

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
MATERIAIS – MESTRADO PROFISSIONAL

Ana Paula Mota Alves

**Concreto autoadensável com adição de resíduo de
vidro: análise das propriedades mecânicas e da
ocorrência de reação álcali-agregado**

Itajubá – MG
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS –
MESTRADO PROFISSIONAL

Ana Paula Mota Alves

**Concreto autoadensável com adição de resíduo de vidro: análise
das propriedades mecânicas e da ocorrência de reação álcali-
agregado**

**Dissertação submetida ao Programa de Mestrado Profissional
em Engenharia de Materiais como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Materiais**

Área de concentração: Não-Metals

**Orientadora: Prof.^a Dr.^a Mirian de Lourdes Noronha Motta
Melo**

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Gonçalves

ITAJUBÁ – MG
2022

AGRADECIMENTOS

A Deus e a meus familiares, em especial meu pai Bertoldo que sempre me inspirou pessoal e profissionalmente, e meus filhos Amanda e Felipe que desde bebês compartilharam parte de minha dedicação a eles com a engenharia e a busca pelo conhecimento. Ao meu namorado Paulo, por todo amor, apoio e compressão.

Aos meus amigos, parceiros de trabalho e também aos clientes da Alves Engenharia, pela compreensão, apoio e incentivo para eu continuar e concluir essa batalha.

Aos mestres que me conduziram até este momento da minha vida, em especial aos da minha graduação em engenharia civil e os atuais do Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais da UNIFEI.

Ao carinho, suporte e atenção dados por minha orientadora Prof.^a Dr.^a Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo e meu coorientador Prof. Dr. Paulo Cesar Gonçalves, que em meio ao momento singular vivido pelo mundo e que afetou toda a cadeia de ensino e pesquisa, se reinventaram e mantiveram minha motivação e rumo no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas da UNIFEI Lucas e Michel, e em especial ao Rafael, por toda ajuda, parceria e força no desenvolvimento deste trabalho, sem o quais eu provavelmente não teria concluído este mestrado.

Ao senhor Jorge e à Empresa Ômega, pela grande contribuição no desenvolvimento e adaptação do equipamento para o ensaio principal deste trabalho.

Aos funcionários e técnicos dos laboratórios da UNIFEI, em especial ao Fabiano, que sempre se prontificaram a colaborar e somar para a adaptação dos equipamentos e realização dos ensaios.

RESUMO

A busca por soluções para equacionar a crescente demanda da construção civil e a sustentabilidade na exploração de recursos naturais passa pela busca de novas fontes renováveis e utilização de resíduos, principalmente os que não são ainda satisfatoriamente absorvidos pela indústria da reciclagem, como o vidro.

Amplamente utilizados em todo o mundo, o concreto e demais compósitos cimentícios são uma boa alternativa para a absorção de resíduos de diversas origens, e vêm sendo aprimorados nas últimas décadas, como é o caso do Concreto Autoadensável (CAA).

Este estudo investigou a viabilidade de produção de Argamassas Autoadensáveis (AAA) como uma fase inicial para produção de CAA, realizando a substituição da areia por Resíduo de Vidro Moído (RVM) nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20% e 30% em massa, utilizando como adição mineral a Sílica Ativa (AS) e como aditivo químico um superplastificante (SPA). Para alcançar os objetivos propostos neste estudo, foram realizados ensaios das argamassas nos estados fresco e endurecido, análise de imagens geradas por microscopia eletrônica de varredura, além da investigação da ocorrência da Reação Álcali-Agregado (RAA), visto que o vidro, por sua natureza, é considerado potencialmente reativo. No que tange aos estudos do RVM, foi realizada manipulação de sua granulometria de forma que se aproximasse à da areia.

Os resultados mostraram que é viável a utilização de RVM como substituto parcial da areia para a produção de CAA, uma vez que as AAA produzidas atenderam aos requisitos em estado fresco e tiveram, em maioria, suas propriedades mecânicas melhoradas, podendo inclusive atender às aplicações estruturais, como em reforços e reparos. Na ocorrência da RAA, as expansões ficaram dentro do limite estabelecido para não causar danos, com a ocorrência de apenas um resultado que excedeu minimamente este valor, apontando uma participação positiva da atividade pozolânica das partículas finas do RVM, mas principalmente a composição essencial da AAA através de seus aditivos.

Palavras-chave: Resíduo de vidro; Concreto autoadensável; Argamassa autoadensável; Reação álcali-agregado.

ABSTRACT

The search for solutions to equate the growing demand of civil construction and sustainability in the exploration of natural resources involves the search for new renewable sources and use of waste, especially those that are not yet satisfactorily absorbed by the recycling industry, such as the glass.

Widely used around the world, concrete and other cementitious composites are a good alternative for the absorption of waste from different origins, and have been improved in the last decades, as the case of Self-Compacting Concrete (SCC).

This study investigated the viability of producing Self-Compacting Mortars (SCM) as an initial phase for the production of SCC, replacing the sand with Ground Waste Glass (GWG) in the proportions of 5%, 10%, 15%, 20% and 30% by mass, using Silica Fume (SF) as a mineral addition and a superplasticizer (SPA) as a chemical additive. To achieve the objectives proposed in this study, tests were performed on the mortars in the fresh and hardened states, analysis of images generated by scanning electron microscopy, as well as the investigation of the occurrence of the Alkali-Aggregate Reaction (AAR), because the glass, in its nature, is considered potentially reactive. Regarding the GWG studies, its granulometry was manipulated so that it approximated to sand.

The results showed that it is viable to use GWG as a partial substitute for sand in the production of SCC, once the SCM produced met the requirements in fresh state and had their mechanical properties improved, furthermore, in most cases, could even meet structural applications such as in reinforcements and repairs.

In the occurrence of AAR, the expansions were within the established limit not to cause damage, with the occurrence of only one result that minimally exceeded this value, indicating a positive participation of the pozzolanic activity of the fine particles of the GWG, but mainly the essential composition of the SCM through its additives.

Keywords: Waste glass; Self-compacting concrete; Self-compacting mortar; Alkali-aggregate reaction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito da umidade relativa na expansão do concreto devido à reação álcali-agregado.....	22
Figura 2 - Arranjo atômico de minerais do grupo da sílica com estrutura ordenada e bem cristalizados, e com estrutura desordenada e mal cristalizados.....	23
Figura 3 - Grão de agregado em contato com a solução dos poros com fase reativa devido à estrutura cristalina desordenada	24
Figura 4 – A superfície do agregado é atacada pelos íons OH ⁻ que rompe a ligação Si-O-Si para formar grupos de silanol.....	25
Figura 5 – Grupos de silanol (Si-OH) são rompidos pelos íons OH ⁻ em íons SiO ⁻ , sobre a superfície do agregado	25
Figura 6 – Os íons de SiO ⁻ liberados são atraídos pelos cátions alcalinos da solução dos poros formando gel de silicato alcalino em torno do agregado. $Si-OH + Na^+ + OH^- \rightarrow Si-O-Na^+ H_2O$	26
Figura 7 - O gel alcalino, ao absorver água, expande, exercendo pressão osmótica sobre a pasta de cimento ou agregado	26
Figura 8 - Histórico do estudo sobre RAA no mundo	28
Figura 9 - Numero de publicações por ano.....	28
Figura 10 - Origens, resultados e medidas preventivas da RAA	30
Figura 11 - Composição do Vidro sem uso de caco e com uso de caco na produção.....	32
Figura 12 - Contrate do comportamento do volume específico versus temperatura exibidos pelos materiais cristalinos e não-cristalinos.	33
Figura 13 - Tetraedro de Silício e Oxigênio $Si_4 + 4 -$	35
Figura 14 - Arranjo dos átomos de silício e oxigênio em uma célula unitária de cristobalita, um polimorfo do SiO ₂	35
Figura 15 - Representação esquemática das posições dos ions em um vidro de sódio-silicato	36
Figura 16 - Abatimento de concreto contendo várias quantidades de CWG em substituição ao agregado fino, que foi adquirido de vários estudos	40
Figura 17 - Resistência à compressão de concreto contendo várias quantidades de resíduo de vidro triturado em substituição ao agregado fino, que foi adquirida em vários estudos.....	41
Figura 18 - Resistência à flexão de concreto contendo várias quantidades de resíduo de vidro triturado adquirida de vários pesquisadores	42
Figura 19 - resistência de ruptura à tração de concreto contendo várias quantidades de resíduo de vidro triturado adquirida em vários estudos.....	42
Figura 20 - Módulo de elasticidade do concreto contendo várias quantidades de resíduo de vidro triturado adquirido em vários estudos	43
Figura 21 – Efeito da substituição por areia de vidro na expansão RRA aos 14 dias de diversos estudos.	45
Figura 22 – Fluxograma das etapas Experimentais do trabalho	46
Figura 23 – linha de moagem dos resíduos de vidro da empresa RANENI de Varginha-MG.	49
Figura 24 - teste de fluxo de argamassa.....	52
Figura 25 - Execução do Ensaio de Fluidez – sequência de execução de (a) a (f)	52
Figura 26 – teste de viscosidade em argamassa.....	53
Figura 27 – Realização de Ensaio de Viscosidade	53
Figura 28 – Ensaio no estado endurecidos realizados (a) resistência à compressão axial (b) resistência a tração na flexão e (c) resistência à tração por compressão diametral.	54
Figura 29 – Corpos de prova submersos em água	55
Figura 30 – Corpos de prova moldados para ensaio de ocorrência de RAA	55
Figura 31 – (a) barras de argamassa em recipiente com solução e (b) recipiente selado e em estufa	56
Figura 32 – (a) Equipamento de medição e barra-padrão adaptados para o estudo, (b) execução de medição de barra de argamassa.....	57
Figura 33 - Curva granulométrica da areia	59
Figura 34 – RVM original	60
Figura 35 - Curva granulométrica do RVM	61
Figura 36 – RVM fino original separado em grupos por dimensão máxima de grão	61
Figura 37 – Comparação entre as curvas granulométricas da areia e do RVM original	62
Figura 38 – RVM separado por dimensão de grãos retidos nas peneiras	62
Figura 39 – Valores do parâmetro de fluidez G _m por traço de argamassa autoadensável	64
Figura 40 – Valores de parâmetro de viscosidade R _m por traço de argamassa autoadensável	65
Figura 41 – Resistência à compressão axial aos 28 dias.....	67
Figura 42 – Resistência à compressão dos resultados de Tuam (2018) com os valores médios de resistência obtidos neste trabalho	68

Figura 43 - Resistência à tração indireta para cada traço de argamassa autoadensável	70
Figura 44- Variação de resistências em relação ao traço 0 RVM	71
Figura 45 – Curvas de Força x Deslocamento para diferentes traços de argamassa autoadensável	72
Figura 46 – Forças máximas e variação em relação ao traço controle	73
Figura 47 – Resistência à tração na flexão e à compressão diametral	74
Figura 48 - Absorção de água para traços de argamassa autoadensável e os de Tuam (2018)	75
Figura 49 - Expansão por reação álcali-agregado - Método Acelerado Grupo AAA 0% RVM.....	78
Figura 50 - Expansão por RAA - Método Acelerado Grupo AAA 5% RVM	78
Figura 51 - Expansão por reação álcali-agregado - Método Acelerado Grupo AAA 10% RVM.....	78
Figura 52 - Expansão por reação álcali-agregado - Método Acelerado Grupo AAA 15% RVM.....	79
Figura 53 - Expansão por reação álcali-agregado - Método Acelerado Grupo AAA 20% RVM.....	79
Figura 54 - Expansão por reação álcali-agregado - Método Acelerado Grupo AAA 30% RVM.....	80
Figura 55 - Expansão por reação álcali-agregado - Método Acelerado Grupo AC 30% RVM.....	80
Figura 56 - Comparação entre as expansões das barras com teor de substituição de 30%	81
Figura 57 – Expansão acumulada ao final dos 28 dias em solução NaOH 1N à temperatura de $(80 \pm 2) ^\circ\text{C}$ das barras de argamassa autoadensável	81
Figura 58 - Expansão por reação álcali-agregado - Método Acelerado para todos os traços	82
Figura 59 – Barras do traço AAA 0 RVM após ensaio de expansão	83
Figura 60 – Presença de RVM e sinais de fissura, estufamento e manchas brancas em barra do traço AAA 5 RVM.....	83
Figura 61 – trincas radiais em torno de material branco em área lascada em barra de argamassa traço AAA 10 RVM.....	84
Figura 62 – Seções de barra de argamassa traço 10 RVM após ensaio de expansão	84
Figura 63 – Barra do traço 15 RVM em seção e área estufada.....	84
Figura 64 - Traço AAA 20 RVM: seção de barra de argamassa; barras com sinais de material esbranquiçado	85
Figura 65 – barras de AAA com 30% de substituição de areia por vidro após ensaio de expansão por RAA	85
Figura 66 – Barra de argamassa convencional com 30% de substituição de areia por RVM após ensaio de expansão por RAA	86
Figura 67 – Aspecto geral do resíduo de vidro moído utilizado nos traços	90
Figura 68 - mapeamento de EDS do resíduo de vidro moído.....	91
Figura 69 – Espectro de EDS do RVM – análise pontual	91
Figura 70 – Imagem de MEV do traço 0 RVM – identificação das fases pasta e agregado	92
Figura 71 – Espectro de EDS no ponto 7 da fase de argamassa do traço 0 RVM	93
Figura 72 – Imagem de MEV do traço 20 RVM - zona de transição entre a pasta e grão de RVM.....	94
Figura 73- Identificação das fases na imagem de MEV do traço 10 RVM	94
Figura 74 – (a) detalhe do poro preenchido com gel MEV (b) Espectro de EDS mostrando a composição química típica de RAA	95
Figura 75 – Imagem de MEV e espectro de EDS em possível produto da RAA em argamassa traço 0 RVM.....	96
Figura 76 – imagem MEV de uma partícula de vidro mostrando uma formação de ASR no limite da partícula em argamassa com agregado de vidro em 100%	96
Figura 77 – Imagem de MEV de argamassa AAA 5 RVM após ensaio de expansão	97
Figura 78 – Imagem MEV mostrando gel amorfo em toda a pasta de cimento e espectro EDS	97
Figura 79 – Imagem MEV e espectro EDS pontual de RVM e possível produto de RAA em argamassa com 5% de RVM.....	98
Figura 80 – imagens de MEV de argamassa com agregado silicoso com (a) 0% de substituição por vidro e (b) 20% de substituição por vidro	99
Figura 81 – Imagem MEV e mapeamento EDS evidenciando as fases e as diferenças entre os agregados no traço AAA RVM 20	100
Figura 82 – Imagens MEV AAA (a) x AC (b) com 30% de RVM	100
Figura 83 – Imagens MEV AAA (a) x AC (b) com 30% de RVM	101
Figura 84 – Imagens MEV AAA (a) x AC (b) com 30% de RVM	101
Figura 85 – imagens de MEV de (a) Cristais aciculares na interface agregado/argamassa, (b) Produtos cristalizados de RAA gel apresentando estrutura rendada.....	102
Figura 86 – Produtos cristalizados de RAA: cristais entrelaçados fibrosos, (b) Aglomerado de produtos na forma de bastonetes sobre a argamassa.	102
Figura 87 – formações estruturadas de possível produto de RAA e fissuras de diversas aberturas na argamassa traço AC 30 RVM.....	103
Figura 88 – partículas de RVM envolvidas por possível produto da RAA no traço AC 30 RVM	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do concreto autoadensável em função das propriedades no estado fresco	16
Tabela 2 - Publicações sobre RAA da base <i>Scopus</i> , 14 primeiros países.....	27
Tabela 3 - Estruturas Hidráulicas no Brasil com reação álcali-agregado	29
Tabela 4 - Composição e Característica de Alguns Vidros Comerciais Comuns	32
Tabela 5 - Formadores, estabilizadores e modificadores de vidro para o vidro investigado (% em peso)	37
Tabela 6: Propriedades do CPV-ARI	47
Tabela 7: Características físicas e químicas da sílica ativa.....	48
Tabela 8: Características físicas e químicas do aditivo superplastificante ADITI-SUPER H25	49
Tabela 9 – Traço Unitário em massa inicial de argamassa autoadensável (AAA)	50
Tabela 10 – Traços unitários em massa utilizados de argamassa autoadensável (AAA)	51
Tabela 11 - Número de corpos de prova por traço por ensaio no estado endurecido de argamassa autoadensável (AAA)	51
Tabela 12 – Características da areia	59
Tabela 13 - Características do RVM	60
Tabela 14 – Exemplo de massa necessária para a construção de 1Kg de RVM com a granulometria similar à da areia	63
Tabela 15 – Ensaio de espalhamento para determinação do parâmetro de fluidez G_m	64
Tabela 16 – Ensaio de Funil V para determinação do parâmetro de viscosidade R_m	65
Tabela 17 – Ensaio de resistência à compressão axial dos traços do Grupo 1.....	66
Tabela 18 – Ensaio de resistência à compressão axial dos traços do Grupo 2.....	66
Tabela 19 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral – Força de ruptura (kN) por amostra..	69
Tabela 20 – Resistência à tração indireta para os traços de argamassa autoadensável	69
Tabela 21 – Força máxima traços de argamassa autoadensável no ensaio de flexão	72
Tabela 22 – Resumo dos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão	73
Tabela 23 – Ensaios de massa específica, índice de vazios e absorção de água para traços de argamassa autoadensável	75
Tabela 24 – Ensaio de expansão pelo método acelerado para o traço controle 0 RVM	76
Tabela 25 – Traços 0 RVM, 5RVM, 10 RVM, 15 RVM e 20 RVM para as argamassas autoadensáveis ao ensaio de expansão acelerada	77
Tabela 26 - Resultados dos traços 30 RVM para a argamassa autoadensável e argamassa convencional ao ensaio de expansão acelerada	77
Tabela 27 – Resumo dos resultados dos ensaios quantitativos.....	89
Tabela 28 – Valores relativos em massa dos elementos químicos constituintes do RVM encontrados por espectro EDS	92
Tabela 29 – Composições químicas de vidros e areais comum.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AAA – argamassa autoadensável

ABIVIDRO - Associação Brasileira das Indústrias de Vidro

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRAVIDRO - Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros
Planos

AC – argamassa convencional

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

ARI – alta resistência inicial

CAA – concreto autoadensável

CAD – concreto de alto desempenho

CCV – concreto convencional vibrado

CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem

EDS - Espectroscopia por energia dispersiva

EFNARC - European Federation of National Trade Associations Representing
Producers and Applicators of Specialist Building products

MEV – microscópio eletrônico de varredura

RAA – reação álcali-agregado

RVM – resíduo de vidro moído

SPA - superplastificante

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1.	Justificativa	12
2.	Objetivos	14
2.1.	Objetivo geral	14
2.2.	Objetivos específicos	14
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1.	Concreto autoadensável (CAA)	15
3.2.	Patologia no concreto.....	18
3.3.	Reação álcali-agregado	19
3.3.1.	Definições	19
3.4.	Desenvolvimento da reação	20
3.5.	Panorama histórico da RAA no Brasil e no mundo	26
3.6.	Normas e prevenção da RAA.....	30
3.7.	O vidro	31
3.7.1.	Aspectos gerais e produção do vidro	32
3.7.2.	Estrutura do vidro	34
3.8.	Uso de resíduos na construção civil.....	37
3.8.1.	Reciclagem e reaproveitamento de resíduo de vidro.....	38
3.8.2.	Uso do resíduo de vidro como agregado fino	39
3.8.3.	Ocorrência de RAA em compósitos cimentícios contendo vidro	44
4.	ETAPA EXPERIMENTAL	46
4.1.	Fluxograma das etapas experimentais.....	46
4.2.	Materiais	47
4.2.1.	Resíduo de vidro moído (RVM)	49
4.3.	Métodos	49
4.3.1.	Dosagem da Argamassa Autoadensável	49
4.4.	Classificação no estado fresco	51
4.4.1.1.	Ensaio de Fluidez – Tronco de cone	51
4.4.1.2.	Ensaio de Viscosidade – Funil V	52
4.5.	Ensaio no estado endurecido	53
4.6.	Ensaio sobre ocorrência de RAA.....	55
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1.	Resultados da caracterização dos agregados	59
5.2.	Resultados dos ensaios no estado fresco	63
5.2.1.	Resultados do ensaio de Fluidez	63
5.2.2.	Resultados do ensaio de Viscosidade.....	65
5.3.	Resultados dos ensaios no estado endurecido	66

5.3.1.	Resultados dos ensaios de resistência à compressão	66
5.3.2.	Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral	68
5.3.3.	Resultados dos ensaios de resistência à flexão.....	71
5.3.4.	Resultados dos ensaios determinação de massa específica, índice de vazios e absorção de água .	74
5.3.5.	Resultados dos ensaios de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.....	76
5.4.	Resumo dos ensaios quantitativos.....	89
5.5.	Análise Microestrutural	90
5.5.1.	Análise microestrutural do RVM.....	90
5.5.2.	Análise microestrutural das amostras em estado endurecido	92
5.5.3.	Análise microestrutural das amostras submetidas ao ensaio acelerado de RAA.....	95
6.	CONCLUSÕES	105
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	106
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é o que mais consome recursos naturais e energia em toda sua cadeia produtiva. Com o constante crescimento da demanda e o avanço da tecnologia da construção, ultimamente tem-se observado um aumento considerável de edificações e de obras de infraestrutura. Por outro lado, o déficit de moradia e obras de arte que necessitam ser substituídas e, até mesmo, novas construções, pode nortear o consumo destes recursos naturais a um nível insustentável (GURSEL et al., 2014).

A busca de novas fontes renováveis ou de menor impacto é um problema a ser resolvido tanto do ponto de vista ambiental, como também da disponibilidade de recursos para se conseguir continuar construindo num futuro bem próximo. Vale ressaltar que as novas tendências na construção civil apontam, cada vez mais, para restrição da utilização de materiais de fonte naturais e, conseqüentemente, o aumento da demanda de materiais alternativos, como resíduos.

No Brasil, a resolução Conama n.º 307 estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil (CONAMA, 2002), e os municípios tendem a desenvolver planos e normatizar seus códigos de obras para o uso de resíduos na construção civil.

O concreto autoadensável (CAA) é um produto de origem recente que vem melhorar não só as propriedades, mas também o processo produtivo e a aplicação em relação ao tradicional concreto convencional vibrado (CCV) (ALI e AL-TERSAWY, 2012). Adicionalmente, abre muitas possibilidades para o estudo do uso de outras fontes de insumos para produção, em especial o uso de resíduos de diversas origens, como é o caso do vidro (FARAJ et al., 2020; JAYA et al., 2017).

1.1. Justificativa

A maior parte dos materiais utilizados é explorada na natureza e de fontes já escassas, como os componentes do concreto, que são de origem mineral. E o concreto é um dos materiais construtivos mais consumidos no mundo, com uma taxa de consumo global próxima a 25 gigatoneladas por ano (GURSEL et al., 2014).

Assim como no CCV, internamente na estrutura do CAA ocorrem vários processos químicos, como a Reação Álcali-Agregado (RAA) e o ataque interno por sulfatos. Tais processos acarretam a deterioração do concreto e conseqüentemente podem levar à perda de suas propriedades, com comprometimento da durabilidade e, conseqüentemente, das

estruturas compostas pelo material. A RAA ocorre no concreto endurecido, sendo uma reação expansiva, que causa tensões de tração que podem superar a resistência do material, ocasionando fissuras e deformações. Basicamente se origina na reação do sódio e do potássio presentes no cimento Portland, com minerais reativos presentes nos agregados, formando um gel higroscópico que, na presença de umidade, se expande. (PEREIRA et al., 2018) (LIMA, 2016). O que os minerais reativos contêm para ocorrer essa reação é sílica reativa (SiO_2), que também está presente nos vidros.

Os vidros comuns, como os de embalagens, são 100% recicláveis, embora a cadeia produtiva ainda não consiga realizar o ciclo completo. Mas existem vários tipos de vidro, como os temperados, que são de difícil reciclagem, o que resulta em seu descarte como resíduo sem destino certo e quase sem solução. As pesquisas desenvolvidas no sentido de utilizar resíduo de vidro em substituição aos agregados do CAA demonstram que o material tem suas propriedades alteradas, em especial a resistência de ruptura à compressão (MOHAJERANI et al., 2017).

Este trabalho propõe investigar o efeito da substituição de parte dos agregados no CAA por resíduo de vidro, através de ensaios em Argamassa Autoadensável (AAA), observando os resultados de ensaios no estado fresco e endurecido, além de o efeito desta substituição na ocorrência de RAA.

Com isso, além de aprimorar o conhecimento sobre a tecnologia de compósitos cimentícios em geral, em especial sobre o CAA com resíduo, o estudo visa contribuir com a preservação do meio ambiente, ao demonstrar uma alternativa viável para o destino de um resíduo problemático cada vez mais abundante, e que pode ainda diminuir a exploração das fontes finitas dos tradicionais agregados usados em materiais cimentícios.

2. Objetivos

2.1. Objetivo geral

Avaliar a viabilidade de produção de Argamassa Autoadensável (AAA) com resíduo de vidro substituindo em proporções os agregados miúdos.

2.2. Objetivos específicos

- Testar traços que produzam AAA com a substituição de partes do agregado miúdo por resíduos de vidro.
- Realizar ensaios para a caracterização das propriedades mecânicas e físicas das argamassas produzidas.
- Investigar a ocorrência de RAA relacionada ao material substituto do agregado.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Concreto autoadensável (CAA)

Segundo EFNARC (2005), o Concreto Autoadensável (CAA) foi desenvolvido no Japão no final da década de 1980, embora a Europa já utilizasse concretos que requerem pouca vibração desde o início dos anos de 1970. Em meados dos anos 1990, o CAA foi utilizado na Suécia em obras de rede de transporte.

O CAA pode ser definido como o concreto que possui a capacidade de fluir no interior da fôrma, por ação exclusiva de seu peso próprio, sem a necessidade de qualquer adensamento mecânico, sendo esta a principal diferença entre ele e o concreto convencional, também chamado de Concreto Convencional Vibrado (CCV) (OKAMURA e OUCHI, 2003). O CAA deve possuir também a habilidade de passar pelos obstáculos, sem apresentar bloqueio das partículas de agregado, além de grande resistência à segregação e à exsudação (OKAMURA e OUCHI, 2003).

Dentre as diversas vantagens do uso do CAA nas obras destaca-se a maior rapidez na execução das concretagens; eliminação de equipamentos vibratórios trazendo menos ruído e mais segurança ao ambiente; potencial nível superior de acabamento e durabilidade proporcionados pelo alto nível de homogeneidade; menor índice de vazios; resistência uniforme; também pode apresentar uma resistência inicial mais alta e consequente liberação do uso mais rápido das estruturas (EFNARC, 2005).

Sobre as vantagens do uso, o CAA representa uma evolução do material, que pode ter mais controle de qualidade, evitar erros humanos em relação a mistura e trabalhabilidade, e ainda resolver os problemas presentes na aplicação do CCV, como ruído e vibração (ALI e AL-TERSAWY, 2012).

No Brasil, a NBR 15823 – Concreto Autodensável (ABNT, 2017) é composta por 6 partes. A Parte 1 trata da classificação, controle e recebimento no estado fresco, e as demais partes tratam dos métodos de ensaio para determinação do espalhamento, do tempo de escoamento, do índice de estabilidade visual, da habilidade passante, da determinação da viscosidade e da determinação da resistência à segregação, cujas tabelas 1 a 9 estão reunidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação do concreto autoadensável em função das propriedades no estado fresco

CLASSES DE ESPALHAMENTO (<i>slump-flow</i>)	CLASSE	ESPALHAMENTO mm	MÉTODO DE ENSAIO
		SF 1	500 a 650
	SF 2	660 a 750	
	SF 3	760 a 850	
CLASSES DE VISCOSIDADE PLÁSTICA APARENTE t_{500} (sob fluxo livre)	CLASSE	t_{500} s	MÉTODO DE ENSAIO
	VS 1	≤ 2	ABNT NBR 15823-2
	VS 2	> 2	
CLASSES DE ÍNDICE DE ESTABILIDADE VISUAL (sob fluxo livre)	CLASSE	IEV	MÉTODO DE ENSAIO
	IEV 0	sem evidencia de segregação ou exsudação	ABNT NBR 15823-2
	IEV 1	Sem evidência de segregação e leve exsudação	
	IEV 3	presença de pequena auréola de argamassa ($\leq 10\text{mm}$) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto	
CLASSES DE HABILIDADE PASSANTE PELO ANEL J (sob fluxo livre)	CLASSE	ANEL J mm	MÉTODO DE ENSAIO
	PJ 1	0 a 25 com 16 barras de aço	ABNT NBR 15823-3
	PJ 2	25 a 50 com 16 barras de aço	
CLASSES DE HABILIDADE PASSANTE PELA CAIXA L (sob fluxo confinado)	CLASSE	CAIXA L (H2/H1)	MÉTODO DE ENSAIO
	PL 1	$\geq 0,80$. com duas barras de aço	ABNT NBR 15823-4
	PL 2	$\geq 0,80$. com três barras de aço	
CLASSES DE HABILIDADE PASSANTE PAL CAIXA U (sob fluxo confinado) - Ensaio facultativo	CLASSE	CAIXA U (H2-H1)	MÉTODO DE ENSAIO
	PU	$\leq 30\text{mm}$	ABNT NBR 15823-4
CLASSES DE VISCOSIDADE PLÁSTICA APARENTE PELO FUNIL V (sob fluxo confinado)	CLASSE	FUNIL V s	MÉTODO DE ENSAIO
	VF 1	< 9	ABNT NBR 15823-5
	VF2	9 a 25	
CLASSES DE RESISTÊNCIA À SEGREGAÇÃO PELA COLUNA DE SEGREGAÇÃO	CLASSE	COLUNA DE SEGREGAÇÃO %	MÉTODO DE ENSAIO
	SR 1	≤ 20	ABNT NBR 15823-6
	SR 2	≤ 15	
CLASSES DE RESISTÊNCIA À SEGREGAÇÃO PELO MÉTODO DA PENEIRA - Ensaio facultativo	CLASSE	MATERIAL RETIDO NA PENEIRA %	MÉTODO DE ENSAIO
	TP 1	≤ 20	ABNT NBR 15823-6
	TP 2	≤ 15	

Fonte: próprio autor adaptado de NBR 15823

Como requisitos gerais os materiais para CAA devem atender à NBR 12655 (ABNT, 2015) e serem caracterizados segundo os ensaios especificados na NBR 15823 – Parte 1 (ABNT, 2017).

Podem ser utilizados como materiais finos o cimento, sílica ativa, metacaulim e outros materiais pozzolânicos que atendam aos requisitos de normas específicas, sendo que os materiais que não são o cimento Portland devem ser utilizados mediante as orientações de seus fabricantes.

Os agregados devem atender à NBR 7211 (ABNT, 2019), sendo considerado agregado graúdo aquele cujos grãos que passam pela peneira de abertura de malha de 75mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75mm, e agregado miúdo aquele que cujos grãos passam pela peneira de abertura de malha de 4,75mm e ficam retidos na de 0,150mm.

Os agregados miúdos (também chamados agregados finos) têm maior influência nas propriedades frescas do CAA do que os agregados graúdos, embora estes influenciam diretamente no fluxo e capacidade de passagem sendo que, quando mais esféricas for a forma do grão, maior será a redução do atrito interno proporcionando maior fluxo, além de serem menos propensos a causar bloqueio. Mesmo sendo possível utilizar tamanhos maiores, os agregados graúdos têm tamanho geralmente limitado de 12 a 20mm, sendo que o espaçamento das armaduras é o fator principal na determinação do tamanho máximo (EFNARC, 2005).

Para os aditivos a serem utilizados deve ser observada a NBR 11768 (ABNT, 2019) que trata dos aditivos químicos para concretos de cimento Portland em geral. Os aditivos químicos em geral são utilizados em quantidades que não ultrapassam 5% da massa de ligante total contida do concreto e tem o objetivo de modificar suas propriedades nos estados fresco e/ou endurecido. Existem sob várias designações (como redutor de água, controlador de hidratação, acelerador de pega e/ou resistência, compensador ou redutor de retração, incorporador de ar, redutor de corrosão ou permeabilidade, modificador de viscosidade) cada um com requisitos gerais e específicos determinados.

No caso do CAA é essencial a utilização de aditivos superplastificantes, como também os modificadores de viscosidade também são bastante utilizados, entre outros, a depender do tipo de aplicação, desempenho desejado e dos demais materiais componentes. O superplastificante é um aditivo tipo redutor de água que deve trazer fluidez à mistura ao mesmo tempo que mantem o efeito de dispersão durante o tempo necessário para o transporte e a aplicação do concreto. Já o modificador de viscosidade confere uma melhor coesão sem alterar a fluidez, minimizando o efeito das variações no material e tornando o CAA mais robusto e menos sensível a pequenas variações nas condições e proporções dos outros constituintes (EFNARC, 2005).

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008) apud Diniz et al. (2018), as adições minerais pozolânicas ou inertes assim como os materiais cimentícios suplementares possibilitam a diminuição do uso de cimento, mas mantendo a quantidade de finos no concreto sendo, portanto, interessantes ao CAA, que tem um maior consumo de finos.

De acordo com a reatividade com a água as adições podem ser classificadas como: Tipo I – Inerte ou semi-inerte, que compreende mineral filler (calcário, dolomita) e pigmentos; Tipo II – Pozolânico (cinza volante e sílica ativa) ou Hidráulica (escória granulada de alto forno). Dentre os pozolânicos, a sílica ativa possui alto nível de finura e forma praticamente esférica, cujo uso melhora a resistência a segregação e confere boa coesão ao concreto (EFNARC, 2005).

3.2. Patologia no concreto

De maneira geral, designa-se por Patologia das Estruturas “ campo da engenharia das construções que se ocupa do estudo das origens, formas de manifestação, consequências e mecanismos de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas.” (SOUZA, 1998).

As patologias podem ser geradas por falhas nas etapas de concepção do projeto, de execução da estrutura e ainda de utilização e manutenção das estruturas. Definida na etapa de projeto ou de execução, a utilização dos materiais inadequados pode desencadear patologias que vão comprometer a durabilidade da estrutura, como, no caso do concreto, a inadequação na dosagem e no uso de aditivos, e a utilização de agregados reativos (SOUZA, 1998).

Segundo a EFNARC (2005), podemos entender como durabilidade a capacidade de resistir a situações agressivas do meio ambiente durante o tempo de vida útil para que foi projetada uma estrutura de concreto, sem comprometer o desempenho exigido.

No Brasil, a NBR 6118 (ABNT, 2014) em sua seção 6 trata das diretrizes para a durabilidade nas estruturas de concreto armado, onde a determinação da classe de agressividade do ambiente precede à de esforços de qualquer natureza (mecânica, térmica, etc.) para a correta definição de parâmetros de classe de concreto, relação água/cimento e cobrimento nominal das armaduras.

De natureza porosa, a permeabilidade do concreto está diretamente ligada à sua durabilidade, uma vez que a permissibilidade do transporte interno de água, gases e outros agentes agressivos é diretamente proporcional à sua degradação, bem como às armaduras internas, no caso do concreto armado. Dentre as causas naturais, assim como a porosidade, as causas químicas existem e possuem papel de destaque na degradação do concreto, muito embora a impressão de “sólido”, “inerte” e “eterno” façam com que, erroneamente, os materiais cimentícios sejam pouco bem tratados com relação à sua proteção e preservação. Dentre as causas químicas podemos relacionar: expansibilidade de certos constituintes do

cimento; presença de cloretos no concreto; presença de ácidos e sais no concreto; presença de anidrido carbônico; presença da água; elevação da temperatura interna do concreto. Além destas, reações internas do concreto como a reação álcali-agregado, a reação álcali-dolomita e reação entre rochas caulinizadas, ou feldspatos calco-sódicos, que contêm alumina, em presença do cálcio do cimento, com os íons sulfatos (SOUZA, 1998).

3.3. Reação álcali-agregado

Os concretos podem sofrer internamente vários processos químicos, como a Reação Álcali-Agregado (RAA), que acarretam a deterioração do concreto e conseqüentemente podem levar à perda de suas propriedades, com comprometimento das estruturas compostas pelo material.

3.3.1. Definições

A NBR 15577-1 define a RAA como sendo:

A reação química que ocorre em argamassas ou concretos envolvendo os íons hidroxila (OH⁻) associados com os componentes alcalinos sódio e potássio, provenientes do cimento Portland ou outras fontes, com certas fases minerais que podem estar presentes em agregados graúdos ou miúdos, que, sob certas condições, pode causar expansão deletéria do concreto ou argamassa (ABNT, 2018).

A RAA ocorre no concreto endurecido, sendo uma reação expansiva, que causa tensões de tração que podem superar a resistência do material, ocasionando fissuras e deformações. Basicamente se origina na reação do sódio e do potássio presentes no cimento Portland, com minerais reativos presentes nos agregados, formando um gel higroscópico que, na presença de umidade, se expande (PEREIRA et al., 2018; LIMA, 2016).

A RAA é classificada em três formas, sendo Reação Álcali-sílica, Reação Álcali-silicato e Reação Álcali-carbonato, sendo que esta última não foi observada no Brasil.

- Reação Álcali-sílica: é a reação mais comum, onde as hidroxilas provenientes dos álcalis do cimento reagem com a sílica presente nos agregados, gerando um gel expansivo. Os materiais reativos encontram-se como: opala (amorfa) ou sílica hidratada, calcedônia (criptocristalina), quartzo deformado, cristobalita (cristalina), tridimita (cristalina) (VALDUGA, 2002).
- Reação Álcali-Silicato: É a reação mais encontrada no Brasil, em diversas barragens. Parecida com a reação Álcali-Sílica ocorrendo, entretanto, de forma mais lenta, é a reação entre hidroxilas dos álcalis do cimento e silicatos. Os silicatos podem estar presentes em rochas sedimentares como argilitos e siltitos, metamórficas como gnaisses

e quartizitos, e magmáticas como os granitos. Sua lentidão é explicada pela presença de quartzo deformado e de os minerais reativos estarem mais disseminados na matriz. (VALDUGA, 2002).

