

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DO DESEMPENHO DO RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO
COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR PARA
APLICAÇÃO EM CONCRETO AUTOADENSÁVEL DE ALTO
DESEMPENHO

ADMA MAGNI DARWICH HIGUCHI

MANAUS

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ADMA MAGNI DARWICH HIGUCHI

ESTUDO DO DESEMPENHO DO RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO COMO MATERIAL
CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR PARA APLICAÇÃO EM CONCRETO
AUTOADENSÁVEL DE ALTO DESEMPENHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Materiais de Construção.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos

MANAUS

2018

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

H638e Higuchi, Adma Magni Darwich
Estudo do desempenho do resíduo de vidro moído como material cimentício suplementar para aplicação em concreto autoadensável de alto desempenho. / Adma Magni Darwich Higuchi. 2018
148 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Raimundo Pereira de Vasconcelos
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Impacto ambiental. 2. Polo Industrial de Manaus. 3. resíduo de vidro. 4. material cimentício suplementar. 5. substituição parcial. I. Vasconcelos, Raimundo Pereira de II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

ADMA MAGNI DARWICH HIGUCHI

ESTUDO DO DESEMPENHO DO RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO COMO MATERIAL
CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR PARA APLICAÇÃO EM CONCRETO
AUTOADENSÁVEL DE ALTO DESEMPENHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Materiais de Construção.

Aprovada em 1º de novembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos

Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho

Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Laerte Melo Barros

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas

*Aos meus pais Assad José Darwich e Sandra
Magni Darwich pelo amor, incentivo e
valiosos ensinamentos desde o início de
minha vida acadêmica.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que contribuíram com o desenvolvimento desta pesquisa. Em especial:

Ao Grande Arquiteto do Universo por toda luz e sabedoria durante esta jornada.

Aos meus pais, mentores de vida e amigos, Sandra e Assad. Pelos conselhos, incentivos e amor, não somente durante esta caminhada, mas desde o “dia 1” de minha existência. Pelo apoio e por disponibilizarem tempo e recursos, seja para ler um “capítulo” deste trabalho, seja para me acompanharem às visitas em fábricas, jazidas, mecânicos, etc. Por todo auxílio físico e intelectual.

Ao meu marido, Francisco, pelo incentivo, apoio e amor incondicional. Pela compreensão e carinho diários. Por acreditar em mim e incentivar todos os dias meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus sogros, Maria Inês e Niro, pelos conselhos, apoio, carinho e contribuições acadêmicas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos, pela dedicação, ensinamentos e apoio desde a graduação. Pela orientação técnica e sábios conselhos durante o desenvolvimento desta pesquisa.

À Universidade Federal do Amazonas e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Às empresas Vidrorios Ltda., MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda., Britamazon Indústria, Comércio e Mineração Ltda. por cederem, respectivamente, o resíduo de vidro, o aditivo superplastificante e os agregados utilizados nesta pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Ensaios de Materiais da UFAM, Jorge Euvaldo Oliveira Santiago e Nilson Braz Videl, pela dedicação e auxílio durante a realização dos ensaios de caracterização de materiais e produção do concreto.

Aos técnicos Sr. Zeca e Sr. Reinaldo do Laboratório de Pavimentação da UFAM pelo auxílio e disponibilização das estufas para secagem de material.

À Prof.^a Dr.^a Virgínia Mansanares Giacon pela disponibilização do Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos e ao técnico Diogo Monteiro pela realização dos ensaios de

Espectrometria de Fluorescência de Raios-X e Termogravimetria.

Ao Prof. Dr. Lizandro Manzato por me receber no Laboratório de Síntese e Caracterização de Nano Materiais - LSCN do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) e disponibilizar o moinho de bolas de 1720 rpm utilizado durante o estudo de moagem.

Ao Mitsuo Takeno pelo apoio e realização do ensaio de Difração de Raios-X.

À Mariana Pavesi do Laboratório de Construções Rurais e Ambiente - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/USP Pirassununga pela realização dos ensaios de determinação da massa específica no cimento e no resíduo de vidro moído.

À Nilda Pantoja do Laboratório de Análises Minerais - LAMIN do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) pelas análises de granulometria por difração à laser

Ao Dr. Assad José Darwich e ao MSc. Josedec Mateus Faria Monteiro por cederem o Laboratório de Química da Água e Limnologia do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA para realização dos ensaios de absorção de água no concreto.

Ao Sr. Wilson Meirelles do Laboratório Temático de Microscopia Óptica e Eletrônica - LTMOE/CPAAF/INPA pelos ensaios de microscopia eletrônica de varredura nas amostras de cimento e resíduo de vidro moído.

Ao engenheiro Domingos Sávio Coelho por disponibilizar a empresa Konkrex Engenharia de Concreto Ltda. para a realização dos ensaios de compressão axial.

À Prof.^a Dr.^a Samantha Pinheiro e ao Prof. Dr. Otávio Augusto Paiva por disponibilizar o Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Estado do Amazonas para a realização dos ensaios de tração por compressão diametral.

Aos meus queridos colegas do mestrado Daiana, Paulo, Elma, Pedro, Ariel, Sara, Armirys, Ewerton, Erick e Maria Clara, por tornarem os dias mais leves com conselhos, ajudas, risadas, almoços, desabafos e incentivos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM pelo auxílio financeiro à pesquisa.

RESUMO

No Polo Industrial de Manaus há grande produção de resíduo proveniente do corte e lapidação de placas de vidro plano. Uma alternativa para a diminuição do impacto ambiental gerado pelo descarte do resíduo de vidro e pelas emissões de CO₂ geradas durante a manufatura do cimento é a sua incorporação no concreto como material cimentício suplementar. Neste trabalho, foi analisado o efeito de diferentes teores de resíduo de vidro moído (RVM), como substituição parcial do cimento, na produção de concreto autoadensável de alto desempenho (CAAD). Foi realizado a moagem do resíduo. Em seguida, foi caracterizado química e fisicamente e estudado na pasta cimentícia, na argamassa e no concreto. Nas pastas, avaliou-se o teor de hidróxido de cálcio aos 28 dias de cura por meio de análises térmicas. Nas argamassas, realizou-se um estudo de eficiência de misturas com 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de RVM em substituição parcial ao cimento. Também foi determinada a capacidade de mitigação das expansões provocadas pelas reações álcalis-sílica (RAS) com teores de 10%, 15% e 20% de RVM. Utilizando-se a metodologia de dosagem Le *et al.* (2015) adaptada, foi possível produzir CAAD. No estado fluido foram realizados testes de resistência à segregação, fluidez, preenchimento, viscosidade e habilidade passante. No estado endurecido, foram conduzidos testes de resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão axial e absorção de água por imersão. Ficou evidenciado que, no estado fluido, todos os concretos desenvolvidos apresentaram espalhamento compatível com concretos autoadensáveis, sem evidência de segregação, podendo ser considerados adequados para a maioria das aplicações estruturais. No estado endurecido, dentre os teores estudados, concretos e argamassas contendo 15% de RVM apresentaram desempenho mecânico superior aos demais a partir dos 28 dias de cura submersa, tanto na compressão quanto na tração. Todos os concretos estudados apresentaram índice de desempenho superior a 75% a partir de 7 dias, o que classifica o RVM como um material pozolânico, de acordo com a ASTM C 618 e a EN 450-1. As argamassas estudadas também apresentaram comportamento semelhante, com exceção daquelas contendo 25% de RVM. Já em relação à durabilidade, conforme o aumento de teor de RVM em substituição ao cimento, observou-se diminuição das expansões provenientes das RAS, da absorção de água e índices de vazios. A substituição parcial do cimento por RVM pode ser uma alternativa de baixo impacto ambiental e economicamente viável na produção de CAAD.

Palavras-chave: Impacto ambiental, Polo Industrial de Manaus, vidro moído, substituição parcial.

ABSTRACT

In the Industrial Pole of Manaus there is great production of residue from the cutting and lapidation of flat glass plates. An alternative to reducing the environmental impact generated by the disposal of glass residue and CO₂ emissions generated during the manufacture of cement is its incorporation in concrete as supplementary cementitious material. In this work, the study of the effect of different contents of ground glass residue (GGR) as partial replacement of cement for the production of high performance self-compacting concrete (HPSCC) was carried out. In doing so, was carried out a study of grinding of this residue, which was then chemically and physically characterized and studied in cement pastes, mortar and concrete. In pastes, the calcium hydroxide content was evaluated at 28 days of cure by thermal analyzes. In mortars, an efficiency study was performed in mixtures with 5%, 10%, 15%, 20% and 25% of GGR in partial replacement of cement. It was also determined the ability to mitigate the expansions caused by alkali-silica reaction (ASR) in mixtures with contents of 10%, 15% and 20% of GGR. Using the mix design proposed by Le *et al.* (2015), it was possible to produce HPSCC. In plastic state, tests of segregation resistance, fluidity, fill, viscosity and passing ability were performed. In hardened state, diametral compressive tensile strength, axial compressive strength and water absorption by immersion were performed. In plastic state, all concretes showed scattering compatible with self-compacting concretes, without evidence of segregation and could be considered suitable for most structural applications. In hardened state, among the studied contents, concretes and mortars containing 15% RVM presented mechanical performance superior to others after 28 days of submerged curing, both in compressive and tensile strength. All the concretes studied showed an activity index higher than 75% at 7 days, which classifies the GGR as a pozzolanic material according to ASTM C 618 and EN 450-1. The mortars studied also presented similar behavior, except for those containing 25% GGR. When it comes to durability, expansions, water absorption and void contents decreased as GGR content increased in substitution of cement. The partial replacement of the cement by GGR can be an alternative of low environmental impact and economically viable in the production of HPSCC.

Keywords: Environmental impact, Industrial Pole of Manaus, ground glass, partial replacement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação gráfica dos maiores produtores de cimento, considerando a média global de dados de 1994 a 2017.....	28
Figura 2 - Crescimento mundial dos principais minerais e produtos manufaturados (1970 = 1).	29
Figura 3 - Disposição de resíduo de vidro no pátio da empresa Amazon Temper.....	33
Figura 4 - Detalhe dos resíduos de vidro: a) Diferentes colorações de vidro; b) Predominância de vidro verde.....	34
Figura 5 - Sistema de corte do vidro: a) Câmaras de água; b) Máquina de corte de placas de vidro plano.....	34
Figura 6 - Resíduo de lapidação de vidros planos: a) Ainda molhado e em grumos; b) Fração de resíduo seco inteiro resultado da sedimentação no interior das câmaras.....	35
Figura 7 - Classificação de concreto para fins estruturais.....	39
Figura 8 - Fluxograma da metodologia de dosagem.....	55
Figura 9 - Exemplo de graduação ideal de agregados.....	60
Figura 10 - Determinação da melhor proporção entre os agregados.....	62
Figura 11 - Curvas de Walz para a determinação da relação água/cimento em função da resistência aos 28 dias.....	67
Figura 12 - Curvas de Abrams para a determinação da relação água/cimento em função da resistência aos 28 dias.....	68
Figura 13 - Ensaio de mini-slump flow: a) Dimensões do molde cônico; b) Medição do espalhamento.....	71
Figura 14 - Fluxograma de atividades realizadas.....	75

Figura 15 - Processos de preparo do resíduo de vidro: a) Detalhe das camadas de resíduo sedimentado nas câmaras de água das máquinas de corte; b) Resíduo seco em estufa; c) Apiloamento manual do resíduo seco.....	80
Figura 16 - Processos de preparo do resíduo de vidro: a) Moagem por 30min em moinho de bolas; b) Resíduo retido na peneira #30; c) Resíduo passante na peneira #30.....	80
Figura 17 - Moinhos utilizados no estudo: a) com motor de 1670 rpm; b) com motor de 1720 rpm.....	81
Figura 18 - Produção das pastas cimentícias: a) béquer e haste de vidro utilizados para produção; b) consistência das pastas; c) pastas acondicionadas em sacos plásticos lacrados..	86
Figura 19 - Ensaio de miniabatimento: a) Funil utilizado; b) Medida do espalhamento	88
Figura 20 - Compatibilização entre o cimento CP-IV e o aditivo superplastificante MC PowerFlow 1102.....	89
Figura 21 - Composição granulométrica dos agregados utilizados nas proporções de 47% de areia e 53% de brita	90
Figura 22 - Espalhamento x Teor de aditivo superplastificante de misturas com diferentes teores de RVM	91
Figura 23 - Espalhamento x Teor de aditivo superplastificante de mistura de referência.....	91
Figura 24 - Mini slump flow: a) Tronco de cone posicionado antes de ser medido o espalhamento; b) Espalhamento do material sobre placa de acrílico	92
Figura 25 - Ensaio de espalhamento <i>slump flow</i> : a) orientação do cone; b) espalhamento.	94
Figura 26 - Método do Funil V: a) Aparato antes do ensaio; b) Aparato sendo preenchido....	94
Figura 27 - Método da Caixa L: a) Caixa vazia antes do ensaio; b) Concreto posicionado na parte vertical da caixa durante o ensaio; c) Concreto após escoamento para a parte horizontal	95

Figura 28 - Preparação dos corpos-de-prova: a) Cura submersa; b) Embalagem em filme PVC; c) Retificação das extremidades das amostras.....	96
Figura 29 - Ensaio à compressão: a) Prensa servo-hidráulica; b) Retífica faceadora	97
Figura 30 - Ensaio de tração por compressão diametral: a) Prensa hidráulica universal utilizada; b) Corpo-de-prova posicionado durante o ensaio.....	97
Figura 31 - Ensaio de absorção de água: a) Corpos-de-prova em banho-maria; b) Temperatura da água confirmada com termômetro	98
Figura 32 - Determinação da massa do corpo-de-prova em balança hidrostática após banho-maria.....	99
Figura 33 - Aferição da massa dos corpos-de-prova: a) Após secagem em estufa; b) Após imersão; c) Após banho-maria.....	99
Figura 34 - Representação gráfica das curvas granulométricas resultado das moagens	100
Figura 35 - Representação gráfica do rendimento das moagens durante 24 horas.....	101
Figura 36 - Representação gráfica das curvas granulométricas de 4h e 24h da moagem M4	102
Figura 37 - Comparação de difratogramas do resíduo de vidro moído e não moído	105
Figura 38 - Micrografia do resíduo de vidro não moído: (a) com aumento de 500x; (b) com aumento de 2000x.....	106
Figura 39 - Micrografia do resíduo de vidro moído: (a) com aumento de 500x; (b) com aumento de 4000x	106
Figura 40 - Micrografia do cimento: (a) com aumento de 500x; (b) com aumento de 2000x	108
Figura 41 - Difratograma do cimento CP-IV feito com ângulo de difração entre o feixe incidente de raios-x e seu prolongamento de 2θ e anodo de cobre.	109
Figura 42 - Solução padrão à esquerda e solução com a areia à direita	110
Figura 43 - Curvas TG das pastas cimentícias com 0%, 10%, 15% e 20% de RVM aos 28 dias.	111

Figura 44 - Curvas DTG das pastas cimentícias com 0%, 10%, 15% e 20% de RVM aos 28 dias.....	112
Figura 45 - Relação entre resistência à compressão aos 28 dias e o teor de substituição parcial do cimento por RVM.....	113
Figura 46 - Relação entre o fator de eficiência aos 28 dias e o teor de substituição parcial do cimento por RVM.....	114
Figura 47 - Representação gráfica das expansões nas barras de argamassa.....	117
Figura 48 - Espalhamentos obtidos no ensaio de <i>Slump flow</i>	118
Figura 49 - Representação gráfica das médias das resistências à compressão	120
Figura 50 - Representação gráfica do ganho de resistência aos 7, 28 e 56 dias	120
Figura 51 - Representação gráfica das médias das resistências à tração por compressão diametral	124
Figura 52 - Representação gráfica das médias da absorção por imersão	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de resíduo de vidro gerado nas 3 principais fábricas de vidro do PIM 33	
Tabela 2 - Composição química dos vidros de silicato sodocálcico	38
Tabela 3 - Composição química de diferentes tipos de vidro.....	42
Tabela 4 - Composição química de vidros de soda-e-cal coloridos	42
Tabela 5 - proporções entre os agregados para determinação do índice de vazios	62
Tabela 6 - Diretrizes para atribuição de forma visual e classificação de angularidade (<i>RSA</i>). 65	
Tabela 7 - Desvio-padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto.....	67
Tabela 8 – Determinação do número de amostras por ensaio do programa experimental.....	76
Tabela 9 - Cálculo da Análise de Variância (ANOVA)	77
Tabela 10 - Características do aditivo superplastificante	79
Tabela 11 - Parâmetros utilizados no estudo da moagem	82
Tabela 12 - Métodos empregados na caracterização do resíduo de vidro e do cimento	82
Tabela 13 - Métodos empregados na caracterização dos agregados	83
Tabela 14 - Consumo de materiais utilizados na produção do CAAD obtidos pela dosagem .90	
Tabela 15 - Metodologias empregadas na caracterização do concreto no estado fresco	93
Tabela 16 - Metodologias empregadas na caracterização do concreto no estado endurecido .95	
Tabela 17 - Quantidades de corpos-de-prova a serem produzidos para cada traço produzido 96	
Tabela 18 - Tamanho médio das partículas das moagens realizadas em moinho de bolas com motor de 1670 rpm	102
Tabela 19 - Tamanho médio das partículas das moagens realizadas em moinho de bolas com motor de 1720 rpm	103
Tabela 20 - Comparação da composição química do RVM resultante da moagem M4 com os requisitos da NBR NM 294 (2004) para vidro silicato sodocálcico.....	104

Tabela 21 - Requisitos químicos para materiais pozolânicos segundo a NBR 12653 (2014)	104
Tabela 22 - Referências utilizadas na identificação de fases cristalinas do RVM	105
Tabela 23 - Características físicas do RVM resultante da moagem M4	105
Tabela 24 - Características químicas do cimento CP-IV.....	107
Tabela 25 - Características físicas do cimento CP-IV	108
Tabela 26 - Referências utilizadas na identificação de fases cristalinas do cimento	109
Tabela 27 - Propriedades dos agregados miúdo e graúdo	110
Tabela 28 - Teores de água quimicamente combinada com os compostos de hidratação, hidróxido e carbonato de cálcio (%).....	113
Tabela 29 - Análise de variância das médias dos tratamentos	115
Tabela 30 - Dados obtidos no ensaio de resistência à compressão de argamassas aos 28 dias	115
Tabela 31 - Resultados dos testes no estado fresco	117
Tabela 32 - Classificação do concreto no estado fluido segundo a NBR 15823-1	118
Tabela 33 - Análise de variância das médias dos concretos aos 7 dias	121
Tabela 34 - Matriz de correlação entre os concretos (valores-p) aos 7 dias.....	121
Tabela 35 - Análise de variância das médias dos concretos aos 28 dias	122
Tabela 36 - Matriz de correlação entre os concretos (valores-p) aos 28 dias.....	122
Tabela 37 - Análise de variância das médias dos concretos aos 56 dias	123
Tabela 38 - Matriz de correlação entre os concretos (valores-p) aos 56 dias.....	123
Tabela 39 - Índice de desempenho do RVM no concreto aos 7, 28 e 56 dias e limites admitidos pelas normas brasileira, americana e europeia	124
Tabela 40 - Análise de variância das médias de resistência à tração dos concretos aos 28 dias	125
Tabela 41 - Matriz de correlação entre os concretos (valores-p) aos 28 dias.....	125

Tabela 42 - Análise de Variância da absorção de água aos 28 dias	126
Tabela 43 - Matriz de correlação entre os tratamentos (valores-p) para absorção de água....	126
Tabela 44 - Resultados obtidos no ensaio de absorção	127

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA - Análise de Variância

ASTM - American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para Testes e Materiais)

C-C – Carbonato de cálcio

C-A-S-H - Sílico aluminato de cálcio hidratado

C-H - Hidróxido de cálcio

cm - Centímetros

CO₂-eq - Carbono equivalente

CP-IV - Cimento Portland Pozolânico

C-S-H - Silicato de cálcio hidratado

CV - Coeficiente de Variação

°C - Graus Celsius

DTG - Derivada termogravimétrica.

EN - European Standard

FRX - Espectrometria de fluorescência de raios-X

g - Grama

GEE - Gases de Efeito Estufa

h - Hora

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)

MCS - Materiais Cimentícios Suplementares

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

m³ - metro cúbico

mm - Milímetros

min - Minutos

ONU - Organização das Nações Unidas

PIM - Polo Industrial de Manaus

PMGIRS - Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Manaus

PNMC - Política Nacional sobre Mudança do Clima

RAS - Reações Álcalis-Sílica

RV - Resíduo de Vidro

RVNM - Resíduo de Vidro Não Moído

RVM - Resíduo de Vidro Moído

TG - Termogravimetria

Ton - Toneladas

µm - Micrômetro

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima)

US\$ - Dólares americanos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	22
1.1. Objetivo.....	25
2. REVISÃO DE LITERATURA	26
2.1. A mudança climática e as emissões de gases de efeito estufa.....	26
2.1.1. As emissões de GEE na indústria cimentícia	27
2.1.2. A mitigação das emissões de GEE	29
2.2. Resíduo de vidro.....	32
2.3. A produção de resíduo de vidro no Polo Industrial de Manaus (PIM)	32
2.4. O resíduo de vidro como material cimentício suplementar	36
2.4.1. Propriedades relacionadas ao desempenho mecânico	37
2.4.2. Propriedades reológicas	43
2.4.3. Propriedades associadas à durabilidade.....	44
3. DOSAGEM DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL DE ALTO DESEMPENHO ..	52
3.1. Método Le <i>et al.</i> (2015) adaptado	53
3.1.1. Parte 1: Fase preliminar	56
3.1.2. Parte 2: cálculo da dosagem	59
3.1.3. Parte 3: Testes no estado fresco.....	72
a) Parâmetro 1: Capacidade de fluidez e preenchimento	72
b) Parâmetro 2: Viscosidade	73
c) Parâmetro 3: Habilidade passante.....	73

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL	75
4.1. Variáveis estudadas	76
4.2. Planejamento experimental	76
4.2.1. Análise de Variância (ANOVA).....	77
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	78
5.1. Material.....	78
5.1.1. Resíduo de vidro	78
5.1.2. Cimento	78
5.1.3. Agregados miúdo e graúdo.....	78
5.1.4. Aditivo Superplastificante	78
5.1.5. Água de amassamento	79
5.2. Métodos.....	79
5.2.1. Preparação do resíduo de vidro	79
5.2.2. Estudo da moagem do resíduo de vidro.....	81
5.2.3. Ensaios de caracterização dos materiais.....	82
5.2.4. Granulometria de partículas por difração à laser.....	83
5.2.5. Massa específica.....	84
5.2.6. Composição química	84
5.2.7. Difração de raios-X	84
5.2.8. Microscopia eletrônica de varredura	85
5.2.9. Termogravimetria das pastas	85

5.2.10.	Produção e caracterização das argamassas	87
5.2.11.	Produção e caracterização do concreto.....	88
5.2.12.	Caracterização do concreto no estado fresco.....	92
5.2.13.	Caracterização do concreto no estado endurecido.....	95
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	100
6.1.	Estudo da moagem do resíduo de vidro.....	100
6.2.	Caracterização de materiais	103
6.2.1.	Resíduo de vidro.....	103
6.2.2.	Cimento	107
6.2.3.	Agregado graúdo e miúdo	110
6.3.	Análise térmica das pastas	111
6.4.	Eficiência do RVM na argamassa	113
6.5.	Índice de desempenho do RVM com o cimento na argamassa.....	115
6.6.	Mitigação das reações álcalis-sílica	116
6.7.	Avaliação das propriedades do concreto no estado fluido	117
6.8.	Avaliação das propriedades no estado endurecido.....	119
6.8.1.	Resistência à compressão axial.....	119
6.8.2.	Índice de desempenho do RVM no concreto.....	123
6.8.3.	Resistência à tração por compressão diametral	124
6.8.4.	Absorção de água.....	125
7.	CONCLUSÃO	128

8. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....130

REFERÊNCIAS131

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o maior desafio da construção civil é aliar o desempenho de um determinado material com a redução do impacto ambiental de sua produção, sem que este processo seja demasiadamente oneroso. Com a produção de concreto, não é diferente.

Os impactos ambientais da indústria do concreto gerados, principalmente, durante a produção do cimento podem ser locais, regionais ou globais. Localmente, os efeitos incluem produção de ruído, influência na qualidade do ar, mudanças na paisagem e no ecossistema. Em escala regional, as emissões de dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x), especialmente o NO₂, contribuem para efeitos da chuva ácida. Globalmente, as emissões dióxido de carbono de (CO₂) provenientes do processo de calcinação e queima de combustíveis fósseis contribuem para a mudança climática (HUNTZINGER & EATMON, 2009).

Segundo o quarto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (BERNSTEIN *et al.*, 2007), a produção de cimento é responsável por 5% das emissões globais de CO₂. Não há um consenso sobre a quantidade exata de emissões por quilograma de cimento, mas estima-se que cada quilograma de cimento Portland comum produzido gere de 0,66 a 0,82 kg de CO₂-eq (HUNTZINGER & EATMON, 2009; LI *et al.*, 2011; PENG *et al.*, 2013).

Uma vez que o cimento é um material indispensável para a fabricação do concreto, pois promove a liga necessária entre os demais componentes, é imprescindível que sejam adotadas medidas para reduzir e/ou mitigar os impactos desta indústria no meio ambiente. No Brasil, são fabricados 2% do total de cimento comercializado no mundo (USGS, 2018). Essa atividade compreende 3% das emissões de CO₂ nacionalmente (BRASIL, 2017). A maior parte da pegada carbônica do cimento deve-se à calcinação do calcário durante o processo de produção do clínquer e ao alto consumo de energia durante a sua fabricação (BARCELO *et al.*, 2014; GARTNER, 2004). De acordo com o relatório SEEG (2016), 60% das emissões são geradas durante o processo de queima do clínquer, enquanto 40% correspondem à queima de combustíveis.

A redução do impacto da fabricação do concreto é possível não só por atividades relacionadas ao próprio concreto, mas também pela melhoria da produtividade de seus componentes (MEHTA, 2001; LIU & CHERN, 2008). O reaproveitamento de resíduos de demolição, melhorias na durabilidade das estruturas, uso de tecnologias como a absorção de

CO₂ da atmosfera por carbonatação induzida, entre outros, são medidas que podem ser aplicadas com este propósito.

Na indústria cimentícia, por exemplo, há uma ampla gama de tecnologias com potencial para redução de impactos. Podem ser feitas melhorias na eficiência energética de fábricas na produção do cimento como utilização de combustíveis de biomassa ou biogás, incineração de resíduos sólidos municipais e sequestro CO₂ em fornos (BERNSTEIN *et al.*, 2007). Há ainda a possibilidade de se projetar clínqueres com menores teores de calcário ou de se diminuir a quantidade de clínquer substituindo-se parte desse por um material cimentício suplementar com propriedades pozolânicas (BARCELO *et al.*, 2014).

Se comparados a outros meios para redução de impacto, como aproveitamento do pó dos fornos e o sequestro de emissões de CO₂ na produção de cimento, a substituição de parte do cimento por adições pozolânicas ainda é o processo mais vantajoso (HUTZINGER & EATMON, 2009). O impacto ambiental relacionado à produção do cimento com adições pozolânicas é, aproximadamente, três quartos menor que o impacto gerado pela produção dos cimentos citados acima e ao cimento Portland comum (HUTZINGER & EATMON, 2009).

É importante que o desempenho ambiental e econômico esteja simultaneamente equilibrado com o desempenho técnico ou funcional que se pretende alcançar (LIPPIATT & AHMAN, 2004). Para isto, além de se utilizar métodos para a redução do impacto ambiental, é necessária a utilização de uma metodologia de dosagem eficiente. Mais recentemente, Le *et al.* (2015) propuseram uma metodologia de dosagem para a produção de concreto autoadensável de alto desempenho com um ou mais materiais cimentícios suplementares combinados.

Além da diminuição da pegada carbônica, o aproveitamento de resíduos de processos produtivos como cinzas volantes, escórias de alto-forno e sílica ativa como materiais cimentícios suplementares (MCS) é um processo vantajoso, pois evita descarte desses materiais em aterros municipais. Para o concreto, tais materiais possuem efeitos benéficos como a melhoria da microestrutura, aumentando a sua resistência e a durabilidade (VISHWAKARMA & RAMACHANDRAN, 2018). Esses materiais são utilizados geralmente em concretos onde o projeto exige alta resistência e alto desempenho.

O uso de MCS alternativos disponíveis para produção de concreto é vantajoso sobre os MCS comumente utilizados e comercializados quando esses não estão à disposição no local ou são mais caros se transportados (OMRAN *et al.*, 2018). Um material com grande potencial para uso como MCS em concreto é o resíduo de vidro.

Apesar de o vidro ser um material 100% reciclável, não é biodegradável e se acumula por vários anos em aterros e lixões se não for reciclado. Uma solução para esse problema, é a incorporação deste resíduo no concreto, uma vez que esse material possui composição química e fases similares aos MCS tradicionais (SOLIMAN & TAGNIT-HAMOU, 2017). Como substituição parcial do cimento, o resíduo de vidro proporciona redução dos impactos ambientais provocados pela produção do cimento e pelo acúmulo de vidro em aterros, melhora as propriedades de resistência e durabilidade e tem potencial para redução de custos na produção de argamassas e concretos.

O vidro oferece a composição química e reatividade desejadas para uso como um material cimentício suplementar, podendo melhorar a estabilidade química, a resistência à umidade e a durabilidade do concreto. Para realizar esse potencial, o vidro residual precisa ser moído em tamanho de partículas em microescala para acelerar suas reações químicas benéficas no concreto (NASSAR & SOROUSHIAN, 2012). Partículas de vidro com tamanhos entre 1.200 μm e 600 μm provocam expansões oriundas da reação entre os álcalis da pasta cimentícia com a sílica presente do vidro, causando efeitos deletérios ao concreto (MEYER & XI, 1999). Abaixo de 600 μm outros processos que dependem da área superficial tornam-se predominantes e as expansões diminuem conforme aumenta a finura (MEYER & XI, 1999; SHI *et al.*, 2005).

Atualmente, considerando-se as três principais fábricas de peças de vidro plano, em Manaus são produzidas 27 toneladas de cacos de vidro e 390 quilos de resíduo em pó por mês. Uma vez que não há reciclagem para esse resíduo no estado do Amazonas, seu destino final ou é o Aterro Municipal ou é enviado a outros estados para que seja feita a reciclagem. Como alternativa para este problema, o subproduto da lapidação de vidro plano tem sido alvo de pesquisas como material cimentício suplementar alternativo para argamassas (PAIVA, 2009), concreto autoadensável de alto desempenho (SOUSA NETO, 2014) e de alta resistência (BARROS, 2016). Bons resultados são obtidos quando as partículas são finamente moídas.

Desse modo, o presente estudo avaliou o desempenho do resíduo de vidro moído como material cimentício suplementar para aplicação em concreto autoadensável de alto desempenho. Foram estudados três teores de resíduo de vidro moído em substituição parcial ao cimento. O método de dosagem aplicado foi baseado em Le *et al.* (2015), com o objetivo de proporcionar de forma otimizada os materiais constituintes do traço. Por fim, as propriedades de desempenho foram analisadas e comparadas entre si, por meio de Análise de Variância (ANOVA), na pasta de cimento, na argamassa e no concreto fresco e endurecido.

1.1. Objetivo

Esta pesquisa teve como objetivo principal estudar o desempenho da utilização de resíduo de vidro moído (RVM) na produção de concreto autoadensável de alto desempenho. Para tal, foram elaborados os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Realizar o estudo da moagem do resíduo de vidro para obtenção de partículas com tamanho inferior às partículas do cimento;
- ✓ Caracterizar química e fisicamente o RVM;
- ✓ Avaliar a atividade pozolânica do RVM por meio da verificação do consumo de hidróxido de cálcio em pastas cimentícias;
- ✓ Avaliar a eficiência do RVM na argamassa como substituição parcial do cimento;
- ✓ Avaliar a mitigação das reações álcalis-sílica por meio da incorporação de RVM em argamassa;
- ✓ Analisar o índice de desempenho do RVM com o cimento na argamassa e no concreto;
- ✓ Produzir concreto autoadensável de alto desempenho utilizando a metodologia de dosagem Le *et al.* (2015) adaptada;
- ✓ Avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto produzido.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A mudança climática e as emissões de gases de efeito estufa

A mudança do clima é uma das maiores preocupações do século XXI. Em 1972 foi realizada em Estocolmo, a primeira conferência da Organização das Nações Unidas (ONU) voltada para as consequências da degradação do meio ambiente. Desde então, a comunidade política e científica monitora as causas e consequências das ações antropogênicas no meio e propõe metas para impedir seu avanço desordenado.

