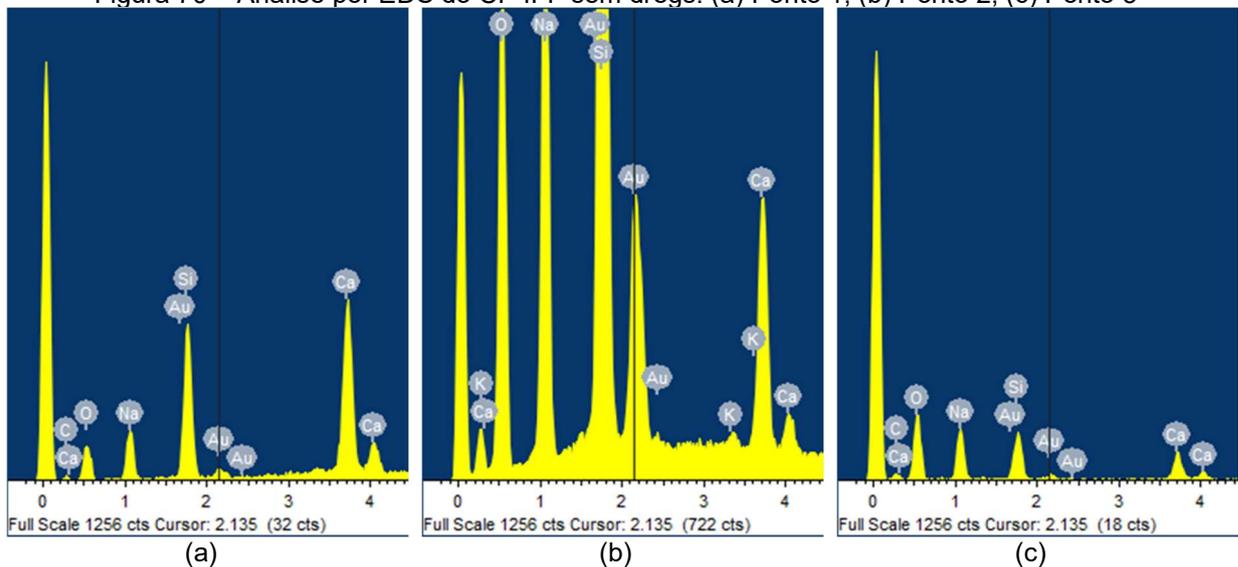
A Figura 69 apresenta as micrografias para a amostra com CP II-F sem adição de dregs, na qual podem ser visualizados compostos com aparência de rosetas. Vale ressaltar, que com esse cimento foram obtidas as maiores expansões no ensaio de reação álcali-agregado. Análise por EDS (Figura 70) evidencia a presença predominante de oxigênio, silício, cálcio e sódio.

Figura 69 – Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP II-F sem dregs: (a) 1000x e (b) 2000x



Fonte: a autora.

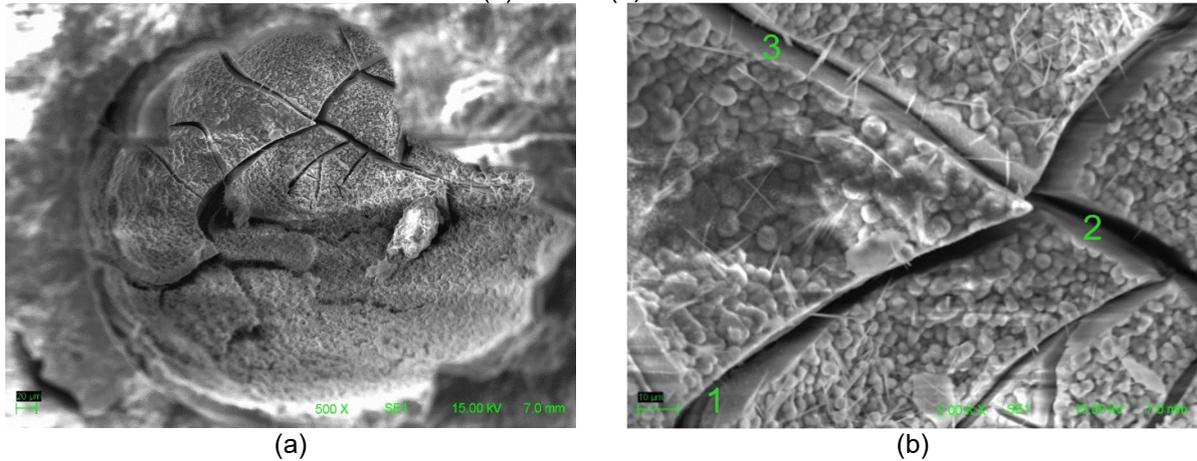
Figura 70 – Análise por EDS do CP II-F sem dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3



Fonte: a autora.

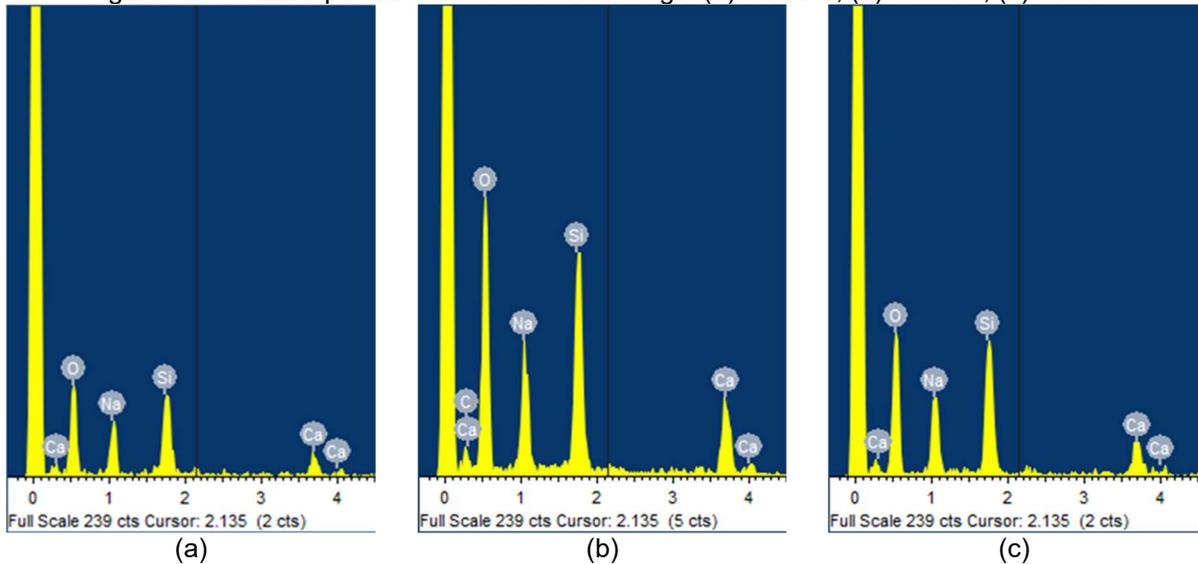
A Figura 71 demonstra a presença do gel maciço gretado na amostra com adição de dregs e cimento CP II-F. No poro ainda são verificados compostos sugestivos de etringita. A análise por EDS (Figura 72) apresenta que os principais minerais encontrados são o oxigênio, silício, sódio e o cálcio.