- Reação Álcali-Carbonato: ocorre entre alguns agregados de calcário dolomítico e os álcalis do cimento, considerada uma reação bem diferente da álcali-sílica, e que não apresenta formação de gel expansivo. Outra diferença importante é a de que no caso da reação álcali-carbonato o álcali é regenerado, sendo citado por (NEVILLE, 2016) como uma provável razão que o uso de pozolanas não produz efeitos no controle desta reação.

O produto da reação entre a sílica reativa dos agregados e os álcalis do cimento é um gel, higroscópico (gel sílico-alcálico). Na presença de umidade o gel torna-se expansivo, produzindo tensões de tração, da ordem de 11 MPa. A resistência do concreto à tração é da ordem de 10% de sua resistência a compressão, assim, mesmo os concretos de grande resistência (C50 e acima), sofrem com as tensões causadas pela expansão, gerando fissuras e conseqüentemente comprometendo a resistência e a durabilidade da peça estrutural.

3.4. Desenvolvimento da reação

Nem toda peça de concreto feita com agregados potencialmente reativos irá desencadear a RAA, pois, além deste fator, são necessários outros dois agindo de forma combinada, que são a alta concentração de álcalis e a umidade adequada (NEVILLE, 2016 e GLASSER, 1992 apud. LIMA, 2016).

Os álcalis estarão presentes no cimento provenientes de seu processo de fabricação em seu principal componente, o clínquer, onde durante a clínquerização ocorrida a uma temperatura da ordem de 1500°C os álcalis Na_2O e o K_2O vão aderir à superfície do clínquer. Relaciona-se a condensação do vapor quente rico em álcalis, possivelmente em forma de sais de sulfato, à fixação à superfície dos grãos, como também bloqueando a estrutura cristalina dos minerais de clínquer na forma de metais alcalinos. Os sulfatos alcalinos têm alta solubilidade em água, o que permite que na hidratação do clínquer os álcalis deles provenientes estejam disponíveis mais rapidamente do que os álcalis que estão na estrutura cristalina dos minerais. Embora a taxa de hidratação das fases do clínquer, o tipo de cimento e a distribuição das fases do clínquer sejam variantes para a liberação total dos álcalis, Diamond (1975) e Glasser (1992) apud Munhoz (2007), consideram provável que todos os álcalis, independente da fonte, estejam disponíveis para que a RAA ocorra, já que esta é uma reação que ocorre de forma lenta.

Mas o cimento não é a única fonte de álcalis para a reação, sendo algumas outras fontes o cloreto de sódio (NaCl) que pode estar presente no próprio agregado, como em areias dragadas do mar ou deserto que não foram lavadas. Também aditivos comumente utilizados no concreto como a escória de alto-forno, que contém álcalis dissolvidos de forma uniforme no vidro e podem ser liberados quando da hidratação da escória, ainda que de forma mais lenta do que os do clínquer. Cinzas volantes também podem contribuir com a reação, pois, assim como o clínquer, contém álcalis provenientes do seu processo de fabricação, tanto em superfície, com liberação instantânea, quanto em sua estrutura, que pode demorar longos períodos para acontecer. Ainda aditivos superplastificantes e a própria água de emassamento do concreto podem conter álcalis (MUNHOZ, 2007; NEVILLE, 2016 apud LIMA, 2016).

Quando a água está presente na estrutura dos poros do concreto é possível o transporte dos íons e moléculas, e é mais rápido quando os poros estão completamente encharcados (POOLE, 1992 apud LIMA, 2016). Por esta perspectiva, a relação água/cimento (a/c) seria um fator importante, uma vez que a água excessiva além da necessária para a hidratação do cimento fica nos poros, sendo então um facilitador para a RAA. Porém, com uma relação a/c baixa, a concentração de íons alcalinos nos poros será maior e a porosidade será menor. Com menos espaços vazios, a acomodação das tensões internas será menor e maior será a fissuração.

A taxa de difusão dos íons é determinada pelo tamanho dos íons hidratados, mas também pelas microfissuras na matriz cimentícia, tamanho dos poros, temperatura, grau de saturação da água dos poros, e também muito importante, o gradiente de concentração de íons no interior do concreto. Segundo Poole (1992) e Chatterji, Thaulow e Jensen (1988) apud Lima (2016) o transporte dos íons de potássio em direção à sílica ocorre mais rapidamente do que os íons de sódio, sendo então, potencialmente, mais perigosos.

Confirmando que a alta umidade relativa do concreto está diretamente relacionada à expansão, Poole (1992) apud Munhoz (2007) demonstrou em um gráfico, reproduzido na Figura 2, seus estudos de caso e ensaios de laboratório, onde podemos observar sua afirmação de que um percentual de 80% de umidade aumenta extremamente a expansão em relação a percentuais mais baixos.

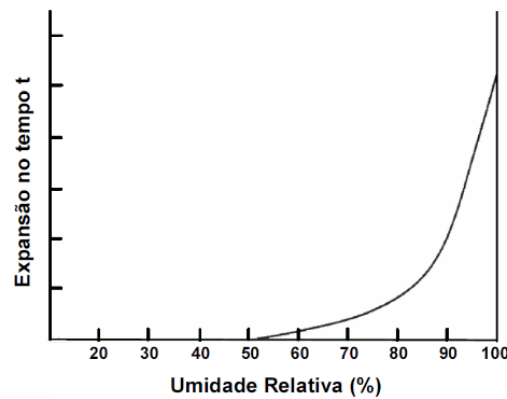


Figura 1 - Efeito da umidade relativa na expansão do concreto devido à reação álcali-agregado
 Fonte: Poole (1992) apud Munhoz (2007)

Isto demonstra que, além do papel de transporte dos íons, a água tem um segundo papel essencial na ocorrência da RAA, sendo que o gel de silicato alcalino, produto da reação, absorve grandes quantidades de água e se expande, dando origem às tensões internas que causam as fissuras. A relação água cimento necessária para a completa hidratação do concreto é de 0,24, muito embora as relações utilizadas nos traços são usualmente entre 0,35 e 0,55, o que gera muita água de sobra mantendo a umidade interna favorável à RAA (POOLE, 1992 e GLASSER, 1992 apud MUNHOZ, 2007).

O terceiro ingrediente para a RAA se desenvolver no concreto é a existência de potencial reativo nos agregados que o compõem, para tanto, o íon hidroxila e os álcalis na solução dos poros deverão encontrar formas de sílica disponíveis a reação química nos agregados.

Munhoz (2007) analisando o trabalho de Hasparyk (1999) sobre as principais fases mineralógicas potencialmente em agregados, observou que estas são quartzo tensionado por esforços tectônicos e seus polimorfos tridimita e cristobalita, com destaque também para as fases amorfas que tem relação com o processo de resfriamento rápido do magma, como o vidro vulcânico, minerais de alteração como a clorofeita, e sílica hidratada – opala. Além destas, sílicas como sílica microcristalina, criptocristalina, calcedônia e feldspato deformados presentes nos agregados podem torna-los potencialmente reativos para RAA. A sílica reativa (SiO_2) é caracterizada por conter uma estrutura cristalina desordenada, o que permite a reação, conforme ilustrado na Figura 3 (COLLINS, 2007 apud MUNHOZ, 2007).

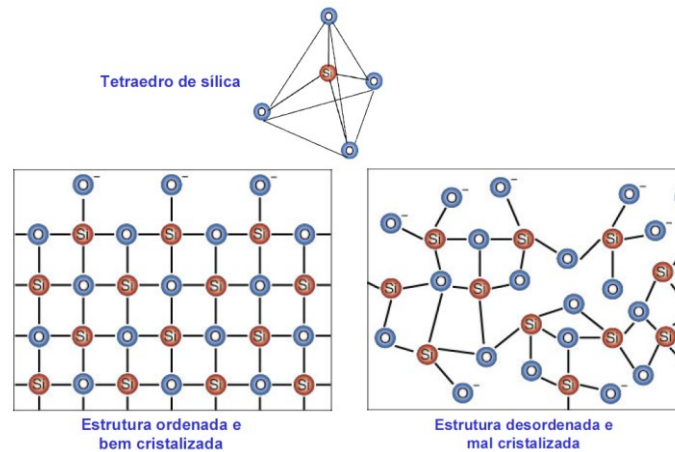


Figura 2 - Arranjo atômico de minerais do grupo da sílica com estrutura ordenada e bem cristalizados, e com estrutura desordenada e mal cristalizados
 Fonte: Collins (2007) apud Munhoz (2007)

Como a maior parte do volume dos concretos e argamassas é composta por seus agregados portanto, indispensável sua presença, desde a descoberta da RAA seus estudos procuraram não só compreender a reação e suas condições de ocorrência, como também as formas de a minimizar e evitar, em parte através do conhecimento dos agregados. A NBR 15577 (ABNT, 2018) traz na primeira de suas sete partes, um guia para a avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para o uso de agregados em concreto. O principal procedimento para avaliar se um agregado é potencialmente reativo é a análise petrográfica, tratada na parte 3 da norma.

Através da observação em microscópio petrográfico, seções delgadas de rocha de 30mm de altura, devem ser analisadas características como textura, granularidade (muito grossa, grossa, média ou fina, levando em conta o tipo de rocha); composição mineralógicas (minerais principais e subordinados, com atenção especial aos minerais opacos); presença (ou ausência) minerais e de fases deletérios quanto à RAA; estimativa da quantidade de quartzo microgranular (menor que 0,15 mm); se presente feldspato em rochas deformadas, indicar a sua textura (se mirmequítica, perítica ou, não aplicável); estado microfissural; estado de alteração da rocha; natureza (ígnea, sedimentar ou metamórfica) e classificação petrográfica da rocha.

Além e inclusive anteriormente ao exame microscópico, a observação macroscópica do agregado deve classificá-la quanto ao tipo (cascalho, pedrisco, fragmento de rocha, testemunho de sondagem ou pedra britada), avaliar as propriedades físico-mecânicas (classificando se a rocha constituinte é muito coerente, coerente, pouco coerente ou friável) e registrar a cor e a estrutura (maciça, foliada, bandada ou outra).

A análise petrográfica da rocha permite classificar o agregado quanto à RAA em potencialmente inócuo ou potencialmente reativo. Ainda segundo a NBR 15577 – 3 (ABNT, 2018), os valores máximos aceitáveis de uma ou mais fases reativas geralmente adotados para classificar um agregado como potencialmente inócuo são: 5 % de quartzo microgranular ou deformado, 3 % de calcedônia, 1% de tridimita ou cristobalita, 3 % de vidro vulcânico e 0,5 % de opala. Acima desses valores os agregados são considerados potencialmente reativos, mas com base em sua experiência e nas demais feições presentes, o petrógrafo pode admitir classificação distinta. Incluir nesta estimativa o quartzo mirmequítico, que deve ser somado na estimativa da quantidade de quartzo microgranular.

Colins (2007) apud Munhoz (2007) apresenta uma sequência de figuras que ilustram a sequência da reação. A solução dos poros do cimento, rica em íons dissolvidos, em contato direto com o agregado com fases reativas está ilustrada na Figura 3.

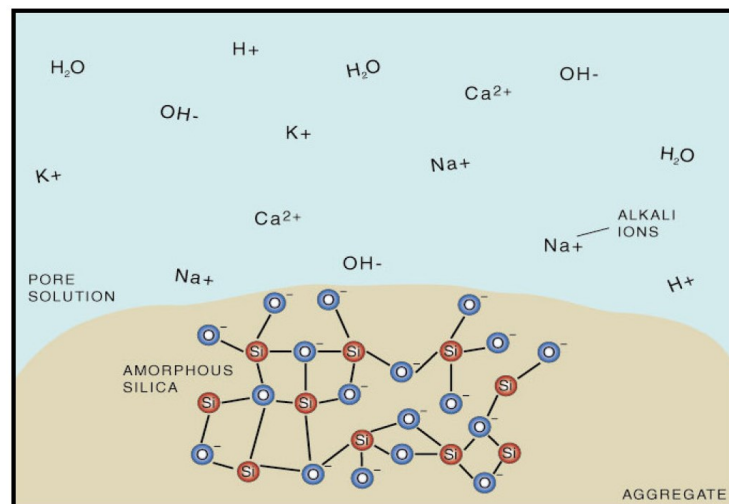


Figura 3 - Grão de agregado em contato com a solução dos poros com fase reativa devido à estrutura cristalina desordenada

Fonte: Collins (2007) apud Munhoz (2007)

Os íons hidroxila (OH^-) as fases reativas reagem quimicamente por dissolução, sendo então a sílica solubilizada em meio altamente alcalino. Em seguida, conforme ilustrado na Figura 4, os íons hidroxila (OH^-) atacam as ligações Si-O-Si no agregado, provocando o rompimento de suas estruturas, dando origem a grupos de silanol (Si-OH).

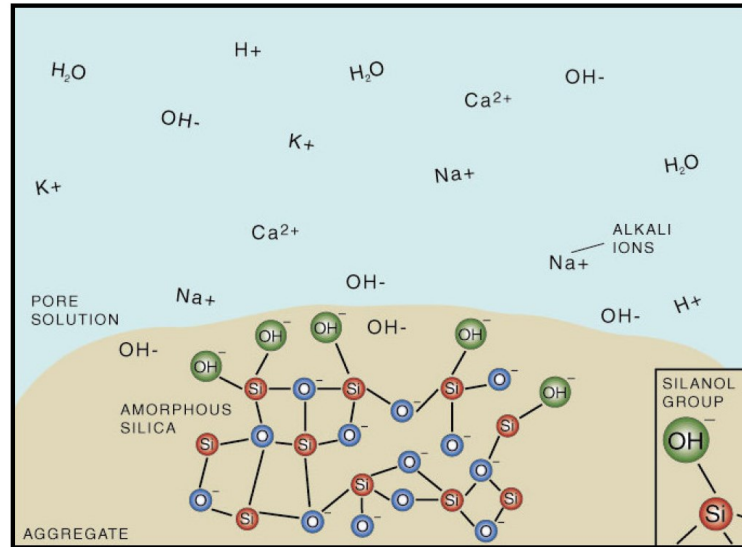


Figura 4 – A superfície do agregado é atacada pelos íons OH^- que rompe a ligação Si-O-Si para formar grupos de silanol

Fonte: Collins (2007) apud Munhoz (2007)

A reação continua e os grupos de silanol são rompidos pelos íons de OH^- em íons SiO^- , sobre a superfície do agregado, conforme ilustra a Figura 5, e aqui termina a primeira fase da reação.

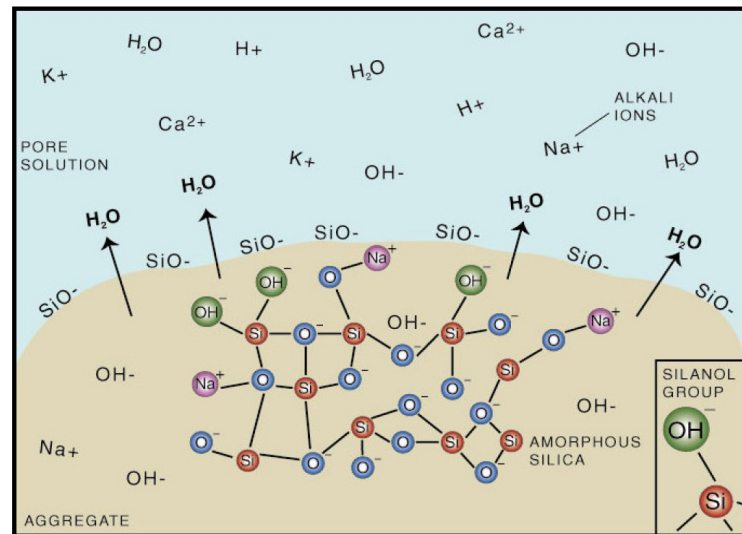


Figura 5 – Grupos de silanol (Si-OH) são rompidos pelos íons OH^- em íons SiO^- , sobre a superfície do agregado

Fonte: Collins (2007) apud Munhoz (2007)

Collins (2007) apud Munhoz (2007) demonstra na Figura 6 que as cargas negativas criadas pelo rompimento das ligações são balanceadas pelos íons alcalinos com cargas positivas (Na^+ , K^+). Os íons SiO^- liberados são atraídos pelos cátions alcalinos da solução dos poros, formando um gel de silicato alcalino em torno do agregado.

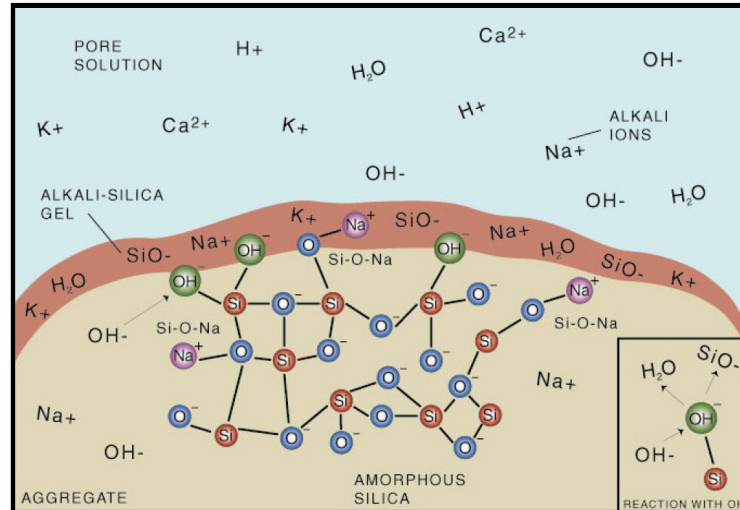


Figura 6 – Os íons de SiO^- liberados são atraídos pelos cátions alcalinos da solução dos poros formando gel de silicato alcalino em torno do agregado. $\text{Si-OH} + \text{Na}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{Si-O-Na}^+ + \text{H}_2\text{O}$

Fonte: Collins (2007) apud Munhoz (2007)

Finalmente, conforme a Figura 7, o efeito que visualizamos macroscopicamente nas estruturas acometidas por RAA é atingido, quando o gel alcalino, ao absorver água, expande, exercendo pressão osmótica sobre a pasta de cimento ou agregado, com força superior à resistência do concreto à tração, fissurando-o (KIHARA, 1997 apud MUNHOZ, 2007).

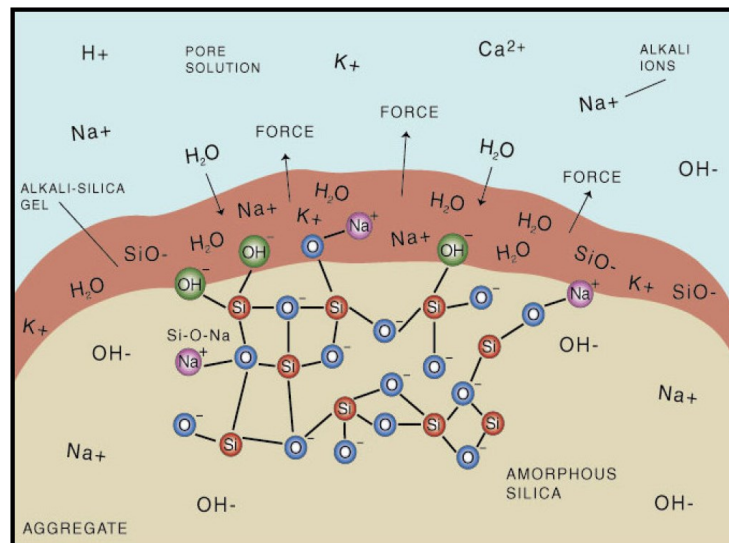


Figura 7 - O gel alcalino, ao absorver água, expande, exercendo pressão osmótica sobre a pasta de cimento ou agregado

Fonte: Collins (2007) apud Munhoz (2007)

3.5. Panorama histórico da RAA no Brasil e no mundo

Uma pesquisa na base de dados *Scopus* em 21-07-2021 com a *string* ("*alkali silica react*" OR "alkali aggregate react*"*) AND (*cement* OR concret* OR aggregate**) limitada a título, resumo e palavras-chave, resultou em 3.255 documentos encontrados. Analisando os países de origens das publicações se observa que mais da metade das publicações foi desenvolvida por cinco países, conforme demonstrado na Tabela 2. Desde a descoberta

inicial do fenômeno da RAA, que ocorreu na década de 1930 na Califórnia, até os dias atuais, os Estados Unidos lideram as pesquisas e publicações sobre o tema, seguido pela China, que juntos concentram cerca de um terço das publicações.

Tabela 2 - Publicações sobre RAA da base *Scopus*, 14 primeiros países

POSIÇÃO	PAÍS	N. DE PUBLICAÇÕES	%
1º	ESTADOS UNIDOS	718	22,06%
2º	CHINA	359	11,03%
3º	CANADÁ	308	9,46%
4º	JAPÃO	211	6,48%
5º	REINO UNIDO	182	5,59%
6º	FRANÇA	152	4,67%
7º	ALEMANHA	110	3,38%
8º	AUSTRÁLIA	107	3,29%
9º	PERU	97	2,98%
10º	ITÁLIA	86	2,64%
11º	SUIÇA	81	2,49%
12º	BRASIL	76	2,33%
13º	POLÔNIA	70	2,15%
14º	PORTUGAL	68	2,09%
	SOMA	2625	80,65%

Fonte: próprio autor

Dentre os 76 documentos publicados pelo Brasil, desde o primeiro publicado em 1997, houve um crescimento nas pesquisas, sendo que 70% das publicações foram nos últimos 10 anos. Considerando que em 2008 foi lançada a primeira norma brasileira tratando da reação e da identificação da potencialidade reativa dos agregados, percebe-se que a pesquisa aumentou em diversos vieses, sendo que são observados alguns como: estudos de casos em estruturas afetadas; adição de materiais de efeito mitigador no cimento e nos compósitos; influência do uso de materiais não convencionais, como resíduos, na produção de compósitos, na ocorrência de RAA; estudos de agregados em determinadas regiões com relação ao potencial reativo, entre outros.

Em seu trabalho Lima (2016) apresenta um breve histórico sobre os estudos de RAA no mundo, sendo que os principais acontecimentos estão ilustrados na Figura 8. A primeira publicação que relacionou o efeito deletérios observado em estruturas de concreto relativamente jovens foi a de Thomas Stanton, em 1940. A existência de RAA foi apontada como a responsável por grandes fissuras nas estruturas observadas, que Stanton relacionou à uma expansão interna do concreto, causada pelos constituintes do mesmo e que, para ele, tinha mais relação com as características dos materiais componentes do que com o ambiente externo.

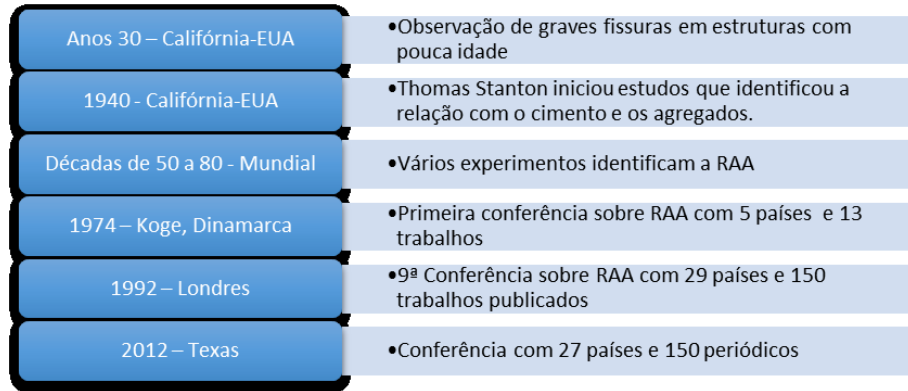


Figura 8 - Histórico do estudo sobre RAA no mundo
Fonte: próprio autor baseado em Lima (2016)

A deterioração do concreto da Represa Parker, no Arizona, foi descrita por Blanks e Meissner em 1941, relatando a observação de alteração nos componentes reativos presentes nos agregados e a formação de um produto da reação RAA naquele concreto. Desde então a observação deste fenômeno em todo o mundo deu origem a diversos estudos, publicações, congressos e conferências sobre o tema.

A Figura 9 evidencia que, desde a primeira publicação nesta base de dados em 1963 a quantidade de estudos publicados envolvendo a *string* pesquisada cresceu modestamente até 2003 e, a partir daquele uma curvatura acentuada até o ano de 2018.

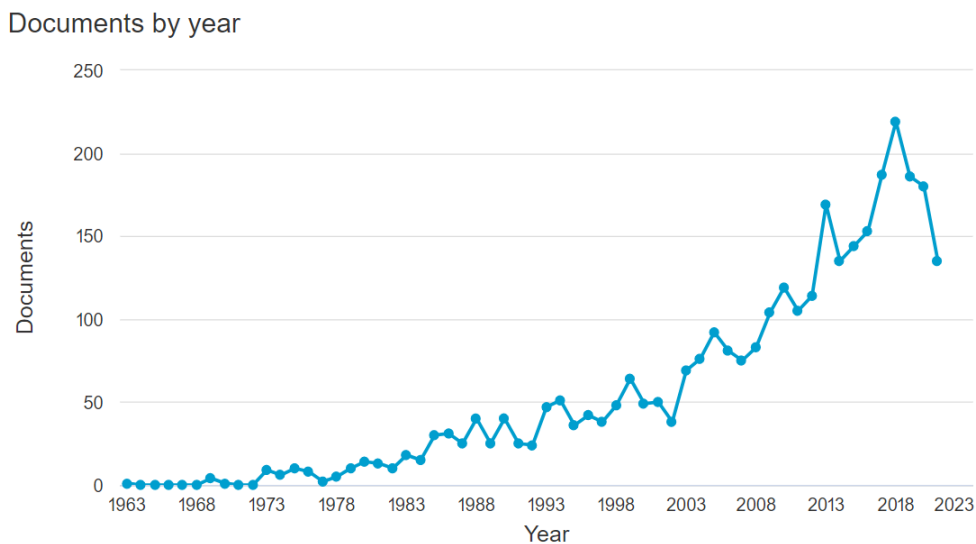


Figura 9 - Numero de publicações por ano
Fonte: adaptado pelo autor da pesquisa na base *Scopus*

Inicialmente, as estruturas identificadas com ocorrência de RAA foram as ligadas à obras hidráulicas, como pontes e barragens, relacionando a condição de existência de umidade para a ocorrência do fenômeno. Também no Brasil foram as obras hidráulicas as primeiras a apresentar sinais de fissuração causada por expansão interna. Como a matriz energética brasileira é baseada principalmente em hidroelétricas, muitos trabalhos foram

realizados desde a primeira identificação, na década de 1960, em diversas barragens brasileiras.

Munhoz (2007) menciona que o primeiro caso em barragem foi divulgado em 1985, ocorrendo na Usina de Moxotó, na cidade de Delmiro Gouveira-AL, e logo em seguida em 1988 foi confirmada a presença na Barragem de Joanes II, Camaçari-BA. Após estas muitas outras estruturas hidráulicas foram sendo identificadas acometidas pela RAA em todo o Brasil, conforme organizado e atualizado por Munhoz (2007) com base na pesquisa de Kihara, Sbrighi Neto e Kuperman (1998), conforme visto na Tabela 3.

Tabela 3 - Estruturas Hidráulicas no Brasil com reação álcali-agregado

Nome da Estrutura	Tipo de estrutura	Fim da construção	RAA notada no ano	Tipo de agregado
Billings-Pedras	Barragem	1936	1992	Granito ¹
Furnas	Barragem	1963	1976	Quartzito ¹
Ilha dos Pombos	Barragem	1924	1991	Gnaisse ¹
Jaguara	Barragem	1971	1996	Quartzito ¹ Granito ²
Joanes II	Barragem	1971	1988	Gnaisse ¹
Jurupará	Barragem	1937	-	Gnaisse ¹ Biotita granito ²
Mascarenhas de Moraes	Barragem	1957	-	Quartzito ³
Moxotó	Casa de Força	1974	1980	Granito-gnaisse ¹
Paulo Afonso I	Barragem	1955	1978	Granito-gnaisse ¹
Paulo Afonso II	Barragem	1962	1978	Granito-gnaisse ¹
Paulo Afonso III	Barragem	1973	1978	Granito-gnaisse ¹
Paulo Afonso IV	Barragem	1979	1985	Granito-gnaisse ¹
Pedro-Beicht	Barragem	1932	1991	Granito-gnaisse ¹
Peti	Barragem	1945	1964	Gnaisse ¹
Porto Colômbia	Vertedouro e Casa de Força	1973	1985	Cascalho e basalto ³
Sá Carvalho	Barragem	1951		Gnaisse ¹
Tapacurá	Barragem	1975	1990	-
Traição	Usina Elevatória	1940	1980	Milonito ¹
Túnel 6	Tomada d'água	1974	1989	Granito-gnaisse ¹

1) Andriolo (2000);

2) Alves et al. (1997);

3) Veiga, Gonçalves e Hasparyk (1997).

Fonte: Munhoz (2007) adaptado de Kihara, Sbrighi Neto e Kuperman (1998)

No Brasil, até 2005 só se conhecia a ocorrência do fenômeno em obras hidráulicas, quando foi constatada a ocorrência em fundações de edifícios urbanos, em sua maior parte residenciais em Recife-PE. Na mesma cidade a ocorrência já tinha sido identificada na Ponte Paulo Guerra, em 2002. Assim como as barragens e demais obras hidráulicas, as fundações de todo tipo de estruturas também podem estar em condições ambientais propícias à ocorrência da RAA, pois muitas vezes se encontram em contato direto com a umidade, como no caso de locais com lençol freático pouco profundo. No caso de Recife, além do ambiente

propício, os concretos das fundações continham agregados com fases reativas e disponibilidade de álcalis. (PECCHIO et al., 2006 apud MUNHOZ, 2007).

Ao longo das décadas de investigações e experimentos os pesquisadores puderam não só conhecer os mecanismos da reação como também, e principalmente, descobrir formas de diminuir, mitigar e até mesmo evitar sua ocorrência. O conhecimento do potencial de reatividade dos agregados é uma das etapas importantes neste processo, e que foi realizada por Andrade et al. (2006) na região metropolitana de Recife-PE, descobrindo que a maior parte dos agregados analisados apresentava fases potencialmente reativas.

3.6. Normas e prevenção da RAA

A Figura 10 relaciona e resume as origens, resultados e medidas preventivas da RAA. Dentre as ações preventivas, quando não é possível reduzir a estrutura às condições favoráveis, torna-se necessário conhecer e escolher bem os materiais a serem utilizados e realizar ajustes à mistura para mitigar a reação.

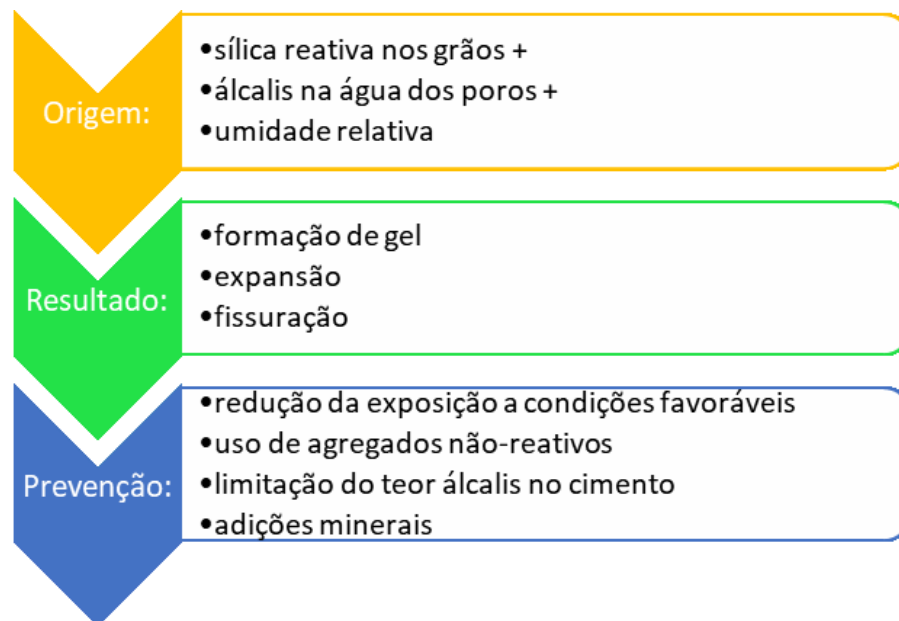


Figura 10 - Origens, resultados e medidas preventivas da RAA
Fonte: próprio autor

Para limitar o teor de álcalis no cimento é necessário saber se a origem dos álcalis é somente do cimento. O teor mínimo de álcalis para desencadear a reação é de 0,6% em equivalente de sódio e o cálculo feito a partir do teor real de óxido de sódio mais 0,658 vezes o teor real de óxido de potássio (NEVILLE, 2016).

O uso de agregados não-reativos nem sempre é possível, de modo que se faz necessário conhecer o potencial reativo dos mesmos para então decidir pelo uso ou pela

mitigação de seus efeitos. No Brasil, a norma que rege esta avaliação é a NBR 15577 (ABNT, 2018) e possui 7 partes que são:

- Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto
- Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concretos
- Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa dos agregados em presença de álcalis do concreto
- Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado (30 dias)
- Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado (30 dias)
- Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto (longa duração, 1 ano)
- Parte 7: Determinação da Expansão em prismas de concreto pelo método acelerado (20 semanas)

As adições minerais reduzem a expansão de RAA por um ou mais mecanismos sendo: redução do teor de álcalis na solução dos poros; redução do pH; consumo de hidróxido de cálcio (o que pode resultar num inchaço menor); redução da permeabilidade do concreto. São várias as adições minerais utilizadas, como: argilas calcinadas; cinzas volantes; escória de alto-forno; sílica ativa; adições químicas como sais de lítio (TOUMA, 2000 apud LIMA, 2016).

3.7.O vidro

Os vidros comuns, como os de embalagens, são 100% recicláveis, embora a cadeia produtiva ainda não consiga realizar o ciclo completo. Mas existem vários tipos de vidros, como os temperados, que são de difícil reciclagem, o que resulta em seu descarte como resíduo sem destino certo e quase sem solução (MOHAJERANI et al., 2017).

Segundo a Abividro (2021) é possível com um quilo de vidro fazer outro quilo de vidro sem a emissão de CO₂ para o meio ambiente. No caso da produção dos vidros de embalagem e vidros planos, além das matérias primas novas (como areia e calcário), a indústria utiliza cacos de vidro que podem chegar até 80% da composição, como exemplificado na Figura 11.

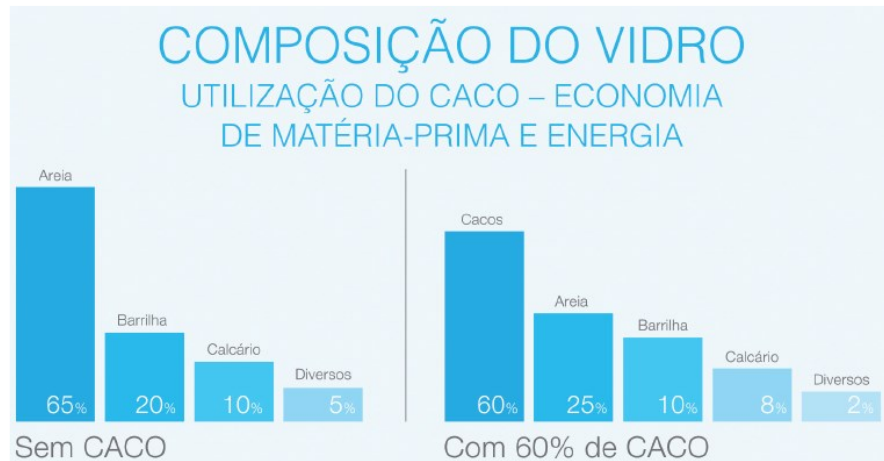


Figura 11 - Composição do Vidro sem uso de caco e com uso de caco na produção
Fonte: ABRIVIDRO (2021)

A produção de vidros processados não-automotivos em 2019 foi de 54.198.402 m², uma queda de 2,8% em relação a 2018. Entre os processados não-automotivos, os temperados correspondem a 55,4%, seguido pelos espelhos com 25,7%, Laminados com 11,8%, tampo e etc. corresponderam a 6,3% e insulado 0,8% (ABRAVIDRO, 2020).

3.7.1. Aspectos gerais e produção do vidro

Segundo Callister e Rethwisch (2012) os vidros fazem parte do grupo das cerâmicas, de relativa facilidade de fabricação e largamente usados em diversos tipos de aplicações, desde os recipientes de vidro como a garrafas e pratos, até fibras de vidro, ambos presentes no nosso dia a dia. Os vidros são silicatos não cristalinos que contém outros óxidos que influenciam diretamente suas propriedades, como CaO, Na₂O, K₂O e Al₂O₃.

Aproximadamente 70% em peso (%p) de um vidro típico de cal de soda é dióxido de silício (SiO₂), que também chamamos de sílica, e o restante é basicamente Na₂O (soda) e CaO (cal). Conforme se observa na Tabela 4, com exceção da vidrocerâmica, a sílica é componente predominante nos vidros comerciais comuns

Tabela 4 - Composição e Característica de Alguns Vidros Comerciais Comuns

Tipo de Vidro	Composição (%p)						Características e Aplicações
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Outros	
Sílica fundida	>99,5						Elevada temperatura de fusão, coeficiente de expansão muito pequeno (resistente a choques térmicos)
96% de Sílica (Vycor)	96				4		Resistente a choques térmicos e a ataques químicos – vidrarias de laboratório
Borossilicato (Pyrex)	81	3,5		2,5	13		Resistente a choques térmicos e a ataques químicos – usado em vidros para fornos
Recipientes (cal de soda)	74	16	5	1		4 MgO	Baixa temperatura de fusão, facilmente trabalhável e também durável
Fibra de vidro	55		16	15	10	4 MgO	Facilmente estirada na forma de fibras – compósitos de fibras de vidro e resina
Sílex óptico	54	1				37 PbO, 8 K ₂ O	Alta massa específica e alto índice de refração – lentes ópticas
Vidrocerâmica (Pyroceram)	43,5	14		30	5,5	6,5 TiO ₂ , 0,5 As ₂ O ₃	Facilmente fabricada; resistente; resiste a choques térmicos – vidros para fornos

Fonte: Callister e Rethwisch (2012)

Segundo Akerman (2000), o estado sólido é caracterizado e definido por uma estrutura cristalina o que, de forma geral, os vidros, embora pareçam corpos sólidos à temperatura ambiente proporcionada por sua rigidez mecânica, não podem se considerar como tais. Embora pela estabilidade de sua forma os vidros podem assimilar-se a sólidos, do ponto de vista estrutural suas semelhanças são muito menos evidentes, o que limita incluir os vidros nos sólidos, mas também não é o suficiente para classifica-los como líquidos. Muitas vezes a designação do vidro como um líquido de viscosidade infinita é aplicado, mas já foi sugerido considera-lo um quarto estado de agregação da matéria, que seria o estado vítreo.