Um estudo feito por três grupos de trabalho do Painel Intergovernamental sobre a Mudança do Clima (IPCC, em inglês) em 1990, tendo em vista o aumento populacional e o consumo desordenado, alertou sobre suas consequências. O aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), decorrentes de atividades humanas, causaria aumento na temperatura mundial, sendo capaz de ocasionar mudanças no clima. Com o objetivo de buscar meios para estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera e evitar grandes alterações climáticas, foi criada, durante a Rio-92, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, em inglês).

Desde então a comunidade internacional tem mantido seu compromisso por meio de metas de redução de emissões firmadas no Protocolo de Quioto em 1997, onde 36 países juntamente com a União Europeia se comprometeram a reduzir suas emissões em 5% em comparação com os níveis de 1990. Em 2002, o Brasil aderiu voluntariamente ao Protocolo de Quioto e implantou a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), oficializada em 2009 pela Lei nº 12.187, visando a compatibilização do desenvolvimento econômico-social com a proteção do sistema climático por meio de medidas para a redução das emissões de GEE (BRASIL, 2009). Hoje 192 países participam deste acordo.

Os GEE emitidos por ações antropogênicas definidos no Protocolo de Quioto (UNITED NATIONS, 1998) compreendem os gases dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarburetos (HFCs), perfluorcarbonetos (PFCs) e hexafluorcarburetos de enxofre (SF₆). Destes o CO₂ é o gás emitido em maior escala e contribui atualmente com, aproximadamente, 85% das emissões de GEEs, seguido pelo CH₄ com 8,6%, HFCs com 3,5%, N₂O com 2,0%, PFCs com 0,5% e SF₆ com 0,4% (FISCHEDICK *et al.*, 2014). Estas emissões são impulsionadas principalmente pelo tamanho da população, atividade econômica, estilo de vida, uso de energia, padrões de uso da terra, tecnologia e política climática.

O Decreto nº 7.390 que regulamenta os artigos 6º, 11º e 12º da Lei nº 12.187, indica que a projeção das emissões nacionais de gases do efeito estufa para o ano de 2020 totalizarão 3.236 milhões toneladas de CO₂-eq. Este valor abrange os setores de energia, agropecuária, processos industriais, tratamento de resíduos e mudança de uso da terra (BRASIL, 2010).

Segundo as projeções feitas pelo IPCC (1990), a estimativa era de que as emissões de CO₂ aumentassem de 7 para 15 bilhões de toneladas de carbono no período de 1985 a 2025, caso nenhuma providência para reduzi-las fosse tomada. Neste cenário, haveria um aumento na temperatura global de 0,3°C a cada década, maior do que o aumento observado nos últimos 10 mil anos. As consequências para este evento são: o derretimento das geleiras antárticas, aumento do nível médio do mar e inundações que colocam em risco áreas costeiras mais baixas e danificação dos ecossistemas que põe em perigo a pesca, poluição atmosférica muito grave, aumento da ameaça de incêndios florestais e escassez de água (IPCC, 1990; BERNSTEIN *et al.*, 2007).

Atualmente, no último relatório do IPCC (FISCHEDICK *et al.*, 2014) foi publicado que as emissões globais de GEE da indústria e de resíduos/efluentes aumentaram de 10,37 bilhões de toneladas de CO₂-eq em 1990 para 15,44 bilhões de toneladas de CO₂-eq em 2010. No setor industrial, o CO₂ responde por mais de 90% das emissões globais de GEE de CO₂-eq (PRICE *et al.*, 2006; US EPA, 2006).

As emissões de CO₂, então, surgem de três fontes: 1) o uso de combustíveis fósseis para energia, seja diretamente pela indústria para geração de calor e energia ou indiretamente na geração de eletricidade e vapor comprados; 2) uso não energético de combustíveis fósseis em processamento químico e fundição de metais; e 3) fontes de combustível não fóssil, por exemplo, fabricação de cimento e cal (BERNSTEIN *et al.*, 2007).

2.1.1. As emissões de GEE na indústria cimentícia

A fabricação do cimento Portland consiste na moagem da matéria-prima, geralmente calcário e argila ou xisto, na sua mistura e na queima à aproximadamente 1450°C em grandes fornos rotativos onde o material é sinterizado e parcialmente fundido. As principais reações que ocorrem neste processo são divididas em três grupos. Abaixo de 1300°C, há a decomposição da calcita (calcinação), dos minerais de argila e a reação entre eles para resultar em belita, aluminato e ferrita. Entre 1300°C e 1450°C ocorre a clinquerização, onde é formada a alita.

Este material formado após resfriado recebe adição de um pequeno teor de sulfato de cálcio e, por fim, é moído finamente (TAYLOR, 1997; NEVILLE, 2016).

Durante este processo são emitidos GEE, sobretudo o CO₂. A maioria das emissões deste gás vêm diretamente da combustão de combustíveis fósseis e da calcinação do calcário na mistura bruta para converter as matérias-primas em cimento Portland (FISCHEDICK *et al.*, 2014). Uma fonte indireta e significativamente menor de CO₂ é o consumo de eletricidade, assumindo que esta é gerada a partir de combustíveis fósseis. Aproximadamente metade do CO₂ emitido é proveniente do combustível e metade é proveniente da conversão da matéria-prima (HENDRIKS *et al.*, 1998). Para Barcelo *et al.* (2014) nesta relação, 60% das emissões ocorrem durante a calcinação da matéria-prima e 40% estão ligadas aos processos energéticos da combustão de combustíveis para alimentar os fornos.

As emissões de CO₂ da indústria do cimento representam 5% das emissões globais (BERNSTEIN *et al.*, 2007). Isto representa, aproximadamente, 4,1 bilhões de toneladas emitidas anualmente. Considerando dados do U.S. Geological Survey (USGS) de 1994 a 2017 a China é o maior produtor de cimento, responsável, em média, por quase 50% da produção global. Em seguida encontram-se a Índia com 6%, Estados Unidos com 4%, Japão com 3% e o Brasil, na quinta posição com 2% (USGS, 2018). A Figura 1 mostra uma representação gráfica da análise destes dados. Esta é uma fração considerável das emissões totais e é por este motivo que pesquisadores do mundo inteiro buscam mapear estas emissões e propor alternativas para mitigá-las.

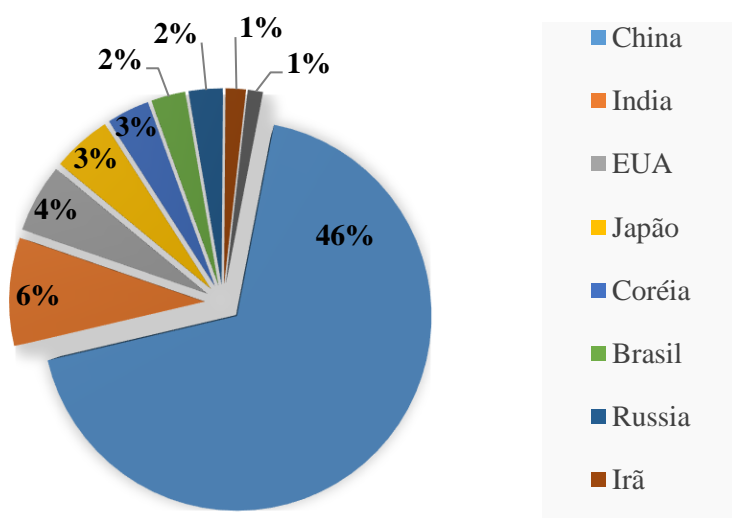


Figura 1 - Representação gráfica dos maiores produtores de cimento, considerando a média global de dados de 1994 a 2017

Das atividades industriais, a manufatura do cimento é a atividade com o maior crescimento dos últimos 40 anos (Figura 2). No Brasil o crescimento anual no período de 2005 a 2012 foi de 10%, ficando logo atrás do maior produtor de cimento do mundo: a China, com 11% (FISCHEDICK *et al.*, 2014).

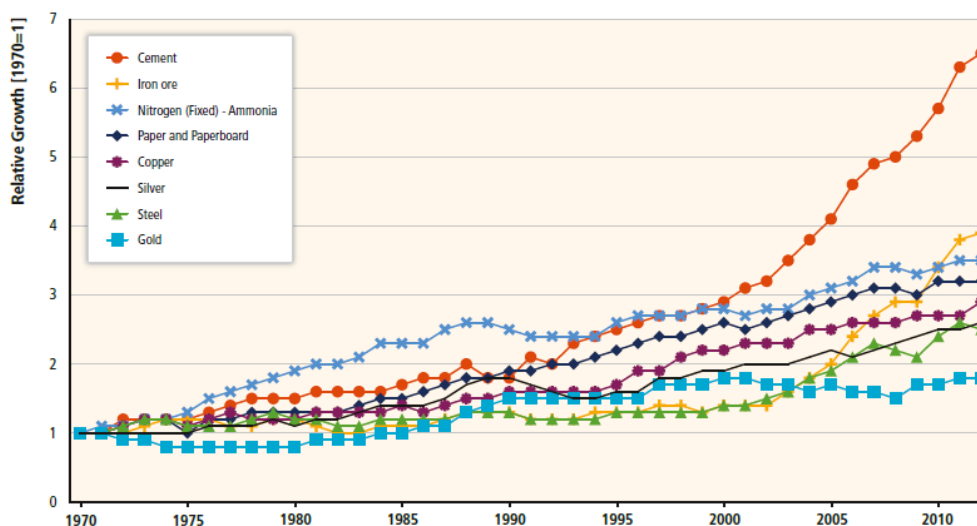


Figura 2 - Crescimento mundial dos principais minerais e produtos manufaturados (1970 = 1).

Fonte: Fishedick *et al.* (2014)

Diferentes tendências podem ser responsáveis por esse desenvolvimento. O aumento populacional e, conseqüentemente, o crescimento das cidades é uma delas (KRAUSMANN *et al.*, 2009). Grandes obras de infraestrutura exigirão grandes quantidades de concreto que, por sua vez, irão demandar aumento na produção do cimento. Sabendo-se que o concreto é o material de construção mais consumido no mundo e que não há um substituto que possa ser moldado em qualquer formato e projetado para qualquer resistência, mantendo os padrões de custos do concreto, é necessário que se busque maneiras para reduzir e mitigar as emissões produzidas, sobretudo, pela produção do cimento.

2.1.2. A mitigação das emissões de GEE

A fabricação de cimento possui duas principais fontes de emissões: a queima de combustível e as emissões de processo. As emissões de combustível podem ser reduzidas através de melhorias na eficiência energética e troca de combustível. Já as emissões de processo são inevitáveis e, portanto, podem ser reduzidas pela diminuição da demanda e por meio da

melhoria da eficiência do material através da substituição de cimento Portland comum por materiais alternativos (BOSOAGA *et al.*, 2009; MALHOTRA, 2010; MCLELLAN *et al.*, 2012; ISHAK & HASHIM, 2015).

No entanto, a mitigação das emissões de GEE na indústria de cimento está progredindo mais lentamente do que a taxa de crescimento da produção. De acordo com Kajaste & Hurme, (2016) diversas razões contribuem para isto:

- a) A vida útil média de uma fábrica de cimento é de 50 anos e a vida útil dos equipamentos-chave é geralmente superior a 20 anos;
- b) Novas usinas possuem altos custos de capital;
- c) Os sistemas de comércio de emissões têm baixos preços de CO₂;
- d) O mercado de cimento é dominado pelo preço; e
- e) A qualidade do cimento é estritamente padronizada e regulada.

Todos esses fatores juntos criam barreiras para mudar a composição do cimento, investindo em novas tecnologias de fornos, melhorando a eficiência energética e reduzindo o uso de eletricidade nas instalações de cimento. O preço da redução das emissões de CO₂ em um único nível de instalação precisa ser atraente o suficiente para superar essas barreiras.

Além disso, a maioria das melhorias para um uso mais eficiente de energia térmica requer um alto custo de investimento. Mesmo que melhorar as tecnologias de eficiência energética em toda a fábrica seja a forma mais econômica de beneficiar o meio ambiente, essas estratégias ainda afetam minimamente as metas de longo prazo. (ISHAK & HASHIM, 2015).

Como 90% das emissões da produção do cimento provém da produção do clínquer, é de grande concordância no meio científico que o maior potencial a curto prazo para reduzir as emissões provenientes da indústria cimentícia é substituindo-se parte do cimento por componentes minerais alternativos (KAJASTE & HURME 2016; BENHELAL *et al.*, 2012; BARCELO *et al.*, 2014). Para Kajaste & Hurme (2016) as melhores opções futuras em desenvolvimento são os cimentos de óxido de magnésio (MgO) e geopolímeros, diferentes tecnologias de oxi-combustão e captura de carbono.

Estes componentes minerais alternativos, chamados de materiais cimentícios suplementares (MCS), tem sido alvo de pesquisas no mundo inteiro por proporcionarem bons resultados ao desempenho do concreto. São, geralmente, ricos em silício (Si) e alumínio (Al) e proporcionam várias vantagens às estruturas de concreto. Do ponto de vista ecológico, além da

redução das emissões, recupera um subproduto industrial que seria descartado em aterros, reduz o teor de cimento Portland no concreto, resultando na diminuição da emissão de gases de efeito de estufa e diminuição da utilização de matérias-primas naturais (LIU & CHERN, 2008).

Considerando o ponto de vista da engenharia, auxiliam na redução da permeabilidade do concreto e, por consequência, redução da penetração agentes nocivos que ocasionam patologias diversas. Estes fatores, combinados ao aumento da resistência, também proporcionam aumento na durabilidade. Também são fatores positivos a redução da segregação, resistência ao congelamento, melhoramento do acabamento e facilidade de bombeamento (APRIANTI, 2017; TURNER & COLLINS, 2013).

Além dos benefícios ecológicos e de engenharia, é possível considerar uma terceira categoria: a econômica. O custo de produção do MCS é, geralmente, inferior ao do cimento quando este material é um subproduto industrial. Esse custo deve abranger a origem do MCS, seu transporte, processamento e a economia feita com taxas de depósito e custos de gerenciamento de aterros (FEDERICO & CHIDIAC, 2009). A substituição de uma parte do cimento pelo MCS é vantajosa quando o desempenho mecânico proporcionado é igual ou superior ao desempenho da matriz sem a incorporação do MCS.

Ainda sobre os benefícios econômicos, os custos das não-emissões também podem ser negociados no mercado internacional como créditos de carbono. No entanto, este mercado ainda não possui uma plataforma consolidada, podendo flutuar amplamente. Nos últimos anos, o valor da tonelada de CO₂ variou de US\$ 17 a US\$ 40 (FAIRBAIRN *et al.*, 2010).

Uma especulação otimista para o futuro prevê que uma tonelada de emissões terá um valor de negociação de cerca de US\$ 40 (MALHOTRA, 2010). Assim, por exemplo, se um país fizer a substituição de 20% de cimento por um MCS, este terá 20% de emissões não emitidas. Para efeito de cálculo, se a produção anual de cimento média de cimento no Brasil for de 50 milhões de toneladas e destes, 20% for substituído por MCS, significa que 10 milhões de toneladas deixariam de serem produzidas. Logo, essa não-emissão, teria um valor de US\$296.000.000,00 em créditos, se considerado que 1 ton de cimento produz, em média, 0,74 ton de CO₂-eq.

Além dos materiais amplamente estudados e comercializados como cinzas volantes, escória de alto forno e sílica ativa, há um grande potencial pozolânico em resíduos de outras indústrias que podem ser incorporados no concreto. Resíduos da agricultura como cinzas de

casca de arroz, cinza de palha de trigo e cinza de bagaço de cana de açúcar e cinza de casca de avelã, ricos em sílica, também podem ser utilizados como MCS (APRIVANTI, 2017).

O uso de resíduos como substituição parcial ou total do cimento Portland também contribui para resolver problemas de aterros sanitários, redução do custo dos materiais de construção, fornece uma solução satisfatória para as questões ambientais e problemas associados à gestão de resíduos, economiza energia e evita poluição (APRIVANTI, 2017). Um resíduo industrial com bastante potencial para ser utilizado como MCS é o resíduo de vidro.

2.2. Resíduo de vidro

O vidro é um material não-cristalino, não-biodegradável, mas 100% reciclável. Pode ser reciclado repetidamente sem que suas propriedades químicas sejam alteradas (SHAYAN & XU, 2004). A reciclagem do vidro economiza e reduz a demanda sobre recursos naturais adicionais e a emissão de gases de efeito estufa resultante de sua produção (CATTANEO, 2008). No entanto, a reciclagem só é possível quando o material é ‘puro’, ou seja, vidros diferentes não podem ser misturados, devido à composição química de cada tipo de vidro (MOHAJERANI *et al.*, 2017). Tradicionalmente, o vidro precisa ser coletado e classificado em cores diferentes. Apenas 5g de vidro não reciclável são suficientes para contaminar uma tonelada de vidro reciclável (AFSHINNIA & RANGARAJU, 2015).

O processo de reciclagem exige cautela, é oneroso e muitas vezes não é praticado. Desta forma, os vidros de pós-consumo acabam sendo descartados em aterros sanitários, onde se acumulam por milhares de anos. Com a finalidade de redirecionar o resíduo de vidro de ser enviado a aterros e minimizar o impacto da indústria da construção no meio ambiente, nos últimos 70 anos pesquisadores estudaram o uso de resíduos de vidro triturado em aplicações de construção (MOHAJERANI *et al.*, 2017).

2.3. A produção de resíduo de vidro no Polo Industrial de Manaus (PIM)

O Distrito Industrial de Manaus possui três principais fábricas de lapidação de vidro plano: Amazon Temper, Vidro Rios e Vitral. As placas de vidro são adquiridas e nas fábricas são feitos processos de têmpera, laminação, impressões, etc. Destes processos são gerados dois tipos de resíduos de vidros coloridos: os cacos e o pó. De acordo com informações fornecidas pelas fábricas, juntas, as três produzem 27 toneladas de cacos e 390 kg de pó por mês (Tabela

1). O descarte desses materiais é feito de duas maneiras. Ou o resíduo é destinado à reciclagem ou ao Aterro Municipal de Manaus.

Tabela 1 - Quantidade de resíduo de vidro gerado nas 3 principais fábricas de vidro do PIM

	Amazon Temper	Vitral	Vidro Rios
Cacos	5 ton/mês	18 ton/mês	4 ton/mês
Pó*	100kg/mês	90kg/mês	200 kg/mês

*A quantidade de pó relatada é referente ao resíduo + água retirado das câmaras de água. Os valores foram fornecidos pelas fábricas.

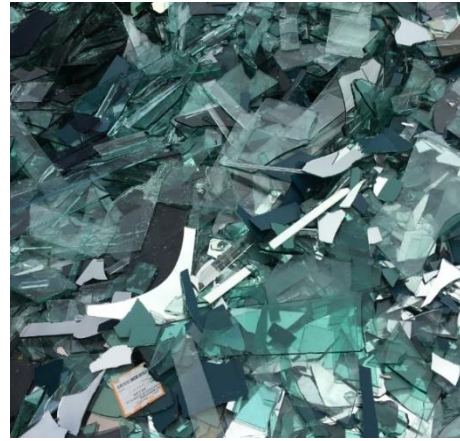
A Amazon Temper destina os cacos para reciclagem e o pó, que não pode ser reciclado, vai para o aterro. Como o Estado do Amazonas não possui reciclagem de vidro, os cacos são acumulados no pátio da fábrica (Figuras 3 e 4) até conter material suficiente para preencher um contêiner, o que leva mais ou menos 6 meses. Visualmente, há predominância de vidro verde (Figura 4 (b)). Este material é, então, enviado para a fábrica de produção do vidro, localizada em Goiânia, para que lá seja feita a reciclagem. Este processo custa para a Amazon Temper em torno de R\$10.000,00. Já os resíduos produzidos pelas duas outras fábricas são recolhidos e destinados ao Aterro Municipal de Manaus.



Figura 3 - Disposição de resíduo de vidro no pátio da empresa Amazon Temper



(a)



(b)

Figura 4 - Detalhe dos resíduos de vidro: a) Diferentes colorações de vidro; b) Predominância de vidro verde

O processo de corte e polimento de placas de vidro plano também gera resíduos na forma de pó. Para facilitar o processo e evitar que este pó fique em suspensão no ar e/ou seja inalado pelo operador da máquina, comumente utiliza-se água ao realizar-se o corte. O resíduo gerado, acumula-se nas câmaras de água localizadas na parte inferior das máquinas de corte e sedimenta-se (Figuras 5 e 6). Ao realizar o processo de limpeza das câmaras, esse resíduo é retirado e encaminhado ao Aterro Sanitário de Manaus.



(a)



(b)

Figura 5 - Sistema de corte do vidro: a) Câmaras de água; b) Máquina de corte de placas de vidro plano



(a)



(b)

Figura 6 - Resíduo de lapidação de vidros planos: a) Ainda molhado e em grumos; b) Fração de resíduo seco inteiro resultado da sedimentação no interior das câmaras

Segundo o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Manaus - PMGIRS (2015), os resíduos sólidos gerados em Manaus são encaminhados para o aterro municipal e recebem destinação e/ou tratamento distinto de acordo com seu tipo e origem. Os resíduos provenientes da coleta seletiva recebem outro tratamento. São encaminhados para galpões, onde passam por processo de triagem, beneficiamento e posterior comercialização no mercado local pelas associações/cooperativas de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis.

O Aterro Sanitário de Manaus possui uma curta vida útil remanescente. Considerando uma taxa de recebimento de 2.500 m³/dia e uma densidade dos resíduos de 0,9 ton/m³ e, considerando os recalques e adensamento dos resíduos, estima-se que ainda lhe restam 5 anos e 10 meses, contando de 2015 que é o ano da publicação do PMGIRS. Sendo assim, possui capacidade de operação até 2021 e logo precisará ser ampliado ou substituído por outro aterro, gerando degradação e impactos ambientais.

Sabendo-se, então, da grande produção de resíduos de vidro plano e que, ainda, no PIM há fábricas de bebidas com grande potencial de geração de resíduos (garrafas), é necessário que sejam propostas alternativas para a disposição destes resíduos. Manaus não possui empresas de reciclagem, logo todo o resíduo é encaminhado para o aterro, o qual está na iminência de atingir sua capacidade máxima. Uma alternativa para o descarte é a incorporação deste resíduo no concreto.

2.4. O resíduo de vidro como material cimentício suplementar

O resíduo de vidro (RV) tem sido amplamente utilizado em pesquisas com concretos e argamassas (MEYER & XI, 1999; JIN *et al.*, 2000; Dyer & Dhir, 2001; TOPÇU & CANBAS, 2004; METWALLY, 2007; MARAGHECHI *et al.*, 2012; ALI & AL-TERSAWY, 2012; PEREIRA-DE-OLIVEIRA *et al.*, 2012; SOUSA NETO, 2014; WANG *et al.*, 2014; AFSHINNIA & RANGARAJU, 2016; ALIABDO *et al.*, 2016; BARROS, 2016). Aliado à possibilidade de ser incorporado ao concreto e, assim, dar um melhor destino do ponto de vista ambiental a este material, o RV confere melhorias às propriedades do concreto. Dependendo do tamanho de suas partículas, atua como adição ou substituição parcial do agregado graúdo, agregado miúdo ou do cimento. No entanto, o tamanho das partículas influencia diretamente nas propriedades do concreto.

Como agregado graúdo ou miúdo, o RV não necessita passar por um processo extensivo e rigoroso de moagem, porém possui menos vantagens do que na forma de pó. No primeiro formato, é possível observar redução de propriedades diversas como a trabalhabilidade, dureza e a resistência à tração, compressão e flexão, conforme o aumento de teor de vidro na mistura (TOPÇU & CANBAS, 2004; AFSHINNIA & RANGARAJU, 2016).

Na condição de agregado miúdo a principal preocupação é a reação álcalis-sílica (RAS). Maiores expansões podem ser observadas com o RV com partículas variando entre 4,8mm a 1,2mm (JIN *et al.*, 2000; MARAGHECHI *et al.*, 2012; MEYER & XI, 1999). Além disso, apesar de apresentar uma melhoria na trabalhabilidade, a resistência à compressão, a resistência à tração, a resistência à flexão e o módulo estático de elasticidade são reduzidas (ALI & AL-TERSAWY, 2012). A permeabilidade é outra propriedade afetada pela substituição parcial de agregado miúdo.

Quando o resíduo de vidro é finamente moído (RVM) e aplicado como substituição parcial do cimento é possível não só suprimir as RAS, mas também obter melhor desempenho relacionado às propriedades mecânicas (AFSHINNIA & RANGARAJU, 2015). A moagem do vidro a um tamanho de partícula em escala micrométrica pode trazer grandes benefícios energéticos, ambientais e de custo quando o cimento é parcialmente substituído por vidro moído para a produção de concreto. Melhorias podem ser obtidas na resistência à tração e compressão, na diminuição da taxa de absorção de água e do índice de vazios conforme o aumento de teor de RVM (ALIABDO *et al.*, 2016).

2.4.1. Propriedades relacionadas ao desempenho mecânico

2.4.1.1. Comportamento pozolânico

Materiais pozolânicos são aqueles constituídos predominantemente de sílica ou sílica e alumínio que, por si só possui pouco ou nenhum valor cimentício, mas quando finamente moídos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes (NBR 12653, 2014; MALHOTRA & MEHTA, 1996). A reação pozolânica do vidro não só consome o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente no cimento para formar C-S-H, mas também reduz o nível de monossulfato. Os impactos da reação pozolânica sobre a solução dos poros são caracterizados por aumento das concentrações de alumínio, sulfato, sódio e silício e diminuição da concentração de cálcio (ZHENG, 2016).

O tamanho das partículas é de tal importância que, apenas quando finamente moída, a sílica pode se combinar com o Ca(OH)_2 , que é produzido pelo cimento Portland durante a hidratação, na presença de água para formar silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) estáveis com propriedades cimentícias (NEVILLE, 2016). Um material pozolânico deve também possuir um alto teor de sílica e uma área superficial grande o suficiente (METWALLY, 2007).

De acordo com a NBR 12653 (2014), quando adicionados a concretos, argamassas e pastas em proporções adequadas, os materiais pozolânicos proporcionam aumento da resistência à compressão e à flexão em idades avançadas, redução da porosidade e permeabilidade, aumento da resistência à sulfatação, aumento da resistência à difusibilidade de íons cloreto, mitigação da reação álcali-agregado, redução da ocorrência de eflorescências e aumento da resistividade elétrica. Sendo assim, os materiais com estas propriedades proporcionam ao concreto, não só melhorias nas propriedades mecânicas, como também na durabilidade.

As pozolanas podem ser em três classes, segundo a NBR 12653 (2014). A Classe N compreende pozolanas naturais e artificiais. O primeiro tipo é formado por materiais de origem vulcânica com a presença de mais de 65% de óxido de silício, ou de origem sedimentar, com atividade pozolânica. O segundo, são materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais, com atividade pozolânica. A Classe C compreende cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas e a classe E representa

qualquer material que apresente atividade pozolânica e que não esteja contemplado nas outras duas classes.

O RV na forma de pó, apresenta alto potencial pozolânico. Quanto à composição química, o óxido de maior percentual presente nos principais tipos de vidro é o SiO₂. Os vidros possuem, em geral, teores maiores do que 50% (CALLISTER, 2012). Isto ocorre devido ao fato de o principal componente na fabricação do vidro ser a areia, composta majoritariamente por dióxido de silício. Os vidros sodocálcicos, utilizados na fabricação do vidro plano, possuem teores de SiO₂ variando de 69 a 74% (Tabela 2). Desta forma, um dos requisitos químicos da norma NBR 12653 (2014) é atendido e pode ser confirmado através da execução de ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX).

Tabela 2 - Composição química dos vidros de silicato sodocálcico

Óxido	Teor (%)
Dióxido de silício (SiO ₂)	69 a 74
Óxido de cálcio (CaO)	5 a 12
Óxido de sódio (Na ₂ O)	12 a 16
Óxido de magnésio (MgO)	0 a 6
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	0 a 3

Fonte: NBR NM 294 (2004)

O comportamento pozolânico pode, ainda, ser avaliado em função da resistência à compressão. A norma americana ASTM C618 - 17a indica que para que um determinado material seja considerado pozolânico, o concreto ou argamassa contendo esse material deve possuir o índice de atividade de pozolânica superior a 75%, quando comparado ao concreto/argamassa de referência. A correspondente europeia EN 450-1 (2012) admite o mínimo de 75% aos 28 dias e 85% aos 90 dias. Já a norma brasileira NBR 12653 (2014) estabelece 90% como valor mínimo aos 28 dias para indicar presença de atividade pozolânica. No entanto este valor estipulado pela norma brasileira diz respeito a 25% de substituição parcial do cimento. Não é possível afirmar que este teor irá conferir o melhor desempenho em relação à mistura de referência para qualquer MCS testado. Portanto, é necessário testar diferentes teores para verificar tanto a eficiência quanto a atividade pozolânica.

2.4.1.2. Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto é geralmente a propriedade analisada para classificar o concreto qualitativamente, visto que está diretamente ligada à estrutura da pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 2016). A norma NBR 8953 (2015) classifica o concreto em dois grupos. O primeiro compreende aqueles com resistência à compressão de 20 a 50 MPa e o segundo 55MPa a 100MPa, sendo este último considerado alta resistência pela NBR 12655 (2015) e pelo Comitê 363 do American Concrete Institute (ACI 363.2R, 2011). Neville (2016) considera alta resistência valores acima de 80 MPa. O alto desempenho relacionado à resistência à compressão é definido em cinco classes por Aïtcin (2000). A Classe I compreende concretos de 50 a 75 MPa, a Classe II concretos de 75 a 100 MPa, a Classe III de 100 a 125 MPa, a Classe IV de 125 a 150 MPa e a Classe V, concretos com resistência superior a 150 MPa (Figura 7).

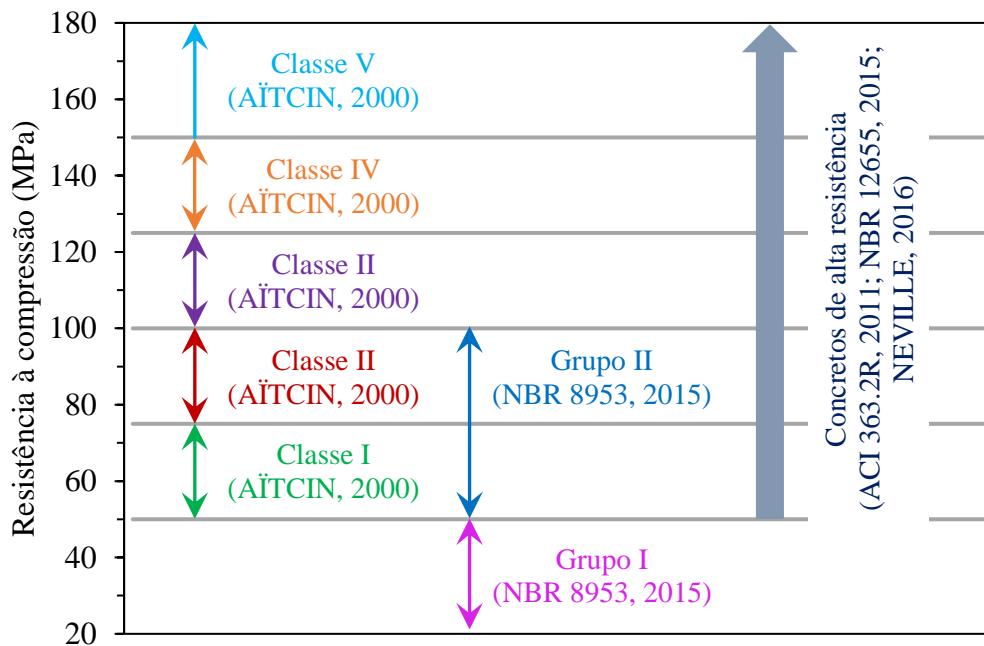


Figura 7 - Classificação de concreto para fins estruturais

Geralmente, a inclusão de resíduo de vidro como substituto do cimento em concreto e argamassa resulta em um aumento na resistência à compressão. Contudo, esse acréscimo depende do tamanho das partículas, do teor de substituição e do tipo de cimento utilizado. Tais fatores são detalhados nos itens a seguir.

i. A influência do tempo de cura

Devido à lenta taxa de reação pozolânica do RV, a substituição do cimento reduz a resistência nas primeiras idades. Nesse período, quanto maior for o percentual de substituição de cimento, menor será a resistência à compressão. Conforme progredido o tempo de cura, a sílica amorfa presente no RV se dissolve lentamente sob o ambiente alcalino e reage com Ca^{2+} para formar géis silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (DU & TAN, 2017). Assim, enquanto nas primeiras idades a resistência à compressão pode apresentar valores mais baixos, concretos em idades avançadas podem apresentar elevadas resistências, dependendo do teor de RV utilizado.