Figura 71 – Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP II-F com dregs: (a) 500x e (b) 2000x



Fonte: a autora.

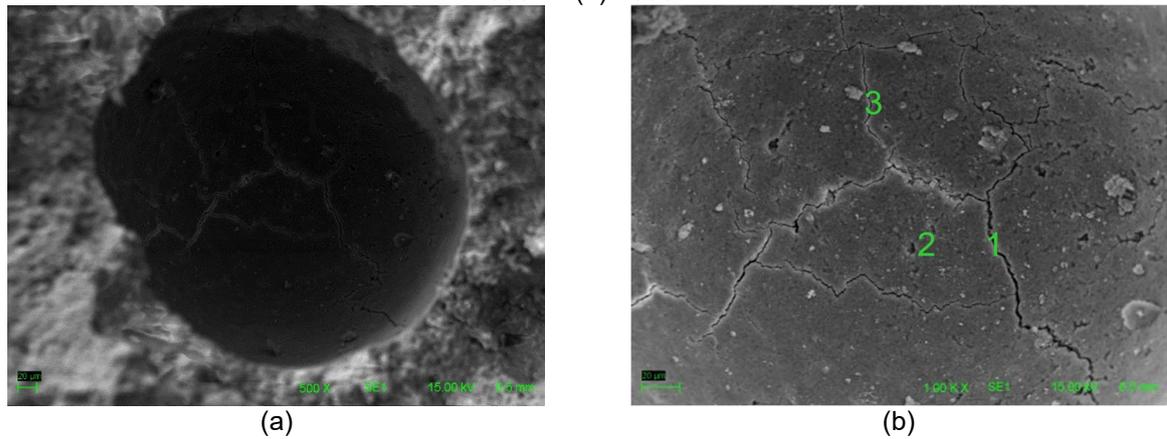
Figura 72 – Análise por EDS do CP II-F com dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3



Fonte: a autora.

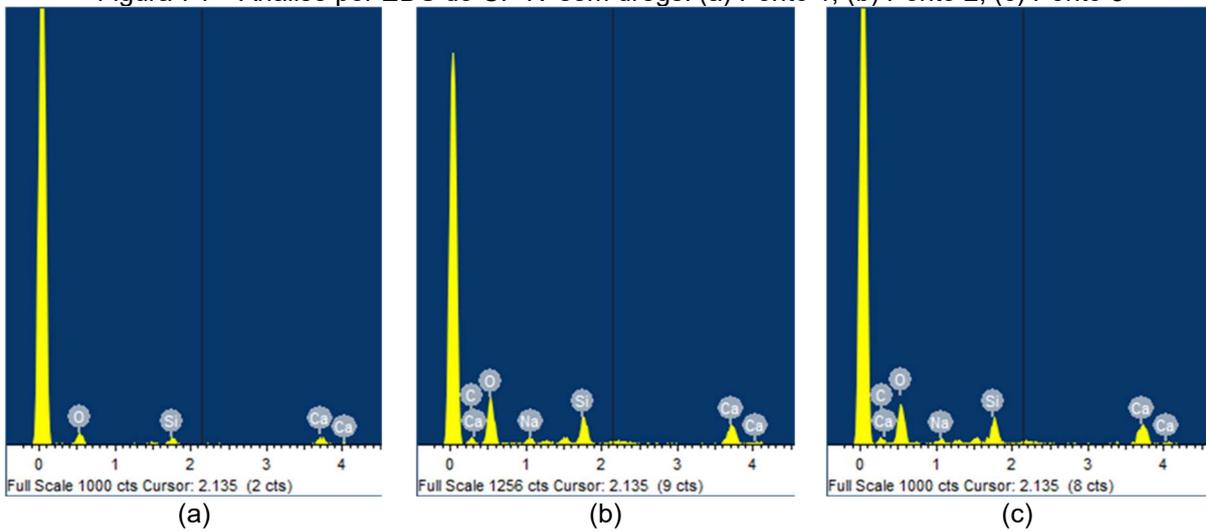
A partir da Figura 73, referente à amostra com CP IV sem a adição de dregs, é possível visualizar um poro da pasta com a presença de pequenas fissuras. Os corpos de prova produzidos com esse cimento tiverem expansões levemente superiores ao limite estabelecido por norma. Os compostos indicados pelo EDS (Figura 74), sódio, carbono, oxigênio, silício e cálcio, podem ser sugestivos da formação do gel álcali-silica.

Figura 73 - Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP IV sem dregs: (a) 500x e (b) 1000x



Fonte: a autora.

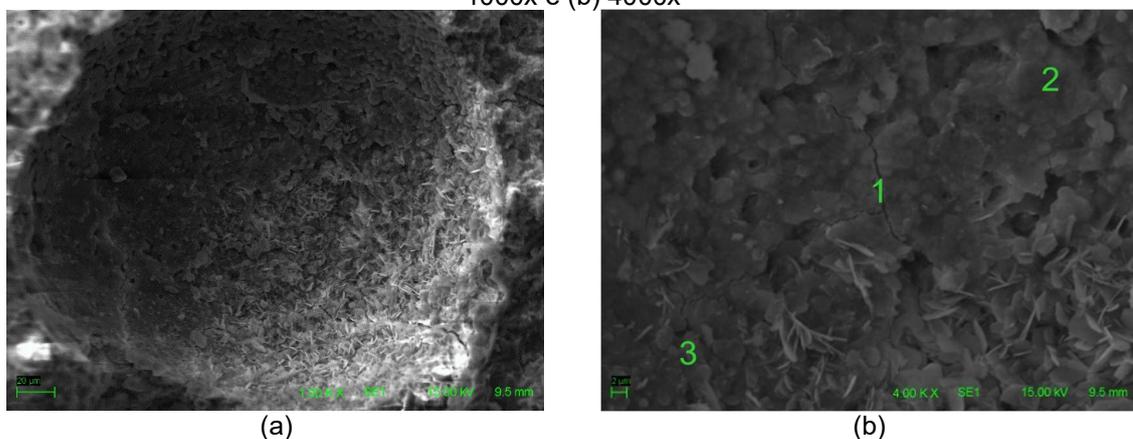
Figura 74 – Análise por EDS do CP IV sem dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3



Fonte: a autora.