Akerman (2000) ainda apresenta outros pontos de vista, características e considerações que mostram como a definição do vidro é indefinida em relação ao tipo de enquadramento do material, e acrescenta que talvez uma boa definição seja a que “Vidro é um sólido, não cristalino, que apresenta o fenômeno de transição vítrea.”. Entender a transição vítrea também é algo complexo, mas que pode ser definida como:

“O fenômeno no qual um sólido amorfo exibe uma variação ‘mais ou menos’ abrupta nas derivadas de propriedades termodinâmicas (capacidade calorífica e expansividade térmica) em função da temperatura, onde as magnitudes dessas propriedades variam de valores próximos aos de materiais cristalinos até os próximos do líquido.” (S.R. ELLIOT, 1990 apud ABREU, 2008).

Diferente dos materiais cristalinos, para os quais existe uma redução descontínua do volume na temperatura de fusão (T_f), nos vítreos o volume diminui continuamente com a redução da temperatura. A temperatura de transição vítrea (T_v) é o ponto onde ocorre uma ligeira diminuição na inclinação da curva, abaixo da qual o material é considerado vidro e acima é um líquido super-resfriado e depois um líquido, conforme ilustrado na Figura 12.

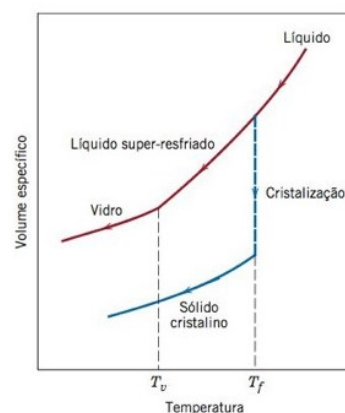


Figura 12 - Contraste do comportamento do volume específico versus temperatura exibidos pelos materiais cristalinos e não-cristalinos.

Fonte: Callister e Rethwisch (2012)

Para a produção do vidro é necessário que as matérias-primas sejam aquecidas até a fusão, o que ocorre em elevadas temperaturas. A fonte da sílica é em geral areia de quartzo (para vidros da variedade sílica-soda-cal), a soda barrilha (Na_2CO_3) fornece o óxido Na_2O e o calcário (CaCO_3) fornece o CaO . Os produtos de vidro são produzidos a partir de métodos de conformação, que podem ser prensagem, sopro, estiramento, e conformação de chapas e fibras.

Tratamentos térmicos podem ser conferidos a um vidro para melhorar suas propriedades, como é o caso do recozimento e da têmpera. O recozimento pode diminuir ou eliminar tensões térmicas introduzidas em um material cerâmico, promovendo uma melhoria na resistência. Ele é realizado após o processo normal de produção, aquecendo novamente o vidro até o ponto de recozimento e deixando-o resfriar lentamente até a temperatura ambiente (CALLISTER e RETHWISCH, 2012).

Os materiais cerâmicos são de maneira geral susceptíveis à falha por consequência de aplicação de tensões de tração. Para conferir mais resistência de um vidro à tração, a técnica de têmpera resulta em tensões residuais de compressão em sua superfície, fazendo com que a tensão de tração necessária para produzir uma trinca seja maior, pois deverá vencer primeiro a tensão residual de compressão. A técnica também usa da temperatura para fazer com que, após o aquecimento até a região de transição vítrea, mas sem atingir o amolecimento, o resfriamento a taxas mais rápidas no exterior do que no interior resulte na deformação do interior de forma a puxar a superfície já rígida, conferindo tensões residuais de compressão à superfície e de tração ao interior do vidro temperado (CALLISTER e RETHWISCH, 2012).

3.7.2. Estrutura do vidro

Os elementos silício e oxigênio são os dois mais abundantes na crosta terrestre, de forma a enquadrar a maior parte das areias, solos, argilas e rochas na classificação de silicatos. Em relação às suas estruturas, a melhor representação para os silicatos são arranjos tetraédricos de Si_4^{4-} , onde nos vértices do tetraedro estão quatro átomos de oxigênio ligados ao átomo de silício no centro, conforme ilustra a Figura 13. Considerando esta a unidade básica dos silicatos, ela é normalmente tratada como uma entidade negativamente carregada (CALLISTER e RETHWISCH, 2012).

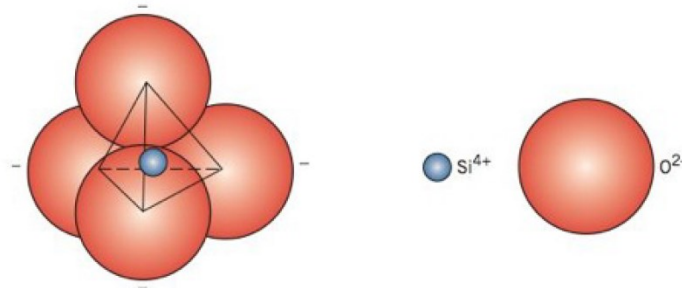


Figura 13 - Tetraedro de Silício e Oxigênio Si_4^{4+}
 Fonte: Callister e Rethwisch (2012)

A sílica (SiO_2) é o silicato mais simples do ponto de vista químico. Na Figura 14 se observa que uma rede tridimensional é formada quando os átomos de oxigênio que estão nos vértices de cada tetraedro são compartilhados por tetraedros adjacentes, como na cristobalita. O material é eletronicamente neutro e todos os seus átomos têm estruturas eletrônicas estáveis. Estruturas cristalinas como a principais polimórficas da sílica, (o quartzo, a cristobalita e a tridimita) podem surgir com o arranjo regular e ordenado dos tetraedros. Devido a força das ligações interatômicas Si-O a temperatura de fusão é relativamente elevada ($1710^{\circ}C$). Já as massas específicas à temperatura ambiente são relativamente baixas ($2,65 \text{ g/cm}^3$ para o quartzo), em consequência de os átomos não estarem densamente compactados uns aos outros.

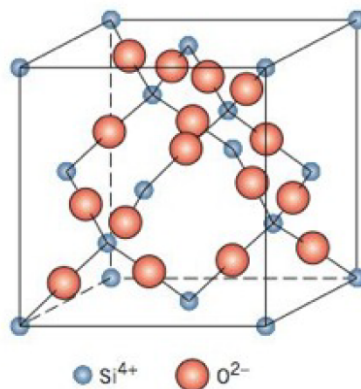


Figura 14 - Arranjo dos átomos de silício e oxigênio em uma célula unitária de cristobalita, um polimorfo do SiO_2

Fonte: Callister e Rethwisch (2012)

A Sílica existe também como um sólido ou vidro não cristalino com elevado grau de aleatoriedade atômica, sendo este material chamado de sílica fundida ou sílica vítrea. A aleatoriedade atômica é característica dos líquidos, razão pela qual há uma grande indefinição quanto ao enquadramento do vidro como um material sólido (CALLISTER e RETHWISCH, 2012).

O tetraedro Si_4^{4-} também a unidade básica e além dela existem um considerável grau de desordem. O SiO_2 , assim como outros óxidos formadores de estruturas vítreas (como B_2O_3 e GeO_2), são chamados formadores de rede. Os óxidos (como CaO e Na_2O) adicionados à sílica para formar os vidros inorgânicos comuns não formam redes poliédricas, mas sim modificam a rede Si_4^{4-} quando seus cátions são incorporados no interior da rede, de modo que esses óxidos aditivos são chamados modificadores de rede. Na Figura 15 vemos uma representação da estrutura de um vidro de sódio-silicato.

Há ainda os óxidos intermediários (como o TiO_2 e o Al_2O_3) que não formam redes, mas substituem o silício e estabilizam a rede tornando-se parte dela. Os óxidos intermediários e modificadores são úteis para permitir a conformação de um vidro em temperaturas mais baixas, pois a adição deles reduz o ponto de fusão e a viscosidade do mesmo.

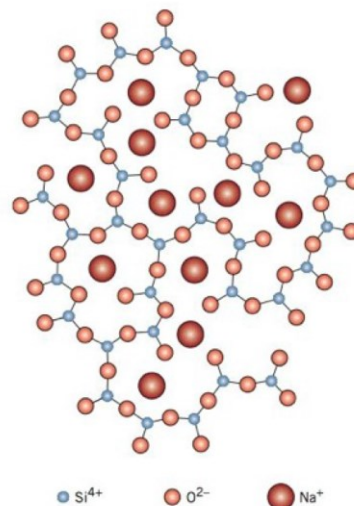


Figura 15 - Representação esquemática das posições dos íons em um vidro de sódio-silicato
Fonte: Callister e Rethwisch (2012)

Bignozzi et al. (2015) investigou a composição química de vários tipos de resíduo de vidro a serem utilizados como material substituto ao cimento, observando como a composição afeta a ação pozzolânica, o desempenho final e também a ocorrência de RAA. A Tabela 5 demonstra os óxidos formadores, estabilizadores e modificadores dos vidros pesquisados, e revela o alto teor de $PbO + Na_2O_{eq}$ e baixo teor de $SiO_2 + Al_2O_3$ do vidro tipo CR (*crystal glass*), que teve o pior desempenho no teste de expansão em barras de argamassa, evidenciando a ligação direta da composição química com a reação pozzolânica e reação alcali-sílica.

Tabela 5 - Formadores, estabilizadores e modificadores de vidro para o vidro investigado (% em peso)

	SL	LMP	FNL	CR
<i>Glass formers</i>				
SiO ₂ + Al ₂ O ₃	72.46	70.73	59.13	58.66
<i>Glass stabilizers</i>				
CaO + MgO	12.77	8.11	4.42	0.41
<i>Glass modifiers</i>				
Na ₂ Oeq + PbO	≈13.90	19.34	31.31	36.38

(Fonte: Bignozzi et al., 2015)

3.8. Uso de resíduos na construção civil

Considera-se que a indústria da construção civil gera grandes impactos ambientais, uma vez que é o setor que mais consome recursos naturais e utiliza energia de forma intensiva. Há também impactos associados à geração de resíduos sólidos, líquidos e gasosos. Dentre os recursos naturais destaca-se o consumo das matérias primas para a produção de concreto e materiais cimentícios, como os agregados graúdos e miúdos, que convencionalmente são de origem mineral (rochas e areias) e constituem a maior parte do volume dos concretos (CAMPOS, 2017).

Por outro lado, a indústria da construção alcançou grandes ganhos na reciclagem de subprodutos e resíduos industriais, incluindo resíduos de vidro. A conversão destes resíduos em agregados reduz o volume de depósito nos aterros e a demanda por extração de matéria-prima natural (RAKSHVIR e BARAI, 2006 apud ALI e AL-TERSAWY, 2012).

O Brasil produz em média 980 mil toneladas de embalagens de vidro por ano, usando cerca de 45% de matéria-prima reciclada na forma de cacos, que provém de refugo nas fábricas e da coleta seletiva. Além de voltar à produção de embalagens, a sucata de vidro pode ser aplicada na composição de asfalto e pavimentação de estradas, construção de sistemas de drenagem contra enchentes, produção de espuma e fibra de vidro, bijuterias e tintas reflexivas. Cerca de 47% das embalagens de vidro foram recicladas em 2011 no Brasil, somando 470 mil ton/ano (CEMPRE, 2020).

No entanto, a facilidade de se reciclar as embalagens não é a mesma para alguns tipos de vidro, como os vidros temperados, espelhos, vidros de automóveis, cristais (usados em taças), reflexivos (comuns em fachadas de edifícios) e tubos de monitores. A principal dificuldade está na composição especial destes tipos de vidros por diversas substâncias diferentes ou fabricados com técnicas próprias, o que torna o processo de reciclagem muito trabalhoso ou até impossível de ser realizado (DINÂMICA AMBIENTAL, 2017).

3.8.1. Reciclagem e reaproveitamento de resíduo de vidro

Diversas pesquisas desenvolvidas no sentido de utilizar resíduo de vidro em substituições ou adições na produção de compósitos cimentícios vem sendo realizadas há décadas com objetivos econômicos, tecnológicos e ambientais. De maneira geral, o uso do resíduo é considerado viável na maioria dos resultados obtidos, embora seja necessária atenção às limitações de teor utilizado, local de aplicações e correções nos traços, uma vez que o material altera as propriedades finais dos produtos, muitas vezes de forma prejudicial.

Uma pesquisa na base de dados *Scopus* em 20/05/2020 revelou que existem 271 artigos revisados por pares que contêm em seus assuntos o CAA com utilização de resíduos (ou termos semelhantes) de vidro quebrado, em pó, moído ou triturado. Alguns dos mais relevantes como Kou e Poon (2009) tratam da substituição de agregados graúdo e miúdo no CAA por vidro reciclado. Sua-Iam e Makul (2013) investigam os vidros com alto teor de chumbo presentes nos tubos de raios catódicos, que são um tipo de vidro de difícil reciclagem.

O vidro fosco foi objeto de um estudo bem-sucedido, utilizado como substituto parcial de 10% do cimento e 10% do agregado fino no CAA, sem a necessidade de agente modificador de viscosidade (LIU, 2011). Em seus estudos Ali e Al-Tersawy (2012) observaram os efeitos no CAA em estado fresco e endurecido quando o agregado fino foi substituído por vidro reciclado, e também que o aumento de vidro reciclado na mistura aumenta o fluxo de *slump*, porém diminui as resistências à compressão, tração e flexão e também o módulo de elasticidade estático.

Conclusões parecidas com as de Sharifi, Houshiar e Aghebati (2013), que reforça a insignificante queda das resistências e acrescenta que a densidade diminuiu com o acréscimo de vidro reciclado. Jaya et al. (2017) estudaram o efeito do pó de vidro, sílica ativa, éter de policarboxilato para otimizar a composição de cada fator na criação de CAA de alto desempenho. Neste estudo o vidro foi utilizado em substituição ao cimento e mostrou, entre outros resultados, vantagens com a diminuição da porosidade.

Resultados interessantes observados no estudo de Ling, Poon e Kou (2012) que testou CAA feito com vidro reciclado, de 0 a 100% em substituição ao agregado, após terem sido expostos a altas temperaturas, onde o derretimento e resolidificação do vidro reciclado ajudou a manter as propriedades do CAA. Recentemente Ristic et al. (2019) mostraram que resíduos como vidro reciclado moído de tubos catódicos podem ser usados como aditivo

mineral no CAA sem perda de propriedades físicas e mecânicas e ainda com o ganho de maior resistência devido a atividade pozolânica.

Na busca por uma forma de baixo custo para transformar resíduos de vidro misturados em materiais de construção sem fundir novamente, Heriyanto, Pahlevani e Sahajwalla (2018) chegaram a um compósito de vidro polimérico, utilizando pós de vidro residual e resina aglutinante, com vantagens estéticas e econômicas em relação aos produtos de pedra natural e projetada.

Androjic e Dimter (2016) verificaram que o uso de resíduo de vidro proveniente de garrafas e janelas, esmagado e com dimensões de até 11mm como substituto a agregados e cargas em misturas asfálticas, obtendo resultados satisfatórios, indicando que é razoável utilizar o resíduo como substituto à brita nas camadas destinadas ao desgaste em misturas asfálticas.

Aliabdo, Abd Elmoaty e Aboshama (2016), assim como Kamali e Ghahremaninezhad (2015) e Bignozzi et al. (2015) estudaram o uso de resíduo de vidro em pó de vários tipos como material cimentante suplementar, em forma de substituição ou adição. Além da confirmação das propriedades pozolânicas do pó de vidro, os estudos mostraram que o uso é viável, gerando materiais compatíveis e até melhores que os de referência, mas que aspectos como a composição química e o tamanho das partículas influencia diretamente no desempenho.

Uma revisão de Shi e Zheng (2007) sobre o uso de resíduos de vidro em produção de cimento e concreto, apontou que o uso de vidro como agregado em concreto tem efeitos negativos nas propriedades, mas que ainda assim é viável mesmo até a proporção de 100% de substituição, porém devem ser observadas a alta expansão e fissuração que costumam causar.

Tan e Du (2013) estudaram o uso de resíduo de vidro como agregado fino, substituindo de 0% a 100% em massa em argamassas, para diversos tipos de vidro. Embora os resultados tenham sido negativos em relação às propriedades mecânicas, relacionadas com as microfissuras nas areias de vidro e a ligação fraca entre a pasta de cimento e o agregado, observou-se uma maior resistência à penetração de íons de cloreto, indicando aumento da durabilidade.

3.8.2. Uso do resíduo de vidro como agregado fino

O trabalho de revisão de Mohajerani et al. (2017) analisou o resíduo de vidro sendo utilizado em várias aplicações em materiais de construção, e verificou que o resíduo de vidro

triturado tem o potencial de ser um substituto para o agregado fino no concreto. O estudo chegou a resultados não conclusivos sobre alguns tópicos, pois os trabalhos analisados possuem diferenças e até mesmo resultados opostos entre si, como é o caso do aumento ou diminuição de resistência compressiva, resistência à flexão e módulo de elasticidade, mas ressalta que ainda assim o vidro triturado pode melhorar propriedades mecânicas, durabilidade e ser uma amigável alternativa aos agregados naturais.

Mohajerani et al. (2017) revisaram diversos trabalhos sobre o uso de resíduo de vidro como agregado fino no concreto, e suas impressões, análises e resultados são ligeiramente apresentados a seguir:

Características Físicas: Densidade aparente de 1360 kg/m^3 ; peso específico entre 2,4 e 2,8; índice de forma (%) 30,5; módulo de finura 4,25 e de 0,43-3,29.

Trabalhabilidade: A Figura 16 mostra um gráfico que compila os resultados de diversos estudos revisados a respeito do teste de abatimento (slump) dos concretos feitos com agregado de vidro reciclado. Neste quesito os resultados são bastante contraditórios, onde em alguns casos a trabalhabilidade aumentou muito e em outros diminuiu muito.

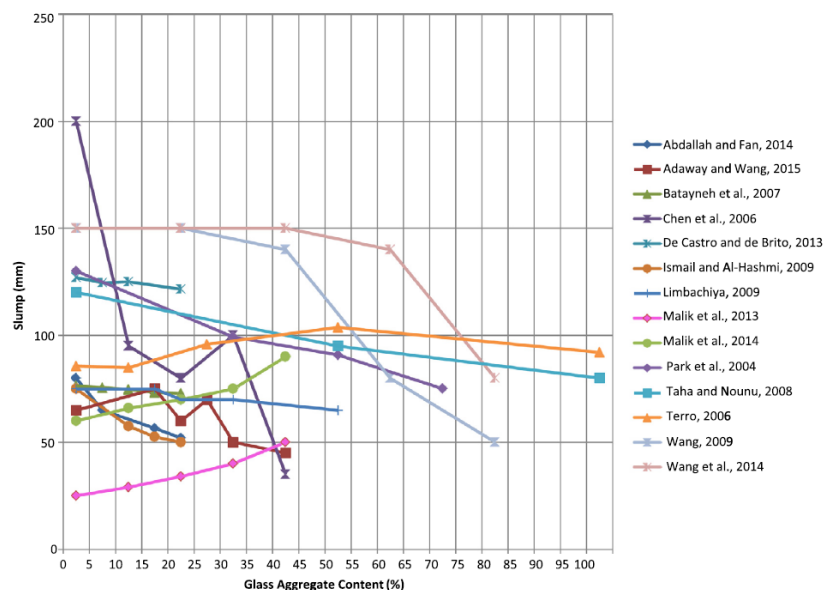


Figura 16 - Abatimento de concreto contendo várias quantidades de CWG em substituição ao agregado fino, que foi adquirido de vários estudos
Fonte: Mohajerani et al. (2017)

Alguns estudos apontam que o agregado de vidro possui superfície lisa, arestas vivas e texturas ásperas, características que prejudicaram a fluidez do concreto, reduzindo a trabalhabilidade. A força coesiva entre o agregado de vidro e as misturas foi observada e atribuída à superfície lisa e a baixa absorção de água pelas partículas do agregado, porém a baixa coesão foi apontada como aspecto positivo e negativo na trabalhabilidade, em estudos

distintos. A partir dos estudos revisados, os autores sugerem que o teor ideal para alcançar a melhor trabalhabilidade foi encontrado em 20%.

Resistência a compressão: Também contraditórios, os resultados de resistência a compressão sugerem que o teor de substituição tem uma influência sobre a resistência variando, inclusive, com a idade do concreto. Observando o gráfico que compila os resultados dos estudos revisados na Figura 17, percebe-se que até teores de substituição de 30% há pouca diminuição e até mesmo aumento da resistência em relação aos concretos com 0% de agregado reciclado. Características como resistência, textura da superfície e maior área superficial do agregado de vidro podem ser apontadas como responsáveis pelo aumento da resistência a compressão do concreto (BATAYNEH, MARIE e ASI, 2007 e ADAWAY e WANG, 2015 apud MOHAJERANI et al., 2017).

Embora outros estudos atribuam a fraca ligação entre o agregado de vidro e a pasta de cimento e a maior proporção de água das misturas (baixa absorção de água pelo agregado conforme observado na trabalhabilidade) à queda na resistência a compressão dos concretos com agregado de vidro em relação aos de controle, uma vez que a baixa coesão pode facilitar o crescimento de fissuras.

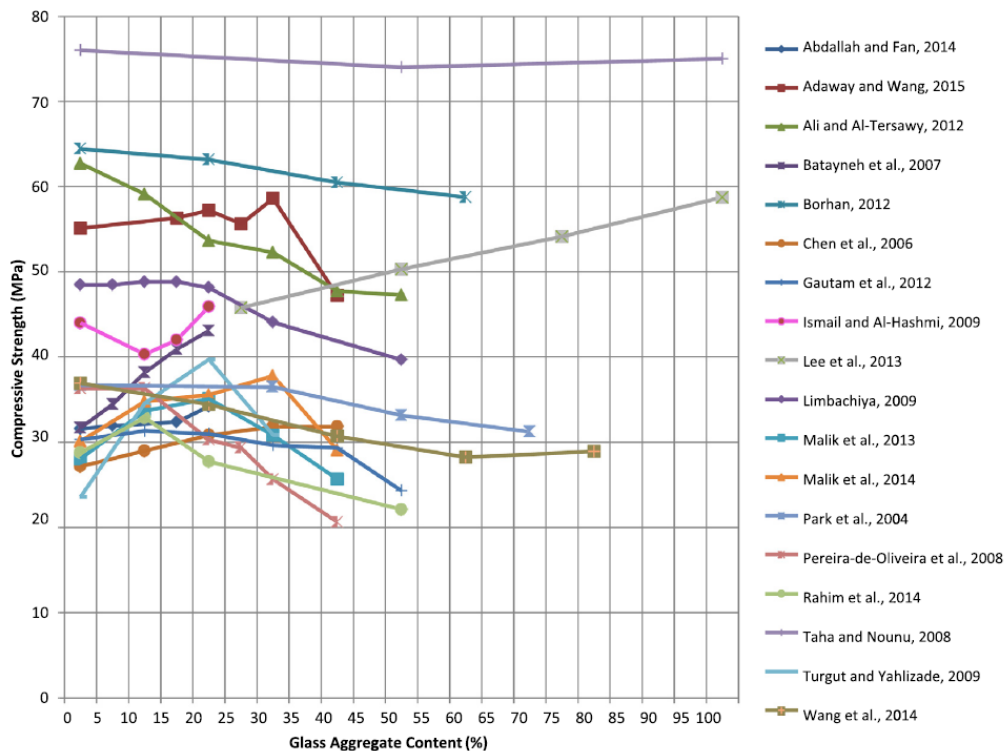


Figura 17 - Resistência à compressão de concreto contendo várias quantidades de resíduo de vidro triturado em substituição ao agregado fino, que foi adquirida em vários estudos
Fonte: Mohajerani et al. (2017)

Resistência à flexão: Um menor número de estudos investigou a resistência à flexão nos concretos com agregados de vidro, apresentados na Figura 18. Na maioria foi observado o aumento de resistência à flexão, embora vários apresentem, como no caso da resistência à compressão, resultados contrários, indicando sua diminuição.

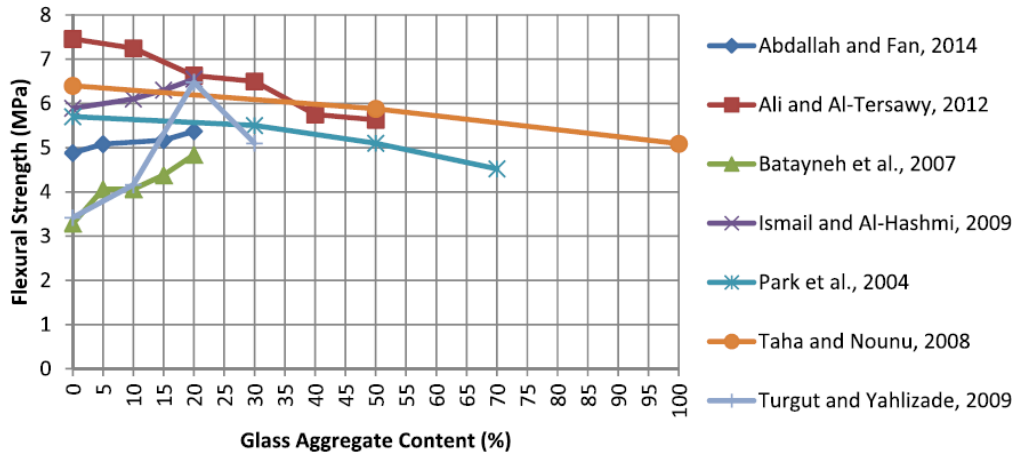


Figura 18 - Resistência à flexão de concreto contendo várias quantidades de resíduo de vidro triturado adquirida de vários pesquisadores
Fonte: Mohajerani et al. (2017)

Resistência à tração: os estudos que realizaram testes de resistência à ruptura por tração levam os autores da revisão a dizer que os resultados são inconclusivos, devido à grande diferença entre eles, o que pode ser também percebido ao observar a Figura 19. A resistência à tração nos concretos é sabidamente muito menor do que a resistência à compressão.

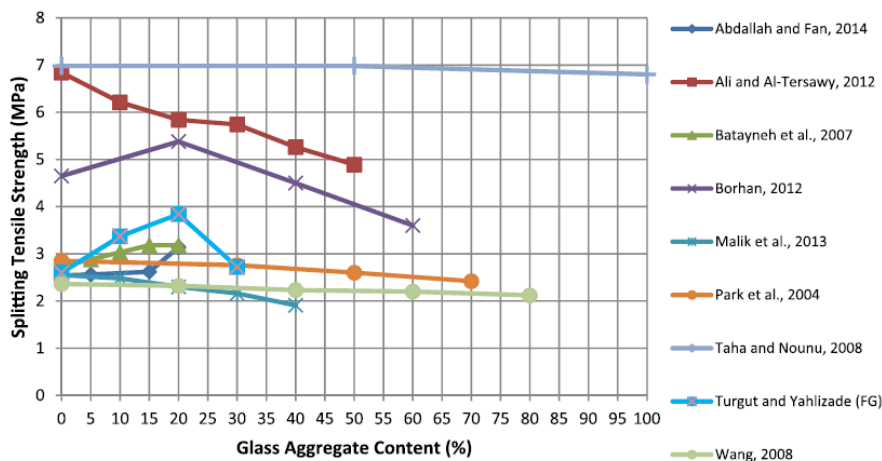


Figura 19 - resistência de ruptura à tração de concreto contendo várias quantidades de resíduo de vidro triturado adquirida em vários estudos
Fonte: Mohajerani et al. (2017)

Módulo de elasticidade: poucos estudos avaliaram a influência da substituição do agregado fino por resíduo de vidro no módulo de elasticidade dos concretos produzidos. Os

que são apresentados na Figura 20 mostram variações, embora aos 20% de substituição podemos observar que há um aumento ou pelo menos uma pequena diminuição no módulo de elasticidade dos concretos em relação aos sem substituição.

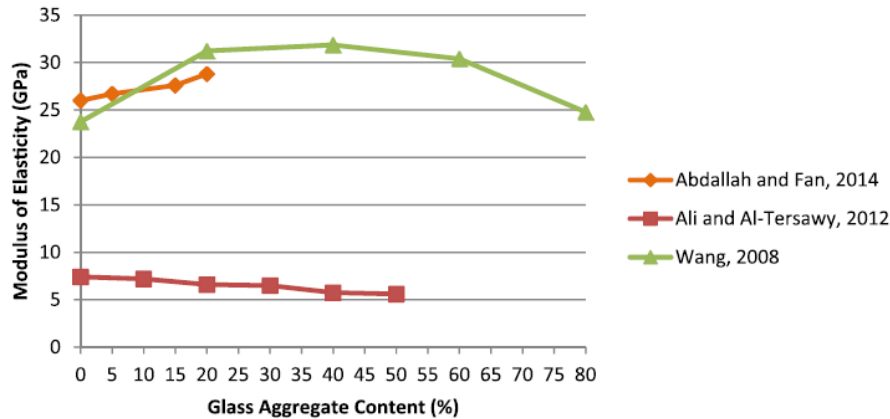


Figura 20 - Módulo de elasticidade do concreto contendo várias quantidades de resíduo de vidro triturado adquirido em vários estudos
Fonte: Mohajerani et al. (2017)

Densidade: Dentre os estudos que observaram as características relacionadas ao peso dos produtos com agregados de vidro reciclado, os autores da revisão constataram que na maioria houve redução no peso unitário e nas densidades fresca e úmida.

Dos estudos revisados por Mohajerani et al. (2017), apenas três trataram diretamente do uso de resíduo de vidro em CAA, nos quais de modo geral a viabilidade de produção de CAA com resíduo de vidro foi considerada positiva (WANG e HUANG, 2010; ALI e AL-TERSAWY, 2012; KOU e POON, 2009).

Wang e Huang (2010) verificaram que é possível produzir CAA com a substituição de areia por resíduo de vidro proveniente de telas de LCD. Usando porções de substituição de 0%, 10%, 20% e 30%, relação água/cimento de 0,28, 0,32 e 0,36, e cinza volante, escória de alto forno e superplastificante como aditivos. Os resultados mostraram que o fluxo de abatimento aumentou com a maior substituição de areia de vidro, devido principalmente à característica hidrofóbica do resíduo, o que resulta em um excesso de água, indicando também que o consumo de água pode ser reduzido. Conforme a quantidade de vidro aumenta na mistura o peso unitário é reduzido, o que influencia no aumento do tempo necessário para o concreto fluir e passar no espaço entre as barras nos testes de funil em V e o teste em U.

Ali e Al-Tersawy (2012) estudaram o efeito da utilização de resíduos de vidro em substituição ao agregado fino, nas propriedades frescas e endurecidas do CAA. Das 18 misturas de concreto produzidas com diferentes teores de cimento (350, 400 e 450 kg/m³) na razão A/C de 0,4, o vidro foi utilizado para substituir o agregado fino de 0%, 10%, 20%,

30%, 40% e 50%. Os resultados mostraram que o aumento do *slump flow* foi proporcional ao aumento do teor de vidro reciclado. Em sentido oposto, quanto maior o percentual de substituição, piores os valores das propriedades mecânicas de resistência à compressão, resistência à tração de ruptura, resistência à flexão e módulo de elasticidade estático.

Kou e Poon (2009) investigaram os efeitos do resíduo de vidro de garrafas nas propriedades frescas e endurecidas do CAA, substituindo proporções de 10%, 20% e 30% da areia e 5%, 10% e 15% do granito (10mm). Resultados apontam também o proporcional aumento no abatimento, a taxa de bloqueio e o conteúdo de ar ao aumento da substituição dos agregados por resíduo de vidro. Como em outros estudos, as resistências à compressão e tração, e módulo de elasticidade estático foram inversamente proporcionais ao aumento do teor de resíduo nas misturas. Do ponto de vista da durabilidade, o uso de agregado de vidro reciclado conferiu mais resistência à penetração de íons cloretos, e o uso de cinzas volantes suprimiu a RAA nas misturas.

3.8.3. Ocorrência de RAA em compósitos cimentícios contendo vidro

Considerando a natureza do vidro e que grande parte de qualquer vidro é sílica, fica clara a importância de estudar seu efeito na ocorrência de RAA quando se deseja utilizar este material em compósitos cimentícios.

Na pesquisa realizada de publicações sobre RAA na base de dados *Scopus*, dos 3.255 documentos encontrados, apenas 194 estavam relacionados com resíduo de vidro (*waste glass*), dos quais 6 documentos tinham relação com CAA.

Ducman, Mladenović e Šuput (2002) concluíram que, apesar da utilização de um agregado leve a base de vidro altamente reativo, ele não causou expansão ou trincas nas barras, o que foi atribuído à alta porosidade do agregado, que poderiam acomodar grande quantidade de gel produzida.

Mohajerani et al. (2017) revisaram a literatura e concluíram que na maioria dos estudos, o concreto contendo resíduo de vidro foi mais propenso à expansão RAA em comparação ao concreto sem vidro, apontando fatores como o tamanho das partículas, a cor, o teor e a presença de microfissuras no vidro como sendo importantes para a expansão. A mitigação dos efeitos pode ser feita com aditivos diversos, entre eles a sílica ativa e o vidro em pó finamente moído.

Na pesquisa de Tuam et al. (2018), barras de AAA com areia parcialmente substituída por resíduo de vidro, observou que o aumento da expansão foi diretamente proporcional ao aumento do teor de vidro nas argamassas, porém todas permaneceram dentro

do limite estabelecido, apontando que o uso de um teor de até 30% pode ser considerado mantendo bons resultados mecânicos.

Du e Tan (2013) plotaram os resultados de diversos trabalhos, inclusive o realizado por eles, que investigaram o efeito da substituição de agregado convencional por areia de vidro em um só gráfico conforme a Figura 21 apresenta. O gráfico não diferencia qual o tipo de mistura e materiais utilizados por cada estudo, mas é possível observar por exemplo que, para o teor de substituição de 30%, a maioria das argamassas estava com expansão acumulada abaixo dos 0,10% aos 14 dias (limite para essa idade no ensaio na norma ASTM C1260-21), sendo que apenas 5 estavam acima de 0,20%.

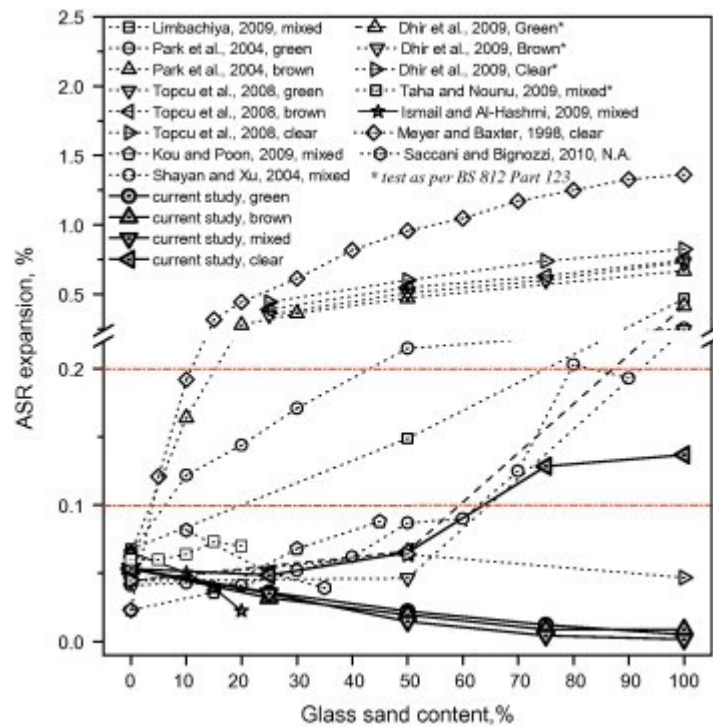


Figura 21 – Efeito da substituição por areia de vidro na expansão RRA aos 14 dias de diversos estudos.

Fonte: Du e Tan (2013)

4. ETAPA EXPERIMENTAL

A Figura 22 apresenta o fluxograma das etapas experimentais desenvolvidas neste trabalho.