Concretos com teores de 15%, 30%, 45% e 60% de substituição parcial de cimento por RV com 75 μm de tamanho máximo foram motivo de estudo de Du & Tan (2017) em um período de 365 dias. Os concretos com RV apresentaram resistência à compressão inferior ao controle aos 7 dias. Aos 28 dias os concretos contendo 15%, 30% e 45% apresentaram resistência superior ao concreto com 60% de RV e ao de controle. Já aos 365 dias o melhor desempenho foi observado no concreto com 15% de RV, seguido pelo de 30%, 45% e 60%. Todos os teores superaram o concreto com a mistura controle nesta idade.

ii. A influência do tamanho das partículas

Em geral, quanto menor o tamanho das partículas, mais espaços são preenchidos, melhor é o empacotamento de partículas e, assim, maiores resistências à compressão são observadas. Shao *et al.* (2000) observaram que tamanhos menores de partícula de vidro levaram a maiores resistências, especialmente em idades posteriores. Foram investigados concretos com 30% de cinzas volantes, sílica ativa e RV proveniente de lâmpadas fluorescentes como substitutos parciais do cimento no concreto. Observou-se que o concreto contendo RV com partículas de 38 μm de tamanho máximo obteve desempenho superior às misturas contendo partículas de RV com tamanho máximo 75 μm e 150 μm nas idades 3, 7, 28 e 90 dias. Os autores atribuíram o desenvolvimento de resistência inicial do concreto contendo pó de vidro aos álcalis no concreto, atuando como um catalisador na formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Porém, somente aos 90 dias apresentou resistência superior à da mistura controle (sem qualquer MCS).

Em relação aos outros MCS, o concreto com RV a 38 μm mostrou-se mais resistente que o concreto composto com cinzas volantes, mas significativamente inferior ao concreto

composto por 30% de sílica ativa. Segundo os autores, o tamanho das partículas submicrométricas e o alto teor de SiO₂ na sílica ativa desempenharam um papel crítico no desenvolvimento da resistência. Sendo assim, é possível concluir que quanto menor o tamanho de partículas de RV utilizado, maior será o ganho de resistência, especialmente nas idades mais avançadas.

iii. A influência do teor de resíduo de vidro na mistura

Metwally (2007) observou que a resistência à compressão tende a ser maior em concretos com diferentes teores de RV de partículas de até 45 µm em comparação a concretos sem este material. No entanto, existe um teor ótimo de substituição onde, a partir desse ponto, a resistência diminui. Segundo o autor, isto significa que no teor ótimo o percentual de resíduo utilizado é suficiente para reagir com todo o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) liberado, produzido a partir do processo de hidratação do cimento para formar o composto cimentício. Qualquer valor excedente funciona apenas como um material de preenchimento e, portanto, menores resistências podem ser observadas devido à diminuição da quantidade de clínquer na mistura. O teor ótimo encontrado por Du & Tan (2017) foi de 15% de RV. Já para Islam *et al.* (2017), o valor ótimo foi de 20% a partir dos 28 dias.

iv. A influência da composição química do vidro

Diferentes tipos de vidro possuem composições químicas distintas. Pequenas quantidades de aditivos são frequentemente adicionadas durante a produção de vidros para adicionar cores diferentes ou para melhorar propriedades específicas (SHI & ZHENG, 2007). Bignozzi *et al.* (2015) estudaram o efeito da composição química do vidro na argamassa. Para este propósito, vidros provenientes de lâmpadas fluorescentes, funil de tubo de raios catódicos e itens de cristal e vidro de soda-e-cal foram utilizados como 25% de substituição de cimento. As composições químicas dos tipos de vidro utilizados (Tabela 3) são discrepantes, principalmente, com relação ao óxido de silício (SiO₂), óxido de cálcio (CaO), óxido de sódio (Na₂O) e óxido de chumbo (PbO).

O vidro moído foi utilizado com partículas de tamanho médio de 10 a 20 µm, para os vidros de funil, lâmpadas e cal e soda, e 25 µm para itens de cristal. Todos os tratamentos obtiveram resistência à compressão inferior à do controle (sem o RV) em todas as idades

estudadas (7, 28, 60 e 90 dias), com exceção da argamassa contendo 25% de funil de tubo de raios catódicos, que alcançou maior resistência à compressão do que o controle. O comportamento pozolânico é exibido principalmente pelas amostras com o resíduo de funil e de vidro de solda-e-cal, enquanto o resíduo de cristal possui uma atividade menor.

Tabela 3 - Composição química de diferentes tipos de vidro

Óxido	Cristal (%)	Lâmpada (%)	Funil (%)	Soda-e-cal (%)
SiO ₂	58,67	68,47	56,11	70,40
CaO	0,12	5,13	2,56	11,03
Na ₂ O	4,67	17,65	5,46	13,40
MgO	0,29	2,98	1,86	1,47
Al ₂ O ₃	0,02	2,26	3,02	2,06
PbO	27,43	0,79	18,34	<0,01
K ₂ O	7,21	1,61	10,01	1,21

Fonte: *Bignozzi et al. (2015)*

Dyer e Dhir (2001) substituíram parcialmente o cimento em concreto com vidro de soda-e-cal transparente, verde e âmbar. As argamassas contendo 10% de vidro transparente e vidro verde apresentaram resistências superiores ao controle aos 28 dias. Já as argamassas contendo 10% e 20% de vidro âmbar alcançaram resistências semelhantes ao controle. A taxa de ganho de resistência nas argamassas contendo RV é visivelmente maior entre 7 e 28 dias em comparação com o controle. Logo, apesar dos vidros utilizados serem do mesmo tipo (soda-e-cal), pequenas diferenças nas composições químicas dos vidros de cores distintas, podem influenciar nas reações químicas do ganho de resistência.

Tabela 4 - Composição química de vidros de soda-e-cal coloridos

Óxido	Vidro Transparente (%)	Vidro Marrom (%)	Vidro Verde (%)
Dióxido de silício (SiO ₂)	70,39	70,01	72,05
Óxido de cálcio (CaO)	6,43	10,00	10,26
Óxido de sódio (Na ₂ O)	16,66	15,35	14,31
Óxido de magnésio (MgO)	2,59	1,46	0,90
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	2,41	3,20	2,81

Fonte: *Dyer & Dhir (2011)*

2.4.1.3. Resistência à tração

Os principais fatores que influenciam a resistência à tração são o tipo e a granulometria do agregado graúdo e a aderência entre a pasta e os agregados (NEVILLE, 2016). Como a inclusão de um MCS influencia diretamente as propriedades da pasta, o principal parâmetro relevante é a aderência entre a matriz de cimento e os agregados. A reação pozolânica que ocorre entre o SiO_2 presente no RV e o Ca(OH)_2 , durante a hidratação do cimento, gera o silicato de cálcio hidratado. Este material adesivo denso pode influenciar na aderência entre pasta de cimento e agregados, resultando em um aumento na resistência à tração do concreto (METWALLY, 2007).

Desta forma, o comportamento do concreto com RV como material cimentício suplementar em relação à resistência à tração tende a se assemelhar ao comportamento em relação à resistência à compressão (METWALLY, 2007). O teor ótimo de substituição parcial encontrado nos ensaios de compressão também pode ser observado na resistência à tração. Para o autor, este teor é 10%.

2.4.2. Propriedades reológicas

2.4.2.1. Trabalhabilidade

Não há um consenso entre os autores sobre a trabalhabilidade de concretos com vidro. Em dosagens de concretos com adensamento convencional, as partículas de vidro finamente moídas, por possuírem elevada área superficial, podem provocar diminuição do abatimento e, conseqüentemente, na trabalhabilidade (METWALLY, 2007; BARROS, 2016). Wang *et al.* (2014) afirmam que a trabalhabilidade tende a diminuir com acréscimo do teor de RV como substituição parcial do agregado miúdo. Já para RV como substituição parcial do cimento, esta propriedade tende a aumentar conforme o aumento do teor de substituição de cimento pro RV.

Em concretos autoadensáveis com RV como substituição parcial do agregado miúdo, há aumento do *slump flow*, conforme o aumento do teor de substituição. Também se observa diminuição do tempo de escoamento pelo Funil-V e menores diferenças entre as alturas medidas na Caixa-L (ALI & TERSAWY, 2012). Quando o pó de vidro é utilizado em substituição ao cimento, melhorias na trabalhabilidade podem ser observadas para o mesmo tipo de concreto (REHMAN *et al.*, 2018).

Metwally (2007) encontrou redução da trabalhabilidade do concreto com a utilização de RV. Para partículas de pó e vidro de tamanho máximo de 45 μm , a trabalhabilidade é reduzida conforme aumenta-se o teor de substituição parcial de cimento. De acordo com o autor, essa diminuição deve-se à presença de partículas muito finas e à alta área superficial específica. Shao *et al.* (2000) também observaram redução da trabalhabilidade em concretos contendo RV em comparação a concretos contendo cinzas volantes e fumo de sílica.

Pereira-de-Oliveira *et al.* (2012), estudaram argamassas com substituições parciais de cimento por resíduo de vidro verde, âmbar e transparente variando de 10% a 40%, em massa, e em tamanhos de partículas variando entre 0 - 45 μm , 45 - 75 μm e 75 - 150 μm . Em nenhuma das combinações entre eles, foram observadas alterações na trabalhabilidade com relação à mistura de referência.

As divergências entre os valores encontrados podem, então, ser associadas às diferentes proporções de mistura de concreto utilizadas, às propriedades físicas dos constituintes do concreto e aos níveis de substituição investigados (LIEW *et al.*, 2017).

2.4.3. Propriedades associadas à durabilidade

A durabilidade de uma estrutura é preocupação constante de engenheiros do mundo todo. Espera-se dos mais diversos tipos de concretos que, além de possuírem resistências a esforços de tração e compressão de acordo com os limites estabelecidos em projeto, sejam capazes de resistir às solicitações às quais serão expostos durante sua vida útil. Estas solicitações dependem tanto de fatores extrínsecos aos concretos, tais como ação das intempéries, ataques químicos e abrasão, como de fatores intrínsecos, como tipo de cimento, relação água/cimento, adições, aditivos e outros (HELENE & TUTIKIAN, 2011).

De um modo geral, a durabilidade do concreto está diretamente ligada à escolha de materiais cimentícios, aditivos apropriados e à boa ou ótima execução de projeto (NEVILLE, 2001). Através de mistura, transporte, colocação, compactação, acabamento, até a cura, pois será a pasta de cimento endurecida que irá permitir, ou não, a penetração de agentes nocivos (NEVILLE, 2001, OKAMURA & OUCHI, 2003). Desta forma, a baixa permeabilidade do concreto é crucial para minimizar ações químicas deletérias.

O impacto ambiental da indústria de concreto pode ser reduzido através da produtividade dos recursos, conservando materiais e energia para a produção de concreto e melhorando a durabilidade dos produtos de concreto. (MEHTA, 2001).

2.4.3.1. Reações álcalis-sílica

Uma grande preocupação em relação ao uso do vidro no concreto é a reação química que ocorre entre as partículas de vidro, ricas em sílica, e os álcalis na solução dos poros do concreto (SHAYAN & XU, 2004). As reações álcalis-sílica (RAS) são reações químicas deletérias que ocorrem entre a sílica reativa de um agregado e os álcalis presentes na pasta de cimento. A reação se inicia com o ataque de materiais silicosos dos agregados pelos hidróxidos alcalinos (Na_2O e K_2O) da água dos poros, derivados nos álcalis no cimento. Como resultado, forma-se nos poros dos agregados ou na superfície das partículas um gel expansivo que pode causar fissuração superficial e desagregação da pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 2016). A fissuração e a desagregação podem facilitar o ingresso de agentes nocivos que causam as patologias do concreto que, por sua vez, danificam sua resistência e durabilidade a longo prazo.

Para minimizar seus efeitos, alguns cuidados devem ser tomados ao produzir-se um concreto. Neville (2016) descreve três medidas preventivas: evitar o uso de agregados reativos, limitar o teor total de álcalis do cimento e utilizar materiais pozolânicos na mistura que sejam capazes de consumir o hidróxido de cálcio. Além destas, outro fator importante é a permeabilidade da pasta de cimento hidratada. Quanto mais porosa for a pasta, maior é a movimentação de água, de vários íons e do gel de sílica, facilitando a ocorrência das RAS.

As reações álcalis-sílica são quantificadas pela NBR 15577-1 (2018) em função do percentual de variações dimensionais causadas pelas expansões. Um agregado potencialmente inócuo apresenta expansões inferiores a 0,19% aos 30 dias de ensaio. A partir deste valor o agregado é considerado potencialmente reativo e medidas devem ser tomadas para minimizar as expansões. A intensidade destas medidas preventivas é função do risco associado à sua ocorrência. Para isto, é recomendado a utilização de materiais inibidores como cimentos pozolânicos e materiais cimentícios suplementares como a sílica ativa, metacaulim, entre outros.

Os materiais pozolânicos, ricos em SiO_2 e com tamanhos de partículas muito menores que o tamanho crítico, atuam como supressores das RAS. Porém, para que esta afirmação seja

verdadeira, as seguintes considerações devem ser obedecidas: i) quanto mais finas forem as partículas, melhor para a mitigação; ii) as misturas devem possuir teor de CaO inferiores a 10%, caso contrário podem atuar como promotores de RAS; iii) a substituição de aproximadamente 10% ou 15 - 30% do cimento Portland comum por sílica ativa ou cinzas volantes de baixo teor de CaO (< 2%), respectivamente, mitigam a RAS (MALVAR *et al.*, 2002; OBLA *et al.*, 2003).

Quando um MCS é utilizado como substituição parcial do cimento, o teor de álcalis no ligante pode ser maior do que o aquele presente em uma mistura sem a presença do MCS. Uma vez que os álcalis são liberados, eles podem ser i) dissolvidos dentro da solução dos poros; ii) ligado pelos produtos de hidratação ou iii) incorporado em sílica gel alcalina (A-S-H) com características expansivas (BIGNOZZI *et al.*, 2015).

Geralmente, as reações álcalis-sílica estão presentes em concretos com agregados de maiores diâmetros. No caso do vidro, quando é utilizado como substituição ao agregado miúdo, estas reações se fazem bastante presentes. No entanto, quando o vidro é finamente moído e é empregado como substituição parcial ao cimento, as expansões provocadas pelas RAS tendem a estabilizarem e até mitigar este efeito (CARPENTER & CRAMER, 1999, ZHENG, 2016). Além do tamanho das partículas de RV, as RAS podem ser influenciadas pela cor (composição química), teor e tipo de vidro utilizado na mistura.

i. A influência do tamanho das partículas de resíduo de vidro

O tamanho de partícula do RV tem uma grande influência, sobretudo, nas reações álcalis-sílica (RAS). Uma vez que a RAS é claramente um fenômeno dependente da área superficial, seria de se esperar que a expansão associada à RAS aumentasse conforme a diminuição do tamanho das partículas do agregado. No entanto, existe um tamanho do agregado em que ocorrem as máximas expansões. Meyer & Xi (1999) denominaram esta faixa granulométrica como “tamanho crítico”, onde as partículas de vidro comum de cal-e-soda estão compreendidas entre 1.200 µm e 600 µm. Maraghechi *et al.* (2012) e Jin *et al.* (2000) relatam que o “tamanho crítico” compreende partículas de 4,8mm a 1,2mm.

Isto significa que a expansão das RAS aumenta com o aumento da finura das partículas de vidro até um certo ponto e depois diminui. Para um agregado mais fino do que 600 µm, outros processos que dependem da área superficial tornam-se predominantes e a expansão diminui com maior finura (MEYER & XI, 1999).

Shi *et al.* (2005) observaram propriedades pozolânicas em tamanhos de partícula abaixo de aproximadamente 300 μm e abaixo de 100 μm . Em termos de área superficial específica, a EFNARC (2002) recomenda que as partículas de vidro devem ter área superior a 2.500 cm^2/g . Tamanhos de partículas maiores podem causar reação álcali-sílica.

Shao *et al.* (2000), observaram que as expansões diminuem conforme reduz-se o tamanho das partículas de vidro utilizadas como 30% de substituição parcial ao cimento. Concretos com partículas de vidro de 38 μm apresentaram expansões inferiores a concretos com 75 μm , 150 μm e sem qualquer MCS (controle). Contudo, em relação a outros MCS, as misturas contendo vidro apresentaram maiores expansões do que as misturas contendo cinzas volantes e sílica ativa, respectivamente, em igual teor de substituição parcial.

ii. A influência da composição química do vidro

Vidros do mesmo tipo, porém com cores diferentes, como o vidro de soda-e-cal possuem pequenas alterações em sua composição química que influenciam na RAS. Meyer & Xi (1999) afirmam que o vidro transparente como agregado causa maiores expansões, seguido pelo âmbar, enquanto o vidro verde não causa reações. Já Dyer & Dhir (2001), ao estudarem o RV com partículas menores que 600 μm como substituição parcial do cimento, observaram influência da composição química e do teor de vidro das expansões. Conforme aumenta-se o teor de RV, menores foram as expansões observadas.

As amostras contendo vidro transparente apresentaram as maiores expansões, em relação às amostras contendo vidros verde e âmbar. Dentre eles, o vidro verde apresentou melhor desempenho na mitigação das expansões em relação aos demais. Estes resultados podem estar associados ao teor de álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658.\text{K}_2\text{O}$) presentes em cada tipo de vidro. No vidro transparente estudado pelos autores, o teor de álcalis (16,81%) é superior ao do vidro âmbar (15,89%) e do vidro verde (14,65%). Isso significa que o vidro finamente moído tem potencial para ser um supressor de RAS, porém o teor de álcalis presente no RV pode ser um fator de grande influência nas RAS. Esse fato também foi observado por Pereira-de-Oliveira *et al.* (2012). É possível que sua eficácia esteja relacionada à quantidade de óxido de cromo (Cr_2O_3) que é adicionada ao vidro quanto à cor (MEYER & XI, 1999; DYER & DHIR, 2001).

Zheng (2016) estudou o comportamento das RAS em barras de argamassa contendo vidro de cores misturadas. O RV foi moído e separado em uma fração mais fina com partículas de tamanho $< 50 \mu\text{m}$ e uma fração mais grossa com partículas entre 125 μm e 200 μm . Com

estas duas frações foram preparadas misturas com as seguintes proporções: 40% de vidro verde, 30% de vidro âmbar e 30% de vidro transparente. Para avaliar as RAS, foram moldadas duas séries de barras de argamassa. Uma com 30% desta mistura e um quartzo reativo e outra com 30% da mistura e um quartzo muito reativo. Os resultados do teste de expansão em barras de argamassa foram influenciados diretamente pelo tipo de agregado utilizado. Quando se utiliza um agregado muito reativo, as expansões observadas são muito maiores do que aquelas causadas por um agregado menos reativo.

Além da composição química, o efeito mitigatório da RAS é devido ao aumento da concentração de alumínio na solução de poros, o que reduz a dissolução da sílica reativa, controlando a RAS (ZHENG, 2016). Sistemas contendo materiais cimentícios suplementares ricos em alumina têm maiores teores de alumínio em suas soluções de poros. Quando agregados reativos são expostos em soluções alcalinas com diferentes concentrações de alumínio, a presença deste reduz claramente a quantidade de reação nos agregados (CHAPPEX & SCRIVENER, 2012). Então, além do teor de óxido de silício, tem mais chances de diminuir as RAS, o vidro com maior teor de óxido de alumínio.

iii. A influência do teor de vidro

Quando em pó, o teor de RV influencia positivamente nas RAS. Quanto maior a substituição parcial de cimento, maior será a redução das RAS (AFSHINNIA & RANGARAJU, 2015). Shayan & Xu (2004) obtiveram redução das RAS conforme o aumento de teor de RV nas misturas. Foram testadas misturas com 5%, 10%, 20%, 30% e 40% de substituição parcial de cimento por RV. Foi evidenciado que a partir de 20% de RV, as expansões são menores que 0,1% aos 35 dias de cura agressiva. Já para 5% e 10% de RV as expansões foram superiores a 0,3% na mesma idade.

Os testes de expansão acelerada realizados por Metwally (2007), mostraram que não só o RV com partículas de tamanho inferior a 45 μ m não é um material reativo, como também influencia na redução das expansões em comparação com a mistura de controle. Conforme o aumento de teor de substituição parcial utilizado, maiores foram as reduções observadas. Segundo o autor, isso está relacionado à redução direta do álcali disponível, pois a cal (Ca(OH)₂) liberada do processo de hidratação do cimento foi consumida pela reação com o RV e uma diminuição na alcalinidade do sistema é esperada.

iv. A influência do tipo de vidro

Ao estudarem a substituição parcial de cimento por resíduos de tipos de vidro diferentes, Bignozzi *et al.* (2015) puderam concluir que as reações pozolânica e álcali-sílica estão estritamente relacionadas à composição química do vidro. Os formadores ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$), estabilizadores ($\text{CaO} + \text{MgO}$) e modificadores ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} + \text{PbO}$) de vidro regulam a dissolução do vidro no ambiente alcalino durante a hidratação do cimento e, como consequência, influenciam diretamente nessas reações.

Para ampliar as possibilidades de reutilizar tipos diferentes de vidros descartados, os autores estudaram o efeito da composição química do vidro na matriz cimentícia. Para este propósito, vidros provenientes de lâmpadas fluorescentes, funil de tubo de raios catódicos, vidro proveniente de itens de cristal e vidro de cal e soda foram utilizados como 25% de substituição de cimento, em partículas de tamanho médio de 10 a 20 μm .

Com exceção do vidro de cal e soda, os demais materiais apresentam óxido de chumbo (PbO) em sua composição. Esse óxido é considerado como metal pesado e necessita cuidados especiais para poder ser descartado. O teor de PbO em cada material foi quantificado em 0,8%, 18,0% e 27,0%, em peso, para os vidros provenientes de lâmpadas fluorescentes, funil de tubo de raios catódicos e peças de cristal, respectivamente.

Nessas condições, as expansões provocadas pelas reações álcalis-agregados foram maiores nas amostras contendo RV do que na amostra de referência (sem adição de vidro). No entanto, com exceção da amostra contendo vidro de cristal, até os 14 dias de teste todas as expansões foram inferiores a 0,1%.

O vidro de cristal possui alto teor de modificadores de vidro e baixa quantidade de formadores e estabilizadores de vidro. Por este motivo possui maior influência no aumento das expansões ocasionadas pelas RAS. Já o vidro de funil, por possuir um aumento de estabilizadores de vidro combinado com uma ligeira redução de modificadores, gera um ambiente adequado para reação pozolânica, reduzindo fortemente a formação de produtos expansivos (BIGNOZZI *et al.*, 2015).

2.4.3.2. Absorção de água

Absorção é um processo pelo qual um líquido é conduzido e tende a preencher os poros permeáveis em um corpo sólido poroso (NBR 9778, 2005). A penetração de água no concreto desempenha um papel importante de difusão de vários mecanismos de deterioração. A água

está envolvida em quase todas as formas de deterioração e a permeabilidade do material à água geralmente determina a taxa de deterioração (MEHTA & MONTEIRO, 2006). Sendo assim, a durabilidade do concreto está diretamente ligada à facilidade com que fluidos, sejam líquidos ou gases, podem penetrar e se movimentar em seu interior (NEVILLE, 2016).

De acordo com a ASTM C1585 - 13, a absorção de água de uma superfície de concreto depende de muitos fatores, incluindo: (a) proporções de mistura de concreto; b) A presença de aditivos químicos e de materiais cimentícios suplementares; c) A composição e características físicas do componente cimentício e dos agregados; (d) o teor de ar arrastado; (e) o tipo e duração da cura; (f) o grau de hidratação ou idade; (g) a presença de microfissuras; (h) a presença de tratamentos superficiais, tais como selantes ou óleo de forma; e (i) método de colocação, incluindo consolidação e acabamento. A absorção de água também é fortemente afetada pela condição de umidade do concreto no momento do teste.

A utilização de MCS com partículas de tamanhos inferiores às do cimento tendem a formar uma matriz mais densa que a do concreto comum, dificultando o ingresso de agentes deletérios. Os resíduos de vidro finamente moídos, através de reações pozolânicas, provocam melhorias através do refinamento do tamanho do poro, bloqueio parcial dos poros capilares contínuos e redução do volume de poros na estrutura porosa da pasta de cimento hidratada (NASSAR & SOROUSHIAN, 2011).

Taha & Nounu (2008) observaram redução da absorção de água em concretos com substituição parcial e total do agregado miúdo por partículas de vidro de mesmas dimensões. Já para concretos onde, além da substituição do agregado miúdo, houve substituição de 20% de cimento por RV com partículas de tamanho inferior a 45 μm , foi observado um aumento na absorção de água.

Nassar & Soroushian (2011), observaram um aumento na resistência do concreto à absorção de umidade e ao transporte de íons nocivos. Amostras de concretos contendo substituições parciais de cimento por vidro moído ($D_{50} = 25\mu\text{m}$) em 15%, 20% e 23%, resultaram em melhores características de durabilidade. A resistência à abrasão e a resistência à compressão a longo prazo do concreto também se beneficiam da substituição parcial do cimento pelo vidro moído, desde que não seja excedido 20% de substituição em peso.

O tamanho das partículas de RV também influencia na capacidade de absorção de água do concreto. Mirzahosseini & Riding (2015) testaram a absorção por capilaridade de concretos contendo substituição parcial de cimento por RV na cor verde com partículas de tamanhos 63

a 75 μm , 25 a 38 μm e 0 a 25 μm . As amostras contendo partículas de vidro de 0 a 25 μm mostraram uma redução de absorção muito maior do que as outras duas faixas de tamanho devido à maior tendência de participar da reação pozolânica e criar mais produtos de hidratação. Isto pode ser atribuído ao efeito de micro preenchimento no qual os vazios entre os grãos de cimento são preenchidos por partículas de vidro de menor tamanho.

3. DOSAGEM DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL DE ALTO DESEMPENHO

Um estudo de dosagem de concreto é primordial para a maioria dos trabalhos de pesquisa experimental (HELENE & TUTIKIAN, 2011). Há diversas metodologias para se produzir concretos com características específicas. Uma criteriosa seleção de materiais em proporções ótimas é necessária para proporcionar as propriedades requeridas tanto do estado fresco quanto no endurecido de um concreto autoadensável de alto desempenho (CAAD).

Diferentemente dos Estados Unidos e da Europa, o Brasil não possui uma metodologia de dosagem de concretos normatizada. Também não há um consenso sobre dosagem para concretos especiais como o concreto autoadensável de alto desempenho. Desta forma, há inúmeras metodologias propostas por diversos autores, cada uma baseada em parâmetros de projeto específicos. Shi *et al.* (2015) dividem as metodologias para formulação de concreto autoadensável, que também serve para outros tipos, em cinco categorias diferentes com base em seus princípios.

A primeira categoria compreende as metodologias empíricas. As estimativas das proporções de mistura para as propriedades requeridas são realizadas por tentativas, através de várias misturas experimentais e ajustes. Estas metodologias são relativamente simples, porém são necessários testes laboratoriais intensivos para proporcionar uma mistura satisfatória com os materiais disponíveis. Além disso, qualquer mudança nos ingredientes do concreto precisará de uma nova bateria de testes e ajustes. Este processo requer disponibilidade de bastante material e tempo.

A segunda categoria compreende as metodologias baseadas na resistência à compressão. Este tipo de método determina a quantidade de cimento, aditivos minerais, água e agregados baseados na resistência à compressão requerida e apresenta um procedimento claro e preciso para obter quantidades específicas de ingredientes, minimizando a necessidade de misturas experimentais. Pode, ainda, levar em consideração a granulometria dos agregados e a contribuição dos materiais pozzolânicos para o desenvolvimento da resistência. No entanto, requer ajustes em todos os ingredientes para alcançar uma proporção ótima de mistura.

A terceira categoria diz respeito às metodologias baseadas no empacotamento de partículas. Esse tipo de método de dosagem determina as proporções de vazios entre os constituintes da mistura. Primeiro empacotam-se os agregados e depois o(s) material(is) cimentante(s) para preencher os vazios entre os agregados. É necessário que sejam tomadas as

devidas precauções para que a otimização do esqueleto granular não resulte em um teor de pasta muito baixo. Este fator pode causar um aumento da segregação.

A quarta categoria compreende as metodologias baseadas em um modelo fatorial estatístico. Neste grupo são testados os efeitos de vários parâmetros na trabalhabilidade e resistência à compressão do concreto fresco e endurecido. Geralmente têm como base uma dosagem de concreto convencional consolidada como o método americano do *American Concrete Institute* (ACI 211) ou a metodologia brasileira da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e diferentes parâmetros são variados como quantidade de cimento, razão água/cimento, teor de argamassa, teor de agregado graúdo, dosagem de superplastificante, etc. Este método pode simplificar o processo necessário para otimizar uma dada mistura, reduzindo o número de testes experimentais. No entanto, o estabelecimento das relações estatísticas requer testes laboratoriais intensivos sobre as matérias-primas disponíveis.

A quinta e última categoria envolve as metodologias baseadas na reologia. Neste método a reologia da pasta de cimento é a parte mais importante a ser dosada, pois controla a resistência à segregação e trabalhabilidade do concreto fresco. O modelo de reologia de pasta pode reduzir a extensão do trabalho de laboratório e dos materiais utilizados e fornecer a base para o controle de qualidade e o desenvolvimento de novas misturas minerais e químicas.

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi escolhida a metodologia proposta por Le *et al.* (2015). Por relacionar graduação de agregados, teor adequado de pasta e relação água/material cimentante com a resistência à compressão desejada, considerando a eficiência de materiais pozolânicos, pode ser enquadrada no segundo, no terceiro e no quinto descritos por Shi *et al.* (2015).

3.1. Método Le *et al.* (2015) adaptado

Utilizar uma metodologia de dosagem adequada é de fundamental importância quando se busca atingir as propriedades de um CAAD. O método proposto por Le *et al.* (2015) busca atender às necessidades tanto do estado fluido quanto do estado endurecido utilizando-se não só de teorias como o empacotamento de partículas de Funk & Dinger (1994), como de fatores de eficiência de um ou mais materiais cimentícios suplementares para expressar o efeito destes na resistência à compressão do concreto.

Esse método foi desenvolvido com base no fator de eficiência cimentante das adições minerais proposto por Wong & Abdul Razak (2005) e tem como importante fase preliminar a

avaliação da eficiência das adições minerais a serem utilizadas. Em seguida, a dosagem ocorre em duas fases: agregado e pasta. Neste trabalho, a metodologia de dosagem proposta por Le *et al.* (2015) foi adaptada, principalmente, com o objetivo de proporcionar uma combinação de agregados com menor teor de vazios e, assim, melhor empacotamento de partículas (Figura 8). Esta será descrita a seguir em três partes: a primeira tratando da avaliação da eficiência das adições, a segunda do cálculo da dosagem e a terceira, dos testes nos estados fresco e endurecido.

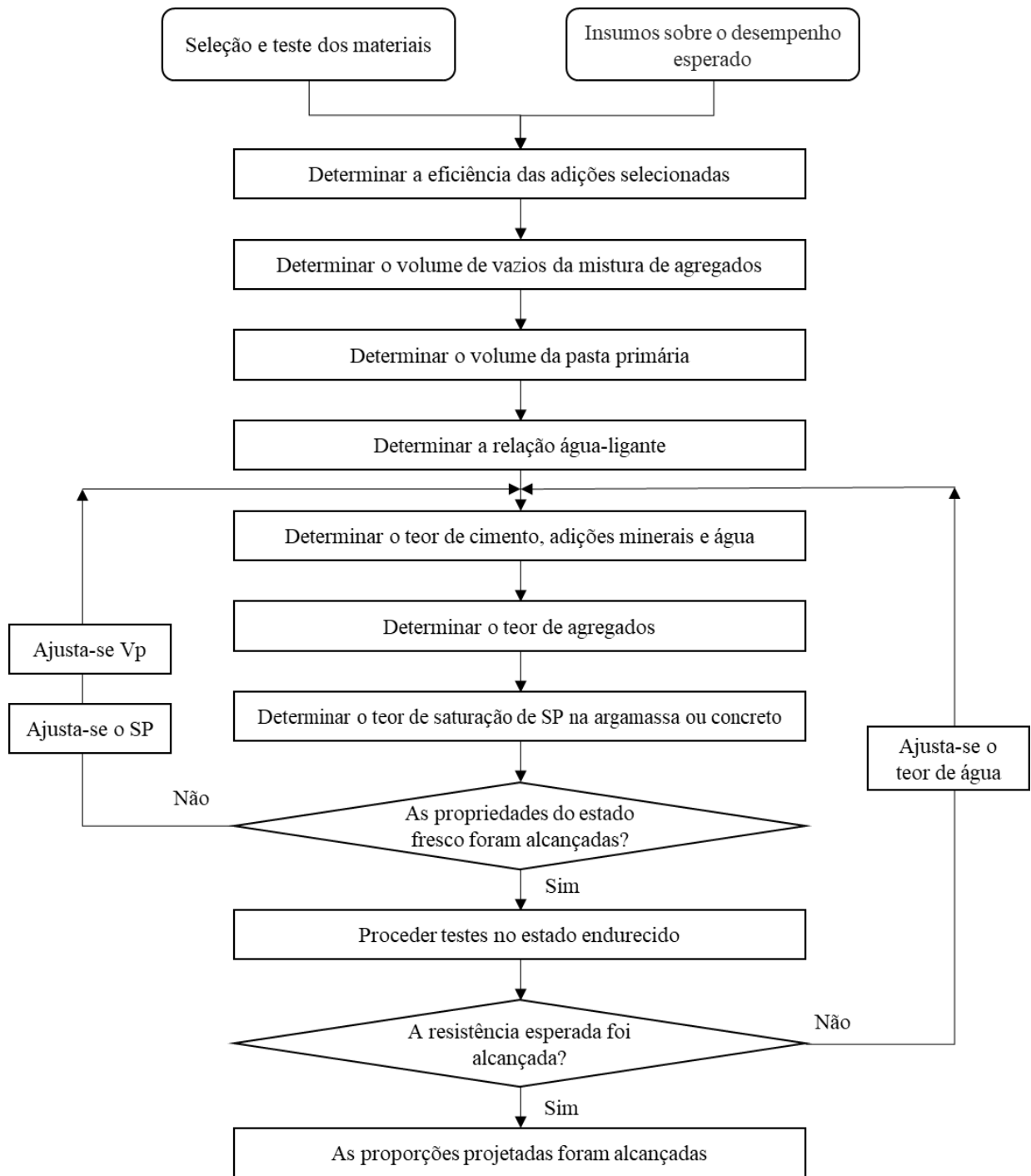


Figura 8 - Fluxograma da metodologia de dosagem

Fonte: Adaptado de Le *et al.*, (2015)

3.1.1. Parte 1: Fase preliminar

Pode-se dizer que a fase preliminar é composta de duas partes: a seleção dos materiais e a avaliação das adições a serem utilizadas para a otimização do traço.