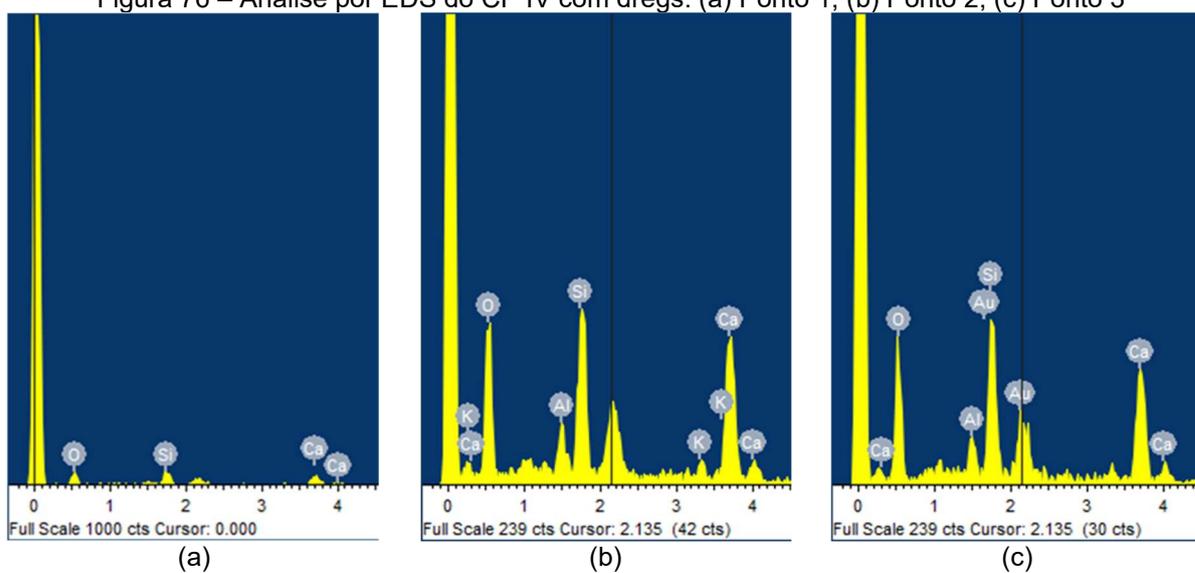
De forma semelhante, na amostra com CP IV e incorporação de dregs (Figura 75) visualiza-se um poro com a presença de vários compostos com pequenas fissuras. Nas amostras com esse cimento houve uma grande dificuldade na busca pelo gel.

Figura 75 - Micrografias eletrônicas por elétrons secundários das amostras com CP IV com dregs: (a) 1000x e (b) 4000x



Fonte: a autora.

Figura 76 – Análise por EDS do CP IV com dregs: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3



Fonte: a autora.

Em todas as análises por microscopia eletrônica de varredura verifica-se a presença sugestiva do gel álcali-agregado. Ressalta-se que em alguns casos, a dificuldade não esperada para a identificação do gel nas amostras com a adição do resíduo dregs pode estar relacionada ao reduzido tamanho das amostras que não permite uma ampla representatividade do todo.

5 CONCLUSÕES

O principal objetivo dessa dissertação foi analisar os efeitos da adição de dregs na reação álcali-agregado, bem como a capacidade mitigadora dos diferentes cimentos utilizados. As conclusões apresentadas nesse trabalho devem ser interpretadas com cautela, já que se referem a um conjunto específico de materiais e combinações. Sua representatividade deve ser fortalecida com a continuidade da investigação e atualização constante. Com isso, por meio dos resultados, é possível concluir que:

- na maior parte dos casos a adição de dregs promoveu maiores expansões, sendo essas diretamente proporcional ao aumento na porcentagem de resíduo;
- a depender do cimento utilizado, nas argamassas de referência (sem adição de dregs) tem-se expansões superiores ao limite estabelecido por norma brasileira. Essas expansões podem ser relacionadas à utilização de um agregado reativo;
- cimentos com teores elevados de adição (CP IV e CP III) demonstram um maior potencial de inibição da expansão promovida pela RAA;
- a utilização da composição de cimento com 10% de sílica ativa não demonstrou efeitos positivos na RAA, sendo isso possivelmente relacionado com a aglomeração das partículas de sílica ativa visto, já que nenhum aditivo ou mudanças na relação água/cimento foi adotada;
- a extensão do ensaio até 63 dias revelou aumento representativo na expansão, evidenciando continuidade da RAA;
- contrário ao obtido aos 30 dias, o CP II-Z demonstrou taxas de expansão inferiores em comparação ao cimento CP V-ARI aos 63 dias. Com isso, a adição pozolânica continua a reagir com os constituintes do cimento ao longo do tempo, contribuindo para a estabilidade dimensional, o que não ocorre para o CP V-ARI devido à ausência de adições quimicamente ativa;
- argamassas produzidas com o cimento CP II-F apresentam elevadas expansões em composições com a areia natural, quando alterado o tipo da areia, essas expansões diminuem, mas ainda acima do limite da norma;
- o cimento CP IV é plenamente eficiente de inibir expansões acima do limite da norma quando utilizada a areia britada;

- a adição de 5% de dregs melhorou a resistência à compressão de algumas argamassas, como CP V-ARI RS, CP II-F e CP IV;
- com 15% de dregs, ocorre uma representativa perda de desempenho na resistência à compressão, principalmente na composição de CP V com 10% de sílica ativa;
- a partir da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), é possível corroborar a presença do gel álcali-sílica em grande parte das amostras, predominantemente manifestado de forma maciça gretada, porém ainda identificável em uma amostra sob a forma de rosetas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das considerações levantadas nessa dissertação sugere-se a realização de trabalhos futuros que elenquem:

- promover a adição de outros teores de resíduo em matrizes cimentícias;
- a avaliação da expansão por reação álcali-agregado em concretos com a incorporação de dregs seguindo a NBR 15577-7 (ABNT, 2018);
- considerar métodos de empacotamento para dosagem de concreto com a adição de dregs;
- estimar o desempenho ambiental de materiais cimentícios com o resíduo dregs;
- analisar a adição de dregs frente a outros ensaios de durabilidade, como carbonatação acelerada e migração de cloretos.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004

_____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15577-1**: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para a avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 15577-4**: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

_____. **NBR 13956-1**: Sílica ativa para uso com cimentos Portland em concreto: argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABD, Jasim. Relationships between Actual Compressive Strength, Modulus of Elasticity and Non-Destructive Tests of High Strength Concrete. *Engineering and Technology Journal*, v. 36, n. 2A, p. 117–124, 1 fev. 2018. Disponível em: <https://etj.uotechnology.edu.iq/article_175003.html>.

ALVARENGA, Bruno *et al.* Análise Experimental Do Desempenho De Argamassas Utilizando Resíduos Da Indústria De Celulose (Dregs E Grits). *7º Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção*, p. 134–141, 2021.

ANGULO-RAMÍREZ, Daniela Eugenia; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby; MEDEIROS, Marcelo. Alkali-activated Portland blast furnace slag cement mortars: Performance to alkali-aggregate reaction. *Construction and Building Materials*, v. 179, p. 49–56, ago. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818312674>>.