4.1. Fluxograma das etapas experimentais

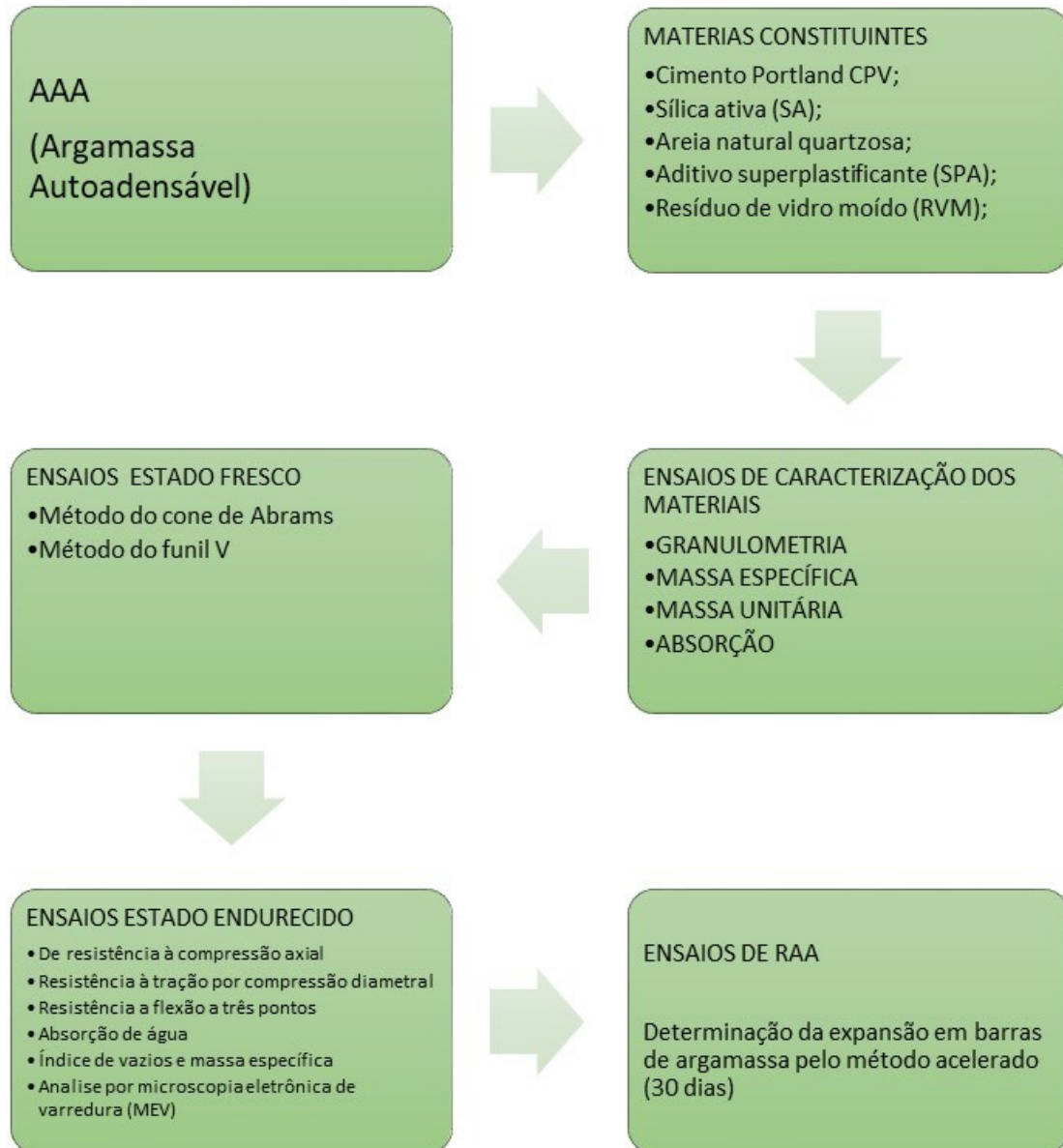


Figura 22 – Fluxograma das etapas Experimentais do trabalho
Fonte: próprio autor

Os dados foram coletados em cada ensaio seguindo os procedimentos de cada respectiva norma. Estes dados foram registrados e depois analisados, verificando basicamente se o traço de referência, ou seja, a AAA sem RVM, atendeu aos parâmetros de cada ensaio, e comparando com os resultados de cada traço com variação percentual de RVM.

Todos os resultados foram também analisados em comparação com os obtidos em outros estudos de argamassas comuns ou AAA com resíduos de vidro ou mesmo outros materiais substitutos de agregados.

4.2. Materiais

Os materiais utilizados foram:

- Cimento Portland CPV-ARI;
- Sílica ativa (SA);
- Areia natural quartzosa;
- Aditivo superplastificante (SPA);
- Resíduo de vidro moído (RVM);

O Cimento Portland de tipo V empregado foi Empresa de Cimentos Liz S.A., comercializado como Cimento CPV-ARI Premium. As propriedades e características do cimento utilizado neste trabalho são mostradas na Tabela 6 e foram fornecidas pelo site do fabricante.

Tabela 6: Propriedades do CPV-ARI

Norma ABNT NBR		Valor	Unidade
Massa específica (ABNT NBR 23:2001)		3,07	Kg/dm ³
Tempo de Pega (ABNT NBR 65:2003)	Início	137	min
	Fim	169	min
Resistência à compressão (ABNT NBR 7215:1997)	1 dia	25,9	MPa
	3 dias	42,2	MPa
	7 dias	49,6	MPa
	28 dias	59,1	MPa

Fonte: Adaptado de Empresa de Cimentos Liz S.A., 2021.

A Sílica Ativa utilizada foi fabricada pela Palmyra do Brasil Indústria e Comércio de Silício Metálico. A Sílica Ativa é um pó fino pulverizado proveniente da fabricação do silício metálico ou ferro silício. O alto teor de SiO₂ no formato amorfo (não cristalino), em conjunto com uma alta finura, confere altíssima reatividade com os produtos decorrentes da hidratação do cimento, garantindo melhor desempenho em concretos e argamassas. A Sílica Ativa possui partículas no formato esférico, vítreas, com diâmetro médio menor do que 1 µm e área superficial específica entre 15 e 25 m²/kg, apresentando altíssima superfície específica e uma massa específica aparentemente baixa (GRUPO TECNOSIL, 2021). Na Tabela 7 são mostrados os valores das propriedades da sílica ativa empregada.

Tabela 7: Características físicas e químicas da sílica ativa

Características Físicas e químicas	
Massa Específica - kg/m³	2.220
Teor de SiO₂ - %	> 90
Superfície Específica - m²/kg	~ 19.000
Formato da partícula	Esférico
Massa unitária	
Não Densificado - kg/m³	< 350
Densificado - kg/m³	> 350

Fonte: Adaptado de Grupo Tecnosil, 2021.

O agregado miúdo empregado foi areia natural média, proveniente de extração de rio, no município de Itajubá-MG.

A água empregada foi água potável proveniente do sistema de abastecimento público de Itajubá-MG.

O aditivo superplastificante (SPA) utilizado foi o ADI-SUPER H25, fornecido e fabricado pela empresa ADITIBRAS - Aditivos Para Concreto e Auxiliares Para Construção Civil. Faz parte de uma linha de aditivos superplastificantes de alta tecnologia, que são formulados a base de polímeros de éteres carboxílicos modificados, que agem sobre as partículas de cimento apresentando um altíssimo efeito dispersante, de onde se obtém concretos altamente fluidos com uma relação água/ligante total extremamente baixa, longa manutenção e elevadas resistências mecânicas iniciais e finais. Especialmente indicado para a fabricação de concretos autoadensáveis, pré-moldados, protendidos, concreto de alto desempenho (CAD), microconcreto, fabricação de artefatos de cimento, concretagem de peças esbeltas e de difícil acesso ou com alta densidade de ferragens. São produtos líquidos, prontos para uso e isentos de cloretos, e atendem aos requisitos da norma ABNT NBR 11768:2019 – tipo RA2. (ADITIBRAS, 2021).

Os aditivos classificados como Redutor de água tipo 2 (RA2) proporcionam elevada redução no consumo de água de concretos, quando comparado com aditivos redutores de água tipo 1, sem modificar sua consistência, além de poderem proporcionar significativo aumento no abatimento e na fluidez do concreto, sem alterar o consumo de água. Aditivos redutores de água podem produzir esses dois efeitos simultaneamente (INSTITUTO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO, 2021). A Tabela 8 mostra os valores referentes as características deste superplastificante.

Tabela 8: Características físicas e químicas do aditivo superplastificante ADITI-SUPER H25

Propriedades físicas e químicas	Valores
pH	$5,5 \pm 1,0$
Aparência	Líquido castanho claro
Massa específica - g/cm ³	$1,055 \pm 0,020$

Fonte: Adaptado de ADITIBRAS, 2021.

4.2.1. Resíduo de vidro moído (RVM)

O resíduo de vidro é proveniente da empresa RANENI de Varginha-MG, cuja linha de moagem está registrada na Figura 23. A empresa recebe diversos tipos de vidro, entre eles os utilizados em guarda-corpos, espelhos, para-brisas e janelas, promove a moagem do vidro de forma misturada e em diversas dimensões que são separadas em grupos de dimensões próximas. O resíduo de vidro moído é vendido para indústrias de diversas finalidades, como o emprego na fabricação de tintas.



Figura 23 – linha de moagem dos resíduos de vidro da empresa RANENI de Varginha-MG.

Fonte: próprio autor

A empresa cedeu baldes de diferentes tipos de resíduos moídos, sendo nomeados como grosso, médio e fino, de acordo com o tamanho médio das partículas. Para este trabalho foi utilizado o tipo fino, por estar mais próximo das dimensões das partículas da areia natural.

4.3. Métodos

4.3.1. Dosagem da Argamassa Autoadensável

O CAA assim como o CCV pode ser obtido pela mistura de uma argamassa, que já contém água, cimento, agregado miúdo eventualmente adições e aditivos, com agregado graúdo. O desenvolvimento dos traços de concreto passa inicialmente pela elaboração da pasta (cimento e água) e da argamassa (pasta e areia), porém não existe um método padrão para o CAA. Conforme a EFNARC (2005) descreve, um dos tipos de métodos utilizados

consiste em avaliar e otimizar o fluxo e a estabilidade da pasta e em seguida das frações da argamassa, só então adicionar o agregado grosso e testar toda a mistura.

O método de dosagem para a AAA seguiu o traço desenvolvido por Silva (2019), que se utilizou do método de dosagem proposto por Tutikian (2004), com o objetivo de elaborar uma argamassa com as características necessárias para integrar um CAA dentro das especificações deste material.

O método pode ser dividido em duas etapas básicas, sendo que na Primeira Etapa é feita a escolha dos materiais e a obtenção do traço de referência partindo do traço proposto por Silva (2019) com correções necessárias para que ensaios de trabalhabilidade apontem que a argamassa pode ser classificada como autoadensável.

Na Segunda Etapa foi feita a incorporação de RVM no traço de referência (0% de RVM) em substituição aos agregados nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20% e 30%.

Para a execução dos traços, foram adicionados primeiro os materiais secos (cimento, sílica ativa, areia e RVM), que foram misturados manualmente. Em seguida, à metade da mistura de secos foi adicionada cerca de 80% da água e misturados na argamassadeira, acrescidos em seguida o restante da mistura de secos e finalmente o SPA diluído no restante da água. O traço inicial está demonstrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Traço Unitário em massa inicial de argamassa autoadensável (AAA)

Cimento	Sílica	Areia	SP	a/c	Consumo de cimento em KG / m³
1,0	0,10	2,00	1,0%	0,35	667,3

Fonte: próprio autor

Após a realização do traço inicial e realização dos ensaios no estado fresco, foram realizados ajustes na relação água-cimento e no teor de superplastificante, para obter a argamassa autoadensável, utilizando esse traço ajustado como o traço de controle, para comparação com os demais traços com substituição. A Tabela 10 demonstra os traços dos dois grupos realizados na pesquisa.

Foram realizados dois grupos de traços, sendo que o primeiro grupo foi executado para produzir amostras para a realização de todos os ensaios, exceto de RAA. O segundo grupo foi executado semanas depois do primeiro, para produzir amostras para a realização do ensaio de RAA e a repetição do ensaio de resistência à compressão. Os dois grupos tiveram os ensaios no estado fresco realizados, para determinar se a mistura poderia ser classificada como AAA.

Tabela 10 – Traços unitários em massa utilizados de argamassa autoadensável (AAA)

TRAÇO	% de substituição de areia por RVM	Cimento	Sílica Ativa	RVM	Areia	a/c	SPA	Consumo de cimento em KG / m ³
0 RVM	0	1	0,1	0	2	0,45	1,51%	667,28
5 RVM	5	1	0,1	0,1	1,9	0,45	1,51%	667,28
10 RVM	10	1	0,1	0,2	1,8	0,45	1,51%	667,28
15 RVM	15	1	0,1	0,3	1,7	0,45	1,51%	667,28
20 RVM	20	1	0,1	0,4	1,6	0,45	1,51%	667,28
30 RVM	30	1	0,1	0,6	1,4	0,45	1,51%	667,28

Fonte: próprio autor

Para os ensaios no estado endurecido foram moldados 16 corpos de prova para cada traço, cujos ensaios, quantidade e dimensões estão demonstrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Número de corpos de prova por traço por ensaio no estado endurecido de argamassa autoadensável (AAA)

Ensaio	Nº de corpos de prova Grupo 1	Nº de corpos de prova Grupo 2	Dimensões
Resistência à compressão axial	3	2	cilindro Ø5x10cm
Resistência à tração por compressão diametral	3	-	cilindro Ø5x10cm
Resistência à tração na flexão	3	-	prisma 4x4x16cm
Absorção de água, índice de vazios e massa específica	2	-	cilindro Ø5x10cm
Reatividade Alkali-agregado - Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado	-	3	barra 2,5x2,5x28,5cm

Fonte: próprio autor

4.4. Classificação no estado fresco

Para o estado fresco em argamassas autoadensáveis foram realizados dois ensaios, que avaliam a fluidez e a viscosidade.

4.4.1.1. Ensaio de Fluidez – Tronco de cone

O ensaio de tronco de cone para determinação da fluidez do CAA foi adaptado para ser utilizado na avaliação das AAA, como mostra da Figura 24. O tronco de cone é colocado sobre uma superfície plana, previamente umedecida, preenchido com a argamassa, sem execução de adensamento, e suspenso verticalmente levando ao espalhamento da argamassa.

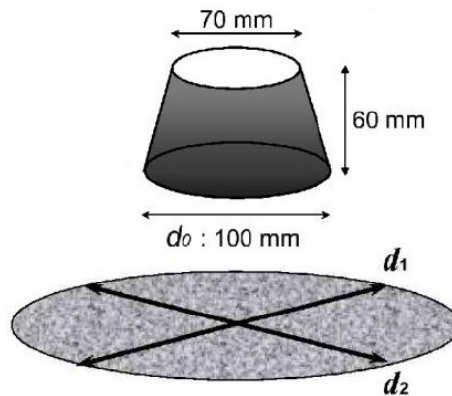


Figura 24 - teste de fluxo de argamassa
Fonte: Adaptado de Okamura e Ouchi (2003)

O cálculo do parâmetro de fluidez (G_m) é dado por:

$$G_m = (d_1 d_2 - d_0^2) / d_0^2 \quad (\text{Equação 1})$$

onde d_1 e d_2 são os diâmetros medidos ortogonalmente na argamassa, após o final da movimentação de espalhamento, e d_0 é o diâmetro da base do cone. Quanto maior o valor de G_m , maior a deformabilidade. Gomes e Barros (2009) sugerem, com base em parâmetros de outros pesquisadores, que o valor de G_m fique entre 3 e 8. A execução do ensaio pode ser acompanhada na Figura 25.

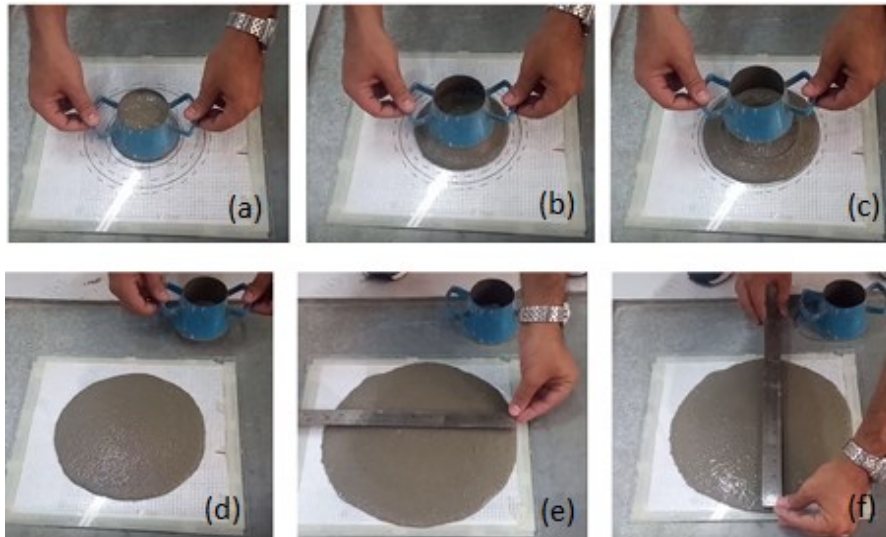


Figura 25 - Execução do Ensaio de Fluidez – sequência de execução de (a) a (f)
Fonte: próprio autor

4.4.1.2. Ensaio de Viscosidade – Funil V

Para o ensaio que determina a viscosidade da argamassa utiliza-se o mini funil V, conforme a Figura 26. Após umedecer o funil, o mesmo é totalmente preenchido com a

argamassa, sem adensamento, e ao abrir o fundo registra-se o tempo necessário para esvaziar o funil. O parâmetro de viscosidade (R_m) é determinado por:

$$R_m = 10/t \quad (\text{Equação 2})$$

onde t é o tempo de fluxo em segundos. Quanto maior o valor de R_m , menor a viscosidade.

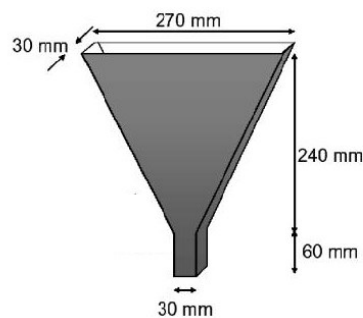


Figura 26 – teste de viscosidade em argamassa
Fonte: Adaptado de Okamura e Ouchi, (2003)

As pesquisas de Domone e Jin (1999) e Edamatsu et al. (1999) citados por Gomes e Barros (2009) sugerem tempos de 5 a 10 segundos, que resultam em R_m entre 1 e 2 para resultar em argamassas utilizadas em CAA. A Figura 27 ilustra a realização do ensaio realizado pelo autor.



Figura 27 – Realização de Ensaio de Viscosidade
Fonte: próprio autor

4.5. Ensaio no estado endurecido

O CAA difere do CCV principalmente em suas características no estrado fresco, uma vez que no estado endurecido pretende-se ter as características e propriedades semelhantes, como as resistências mecânicas e de durabilidade, assim sendo, não há normas específicas para CAA no estado endurecido.

Após a execução das argamassas foram moldados corpos de prova para a realização de ensaios no estado endurecido, sendo eles: de resistência à compressão axial conforme NBR 5739 (ABNT, 2018); de resistência à tração por compressão diametral conforme NBR 7222 (ABNT,2011), de resistência a tração na flexão com o ensaio de flexão a 3 pontos conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005); e absorção de água, índice de vazios e massa específica conforme NBR 9778 (ABNT, 2009). Considerando a característica de autoadensabilidade do material, não foi realizada a etapa de adensamento manual com os golpes previstos em norma. A Figura 28 demonstra os ensaios de resistência mecânica realizados neste estudo.

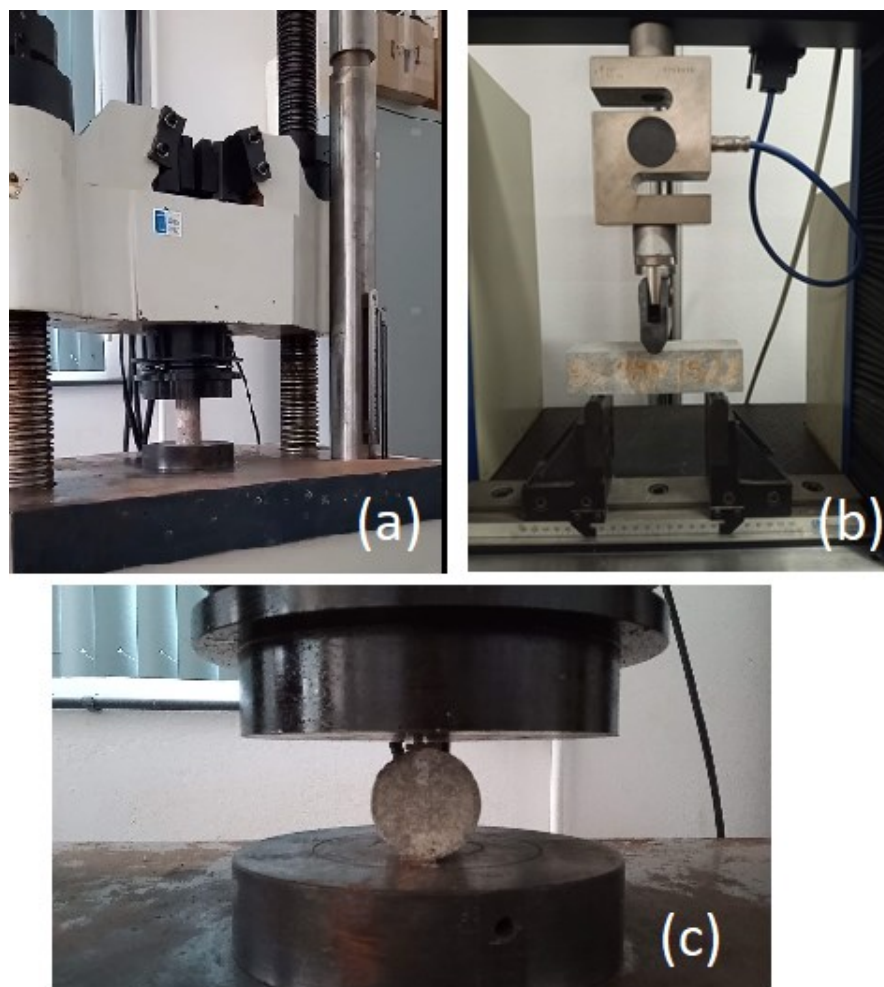


Figura 28 – Ensaios no estado endurecidos realizados (a) resistência à compressão axial (b) resistência a tração na flexão e (c) resistência à tração por compressão diametral.

Fonte: próprio autor

Além dos ensaios citados, amostras dos corpos de prova no estado endurecido foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A Figura 29 mostra alguns dos corpos de prova moldados submersos em água, onde ficaram até serem ensaiados, 28 dias após a moldagem.



Figura 29 – Corpos de prova submersos em água
Fonte: próprio autor

4.6. Ensaio sobre ocorrência de RAA

Após a execução das argamassas do Grupo 2, foi realizada moldagem de corpos de prova para o ensaio de determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, realizado com base na NBR 15577-4 (ABNT, 2018). Considerando a característica de autoadensabilidade do material, não foi realizada a etapa de adensamento manual com os golpes previstos em norma.

Os traços utilizados para a realização deste ensaio foram os mesmos para a realização dos ensaios no estado endurecido, ou seja, com proporções diferentes e adições inexistentes na norma, porém com o objetivo de avaliar justamente o efeito da autoadensabilidade e do RVM. Entretanto, para efeito de comparação, um traço seguindo a dosagem de argamassa determinada no item 6.3 da norma foi executado, porém com a substituição de 30% da areia por RVM. A Figura 30 mostra um conjunto de barras após a moldagem de AAA.



Figura 30 – Corpos de prova moldados para ensaio de ocorrência de RAA
Fonte: próprio autor

O ensaio consiste em, após a moldagem, manter os corpos de prova em cura úmida por 24 horas e após esse período, identifica-las e levá-las para imersão em água a temperatura ambiente em recipiente selado. O recipiente é levado a uma estufa ventilada ou banho termo-

regulador por 24 horas, aquecendo até 80°C em (6 ± 2) h. Em seguida, a leitura inicial das barras de argamassa é realizada, retirando uma de cada vez da água e colocadas no comparador (em posição a ser marcada para que as próximas leituras sejam sempre na mesma posição), giradas lentamente 360° e anotada a menor leitura. Após a primeira leitura, as barras devem ser todas colocadas em outro recipiente, totalmente imersas em uma solução de NaOH ($1,0 \pm 0,1$)N à temperatura de $(80 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, selando e retornando o recipiente à estufa ou banho termo-regulador. As barras devem permanecer nesta condição por mais 28 dias, sendo realizadas leituras aos 14 dias e 28 dias de imersão na solução, além de leituras intermediárias para acompanhar a evolução das expansões. A Figura 31 ilustra um grupo de barras deste estudo durante o processo de colocação em solução e em estufa.

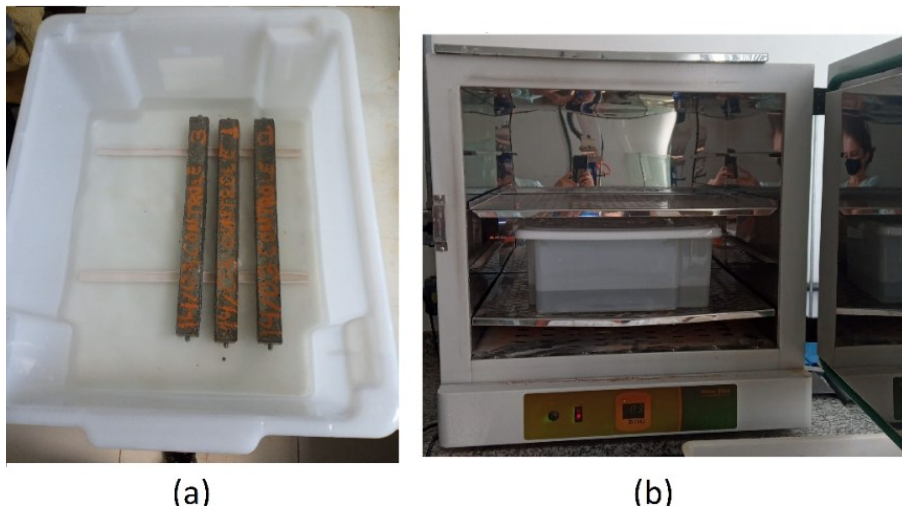


Figura 31 – (a) barras de argamassa em recipiente com solução e (b) recipiente selado e em estufa
Fonte: próprio autor

Para as leituras das barras utilizou-se um relógio comparador de comprimento digital, capaz de medir variações totais maiores que 5 mm e com divisão de leitura de 0,001 mm. O relógio é fixado em uma barra horizontal no alto do equipamento, cuja parte móvel está alinhada verticalmente com outra barra horizontal na base do equipamento, que possui encaixe para receber os pinos das barras. Deve ser utilizada uma barra-padrão para controle do aparelho, que deve ter um comprimento total de $(295,00 \pm 1,5)$ mm, em liga de aço e conforme as especificações do item 3.10 da referida norma. A barra-padrão deve ser marcada para que a leitura seja feita sempre na mesma posição.

Os cálculos realizados de forma a expressar a variação de comprimento de cada barra, através da diferença entre seu comprimento na idade considerada e o seu comprimento na leitura inicial, sendo expressa em porcentagem do comprimento efetivo de medida, com aproximação de 0,001%. Em cada idade, a variação do comprimento é a média dos valores

obtidos nas três barras de argamassa correspondentes, calculada com aproximação de 0,01%, demonstradas em tabelas em gráficos da evolução da expansão média.

Neste estudo, o equipamento de suporte do relógio comparador de comprimento e a barra padrão foram construídos pelo autor, com suporte de colaboradores externos e internos da UNIFEI. A Figura 32a mostra o equipamento adaptado e a barra padrão construída, com material de isolamento na parte central a fim de reduzir o efeito da variação de temperatura durante a sua manipulação, com o relógio comparador zerado para dar início à medição das barras, cuja realização é exemplificada pela Figura 32b.

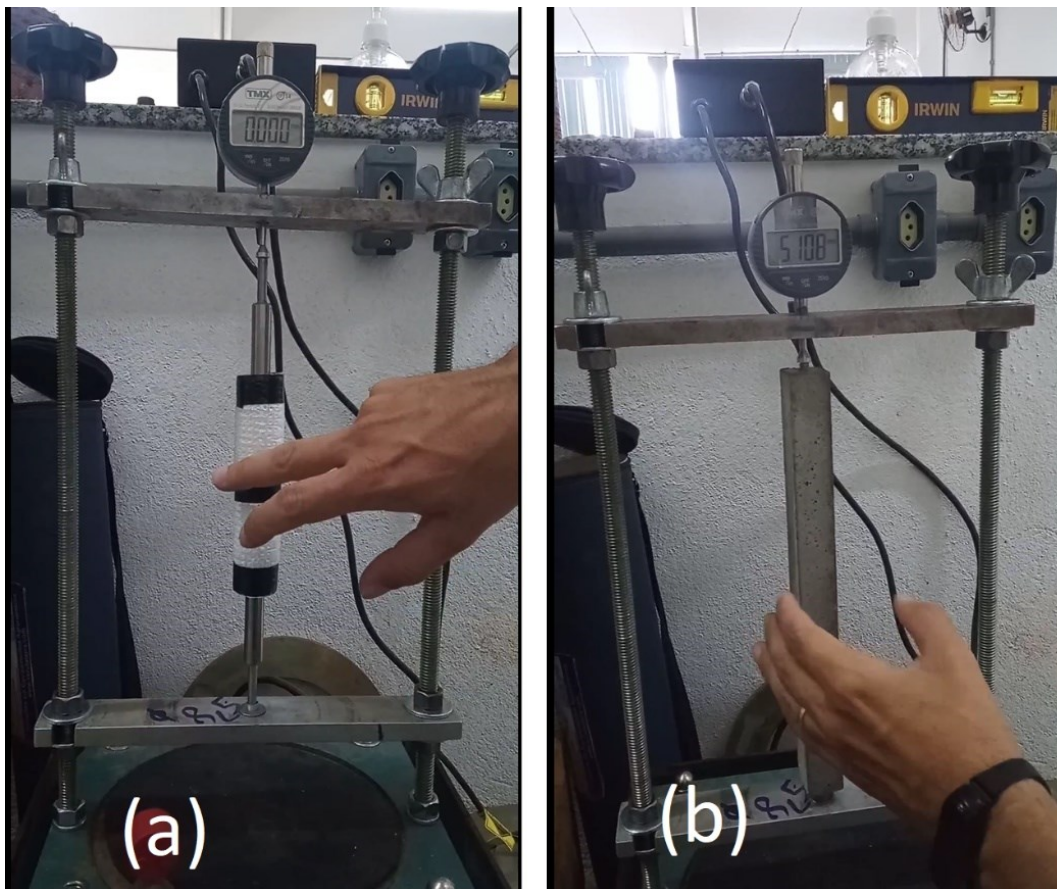


Figura 32 – (a) Equipamento de medição e barra-padrão adaptados para o estudo, (b) execução de medição de barra de argamassa
Fonte: próprio autor

Considerando que a sílica ativa já faria parte da mistura, por já estar dentro do traço utilizado por Silva (2019), a expectativa é que ela já exerceria um efeito mitigador da reação, já que o cimento utilizado (CPV) não está listado entre os materiais inibidores na NBR 15577 (ABNT, 2018).

A depender dos resultados, ou seja, se as barras se mostrassem com expansão além do limite máximo preconizado para o ensaio, que é de 0,19%, poderia ser proposta uma intervenção na mistura com adição de material pozolânico (ABNT NBR 12653), metacaulim

(ABNT NBR 15894-1), sílica ativa (ABNT NBR 13956-1) ou outro tipo de adição, sendo que ao aumento da quantidade de sílica ativa seria uma primeira opção por já fazer parte do traço estudado.

Também poderia ser considerada a possibilidade de realizar o traço desde o início com algum cimento que esteja listado entre os materiais inibidores na ABNT NBR 15577-1:2018, a fim de se ter desde o início uma mistura já menos susceptível à ocorrência da RAA. Entretanto, não foram realizadas tais alterações.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão expostos em quatro etapas: caracterização dos agregados, ensaios no estado fresco, ensaios no estado endurecido e ensaios de RAA. A análise realizada neste trabalho é do tipo quantitativa, com avaliação dos dados numéricos.

5.1. Resultados da caracterização dos agregados

Na caracterização da areia os ensaios empregados foram massa específica segundo a ABNT NBR NM 52:2009; massa unitária segundo a ABNT NBR NM 45:2006; composição granulométrica conforme a ABNT NBR NM 248: 2003; material passante na peneira 75 μ m de acordo com a ABNT NBR NM 46:2003, cujos resultados são apresentados na Tabela 12 e na Figura 33.

Tabela 12 – Características da areia

Abertura da peneira (mm)	% retida	% retida acumulada
9,50	0	0
6,30	0	0
4,75	0	0
2,40	9,1	9,1
1,20	11,1	20,1
0,60	17,1	37,2
0,30	24,1	61,4
0,15	30,5	91,9
< 0,15	8,1	100,0
Massa específica (g/cm³)	2,67	
Massa Unitária (g/cm³)	1,69	
Material fino (passante 0,075mm) (%)	1,18	

Fonte: próprio autor

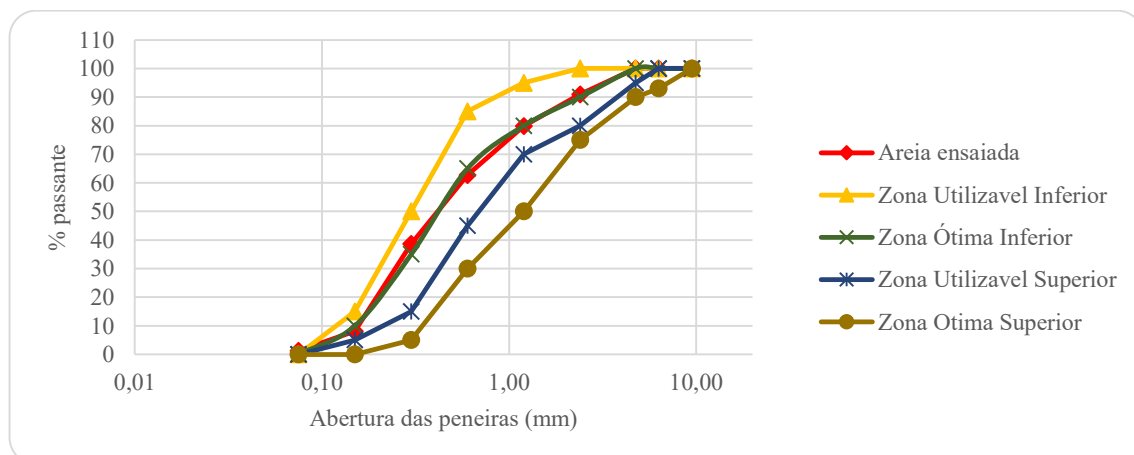


Figura 33 - Curva granulométrica da areia

Fonte: próprio autor

Como a proposta era que o RMV substituísse o agregado miúdo, a caracterização do RVM também seguiu as mesmas normas. O RVM está ilustrado na Figura 34 foi caracterizado da forma original como veio do fornecedor, cujos resultados são apresentados na Tabela 13 e na Figura 35.

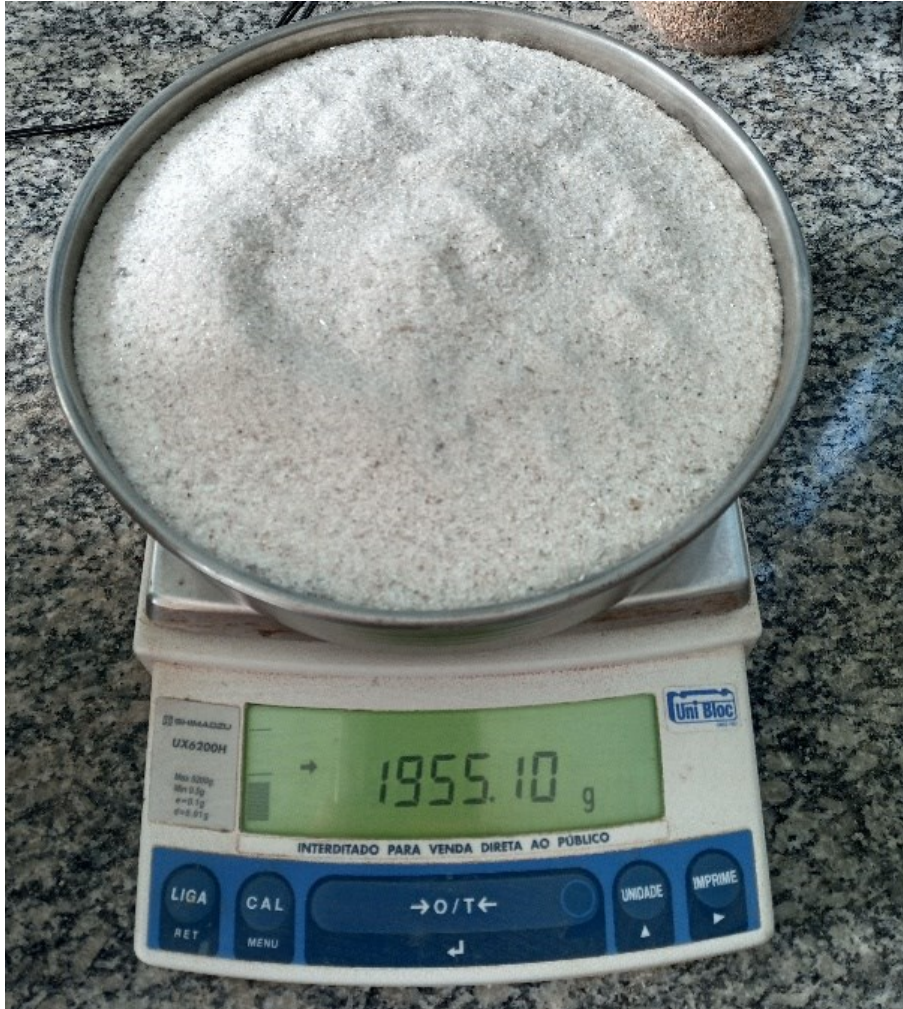


Figura 34 – RVM original
Fonte: próprio autor

Tabela 13 - Características do RVM

Abertura da peneira (mm)	% retida	% retida acumulada
4,75	0,08	0,08
2,4	1,12	1,20
1,2	2,28	3,48
0,6	7,35	10,84
0,3	59,17	70,00
0,15	20,35	90,35
0,075	6,93	97,28
Fundo	2,72	100,00
Massa específica (g/cm ³)	2,55	
Massa Unitária (g/cm ³)	1,24	

Fonte: próprio autor

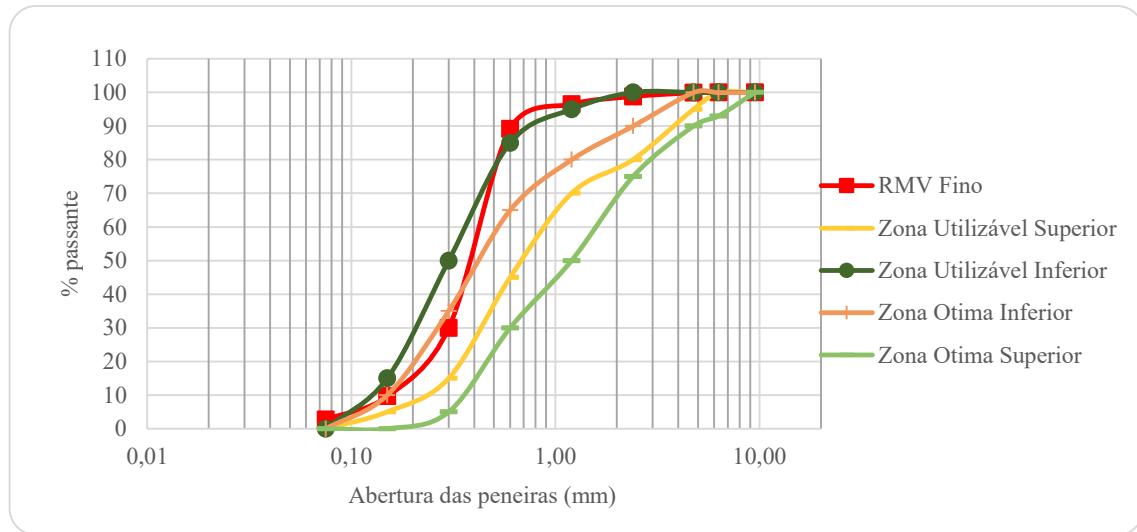


Figura 35 - Curva granulométrica do RVM
Fonte: próprio autor

Com a realização das caracterizações foi observado que a areia estava dentro dos padrões da NBR 7211 (ABNT, 2009), e quase que coincidente com a curva da zona ótima inferior. Entretanto, o RVM apresentou não só uma granulometria fora das curvas ideais, como também muito diferente da areia.