3.1.1.1. Seleção dos materiais constituintes

A seleção dos materiais é uma importante fase inicial para a concepção do CAAD. O desempenho e a qualidade de cada ingrediente tornam-se cruciais à medida que a resistência almejada aumenta (AÏTCIN, 2000). Cada material deve ser escolhido de forma a proporcionar as propriedades requeridas: alta resistência à compressão, fluidez, resistência à segregação, durabilidade; além de outros requisitos importantes como a redução do custo e a redução de impactos ambientais.

a) Cimento

Para o CAAD, o cimento deve atender a duas exigências: que proporcione melhor desempenho em termos de resistência e que seja compatível com o aditivo superplastificante. As características reológicas deste tipo de concreto estão diretamente relacionadas com a quantidade de álcalis presentes no cimento (AÏTCIN, 2000). Por isso, deve-se dar preferência para cimentos com tão pouco aluminato tricálcico (C_3A) quanto possível e com baixo módulo de finura. Quanto maior for a superfícies específica do cimento, maior a quantidade de partículas em contato com a água e maior a coesão da mistura (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2015).

b) Agregados

O tamanho dos agregados influencia diretamente nas propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido. Ao aumentar-se o tamanho máximo do agregado graúdo, é possível observar redução da fluidez e a capacidade de passagem no estado fluido. Gómes e Maestro (2005) recomendam que a dimensão máxima do agregado graúdo esteja compreendida entre 12,5 e 19 mm. Dimensões superiores a 19 mm podem comprometer a capacidade do concreto fluir entre a armadura. Khaleel *et al.* (2011) observaram maior fluidez, capacidade de

passagem e ganho de resistência em misturas de CAA com agregados com tamanho máximo de 10 mm.

Além disso, maiores resistências à compressão são observadas em concretos conforme é reduzido o tamanho máximo do agregado graúdo utilizado. Se comparado com o concreto comum, as dimensões máximas dos agregados graúdos devem ser menores conforme aumentasse a resistência à compressão desejada. Para concretos de até 75 MPa, Aïtcin (2000) recomenda que a dimensão máxima do agregado graúdo esteja em torno de 20 a 28 mm. Para concretos de resistência entre 75 e 100 MPa, 10 a 20 mm são dimensões máximas adotadas. Já para concretos de altíssima resistência (125 MPa), a máxima dimensão estabelecida é de 10 a 14 mm.

A distribuição granulométrica dos agregados influencia também o empacotamento dos grãos da mistura (DE LARRARD & SEDRAN, 2002). Agregados menores favorecem o empacotamento de partículas e, assim, a redução dos vazios (KOEHLER & FOWLER, 2007). Esta, por sua vez, ocasiona um concreto de maior densidade e, como consequência, com maior resistência à compressão.

Ressalvas quanto à forma também são feitas: agregados cúbicos e esféricos são preferíveis a lamelares. Koehler & Fowler (2007) afirmam que qualquer aumento na angulação de agregados miúdos e redução na equidimensionalidade resultaram no aumento do índice de vazios compactados e do atrito interpartículas. Isso pode provocar um aumento da demanda de aditivo superplastificante, viscosidade plástica e bloqueio da capacidade de passagem. Já para agregados graúdos, os autores afirmam que características de forma e angularidade são altamente influentes na habilidade de passagem.

Quanto à natureza dos agregados, para os agregados miúdos, são mais indicadas as areias naturais (depósitos eólicos e de beira de rio) por possuírem melhor composição granulométrica (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2015).

c) Materiais cimentícios suplementares

Tanto para a obtenção das propriedades do CAA quanto para CAD é comum o uso de MCS para o aumento da coesão da mistura e evitar segregação. Estes materiais devem possuir área superficial maiores do que o componente que estão substituindo e podem ser quimicamente ativos, como é o caso das pozolanas, ou sem atividade química (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2015).

d) Dispersantes

A utilização de aditivos superplastificantes e/ou modificadores de viscosidade é obrigatória para obtenção da fluidez necessária utilizando um baixo teor água/cimento do CAAD. Kostrzanowska-Siedlarz & Gołaszewski (2015) afirmam que um modificador de viscosidade é necessário também para evitar a aglomeração de agregados do concreto no estado fresco. Apesar dos vários tipos de aditivos presentes no mercado, o mais comumente utilizado devido ao seu desempenho é o aditivo superplastificante a base de policarboxilatos (SAFIUDDIN, 2008; ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK, 2015). Como o superplastificante atua na dispersão das moléculas do cimento (AİTCIN, 2000), a escolha por um determinado tipo de superplastificante deve ser feita mediante a testes de compatibilidade entre este e o cimento.

e) Água

As recomendações para a água de amassamento do CAAD são apenas duas: primeiro que se enquadre na norma NBR 15900-1 (2009) e segundo que seu teor em relação ao cimento seja tão baixo quanto possível. Para evitar uma estrutura demasiadamente porosa, é recomendável que o teor de água na mistura seja tão baixo quanto possível e não ultrapasse 200kg/m³. Para Neville & Aİtcin (1998), a relação de água/material cimentante deve ser inferior a 0,35 para que se obtenha elevada resistência.

3.1.1.2. Avaliação da eficiência das adições

Antes do cálculo da dosagem pelo método proposto, deve-se analisar a eficiência dos materiais cimentícios suplementares (MCS) que se pretende utilizar para a obtenção do CAAD. Este estudo é relativamente simples e pode ser obtido pela relação entre o valor da resistência à compressão do concreto ou argamassa contendo determinada porcentagem de substituição de cimento pelo material que se pretende utilizar e a correspondente mistura de controle onde não há MCS.

A eficiência é uma importante propriedade a ser determinada, pois é possível verificar quais teores de substituição de cimento proporcionam um desempenho equivalente ou superior ao concreto de referência, ou seja, sem MCS.

Considerando que as misturas controle e com substituição parcial do cimento por adições possuam as mesmas proporções de materiais, a mesma relação a/c, foram curadas durante o mesmo tempo, nas mesmas condições e foram testadas pelo mesmo método, Wong & Abdul Razak (2005) propuseram o cálculo da eficiência (k) pela Equação 1, onde: S_p é a resistência aos 28 dias da mistura com adição, S_c é a resistência da mistura controle e P é o teor de substituição do MCS na mistura.

$$k = 1 + \frac{\left(\frac{S_p}{S_c}\right) - 1}{P} \quad (1)$$

Segundo os autores, se o valor de k for igual a 1, significa dizer que o teor de substituição de cimento pela adição mineral é equivalente à mistura controle e, portanto, não há ganhos e nem perdas na resistência. Isso indica que as duas misturas analisadas tem a mesma eficiência e que uma parte do MCS substitui uma parte do cimento sem mudanças na resistência. Este é um fator que influencia positivamente quando o objetivo é a redução de custo e do impacto ambiental causado pelo cimento, por exemplo.

Já para um valor de k maior que 1, o teor empregado de substituição parcial do cimento pela adição mineral gera resultados mais satisfatórios do que a mistura controle e, portanto, é mais eficiente. Por outro lado, se o valor obtido de k for inferior à unidade, o teor de substituição empregado é menos eficiente que a mistura de controle em termos de contribuição de resistência (WONG & ABDUL RAZAK, 2005).

Para a validação do método proposto, Le *et al.* (2015) realizaram os testes desta fase preliminar em corpos-de-prova de argamassa nas proporções 1:3:0,5. Esta proporção é similar à utilizada na norma brasileira NBR 7215 (1996) para determinação da resistência à compressão do cimento. Para evitar que sejam introduzidas demasiadas variáveis que possam comprometer os resultados gerados neste estudo e para que haja padronização, propõe-se, então, a utilização dos procedimentos descritos nesta norma para a produção de corpos-de-prova cilíndricos, fazendo-se apenas as substituições parciais do cimento pelo MCS que se deseja estudar.

3.1.2. Parte 2: cálculo da dosagem

O cálculo da dosagem será descrito a seguir em sete passos.

3.1.2.1. Passo 1: Determinação do conteúdo de vazios da mistura de agregados compactados

Le *et al.* (2015) baseiam-se na equação proposta por Funk & Dinger (1994) para empacotamento de partículas na produção de cerâmicas. Os autores afirmam que um módulo de distribuição de partículas (q) igual a 0,30, 0,25 ou 0,20 proporciona um empacotamento relativamente denso com colóides suficientes para obter propriedades reológicas.

Para a obtenção da curva granulométrica ideal, calculada pela Equação 2, Le *et al.* (2015) indicam o uso do módulo de distribuição de partículas (q) igual a 0,25. A composição da proporção ideal de agregados para a produção do CAAD é, então, aquela que segue a curva ideal com o mínimo de desvio, desde que se encontre dentro dos limites estabelecidos de acordo com as normas alemãs DIN EN 206-1 (2001) e DIN 1045-2 (2008) como exemplificado na Figura 9.

$$P(D) = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \quad (2)$$

Onde:

$P(D)$: o percentual do agregado passando pela peneira com o tamanho D (% em peso);

D : abertura da peneira (mm); e

D_{min} e $D_{máx}$: os tamanhos mínimo e máximo de partículas na mistura agregada (mm).

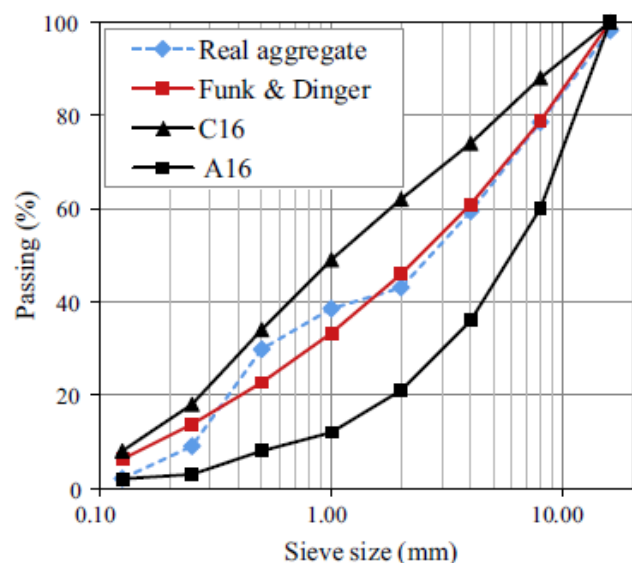


Figura 9 - Exemplo de graduação ideal de agregados

Fonte: Le *et al.* (2015)

Para que a graduação de agregados possua uma distribuição contínua e próxima à curva ideal de Funk & Dinger, muitas vezes é necessário que se divida o montante de agregado em frações. No entanto, esta proporção nem sempre resultará na combinação de agregados com menor volume de vazios. Este é um detalhe importante a ser considerado na dosagem do CAAD uma vez que, para a obtenção do desempenho necessário, a matriz deve possuir, entre outras características, baixo volume de vazios afim de evitar a penetração de agentes nocivos que possam comprometer suas propriedades, principalmente a resistência (AÏTCIN, 2000).

Sendo assim, uma maneira prática, e utilizada neste trabalho, de se obter a proporção de agregados com o menor volume de vazios é determinando-se o esqueleto granular conforme a metodologia de Tutikian & Dal Molin (2008). Para isto, deve-se empacotar todos os agregados, dois a dois, em ordem decrescente de diâmetro das partículas. Assim que encontrada a primeira composição entre os dois materiais de maior diâmetro, se realiza o mesmo procedimento com esta mistura e o próximo componente.

Caso haja mais de um tipo de agregado graúdo e miúdo, por exemplo, brita 1 e brita 0 e areia grossa e fina, primeiro devem ser empacotados os agregados de maiores tamanhos (brita 1 e 0) e com o resultado do empacotamento desta, deve-se realizar o mesmo procedimento para o próximo componente à mistura (areia grossa). Após este passo, com o melhor resultado dos três materiais, junta-se o quarto (areia fina). É possível, ainda, dividir as frações granulométricas dos agregados para proporcionar uma distribuição contínua (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2008).

Para realizar o procedimento descrito acima, Helene & Terzian (1992) propõem uma adaptação da NBR NM 45 (2006) (versão atual da norma NBR 7810, utilizada pelos autores). Este ensaio busca determinar a massa unitária da mistura por meio do empacotamento e com esta, é possível calcular o índice de vazios. Primeiro, deve ser aferida a massa de cada mistura contendo diferentes teores de cada fração. Neste passo, Tutikian & Dal Molin (2008) utilizam proporções de 10% em 10% dos agregados, variando de 100% do agregado A e 0% do agregado B até 0% do agregado A e 100% do B. Já Helene & Terzian (1992) propõem uma faixa intermediária de 100 a 40%, sendo de 100% do agregado A e 0% do agregado B até 40% do primeiro e 60% do segundo. Nesta pesquisa, esta proporção foi trabalhada como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - proporções entre os agregados para determinação do índice de vazios

Brita (%)	Areia (%)
100	0
65	35
60	40
55	45
50	50
40	60
0	100

Inicialmente, um recipiente é preenchido com 100% do agregado de maior tamanho e sua massa é registrada descontando o valor da massa do recipiente vazio (Figura 10). Em seguida é feito o acréscimo do segundo agregado com a massa necessária para passar de uma composição (%) para a seguinte, aproveitando a mistura realizada anteriormente. O recipiente deve ser preenchido em 3 camadas e cada camada deve ser compactada com 25 golpes com soquete metálico. Também é possível realizar o ensaio em mesa vibratória. O topo do recipiente deve ser rasado, descartando-se o material excedente.



Figura 10 - Determinação da melhor proporção entre os agregados

Do processo de empacotamento, é possível calcular a massa unitária compactada (MunitAB) que compreende a razão entre massa da mistura (Mmist), em kg, e o volume do recipiente (Vrecip) utilizado, em m³ (Equação 3). Este deve ter o diâmetro, pelo menos, cinco vezes maior que o diâmetro médio das partículas para evitar o efeito de parede descrito por De Larrard (1999). É importante que os materiais estejam secos e bem misturados.

$$M_{unitAB} = \frac{M_{mist}}{V_{recip}} \quad (3)$$

A massa específica (M_{espAB}) de cada uma das proporções é calculada segundo a Equação 4. Este cálculo é necessário para a determinação dos vazios da mistura e independe da M_{unitAB} . Θ %A ou %B é o percentual de cada um dos componentes de uma mistura entre os materiais A e B.

$$M_{espAB} = \frac{(M_{espA} * \%A) + (M_{espB} * \%B)}{100} \quad (4)$$

Com as massas específicas de cada material e a massa unitária da mistura compactada já calculadas, pode-se determinar a porcentagem de volume dos vazios (V), para cada uma das composições, através da Equação 5.

$$V = \frac{M_{espAB} - M_{unitAB}}{M_{espAB}} * 100 \quad (5)$$

Com o índice de vazios calculado, a proporção entre os materiais escolhidos deve ser a que apresentar o menor índice de vazios, pois nem sempre a mistura com a maior massa unitária compactada será aquela com menor índice de vazios (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2008). Com os materiais A e B empacotados, segue-se então para empacota-los com o material C e assim por diante até que todos os agregados estejam empacotados.

Com o esqueleto granular da mistura determinado, há uma grande probabilidade de que o CAAD não segregue e nem ocorra excesso de material fino (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2008). No entanto, Koehler & Fowler (2007) afirmam que o teor de vazios mínimos, onde há densidade de empacotamento máxima, pode não ser considerado ótimo em todos os casos. Para um concreto autoadensável, outras propriedades, como a capacidade de passagem, a resistência à segregação ou a dureza, podem ser mais importantes.

Na metodologia proposta por Le *et al.* (2015), com as quantidades ideais de agregados determinados pela curva de Funk & Dinger (1994), também são feitos testes de empacotamento por meio de compactação manual ou por vibração. Depois são calculados a massa específica e o volume de vazios da mistura de agregados.

Sabendo-se o percentual ideal de cada agregado, traça-se a curva de graduação real juntamente com a graduação ideal calculada pela Equação 2. A curva real deve constar entre os limites estabelecidos pelas normas DIN EN 206-1 (2001) e DIN 1045-2 (2008).

3.1.2.2. Passo 2: Determinação do volume da pasta primária

Para que o CAAD alcance as propriedades de trabalhabilidade do estado fluido, um volume mínimo de pasta deve ser fornecido. O volume mínimo exigido de pasta deve ser calculado separadamente para capacidade de preenchimento e capacidade de passagem. Posteriormente, o volume calculado deve ser testado e os devidos ajustes devem ser feitos. Se o volume de pasta for insuficiente, não apenas prejudicará a capacidade de passagem do concreto, mas também reduzirá sua resistência à compressão caso não haja vibração (CHAI, 1998). Como o CAAD deve possuir as propriedades no estado fluido de um concreto autoadensável, o volume de pasta deve variar entre 28% a 42% (OKAMURA, 1998; EFNARC, 2005; KOEHLER & FOWLER, 2007).

Com os resultados da proporção de agregados com menor volume de vazios, determina-se a quantidade de pasta necessária para garantir capacidade de preenchimento e habilidade de passagem de acordo com as Equações 6 a 8 de Koehler e Fowler (2007).

$$V_p = V_{exp} + V_{void} \quad (6)$$

$$V_p = V_{exp} + V_{vazios} * \frac{(100 - V_{exp})}{100} \quad (7)$$

$$V_{exp} = 8 + \left(\frac{16 - 8}{4}\right) (R_{SA} - 1) \quad (8)$$

Onde:

V_{void} : volume de vazios da mistura de agregados compactados no concreto (vol.%);

Vazios: conteúdo vazio na mistura de agregados compactados (vol.%);











V_p : volume da pasta primária necessário para a capacidade de preenchimento (vol.%);

V_{exp} : volume de pasta excedente para espaçamento (vol.%);

R_{SA} : coeficiente relacionado à forma (S) e a angularidade (A) do agregado na faixa de 1-5 segundo a Tabela 6.

O coeficiente relacionado à forma e a angularidade deve ser avaliado com a combinação dos agregados utilizados e não para cada agregado individualmente. Uma classificação única deve ser atribuída à combinação de agregados. Por exemplo, um agregado gráudo com uma classificação 5 juntamente com uma areia natural com uma classificação de 1 receberia uma classificação 3 para a classificação combinada (KOEHLER & FOWLER, 2007).

Tabela 6 - Diretrizes para atribuição de forma visual e classificação de angularidade (R_{SA}).

	1	2	3	4	5
Forma	A maioria das partículas são equidimensionais	As partículas com desvio modesto do equidimensional	Partículas não são equidimensionais, nem planas ou alongadas	Algumas partículas são planas e/ou alongadas	Abundância de partículas planas e/ou alongadas
					
Angularidade	Bem arredondadas	Arredondadas	Subangular ou subarredondadas	Angulares	Altamente angular
					
Exemplos	A maioria dos cascalhos e areias de rio/glacial	Cascalho rio/glacial parcialmente britados ou algumas areias manufaturadas	Agregado gráudo britado bem moldado ou areia fabricada com a maioria dos cantos $> 90^\circ$	Agregado gráudo britado ou areia manufaturada com alguns cantos $\leq 90^\circ$	Agregado gráudo britado ou areia manufaturada com muitos cantos $\leq 90^\circ$ e grandes áreas convexas

Fonte: Adaptado de Koehler & Fowler (2007)

A quantidade mínima de pasta necessária para proporcionar espaçamento (V_{exp}) entre os agregados depende principalmente da forma e angularidade do agregado combinado. Sendo assim, este valor varia de 8% para agregados equidimensionais e bem arredondados (forma visual e classificação de angularidade de 1), a 16% para formas mal configuradas, agregados angulares (forma visual e classificação angular de 5) (KOEHLER & FOWLER, 2007).

3.1.2.3. Passo 3: Determinação do fator água/ligante

Para a determinação da quantidade de água na mistura, primeiro calcula-se a resistência à compressão média que se pretende alcançar no projeto. As normas europeias geralmente consideram o valor da resistência em corpos-de-prova cúbicos, o que proporciona ligeiras diferenças em relação ao formato mais utilizado no Brasil (cilíndricos). Para este cálculo, então, recomenda-se o estabelecido pela NBR 12655 (2015) (Equação 9).

$$f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65 \times S_d \quad (9)$$

Onde:

f_{cmj} : é a resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias (MPa);

f_{ckj} : é a resistência característica do concreto à compressão, aos j dias (MPa);

S_d : é o desvio-padrão da dosagem (MPa).

Se o desvio-padrão é conhecido e o concreto for preparado com os mesmos materiais, mediante a equipamentos similares e sob condições equivalentes, o valor numérico do desvio-padrão a ser adotado deve corresponder a, no mínimo, 20 resultados de testes em corpos-de-prova obtidos no intervalo de 30 dias. Se o desvio-padrão é desconhecido, pode ser adotado um valor que depende da condição de preparo do concreto. Em nenhum caso o valor de S_d pode ser inferior a 2 MPa (NBR 12655, 2015).

As condições de preparo são as seguintes: a) o cimento e os agregados são medidos em massa, a água é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados (aplicável a todas as classes de concreto); b) o cimento é medido em massa, a água é medida em volume mediante a dispositivo dosador e os agregados medidos em massa combinada com volume (aplicável às classes C10 e C20); c) o cimento é medido em massa, os agregados em volume, a água é medida em volume e sua quantidade é corrigida em função da estimativa de umidade dos agregados (aplicável às classes C10 e C15). O desvio padrão a ser adotado para cada condição descrita está descrito na Tabela 7.

Tabela 7 - Desvio-padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto

Condição do preparo do concreto	Desvio-padrão (MPa)
A	4,0
B	5,5
C	7,0

Fonte: NBR 12655 (2015)

Com o valor da resistência calculada e utilizando os diagramas de Walz (1970) (Figura 11), semelhante aos diagramas de Abrams (Figura 12), que relaciona a resistência à compressão com o fator água/ligante, determina-se a quantidade de água (W/B). Em seguida, calcula-se o fator água/cimento equivalente (W/C_{eq}), levando-se em consideração a eficiência dos MCS determinados na fase preliminar desta metodologia (Equação 10).

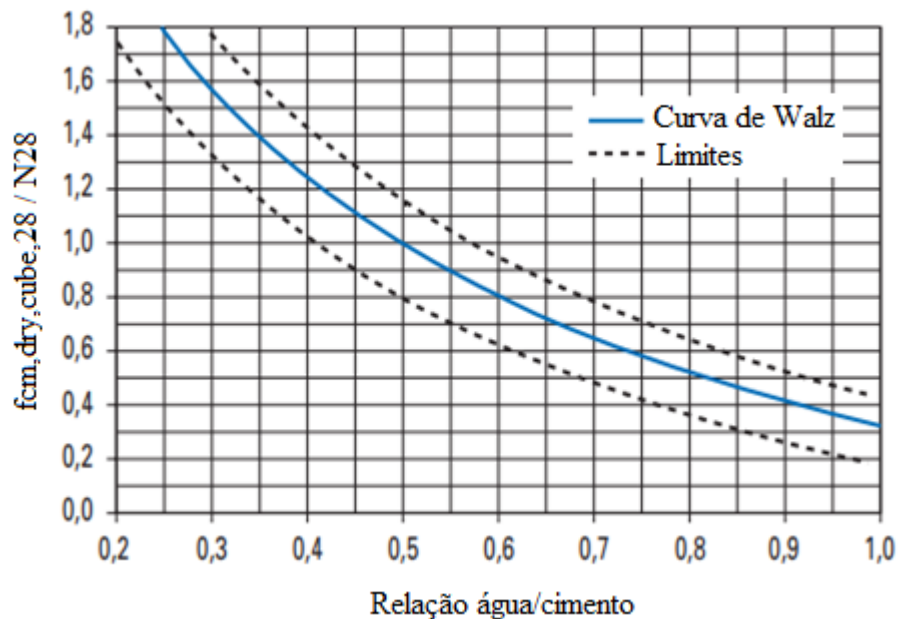


Figura 11 - Curvas de Walz para a determinação da relação água/cimento em função da resistência aos 28 dias

Fonte: Adaptado de Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2002)

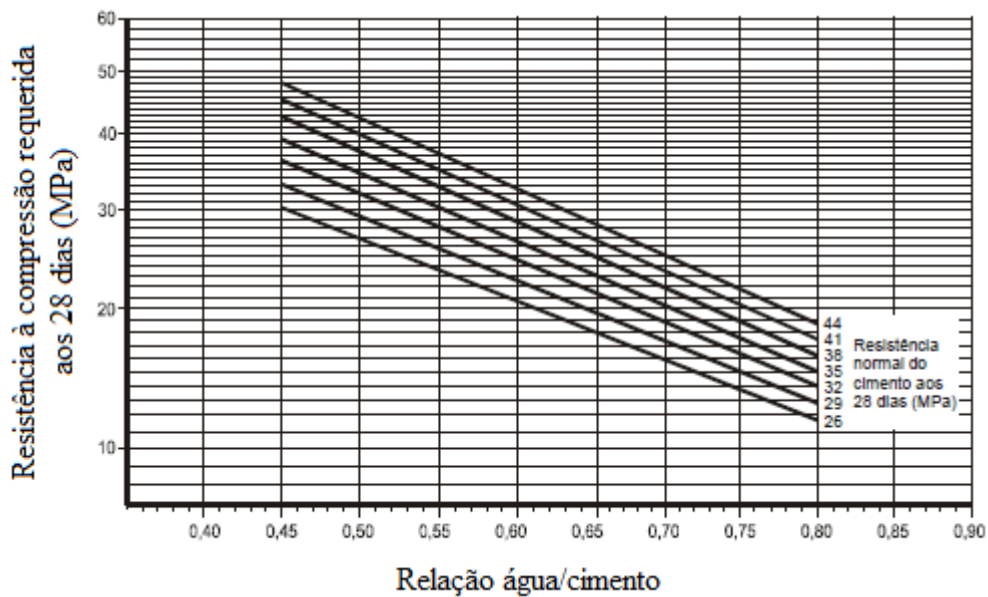


Figura 12 - Curvas de Abrams para a determinação da relação água/cimento em função da resistência aos 28 dias

Fonte: Rodrigues (1998)

$$W/B = W/C_{eq} * \left\{ \left(1 - \sum_{i=1}^n p_i \right) + \sum_{i=1}^n p_i * k_i \right\} \quad (10)$$

Onde:

W/B = fator água/ligante determinado;

W/C_{eq} = água/cimento equivalente calculado com base na relação entre a resistência e o W/C (curva de Walz);

k_i = fator de eficiência da adição mineral i (AM_i);

p_i = o percentual de cimento substituído pela adição i (em peso%);

n = o número de adições utilizadas.

A relação W/B do concreto de alto desempenho é, geralmente, na faixa de 0,25 a 0,40, enquanto a relação W/B do concreto autoadensável varia de 0,26 a 0,48. Portanto, a relação W/B apropriada para o CAAD deve estar entre 0,25 e 0,40 (LE *et al.*, 2015). A fluidez necessária deve ser alcançada por meio de aditivos superplastificantes.

3.1.2.4. Passo 4: Determinação do cimento, MCS e teor de água

A quantidade de cimento, de material cimentício suplementar (MCS) e de água pode ser determinado com base no volume de pasta conhecido (V_p), na relação água/ligante e no teor de cimento substituído por cada MCS. Primeiro determina-se o consumo de ligante (Equações 11 a 13) e, em seguida, os consumos de cimento (Equação 14), de MCS (Equação 15) e de água (Equação 16). Após calculados estes valores, devem ser procedidos testes experimentais para que se façam ajustes, caso necessário.

$$B * \frac{(1 - \sum_{i=1}^n p_i)}{\rho_c} + B * \left(\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{\rho_{MA_i}} \right) + B * \left(\frac{W}{B} \right) = V_p \quad (11)$$

$$B * \left[\frac{(1 - \sum_{i=1}^n p_i)}{\rho_c} + \left(\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{\rho_{MA_i}} \right) + \left(\frac{W}{B} \right) \right] = V_p \quad (12)$$

$$B = \frac{V_p}{\frac{(1 - \sum_{i=1}^n p_i)}{\rho_c} + \left(\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{\rho_{MA_i}} \right) + \left(\frac{W}{B} \right)} \quad (13)$$

$$C' = \left(1 - \sum_{i=1}^n p_i \right) * B \quad (14)$$

$$P_{MCS_i} = p_i * B \quad (15)$$

$$W = \left(\frac{W}{B} \right) * B \quad (16)$$

Onde:

B = o consumo da pasta (cimento + MCS) (kg/m^3);

C' = o consumo de cimento no concreto misturado com AM (kg/m^3);

p_i = o percentual de cimento substituído pela adição i (peso%);

n = o número de adições utilizadas;

P_{MCS_i} = o teor da adição mineral i (kg/m^3);

ρ_{MCS_i} = a massa específica da adição mineral i (kg/m^3);

ρ_c = a massa específica do cimento (kg/m^3);

V_p = o volume da pasta primária necessário para a habilidade de preenchimento (vol.%).

3.1.2.5. Passo 5: Determinação do consumo de agregados

Com base no volume de pasta obtido no passo 2 e na proporção de agregados obtida no passo 1, determina-se o consumo da combinação de agregados (Equação 17). Em seguida, determina-se o consumo de cada agregado (Equação 18). Normalmente, o teor de agregado para um concreto com a fluidez necessária de um CAA é de 59 a 68% (SU *et al.*, 2001).

$$AB = \frac{1 - V_p - V_{ar}}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\rho_{A_i}}\right)} \quad (17)$$

$$A_i = a_i * AB * (1 + H_{A_i}) \quad (18)$$

Onde:

AB = o conteúdo da mistura de agregados (kg/m³);

A_i = o conteúdo do agregado i seco ao ar (kg/m³);

a_i = o teor do agregado i na mistura de agregados (peso%);

n = o número de agregados utilizados;

H_{A_i} = o teor de umidade do agregado i (kg/m³);

ρ_{A_i} = a massa específica do agregado i (kg/m³);

V_p = o volume da pasta primária necessário para a habilidade de preenchimento (vol.%);

V_a = volume de ar projetado, geralmente 2% (vol.%).

3.1.2.6. Passo 6: Dosagem do superplastificante e ajuste da água na mistura

Como o CAAD requer uma baixa quantidade de água, a fluidez necessária no estado fluido é conseguida com o uso de aditivos superplastificantes (SP). Para a determinação do teor de SP a ser utilizado na mistura, recomenda-se o que se proceda testes de diferentes teores (% em relação ao peso do cimento) em argamassa conforme EFNARC (2002). Este procedimento é feito pelo teste de mini *slump flow* e da medida do T₂₅₀ (Figura 13). Estes testes consistem na medida do espalhamento médio e do tempo em que a mistura atinge um círculo de diâmetro 250 mm, concêntrico com o cone. Este teste é similar ao *slump flow* e ao T₅₀₀, porém em menor escala. O teor de saturação de SP da argamassa correspondente é utilizada como a demanda primária de SP para CAAD. Este teor é atingido quando, a partir deste, não há ganhos significativos de espalhamento (SAFIUDDIN, 2008).