BATTAGIN, Arnaldo *et al.* A evolução da cultura da prevenção álcali-agregado no mercado nacional. *Concreto & Construções*, p. 39–43, 2016.

- BENTZ, Dale P *et al.* Effects of cement particle size distribution on performance properties of Portland cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, v. 29, p. 1663–1671, 1999.
- BONEN, David; DIAMOND, Sidney. *Occurrence of large silica fume-derived particles in hydrated cement paste. CEMENT and CONCRETE RESEARCH*. [S.l.: s.n.], 1992.
- CARASEK, Helena; CASCUDO, Oswaldo; CAETANO, Geovanne. Contribuição à previsão de danos para estruturas de concreto atacadas pela reação álcali-silica. *Concreto & Construções*, p. 30–38, 2016.
- CASTRO, F *et al.* Utilisation of pulp and paper industry wastes as raw materials in cement clinker production. *Int. J. Materials Engineering Innovation*, v. 1, n. 1, p. 74–90, 2009.
- CHEREMISINOFF, Nicholas P.; ROSENFELD, Paul E. Sources of air emissions from pulp and paper mills. *Handbook of Pollution Prevention and Cleaner Production*, p. 179–259, 1 jan. 2010. Acesso em: 26 maio 2023.
- COPETTI, M *et al.* Estudo de mitigação pelo método acelerado de reatividade álcali-agregado em concretos para fundações. abr. 2020, Fortaleza: CBPAT, abr. 2020. p. 1972–1983.
- COUTO, Tiago. *Reação álcali-agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas*. 2008. 191 f. Mestrado – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.
- DAL MOLIN, Denise. Adições minerais. In: TUTIKIAN, BERNARDO *et al.* (Org.). . *Concreto: ciência e tecnologia*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2022. v. 1. p. 317–370.
- DUTRA, Alexander. *Reação álcali-agregado: investigação do comportamento de agregados da região sudoeste do Rio Grande do Sul frente a utilização de diferentes tipos de cimento Portland*. 2018. 66 f. TCC – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2018.
- FALCÃO, Juliane R *et al.* Avaliação das propriedades de argamassas com adições de Dregs. 25 out. 2023, [S.l.: s.n.], 25 out. 2023. p. 1–7. Disponível em: <<https://eventos.antac.org.br/index.php/enarc/article/view/2940>>.

FARAGE, Rogério Machado Pinto *et al.* Intermediate covering of municipal solid waste landfills with alkaline grits, dregs and lime mud by-products of kraft pulp production. *Journal of Cleaner Production*, v. 239, 2019.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Online data FAOSTAT. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO> . Acesso: 8 jan. 2024. FAO, 2022.

FOURNIER, Benoit; BÉRUBÉ, Marc-André. *Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications*. . [S.l: s.n.], 2000.

GLASSER, L S; KATAOKA, N. *The chemistry of “Alkali-aggregate” reaction*. *CEMENT and CONCRETE RESEARCH*. [S.l: s.n.], 1981.

GUILLANTE, Patrícia *et al.* Synergistic effect of RHA and FCW in alkali-aggregate reaction mitigation. *Ambiente Construído*, v. 19, n. 2, p. 7–20, abr. 2019.

HAPASRYK, N *et al.* Efeito dos álcalis e da finura do cimento nas expansões geradas pela reação álcali-agregado. 2007, São Paulo: IBRACON, 2007. p. 14.

HASPARYK, Nicole. *Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado*. 2005. 326 f. Tese – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HASPARYK, Nicole. *Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado - efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa*. 1999. 257 f. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999.

HASPARYK, Nicole. Reação Álcali-Agregado no Concreto. In: TUTIKIAN, BERNARDO *et al.* (Org.). . *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2022. v. 2. p. 1067–1166.

HE, Zhi-hai *et al.* A novel development of green UHPC containing waste concrete powder derived from construction and demolition waste. *Powder Technology*, v. 398, p. 117075, jan. 2022.

HELENE, Paulo; CARVALHO, Mariana; PACHECO, Jéssika. Engineering field tests for alkali-aggregate reaction. *Structural Concrete*, v. 18, n. 2, p. 349–355, 1 abr. 2017.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. Relatório Anual IBÁ 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/publicacoes/relatorios>. Acesso em: 8 jan. 2024. IBÁ, 2022.

JOO, Hyo Eun; TAKAHASHI, Yuya. Development of alkali-silica reaction model considering the effect of aggregate size. *Cement and Concrete Composites*, v. 122, p. 104149, set. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946521002171>>.

JR. DIAS, Hélio Lourenço Ferreira. *Influência do uso de diferentes teores de dregs em substituição à areia nas propriedades de argamassas*. 2021. 28 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

JUENGER, Maria C.G.; SNELLINGS, Ruben; BERNAL, Susan A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research*, v. 122, p. 257–273, ago. 2019.

KALANTARI, Behzad; PRASAD, Arun; HUAT, Bujang B.K. Cement and Silica Fume Treated Columns to Improve Peat Ground. *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 38, n. 4, p. 805–816, 1 abr. 2013.

KHANAPUR, Namratha V. *et al.* Glass powder mortar – A study on alkali-silica reaction and environmental impact. *Materials Today: Proceedings*, jun. 2023.

KIHARA, Yushiro. Reação álcali-agregado: Aspectos mineralógicos. 1988, [S.l.: s.n.], 1988. p. 127–141.

KIHARA, Yushiro; SCANDIUZZI, Luércio. Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros. 1993, São Paulo: [s.n.], 1993. p. 319–338.

KURODA, T *et al.* Effects of particle size, grading and content of reactive aggregate on ASR expansion of mortars subjected to autoclave method. 2004, Beijing: [s.n.], 2004. p. 736–743.

LAWRENCE, Philippe; CYR, Martin; RINGOT, Erick. Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 12, p. 1939–1947, dez. 2003.

LOTTHENBACH, Barbara *et al.* Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, v. 38, n. 6, p. 848–860, jun. 2008.

MAAS, Andrew J.; IDEKER, Jason H.; JUENGER, Maria C.G. Alkali silica reactivity of agglomerated silica fume. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 2, p. 166–174, fev. 2007. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884606002717>>.

MACEDO, José Vitor da Silva *et al.* Mitigation of the alkali-aggregate reaction against the addition of sugarcane berry ash. *Themes focused on interdisciplinarity and sustainable development worldwide V.1*. [S.l.]: Seven Editora, 2023. .

MADDALENA, Riccardo; ROBERTS, Jennifer J.; HAMILTON, Andrea. Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. *Journal of Cleaner Production*, v. 186, p. 933–942, 10 jun. 2018.

MARQUES, Joana Inês da Silva. *Geopolimerização de cinzas e dregs da indústria de pasta de papel*. 2013. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade de Aveiro, Portugal, 2013.