Observando as Tabelas 13 e 14 é possível perceber o grande percentual de partículas retidas na peneira de abertura 0,3mm do RVM em comparação com o da areia, quase duas vezes e meia a mais. A diferença entre o volume de cada grupo de dimensão máxima de grão do RVM original pode ser verificada visualmente na Figura 36, que mostra os grupos acondicionados em embalagens plásticas após a separação, explicada à frente, e a Figura 37 permite a visualização da diferença nas curvas.



Figura 36 – RVM fino original separado em grupos por dimensão máxima de grão
Fonte: próprio autor

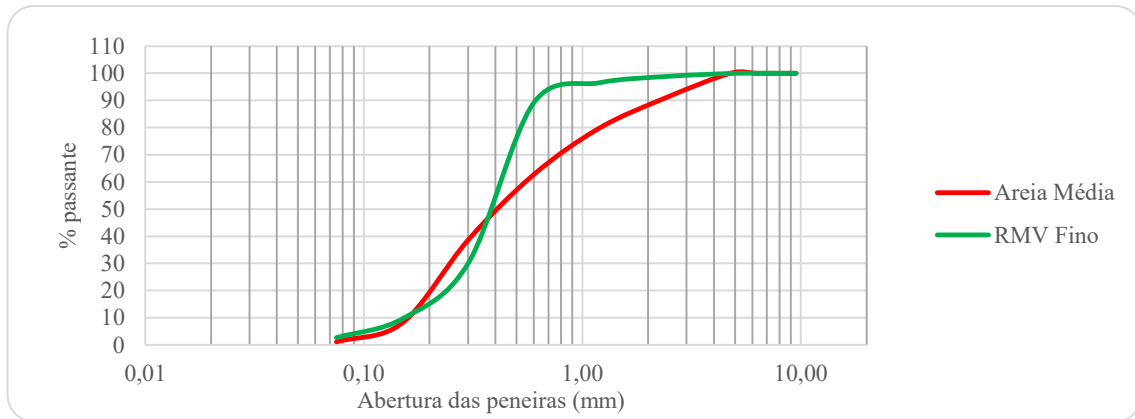


Figura 37 – Comparação entre as curvas granulométricas da areia e do RVM original
Fonte: próprio autor

Foi realizado então um processo para construir um RVM com granulometria próxima à da areia, com o objetivo de ter um material de substituição mais adequado e próximo do ponto de vista granulométrico e, portanto, de papel de preenchimento e volume em conjunto com a pasta na formação da argamassa.

O RVM fino original foi peneirado com as mesmas peneiras do ensaio de granulometria, e separado em porções de acordo com o material retido em cada uma delas, conforme se observa na Figura 38.



Figura 38 – RVM separado por dimensão de grãos retidos nas peneiras

Fonte: próprio autor

Após a separação foi feito o cálculo da quantidade necessária para os traços a serem realizados, chegando a um peso total de RVM a ser construído. Assim, seguindo aproximadamente os percentuais de grãos retidos nas peneiras da areia, foi feita a pesagem de cada grupo na quantidade necessária e em seguida a mistura dos grupos, chegando a um RVM com granulometria próxima à da areia que seria utilizada e substituída. A Tabela 14 ilustra o procedimento realizado, apresentando o cálculo da massa necessária para a construção de 1Kg de RVM com a granulometria similar à da areia.

Tabela 14 – Exemplo de massa necessária para a construção de 1Kg de RVM com a granulometria similar à da areia

Abertura da peneira (mm)	% retida na areia	Massa necessária para construção de 1Kg de RVM (g)
4,75	0	0
2,4	9,1	91
1,2	11,1	111
0,6	17,1	171
0,3	24,1	241
0,15	30,5	305
< 0,15	8,1	81
Soma	100	1.000

Fonte: próprio autor

Embora o RVM utilizado neste estudo tenha sido manipulado para que sua granulometria ficasse muito próxima à da areia, a separação dos grupos de grãos por tamanho máximo não eliminou o fino pó que está presente em todo o resíduo. Esta observação se torna importante para a interpretação do comportamento das argamassas que tiveram parte da areia substituída pelo RVM, pois diversos estudos demonstraram o uso e o efeito do uso do pó de vidro em substituição ao cimento (SOROUSHIAN et al., 2012) ou ainda como material mitigador dos efeitos da AAA em argamassas e concretos (SERPA et al., 2013).

5.2. Resultados dos ensaios no estado fresco

As AAAs foram ensaiadas para a determinação dos parâmetros de fluidez e viscosidade nos dois grupos de traços realizados.

5.2.1. Resultados do ensaio de Fluidez

O ensaio de espalhamento para a determinação do parâmetro de fluidez (G_m) foi realizado para os traços de AAA conforme descrito no Capítulo 4.3. As dimensões d_1 e d_2 bem como o G_m estão expostos na Tabela 15.

O cálculo de G_m dado pela Equação 1, resultou em valores entre 5,9 e 7,3 o que corresponde a diâmetros médios de 26,3 a 28,8 cm para os traços do Grupo 1, e valores de 3,6 a 7,1 com diâmetros médios de 21,5 a 28,5 cm para os traços do Grupo 2.

Tabela 15 – Ensaio de espalhamento para determinação do parâmetro de fluidez G_m

Traço	Grupo 1			Grupo 2		
	d_1 (cm)	d_2 (cm)	G_m	d_1 (cm)	d_2 (cm)	G_m
0 RMV	28,0	27,5	6,7	28,50	28,50	7,1
5 RMV	26,5	26,0	5,9	24,50	24,50	5,0
10 RVM	27,5	27,5	6,6	24,50	24,50	5,0
15 RVM	27,5	27,5	6,6	26,50	26,50	6,0
20 RVM	28,5	29,0	7,3	23,50	24,50	4,8
30 RVM	26,0	26,5	5,9	21,50	21,50	3,6

Fonte: próprio autor

Os resultados mostram que, adotando o intervalo sugerido por Gomes e Barros (2009) de $3 > G_m > 8$, todos os traços tiveram o parâmetro de fluidez aceitável para AAA. Em comparação com o traço controle (0 RVM), que teve $G_m=6,7$ no Grupo 1 e $G_m=7,1$ no Grupo 2, a média de G_m dos traços com substituição de areia por RVM foi de 6,4 no Grupo 1 e 4,9 no Grupo 2. Observando o Figura 39 é possível perceber que não houve uma relação linear entre o G_m e o percentual de substituição de areia por RVM, embora todos tenham ficado entre o intervalo adotado.

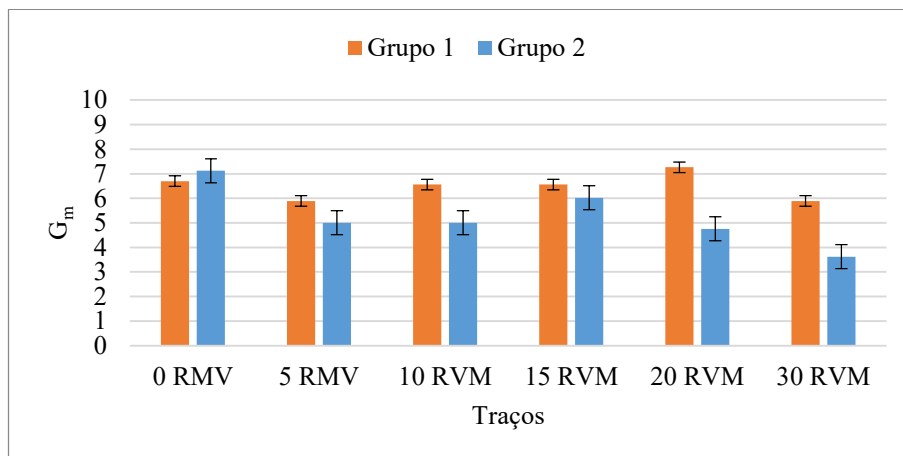


Figura 39 – Valores do parâmetro de fluidez G_m por traço de argamassa autoadensável

Fonte: próprio autor

O estudo de Tuaum (2018) em traços de AAA contendo RVM encontrou dimensões de diâmetro médio entre 242 mm e 255 mm para as misturas com os mesmos teores de substituição do presente estudo, porém aquele estudo variou a dosagem de superplastificante proporcionalmente ao aumento do RVM, enquanto que no presente estudo a dosagem foi mantida a mesma para todos os traços.

De modo geral, exceto o traço 20 RVM do Grupo 1, todos os demais resultaram em misturas com uma deformabilidade menor em relação aos seus respectivos traços controle.

5.2.2. Resultados do ensaio de Viscosidade

O ensaio para determinação do parâmetro de viscosidade (R_m) foi realizado para os traços de AAA conforme descrito no Capítulo 4.3. A Tabela 16 apresenta os tempos medidos e o valor calculado pela Equação 2 para cada traço de AAA.

Tabela 16 – Ensaio de Funil V para determinação do parâmetro de viscosidade R_m

TRAÇO	Grupo 1		Grupo 2	
	t (s)	R_m	t (s)	R_m
0 RMV	7	1,4	7	1,4
5 RMV	9	1,1	9	1,1
10 RVM	7	1,4	9	1,1
15 RVM	8	1,3	8	1,3
20 RVM	10	1,0	7	1,4
30 RVM	8	1,3	11	0,9

Fonte: próprio autor

Todos os traços, com exceção do 30 RVM Grupo 2, tiveram tempos de 7 a 10 segundos, o que resultaram em R_m entre 1 e 2, desta forma, dentro do intervalo considerado como aceitável para produzir argamassas para compor um CAA, e coerentes com os encontrados em outro estudo (TUAUM, 2018). Assim como nos resultados de G_m , os valores de R_m não apresentaram relação proporcional, crescente ou decrescente em relação ao percentual de substituição, diferente dos resultados de Tuaum (2018) que observou um aumento proporcional. Os resultados podem ser visualizados no Figura 40.

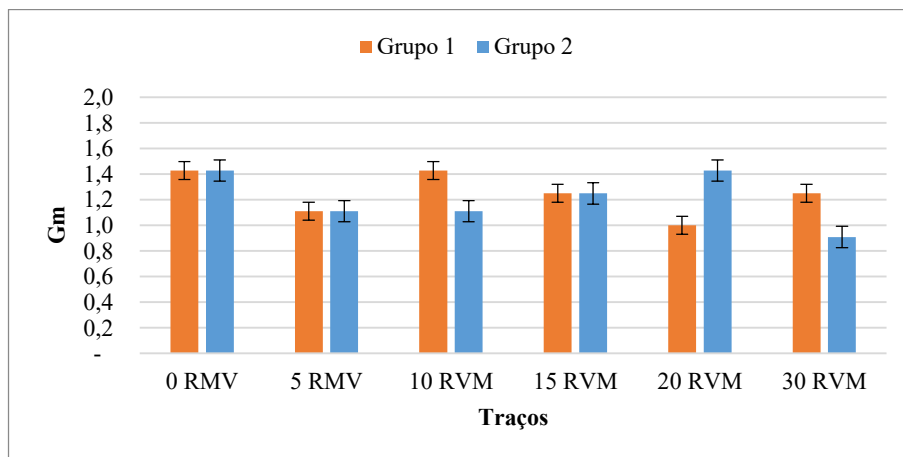


Figura 40 – Valores de parâmetro de viscosidade R_m por traço de argamassa autoadensável

Fonte: próprio autor

Analisando os valores de R_m traços é possível perceber que todos os traços com substituição tiveram resultados iguais ou inferiores aos traços controles, evidenciando um aumento da viscosidade com o uso do RVM.

5.3. Resultados dos ensaios no estado endurecido

Após a confecção dos traços e todos serem considerados autoadensáveis pelos parâmetros dos ensaios no estado fresco, foram moldados os corpos de prova para os ensaios de verificação das resistências mecânicas aos esforços de compressão axial, tração e flexão, além da determinação de massa específica, índice de vazios e absorção de água.

5.3.1. Resultados dos ensaios de resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados após 28 dias de cura submersa para todos os traços de AAA, dos grupos 1 e 2, cujos resultados são apresentados nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17 – Ensaio de resistência à compressão axial dos traços do Grupo 1

Traço	Resistência à Compressão (MPa)				
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Desvio padrão
0 RVM	46,19	36,84	52,79	45,27	8,01
5 RVM	50,86	56,83	46,54	51,41	5,17
10 RVM	41,76	47,94	28,10	39,27	10,15
15 RVM	42,51	49,95	46,08	46,18	3,72
20 RVM	47,28	48,98	45,69	47,32	1,64
30 RVM	49,68	43,12	53,27	48,69	5,15

Fonte: próprio autor

Tabela 18 – Ensaio de resistência à compressão axial dos traços do Grupo 2

Traço	Resistência à Compressão (MPa)			
	Amostra 1	Amostra 2	Média	Desvio padrão
0 RVM	55,378	50,21	52,79	3,65
5 RVM	53,277	59,308	56,29	4,26
10 RVM	51,781	67,527	59,65	11,13
15 RVM	65,902	68,765	67,33	2,02
20 RVM	51,351	57,685	54,52	4,48
30 RVM	49,646	53,307	51,48	2,59

Fonte: próprio autor

Todas amostras com incorporação de RMV apresentaram valores de resistência média à compressão superiores aos limites que atendem os requisitos de classificação como argamassa estrutural, bem acima do valor médio aos 28 dias de 17,2 MPa, especificado pela norma ASTM C270 (ASTM, 2019).

No Grupo 2 foram moldados e ensaiados apenas dois corpos de prova, pois o objetivo principal da execução dos traços foi de moldar barras para o ensaio de RAA, entretanto, pretendia-se também verificar se os traços se repetiriam em condições no estado fresco e no endurecido, para isso verificando apenas a resistência à compressão. A Figura 41 demonstra a resistência média à compressão para cada traço.

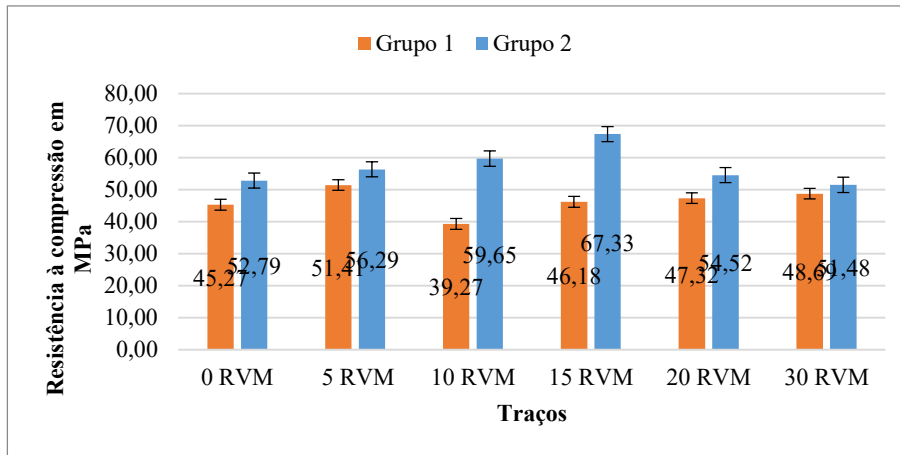


Figura 41 – Resistência à compressão axial aos 28 dias
Fonte: próprio autor

Os resultados dos traços do Grupo 2 foram todos melhores do que os do Grupo 1, o que pode ser atribuído, entre outros fatores, a um melhor domínio na execução dos experimentos. Diferentemente de alguns resultados apresentados na literatura, nos quais o uso de resíduos de vidro reciclado como substituição da areia em materiais cimentícios indicaram diminuição da resistência à compressão quando comparado com traço de controle (ALI e AL-TERSAWY, 2012; TAN e DU, 2013), pode-se perceber que apenas o traço de AAA com a proporção de substituição de 10% por RMV do Grupo 1 apresentou redução da resistência em 13,3%, em comparação com os resultados do traço controle. Embora o valor considerado para a comparação de resultados seja a média das 3 amostras ensaiadas, vale observar que a Amostra 3 do lote de 10 RVM do Grupo 1 apresentou uma resistência muito abaixo das outras duas (possíveis motivos como de falhas internas imperceptíveis, falhas na retificação da amostra) e contribuiu para que o valor médio ficasse bem abaixo do traço controle. Para o mesmo teor de substituição no traço do Grupo 2 a resistência média maior que a do Grupo 1 e acima dos traços controle.

Os demais traços do Grupo 1 apresentaram aumento da resistência à compressão, cujo destaque foi traço 5 RVM que obteve um aumento de 13,6% em relação ao traço controle, seguido do traço 30 RVM com aumento de 7,5%. No Grupo 2 apenas o traço 30 RVM apresentou uma pequena queda na resistência em relação ao traço controle, onde destaque foi para o traço 15 RVM seguido do traço 10 RVM, com aumentos de 27,5% e 13,0% respectivamente. No Grupo 1, os traços com teor de substituição de 15% e 20% de areia por RVM tiveram um aumento menor, porém ainda acima do traço de referência. No Grupo 2, os traços de 5% e 20% tiveram um aumento menor, porém ainda acima do traço de referência.

A variação de resultados de resistência também foi observada no trabalho de Ahmad et al. (2021), cuja incorporação com resíduos de vidro em substituição do cimento, apresentaram aumento da resistência a compressão em até 20%, depois diminuiu gradualmente, conforme observado nos resultados do concreto com 30% de resíduos de vidros, em comparação com o concreto controle.

Conforme exposto no referencial teórico, características como resistência, textura da superfície e maior área superficial do agregado de vidro podem ser apontadas como responsáveis pelo aumento da resistência à compressão. Adicionalmente, o vidro é um material que pode apresentar atividade pozolânica, e a sílica presente nos resíduos de vidro reage com o hidrato de cálcio e o converte em gel de hidrato de silicato de cálcio, o qual proporciona uma propriedade de ligação adicional, levando a uma maior resistência à compressão (AHMAD, et al., 2021).

Tuaum (2018) encontrou valores ligeiramente menores de resistência a compressão aos 28 dias nos traços com 10, 20 e 30% de RVM em comparação ao traço controle, cujos resultados são comparados aos do presente estudo no Figura 42, usando a média de todas as amostras dos dois grupos de traços. Neste estudo observamos todos os traços obtiveram resistências médias superiores ao controle.

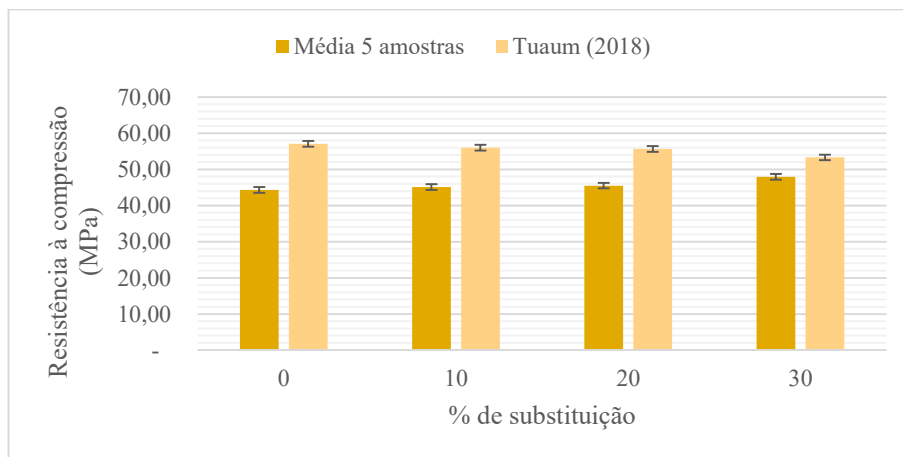


Figura 42 – Resistência à compressão dos resultados de Tuaum (2018) com os valores médios de resistência obtidos neste trabalho
Fonte: próprio autor

5.3.2. Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados após 28 dias de cura submersa para todos os traços de AAA, cujos resultados são apresentados na Tabela 19, com os valores das forças de ruptura informadas pelo equipamento no ensaio.

Tabela 19 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral – Força de ruptura (kN) por amostra

Traço	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
0 RVM	36,13	33,45	46,4
5 RVM	48,25	48,1	46,4
10 RVM	33,07	37,49	35,6
15 RVM	43,37	40,04	38,17
20 RVM	44,84	35,91	37,68
30 RVM	42,72	45,74	48,25

Fonte: próprio autor

Com os dados de força foram calculadas as resistências à tração indireta, apresentados na Tabela 20, através da equação:

$$f_{ct,sp} = 2F/\pi Ld \quad (\text{Equação 3})$$

onde:

$f_{ct,sp}$ = Resistência à tração indireta (MPa)

F = Força aplicada (N)

L = Comprimento do corpo de prova (mm)

d = diâmetro do corpo de prova (mm)

Tabela 20 – Resistência à tração indireta para os traços de argamassa autoadensável

Traço	Resistência à Tração indireta (MPa)		Variação em relação à resistência à compressão
	Média	Desvio padrão	
0 RVM	4,92	0,87	10,9%
5 RVM	6,06	0,13	11,8%
10 RVM	4,51	0,28	11,5%
15 RVM	5,16	0,34	11,2%
20 RVM	5,03	0,60	10,6%
30 RVM	5,80	0,35	11,9%

Fonte: próprio autor

Os resultados demonstram que as resistências à tração das argamassas ficaram dentro da ordem de grandeza esperada em relação à resistência à compressão axial, sendo que a média ficou em 11,3%.

A Figura 43 mostra um gráfico com resistência média para cada traço.

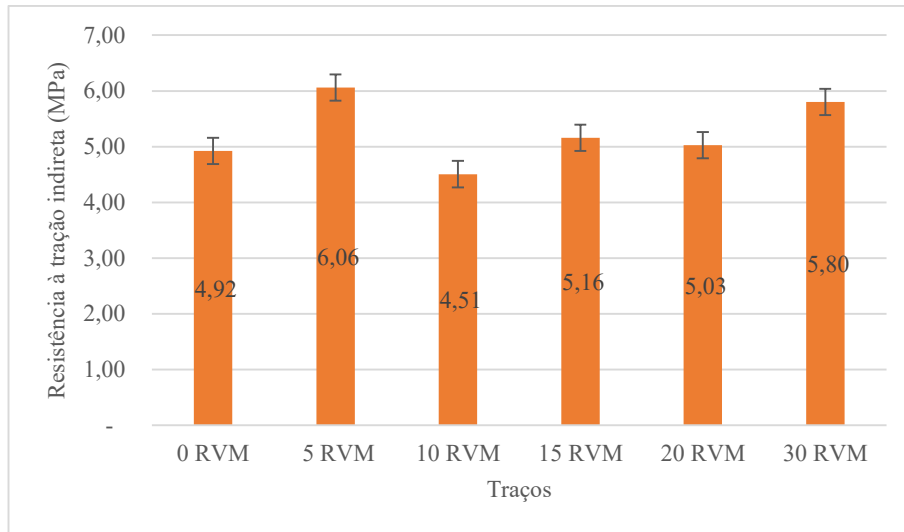


Figura 43 - Resistência à tração indireta para cada traço de argamassa autoadensável
Fonte: próprio autor

A comparação dos resultados de diversos estudos realizado por Mohajerani et al. (2017) envolvendo a substituição de areia por resíduos de vidro, já discutido no referencial teórico deste trabalho, mostrou ser inconclusivo para diversas características devido à grande divergência entre os resultados de tais estudos. No caso da resistência à tração, o pequeno número de estudos que realizou ensaios a diferença entre os resultados foi evidente, como pode ser observado na Figura 19, onde, até o teor de substituição de 20% metade dos estudos resultou em aumento de resistência e a outra metade, em diminuição, e aos 30% todos diminuíram.

A Figura 44 apresenta uma comparação da variação de resistências à compressão e à tração indireta dos traços com substituição do Grupo 1 em relação ao traço controle. Assim como na resistência à compressão o traço 10 RVM apresentou uma diminuição da resistência à tração, sendo esta mais acentuada em termos percentuais. Também é possível notar que não houve, assim como nos ensaios no estado fresco, uma proporcionalidade entre teor de substituição e alteração de resistência mecânica. Nem mesmo entre as variações de resistência à compressão e à tração para um mesmo traço, ou entre eles, há uma proporção, sendo que nos traços 5 RVM, 10 RVM E 30 RVM a variação de resistência à compressão foi maior, enquanto que nos demais, à tração foi que variou mais.

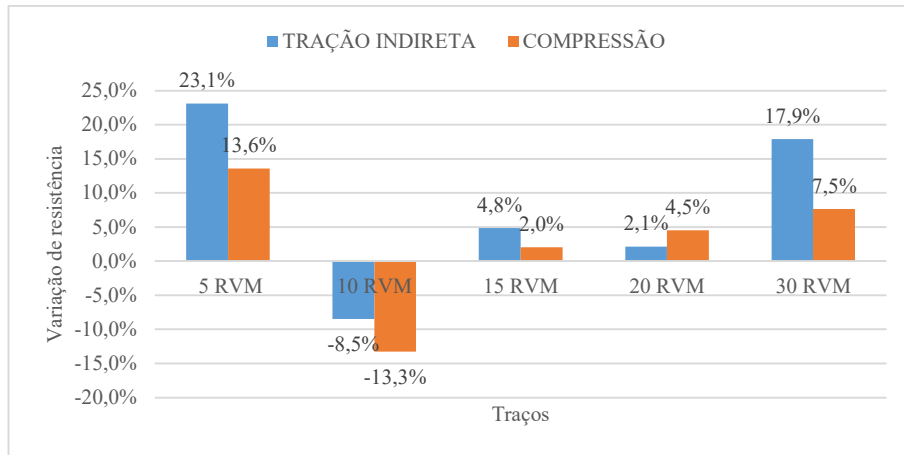


Figura 44- Variação de resistências em relação ao traço 0 RVM

Fonte: próprio autor

5.3.3. Resultados dos ensaios de resistência à flexão

Os ensaios de resistência à tração na flexão a três pontos foram realizados após 28 dias de cura submersa para todos os traços de AAA. O ensaio fornece dados da força e o respectivo deslocamento no ponto de aplicação da força para cada amostra, com os quais foi possível traçar as curvas de força versus deslocamento para todas as 18 amostras. Das três amostras de cada traço, foi selecionada a curva média em termos de valores de deslocamentos para o propósito de comparação dos resultados, que estão plotadas no gráfico da Figura 43, onde se observa que o traço controle apresentou o menor valor de força de pico e uma rigidez muito reduzida ao deslocamento vertical no início do ensaio. Os prismas de traços com substituição tiveram um menor deslocamento para atingir a força máxima, porém com forças maiores do que o traço controle.

Os valores dos espécimes com substituição de RVM apresentaram a força máxima aplicada (pico da curva) superior ao obtido pelo controle. Quanto ao comportamento das curvas desses corpos de prova, pode-se entender que seja comportamento típico de materiais quase-frágeis, como argamassas e concreto, quando submetido a tensões de tração na flexão. Pode-se observar nos resultados apresentados na Figura 45 que logo após o ensaio atingir o pico de carga, provavelmente ocorrem as primeiras fissuras na parte tracionada dos espécimes, e observa-se uma parte descendente da curva de forma brusca. Este fato está associado à reduzida resistência dos materiais quase-frágeis. O fenômeno que ocorre quando a força máxima é atingida está relacionado com a superação da resistência à tração do material com consequente início do estado de fissuração. A rigidez é reduzida abruptamente e o corpo de prova passa a não absorver mais carga. Porém, é importante ressaltar que, diferentemente dos materiais que apresentam comportamento de escoamento, como o aço, os materiais quase-frágeis desenvolvem uma região denominada coesiva à frente das

primeiras fissuras. Nesta região de micro fissuração, o volume do material está parcialmente destruído, porém, ainda continua a transferir tensões entre as seções adjacentes, fenômeno denominado de fratura coesiva. O espécime com material quase-frágil apresenta, na primeira parte da curva, um aumento contínuo de absorção de carga com desenvolvimento de deformações, até o pico de carga. Após o pico de carga, ocorre um estado de fissuração e o corpo de prova passa a apresentar um decréscimo de carga com pouco desenvolvimento de deformação. Nesta segunda parte da curva ocorre o denominado amolecimento do material.

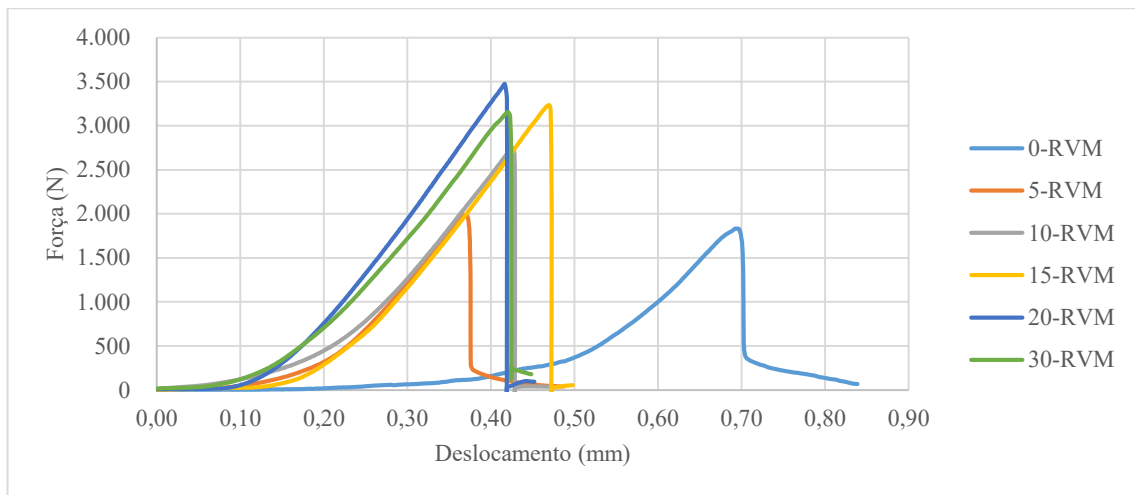


Figura 45 – Curvas de Força x Deslocamento para diferentes traços de argamassa autoadensável
Fonte: próprio autor

As forças máximas de cada amostra formam a força máxima média para cada traço, demonstradas da Tabela 21.

Tabela 21 – Força máxima traços de argamassa autoadensável no ensaio de flexão

TRAÇO	AMOSTRA 1 (N)	AMOSTRA 2 (N)	AMOSTRA 3 (N)	MÉDIA (N)
0 RVM	2.088,50	1.832,80	1.832,80	1.918
5 RVM	1.926,70	1.989,30	1.853,70	1.923
10 RVM	2.745,80	2.535,40	2.542,30	2.608
15 RVM	2.599,70	2.987,50	3.234,40	2.941
20 RVM	2.751,00	2.855,30	3.470,90	3.026
30 RVM	3.695,20	3.154,40	3.050,10	3.300

Fonte: próprio autor

Para cada força máxima foi registrada a deformação média correspondente que, numericamente confirma a situação visível nas curvas, de que o traço controle teve uma maior deformação em sua força de ruptura.

A NBR 13279 (ABNT, 2005) indica o cálculo da resistência à tração na flexão, para prismas de 40x40x160mm, pela equação:

$$R_f = 1,5 F_f L / 40^3$$

(Equação 4)

onde:

R_f é a resistência à tração na flexão, em megapascals;

F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons;

L é a distância entre os suportes, em milímetros;

A Tabela 22 demonstra os resultados de força, deformação máxima e resistência à tração na flexão, além da comparação deste último resultado em relação ao traço controle e à resistência à compressão.

Tabela 22 – Resumo dos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão

TRAÇO	Força máxima (N)	Deformação na força máxima (mm)	Resistência à tração		
			R_f (MPa)	Variação em relação ao traço controle	Proporção em relação à resistência à compressão
0 RVM	1.918	0,5160	3,30	-	7,3%
5 RVM	1.923	0,4051	3,31	0,3%	6,4%
10 RVM	2.608	0,3977	4,48	36,0%	11,4%
15 RVM	2.941	0,4601	5,05	53,3%	10,9%
20 RVM	3.026	0,4105	5,20	57,8%	11,0%
30 RVM	3.300	0,4333	5,67	72,0%	11,6%

Fonte: próprio autor

A visualização das forças máximas e da variação delas em relação ao traço controle pode ser observada na Figura 46, onde o gráfico expõe o grande e crescente aumento da resistência à tração a partir do teor de 10% de substituição de areia por RVM.

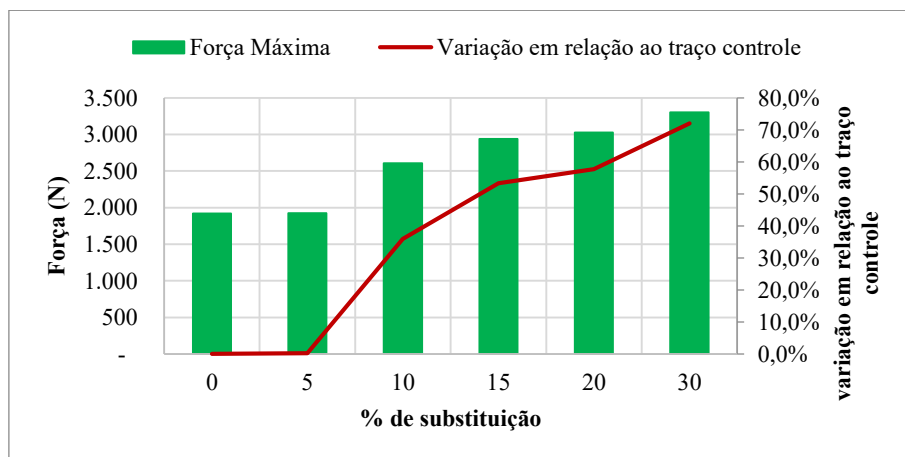


Figura 46 – Forças máximas e variação em relação ao traço controle

Fonte: próprio autor

No gráfico apresentado na Figura 47 chama à atenção a grande diferença dos resultados para os traços 0 RVM e 5 RVM nos dois ensaios de resistência à tração, onde o ensaio de tração na flexão resultou nos valores bem mais baixos. Nos teores de substituição 10% e seguintes houve grande coerência entre os resultados, sendo que os valores de R_f

foram progressivamente crescentes, enquanto que os de $f_{ct,sp}$ variaram em aumento e diminuição desde o primeiro traço.

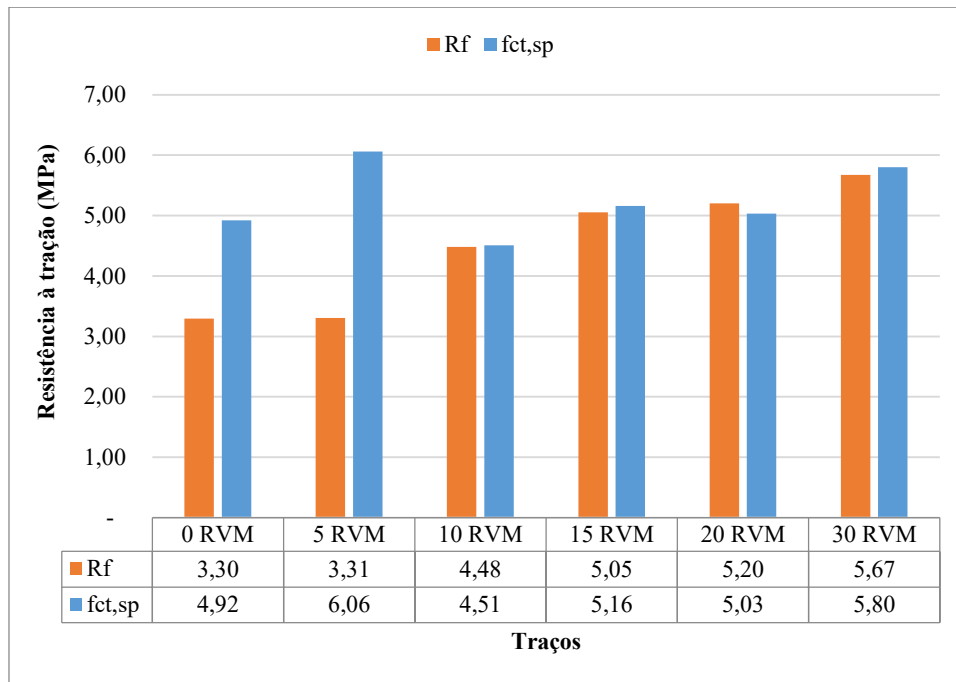


Figura 47 – Resistência à tração na flexão e à compressão diametral

Fonte: próprio autor

Abdallah e Fan (2014) tiveram resultados de resistência de tração na flexão crescentes com o aumento do teor de vidro em substituição aos agregados de concreto convencional, observando inclusive que a variação do aumento de resistência foi notada ao longo do tempo, sendo que aos 14 dias de ensaio as resistências de traços com maior teor de vidro eram menores dos que as de traços de baixo teor, situação que se inverteu aos 28 dias.

Ismail e Al-Hashmi (2009) e Turgut e Yahlizade (2009), observaram o crescimento da resistência à tração na flexão em concretos convencionais feitos com areia de vidro, onde a ação pozolônica do vidro também foi apontada como possível causa desse incremento.