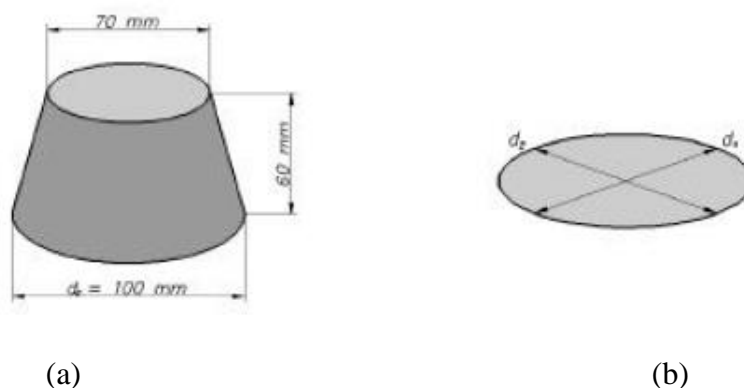


Figura 13 - Ensaio de mini-slump flow: a) Dimensões do molde cônico; b) Medição do espalhamento

Fonte: EFNARC (2002)

A quantidade de água na mistura é ajustada juntamente com os testes de dosagem do aditivo superplastificante. O cálculo da quantidade de água para as misturas inclui a água contida da parte líquida do aditivo conforme Aïtcin (2000) (Equações 19 a 24), de modo a não modificar o teor W/B calculado previamente.

$$M_a = M_{líq} - M_{sol} \quad (19)$$

$$M_{líq} = \left(\frac{M_{sol} * 100}{\text{teor de sólidos}} \right) \quad (20)$$

$$M_{sol} = mc * \frac{\%s. p. c}{100} \quad (21)$$

$$M_{aSP} = \left(\frac{M_{sol} * 100}{\text{teor de sólidos}} \right) - \left(mc * \frac{\%s. p. c}{100} \right) \quad (22)$$

$$M_{aSP} = \left(\frac{mc * \%s. p. c}{\text{teor de sólidos}} \right) - \left(mc * \frac{\%s. p. c}{100} \right) \quad (23)$$

$$M_a = (a/b * mc) - [M_{sól} + líq - (\%s. p. c * mc)] \quad (24)$$

Onde:

M_{aSP} = massa da água do superplastificante (g);

$M_{líq}$ = massa total do superplastificante líquido (g);

M_{sol} = massa da parte sólida do superplastificante (g);

mc = massa e cimento (g);

%s.p.c = teor de superplastificante (g);

Ma = massa de água na mistura (g);

a/b = teor água/ligante.

Neste trabalho, a dosagem do SP foi obtida avaliando-se três fatores: o espalhamento médio, a viscosidade observada por meio do tempo necessário para o espalhamento atingir um diâmetro de 250 mm e o índice de estabilidade visual. Para confirmar os resultados destes ensaios, foram realizados um teste de *slump flow* convencional para cada mistura estudada, ou seja, para a mistura controle e os três percentuais de substituição parcial do cimento por RVM.

3.1.3. Parte 3: Testes no estado fresco

Por último, as quantidades calculadas para os traços de concreto devem ser testadas com o objetivo de verificar se as misturas projetadas atendem aos requisitos de autocompatibilidade e resistência à compressão. Quando os resultados dos testes de controle de qualidade não atenderem aos requisitos do concreto fresco, os ajustes devem ser feitos até que todas as propriedades do CAAD atendam aos requisitos esperados no projeto.

Por exemplo, quando as habilidades de preenchimento e passagem são ruins, a dosagem de SP deve ser aumentada primeiro. Quando as habilidades de preenchimento e passagem não podem ser alcançadas ajustando-se a dosagem de SP, o aumento no volume de pasta leva a maiores habilidades de preenchimento e passagem para uma dada dosagem de SP (LE *et al.*, 2015). No estado fluido três principais testes podem ser procedidos para a avaliação dos parâmetros requeridos.

a) Parâmetro 1: Capacidade de fluidez e preenchimento

O primeiro parâmetro a ser testado é a capacidade de fluidez e preenchimento. Estas propriedades são observadas por meio do *slump flow*. Este teste consiste na determinação do espalhamento médio da mistura de concreto sobre uma superfície lisa e nivelada.

O espalhamento pode ser classificado em três classes, segundo a NBR 15823-1 (2017). A classe SF 1 compreende espalhamentos de 550mm a 650 mm, SF 2 para espalhamentos de 660

a 750 mm e SF 3 para 760 a 850 mm. Além disso, também pode ser classificado segundo sua estabilidade visual. Preferencialmente o concreto deve apresentar estabilidade e IEV 0 ou 1. A presença de acúmulo de agregados no centro (segregação) e dispersão da argamassa nas extremidades (exsudação) são características de concreto com IEV 3 e, assim, bastante instável.

b) Parâmetro 2: Viscosidade

A viscosidade plástica é, muitas vezes, o principal fator que diferencia a trabalhabilidade de uma mistura da outra. Mudanças na viscosidade podem refletir diretamente mudanças nos materiais ou proporções de mistura, tornando sua medição valiosa para o controle de qualidade. As classes de viscosidade plástica devem ser classificadas de acordo com a NBR 15823-1 (2017).

A viscosidade também é observada por meio do tempo de escoamento em que este concreto leva para atingir um diâmetro de 500 mm (T_{500}). Se esse tempo for inferior a 2 segundos, significa que a mistura possui viscosidade muito baixa. Esta alteração pode causar grave exsudação (KOEHLER & FOWLER, 2007). Caso isto aconteça, considerar reduzir o teor de superplastificante, o teor de água ou o de pasta. Em alguns casos, é recomendado o uso de um agente modificados de viscosidade. Também são possibilidades utilizar MCS ou cimento com partículas de maior área específica ou um agregado miúdo com partículas mais finas. É aceitável que o T_{500} varie entre 2 e 7 segundos (EFNARC, 2002).

A viscosidade também é testada pelo ensaio do Funil-V. este ensaio consiste no preenchimento do funil com o concreto que se pretende avaliar e deixa-lo fluir por gravidade pelo aparato. O tempo em que este procedimento ocorre é anotando quando a mistura flui totalmente e é possível enxergar luz vinda da extremidade do funil. A EFNARC (2002) considera apropriado um tempo de fluxo de até 10 segundos. Para a NBR 15823-1 (2017), o limite compreende 25 segundos. As classes de concreto, de acordo com o tempo de fluxo, são VF 1 para fluidez < 9 segundos e VF 2 para tempos de 9 a 25 segundos.

c) Parâmetro 3: Habilidade passante

A habilidade passante é o terceiro requisito para o CAAD no estado fluido e pode ser analisada pelo método da Caixa-L. Este teste avalia o fluxo do concreto, e também até que ponto ele está sujeito ao bloqueio pelas armaduras. O ensaio consiste em depositar o concreto

na câmara vertical e abrir a comporta de modo que passe pelas barras internas e flua para a câmara horizontal. Ao final calcula-se o coeficiente de bloqueio pela relação entre as alturas (H_2/H_1) do concreto fluido dentro do aparato. O mínimo valor aceitável para esta relação é 0,8 e quanto mais próximo este valor estiver da unidade, melhor o fluxo do concreto.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental deste trabalho foi desenvolvido segundo a ordem de atividades apresentada no fluxograma da Figura 14. Para estudar o desempenho do resíduo de vidro na matriz cimentícia, o material passou por um processo de moagem e foi caracterizado física e quimicamente. Após este procedimento, foi adotada a nomenclatura “resíduo de vidro moído” (RVM) para o material estudado. Os componentes do concreto foram selecionados e caracterizados de modo a proporcionar fluidez e alta resistência e, assim, garantir que os parâmetros do estado fresco e endurecidos fossem atendidos. Em seguida, com o RVM estudado em substituição parcial do cimento, foi determinada sua eficiência na argamassa e foram realizados estudos da dosagem. As propriedades do concreto foram testadas no estado fresco e no estado endurecido.

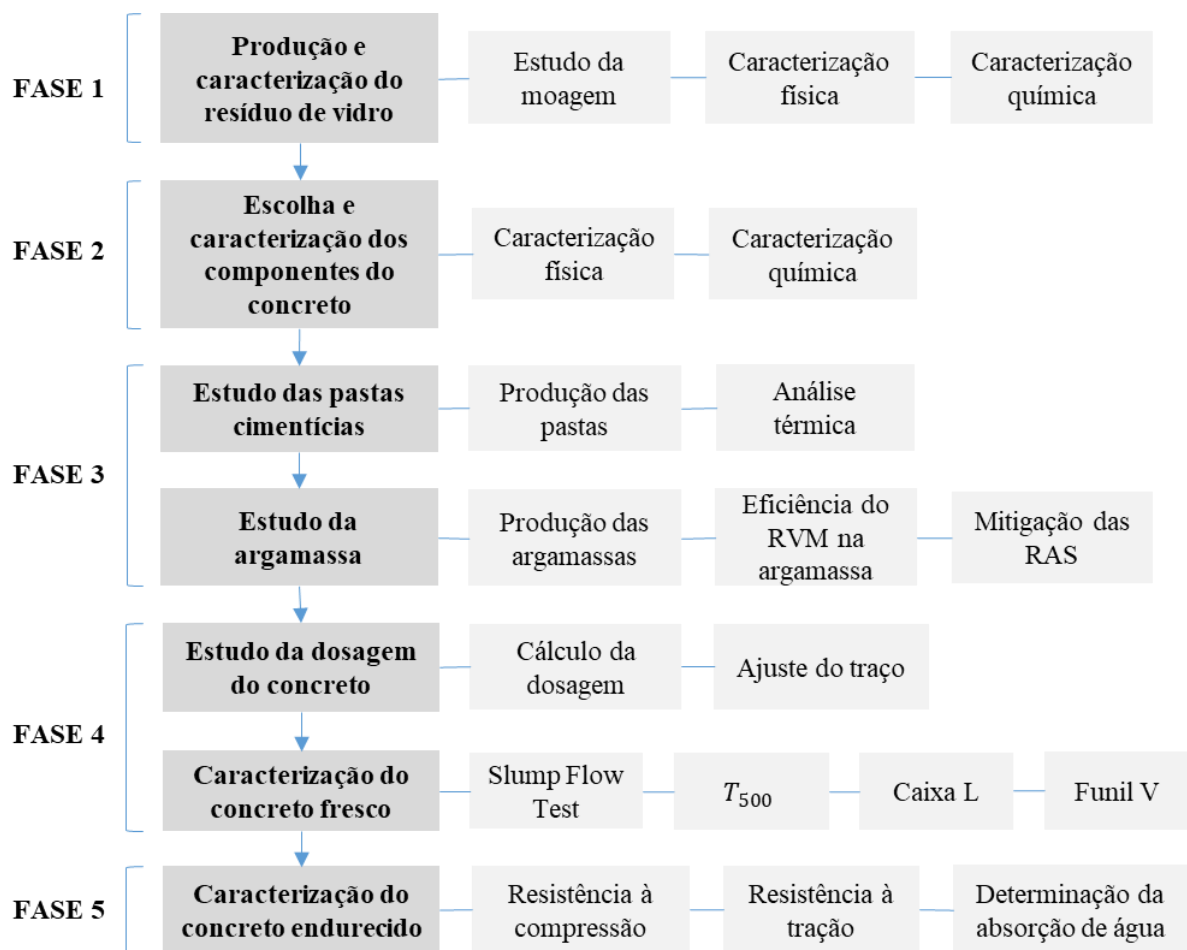


Figura 14 - Fluxograma de atividades realizadas

4.1. Variáveis estudadas

O desempenho do RVM foi determinado mediante avaliação da resistência à compressão e mitigação de expansões provocadas por reações álcalis-sílica em argamassa; avaliação da fluidez, capacidade de resistir à segregação, capacidade de passar por obstáculos, resistência à compressão, resistência à tração e absorção de água do concreto com diferentes percentuais de substituição parcial de cimento por RVM na matriz cimentícia. Para o programa experimental, as variáveis foram classificadas como:

a) Variáveis independentes: horas de moagem, rotação do moinho e a proporção entre material e esferas para o estudo de moagem e teor de substituição de cimento por RVM para os demais estudos.

b) Variáveis dependentes: tamanho de partículas, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, fluidez, capacidade de resistir à segregação, capacidade de passagem, mitigação das reações álcalis-sílica, taxa de absorção de água.

4.2. Planejamento experimental

A Tabela 8 detalha as repetições realizadas em cada ensaio para cada tratamento e a metodologia empregada no programa experimental.

Tabela 8 – Determinação do número de amostras por ensaio do programa experimental

Propriedades investigadas	Número de amostras	Metodologia
Determinação da fluidez: <i>Slump Flow</i>	2	NBR 15823-2 (2017)
Viscosidade: T ₅₀₀	2	NBR 15823-2 (2017)
Habilidade passante: Método da Caixa L	2	NBR 15823-4 (2017)
Viscosidade: Método do Funil V	2	NBR 15823-5 (2017)
Eficiência do resíduo de vidro moído	4	Wong & Abdul Razak (2005)
Atividade pozolânica	1	Análise térmica
Dosagem experimental	-	Le <i>et al.</i> (2015) adaptada
Resistência à Compressão Axial	4	NBR 5739 (2018)
Resistência à Tração por Compressão Diametral	4	NBR 7222 (2011)
Absorção, massa específica e índice de vazios	3	NBR 9778 (2005)
Mitigação da expansão devido a reações álcalis-sílica em barras de argamassa	3	NBR 15577-5 (2018)

4.2.1. Análise de Variância (ANOVA)

Neste programa experimental, a ANOVA foi utilizada para comparar as médias obtidas nos ensaios de resistência à tração, resistência à compressão, eficiência e absorção de água. Todos os testes estatísticos foram feitos adotando-se um nível de significância de 1% ($\alpha = 0,01$). A ANOVA foi realizada com base na Tabela 9.

Tabela 9 - Cálculo da Análise de Variância (ANOVA)

Fontes de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
Tratamento	k - 1	$SQTr = \sum_{i=1}^n (x - média)^2$	$MQTr = \frac{SQTr}{k - 1}$	$F = \frac{MQTr}{MQR}$
Resíduo	n - k	$SQR = \sum_{i=1}^n x_{ij}^2 - \frac{\sum_{i=1}^k (\sum_{j=1}^g x_{ij})^2}{g}$	$MQR = \frac{(SQR)}{(n - k)}$	
Total	n	$SQT_r + SQD$		

NOTA: n= número total de observações; k = número de tratamentos; SQTr = Soma de quadrados entre os tratamentos; MQTr = Média quadrática entre os tratamentos; SQR = Soma dos quadrados do resíduo; MQR = Média quadrática do resíduo; F = teste-F de probabilidade.

Caso a ANOVA apresente fortes evidências de que há alguma diferença estatísticas entre as médias, aplica-se um teste de *post hoc* de Tukey para identificar especificamente quais médias se destacam, utilizando-se da seguinte fórmula:

$$\Delta = q \sqrt{\frac{MQR}{r}} \quad (25)$$

Onde:

q = valor tabelado ao nível de significância estabelecido que depende do número de tratamentos e do número de graus de liberdade do resíduo;

MQR = média quadrática do resíduo;

r = número de repetições.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Material

A produção de um concreto que possua simultaneamente as características do concreto autoadensável e do concreto de alto desempenho requer uma criteriosa seleção dos materiais a serem utilizados. Nem todos os materiais disponíveis no mercado são capazes de garantir as propriedades almejadas. Para atender às especificações de ambos os concretos, os materiais foram selecionados conforme descrito no item 3.1.1.1. Após a seleção, foram feitos ensaios de caracterização e, em seguida, procedeu-se a dosagem e os testes no estado fluido e endurecido.

5.1.1. Resíduo de vidro

Nesta pesquisa foi utilizado resíduo de vidro plano verde de soda-e-cal, gerado durante o processo de lapidação de placas. O material foi fornecido pela empresa Vidro Rios Ltda.

5.1.2. Cimento

Com o objetivo de estudar um cimento comumente comercializado na cidade de Manaus, nesta pesquisa foi utilizado o Cimento Portland CP-IV-32.

5.1.3. Agregados miúdo e graúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia proveniente do município de Manacapuru. Como agregado graúdo foi utilizada a brita 0, extraída de rocha granítica, proveniente da região de Moura no município Barcelos, no estado do Amazonas.

5.1.4. Aditivo Superplastificante

Devido aos resultados obtidos na pesquisa de Sousa Neto (2014), optou-se pela utilização do aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 para a redução da água na mistura, cujas características fornecidas pelo fabricante estão apresentadas na Tabela 8. O teor de sólidos foi obtido conforme norma NBR 10908 (2008).

Tabela 10 - Características do aditivo superplastificante

Propriedade	Característica
Principal componente químico	Polímeros Policarboxilatos
Densidade (g/cm ³)	1,07
Dosagem Recomendada (% sobre o peso do cimento)	0,2 - 5,0
Teor de sólidos*	31%
Estado	Líquido

* *Ensaio realizado*

Fonte: Fabricante

5.1.5. Água de amassamento

Neste trabalho foi utilizada água proveniente dos poços da Universidade Federal do Amazonas.

5.2. Métodos

O processo da moagem do resíduo tem um papel de extrema importância na incorporação do resíduo de vidro moído no concreto (PAIVA, 2009; NASSAR, 2012; SOUSA NETO, 2014; BARROS, 2016). Para determinar o melhor processo, foi realizado o estudo da moagem do resíduo de vidro. Em seguida, foi realizada a caracterização dos materiais, a dosagem para concreto autoadensável de alto desempenho e a caracterização do concreto em estado fresco e endurecido.

5.2.1. Preparação do resíduo de vidro

A sedimentação do resíduo nas câmaras de água das máquinas de corte e lapidação proporciona alto adensamento entre camadas do resíduo de vidro, podendo ser comparado a pedras artificiais (PAIVA, 2009). Para tornar viável a utilização deste material como substituição parcial do cimento, foi realizada uma preparação inicial que consistiu em secagem, separação de grãos de maiores tamanhos e moagem. Após coletada, a amostra foi seca em estufa a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24 horas, apiloada manualmente para desagregar os torrões de maiores

dimensões. Em seguida, foi moído por 30 minutos em moinho de bolas e, então, peneirado na peneira Mesh #30 (abertura de malha 0,60mm). Este processo é mostrado nas Figuras 15 e 16.

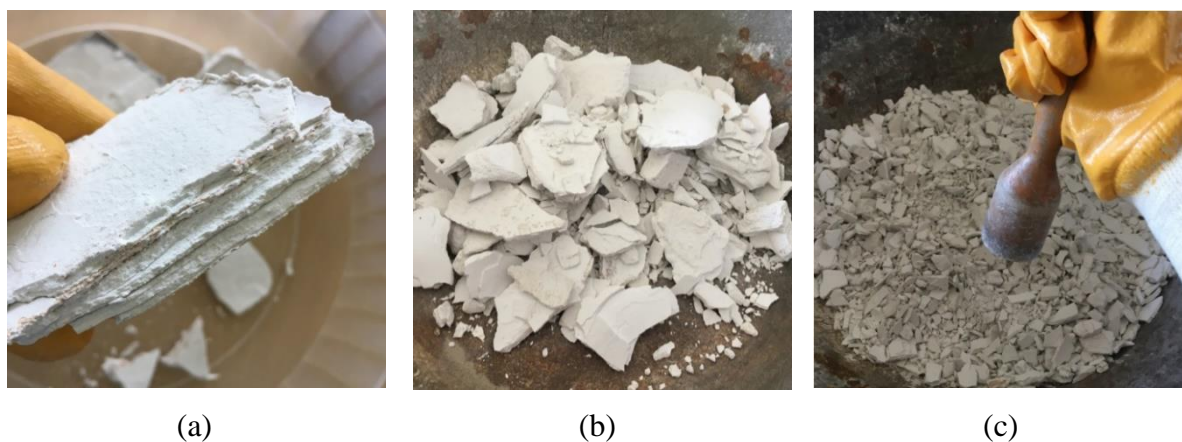


Figura 15 - Processos de preparo do resíduo de vidro: a) Detalhe das camadas de resíduo sedimentado nas câmaras de água das máquinas de corte; b) Resíduo seco em estufa; c) Apiloamento manual do resíduo seco.

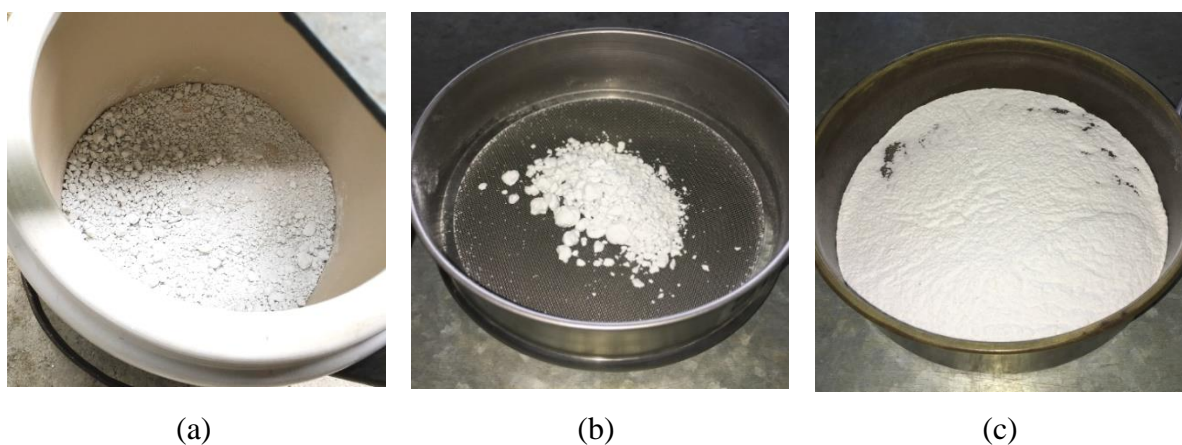


Figura 16 - Processos de preparo do resíduo de vidro: a) Moagem por 30min em moinho de bolas; b) Resíduo retido na peneira #30; c) Resíduo passante na peneira #30.

Após este processo, com o resíduo passante na peneira, foi feito o estudo da moagem que teve por objetivo verificar o processo mais eficiente para obtenção de grãos com tamanho médio de partículas menores que a do cimento em um menor tempo. Após o processo da moagem, o resíduo de vidro recebeu a nomenclatura RVM.

5.2.2. Estudo da moagem do resíduo de vidro

O refinamento dos grãos do resíduo de vidro foi obtido por processos de moagem por via seca. Três variáveis foram analisadas neste estudo: quantidade de esferas (corpos moedores) em relação à quantidade de resíduo, tempo de moagem e a rotação do motor do moinho. A combinação de três tamanhos de esferas foi utilizada: pequena, média e grande com 2 cm, 3,20 cm e 4,5 cm de diâmetro, respectivamente.

Duas moagens foram realizadas em moinho com motor de 1670 rotações por minuto (Figura 17 (a)). A primeira (M1), foi realizada durante 48 horas na proporção 2:3 (material:esferas) em peso. A segunda (M2) foi realizada na proporção 1:3 durante 24 horas (M2). Já no segundo moinho (Figura 17 (b)), com motor de 1720 rotações por minuto, foram realizadas as moagens M3 e M4 durante 24 horas, cada. As proporções de material:esferas utilizadas foram 1:2 e 1:3, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 17 - Moinhos utilizados no estudo: a) com motor de 1670 rpm; b) com motor de 1720 rpm.

Durante as moagens experimentais foram coletadas amostras periodicamente para que fosse feita análise granulométrica por difração à laser do material particulado. Desta forma, foi possível analisar as distribuições de tamanhos das partículas referente às moagens e, assim, determinar o tempo com melhor rendimento de moagem do material. Os parâmetros de moagem utilizados neste estudo encontram-se na Tabela 11. O material coletado de cada moagem foi analisado por meio de análise granulométrica por difração à laser. Após esta análise, o resíduo

de vidro foi caracterizado utilizando-se o produto da moagem mais eficiente, escolhida para a confecção do CAAD.

Tabela 11 - Parâmetros utilizados no estudo da moagem

	RVM : esferas (kg)	Tempo (h)	Rotação (rpm)
M1	2 : 3	48	1670
M2	1 : 3	24	1670
M3	1 : 2	24	1720
M4	1 : 3	24	1720

5.2.3. Ensaios de caracterização dos materiais

As metodologias de caracterização dos materiais escolhidos para a produção do CAAD estão detalhadas nas Tabela 12 e 13. Serão descritas, a seguir, aquelas que não forem normatizadas.

Tabela 12 - Métodos empregados na caracterização do resíduo de vidro e do cimento

	Propriedade	Método
Resíduo de vidro / cimento	Granulometria	Difração à laser
	Massa específica	Picnometria à gás hélio
	Composição química	Espectrometria de fluorescência de raios-X
	Área superficial específica	Difração à laser
	Caracterização da estrutura cristalina	Difração de Raios-X
	Morfologia das partículas	MEV
	Perda ao fogo	Termogravimetria
Cimento	Tempo de pega	NBR 16607 (2017)
	Resistência à compressão	NBR 7215 (1996)
	Finura na peneira 75µm	NBR 11579 (2012)

Tabela 13 - Métodos empregados na caracterização dos agregados

	Propriedade	Método
Agregado gráudo	Granulometria	NBR NM 248 (2003)
	Massa específica e massa específica aparente	NBR NM 53 (2009)
	Absorção de água	NBR NM 53 (2009)
Agregado miúdo	Granulometria	NBR NM 248 (2003)
	Massa específica e massa específica aparente	NBR NM 52 (2009)
	Teor de umidade superficial	NBR 9775 (2011)
	Teor de impurezas	NBR NM 49 (2001)

5.2.4. Granulometria de partículas por difração à laser

Para determinar o tamanho das partículas do cimento e do RVM, foi realizada a granulometria por difração à laser com granulômetro à laser Malvern Mastersizer 2000, capaz de avaliar partículas no intervalo de 0,02 a 2000 μm . A área superficial específica também pôde ser determinada pelo mesmo aparelho. Nesta análise, a distribuição granulométrica das partículas foi determinada conforme a teoria de difração de Fraunhofer, que consiste no espalhamento de luz sobre partículas para calcular a distribuição de tamanho por medição angular, considerando-se partículas esféricas de volume equivalente.

Para a análise da distribuição granulométrica do RVM, foi utilizado água como dispersante e para o cimento, álcool etílico 99,8% para evitar a aglomeração das partículas, uma vez que o cimento reage quimicamente com a água. As amostras foram agitadas por ultrassom durante 60 segundos antes das leituras para evitar aglomerações das partículas. As análises foram iniciadas após obscuração de 10% a 15%, que representa a fração de luz “perdida” do feixe principal quando a amostra é introduzida.

5.2.5. Massa específica

A massa específica do cimento e do RVM foi determinada por ensaio de picnometria em multiplicnômetro de gás hélio Quantachrome Instruments, modelo MVP-6DC. A massa específica foi calculada pela razão da massa da amostra pelo volume conforme Equações 26 e 27. A leitura foi realizada em sete amostras e a massa específica final foi obtida pela média entre elas.

$$V_p = V_c - V_r \times \left(\frac{P_1}{P_2} - 1 \right) \quad (26)$$

$$\rho = m/V_p \quad (27)$$

Onde:

V_p = Volume da amostra (cm³);

V_c = Volume do porta amostra (cm³);

V_r = Volume da referência (cm³);

P_1 = Pressão medida depois da pressurização do volume de referência (PSI);

P_2 = Pressão medida depois de incluída V_c (PSI);

m = massa da amostra utilizada no ensaio (g).

5.2.6. Composição química

A composição química do cimento e do RVM foi obtida pela técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X de energia dispersiva Panalytical, modelo Epsilon 3-X. A análise foi realizada em atmosfera de gás hélio e buscou determinar os teores de óxidos presentes nas amostras. Esta análise também auxilia a interpretação dos resultados da difração de raios-X.

5.2.7. Difração de raios-X

A caracterização da estrutura cristalina do cimento e do RVM foi obtida por difração de raios-x em difratômetro BRUKER D2 Phaser, com tubo de radiação de Cu-K α ($\lambda = 0,15406$ nm, 30 kV, 10 mA). As amostras foram analisadas com ângulos de varredura de 10° a 100° (2 θ), ao passo de 0,02° e intensidades registradas por 1 segundo/ passo. A identificação das fases obtidas durante o ensaio foi realizada com auxílio do software X'Pert HighScore Plus

(Panalytical). A análise das fases cristalinas presentes nas amostras foi comparada com os difratogramas disponíveis nos bancos de dados de referência do ICSD (Inorganic Crystal Structure Database) e ICDD (International Center for Diffraction Data) e com Taylor (1990).

5.2.8. Microscopia eletrônica de varredura

A morfologia das partículas do resíduo de vidro moído, de vidro não moído e de cimento foram observadas em microscópio eletrônico de varredura LEO 435 VP. As imagens foram obtidas com ampliação de 500 a 4.000 vezes.

5.2.9. Termogravimetria das pastas

Nas pastas foram conduzidos estudos de análises térmicas para detectar a atividade pozolânica por meio do consumo do hidróxido de cálcio. Foram estudadas pastas cimentícias com diferentes teores de substituição parcial de cimento por RVM.

5.2.9.1. Produção das pastas

As pastas foram produzidas com relação água/material cimentante de 0,40, sendo o material cimentante uma mistura de cimento + RVM. Os teores de substituição parcial estudados foram 0%, 10%, 15% e 20% (P0RVM, P10RVM, P15RVM e P20RVM, respectivamente). A relação água/material cimentante foi escolhida para obtenção uma pasta suficientemente viscosa sem a necessidade de utilização de aditivos superplastificantes que pudessem interferir no resultado da análise térmica.

As pastas foram produzidas manualmente em béquer de 250ml (Figura 18 (a)). O cimento e o RVM foram homogeneizados previamente e misturados vigorosamente à água durante 2 minutos (Figura 18 (b)). Em seguida foram acondicionados em sacos plásticos vedados e mantidas em dessecador até a idade dos ensaios (Figura 18 (c)).

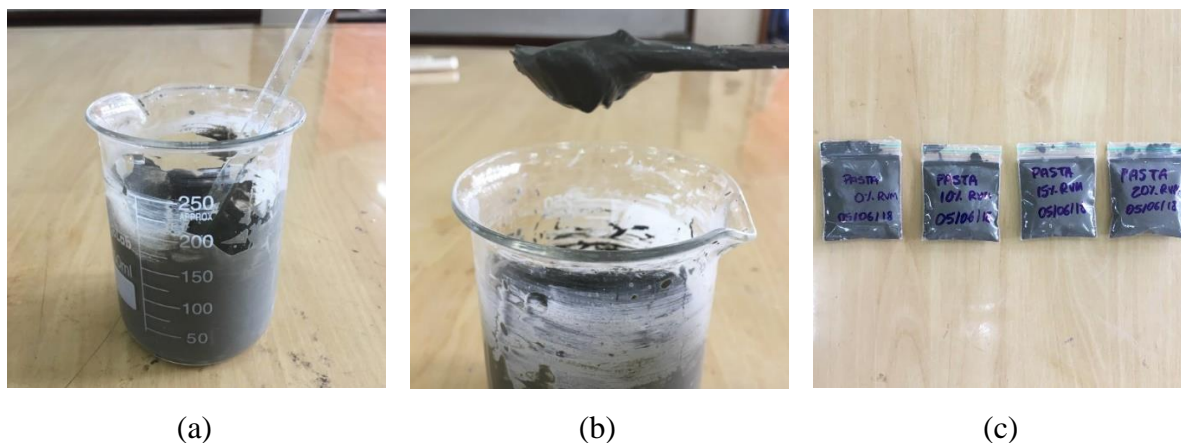
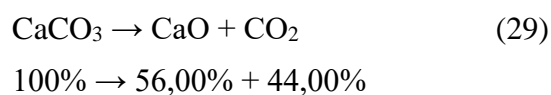
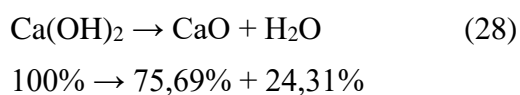


Figura 18 - Produção das pastas cimentícias: a) béquer e haste de vidro utilizados para produção; b) consistência das pastas; c) pastas acondicionadas em sacos plásticos lacrados.

5.2.9.2. Análise térmica

A análise térmica foi feita por termogravimetria e sua derivada (TG/DTG). Essa análise registra variações de massa em função da temperatura a uma taxa de aquecimento constante (TAYLOR, 1997). Para tanto, foi empregado o equipamento SDT Q600 da TA Instrument, com taxa de aquecimento de 10 °C/min até a temperatura final de 950°C, com fluxo de gás nitrogênio (N 5.0) de 30 ml/min. As amostras foram aferidas a aproximadamente 10 mg e posicionadas em cadinho de alumina de 90 microlitros sem tampa. As análises foram realizadas para o cimento, o resíduo de vidro moído e pastas de cimento aos 28 dias.

Nesta análise foi verificada a atividade pozolânica do RVM, avaliada pelo teor de hidróxido de cálcio na mistura, de acordo com os procedimentos sugeridos por Dweck *et al.* (2009) e Pinheiro (2015). As perdas de massa foram estimadas por meio das equações estequiométricas de desidratação do hidróxido de cálcio (C-H) (Equação 28) e da decarbonatação do carbonato de cálcio (C-C) (Equação 29). Para os cálculos foram considerados os picos das curvas TG /DTG nos intervalos de 20 a 200°C para quantificação da água quimicamente combinada com as fases etringita, silicato de cálcio hidratado (C-S-H), sílico-aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H) e aluminato de cálcio hidratado (C-A-H). Para a quantificação do C-H considerou-se o intervalo de 400 a 500°C e para o C-C de 500 a 725°C.