MARTÍNEZ-LAGE, Isabel *et al.* Concretes and mortars with waste paper industry: Biomass ash and dregs. *Journal of Environmental Management*, v. 181, p. 863–873, 1 out. 2016.

MARTINS, Fernanda Machado. *Caracterização Química e Mineralógica de Resíduos Sólidos Industriais Minerais do Estado do Paraná*. 2006. 158 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

MATHEW, Anil K. *et al.* Lignocellulosic Biorefinery Wastes, or Resources? *Waste Biorefinery*. [S.l.]: Elsevier, 2018. p. 267–297. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444639929000094>>. Acesso em: 26 maio 2023.

MATSCHEI, T.; LOTHENBACH, B.; GLASSER, F. P. The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 4, p. 551–558, abr. 2007.

MELO, R. H. R. Q.; HASPARYK, N. P.; TIECHER, F. Assessment of Concrete Impairments over Time Triggered by DEF. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 35, n. 8, ago. 2023.

MENÉNDEZ, Esperanza *et al.* Durability of blended cements made with reactive aggregates. *Materials*, v. 14, n. 11, 1 jun. 2021.

MENEZES, Maurício Faria Filho. *Substituição da cal hidratada por dregs, resíduo da indústria de celulose, na confecção de argamassas de múltiplo uso*. 2022. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2022.

MULTON, Stéphane *et al.* Effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. *Cement and Concrete Research*, v. 40, n. 4, p. 508–516, abr. 2010. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884609002038>>.

MYMRIN, Vsevolod *et al.* Efficient application of cellulose pulp and paper production wastes to produce sustainable construction materials. *Construction and Building Materials*, v. 263, p. 120604, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120604>>.

NOVAIS, Rui M. *et al.* In-depth investigation of the long-term strength and leaching behaviour of inorganic polymer mortars containing green liquor dregs. *Journal of Cleaner Production*, v. 220, p. 630–641, 2019a.

NOVAIS, Rui M. *et al.* In-depth investigation of the long-term strength and leaching behaviour of inorganic polymer mortars containing green liquor dregs. *Journal of Cleaner Production*, v. 220, p. 630–641, 20 maio 2019b.

NOVAIS, Rui M. *et al.* Upcycling unexplored dregs and biomass fly ash from the paper and pulp industry in the production of eco-friendly geopolymer mortars: A preliminary assessment. *Construction and Building Materials*, v. 184, p. 464–472, 30 set. 2018.

OHEY, Tandr  *et al.* The filler effect: The influence of filler content and surface area on cementitious reaction rates. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 96, n. 6, p. 1978–1990, jun. 2013.

OLIVEIRA, Alencar Ibeiro De. *Uso de dregs em substitui o da cal hidratada em argamassas mistas de revestimento*. 2022. 69 f. Mestrado (Disserta o em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

OLIVEIRA, Yasmine Simões De; COSTA, Eliane Betânia Carvalho; MOTTA, Leila Aparecida de Castro. Uso de dregs e grits em substitui o parcial ao cimento: caracteriza o e resistência mecânica. *Ambiente Construido*, v. 24, dez. 2024. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212024000100907&tlng=pt>.

OLIVEIRA, Yasmine. *Uso dos resíduos do processo kraft de celulose – dregs e grits – como adi o mineral na produ o de matrizes cimentícias*. 2022. 113 f. Disserta o (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/36137>>.

OWSIK, Zdzis awa; CZAPIK, Przemys aw; ZAPA A-S LAWETA, Justyna. METHODS OF MITIGATING ALKALI REACTIVITY OF GRAVEL AGGREGATE. *Structure and Environment*, v. 14, n. 3, p. 102–109, 30 set. 2022.

RODRIGUES, L R *et al.* Resíduo do processo Kraft (dregs) como m teria-prima alternativa para cerâmica vermelha TT - Kraft process waste (dregs) as alternative raw material for red ceramic. *Cer mica*, v. 65, n. 373, p. 162–169, 2019. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132019000100162&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.br/pdf/ce/v65n373/1678-4553-ce-65-373-162.pdf>.

ROJO-LÓPEZ, Gemma *et al.* Rheology, durability, and mechanical performance of sustainable self-compacting concrete with metakaolin and limestone filler. *Case Studies in Construction Materials*, v. 17, 1 dez. 2022.

ROMANO, R. C. O. *et al.* Influência da técnica de dispersão nas propriedades de sílica ativa. *Cer mica*, v. 54, n. 332, p. 456–461, dez. 2008. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132008000400011&lng=pt&tlng=pt>.

SAHA, Ashish Kumer *et al.* The ASR mechanism of reactive aggregates in concrete and its mitigation by fly ash: A critical review. *Construction and Building Materials*, v. 171, p. 743–758, maio 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818306640>>.

SANTANA, Raphael; BRASILEIRO, Francisca; CABRAL, Antonio. Análise da mitigação da reação álcali-agregado com o tipo de cimento. 2020, Fortaleza: CBPAT, 2020. p. 1789–1799.

SANTOS, Rodrigo Felipe *et al.* Addition of dregs in mixed mortar: Evaluation of physical and mechanical properties. 2018a, [S.l.]: Springer International Publishing, 2018. p. 419–427.

SANTOS, Rodrigo Felipe *et al.* Addition of dregs in mixed mortar: Evaluation of physical and mechanical properties. *Minerals, Metals and Materials Series*, p. 419–427, 2018b.

SANTOS, Rodrigo Felipe *et al.* Evaluation of incorporation of dregs in mortar production in replacement of hydrated lime. *Materials Science Forum*, v. 881, p. 351–356, 2017.

SANTOS, V. *et al.* Green liquor dregs and slaker grits residues characterization of a pulp and paper mill for future application on ceramic products. *Journal of Cleaner Production*, v. 240, 10 dez. 2019.

SCHOVANZ, Dioice; COSTA, Luana Centofante; BONSEMBIANTE, Francieli Tiecher. Mapeamento do potencial álcali reativo das areias no Rio Grande do Sul. *Revista de Arquitetura IMED*, v. 8, n. 1, p. 3, 16 set. 2019.

SCRIVENER, K; SNELLINGS, R; LOTHENCACH, B. *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. [S.l.: s.n.], 2016.

SCRIVENER, Karen L.; JOHN, Vanderley M.; GARTNER, Ellis M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 2–26, 1 dez. 2018.

SHANMUGA PRIYA, T. Experimental investigation on high performance RC column with manufactured sand and silica fume. 3 dez. 2017, [S.l.]: Institute of Physics Publishing, 3 dez. 2017.