5.3.4. Resultados dos ensaios determinação de massa específica, índice de vazios e absorção de água

Os ensaios foram realizados seguindo a ABNT NBR 9778:2009 com duas amostras de cada traço e os resultados são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Ensaio de massa específica, índice de vazios e absorção de água para traços de argamassa autoadensável

Traço	Absorção por Imersão	Índice de Vazios	Massa Especifica da Amostra Seca	Massa Especifica da Amostra Saturada
0 RVM	4,07%	8,55%	2,10	2,19
5 RVM	4,36%	8,82%	2,02	2,11
10 RVM	5,00%	10,42%	2,08	2,19
15 RVM	4,70%	9,86%	2,09	2,19
20 RVM	5,39%	10,84%	2,01	2,12
30 RVM	6,06%	12,16%	2,01	2,13

Fonte: próprio autor

Em comparação com o traço de referência, todos os traços com substituição de areia por RVM apresentaram um acréscimo no índice de vazios e um decréscimo nas massas específicas. Assim como nos resultados de ensaios de resistências e de estado fresco, não houve uma proporcionalidade progressiva entre o percentual de substituição e os resultados.

Dentre os estudos analisados por Mohajerani et al. (2017) que observaram as características relacionadas ao peso dos produtos com agregados de vidro reciclado, os autores constataram que na maioria houve redução no peso unitário e nas densidades fresca e úmida, o que está de acordo com os resultados deste estudo.

Para os traços com substituição de até 30% de areia por RVM este estudo encontrou uma relação de crescimento na absorção de água proporcional ao aumento do teor de substituição, o que foi exatamente o inverso dos resultados de Tuaum (2018). A Figura 48 permite visualizar essa divergência, embora no traço de 30 RVM o resultado tenha sido bem próximo.

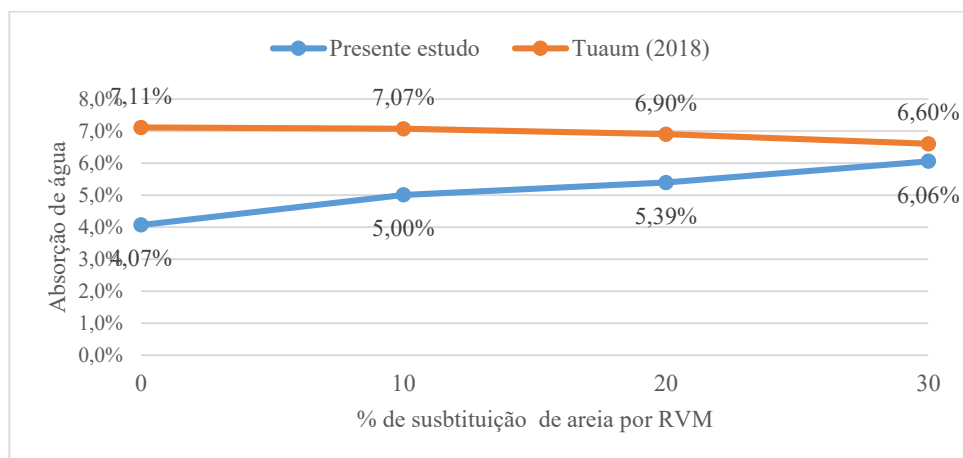


Figura 48 - Absorção de água para traços de argamassa autoadensável e os de Tuaum (2018)

Fonte: próprio autor

5.3.5. Resultados dos ensaios de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado

Os ensaios de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado foram realizados com base na ABNT NBR 15577-4 para todos os traços de AAA e um traço de argamassa convencional (AC) seguindo as proporções prescritas na norma, porém com a substituição de 30% de areia por RVM. Após a cura de 24 horas em câmara úmida e mais 24 horas em água aquecida, foi realizada a leitura inicial e as barras voltaram para a estufa, em solução NaOH ($1,0 \pm 0,1$)N à temperatura de (80 ± 2) °C, e tiveram leituras em outras idades até 28 dias após a primeira. Leituras intermediárias às datas de início e 28 dias permitiram acompanhar a evolução das expansões das barras.

A Tabela 24 apresenta os dados dos ensaios para o grupo de barras de referência, sem substituição de areia por RVM, com o número de dias a partir do primeiro em solução e as medidas de variação em relação à barra padrão em cada idade.

A partir da medida de variação são calculados, para cada idade: os comprimentos totais das barras em cada idade, somando a variação à medida da barra padrão; a média de comprimento total das barras; a variação média acumulada através da diferença entre a medida em cada idade e a medida inicial; e a variação média acumulada em percentual.

Tabela 24 – Ensaio de expansão pelo método acelerado para o traço controle 0 RVM

GRUPO	AAA CONTROLE - 0% RVM				
Dias a partir do 1º na solução	Leitura inicial	5	20	22	29
Varição (mm)					
Barra 1	5,165	5,221	5,341	5,402	5,608
Barra 2	6,118	6,160	6,231	6,298	6,458
Barra 3	5,363	5,388	5,471	5,543	5,721
Comprimento da barra (mm)					
Barra 1	300,165	300,221	300,341	300,402	300,608
Barra 2	301,118	301,160	301,231	301,298	301,458
Barra 3	300,363	300,388	300,471	300,543	300,721
Comprimento médio (mm)	300,549	300,590	300,681	300,748	300,929
Varição média acumulada (mm)	0	0,041	0,132	0,199	0,380
Varição média acumulada (%)	0	0,014	0,044	0,066	0,127

Fonte: próprio autor

As leituras foram realizadas para todos os traços, cujos dados finais estão apresentados nas Tabelas 25 e 26.

Tabela 25 – Traços 0 RVM, 5RVM, 10 RVM, 15 RVM e 20 RVM para as argamassas autoadensáveis ao ensaio de expansão acelerada

TRAÇO AAA 0 RVM					
Dias a partir do 1º na solução	Leitura inicial	5	20	22	29
Variação média acumulada	0,000%	0,014%	0,044%	0,066%	0,127%
TRAÇO AAA 5 RVM					
Dias a partir do 1º na solução	Leitura inicial	4	19	21	28
Variação média acumulada	0,000%	0,04%	0,12%	0,14%	0,20%
TRAÇO AAA 10 RVM					
Dias a partir do 1º na solução	Leitura inicial	4	19	21	28
Variação média acumulada	0,000%	0,00%	0,04%	0,06%	0,13%
TRAÇO AAA 15 RVM					
dias a partir do 1º na solução	Leitura inicial	13	15	22	28
Variação média acumulada	0,000%	0,00%	0,03%	0,03%	0,02%
TRAÇO AAA 20 RVM					
dias a partir do 1º na solução	Leitura inicial	13	15	22	28
Variação média acumulada	0,000%	-0,07%	0,01%	0,01%	0,00%

Fonte: próprio autor

Tabela 26 - Resultados dos traços 30 RVM para a argamassa autoadensável e argamassa convencional ao ensaio de expansão acelerada

TRAÇO AAA 30 RVM							
Dias a partir do 1º na solução	Leitura inicial	7	13	18	21	25	29
Variação média acumulada	0,000%	0,00%	0,01%	0,01%	0,05%	0,06%	0,15%
TRAÇO AC 30 RVM							
Dias a partir do 1º na solução	Leitura inicial	7	12	15	19	23	26
Variação média acumulada	0,000%	0,08%	0,09%	0,15%	0,33%	0,66%	0,92%

Fonte: próprio autor

As Figuras 49 a 55 demonstram a evolução das expansões das barras de argamassa. O traço sem substituição apresentou um bom desempenho, apresentando um aumento da expansão a partir do 20º dia em solução, porém ficando abaixo do limite considerado potencialmente reativo ao final dos 28 dias com uma variação dimensional de 0,127% em relação à leitura inicial. Isso demonstra que, para o traço e os materiais utilizados na argamassa AAA desenvolvida para comparação, o uso desta areia não representa um risco ao concreto a ser desenvolvido a partir desta argamassa.

O traço com substituição de 5% de areia por RVM foi o único que apresentou uma expansão final acima dos 0,19% utilizados pela NBR 15577 (ABNT, 2018) para considerar que um agregado é potencialmente reativo para RAA. Ainda assim, o valor foi muito próximo, sendo 0,20%, porém demonstra que o RVM é um material capaz de provocar a RAA nas argamassas autoadensáveis.

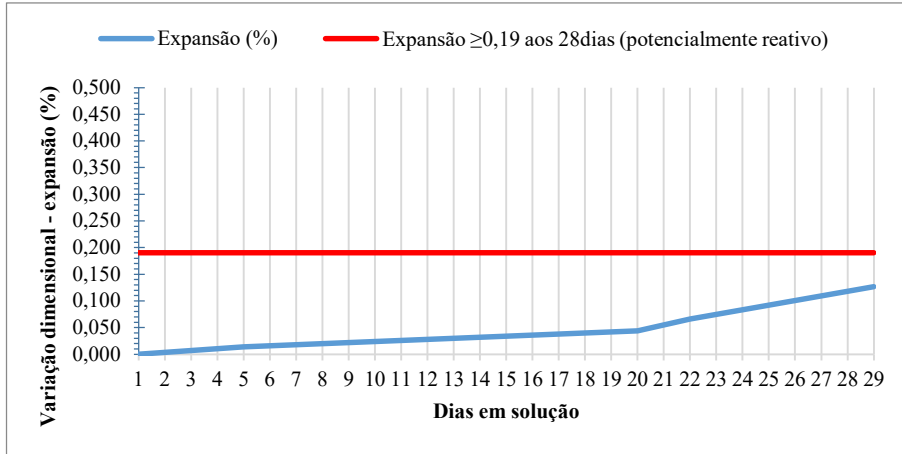


Figura 49 - Expansão por reação álcali-agregado - Método Acelerado Grupo AAA 0% RVM
Fonte: próprio autor

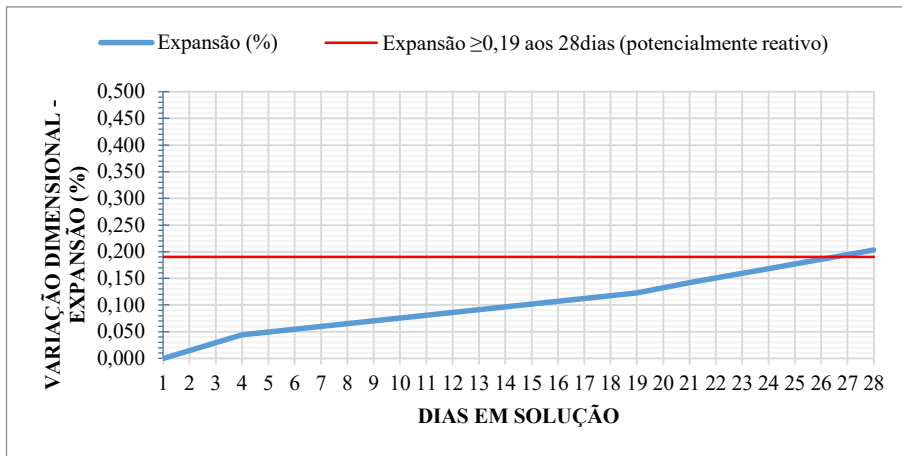


Figura 50 - Expansão por RAA - Método Acelerado Grupo AAA 5% RVM
Fonte: próprio autor

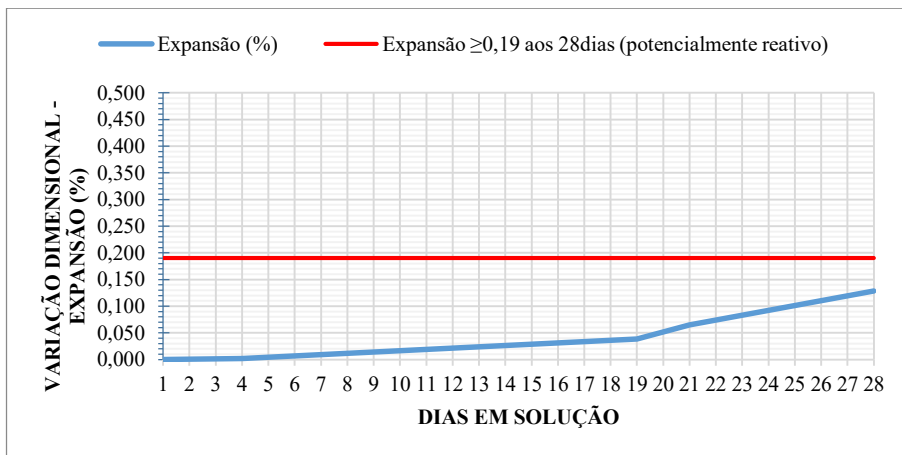


Figura 51 - Expansão por reação álcali-agregado - Método Acelerado Grupo AAA 10% RVM
Fonte: próprio autor

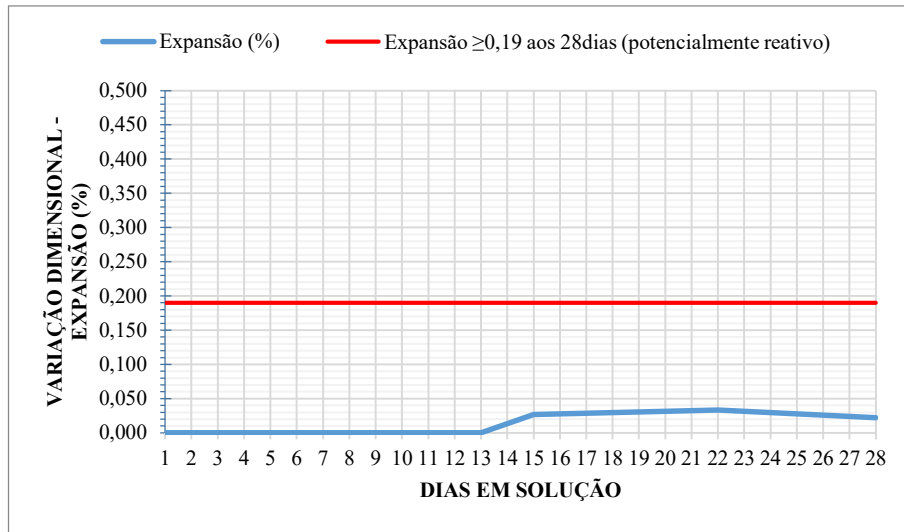


Figura 52 - Expansão por reação álcali-agregado - Método Acelerado Grupo AAA 15% RVM
Fonte: próprio autor

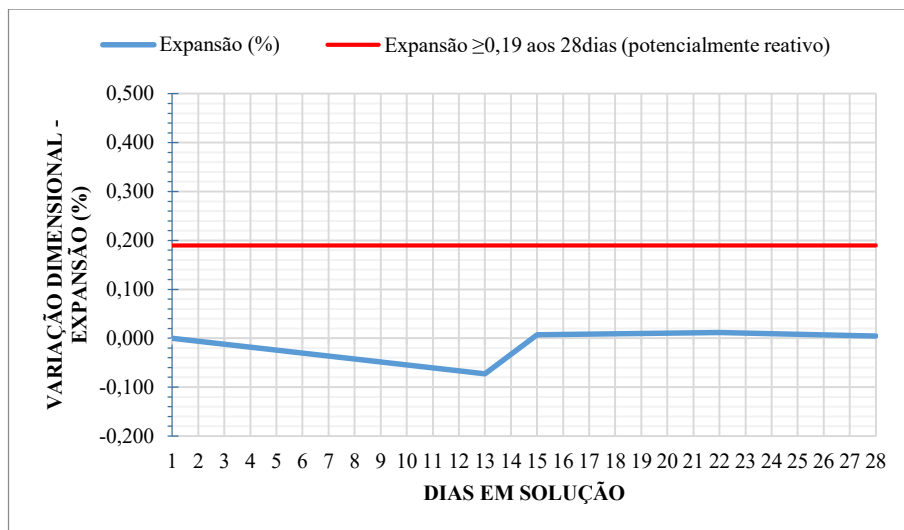


Figura 53 - Expansão por reação álcali-agregado - Método Acelerado Grupo AAA 20% RVM
Fonte: próprio autor

Já para a teor de substituição de 10% de areia por RVM o comportamento da barra no ensaio foi muito parecido e comparável com o traço de controle, tanto ao longo do período como no valor da variação dimensional final.

Essa tendência de diminuição de expansão com o aumento do teor de substituição continuou nas barras dos traços AAA 15 RVM e AAA 20 RVM, onde a expansão acumulada foi notadamente menor do que os traços com menor teor, chegando ao final dos 28 dias com valores próximos a 0%.

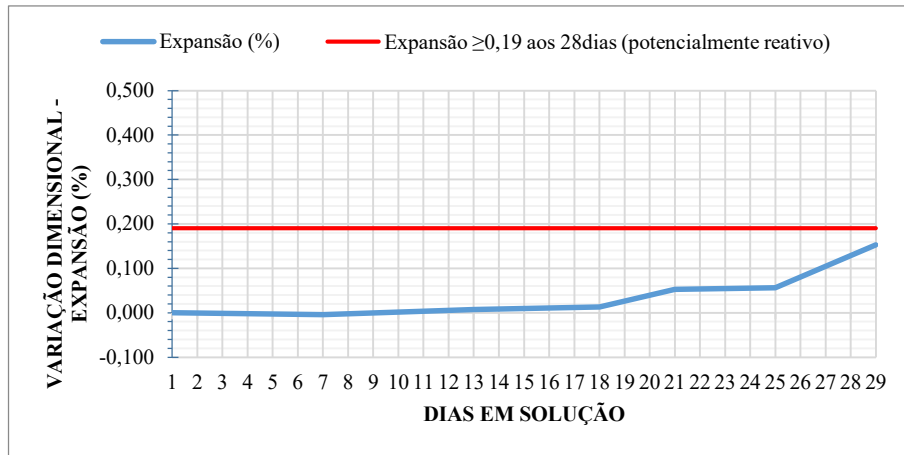


Figura 54 - Expansão por reação álcali-agregado - Método Acelerado Grupo AAA 30% RVM
Fonte: próprio autor

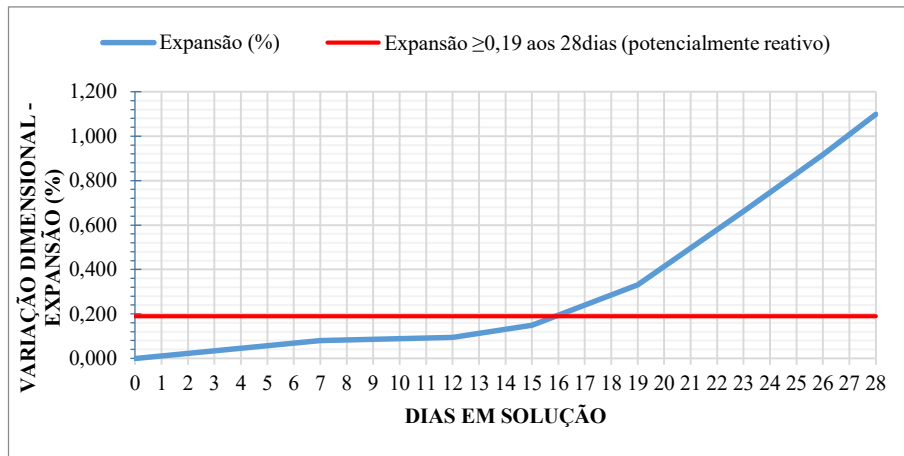


Figura 55 - Expansão por reação álcali-agregado - Método Acelerado Grupo AC 30% RVM
Fonte: próprio autor

Nos traços com 30% de substituição os resultados mudaram novamente de tendência, voltando a apresentar expansões graficamente visíveis. A barras de traço autoadensável AAA 30 RVM apresentaram expansões comparáveis às das barras de teores 0% e 5% de substituição, ficando também confortavelmente abaixo do limite de 0,19%. Já o traço de argamassa convencional AC 30 RVM revelou o potencial reativo do RVM quando não se utilizou materiais para a autoadensabilidade da argamassa, apresentando uma expansão crescente desde os primeiros dias e chegando ao alto valor de 1,10%.

A Figura 56 evidencia a grande diferença apresentada entre os traços.

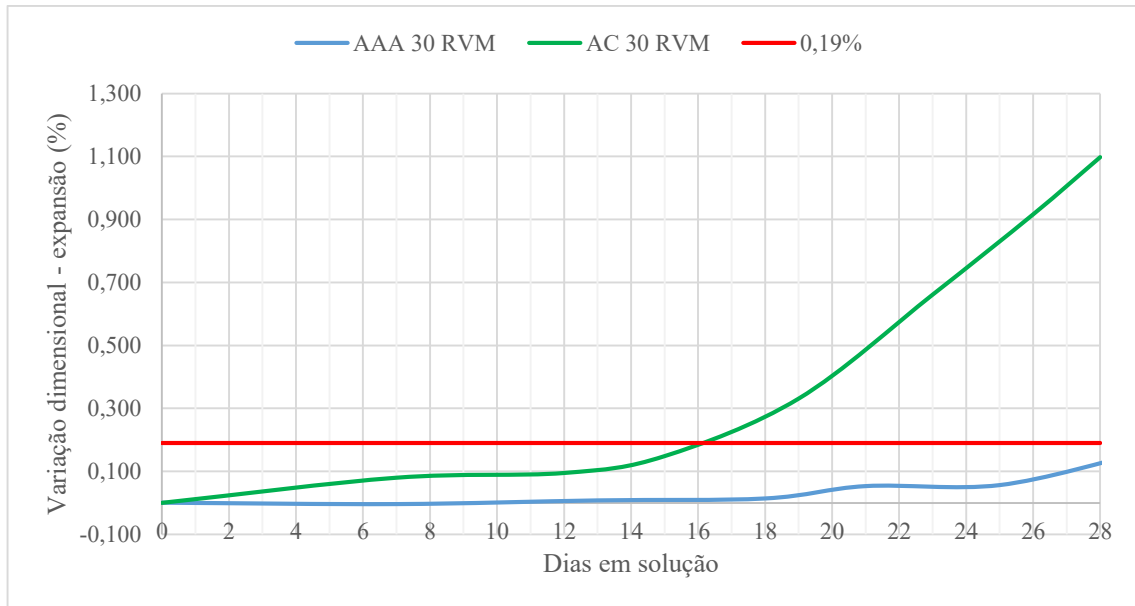


Figura 56 - Comparação entre as expansões das barras com teor de substituição de 30%
Fonte: próprio autor

A exemplo dos resultados de todos os ensaios anteriores, a expansão por RAA não apresentou uma relação diretamente proporcional ao teor de substituição de areia por RVM, como pode ser observado na Figura 57, que apresenta um gráfico da expansão acumulada ao final dos 28 dias em solução NaOH 1N das barras de AAA.

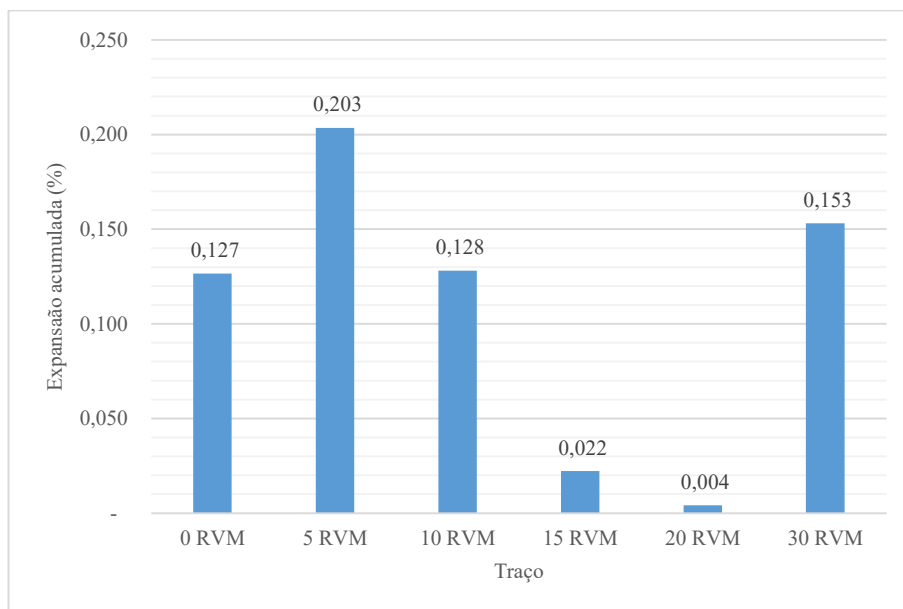


Figura 57 – Expansão acumulada ao final dos 28 dias em solução NaOH 1N à temperatura de $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$ das barras de argamassa autoadensável
Fonte: próprio autor

O comparativo entre as curvas de todos os traços pode ser observado na Figura 58, onde o destaque da expansão do traço de argamassa convencional é notório.

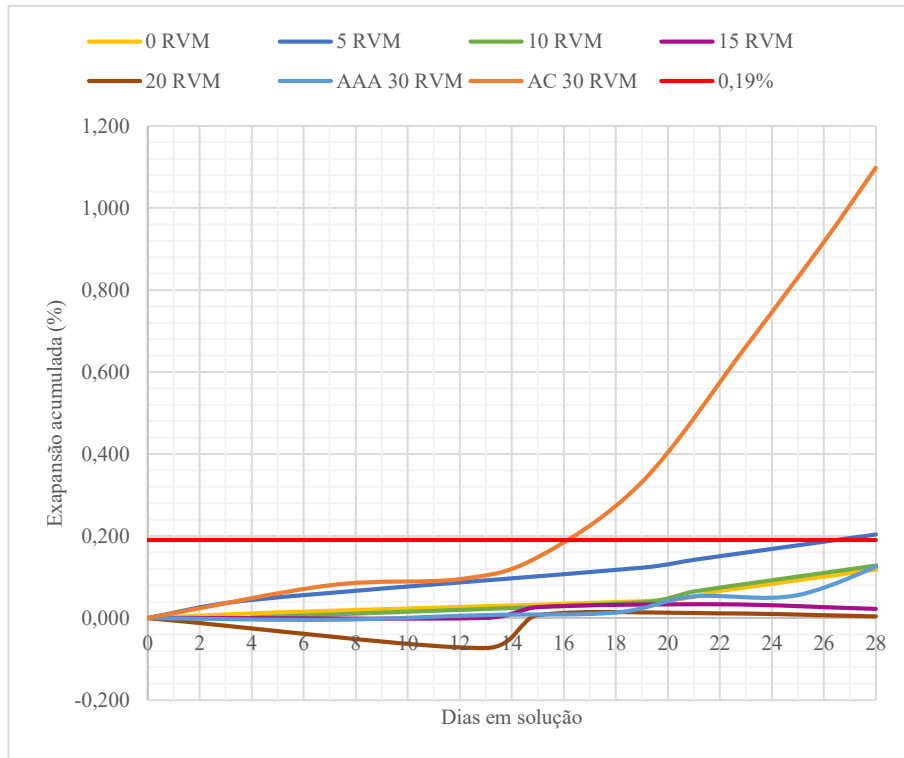


Figura 58 - Expansão por reação álcali-agregado - Método Acelerado para todos os traços
Fonte: próprio autor

Comparando os diversos resultados dos estudos analisados por Du e Tan (2013) conforme se apresentou na revisão bibliográfica e se observa na Figura 21, com o presente estudo, aos 14 dias todos os traços estavam com expansão acumulada abaixo de 0,20%, sendo que apenas os traços 5 RVM e AC 30 RVM estavam acima de 0,10%. Entretanto, aos 28 dias o traço AC 30 RVM apresentou uma expansão de 1,10% em relação à medida inicial, o que é um valor muito alto, mesmo em comparação com outros estudos com argamassas de teores mais altos.

Além das leituras das variações de expansão, as barras de argamassa tiveram seus aspectos visuais acompanhados ao longo do ensaio e ao final, conforme registram as Figuras 59 a 66. Em todas as amostras de AAA foi observada a presença de poros com seção circular, presença de sinais de estufamento, lascamento, presença de material esbranquiçado em forma de respingos, manchas ou massa. É importante recordar que na moldagem das AAA não foi realizada a etapa de adensamento manual.

O RVM é identificado nas seções das barras com substituição, tendo aspecto visivelmente diferenciado do dos grãos de areia. Na manipulação das barras observação e registro de imagem não foram observadas fissuras nas seções transversais, entretanto nas

superfícies externas ocorreram fissuras, algumas partir de áreas onde houve um lascamento e ficou evidente uma massa branca, possivelmente produto da RAA.

Particularmente a manipulação das barras do traço convencional revelou a grande fragilidade das mesmas, dias após serem retiradas da solução alcalina, em que as mesmas puderam ser quebradas facilmente apenas com as mãos, e se mostraram esfarelar com igual facilidade.



Figura 59 – Barras do traço AAA 0 RVM após ensaio de expansão
Fonte: próprio autor



Figura 60 – Presença de RVM e sinais de fissura, estufamento e manchas brancas em barra do traço AAA 5 RVM
Fonte: próprio autor

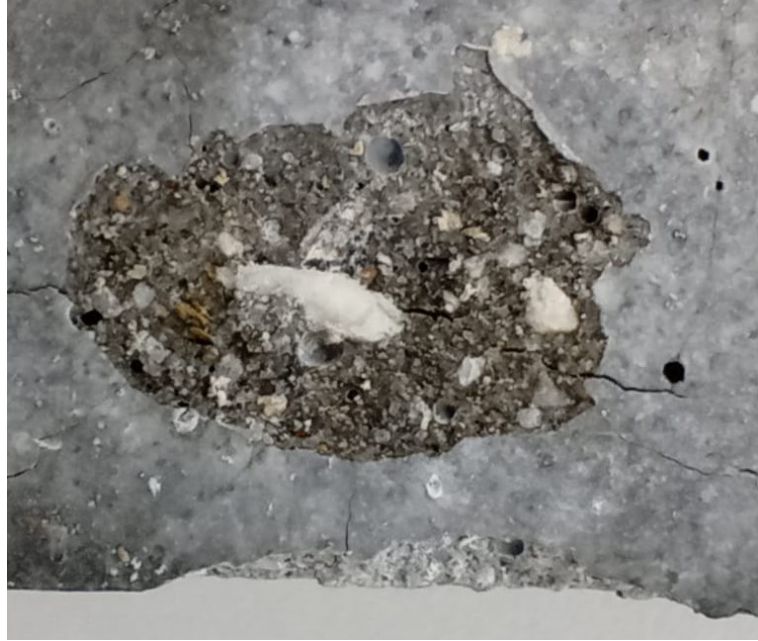


Figura 61 – trincas radiais em torno de material branco em área lascada em barra de argamassa traço AAA 10 RVM

Fonte: próprio autor

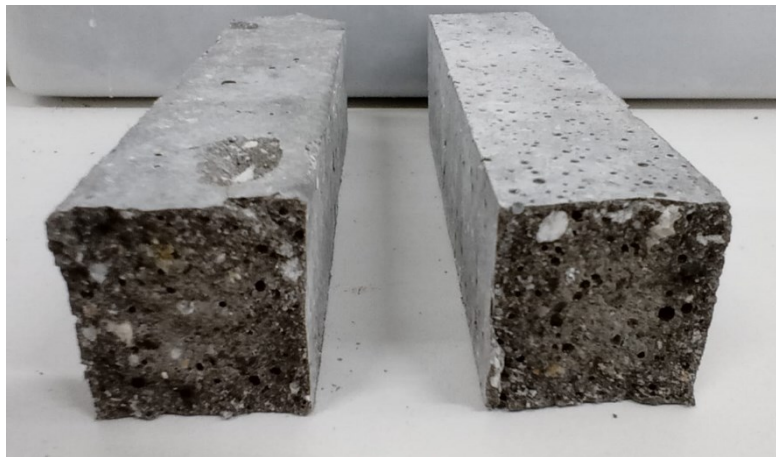


Figura 62 – Seções de barra de argamassa traço 10 RVM após ensaio de expansão

Fonte: próprio autor



Figura 63 – Barra do traço 15 RVM em seção e área estufada

Fonte: próprio autor



Figura 64 - Traço AAA 20 RVM: seção de barra de argamassa; barras com sinais de material esbranquiçado
Fonte: próprio autor



Figura 65 – barras de AAA com 30% de substituição de areia por vidro após ensaio de expansão por RAA
Fonte: próprio autor



Figura 66 – Barra de argamassa convencional com 30% de substituição de areia por RVM após ensaio de expansão por RAA
Fonte: próprio autor

Observando as Figuras 65 e 66 é possível perceber a diferença no aspecto geral das argamassas com (AAA) e sem (AC) o uso de sílica ativa e aditivo superplastificante. Embora o traço de AAA tenha apresentado características que remetem à ação da expansão por RAA, como área com um volume de material esbranquiçado, a argamassa autodensável se manteve com bom aspecto, equilibrado em quantidade de poros, agregados aparentes e distribuição de pasta. Já a argamassa convencional apresentou um aspecto mais confuso visualmente, com mais marcas brancas e toda fissurada, tanto que o esfarelamento era muito fácil.

Hadlington (2002) apud Abdallah e Fan (2014) faz uma interessante observação, de que a RAA, embora seja prejudicial à estabilidade do concreto, em certa medida a reação química pode aumentar a resistência do concreto. O processo de preenchimento da área de adesão com os produtos da reação cimentícia que ocorreram, porém não causaram expansão deletéria, é atribuído ao aumento da resistência, processo que pode ser considerado semelhante à reação pozolânica nos concretos. Tal observação pode ser pensada como uma relação possível entre os resultados do traço 5 RVM, que teve o maior resultado de resistência à compressão e também a maior variação de expansão final e apenas pouco acima do valor potencialmente, assim como no traço 30 RVM.

Serpa et al. (2013) apresenta dados da literatura que indicam que o uso do pó de vidro utilizado em substituição ao cimento promove a mitigação dos efeitos da RAA, comparativamente a outros pós finos reativos, observando que quanto mais fino for o pó de vidro melhor será seu desempenho na mitigação.

Os resultados de Sales et. al (2017) também mostraram o efeito mitigador do pó de vidro na RAA em argamassas.

Como foi relatado, o RVM utilizado neste estudo foi manipulado para que sua granulometria ficasse muito próxima à da areia, contudo o fino pó que recobria os grãos de todos os tamanhos é muito presente e não foi eliminado. Desta forma, parte do RVM não entrou na mistura como agregado, mas sim como material fino.

A variação não linear entre o teor de substituição e a expansão pode indicar que, no caso do traço 5 RVM o efeito do potencial reativo do vidro em dimensões de agregado foi superior ao efeito mitigador do pó de vidro, levando as barras à expandirem mais do que os traços seguintes. Isso pode ser observado pela diminuição da variação de expansão na medida que o teor de substituição aumentou até o traço com 20%, progressivamente. O comportamento muda novamente quando o teor de substituição chega aos 30%, porém ainda assim ficando semelhante ao traço controle. O potencial reativo do RVM como agregado em uma quantidade maior na argamassa fica mais evidente e, nesta situação, a possível ação mitigadora do pó, mesmo que proporcionalmente também esteja em maior quantidade, não consegue ter o mesmo efeito observado nos traços 15 RVM e 20 RVM, onde a expansão foi praticamente nula.

O uso de até 20% de substituição de agregado miúdo por vidro resultou em expansões detectáveis, porém dentro dos limites aceitáveis em concreto convencional (SERPA et al., 2013).

Kou e Poon (2009) observaram que o aumento da expansão por RAA em seus concretos com agregado de vidro foi diretamente proporcional ao teor de substituição, e, embora tenham ficado dentro do limite estabelecido, quando as misturas continham cinzas volantes a variação a expansão foi notadamente menor, tanto nos ensaios com barras de argamassa quanto nos ensaios com prismas de concreto.

Nasiru et. al (2021) conseguiram um ótimo controle da RAA nas barras de argamassa com misturas contendo vidro e cinzas volantes como agente mitigador, com um desempenho comparável a outros materiais utilizados em estudos de referência. Segundo os autores, a retração promovida pelo uso das cinzas volantes pode ter compensado parte da expansão.

A pesquisa na literatura existente sobre o uso de resíduos de vidro em materiais cimentícios mostrou que existem poucos que tenham analisado o uso em misturas autoadensáveis. O uso de aditivos nas misturas autoadensáveis é parte da construção do material e estão claramente demonstrados na literatura e prática deste assunto. Dentre os aditivos pozolânicos, a sílica ativa possui alto nível de finura e forma praticamente esférica, cujo uso melhora a resistência a segregação e confere boa coesão ao concreto (EFNARC, 2005).

Neste estudo a sílica ativa foi utilizada no traço controle, conforme exposto na seção de materiais e métodos, seguindo o traço desenvolvido por Silva (2019). Desta forma, os resultados dos ensaios de expansão precisam ser observados considerando essa diferenciação de muitos estudos, pois o tipo de argamassa e a o uso da sílica ativa já constituem um ponto positivo inicial na redução das possíveis das expansões causadas pelo potencial reativo do RVM.

Sendo utilizada como um material cimentício suplementar, a sílica ativa, têm demonstrado melhorar a resistência a RAA do concreto através da produção de uma matriz densa e impermeável que irá inibir o movimento de água e álcalis, e pela ligação de álcalis livres em hidratos de sílica de cálcio ou por adsorção em sua grande área de superfície específica, reduzindo assim a concentração de íons hidroxila da solução de poro (KROPP, 1995 e THOMAS e BLESZYNSKI, 2001 apud BODDY, HOOTON e THOMAS, 2003).

Du e Tan (2013) estudaram o uso de resíduo de vidro de cores diversas como parte do agregado miúdo em argamassas, e também o uso de diferentes materiais como substitutos do cimento a fim de mitigar o efeito da RAA. Os resultados mostraram, no caso do vidro transparente, a sílica ativa, utilizada assim como no presente estudo, com um teor de 10% de substituição do cimento, teve um efeito mitigador mais notável do que as cinzas volantes ou o pó de vidro. Tal efeito pode ser atribuído principalmente ao tamanho de partícula ultrafino da sílica ativa, o que melhora a microestrutura porosa na zona de transição entre agregado e pasta, podendo reduzir a porosidade e aumentar a resistência da argamassa.