5.2.10. Produção e caracterização das argamassas

Na argamassa foram realizados estudos de eficiência e de atividade pozolânica.

5.2.10.1. Eficiência do RVM

As misturas foram confeccionadas com traço e agregado miúdo indicados pela norma NBR 7215 (1996) nas proporções 1:3:0,48 (cimento : areia : água). Foram testadas seis misturas com teores de substituição parcial de cimento por RVM de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. Para cada mistura, produziu-se 4 corpos-de-prova cilíndricos de argamassa de dimensões 5 x 10 cm que permaneceram em cura submersa por 28 dias. A eficiência foi determinada pela relação das resistências à compressão, conforme descrito no item 3.1.1.2. O procedimento foi realizado em prensa servo-hidráulica EMIC AC 6.08 com velocidade de 0,60 MPa/s e as médias resultantes dos ensaios foram analisadas por análise de variância (ANOVA).

5.2.10.2. Índice de desempenho com o cimento

A desempenho do RVM com o cimento foi determinado segundo a NBR 5752 (2014), calculando-se a relação entre a resistência à compressão dos corpos-de-prova com 25% de MCS e a resistência dos corpos-de-prova de referência, sem MCS. Nesta pesquisa o índice de desempenho foi determinado na argamassa com os teores de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%.

5.2.10.3. Mitigação da reatividade álcalis-sílica

A avaliação da mitigação das expansões provocadas pelas reações álcalis-sílica foi determinada pelo método acelerado em barras de argamassa conforme NBR 15577-4 (2018) e NBR 15577-5 (2018). Para a confecção das barras de argamassa, conforme a referida norma, foi utilizado cimento padrão ABCP do tipo CP-V ARI, cujas características encontram-se na Tabela A7 do Anexo II deste trabalho, agregado reativo e teores 10%, 15% e 20% de RVM em substituição parcial ao cimento (Tabelas A5 e A6 - Anexo II). Três barras prismáticas foram moldadas para cada teor de RVM investigado.

As expansões foram observadas durante 30 dias e expressas em percentagem de acordo com a Equação 30. Neste período é possível afirmar que a mitigação ocorre quando as expansões forem menores do que 0,19% (NBR 15577-1, 2018).

$$E(\%) = \frac{L_n - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (30)$$

Onde:

E (%): Variação dimensional, expressa em percentagem;

L_n : média dos comprimentos das barras aos “n” dias (mm);

L_0 : média dos comprimentos das barras aos “0” dias (mm).

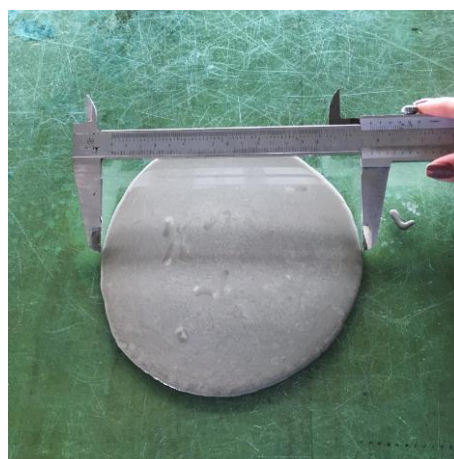
5.2.11. Produção e caracterização do concreto

5.2.11.1. Compatibilidade entre o cimento e o aditivo superplastificante

Primeiramente, foi feita verificação da compatibilidade entre o cimento e o aditivo superplastificante. Esta verificação foi realizada pelo ensaio de mini abatimento de Kantro (1980). Foram estudadas misturas de pasta de cimento com diferentes teores de aditivo superplastificante. As misturas foram feitas em argamassadeira SOLOTEST de movimento planetário conforme NBR 7215 (1996) e foram mantidas em repouso por 5, 30 e 60 minutos antes de serem colocadas no funil. O espalhamento foi realizado sobre placa de vidro (Figura 19 (a)) e medido com paquímetro em quatro direções (norte-sul, leste-oeste e as duas transversais intermediárias) para determinar-se a média (Figura 22 (b)).



(a)



(b)

Figura 19 - Ensaio de miniabatimento: a) Funil utilizado; b) Medida do espalhamento

O aditivo utilizado foi considerado adequado para utilização em conjunto com o cimento CP-IV escolhido, pois as misturas não apresentaram perdas na fluidez entre 5 e 30 min (Figura 20). As perdas após 30 min são esperadas.

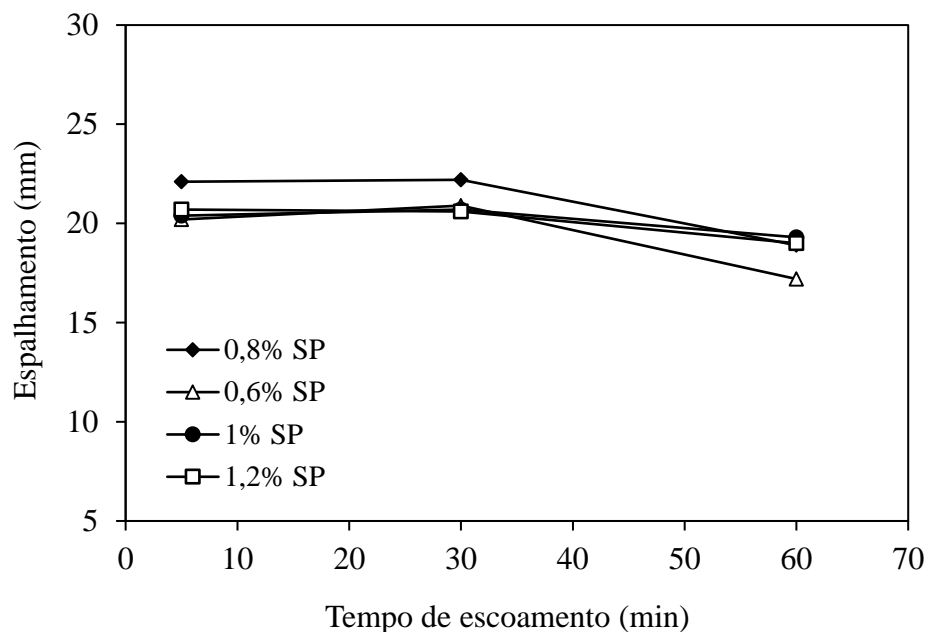


Figura 20 - Compatibilização entre o cimento CP-IV e o aditivo superplastificante MC PowerFlow 1102

5.2.11.1. Dosagem experimental do CAAD

A dosagem experimental foi feita adaptando-se a metodologia proposta por Le *et al.* (2015), como detalhado no item 3.1. As misturas receberam nomenclatura de acordo com o teor de RVM. Logo, a mistura C0RVM corresponde ao concreto de referência com 0% de RVM e as misturas C10RVM, C15RVM e C20RVM correspondem, respectivamente, aos concretos com 10%, 15% e 20% de substituição parcial de cimento por RVM.

Os valores do consumo dos materiais utilizados na produção do CAAD, obtidos pela dosagem, apresentam-se na Tabela 14. O teor de ar incorporado considerado nos cálculos foi de 2%. A composição granulométrica dos agregados, após os ajustes de volume de materiais, para menor índice de vazios foi de 47% de areia e 53% de brita. Esta composição também se encontra dentro dos limites das normas alemãs DIN EN 206-1 (2001) e DIN 1045-2 (2008) (Figura 21).

Tabela 14 - Consumo de materiais utilizados na produção do CAAD obtidos pela dosagem

Misturas	W/Ceq	W/B	Cimento (kg/m ³)	RVM (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	SP (peso%)	Água (kg/m ³)
C0RVM	0,30	0,30	597	0	839	941	1,4	179
C10RVM	0,33	0,30	537	60	839	941	1,0	198
C15RVM	0,29	0,30	507	90	839	941	0,8	173
C20RVM	0,30	0,30	478	119	839	941	0,8	179

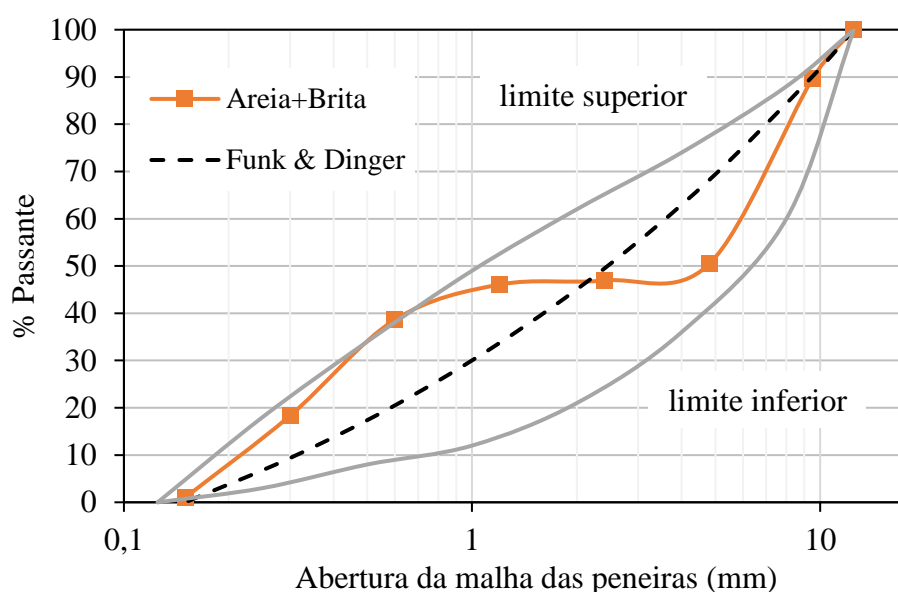


Figura 21 - Composição granulométrica dos agregados utilizados nas proporções de 47% de areia e 53% de brita

Para a escolha dos teores de aditivos superplastificante, foram levados em consideração não só a medida do espalhamento do ensaio de mini *slump flow*, mas também os valores observados no T_{250} e o índice de estabilidade visual. Para as misturas com 10%, 15% e 20% de RVM, os teores de saturação do SP foram 1%, 1% e 0,8%, respectivamente (Figura 22). No entanto, para o teor de 15% de RVM, o menor tempo de escoamento foi obtido com 0,8% de SP. Logo, este foi o valor adotado. Para a mistura de referência o mesmo critério foi aplicado, justificando a escolha do teor 1,4% ao invés do teor de saturação 1% (Figura 23). Todos os teores adotados possuem IEVs iguais a 0, ou seja, altamente estável e sem evidência de segregação ou exsudação.

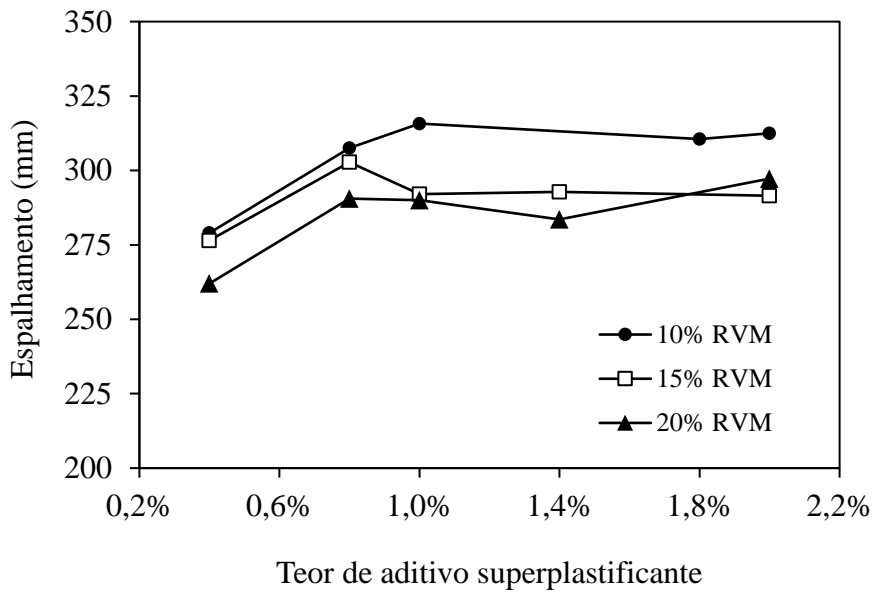


Figura 22 - Espalhamento x Teor de aditivo superplastificante de misturas com diferentes teores de RVM

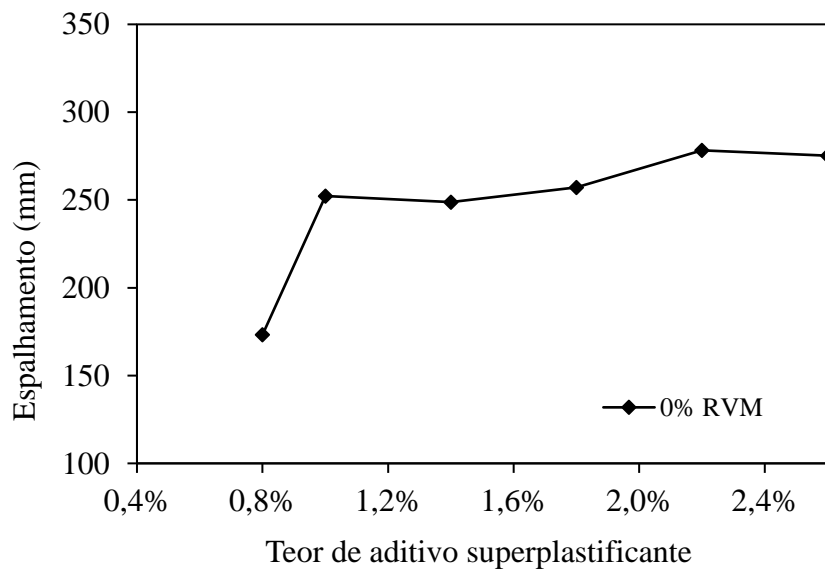


Figura 23 - Espalhamento x Teor de aditivo superplastificante de mistura de referência

5.2.11.2. Ajuste do volume de pasta e do consumo dos materiais

O cálculo do consumo dos materiais foi feito conforme descrito no item 3.1.2. As quantidades foram ajustadas, considerando-se primeiramente a dosagem ótima de superplastificante utilizada por Sousa Neto (2014), uma vez que o autor utilizou o mesmo

aditivo. Foram produzidas vinte e seis misturas em argamassadeira SOLOTEST de movimento planetário. A capacidade de fluidez e viscosidade foram determinadas pelo mini *slump flow* e pelo T₂₅₀, que consistem em versões reduzidas do *slump flow* convencional e do T₅₀₀, respectivamente.

As misturas foram posicionadas no interior de um tronco de cone e o espalhamento foi realizado sobre uma placa de acrílico (Figura 24 (a)). Sob a placa foi posicionado um papel milimetrado marcando um círculo de 250 mm de diâmetro para facilitar a leitura do T₂₅₀, de modo a não interferir no espalhamento (Figura 24 (b)). A média do espalhamento foi determinada pela medida das quatro direções (horizontal, vertical e as duas transversais intermediárias). O T₂₅₀ foi cronometrado. Os critérios de escolha do ajuste ideal foram: i) o índice de estabilidade visual (NBR 15823-2, 2017); ii) medida do espalhamento; e iii) fluidez. Em seguida procedeu-se o teste de dosagem do superplastificante, como especificado no item 3.1.2.6.

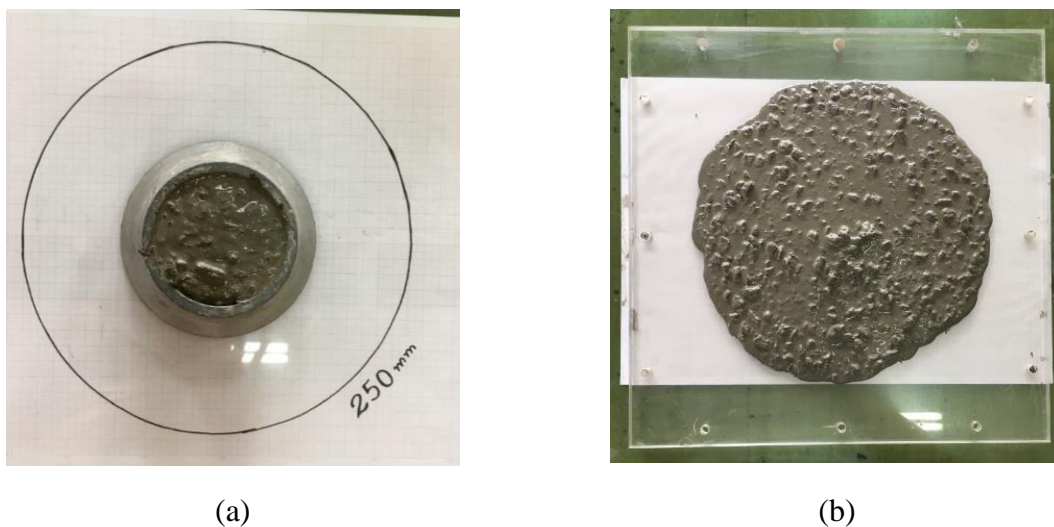


Figura 24 - Mini slump flow: a) Tronco de cone posicionado antes de ser medido o espalhamento; b) Espalhamento do material sobre placa de acrílico

5.2.12. Caracterização do concreto no estado fresco

Depois de realizados os ajustes, o concreto foi caracterizado no estado fresco. Para isto, as misturas foram produzidas em betoneira de 145 litros e motor de 1 CV. Os materiais foram inseridos na betoneira, de acordo com a NBR 12821 (2009), na seguinte sequência: Primeiramente foi adicionado o agregado graúdo e, aproximadamente, 1/3 do volume da água.

Em seguida, adicionou-se o cimento previamente homogeneizado com o RVM e mais 1/3 do volume de água. Por último, o agregado miúdo e o restante da água juntamente com o aditivo superplastificante. Este processo não excedeu 10 minutos de mistura.

A capacidade de fluidez foi determinada pelo ensaio de espalhamento *Slump Flow*, a viscosidade pelo ensaio de tempo de escoamento T_{500} e pelo método do Funil V e a determinação da habilidade passante foi realizada pelo método da Caixa L. As metodologias utilizadas estão apresentadas, em resumo, na Tabela 15.

Tabela 15 - Metodologias empregadas na caracterização do concreto no estado fresco

Propriedade	Ensaio	Metodologia
Capacidade de fluidez	Espalhamento <i>Slump Flow</i>	NBR 15823-2 (2010)
Viscosidade	Tempo de escoamento T_{500}	NBR 15823-2 (2010)
Habilidade passante	Método da Caixa L	NBR 15823-4 (2010)
Viscosidade	Método do Funil V	NBR 15823-5 (2010)

5.2.12.1. Capacidade de fluidez e de preenchimento

A capacidade de fluidez e de preenchimento foi testada por meio de ensaio de espalhamento *slump flow* com a orientação do cone de Abrams invertida (Figura 25 (a)). A medida do *slump flow* é ensaio mais conhecido e amplamente utilizado para caracterizar a fluidez do concreto, pela sua simplicidade de execução. Para o CAAD e para o CAA, o espalhamento horizontal reflete a capacidade do concreto fluir sob sua própria massa (tensão de escoamento) (KOEHLER & FOWLER, 2007).

A orientação invertida do cone foi escolhida pela facilidade de preenchimento com menores perdas de material. Nessa orientação a massa de concreto no interior do cone é suficiente para segurá-lo, eliminando a necessidade de uma pessoa ficar em pé nos pedais. Além disso, o espalhamento final é o mesmo, independentemente da orientação do cone, e a medida do tempo de escoamento (T_{500}) pode ser obtida com maior precisão (KOEHLER & FOWLER, 2007)

Primeiramente, o cone é posicionado sobre uma placa metálica com a marcação do diâmetro de 500 mm (Figura 25 (a)). Esta marca corresponde ao ensaio T_{500} que é feito em conjunto com o *slump flow*. Em seguida, o cone é preenchido com o concreto e levantado para

permitir que este flua. O material espalhado é medido em quatro direções para ser determinada a média, uma vez que o espalhamento não ocorre de forma uniforme para todas as direções (Figura 25 (b)).

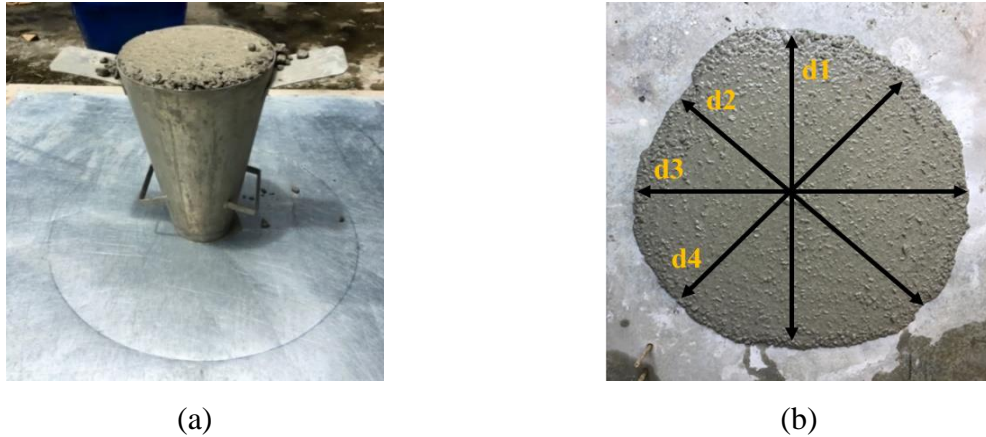


Figura 25 - Ensaio de espalhamento *slump flow*: a) orientação do cone; b) espalhamento.

5.2.12.2. Viscosidade

A viscosidade foi avaliada por meio de ensaios que quantificam o tempo de fluidez: o T500 e o método do Funil V. O primeiro foi realizado juntamente com o *slump flow*. Durante o ensaio foi cronometrado o tempo de escoamento do concreto até atingir um diâmetro de 500 mm. Como o ensaio foi realizado com o cone de Abrams invertido, o tempo de escoamento pode ser superior a 2 segundos (KOEHLER & FOWLER, 2007). No método do Funil V consiste em cronometrar o tempo em que o concreto leva para escoar do aparato (Figura 26 (a) e (b)).



Figura 26 - Método do Funil V: a) Aparato antes do ensaio; b) Aparato sendo preenchido.

5.2.12.3. Habilidade passante

A habilidade passante foi avaliada por meio do método da Caixa L. Este ensaio avalia a capacidade do concreto passar por obstáculos sem perder a coesão entre as partículas. Durante o ensaio o concreto flui do compartimento vertical para o compartimento horizontal da caixa, passando por uma grade de ferro que simula a armadura dentro das formas (Figura 27). São aferidas as alturas: inicial (H1) e final (H2). Quanto mais fluida estiver a mistura, mais nivelada estará ao final do ensaio.

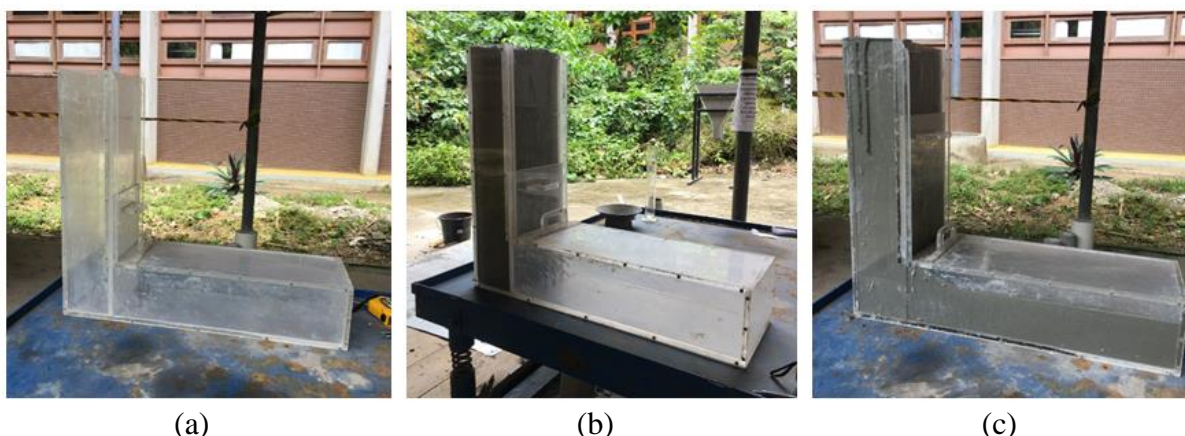


Figura 27 - Método da Caixa L: a) Caixa vazia antes do ensaio; b) Concreto posicionado na parte vertical da caixa durante o ensaio; c) Concreto após escoamento para a parte horizontal

5.2.13. Caracterização do concreto no estado endurecido

O concreto no estado endurecido foi caracterizado por meio de ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral e por absorção de água, conforme metodologias descritas na Tabela 16.

Tabela 16 - Metodologias empregadas na caracterização do concreto no estado endurecido

Ensaio	Metodologia
Resistência à Compressão Axial	NBR 5739 (2018)
Resistência à Tração por Compressão Diametral	NBR 7222 (2011)
Determinação da Absorção de Água por Imersão	NBR 9778 (2005)

Para os ensaios de compressão, tração e absorção de água foram executados 3 traços de concreto contendo 10, 15 e 20% de substituição parcial de cimento por RVM e um de

controle, sem o RVM. Para cada ensaio foram moldados corpos-de-prova (CPs) cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, conforme a norma NBR 5738 (2015), nas quantidades indicadas pela Tabela 17. Não foram utilizados aparatos para adensamento como vibradores ou hastes de metal. Após moldados, os corpos-de-prova foram submetidos à cura submersa até a idade para o ensaio (Figura 28 (a)). Após este período, foram envolvidos em papel filme PVC para não perderem umidade no transporte até o local do ensaio (Figura 28 (b)).

Tabela 17 - Quantidades de corpos-de-prova a serem produzidos para cada traço produzido

Tipo de ensaio	Quantidade de CPs RVM			Quantidade de CPs REF		
	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias	28 dias	56 dias
Compressão axial	4	4	4	4	4	4
Tração por compressão diametral		4			4	
Absorção de água		3			3	

5.2.13.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão das amostras de concreto foi determinada pela compressão axial, conforme norma NBR 5739 (2018). Para este ensaio foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. Antes do ensaio as extremidades dos corpos-de-prova foram retificadas (Figuras 28 (c) e 29 (b)). O procedimento foi realizado em prensa servo-hidráulica EMIC AC6.08 com velocidade de ensaio de 0,60 MPa/s (Figura 29 (a)). Com os resultados deste ensaio também foi calculado o índice de desempenho do RVM no concreto.

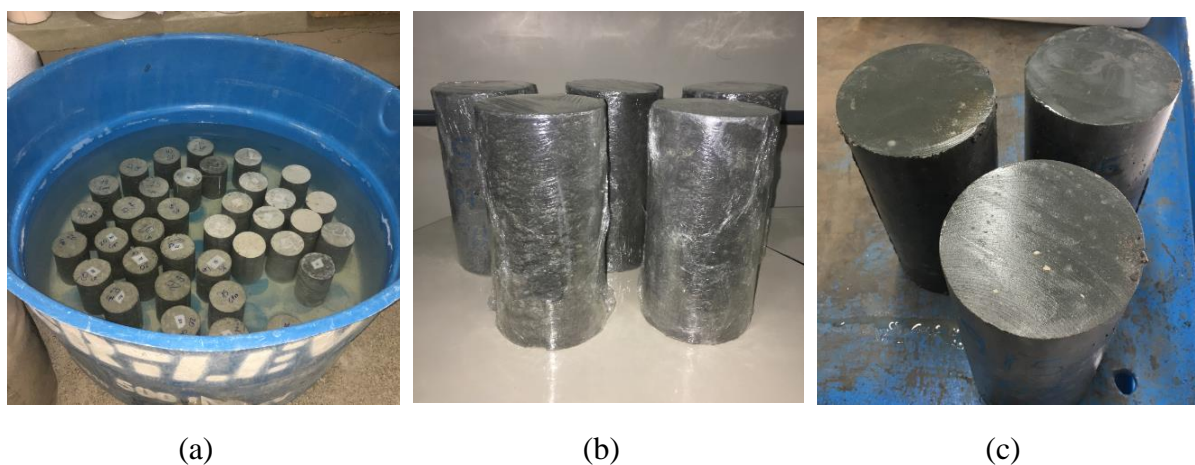


Figura 28 - Preparação dos corpos-de-prova: a) Cura submersa; b) Embalagem em filme PVC; c) Retificação das extremidades das amostras



(a)



(b)

Figura 29 - Ensaio à compressão: a) Prensa servo-hidráulica; b) Retífica faceadora

5.2.13.2. Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração foi determinada por meio de ensaio de compressão diametral, conforme norma NBR 7222 (2011). Após o período de cura, foram posicionadas taliscas de madeira, conforme indicação da referida norma. O ensaio foi executado em prensa hidráulica universal Contenco com capacidade para 1.000kN com velocidade de ensaio de 0,20 MPa/s (Figura 30).



(a)



(b)

Figura 30 - Ensaio de tração por compressão diametral: a) Prensa hidráulica universal utilizada; b) Corpo-de-prova posicionado durante o ensaio

5.2.13.3. Absorção de água

A absorção e água foi determinada por meio de imersão, conforme NBR 9778 (2005). Para este ensaio, os corpos-de-prova, foram secados em estufa a 90°C até a constância de massa. Em seguida foram imersos em recipiente com água até a completa saturação, determinada por constância de massa. As amostras foram pesadas e colocadas em aparelho de banho-maria adaptado que consiste em uma panela industrial munida de resistência e termostato (Figura 31 (a)). O banho foi mantido em 90°C durante 5h consecutivas (Figura 31 (b)).

Após o resfriamento natural, que ocorreu, aproximadamente, após 17 horas, foram determinadas as massas das amostras em balança hidrostática Solotest BG 4000 (Figura 32). Em seguida, as amostras foram secas superficialmente com um pano úmido e suas massas foram determinadas novamente ao ar (Figura 33 (a), (b) e (c)).

Além de quantificar a absorção, este ensaio também fornece informações importantes sobre o concreto como índice de vazios (I_v), massa específica da amostra seca (ρ_s), massa específica da amostra saturada (ρ_{sat}) e massa específica real (ρ_r).



(a)



(b)

Figura 31 - Ensaio de absorção de água: a) Corpos-de-prova em banho-maria; b) Temperatura da água confirmada com termômetro



Figura 32 - Determinação da massa do corpo-de-prova em balança hidrostática após banho-maria

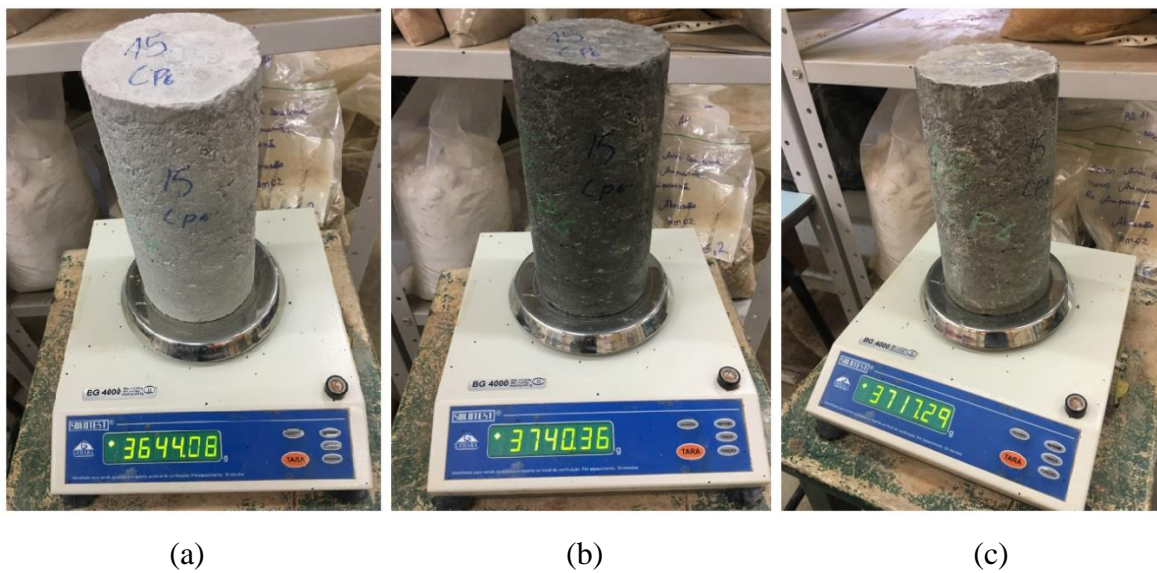


Figura 33 - Aferição da massa dos corpos-de-prova: a) Após secagem em estufa; b) Após imersão; c) Após banho-maria

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Estudo da moagem do resíduo de vidro

Como mencionado anteriormente, o material obtido durante o estudo da moagem foi analisado por meio de granulometria por difração à laser. Para análises granulométricas de partículas são considerados como parâmetros os tamanhos D_{10} , D_{50} e D_{90} para determinar a distribuição dos grãos. O D_{50} é o valor que divide a distribuição de partículas, onde 50% encontra-se abaixo e 50% acima. Comumente o D_{50} é considerado como representativo do tamanho médio das partículas. Do mesmo modo, o D_{90} e D_{10} representam o valor em que 90% e 10% das partículas encontram-se abaixo destes diâmetros respectivamente (HORIBA, 2016). Portanto, é adequado que os três parâmetros sejam indicados quando se pretende caracterizar a distribuição granulométrica de um determinado material particulado. As tabelas com os valores de cada moagem encontram-se no Anexo I.