SILVA, Cláudia. *Contribuição para a eficácia da mitigação da reação álcali-agregado: influência de aditivos superplastificantes nas expansões ao utilizar adições minerais*. 2015. 142 f. Tese de doutorado – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SILVA, Patricia Neves. *Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do complexo Paulo Afonso/CHESF: Influência da reação nas propriedades do concreto*. 2007. 241 f. Dissertação de mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SIMÃO, L. *et al.* Wastes from pulp and paper mills - A review of generation and recycling alternatives. *Ceramica*, v. 64, n. 371, p. 443–453, 1 jul. 2018.

SOUZA, L.; ZOLETT, E. R.; CARRAZEDO, R. Study of effect of electric arc furnace slag on expansion of mortars subjected to alkali-aggregate reaction. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 9, n. 4, p. 572–578, ago. 2016.

SOUZA, Vitória da Luz. *Beneficiamento físico-químico do resíduo sólido dregs da indústria de celulose e papel para emprego em misturas asfálticas*. 2022. 108 f. Mestrado (Dissertação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2022.

SRIVASTAVA, Sumit *et al.* Utilization of calcite-rich Green Liquor Dregs (GLD) by-products from pulp and paper industry: cement clinker production and life cycle analysis. *Case Studies in Construction Materials*, p. e02870, jan. 2024a. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214509524000214>>.

SRIVASTAVA, Vikas; AGARWAL, V C; KUMAR, Rakesh. Effect of Silica fume on mechanical properties of Concrete. *J. Acad. Indus. Res*, v. 1, n. 4, p. 176, 2012.

SCHOVANZ, D. *Estudo na formação da etringita tardia (DEF) em concretos com cimento Portland pozolânico e de alta resistência*. 2019. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil) - Atitus Educação, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul

TAPAS, Marie Joshua *et al.* Comparative study of the efficacy of fly ash and reactive aggregate powders in mitigating alkali-silica reaction. *Journal of Building Engineering*, v. 63, 1 jan. 2023.

THOMAS, Michael. The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, p. 1224–1231, dez. 2011. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884610002462>>.

TIECHER, Francieli. *Influência do grau de cristalinidade e deformação do quartzo no desencadeamento da reação álcali-agregado*. . Porto Alegre: [s.n.], 2010.

TIECHER, Francieli. *Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do Sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado*. 2006. 182 f. Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

TORRES, Caio *et al.* Use of Alkaline Solid Wastes from Kraft Pulp and Paper Mills, Dregs and Grits in Cement Production. *Minerals, Metals and Materials Series*, p. 843–852, 2017.

TORRES, Caio Moreira Miquelino Eleto *et al.* Dregs and grits from kraft pulp mills incorporated to Portland cement clinker. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 22, n. 3, p. 851–861, 1 maio 2020a.

TORRES, Caio Moreira Miquelino Eleto *et al.* Dregs and grits from kraft pulp mills incorporated to Portland cement clinker. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 22, n. 3, p. 851–861, 29 maio 2020b. Disponível em:

<<http://link.springer.com/10.1007/s10163-020-00983-x>>.

TORRES, Caio Moreira Miquelino Eleto. *Incorporação de dregs e grits de fábricas de polpa celulósica Kraft ao clínquer para a produção de cimento Portland*. 2016. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

TORRES, Samanta *et al.* Utilização de finos de dregs na produção de concretos. 2017, Bento Gonçalves: IBRACON, 2017.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. The Paris Agreement. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>. Acesso em: 27 jan. 2024.

VALDUGA, L *et al.* Influência da forma do agregado, da relação água/cimento e da consistência da argamassa na verificação da potencialidade reativa do agregado. 2005, Olinda: Ibracon, 2005.

VANCE, Kirk *et al.* The rheological properties of ternary binders containing Portland cement, limestone, and metakaolin or fly ash. *Cement and Concrete Research*, v. 52, p. 196–207, 2013.

VIJAY, Shanmugapriya *et al.* STUDIES ON FLEXURAL BEHAVIOUR OF HIGH PERFORMANCE RC BEAMS WITH MANUFACTURED SAND AND SILICA FUME. *IJCIET_07_06_064 International Journal of Civil Engineering and Technology*, v. 7, n. 6, p. 578–586, 2016. Disponível em: <<http://www.iaeme.com/IJCIET/index.asp578><http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=7&IType=6><http://www.iaeme.com><http://www.iaeme.com/IJCIET/index.asp579>>.

WANG, Dehui *et al.* A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. *Construction and Building Materials*, v. 181, p. 659–672, 30 ago. 2018.

WANG, Zhiwen *et al.* Endogenous alkali silica reaction evaluation of rice husk ash in mortar. *Journal of Building Engineering*, v. 75, 15 set. 2023.

YOUNG, Raymond A.; KUNDROT, Robert; TILLMAN, David A. Pulp and Paper. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, p. 249–265, 1 jan. 2003. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B0122274105006190>>. Acesso em: 26 maio 2023.

ZANELLA, B P; CRISTINA, Isabel; TRANNIN, Barros. Recycling residues from the pulp and paper industries in the civil construction. *EJGE*, v. 20, n. 3, p. 1115–1128, 2019. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/283097746>>.

APÊNDICE A – Estudo de moagem

O estudo de moagem foi realizado a fim de determinar o melhor tempo de moagem para redução das partículas de dregs para sua futura utilização como fíler. Foi utilizado o moinho de bolas, a proporção de resíduo e bolas foi de 1:1, as bolas selecionadas foram de diferentes tamanhos a fim de preencher os vazios entre elas. O estudo foi conduzido durante 10 horas, sendo coletadas amostras a cada 2 horas. O ensaio de granulometria a laser foi realizado para todas as amostras da moagem (0, 2, 4, 6, 8 e 10h) para verificar as alterações no tamanho das partículas, o resultado das curvas granulométricas é apresentado pela Figura A1.

Figura A1 – Curvas granulométricas do estudo de moagem

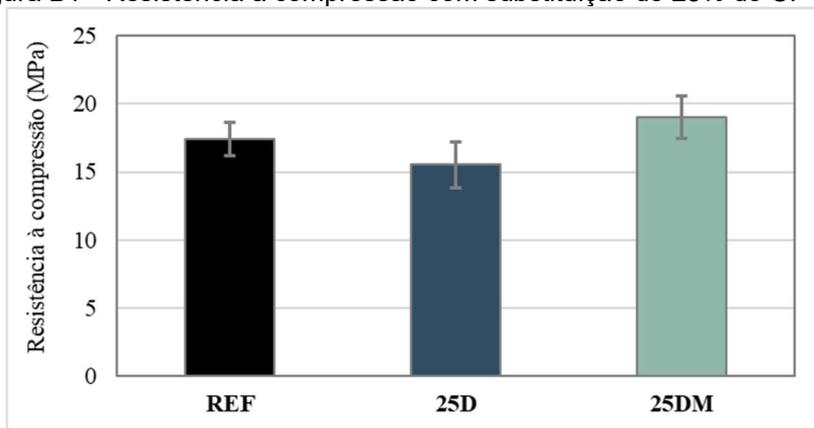
oFonte: elaborado pela autora.