Tuaum et al. (2018) realizaram um dos poucos estudos sobre AAA com uso de resíduo de vidro, em condições semelhantes a este estudo, porém com o uso de pó de calcário como agente de ligação em teor de 20%. O aumento da expansão foi diretamente proporcional ao aumento do teor de vidro nas argamassas, porém todas permaneceram dentro do limite estabelecido, considerados inócuos, mesmo para até o teor de 50%.

Como neste estudo o objetivo era de investigar o uso de resíduo de vidro no CAA através da confecção de traços de AAA, não foram realizados testes com o RVM em argamassas convencionais, exceto no ensaio de expansão acelerada para RAA, onde o traço AC 30 RVM seguiu a proporção de materiais indicados na ABNT NBR 15577-4, porém com a substituição da areia por RVM. Deste modo, não temos dados suficientes para comparar o uso do RVM nos demais teores de substituição de AAA para AC.

Importante salientar que o resultado da expansão final das barras do traço AC 30 RVM foi bastante elevado quando comparado com outros estudos que utilizaram este e inclusive teores maiores de substituição, podendo indicar uma possível falha no processo de

confeção do traço, das barras ou do ensaio de expansão, fato que não foi esclarecido pela falta de outros ensaios comparativos. Pelo Gráfico 18 é possível notar que a expansão acumulada das barras AC 30 RVM foi maior do que as demais, porém dentro do limite e bem próxima à do traço AAA 5 RVM até os 14 dias de ensaio, quando a curva se acentua notadamente a partir desta idade. Ainda assim, ficou claro que o potencial reativo do RVM é alto quando comparamos os traços autoadensável e convencional com o mesmo teor de substituição. Por esse ângulo, podemos considerar que o efeito mitigador da sílica ativa presente é claramente positivo e decisivo para que as argamassas tenham uma baixa expansão causada pela presença do RVM, uma vez que o possível efeito do pó contido no RVM, a areia e o tipo de cimento sem propriedades mitigadoras foram os mesmos para as duas misturas.

5.4. Resumo dos ensaios quantitativos

A Tabela 27 apresenta de forma resumida e não-numérica os resultados dos ensaios quantitativos no estado fresco, no estado endurecido e na ocorrência de RAA realizados para os traços do Grupo 1, que foi o grupo que teve todos os ensaios realizados.

O traço controle 0 RVM foi avaliado pela sua adequação ao tipo de resultado que se esperava, dentro de limites normativos, indicados pela bibliografia ou comparativo com outros trabalhos correlatos.

Tabela 27 – Resumo dos resultados dos ensaios quantitativos

PROPRIEDADE	TRAÇO AAA					
	0 RVM	5 RVM*	10 RVM*	15 RVM*	20 RVM*	30 RVM*
Deformabilidade** *	ADEQUADO	↓	↓	↓	↑	↓
Viscosidade ***	ADEQUADO	↑	=	↑	↑	↑
Resistência à compressão axial ***	ADEQUADO	↑	↓	↑	↑	↑
Resistência à tração indireta ***	ADEQUADO	↑	↓	↑	↑	↑
Resistência à tração na flexão ***	ADEQUADO	=	↑	↑	↑	↑
Índice de Vazios ***	ADEQUADO	↑	↑	↑	↑	↑
Massa específica ***	ADEQUADO	↓	↓	↓	↓	↓
Expansão por RAA **	INÓCUO	↑ / DELETÉRIO	= / INÓCUO	↓ / INÓCUO	↓ / INÓCUO	↑ / INÓCUO

Fonte: próprio autor

* Em relação ao traço 0 RVM

** Em relação ao traço 0 RVM / potencial reativo dos agregados

*** Argamassas do Grupo 1

**** Argamassas do Grupo 2

Os traços com substituição de areia por RVM foram avaliados comparando seus resultados com o traço controle, indicando simplesmente se o valor aumentou ou diminuiu e, no caso da ocorrência de RAA, se o resultado da expansão classifica o mix de agregados como inócuo ou potencialmente reativo, segundo a ABNT NBR 15577:2018.

Os ensaios no estado endurecido, de modo geral, mostraram que o desempenho do material aos esforços de tração melhorou mais significativamente do que melhorou à compressão com o uso do RVM, o que tem particular importância para o material resistir às expansões causadas por RAA, que geram tensões de tração no interior das argamassas e concretos. A atividade pozolânica das partículas finas do RVM parece ser o principal fator de contribuição na melhoria mecânica do material.

5.5. Análise Microestrutural

Através das análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi possível observar os componentes das argamassas estudadas, bem como as fissuras, os vazios, poros, a zona de transição entre os agregados e pasta. As análises foram realizadas em todos os traços de AAA após os 28 dias de cura submersa e após 28 dias em solução alcalina, além do traço de argamassa convencional e do RVM.

5.5.1. Análise microestrutural do RVM

A Figura 67 apresenta a micrografia do RVM utilizado nos traços deste estudo. É possível observar a superfície lisa, as arestas marcantes e a ausência de trincas.

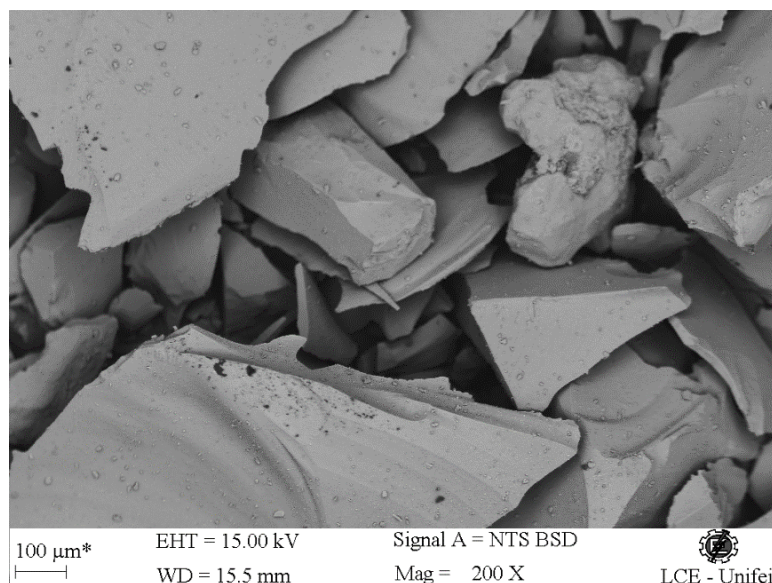


Figura 67 – Aspecto geral do resíduo de vidro moído utilizado nos traços

Fonte: próprio autor

A Figura 68 mostra o mapeamento de EDS do RVM onde os elementos encontrados foram carbono (C), oxigênio (O), sódio (Na), magnésio (Mg), alumínio (Al), silício (Si) e cálcio (Ca), e na Figura 69 é possível observar o espectro, por exemplo, do ponto 1 de EDS do RVM.

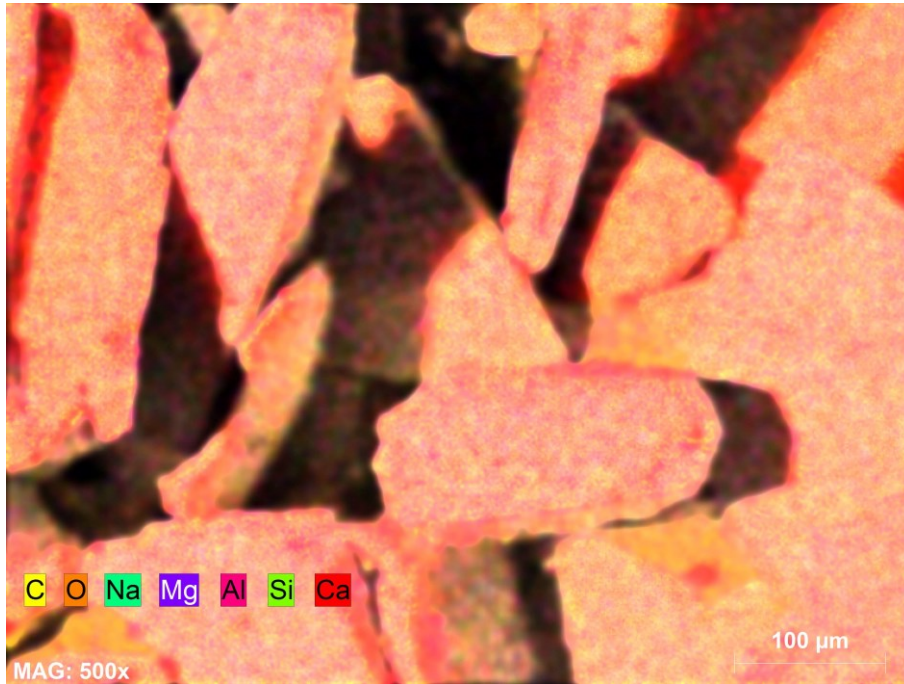


Figura 68 - mapeamento de EDS do resíduo de vidro moído
Fonte: próprio autor

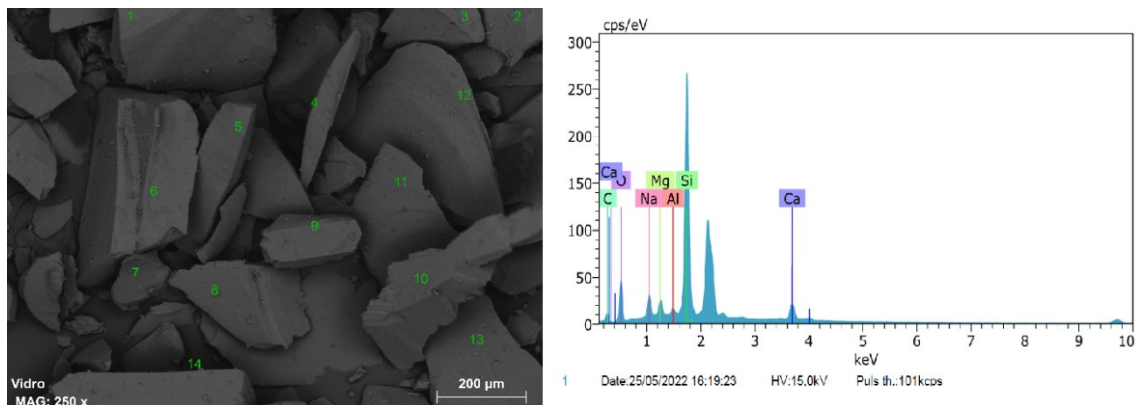


Figura 69 – Espectro de EDS do RVM – análise pontual
Fonte: próprio autor

A Tabela 28 traz o resultado da análise de todos os pontos, onde é possível observar o alto percentual de Si e O, evidenciando a presença de sílica, principal componente dos vidros.

Tabela 28 – Valores relativos em massa dos elementos químicos constituintes do RVM encontrados por espectro EDS

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	Ca
1	15,63	27,11	3,38	1,73	0,13	43,69	8,33
2	12,34	36,68	7,02	2,29	0,22	35,37	6,08
3	10,77	38,82	0,59	0,98	1,07	38,75	9,02
4	13,22	35,11	0,00	1,54	1,31	34,53	14,28
5	16,42	43,59	5,88	2,02	0,90	26,54	4,66
6	12,23	33,33	4,54	0,66	0,13	38,99	10,12
7	17,63	20,55	1,87	1,63	0,80	44,59	12,94
8	11,61	32,94	3,68	2,73	0,00	40,12	8,92
9	14,69	26,10	2,83	1,88	0,00	45,47	9,03
10	13,03	38,04	5,19	2,25	0,21	35,27	6,02
11	11,98	35,69	5,75	2,37	0,23	37,48	6,51
12	12,31	31,66	5,25	1,58	0,40	39,29	9,52
13	12,72	25,99	5,52	1,96	0,06	44,92	8,83
14	14,11	26,37	2,12	1,88	0,00	46,33	9,18
Mean value:	13,48	32,28	3,83	1,82	0,39	39,38	8,82
Sigma:	1,97	6,33	2,12	0,54	0,44	5,46	2,59
Sigma mean:	0,53	1,69	0,57	0,14	0,12	1,46	0,69

Fonte: próprio autor

5.5.2. Análise microestrutural das amostras em estado endurecido

As amostras foram retiradas de corpos de prova moldados para ensaios no estado endurecido, após 28 dias de cura submersa. A Figura 70 mostra a diferença entre as fases pasta e agregado, evidenciadas pela coloração dos elementos no mapeamento de EDS no traço 0 RVM, enquanto a Figura 71 apresenta o espectro de EDS no ponto 7 da fase de argamassa do traço 0 RVM.

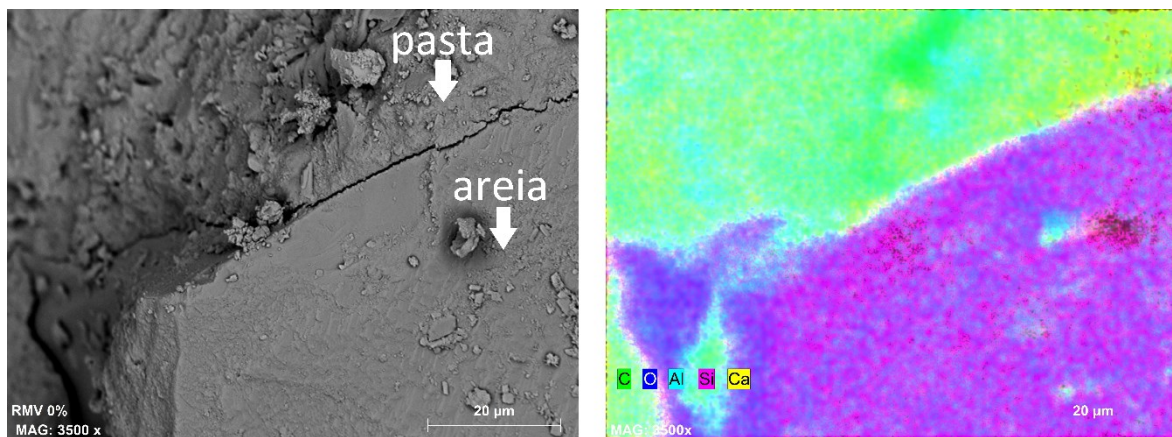


Figura 70 – Imagem de MEV do traço 0 RVM – identificação das fases pasta e agregado

Fonte: próprio autor

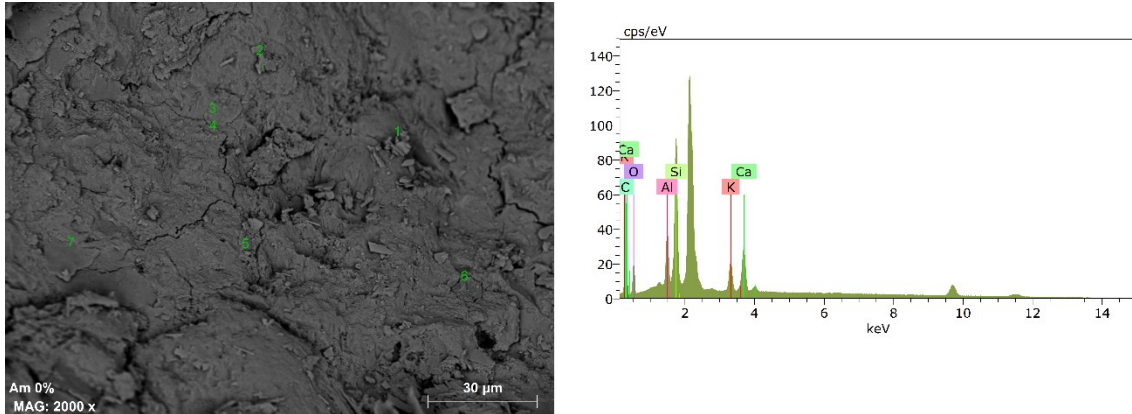


Figura 71 – Espectro de EDS no ponto 7 da fase de argamassa do traço 0 RVM
Fonte: próprio autor

As imagens permitiram identificar a diferença visual e de composição das fases, sendo que a areia apresentou basicamente Si e O, enquanto que a pasta era composta por C, O, Al, Si, K, e Ca.

Tabela 29 – Composições químicas de vidros e areias comum

Composição (%)	Vidro verde	Vidro marrom	Vidro transparente	Areia natural
SiO ₂	71,22	72,08	72,14	88,54
Al ₂ O ₃	1,63	2,19	1,56	1,21
Fe ₂ O ₃	0,32	0,22	0,06	0,76
CaO	10,79	10,45	10,93	5,33
MgO	1,57	0,72	1,48	0,42
Na ₂ O	13,12	13,71	13,04	0,33
K ₂ O	0,64	0,16	0,62	0,31
TiO ₂	0,07	0,10	0,05	0,05
Cr ₂ O ₃	0,22	0,01	–	–

Fonte: Adaptado de Du e Tan (2013)

O trabalho de Du e Tan (2013) investigou o uso de vidro como agregado miúdo em argamassas, inclusive a diferença de desempenho de vidros de cores diferentes. As composições dos vidros e da areia utilizados estão demonstrados na Tabela 29, onde é possível observar que o dióxido de silício (SiO₂) é a principal composição dos agregados. Neste estudo a origem do RVM mostrou que ele era predominantemente proveniente da moagem de vidros transparentes, que se destaca pela quantidade de Na₂O muito maior do que a da areia.

A zona de transição entre as fases agregado e pasta pode ser observada na Figura 72.

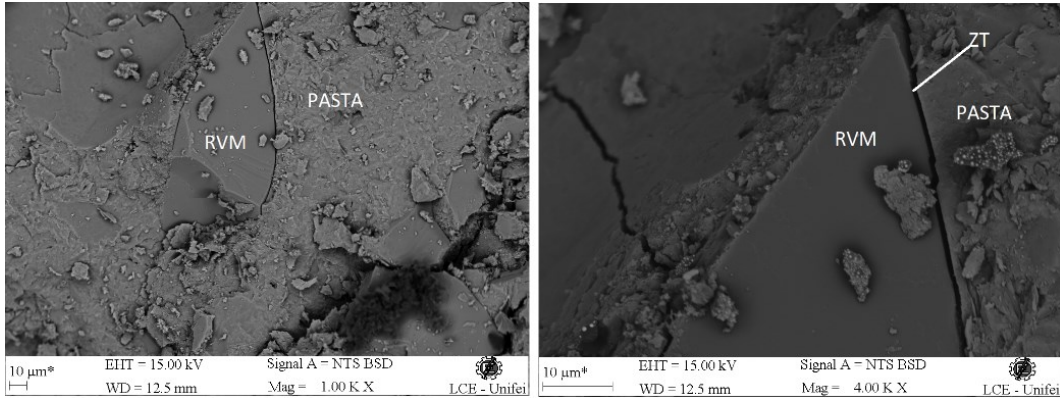


Figura 72 – Imagem de MEV do traço 20 RVM - zona de transição entre a pasta e grão de RVM
Fonte: próprio autor

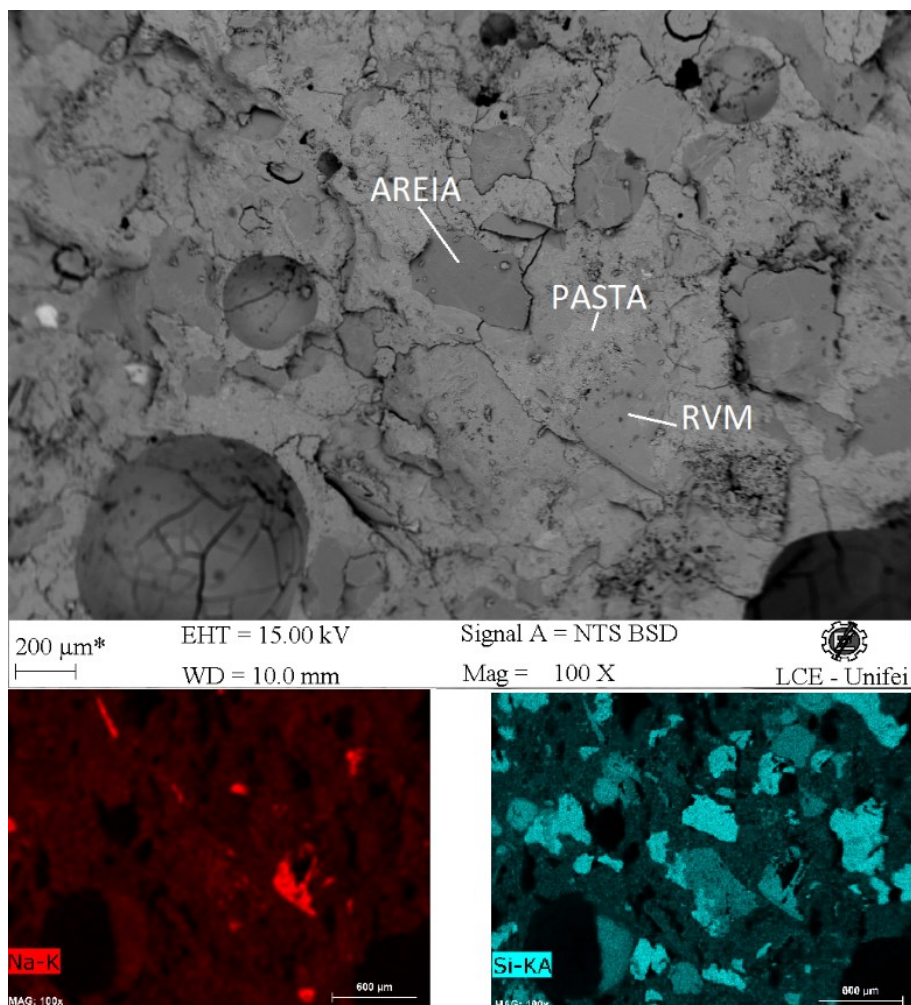


Figura 73- Identificação das fases na imagem de MEV do traço 10 RVM
Fonte: próprio autor

Na Figura 73 é possível observar a distribuição das fases pasta e agregados na amostra do traço 10 RVM, identificando através do destaque de teor de sódio, a areia e o RVM na mistura, bem como poros e fissuras na pasta.

5.5.3. Análise microestrutural das amostras submetidas ao ensaio acelerado de RAA

Foram realizadas imagens por um microscópio eletrônico de varredura (MEV) com EDS acoplado, a fim de observar as barras de argamassa após o ensaio acelerado de RAA.

Effting (2004) enfatizou que a utilização da técnica da microscopia eletrônica de varredura mostrou ser uma importante ferramenta na avaliação de produtos expansivos causados por reações deletérias, citando o trabalho realizado pela da Equipe Furnas (1997), que utilizou a técnica para investigar testemunhos de concreto retirados de barragens brasileiras quanto à ocorrência de RAA.

No trabalho de Munhoz (2007) entre vários outros que pesquisaram os produtos da RAA em testemunhos de estruturas ou em barras ensaiadas, foram identificadas várias formações, dentre elas a que está ilustrada na Figura 74, cujo espectro demonstra uma composição química típica de RAA.

Como apresentados nos resultados do ensaio de expansão acelerada, as barras do traço controle apresentaram variação na expansão, porém sem ultrapassar o limite da norma. Na Figura 75 é possível observar o que pode ser o produto de RAA espalhado sobre a pasta e adentrando à borda de um poro, enquanto que o espectro de EDS pontual revelou uma grande presença de sódio (Na).

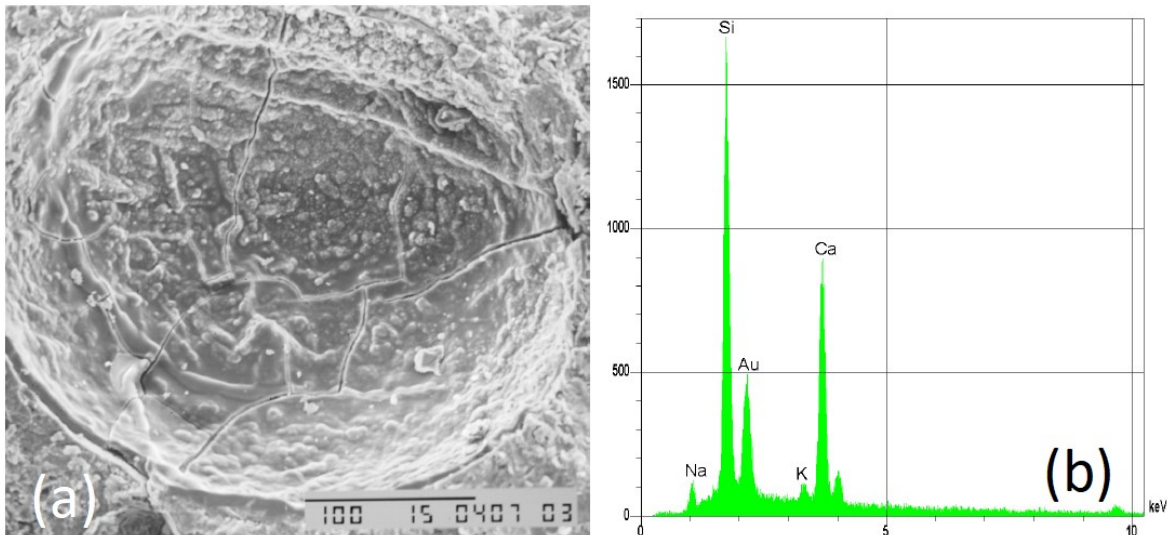


Figura 74 – (a) detalhe do poro preenchido com gel MEV (b) Espectro de EDS mostrando a composição química típica de RAA
Fonte: Munhoz (2007)

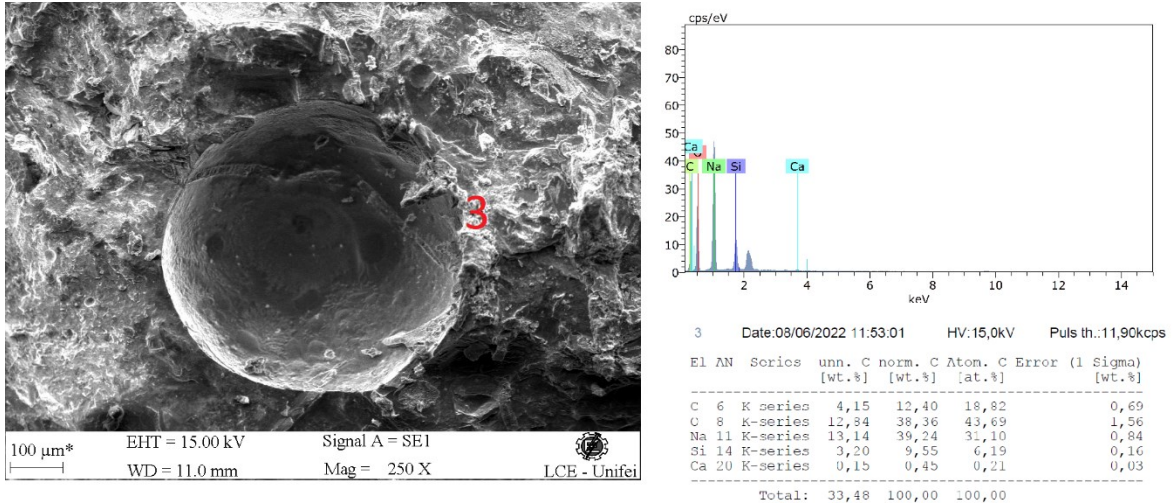


Figura 75 – Imagem de MEV e espectro de EDS em possível produto da RAA em argamassa traço 0 RVM
Fonte: próprio autor

Serpa et al. (2013) registraram a formação de produto de RAA no limite de uma partícula de vidro em sua argamassa de traço executado com 100% de agregado de vidro, como demonstrado na Figura 76. Uma formação parecida é possível observar entre o RVM e a pasta na Figura 77, onde uma fissura acompanha parte da formação, além de um material de formação diferente que recobre a pasta.

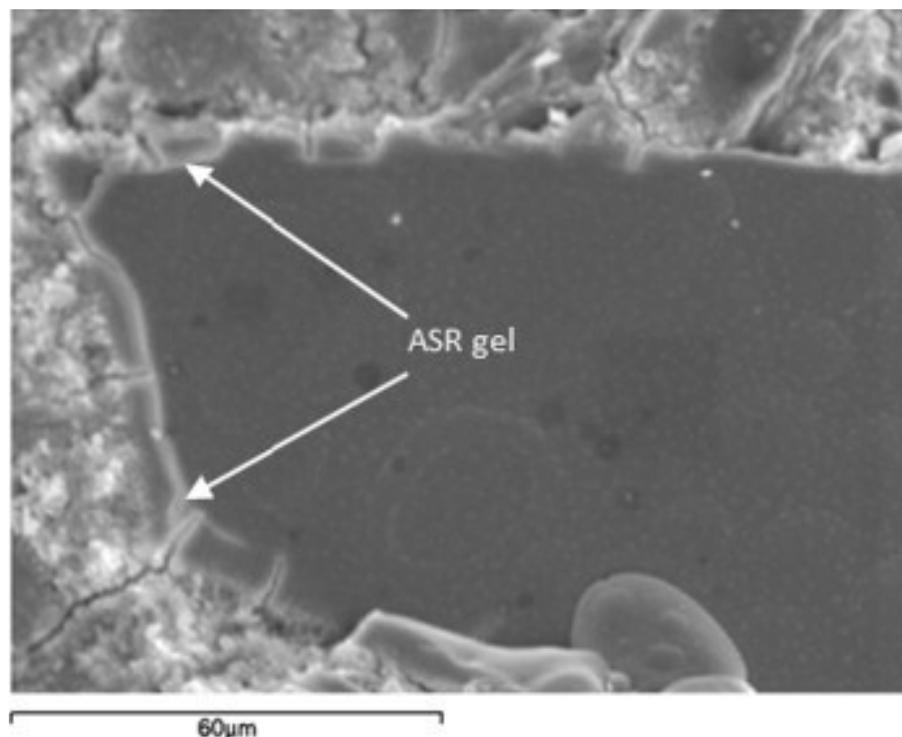


Figura 76 – imagem MEV de uma partícula ade vidro mostrando uma formação de ASR no limite da partícula em argamassa com agregado de vidro em 100%
Fonte: Serpa et al. (2013)

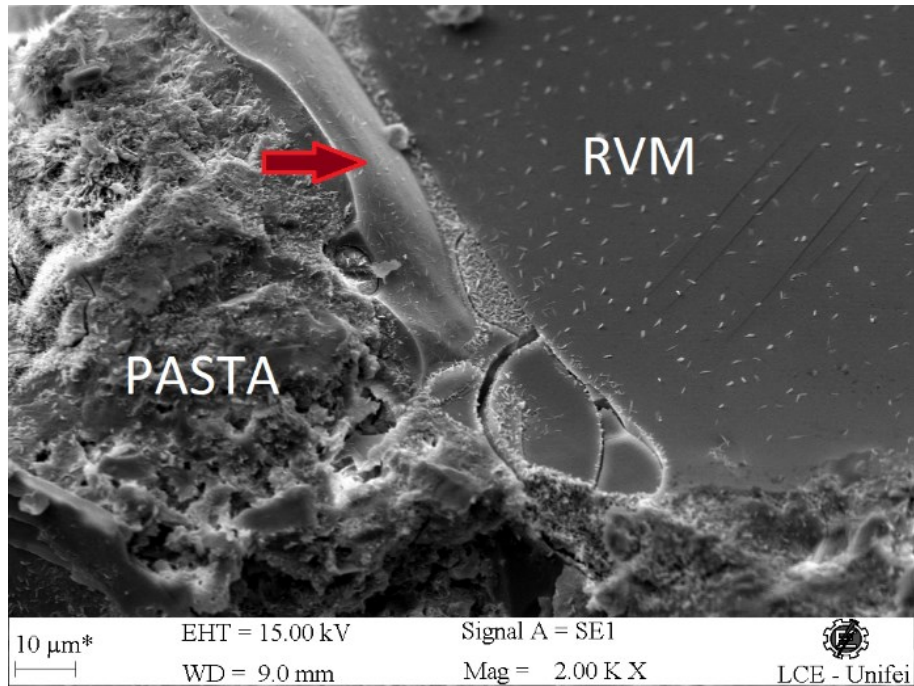


Figura 77 – Imagem de MEV de argamassa AAA 5 RVM após ensaio de expansão
Fonte: próprio autor

Uma formação de gel amorfo produto de RAA foi encontrada em todas as argamassas feitas com agregado silicoso reativo, dispersos pela pasta, conforme ilustra a Figura 78a, com espectro EDS apresentado na Figura 78b (SERPA et al, 2013). Algumas das figuras deste presente estudo apresentam aspecto parecido, mesmo para os traços que apresentaram pouca e quase nenhuma expansão.

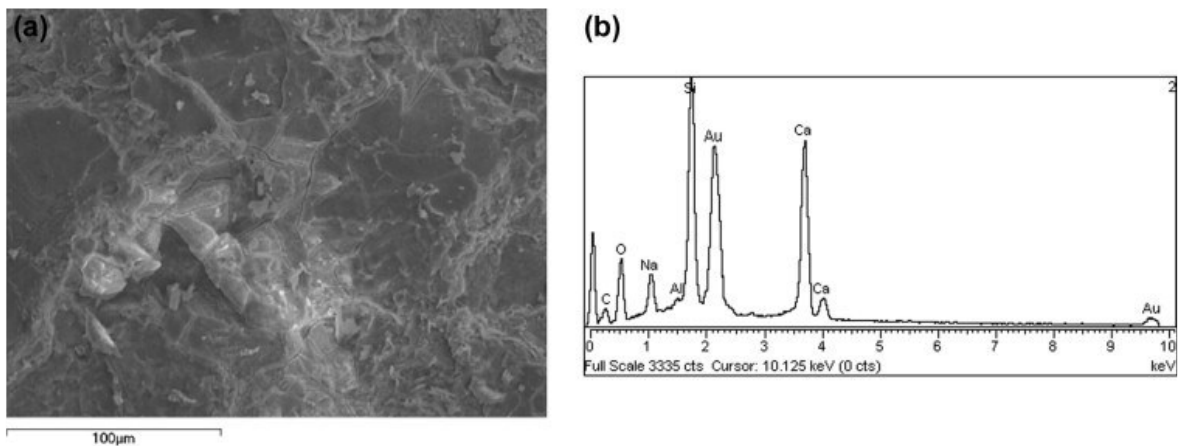


Figura 78 – Imagem MEV mostrando gel amorfo em toda a pasta de cimento e espectro EDS
Fonte: Serpa et al. (2013)

Os diversos aspectos dos produtos de RAA nos concretos e argamassas foram registrados por diversos pesquisadores, onde nem sempre a presença destes produtos significou prejuízo às barras, prismas ou estruturas em trabalho estudadas. Como pode ser observado na Figura 79, a imagem MEV e espectros EDS pontuais mostram diferentes texturas e formações na argamassa com 5% de RVM.

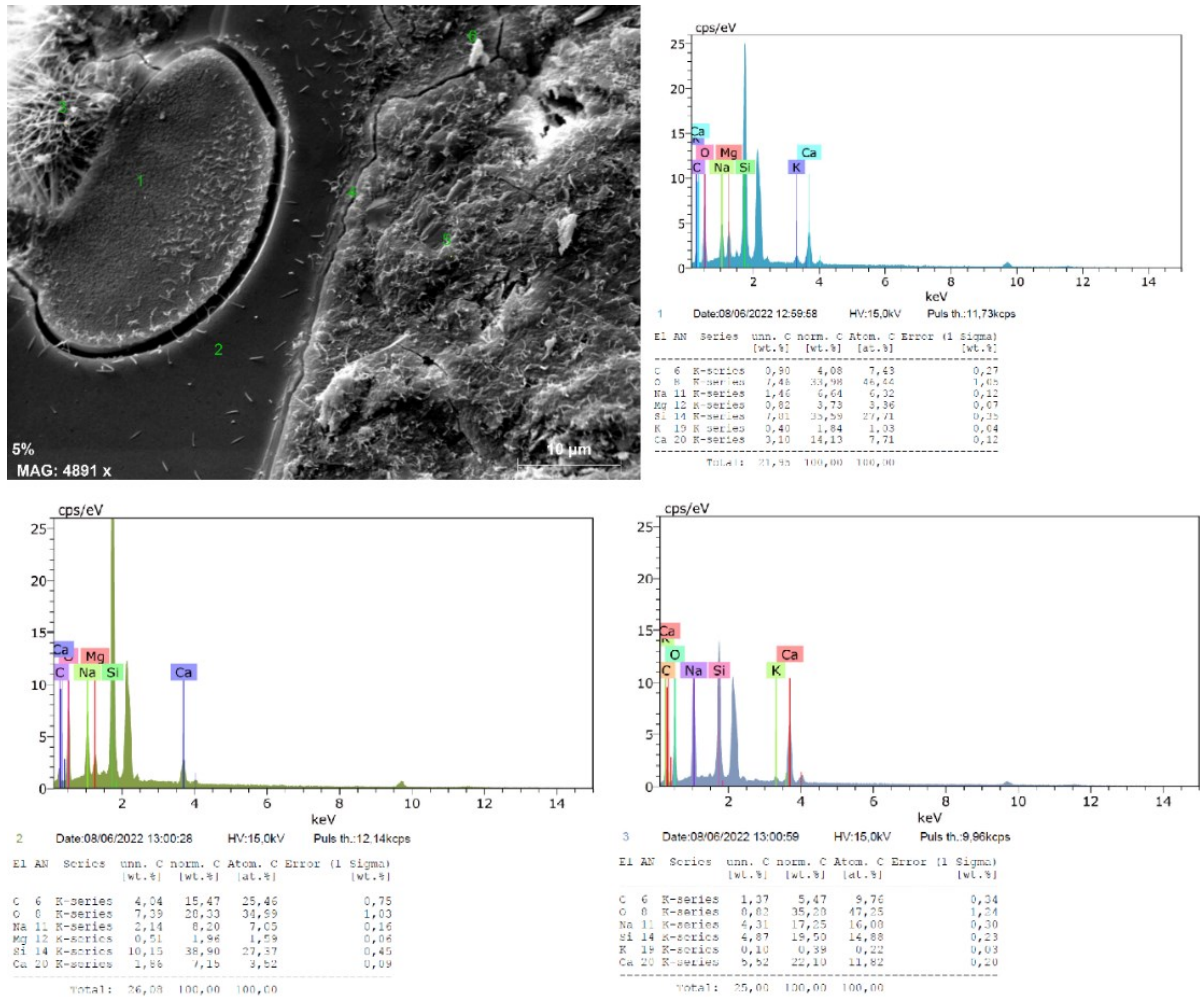


Figura 79 – Imagem MEV e espectro EDS pontual de RVM e possível produto de RAA em argamassa com 5% de RVM

Fonte: próprio autor

O aspecto da pasta e da zona de transição com característica fissura é facilmente identificada, e os espectros dos pontos 1 e 3 mostram que foram formados dois diferentes possíveis produtos de RAA, diferenciados pela textura e também pela composição do ponto 2, onde se tem uma partícula de RVM notoriamente separada da massa de RAA.