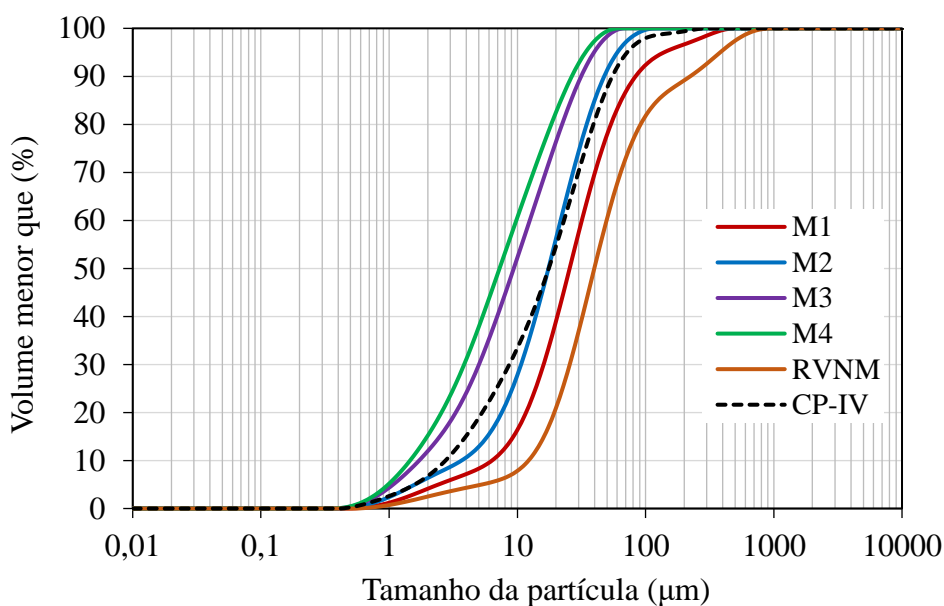


Figura 34 - Representação gráfica das curvas granulométricas resultado das moagens

Pela análise das distribuições granulométricas (Figuras 34 e 35), foi possível identificar que o resíduo não moído (0h) apresentava partículas de dimensões maiores que a do cimento utilizado nesta pesquisa. Como resultado das moagens, observou-se uma distribuição mais uniforme de partículas, onde apenas M3 e M4 alcançaram o objetivo proposto, reduzindo o tamanho das partículas a uma graduação inferior à do cimento. Desta forma, podem atuar como efeito “fíler”, preenchendo os espaços deixados pelas partículas de cimento e, assim, proporcionar maior densidade para a matriz.

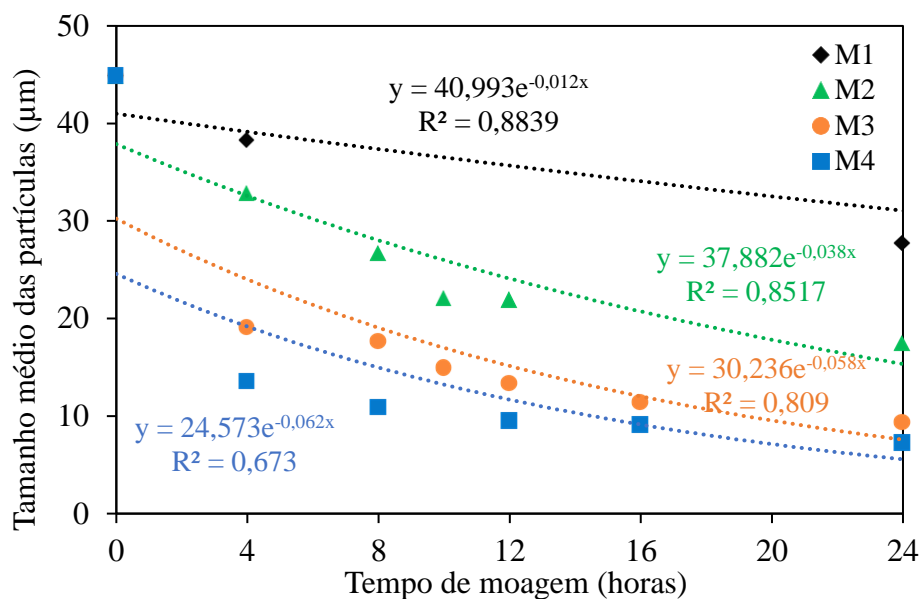


Figura 35 - Representação gráfica do rendimento das moagens durante 24 horas

O desempenho obtido para as moagens realizadas levou em consideração dois fatores: (i) quantidade de corpos moedores e (ii) energia desenvolvida por este moinho. Observou-se que quanto menor a relação material:esferas e quanto maior a energia empregada na moagem, maior foi o refinamento obtido. Comparando-se as moagens com mesma energia empregada, se sobressai a moagem com menor relação material:esferas. Entre as moagens M1 e M2 a com maior rendimento foi a M2, pois sua relação foi de 1:3, enquanto M1 foi de 2:3. Entre as moagens M3 e M4, apesar de parecidas, o maior rendimento foi observado na M4 (relação 1:3). Além disso, as moagens realizadas em moinho com mais rotações por minuto (M3 e M4) apresentaram melhor desempenho em relação às demais.

Em termos de “tempo de moagem”, observa-se que para M1, a partir de 24 horas no moinho, não há diferenças significativas no tamanho médio das partículas de vidro (Tabela 18). As partículas obtidas ao final da moagem em M2 e M3 apresentam 61% e 79% de redução em relação ao resíduo não moído, respectivamente. No entanto, o maior rendimento pode ser observado nas quatro primeiras horas em todas as moagens (Figura 36). Comparando-se a curva granulométrica obtida nas quatro primeiras horas com a curva obtida ao final da moagem mais eficiente (M4) (Figura 36), observa-se que a primeira já possuía partículas com tamanhos inferiores ao do cimento. No entanto, o comportamento da fração fina (< 10 µm) ainda era próximo ao do cimento.

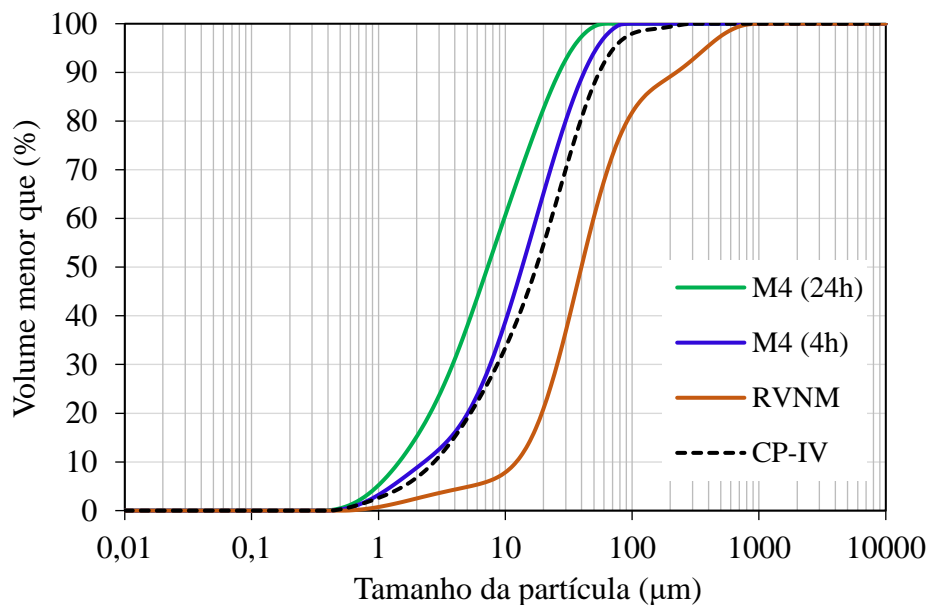


Figura 36 - Representação gráfica das curvas granulométricas de 4h e 24h da moagem M4

Das moagens executadas, a M4 apresentou melhor desempenho em relação às demais (Tabela 19). Ao final das 24 horas, 90% das partículas alcançaram tamanho menor que 27 μm e tamanho médio (D_{50}) de 7,26 μm , o que representa uma redução de, aproximadamente, 84% do tamanho inicial. Em comparação, Sousa Neto (2014) obteve, ao final de 32 horas de moagem utilizando moinho e metodologia semelhante, partículas com 11 μm de tamanho médio, aproximadamente. Este valor representa um rendimento de cerca de 79% em relação ao tamanho de partículas inicial.

Tabela 18 - Tamanho médio das partículas das moagens realizadas em moinho de bolas com motor de 1670 rpm

M1			M2		
Tempo (h)	D_{50}	Redução (%)*	Tempo (h)	D_{50}	Redução (%)*
0	44,87	100	0	44,87	100
4	38,30	15	4	32,85	27
24	27,72	38	8	26,65	41
32	26,96	40	10	22,07	51
36	27,35	39	12	21,93	51
48	25,56	43	24	17,48	61

*Em relação às partículas não moídas (0 h)

Tabela 19 - Tamanho médio das partículas das moagens realizadas em moinho de bolas com motor de 1720 rpm

M3			M4		
Tempo (h)	D ₅₀	Redução (%)*	Tempo (h)	D ₅₀	Redução (%)*
0	44,87	100	0	44,87	100
4	19,09	57	4	13,57	70
8	17,68	61	8	10,92	76
10	14,95	67	10	-	-
12	13,39	70	12	9,52	79
16	11,40	75	16	9,12	80
24	9,37	79	24	7,26	84

*Em relação às partículas não moídas (0 h)

6.2. Caracterização de materiais

6.2.1. Resíduo de vidro

Com os resultados da espectrometria de fluorescência de raios-X foi possível observar que o RVM estudado é composto majoritariamente por óxido de silício, seguido por óxido de cálcio e óxido de sódio (Tabela 20). Desta forma, pode ser classificado, segundo a NBR NM 294 (2004), como vidro silicato sodocálcico. Ficou evidenciado também, aproximadamente, 74% de componentes reativos (Tabela 21). Esse teor é superior aos valores mínimos de cada classe de material pozolânico recomendados pela norma NBR 12653 (2014), atendendo a este requisito.

No entanto, o teor de álcalis encontrado no RVM é superior ao teor encontrado na amostra de cimento e excede o limite estabelecido pela referida norma. Um alto teor de álcalis não é característica desejada, pois pode influenciar na ocorrência das RAS. Não foi detectada presença de óxido de enxofre (SO₃) na amostra. A perda ao fogo obtida pela análise térmica (TG) está dentro dos limites das classes de materiais pozolânicos, sendo 20% o máximo para a classe N e 6% para as classes C e E.

Tabela 20 - Comparação da composição química do RVM resultante da moagem M4 com os requisitos da NBR NM 294 (2004) para vidro silicato sodocálcico

Óxido	RVM (%)	Requisito mínimo da NBR NM 294 (2004) (%)
SiO ₂	72,72	69 a 74
CaO	14,35	5 a 12
Na ₂ O	8,58	12 a 16
MgO	2,06	0 a 6
Al ₂ O ₃	0,97	0 a 3
Fe ₂ O ₃	0,52	-
P ₂ O ₅	0,42	-
K ₂ O	0,18	-

Tabela 21 - Requisitos químicos para materiais pozolânicos segundo a NBR 12653 (2014)

Propriedade	RVM (%)	Requisito mínimo da NBR 12653 (2014) (%)
Equivalente de componentes reativos: (SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	74,2	> 70
Teor de álcalis: (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O)	8,70	≤ 1,5
Teor de sulfato (SO ₃)	-	≤ 5,0
Perda ao fogo	4,37	≤ 10

A caracterização de estrutura cristalina foi realizada comparando-se o resíduo de vidro não moído (RVNM) e o resíduo de vidro moído (RV). É possível observar nos difratogramas da Figura 37 a presença de uma banda tipicamente amorfa entre 15 e 40° nas duas amostras, proveniente da presença de óxido de silício (SiO₂) na amostra (GALVÃO *et al.*, 2014; SOLIMAN & TAGNIT-HAMOU, 2016). No entanto, também se observa a presença de materiais cristalinos como quartzo e calcita. Segundo Lohtia & Joshi (1995), pozolanas constituídas, em sua maior parte, por material amorfo com uma pequena quantidade de material cristalino, geralmente, composto por quartzo (SiO₂), mulita (3Al₂O₃2SiO₂ ou 2Al₂O₃SiO₂), hematita (Fe₂O₃) ou magnesita (MgCO₃), são classificados como pozolanas de atividade intermediária. A Tabela 22 apresenta as referências utilizadas na identificação das fases.

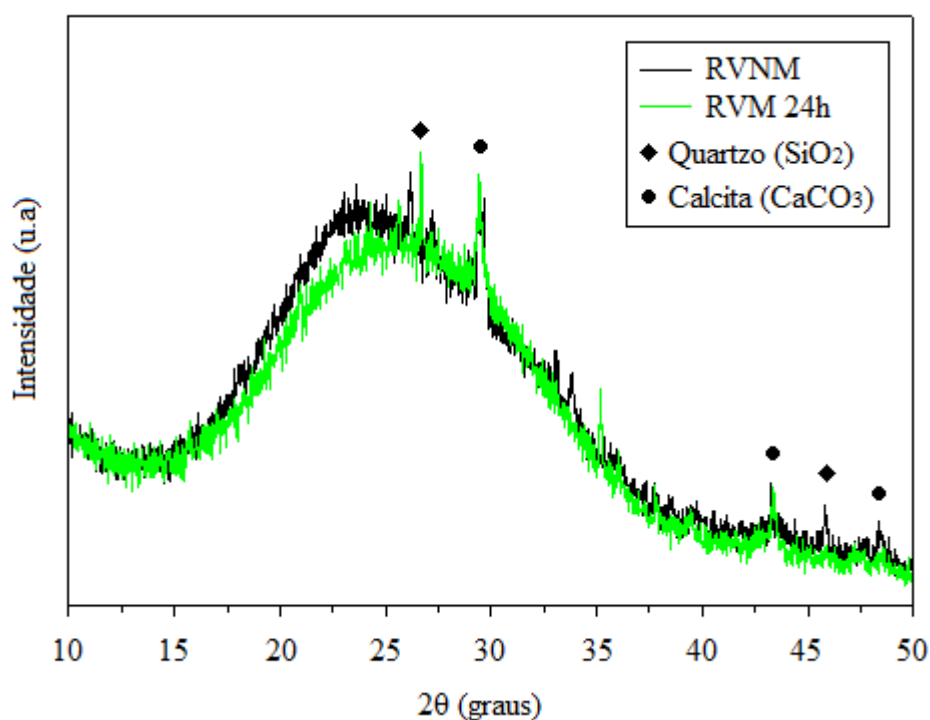


Figura 37 - Comparação de difratogramas do resíduo de vidro moído e não moído

Tabela 22 - Referências utilizadas na identificação de fases cristalinas do RVM

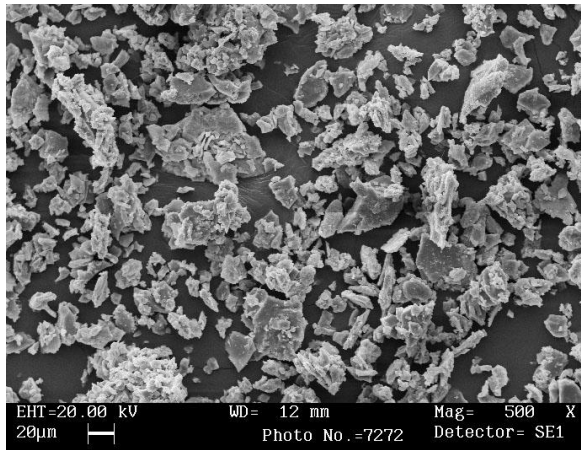
Fases	Fórmula química	Referência
Quartzo	SiO ₂	ICDD 33-1161 <i>apud</i> Barros (2016)
Calcita	CaCO ₃	ICDD 05-0586 <i>apud</i> Barros (2016)

As características físicas obtidas dos ensaios de picnometria e granulometria por difração à laser encontram-se na Tabela 23. Comparativamente aos resultados obtidos para o cimento (Tabela 25), o RVM apresenta área superficial específica 1,76 vezes maior que o cimento, tamanho médio de partículas 2,13 vezes menor e massa específica 1,12 vezes menor.

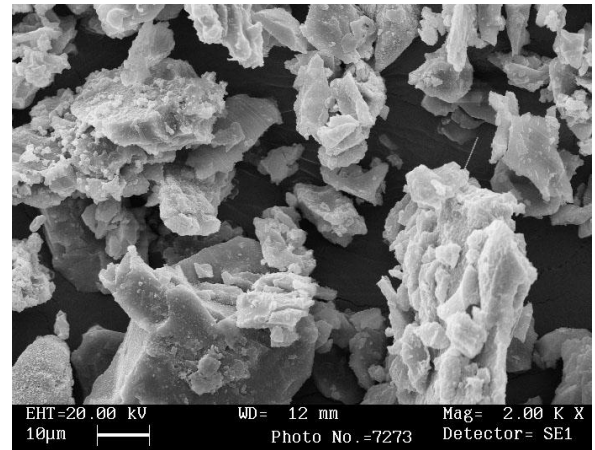
Tabela 23 - Características físicas do RVM resultante da moagem M4

Parâmetro	RVM
Massa específica (g/cm ³)	2,49
Área superficial específica (m ² /kg)	1620
Tamanho de partículas D ₁₀ (µm)	1,46
Tamanho de partículas D ₅₀ (µm)	7,26
Tamanho de partículas D ₉₀ (µm)	26,57

A morfologia das partículas pôde ser observada por meio das micrografias. Antes do processo de moagem, as partículas de resíduo de vidro apresentavam geometria irregular. Após moagem as partículas apresentam arestas mais arredondadas, como é possível observar comparando-se as Figuras 38 e 39. Esta morfologia também foi observada por Du & Tan (2017). A forma arredondada favorece o empacotamento das partículas e, assim, o preenchimento dos espaços deixados pelos grãos de cimento.

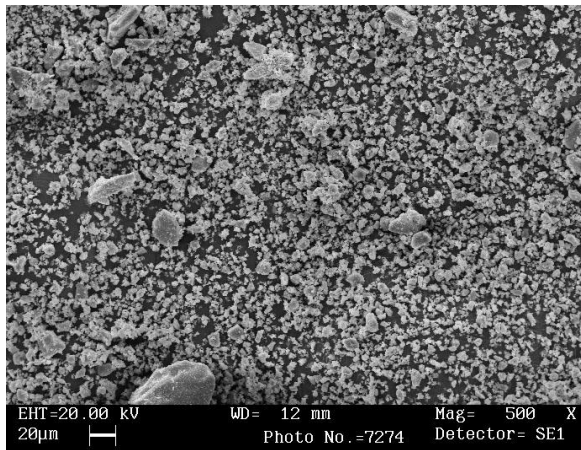


(a)

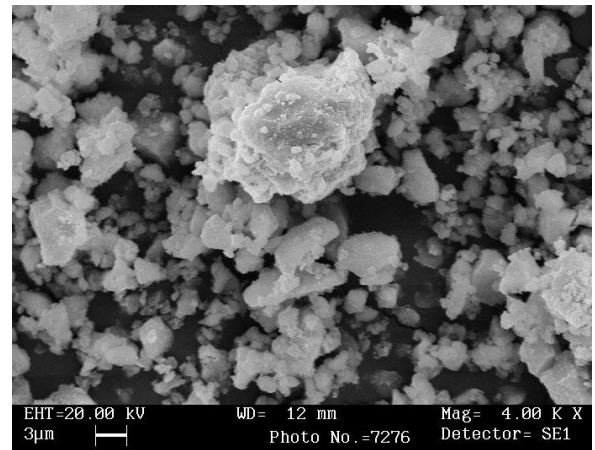


(b)

Figura 38 - Micrografia do resíduo de vidro não moído: (a) com aumento de 500x; (b) com aumento de 2000x



(a)



(b)

Figura 39 - Micrografia do resíduo de vidro moído: (a) com aumento de 500x; (b) com aumento de 4000x

6.2.2. Cimento

O alto teor de óxido de silício (SiO_2) observado no ensaio de espectrometria de fluorescência e confirmado por difração de raios-x, caracteriza o cimento estudado como sendo, de fato, um cimento pozolânico. As características químicas (Tabela 24) e físicas (Tabela 25) atendem às especificações da NBR 16697 (2018).

A referida norma não faz especificações sobre o teor de MgO , porém é válido ressaltar que seu teor é, geralmente, limitado em 4 a 5%. Teores excessivos deste óxido podem causar expansão destrutiva do concreto endurecido através da reação lenta com a água (TAYLOR, 1997). O cimento estudado possui teor de MgO de 1,5%, abaixo do limite permitido. O teor de álcalis também é um parâmetro importante a ser considerado, uma vez que reagem com a sílica dos agregados e do RVM causando expansões. A norma americana ASTM C 150 recomenda limitar o teor de álcalis em 0,6% de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$. Sendo assim, o teor de álcalis do cimento CP-IV está dentro do limite permitido.

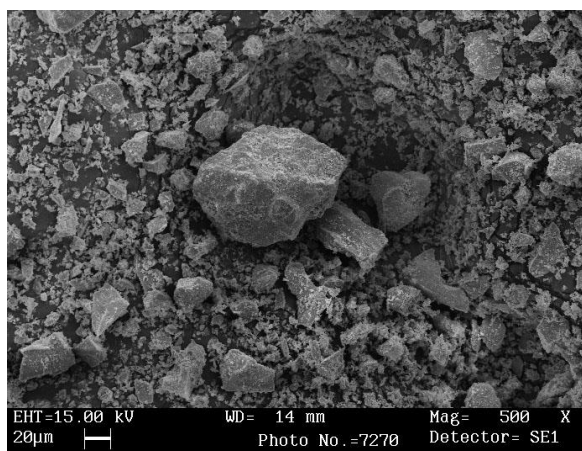
Tabela 24 - Características químicas do cimento CP-IV

Óxido	CP-IV (%)	Exigências da NBR 16697 (2018) (%)
SiO_2	28,05	-
CaO	56,1	-
MgO	0,81	-
Al_2O_3	7,18	-
Fe_2O_3	3,65	-
P_2O_5	0,41	-
K_2O	0,53	-
SO_3	2,43	$\leq 4,5$
Material carbonático CaCO_3 ($\text{CaO} \div 0,56$)	100,18	> 75
Equivalente de componentes reativos: ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$)	38,88	-
Teor de álcalis: ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} +$ $0,658 \text{ K}_2\text{O}$)	0,35	-

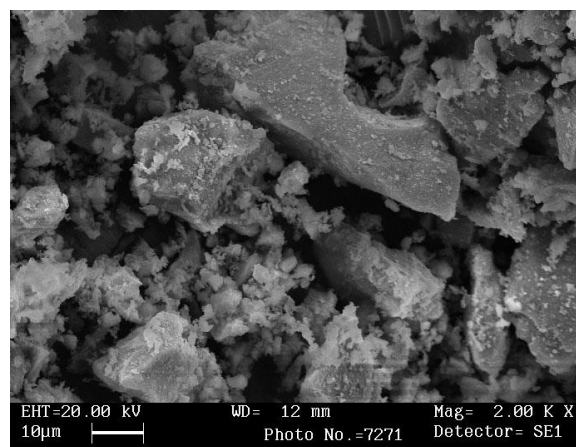
O cimento utilizado apresentou características físicas com especificações dentro das exigências da NBR 16697 (2018) com exceção da resistência à compressão aos 28 dias. A micrografia da Figura 40 (a) e (b) apresenta partículas com morfologia angulosa, semelhante à do resíduo de vidro não moído.

Tabela 25 - Características físicas do cimento CP-IV

Parâmetro	CP-IV	Exigências da NBR 16697 (2018)
Massa específica (g/cm ³)	2,78	-
Área superficial específica (m ² /kg)	917	-
Tempo de início de pega (min)	132	≥ 60
Tempo de fim de pega (min)	214	≤ 720
Finura na peneira 75µm (%)	1,62	≤ 8
Perda ao fogo (%)	5,7	≤ 6,5
Tamanho de partículas D ₁₀ (µm)	2,75	-
Tamanho de partículas D ₅₀ (µm)	17,57	-
Tamanho de partículas D ₉₀ (µm)	55,01	-
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	≥ 10
	7 dias	≥ 20
	28 dias	≥ 32



(a)



(b)

Figura 40 - Micrografia do cimento: (a) com aumento de 500x; (b) com aumento de 2000x

Ao contrário do RVM, o cimento apresenta fases cristalinas bem definidas. Na Figura 41 é possível observar, conforme indica Taylor (1997) a presença de silicato tricálcico (C_3S) nos picos característicos $32,14^\circ$, $32,55^\circ$, $34,30^\circ$, $41,32^\circ$, $51,66^\circ$, $56,35^\circ$, 60° , $62,14^\circ$ e $67,74^\circ$; silicato dicálcico (C_2S) nos picos $29,38^\circ$ e $46,94^\circ$; aluminato tricálcico (C_3A) nos picos 25° , $33,35^\circ$ e 47° ; e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) nos picos característicos $11,69^\circ$ e $12,39^\circ$. Além dessas fases, é possível notar picos em torno de 21° e 27° , característico de materiais silicosos (TAYLOR, 1997). Estes picos, principalmente o de 27° se explicam pelo alto teor de material pozolânico presente no cimento CP-IV estudado.

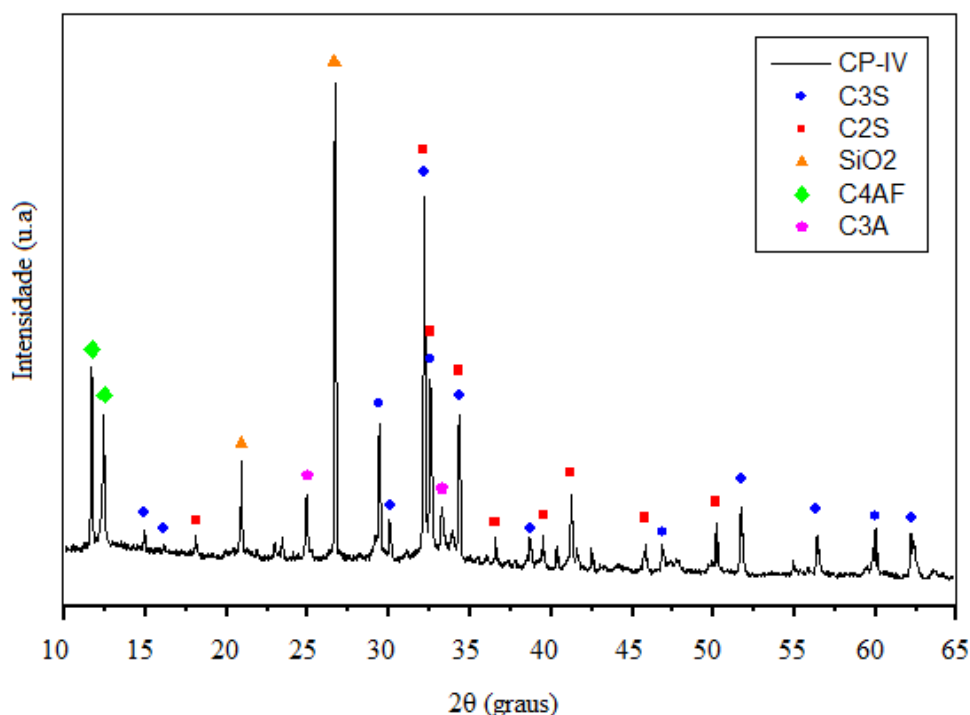


Figura 41 - Difratograma do cimento CP-IV feito com ângulo de difração entre o feixe incidente de raios-x e seu prolongamento de 2θ e anodo de cobre.

Tabela 26 - Referências utilizadas na identificação de fases cristalinas do cimento

Fases	Fórmula química	Referência
Silicato tricálcico (C_3S)	Ca_3SiO_5	Taylor (1997)
Silicato dicálcico (C_2S)	Ca_2SiO_4	ICSD 82997
Aluminato tricálcico (C_3A)	$Ca_3Al_2O_6$	ICSD 151369
Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF)	Ca_2AlFeO_5	Taylor (1997)
Óxido de silício (SiO_2)	SiO_2	ICSD 89284

6.2.3. Agregado graúdo e miúdo

Os agregados foram selecionados de modo a atenderem às especificações do item 3.1.1.1. Desta forma, as propriedades dos agregados obtidas por meio de ensaios normatizados, também estão em concordância com os critérios da seleção. Os resultados estão apresentadas na Tabela 27.

Tabela 27 - Propriedades dos agregados miúdo e graúdo

Propriedade	Areia	Brita
Módulo de finura	2,79	3,13
Dimensão máxima característica (mm)	1,20	12,50
Massa específica (g/cm ³)	2,67	2,70
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,59	2,62
Teor de umidade superficial (%)	2,16	-
Absorção de água (%)	-	1,10

O teor de impurezas da areia, determinado segundo a norma NBR NM 49 (2001), indica que a quantidade de matéria orgânica da areia utilizada está acima do desejado (Figura 42). Porém, esse resultado não limita o seu uso. Segundo Perdiz (2009), as areias oriundas de jazidas naturais, utilizadas como agregado miúdo no estado do Amazonas, sofrem grande influência do material orgânico proveniente da floresta alagada em função do ciclo de enchentes e vazantes dos rios. Portanto, as areias utilizadas em Manaus normalmente não se enquadram nos limites permitidos pela norma.

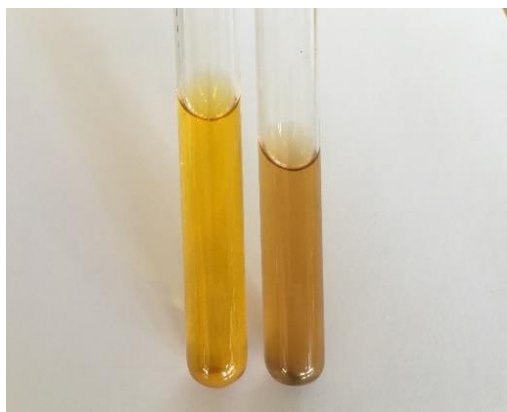


Figura 42 - Solução padrão à esquerda e solução com a areia à direita

6.3. Análise térmica das pastas

O resultado das análises térmicas aos 28 dias está representado graficamente nas Figuras 43 e 44. Observa-se que a desidratação do C-S-H e da etringita até, aproximadamente 200°C. Esta fase é composta por dois picos: o primeiro à 59°C e o segundo a 91°C. a desidroxilação da C-H foi registrada em torno de 445°C e a descarbonatação da C-C à 630°C.

Poucas mudanças foram observadas nas intensidades e posicionamento dos picos de C-H, conforme a variação dos teores de RVM nas misturas (Figura 44). Já para o C-C, ficou evidenciado menor a quantidade deste óxido na mistura, conforme o aumento do teor de RVM.