Cabe, no entanto, ressaltar que, apesar da redução com 10 horas de moagem ser de 218,14%, a energia gasta durante o tempo de moagem não justifica a sua escolha. Dessa forma, nessa pesquisa, foi adotado o tempo de moagem de 2 horas.

APÊNDICE B – Substituição parcial de CP II – F por dregs em argamassas

A fim de analisar o potencial de aplicação do resíduo como substituto parcial ao cimento CP II – F, foram moldados corpos de prova cilíndricos (5 x 10 cm) a partir das diretrizes estabelecidas pela NBR 5752 (ABNT, 2014¹). A porcentagem de substituição do cimento foi de 25%. Foram moldadas três argamassas, de referência (sem substituição), com o resíduo apenas desaglomerado (25D) manualmente com pistilo e almofariz e após 10 horas de moagem em moinho de bolas (25DM). Os resultados de resistência à compressão são apresentados pela Figura B1.

Figura B1 - Resistência à compressão com substituição de 25% do CP II - F



Fonte: elaborado pela autora.

É possível observar que quando o resíduo foi apenas desaglomerado ocorre uma redução da resistência à compressão na ordem de 11,89%, entretanto, quando o resíduo é moído há um incremento de 9,52% em relação a referência. A partir disso, a análise de variância ANOVA (Tabela B1) demonstra que não há variação significativa entre os resultados.

Tabela B1 - ANOVA da substituição de 25% do CP II - F

Efeito	Soma Quadrada	Graus de Liberdade	Média Quadrada	Teste F	Probabilidade	Influência Significativa
Amostras	4,265	2	2,133	0,2958	0,748182	Não
Erro	108,152	15	7,21			

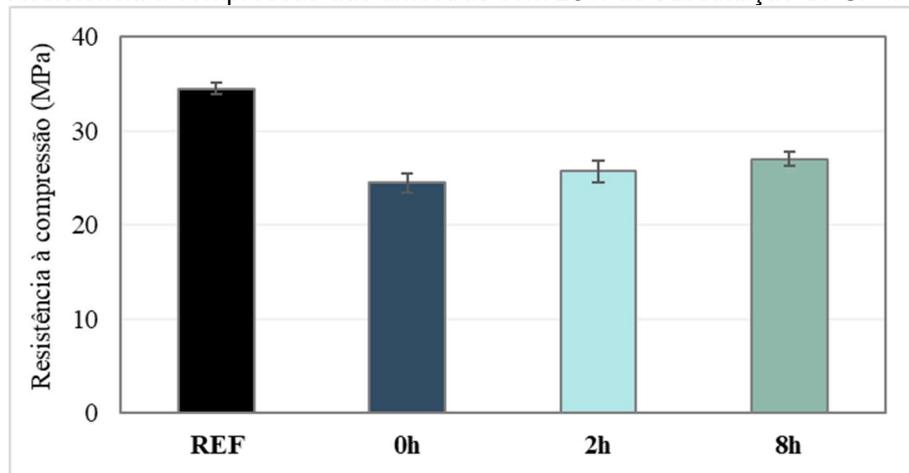
Fonte: elaborado pela autora.

¹ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014

APÊNDICE C – Substituição parcial de CP II – Z por dregs em argamassas

A partir do estudo de moagem (Apêndice A), foram selecionados os tempos de 0, 2 e 8 horas para a realização de um estudo preliminar em relação a resistência à compressão. Para isso, 4 traços de argamassa foram confeccionados conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014¹), contudo, o cimento foi alterado, sendo utilizado o CP II – Z. Utilizou-se uma substituição de 25% do cimento por dregs. A Figura C1 apresenta os resultados de resistência à compressão para as argamassas. Nota-se que todas as amostras apresentam resultados inferiores a referência, ainda há um acréscimo dos valores conforme o aumento no tempo de moagem do resíduo.

Figura C1 - Resistência a compressão das amostras com 25% de substituição do CP II- Z pelo dregs



Fonte: elaborado pela autora.

A análise de variância ANOVA (Tabela C1) demonstra que há diferença significativa entre os resultados. Com isso, a partir da análise múltipla de média por Fisher LSD, é possível observar que há diferença significativa entre todas as amostras, com exceção, da amostra 2h em relação a 8h. Desse modo, conclui-se que a moagem de 6 horas a mais não resultou em resultados estatisticamente significativos.

Tabela C1 - ANOVA da substituição de 25% do cimento pelo dregs

Efeito	Soma Quadrada	Graus de Liberdade	Média Quadrada	Teste F	Probabilidade	Influência Significativa
Amostras	1049,56	3	349,85	55,48	0	Sim
Erro	119,81	19	6,31			

Fonte: elaborado pela autora.

APÊNDICE D – Adições de 7,5 e 15% de dregs em argamassas

O estudo preliminar foi realizado a partir da adição, sobre a massa do cimento, de 7,5% (7,5D) e 15% (15D) do resíduo dregs em argamassas. O principal objetivo desse estudo foi analisar a suscetibilidade das argamassas sofrerem reação álcali-agregado, uma vez que o resíduo apresenta porcentagens consideráveis de álcalis (Na_2O e K_2O).

Para isso, foram seguidas as diretrizes da NBR 15577 – 4 (ABNT, 2018²) para todos os ensaios de modo a proporcionar uma padronização. Assim, foi utilizada a proporção em massa de 1:2,25 e relação água cimento fixa de 0,47. O resíduo foi desaglomerado manualmente com auxílio de um pistilo e almofariz de porcelana e peneirado em malha 0,15 mm.

Os resultados da caracterização das argamassas são apresentados pela Tabela D1. Através do índice de consistência, pode-se inferir que os sistemas têm trabalhabilidade semelhante, mesmo com o aumento da porcentagem de adição, uma vez que a capacidade de espalhamento foi semelhante para todos os sistemas. O ensaio de densidade de massa evidenciou que a argamassa com adição de 15% de Dregs apresentou maior densidade de massa em relação as demais.

Tabela D1 - Caracterização das argamassas com adição de 7,5% e 15% de dregs

	Ensaio	REF	7,5D	15D
Estado fresco	Índice de consistência	24,83	24,50	24,67
	Densidade de massa estado fresco	2176,65	2228,88	2248,29
Estado endurecido	Resistência à compressão	46,02 ± 2,17	46,44 ± 2,43	50,16 ± 0,68
	Resistência à tração na flexão	7,73 ± 1,09	8,07 ± 0,59	7,69 ± 0,58
	Módulo de elasticidade dinâmico	34705 ± 1854,84	35623 ± 562,46	39627 ± 360,67
	Densidade de massa estado endurecido	2075,8 ± 33,39	2114,0 ± 10,20	2148,0 ± 21,75
	Absorção de água por capilaridade	3,41 ± 0,49	3,66 ± 0,04	3,02 ± 0,23

Fonte: elaborado pela autora.

²ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577 - 4**: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2018

Devido a fina granulometria do resíduo, evidenciaram-se maiores valores de densidade de massa para os sistemas com adições de Dregs. No entanto, ressalta-

se que essas diferenças numéricas foram bastante próximas. Em relação ao coeficiente de capilaridade, nota-se que o sistema 15D apresentou coeficiente de capilaridade 11,3% inferior ao valor do sistema de referência. Esse comportamento ocorre, possivelmente, devido a um maior empacotamento das partículas promovido pela incorporação da elevada finura do resíduo.

O sistema 15D apresentou maior resistência mecânica à compressão, na ordem de 9,0% em relação a REF, e maior módulo de elasticidade dinâmico. Isso ocorre, provavelmente, devido ao preenchimento de vazios, que a elevada finura desse resíduo possibilitou. Os resultados dos ensaios de densidade de massa no estado endurecido corroboram com essa hipótese. No mesmo sentido, o sistema 7,5D demonstrou um ganho de 0,9% em relação ao sistema REF.

Para o ensaio de resistência à tração na flexão, é possível observar grande similaridade entre os valores encontrados para todos os sistemas avaliados, contudo, a ligeira redução de resistência que se nota, proporcional a adição de resíduos está em consonância com a bibliografia (ALVARENGA *et al.*, 2022³; OLIVEIRA Jr. *et al.*, 2019⁴; MARTÍNEZ-LAGE *et al.*, 2016).

- **REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO**

Através da análise da Figura D1, observa-se que a incorporação do resíduo elevou a reatividade e promoveu maior expansibilidade das argamassas frente ao contato com a solução alcalina em elevada temperatura. O sistema com adição de 7,5% de Dregs apresentou maior expansibilidade que os demais após o período de ensaio. Diferentemente do esperado, o aumento do teor de adição de resíduo nas argamassas não elevou a reatividade dessas, uma vez que o sistema com 15% de incorporação de resíduo registrou expansibilidade inferior ao sistema com 7,5% de adição.

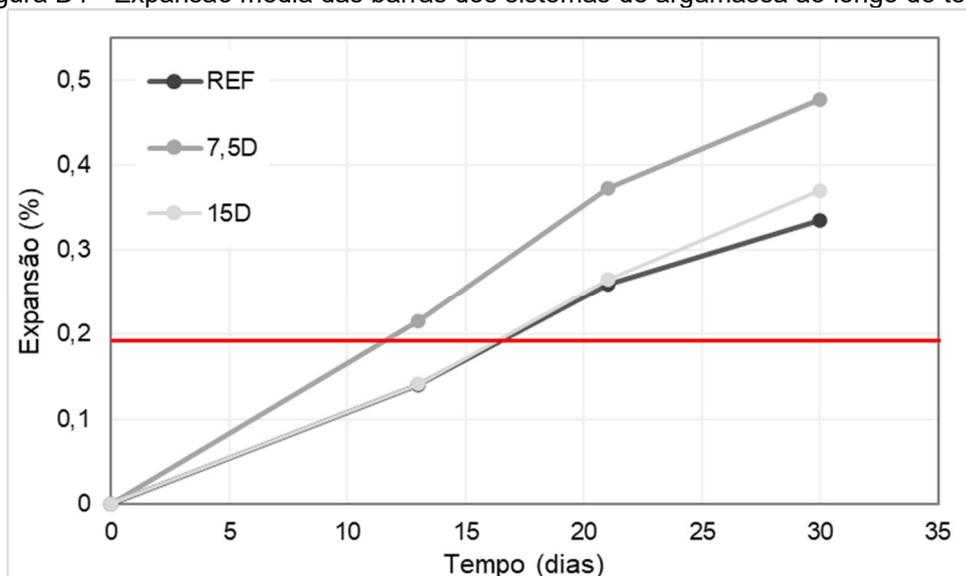
³ALVARENGA, Bruno *et al.* Avaliação das propriedades de argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por resíduos da indústria de celulose. In: CONGRESSO DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 2022, Brasília. **Anais [...]**. 2022: UnB, 2022.

⁴OLIVEIRA JR. *et al.* The influence of partial replacement of natural sand aggregates by grits residues on the mechanical properties of an ecological mortar. **Journal of Building Engineering**, v. 26, p. 100912, 2019.

Esse comportamento expansivo inversamente proporcional a adição de resíduo também fora registrada em estudos anteriores nas avaliações de outros resíduos como a cinza de casca de arroz (ANDRADE *et al.*, 1993⁵; HASPARIK, 1999⁶; SILVEIRA, 2007⁷).

Ressalta-se que o agregado miúdo também apresentou comportamento reativo, uma vez que o sistema de referência apresentou valores de expansibilidade superiores aos limites normativos. Dessa forma, de acordo com a Tabela 2 do item 5.3 da NBR 15577-1 (ABNT, 2018), o agregado miúdo natural empregado no ensaio, classifica-se como “potencialmente reativo grau R1”, visto que apresentou expansão entre 0,19% e 0,40% aos 30 dias. Esse fator pode ter contribuído para a amplificação dos valores de expansão verificados nos sistemas com adição de resíduos.

Figura D1 - Expansão média das barras dos sistemas de argamassa ao longo do tempo



Fonte: elaborado pela autora.

⁵ANDRADE, W.P.; SANTOS, M.C.; FONTOURA, J.T.F. **Estudo da Atividade Pozolanica da Cinza de Casca de Arroz**. Furnas Centrais Elétricas S.A. Relatório DCT. T.1.055.93-R0, Laboratório de Concreto, Goiânia, 1993.

⁶HASPARYK, N.P. **Investigação dos Mecanismos da Reação Álcali-Agregado – Efeito da cinza de casca de arroz e sílica ativa**. 1999. 257p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiânia. Goiânia-GO, 1999, 257p.

⁷SILVEIRA, A. A. **Contribuição ao estudo do efeito da incorporação de cinza de casca de arroz em concretos submetidos à reação álcali-agregado**. 2007. 227 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre 2007.

A análise de variância (ANOVA), com confiabilidade de 95%, identifica que há diferença significativa entre o fator controlável (adição) em e a variável de resposta (expansão) aos 30 dias (Tabela D2). O teste de comparação múltipla de médias pelo método de Fisher demonstrou que, entre o sistema com 15% de adição de Dregs e a referência não há, estatisticamente, diferença significativa. No entanto, foi observada diferença significativa quando comparado o sistema com adição de 7,5% em relação aos demais sistemas.

Tabela D2 - ANOVA das argamassas com adição de 0%, 7,5% e 15% de dregs

Efeito	Soma Quadrada	Graus de Liberdade	Média Quadrada	Teste F	Probabilidade	Influência Significativa
Adição	0,03279	2	0,016395	31,15	0,000678	Sim
Erro	0,003158	6	0,000526			

Fonte: elaborado pela autora.