Serpa et al. (2013) observaram que nas misturas de argamassas com agregados silicosos houve o aparecimento de produtos de RAA, sendo que na mistura sem substituição a Figura 80a mostra que apenas produtos amorfos foram encontrados, enquanto que na mistura com teor de substituição de 20% do agregado original por agregado de vidro, Figura 80b, apresentou produtos amorfos e também cristalinos.

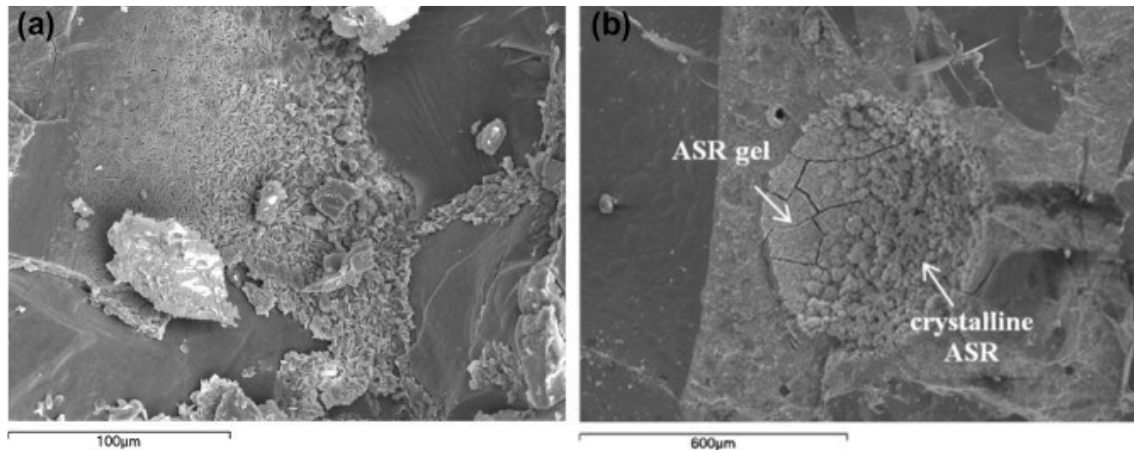


Figura 80 – imagens de MEV de argamassa com agregado silicoso com (a) 0% de substituição por vidro e (b) 20% de substituição por vidro
 Fonte: Serpa et al. (2013)

Os traços com 15% e 20% de RVM em substituição à areia tiveram o desempenho mais positivo em relação às expansões de RAA, ficando com variação acumulada próximo de zero, inclusive menor do que a do traço controle. Na Figura 81 foi possível identificar as fases pasta e agregados da argamassa do traço 20 RVM após o teste de expansão acelerado, cujo aspecto geral não evidencia a presença de produtos de RAA.

Os agregados de areia e RVM são evidenciados pelo destaque do elemento silício (Si) e diferenciados entre si pelo sódio (Na) no RVM. Na escala de aumento da imagem é possível observar apenas uma fissura que contorna uma parte do grão de areia maior e segue entremeando outros dois, sendo que os demais grãos de areia e de RVM apresentam uma boa ligação com a pasta.

O teor máximo de substituição de areia por RVM neste estudo foi de 30% em massa que, assim como os traços anteriores, trabalhou com superplastificante e sílica ativa como materiais para tornar as misturas autoadensáveis, o que de maneira geral resultou em um bom resultado nas propriedades mecânicas. No ensaio de RAA foi feito um traço a mais, de argamassa convencional também com 30% de teor de substituição, com o objetivo de observar o efeito que as adições e aditivos poderiam exercer na RAA.

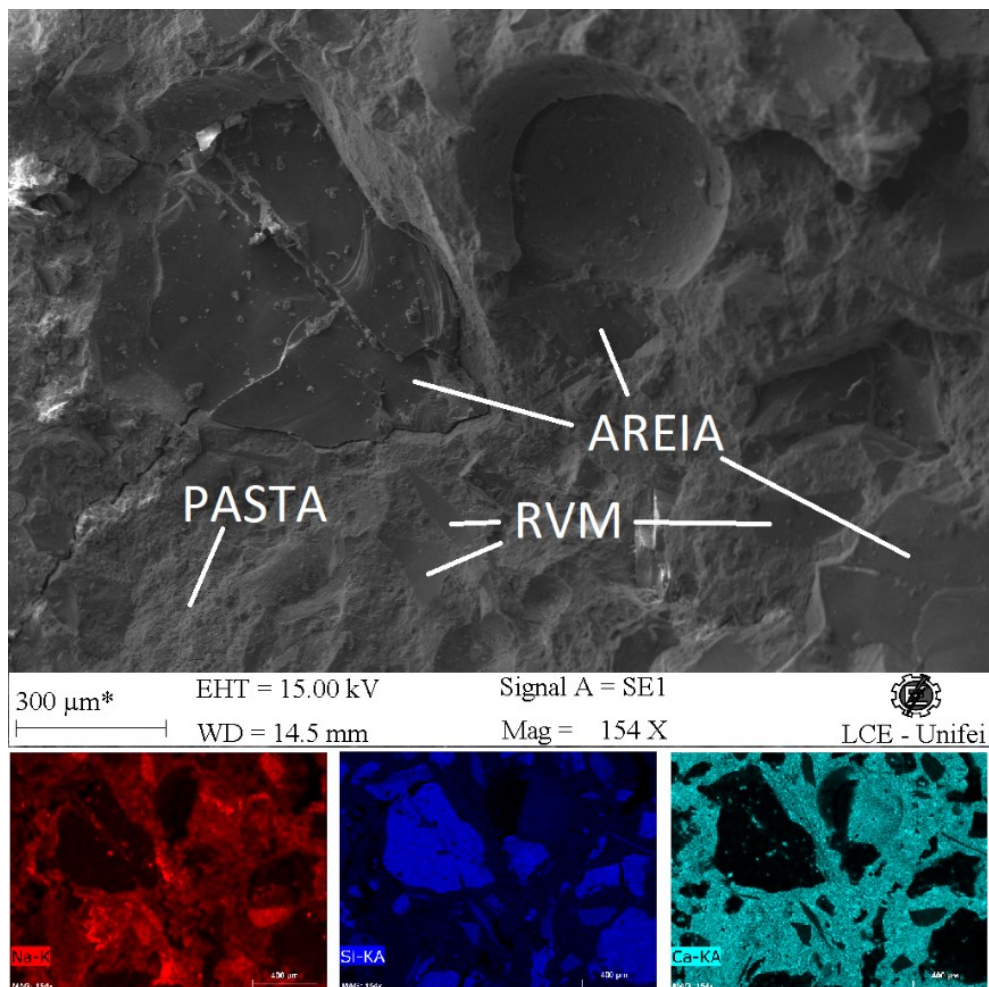


Figura 81 – Imagem MEV e mapeamento EDS evidenciando as fases e as diferenças entre os agregados no traço AAA RVM 20
Fonte: próprio autor

A comparação desses resultados pode ser observada nas Figuras 82, 83 e 84, em diferentes níveis de ampliação onde, assim como nas imagens fotográficas já apresentadas, nota-se que no traço AAA é possível identificar com certa facilidade as fases, enquanto que no traço AC toda a amostra é confusa, com formações e texturas bem diferentes.

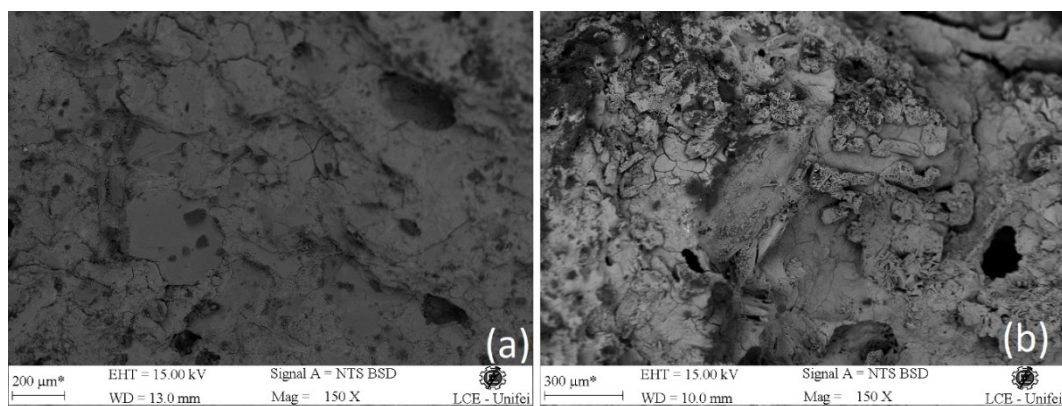


Figura 82 – Imagens MEV AAA (a) x AC (b) com 30% de RVM
Fonte: próprio autor

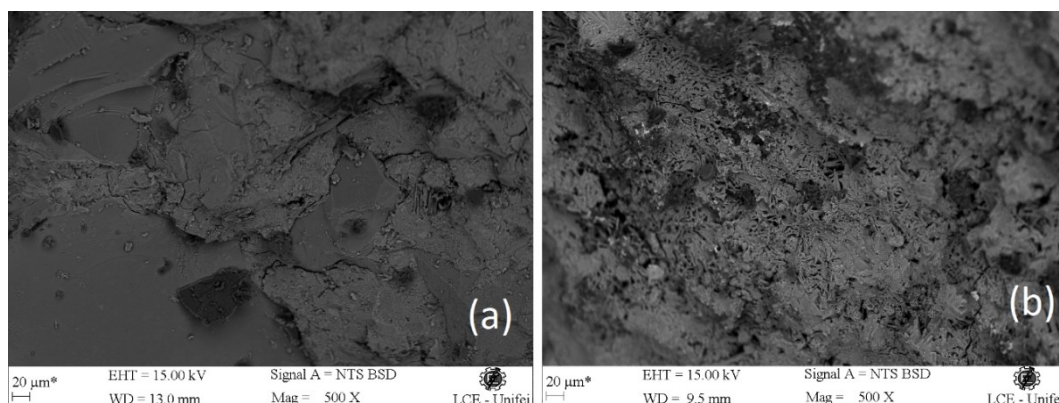


Figura 83 – Imagens MEV AAA (a) x AC (b) com 30% de RVM

Fonte: próprio autor

Embora o resultado do teste de expansão acelerada tenha mostrado que o traço AAA 30 RVM sofreu expansão maior que o traço controle e a segunda maior expansão acumulada dos traços com substituição, ela ficou abaixo do limite estabelecido, enquanto que a AC 30 RVM teve uma expansão muitíssimo acima do limite. Deste modo, os possíveis produtos de RAA foram observados em todos os traços de AAA, entretanto foram em volume pequeno, que provavelmente não causaria danos à uma estrutura feita com CAA a partir destas argamassas.

A Figura 84 compara os dois tipos de argamassa com 30% de substituição de areia por RVM, onde na AAA (a) é possível observar os agregados envolvidos pela pasta, fissuras em geral na interface das duas fases, e no alto da imagem um vazio não preenchido com material de RAA. Já na AC (b) não se diferencia as fases pasta e agregado, e o aspecto geral da amostra é tipo “craquelado”, com fissuras generalizadas e com um aparente poro preenchido com material agulhado.

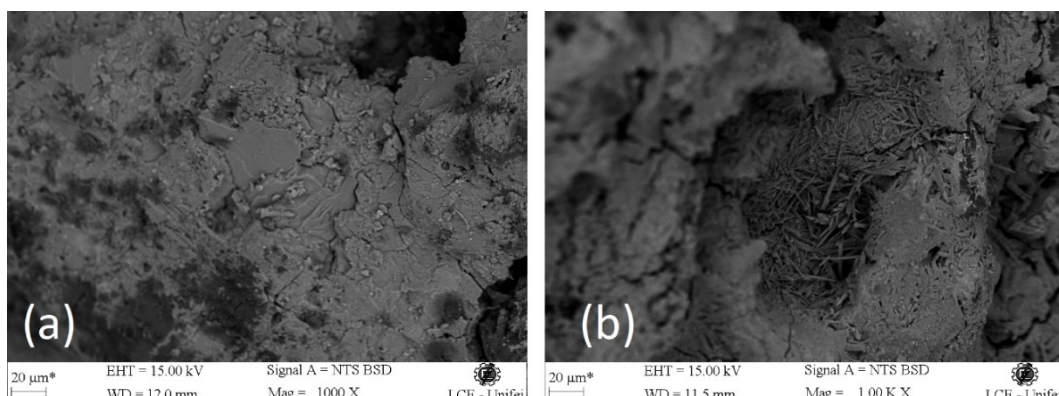


Figura 84 – Imagens MEV AAA (a) x AC (b) com 30% de RVM

Fonte: próprio autor

O trabalho da Equipe Furnas (1997) apud Effting (2004) apresenta imagens de MEV de argamassas de barragens com produtos de RAA podem ser observados na Figura 85a, onde se observa cristais aciculares na interface agregado/argamassa encontrados na amostra

proveniente da Barragem de Joanes II e na Figura 85b que apresenta produtos cristalizados de RAA encontrados nas amostras da Usina Hidrelétrica de Jurupará em forma de gel apresentando estrutura rendada.

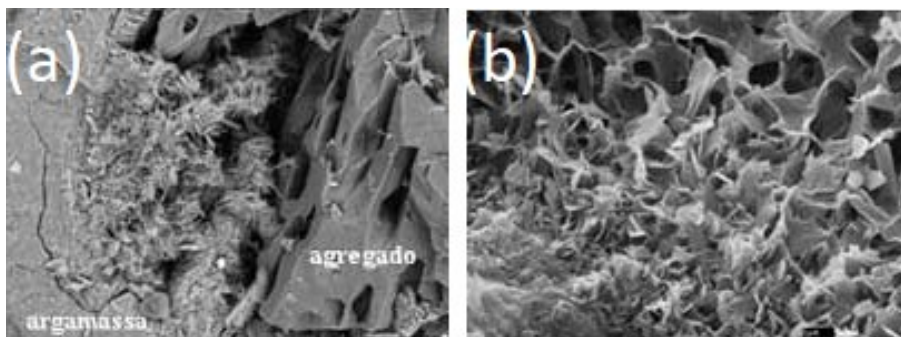


Figura 85 – imagens de MEV de (a) Cristais aciculares na interface agregado/argamassa, (b) Produtos cristalizados de RAA gel apresentando estrutura rendada.

Fonte: Equipe Furnas (1997) apud Effting (2004)

A Figura 86 também mostra exemplos de aspectos observados em MEV de produtos de RAA que podem ser comparados aos do presente estudo, sendo (a) produtos cristalizados de RAA encontrados nas amostras da Usina Hidrelétrica de Jurupará em forma de cristais entrelaçados fibrosos, e em (b) um aglomerado de produtos na forma de bastonetes sobre a argamassa do concreto proveniente da Usina Hidrelétrica de Furnas (EQUIPE FURNAS, 1997 apud EFFTING, 2004). Effting (2004) ressalta que, embora os a RAA tenha sido detectada nas barragens estudadas, ela não levou a um comprometimento das estruturas de concreto.

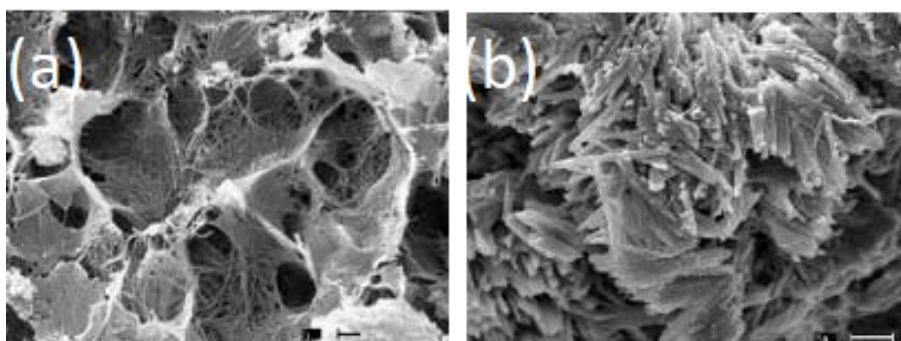


Figura 86 – Produtos cristalizados de RAA: cristais entrelaçados fibrosos, (b) Aglomerado de produtos na forma de bastonetes sobre a argamassa.

Fonte: Equipe de Furnas (1997) apud Effting (2004)

Na Figura 87, é possível observar as diferentes larguras das fissuras formadas na pasta, que dividem a mesma em torno de uma curiosa estrutura de possível produto de RAA, e se ramificam em fissuras menores, em várias direções, “craquelando” todo o material, e onde mais uma vez não é possível identificar os agregados, possivelmente encobertos e envolvidos pela reação.

As estruturas formadas exclusivamente na argamassa de traço convencional podem ser observadas na Figura 88, onde a uma ampliação de 3000 vezes foi possível identificar o agregado RVM sendo envolvido pela estrutura, parecendo ser o próprio RVM a origem da formação.

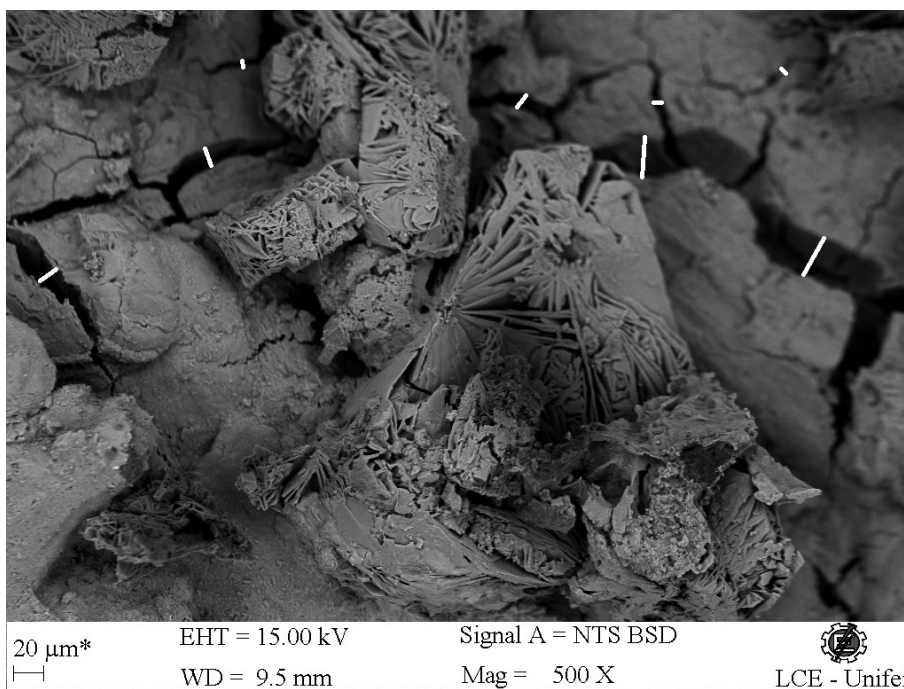


Figura 87 – formações estruturadas de possível produto de RAA e fissuras de diversas aberturas na argamassa traço AC 30 RVM
Fonte: próprio autor

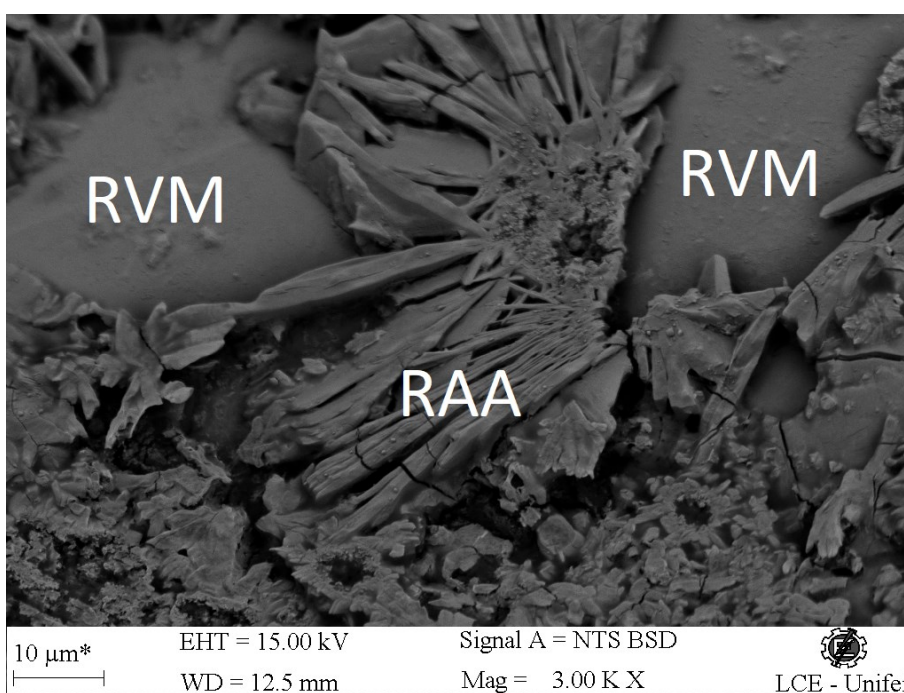


Figura 88 – partículas de RVM envolvidas por possível produto da RAA no traço AC 30 RVM
Fonte: próprio autor

Embora seja uma das preocupações quanto à durabilidade dos concretos, é muito importante lembrar que, mesmo constituído por agregados potencialmente reativos, e ainda que sem o uso de materiais mitigadores, a ocorrência da RAA depende intimamente da alta umidade do ambiente, o que possibilita o uso favorável de agregados reativos em diversas áreas estruturais e não-estruturais da construção civil.

6. CONCLUSÕES

A avaliação da viabilidade de produção de AAA com resíduo de vidro substituindo em proporções o agregado miúdo, proposta geral deste trabalho, foi realizada. Em relação ao traço de referência 0% RVM, os teores de substituição de 5%, 10%, 15%, 20% e 30% também resultaram em AAA, mantendo todos os demais componentes, permitindo que o foco das comparações ficasse no efeito do RVM.

No estado fresco, o uso do RVM resultou em misturas com uma menor deformabilidade e uma maior viscosidade. E no estado endurecido, resultou em argamassas com maior índice de vazios e menores massas específicas.

No estado endurecido, na resistência à compressão axial houve, de modo geral, uma melhoria com o uso do RVM, e todas as argamassas obtiveram resultados de classe estrutural. Na resistência à tração por compressão diametral apenas no 10 RVM houve diminuição em relação ao de controle, o mesmo único que apresentou menor resistência à compressão axial. A resistência à tração na flexão a três pontos apresentou também acréscimo nos resultados e, diferentemente dos demais ensaios, uma relação crescente entre o aumento do teor de substituição e o aumento da resistência mecânica.

Na investigação da ocorrência de RAA nas AAA, apenas a de teor de 5% de RVM apresentou variação dimensional pouco acima do limite estabelecido, sendo que os teores de 15% e 20% tiveram expansões acumuladas próximas de zero e menores do que as do traço controle. Embora a inspeção visual e as imagens de MEV tenham evidenciado produtos de RAA em todas amostras, as expansões causadas ficaram dentro do limite, mostrando que a ocorrência da reação não é, a princípio, um fator impeditivo para o uso do RVM.

Em comparação com o traço autoadensável com 30% de RVM, a argamassa de traço convencional de mesmo teor apresentou altíssima atividade da RAA, evidenciando que, embora a atividade pozolânica dos finos do RVM possa ter grande contribuição no melhoramento das características mecânicas e também na diminuição da RAA, a sílica ativa é que tem grande papel mitigador da expansão que leva a níveis deletérios.

Assim, conclui-se que é possível produzir argamassa autoadensável com uso de resíduo de vidro moído em substituição parcial à areia, com características necessárias para a produção de um concreto autodensável. Além do atendimento às exigências no estado fresco, o material pode ter ganhos de desempenho no estado endurecido, resistir aos efeitos deletérios da reação álcali-agregado, contribuindo ainda para melhorar o manejo dos resíduos de vidro e diminuir a exploração de agregados naturais.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar uma maior investigação do RVM a fim de conhecer sua composição química e a influência da mesma nas características da AAA.

Realizar a execução do CAA a partir dos traços de AAA e os devidos ensaios, para confirmar suas viabilidades.

Realizar o ensaio de RAA em misturas sem a utilização de sílica ativa e superplastificante, ou seja, em argamassas convencionais, para os mesmos teores de substituição, a fim de observar e comparar os resultados com as AAA para determinar o efeito do RVM e também das adições na ocorrência e/ou mitigação da reação.

Realizar todos os ensaios, com a execução das mesmas misturas, convencionais e autoadensáveis, utilizando um tipo cimento que esteja relacionado como material de ação mitigadora da RAA, e também que seja mais amplamente utilizado comercialmente, a fim de conhecer o poder mitigador do mesmo, a possível maior redução das expansões nos dois tipos de argamassas e o potencial de utilização do RVM de forma mais abrangente nos compósitos cimentícios.

Realizar o ensaio de compressão específico para argamassas, a fim de se ter um melhor parâmetro de comparação com os resultados de tração na flexão, ambos tratados na mesma norma, além de outros ensaios de resistência e caracterização do material.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLAH, S.; FAN, M. **Characteristics of concrete with waste glass as fine aggregate replacement**. International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR), v. 2, n. 6, p. 11-17, 2014.
- ABIVIDRO. **Guia reciclagem do vidro 100% puro. 100% reciclável**. Disponível em <https://abividro.org.br/wp-content/uploads/2019/01/Abividro-Guia-Reciclagem-do-Vidro.pdf>. Acessado em 21/07/2021. São Paulo, 2019.
- ABRAVIDRO. **O Mercado vidreiro em números edição 2020**. Disponível em <https://abraavidro.org.br/panorama-abraavidro-2020> - Acessado em 21/07/2021. São Paulo, 2020.
- ABREU, W. M. **Estudo da temperatura de transição vítrea (T_g) em vidros orgânicos: mel, corante caramelo e frutose**. Tese de Doutorado. OFOP. Ouro Preto, 2008.
- ADAWAY, M; WANG, Y. **Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete—Effects on compressive strength**. Electronic Journal of Structural Engineering, v. 14, n. 1, p. 116-122, 2015.
- AHMAD, Jawad et al. **Effects of waste glass and waste marble on mechanical and durability performance of concrete**. Scientific reports, v. 11, n. 1, p. 1-17, 2021.
- AKERMAN, M. **Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro**. p. 1–37, 2000.
- ALIABDO, A. A.; ABD ELMOATY, M.; ABOSHAMA, A. Y. **Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete**. Construction and Building Materials, v. 124, p. 866-877, 2016.
- ALI, E. E.; AL-TERSAWY, S. H. **Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete**. Construction and Building Materials, v. 35, p. 785-791, 2012.
- ANDRADE, T. et al. **Diagnóstico de reação álcali-agregado em blocos de fundação de um edifício público situado na cidade de Recife/PE**. 2006, Anais. São Paulo: IBRACON, 2006.
- ANDROJIĆ, Ivica; DIMTER, Sanja. **Properties of hot mix asphalt with substituted waste glass**. Materials and structures, v. 49, n. 1, p. 249-259, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland**. Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577: Agregados - Reatividade álcali-agregado**. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823: Concreto Autoadensável**. Rio de Janeiro. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 270: Standard specification for mortar for unit masonry**. Pennsylvania, 2019.

BATAYNEH, M.; MARIE, I.; ASI, I. **Use of selected waste materials in concrete mixes**. Waste Management, v. 27, n. 12, p. 1870–1876, 2007.

BIGNOZZI, M. C. et al. **Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition**. Cement and Concrete Composites, v. 55, p. 45–52, 2015.

BODDY, A. M.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. **The effect of the silica content of silica fume on its ability to control alkali–silica reaction**. Cement and Concrete research, v. 33, n. 8, p. 1263-1268, 2003.

CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia dos materiais - uma introdução** – 8ª Ed, Rio de Janeiro, LTC, 2012.

CAMPOS, R. S. **Concreto autoadensável produzido com resíduos de construção e demolição: propriedades mecânicas e reológicas**. Dissertação de Mestrado apresentada na PUC, Campinas, 2017.

CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem. **Vidro**. Disponível em <https://cempre.org.br/vidro/>. Acessado em 31/07/2021. São Paulo, 2021.

CHATTERJI, S.; THAULOW, N.; JENSEN, A. D. **Studies of alkali-silica reaction, part 6. Practical implications of a proposed reaction mechanism**. Cement and Concrete Research, v. 18, n. 3, p. 363-366, 1988.

COLLINS, C. L., et al. **Alkali-Silica Reaction: “The Cancero of Concrete”** School of Civil and Environmental Engineering, Georgia, Institute of Technology. Disponível em: <http://www.ce.gatech.edu/~kkurtis/gwillis/learn4.htm>. Acesso em 18 jan. 2007

CONAMA. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil RESOLUÇÃO nº 307 de 5 de julho de 2002**. Publicada no DOU nº 136, de 17/07/2002, págs. 95-96, 2002

DIAMOND, S. **A review of álcali-silica reaction and expansion mechanisms 1. Alkalies in cements na in concrete pore solutions.** Cement and Concrete Research 5 (1975) p. 329-346

DINÂMICA AMBIENTAL. **Conheça 3 tipos de vidros que não são recicláveis.** Disponível em: <https://www.dinamicambiental.com.br/blog/reciclagem/conheca-3-tipos-vidros-nao-sao-reciclaveis/>. Acessado em 31/07/2021. São Paulo, 2017.

DINIZ, H. A. A. et al. **Caracterização e avaliação das propriedades de concretos autoadensáveis com adições minerais e baixo consumo de cimento.** HOLOS, v. 5, p. 51-64, 2018.

DUCMAN, V.; MLADENOVIC, A.; ŠUPUT, J. S. **Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali-silica reactivity.** Cement and Concrete Research, v. 32, n. 2, p. 223-226, 2002.

DU, H.; TAN, K. **Use of waste glass as sand in mortar: Part II-Alkali-silica reaction and mitigation methods.** Cement and Concrete Composites, v. 35, n. 1, p. 118-126, 2013.

ELLIOTT, S. R. **Physics of Amorphous Materials.** John Wiley & Sons, Incorporated, 1986.

EFFTING, C. **Mecânica da fratura aplicada aos materiais duteis e frágeis.** 2004. Tese de Doutorado. Universidade do Estado de Santa Catarina.

EFNARC. **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use.** The European Guidelines for Self Compacting Concrete, n. May, p. 68, 2005.

EQUIPE FURNAS - Laboratório Concreto. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado a rolo.** Editora Pini, São Paulo, 1997.

FARAJ, R. H. et al. **Use of recycled plastic in self-compacting concrete : A comprehensive review on fresh and mechanical properties.** Journal of Building Engineering, v. 30, n. February, p. 101283, 2020.

GLASSER, F. P. **Chemistry of the AlkaliAggregate Reaction. In: SWAMY, R. N. (Ed.). The Alkali-Silica Reaction in Concrete.** Glasgow: Blackie and Son, 1992.

GURSEL, A. P. et al. **Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review.** Cement and Concrete Composites, v. 51, p. 38-48, 2014.

HADLINGTON, S. **Recycling Beyond the Glass Ceiling.** Report for the Independent. disponível em: <<http://www.independent.co.uk/environment/recycling-beyond-the-glass-ceiling-604663.html>> (Nov.18,2002).

HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado-efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa.** Dissertação de Mestrado apresentada na UFG, Goiânia, 1999.

HERIYANTO; PAHLEVANI, F.; SAHAJWALLA, V. **From waste glass to building materials – An innovative sustainable solution for waste glass.** Journal of Cleaner Production, v. 191, p. 192–206, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO; **Manual de utilização de aditivos químicos para concreto.** Livro eletrônico 2. ed. - São Paulo, 2021.

ISMAIL, Z. Z.; AL-HASHMI, E. A. **Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete.** Waste management, v. 29, n. 2, p. 655-659, 2009.

JAYA, E. J. et al. **Optimizing High Performance Self Compacting Concrete.** In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017. p. 01027.

KAMALI, M.; GHAREMANINEZHAD, A. **Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials.** Construction and Building Materials, v. 98, p. 407–416, 2015.

KIHARA, Y. **The influence of carbonation on the alkali-aggregate reaction mechanism.** In: Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement. 1997.

KIHARA, Y.; SBRIGHI NETO, C.; KUPERMAN, S. C. **Reação álcalis-agregado: visão atual e a situação brasileira.** In: SIMPÓSIO SOBRE DURABILIDADE DO CONCRETO, 1998, São Paulo. Anais... São Paulo: IBRACON/USP, 1998.

KROPP, J. **Relations between transport characteristics and durability.** Performance criteria for concrete durability, RILEM Report, v. 12, p. 97-137, 1995.

KOU, S. C.; POON, C. S. **Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate.** Cement and Concrete Composites, v. 31, n. 2, p. 107–113, fev. 2009.

LIMA, M. R. M. **Efeito do grau de cristalinidade da sílica na reatividade de agregados em ambiente alcalino.** João Pessoa, 2016.

LING, Tung-Chai; POON, Chi-Sun; KOU, Shi-Cong. **Influence of recycled glass content and curing conditions on the properties of self-compacting concrete after exposure to elevated temperatures.** Cement and Concrete Composites, v. 34, n. 2, p. 265-272, 2012.

LIU, M. **Incorporating ground glass in self-compacting concrete.** Construction and Building Materials, v. 25, n. 2, p. 919-925, 2011.

MOHAJERANI, A. et al. **Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review.** Construction and Building Materials, v. 156, p. 443-467, 2017.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações Álcali-sílica e álcali-silicato.** São Paulo. 2007.

NASIRU, Salifu et al. **Properties of cement mortar containing recycled glass and rice husk ash**. Construction and Building Materials, v. 299, p. 123900, 2021.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto** -5ª Edição. Bookman Editora, 2015.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-compacting concrete**. Journal of advanced concrete technology. Japan Concrete Institute, v. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.

PECCHIO M., et al. **Produtos da reação alcali-silicato em concretos de edificações da região Metropolitana da Grande Recife/PE**. In. II SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ALCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2006, Rio de Janeiro.

PEREIRA, E. et al. **Avaliação do efeito combinado da reação álcali-agregado (RAA) e ataque interno por sulfatos (ISA) sobre as resistências mecânicas e microestrutura de argamassas em cura imersa em solução de hidróxido de sódio**. Revista Técnico-Científica, 2018.

POOLE AB. **Alkali silica reactivity mechanisms of gel formation and expansion**. Proceedings of the 9th International conference on Alkali-Silica reaction in concrete, (ICAAR), London, England, 1992 pp 782-789

RAJABIPOUR, F.; MARAGHECHI, H.; FISCHER, G. **Investigating the alkali-silica reaction of recycled glass aggregates in concrete materials**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 22, n. 12, p. 1201-1208, 2010.

RAKSHVIR, M.; BARAI, S. V. **Studies on recycled aggregates-based concrete**. Waste Management & Research, v. 24, n. 3, p. 225-233, 2006.

RISTIC, Nenad et al. **Properties of self-compacting concrete produced with waste materials as mineral admixture**. Revista Romana de Materiale, v. 49, n. 4, p. 568-580, 2019.

SALES, Rosemary Bom Conselho et al. **Durability of mortar made with fine glass powdered particles**. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2017, 2017.

SANTOS, V. C. et al. **Behavior of the self-compacting mortar with sugarcane bagasse ash in the fresh and hardened state**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 12, p. 179-198, 2019.

SERPA, D. et al. **ASR of mortars containing glass**. Construction and Building Materials, v. 47, p. 489-495, 2013.

SHARIFI, Yasser; HOUSHIAR, Mahmoud; AGHEBATI, Behnam. **Recycled glass replacement as fine aggregate in self-compacting concrete**. Frontiers of Structural and Civil Engineering, v. 7, n. 4, p. 419-428, 2013.

SHI, C.; ZHENG, K. **A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete**. Resources, Conservation and Recycling, v. 52, n. 2, p. 234-247, 2007.

SILVA, L. R. R. da. **Análise de propriedades do concreto autoadensável com resíduo polimérico**. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

SOROUSHIAN, Parviz et al. **Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement**. Construction and Building Materials, v. 29, p. 368-377, 2012.

SOUZA, V. C. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo. Editora Pini. 1998.

SUA-IAM, G.; MAKUL, N. **Use of limestone powder during incorporation of Pb-containing cathode ray tube waste in self-compacting concrete**. Journal of environmental management, v. 128, p. 931-940, 2013.

TAN, K. H.; DU, H. **Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties**. Cement and Concrete Composites, v. 35, n. 1, p. 109–117, jan. 2013.

THOMAS, M. D; BLESZYNSKI R. F. **The use of silica fume to control expansion due to alkali-aggregate reactivity in concrete: a review**. Materials Science of Concrete VI. American Ceramic Society, Inc, 735 Ceramic Place, Westerville, OH 43081, USA, 2001., p. 377-433, 2001.

TOUMA, W. E. **Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives**. The University of Texas at Austin, 2000.

TUAUM, Awetehagn; SHITOTE, Stanley; OYAWA, Walter. **Experimental study of self-compacting mortar incorporating recycled glass aggregate**. Buildings, v. 8, n. 2, p. 15, 2018.

TURGUT, P.; YAHLIZADE, E. S. **Research into concrete blocks with waste glass**. International Journal of Civil and Environmental Engineering, v. 3, n. 3, p. 186-192, 2009.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos autoadensáveis**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre. 2004.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: PINI, 2008.

VALDUGA, L. **Reação Alkali-agregado – Mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo**. Secretaria da Educação do Estado de São Paulo. 2002.

WANG, H. Y.; HUANG, W. L. **A study on the properties of fresh self-consolidating glass concrete (SCGC)**. Construction and Building Materials, v. 24, n. 4, p. 619–624, 2010.