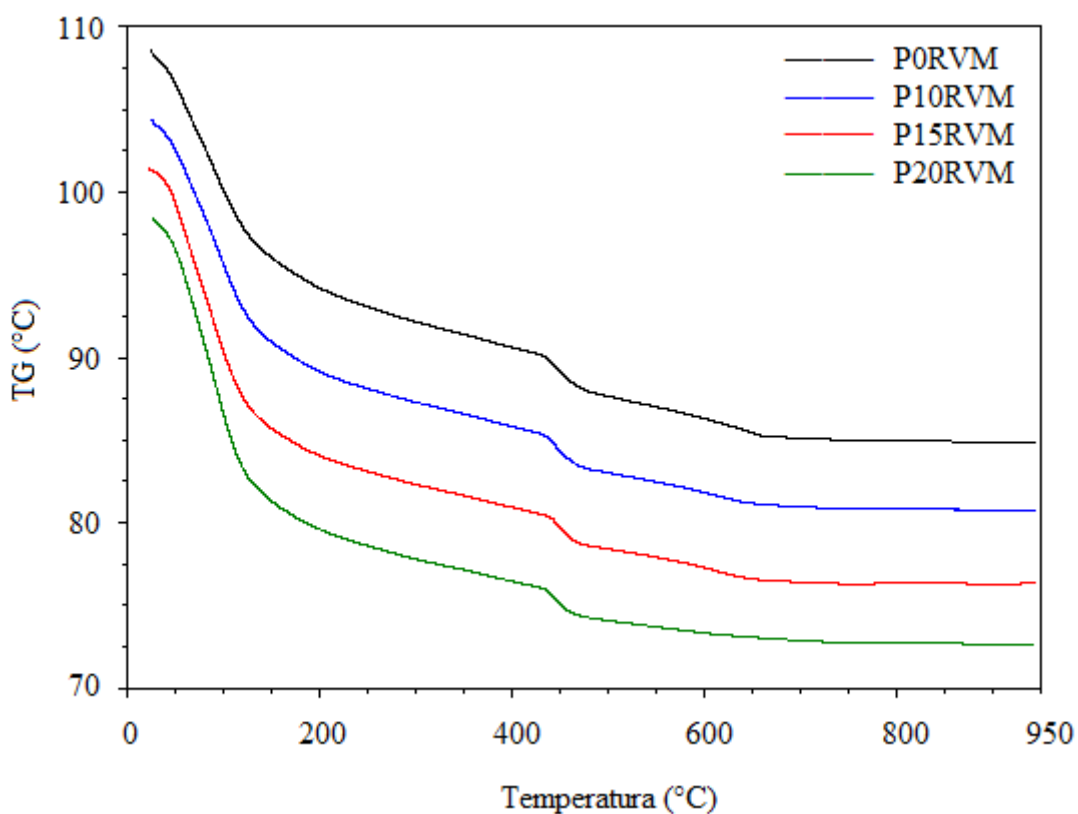


Figura 43 - Curvas TG das pastas cimentícias com 0%, 10%, 15% e 20% de RVM aos 28 dias.

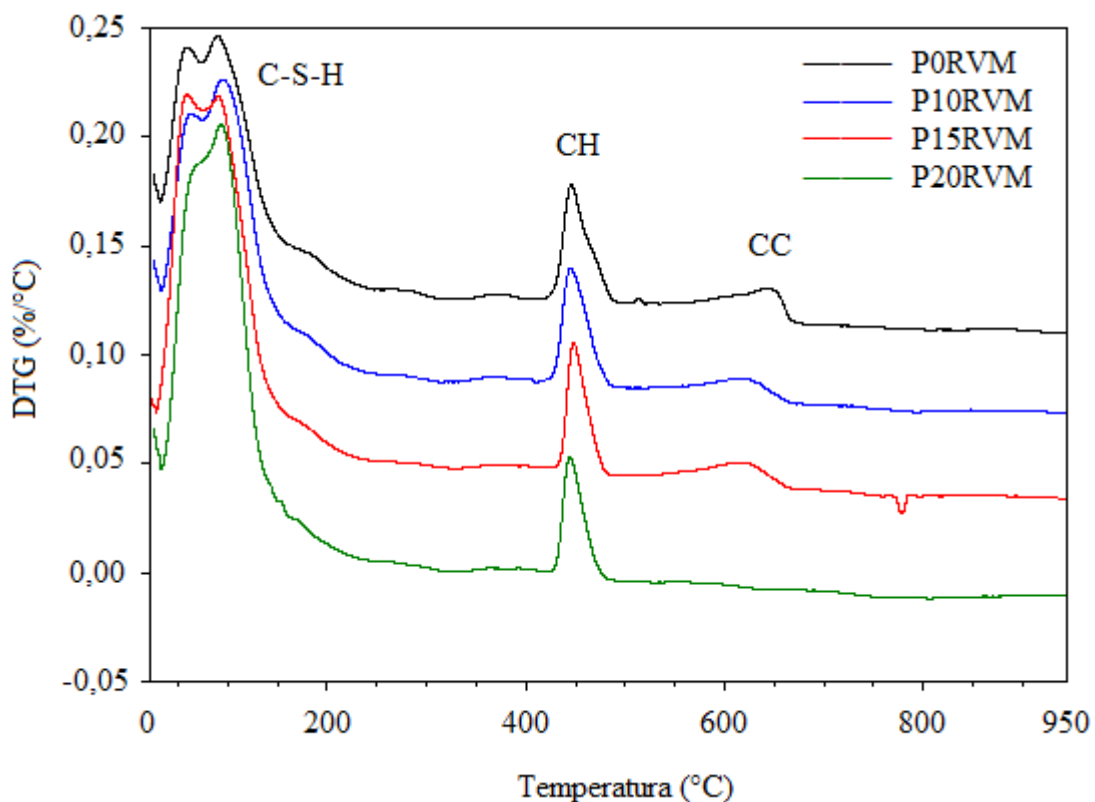


Figura 44 - Curvas DTG das pastas cimentícias com 0%, 10%, 15% e 20% de RVM aos 28 dias.

Para uma matriz constituída por 100% de Cimento Portland comum (CP-I), a quantidade de C-H normalmente formada após 28 dias de cura é de cerca de 20% em peso dos produtos de hidratação (BIGNOZZI, 2015). Assumindo que 20%, em peso, de cimento seja substituído por um constituinte inerte, que não participa das reações de hidratação do cimento, o teor de C-H após 28 dias, é esperado que o teor de C-H presente na mistura seja de, aproximadamente, 16%. Logo, 20% de MCS será capaz de consumir inteiramente o C-H na mistura e os 4% restantes atuariam como material de preenchimento.

No entanto, o teor de C-H calculado demonstra uma tendência diferente. O cimento Portland estudado é do tipo CP-IV. Este tipo de cimento geralmente conta com teores de material pozolânico de 15 a 50%, em peso, em sua composição. Por esse motivo, aos 28 dias de cura, a pasta de controle (P0RVM) apresentou teor de C-H de 0,72% (Tabela 28). O MCS presente no cimento foi suficiente para consumir todo C-H disponível na mistura. Logo, não houve variações significativas no teor de CH presente nas pastas P10RVM, P15RVM, e P20RVM.

Tabela 28 - Teores de água quimicamente combinada com os compostos de hidratação, hidróxido e carbonato de cálcio (%)

Tratamento	Teor em massa (%)		Água quimicamente combinada com AFT, C-S-H, CASH, CAH (%)	CH (%)	CC (%)
	Cimento	RVM			
P0RVM	100	0	20,00	0,72	0
P10RVM	90	10	22,87	0,78	0
P15RVM	85	15	27,64	0,74	0
P20RVM	80	20	32,03	0,77	0

6.4. Eficiência do RVM na argamassa

As médias resultantes dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias e o fator de eficiência de corpos-de-prova de argamassa com diferentes teores de substituição parcial de cimento por RVM estão representadas nas Figura 45 e 46, respectivamente.

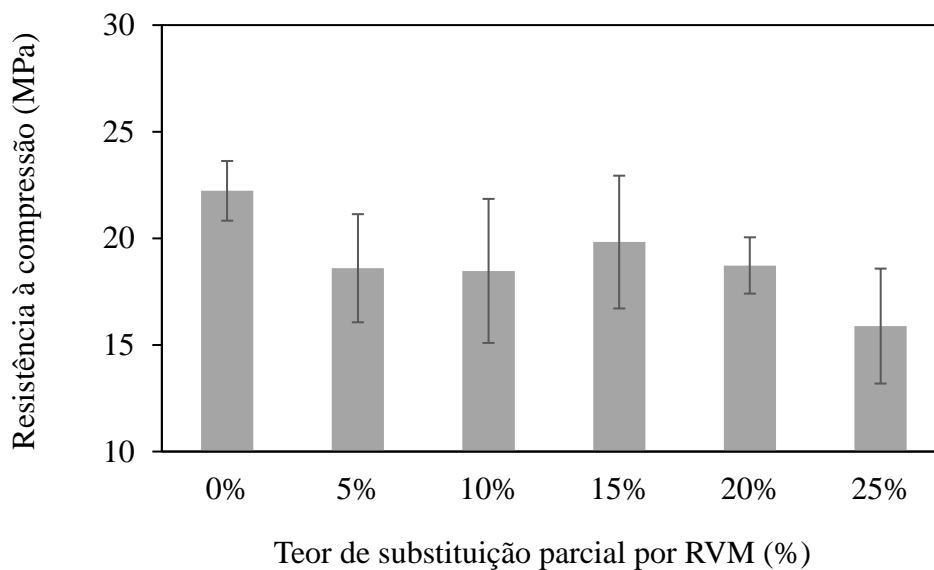


Figura 45 - Relação entre resistência à compressão aos 28 dias e o teor de substituição parcial do cimento por RVM

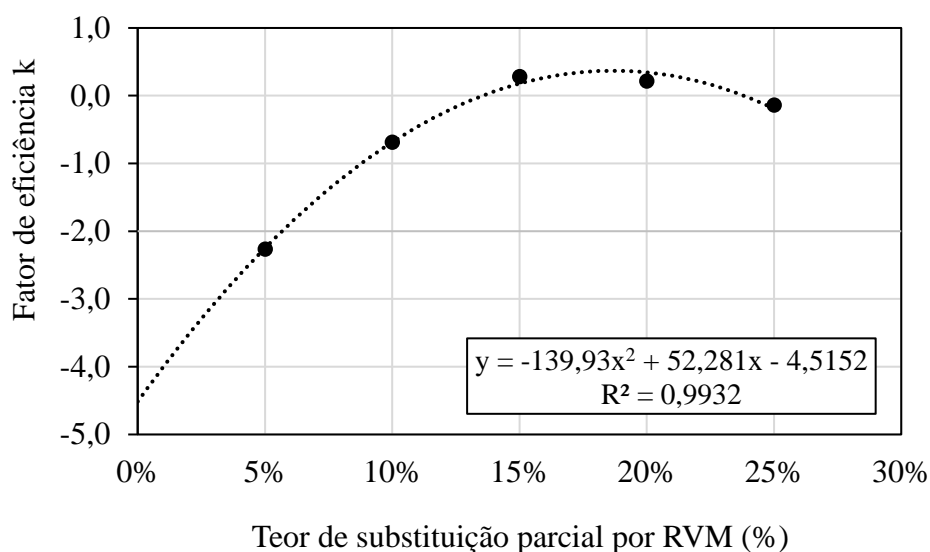


Figura 46 - Relação entre o fator de eficiência aos 28 dias e o teor de substituição parcial do cimento por RVM

Dentre as argamassas com substituição parcial de cimento por RVM, o tratamento com 15% de RVM apresentou maior resistência à compressão. Em comparação ao tratamento controle (0% RVM), as argamassas com teores de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de RVM apresentaram redução da resistência a compressão de 14%, 18%, 9%, 18% e 27%, respectivamente (Tabela 28). No entanto, a análise estatística realizada não apresentou diferenças entre as misturas. Para um nível de significância de 1%, pela ANOVA (Tabela 29) não há diferenças estatísticas ($p > 0,01$) significativas entre os teores de RVM estudados.

Dentre os tratamentos investigados, as argamassas com 15% e 5% de RVM apresentaram o maior e o menor fator de eficiência k, respectivamente. Teores de substituições acima de 15%, mostraram uma tendência a apresentarem menor eficiência. Este resultado infere que o teor ótimo de RVM na mistura é 15%. No entanto, todas as argamassas com RVM apresentaram $k < 1,00$ (Tabela 30) e apenas os teores de 15 e 20% possuem $k > 0$. Logo, a substituição parcial de cimento por RVM demonstra possuir eficiência inferior à mistura de controle. Com base nestes resultados foram escolhidos os teores de 10%, 15% e 20% de RVM para serem estudados na dosagem do concreto.

É possível que este comportamento ocorra devido ao teor ótimo de substituição de cimento por RVM. Como o cimento utilizado é do tipo CP-IV com elevado teor de material pozolânico em sua composição, a adição de RVM passa a agir apenas como material de

preenchimento. O teor de RVM presente nas misturas é superior ao necessário para reagir com a cal liberada Ca(OH)_2 durante o processo de hidratação do cimento.

Tabela 29 - Análise de variância das médias dos tratamentos

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Valor-P
Tratamentos	5	85,214	17,043	2,105	0,112
Resíduos	18	145,745	8,097		
Total	23	230,959			

Tabela 30 - Dados obtidos no ensaio de resistência à compressão de argamassas aos 28 dias

	Teor de substituição parcial de cimento por RVM					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
fc (Mpa)	22	19	18	20	19	16
d.p.	4,42	3,42	2,32	2,53	1,73	1,58
I.C.	4,33	3,35	2,28	2,48	1,70	1,55
k ₂₈	-	-2,27	-0,69	0,28	0,21	-0,14
ID ₂₈	-	84%	83%	89%	84%	71%

Onde:

fc: média das resistências à compressão

d.p.: desvio-padrão calculado

I.C.: intervalo de confiança

K₂₈: fator de eficiência-k aos 28 dias de cura

ID₂₈: índice de desempenho

6.5. Índice de desempenho do RVM com o cimento na argamassa

O índice de desempenho aos 28 dias (ID₂₈) também foi determinado analisando-se a resistência à compressão dos corpos-de-prova de argamassa. A NBR 12653 (2014) admite que para 25% de substituição parcial, materiais pozolânicos devem apresentar índice de desempenho de 90%. O único teor estudado que se aproxima do limite da referida norma é o de 15% de RVM (Tabela 30). Segundo a norma brasileira, esse é um indicador de que as misturas com 5%, 10%, 20% e 25% de RVM possuem baixa atividade pozolânica aos 28 dias.

As argamassas com 25% de RVM obtiveram o menor desempenho, comparado às demais misturas. Esses resultados estão de acordo com o fator de eficiência-k. Portanto, para se determinar o desempenho de determinado MCS, é recomendado que sejam analisados diferentes teores de substituição parcial do cimento. Desta maneira evita-se classificações equivocadas. Em contraste com norma brasileira, as normas americana (ASTM C 618, 2005) e europeia (EN 450-1, 2012) admitem o valor mínimo de 75% para se determinar o desempenho de materiais pozolânicos. Sendo assim, de acordo com as referidas normas, todos os teores de substituição parcial estudados, com exceção de 25%, apresentam atividade pozolânica aos 28 dias.

6.6. Mitigação das reações álcalis-sílica

As expansões provocadas pelas reações álcalis-sílica (RAS) durante o ensaio acelerado estão representadas na Figura 47. As combinações do cimento padrão com as substituições de 10%, 15% e 20% de RVM e agregado reativo apresentaram expansões de 0,28%, 0,24% e 0,18% aos 14 dias e 0,50%, 0,42% e 0,33% aos 28 dias em cura alcalina, respectivamente. É evidente que, conforme o aumento de teor de RVM na mistura, menores foram as expansões observadas.

A substituição parcial de cimento padrão por 20% de RVM ocasionou reduções de, aproximadamente, 40% das expansões aos 14 e aos 28 dias. Entretanto, apenas as misturas com esse teor de RVM apresentaram resultados abaixo do limite da NBR 15577-1 (2018) aos 14 dias foi 20%. Aos 28 dias todas as barras de argamassa com teores investigados apresentaram expansões acima do limite permitido. Este comportamento pode ter sido influenciado pelo alto teor de álcalis (8,70%) presente no RVM, conforme observado por Bignozzi *et al.* (2015). Para evitar riscos de manifestações patológicas referentes à RAS, é necessário a utilização de um cimento pozolânico, da substituição do agregado e/ou da combinação com outro MCS, como a sílica ativa ou o metacaulim.

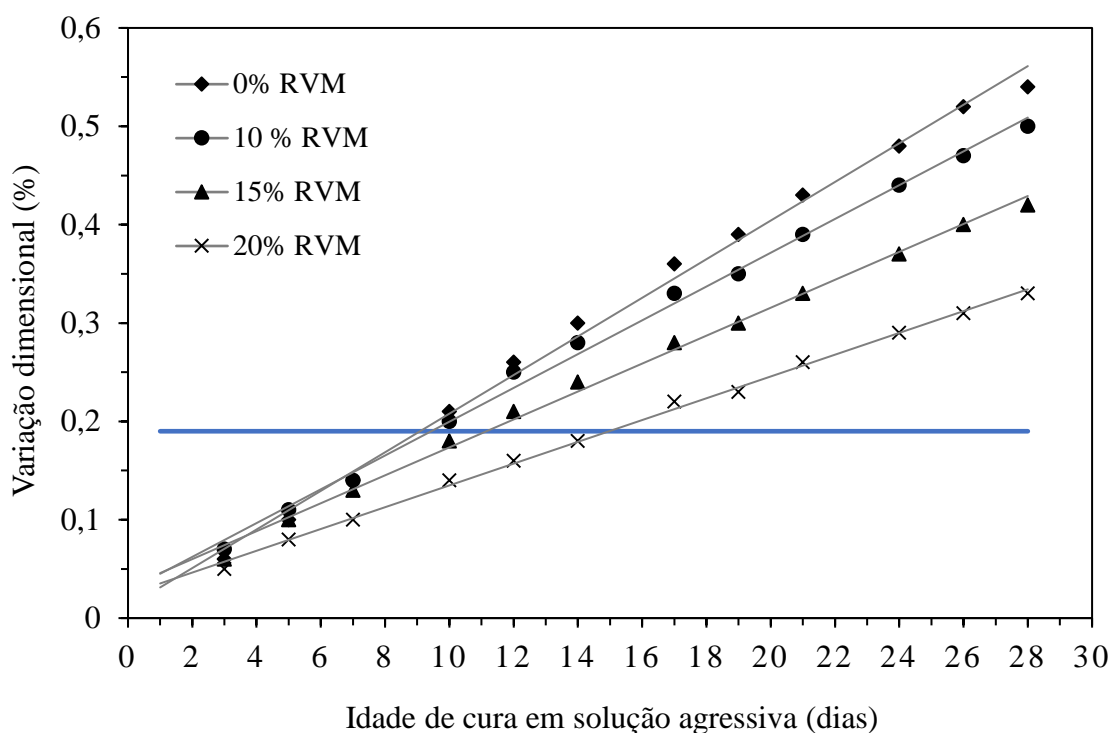


Figura 47 - Representação gráfica das expansões nas barras de argamassa

6.7. Avaliação das propriedades do concreto no estado fluido

No estado fluido os quatro concretos desenvolvidos apresentaram espalhamento compatível com o concreto autoadensável (> 550mm) e IEV = 1 (Tabela 31), ou seja, um concreto estável sem evidência de segregação e ligeira exsudação observada como um brilho na massa de concreto. As misturas com teores de RVM apresentaram aumento no espalhamento conforme acréscimo no teor de RVM (Figura 48). Rehman *et al.* (2018) também observaram o mesmo efeito do pó de vidro no concreto autoadensável.

Tabela 31 - Resultados dos testes no estado fresco

Mistura	SF (mm)	T ₅₀₀ (s)	IEV	Caixa-L (H ₂ /H ₁)	Funil-V (s)
C0RVM	774	6,9	1	1	10,0
C10RVM	726	6,6	1	1	7,7
C15RVM	746	10,0	1	1	10,6
C20RVM	773	9,3	1	1	10,6

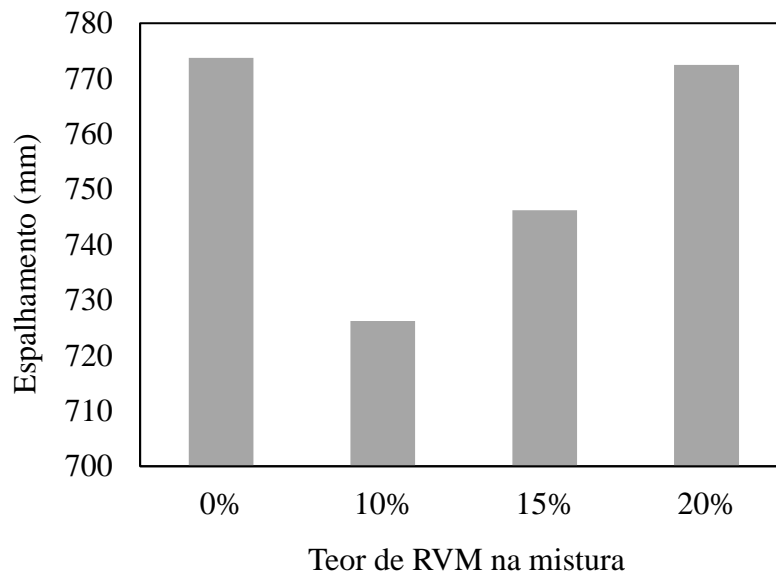


Figura 48 - Espalhamentos obtidos no ensaio de *Slump flow*

O teor de aditivo superplastificante nas misturas também influencia diretamente nos valores obtidos dos ensaios no estado fluido. A exsudação e a segregação são consideravelmente reduzidas com a utilização de MCS, pois parte da água livre presente na mistura é adsorvida na superfície das partículas (LOHTIA & JOSHI, 1995). O concreto com 20% de RVM (C20RVM) apresentou espalhamento semelhante ao concreto de referência (C0RVM). No entanto, foi necessário um teor de superplastificante inferior ao teor utilizado na mistura de controle. Enquanto o teor de SP utilizado para a produção do C0RVM foi de 1,4%, o teor de SP na mistura C20RVM, para produzir o mesmo espalhamento, foi de 0,8%. Isto indica que a presença de um maior teor de RVM na mistura ocasiona melhorias no espalhamento e, por consequência, na trabalhabilidade do concreto. Sendo assim, a presença do RVM na mistura proporcionou maior trabalhabilidade ao concreto.

Tabela 32 - Classificação do concreto no estado fluido segundo a NBR 15823-1

Mistura	Espalhamento	Viscosidade		Habilidade passante
		T ₅₀₀	Funil-V	
C0RVM	SF 3	VS 2	VF 2	PL 2
C10RVM	SF 2	VS 2	VF 1	PL 2
C15RVM	SF 2	VS 2	VF 2	PL 2
C20RVM	SF 3	VS 2	VF 2	PL 2

A viscosidade foi analisada por meio dos métodos T₅₀₀ e Funil-V (Tabela 32). Como a orientação do cone de Abrams pode influenciar no resultado do T₅₀₀ e proporcionar uma medida de tempo superior ao observado no ensaio com orientação convencional (KOEHLER & FOWLER, 2007), todas as misturas obtiveram classificação VS 2. A EFNARC (2002) sugere que tempos de espalhamentos superiores a 5s implicam em uma mistura com viscosidade muito alta. Quando isto acontece, é recomendado que se proceda o aumento do volume de pasta e/ou de superplastificante.

No entanto, ao analisar os resultados do ensaio do Funil-V, é possível observar que a viscosidade das misturas estudadas se encontra dentro dos limites indicados pela NBR 15823-1 (2017) (25 segundos) e da EFNARC (2002), que considera apropriado um tempo de fluxo de até 10 segundos. As misturas C0RVM, C15RVM e C20RVM receberam classificação VF 2 e apenas a mistura C10RVM recebeu classificação VF 1.

A habilidade passante, estudada por meio do ensaio da Caixa-L, obteve classificação PL 2 ($H_2/H_1 \geq 0,80$). O coeficiente de bloqueio calculado pela relação entre as alturas (H_2/H_1) em todas as misturas investigadas é igual a unidade. Isto significa que não foi observado bloqueio do concreto fluido por entre as armaduras.

Considerando-se a combinação dos resultados dos ensaios no estado fluido, classifica-se, de acordo com a NBR 15823-1 (2017), os concretos estudados como sendo adequados para a maioria das aplicações. Para estes elementos como vigas, lajes, pilares e elementos de fundações, entre outros, devem ser considerados espaçamentos de armaduras de 80 mm a 100 mm para que os efeitos da habilidade passante sejam garantidos. Nestas condições o concreto apresenta menor pressão sobre as formas e melhor resistência à segregação. No entanto, efeitos negativos podem ser obtidos em relação à superfície de acabamento devido ao ar aprisionado.

6.8. Avaliação das propriedades no estado endurecido

6.8.1. Resistência à compressão axial

A resistência à compressão média dos diferentes teores de substituição parcial analisados aos 7, 28 e 56 dias está representada graficamente nas Figuras 49 e 50. Com os resultados obtidos neste ensaio, identificou-se que a série de referência apresentou a maior resistência à compressão àquelas com substituição parcial do cimento por resíduo de vidro em todas as idades investigadas. Aos 7 dias esse resultado era esperado, pois o ganho de resistência

de concretos com adição de MCS é evidenciado nas idades avançadas (LOHTIA & JOSHI, 1995; CARSANA *et al.*, 2014; DU & TAN, 2017).

Nesta idade também se observa que todos os concretos com resíduo de vidro obtiveram resistência superior a 40 MPa. Segundo os requisitos da NBR 6118 (2014), os concretos produzidos não só estão adequados para a maioria das aplicações, como também atende às especificações de resistência mínima para ambientes com classe de agressividade severa, onde há elevado risco de deterioração da estrutura (ex.: ambientes industriais e marítimos).

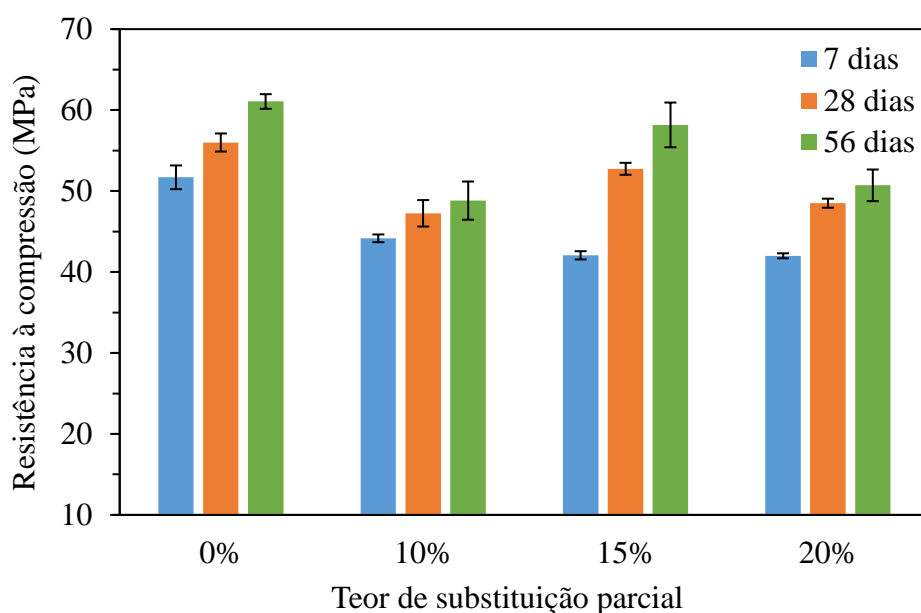


Figura 49 - Representação gráfica das médias das resistências à compressão

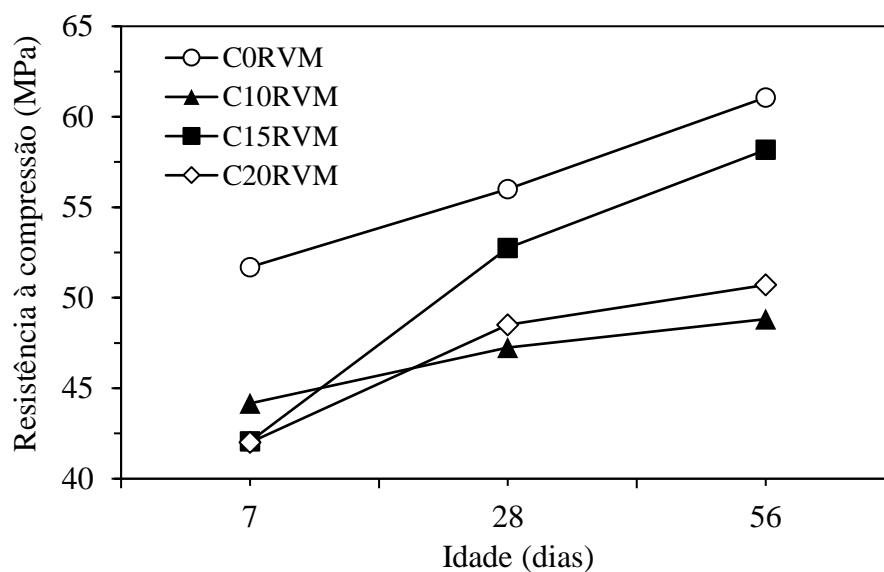


Figura 50 - Representação gráfica do ganho de resistência aos 7, 28 e 56 dias

Observa-se, pela Figura 50, que a série de referência C0RVM apresentou ganho constante de resistência. O ganho foi de 8% tanto de 7 para 28 dias, quanto de 28 para 56 dias. Já os concretos com RVM apresentaram um maior ganho entre 7 e 28 dias. O C15RVM apresentou o maior aumento na resistência, sendo 20% da resistência final adquirida entre 7 e 28 dias e 9% entre 28 e 56 dias. Em contrapartida, o C20RVM apresentou ganho de 13% de resistência entre 7 e 28 dias e 4% entre 28 e 56 dias. Dos teores estudados, o C10RVM apresentou o menor ganho de resistência entre os tratamentos. 7% foi adquirido entre 7 e 28 dias e 3% entre 28 e 56 dias.

De acordo com a Análise de Variância (ANOVA), para um nível de significância de 0,01, foram identificadas fortes evidências (valor-p < 0,01) de que pelo menos uma das médias dos tratamentos aos 7 dias possui diferença estatística significativa (Tabela 33). Para identificar quais dos tratamentos apresentou diferença, foi aplicado um teste *post-hoc* de Tukey. O resultado identificou que os concretos com 15 e 20% de RVM como substituição parcial são semelhantes entre si (valor-p > 0,80) e diferentes dos demais (Tabela 34).

Tabela 33 - Análise de variância das médias dos concretos aos 7 dias

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Valor-p
Concretos	3	252,547	84,182	23,030	0,000029
Resíduos	12	43,863	3,655		
Total	15	296,410			

Tabela 34 - Matriz de correlação entre os concretos (valores-p) aos 7 dias

	0%	10%	15%	20%
0%				
10%	0,00061			
15%	0,00007	0,43867		
20%	0,00006	0,41565	0,99997	

Aos 28 dias, dentre os concretos com RVM, a maior resistência foi obtida com 15% de RVM, cujo valor foi superior a 50 MPa. É possível observar que esse concreto levou 28 dias para desenvolver uma resistência semelhante ao C0RVM aos 7 dias. Assim como o concreto

de referência, o C15RVM pode ser considerado como concreto de alta resistência segundo a NBR 8953 (2015) e como Classe I para um concreto de alto desempenho (AİTCIN, 2000). Com a ANOVA, foram identificadas fortes evidências (valor-p < 0,01) de que pelo menos uma das médias possui diferença estatística significativa (Tabela 35). O teste de Tukey, identificou semelhanças estatísticas entre os C10RVM e o C20RVM aos 28 dias (Tabela 36).

Tabela 35 - Análise de variância das médias dos concretos aos 28 dias

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Valor-p
Concretos	3	193,250	64,417	10,105	0,001327
Resíduos	12	76,500	6,375		
Total	15	269,750			

Tabela 36 - Matriz de correlação entre os concretos (valores-p) aos 28 dias

	0%	10%	15%	20%
0%				
10%	0,00179			
15%	0,31108	0,04121		
20%	0,00584	0,89507	0,13415	

Espera-se que em idades avançadas, concretos contendo MCS com atividade pozolânica atinjam resistências à compressão superiores a concretos sem este material. O ganho da resistência ocorre lentamente, pois, em geral, as reações pozolânicas iniciam após a hidratação do cimento, quando o CH se torna disponível. Assim, com a substituição do cimento pelo MCS, a taxa de hidratação do cimento nas primeiras idades é retardada (LOHTIA & JOSHI, 1995).

No entanto, nesta pesquisa os concretos com os teores de RVM estudados apresentaram resistência inferior ao concreto sem este material aos 56 dias. O mesmo comportamento foi observado em concretos de 90 dias por Sousa Neto (2014), por Pereira-de-Oliveira *et al.* (2012) para 25% de RVM, por Wang *et al.* (2014) para teores de RVM superiores a 40%, por Bignozzi *et al.* (2015) em concretos com diferentes tipos de vidro, por Shao *et al.*

(2000) em concretos com 30% de RVM com partículas de tamanhos iguais ou superiores a 75 µm e por Barros (2016) para teores iguais ou superiores a 15%.

Aos 56 dias foi observado comportamento semelhante ao de 28 dias. Dentre concretos com RVM, o melhor desempenho foi obtido com 15% de substituição parcial de cimento por RVM e apenas o C10RVM não pode ser considerados como de alta resistência. Ao realizar-se a análise de variância, foram identificadas fortes evidências (valor-p > 0,01) de que pelo as médias não possuem diferença estatística significativa entre si (Tabela 37). No entanto, como o valor-p obtido é próximo do valor limite estipulado, foi feito o teste de Tukey (Tabela 38). Como resultado, não apresentaram diferenças estatísticas (valor-p > 0,80) os concretos com 0% e 15% de RVM e aqueles com 10% e 20%.

Tabela 37 - Análise de variância das médias dos concretos aos 56 dias

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Valor-P
Tratamentos	3	412,273	137,424	5,780	0,011057
Resíduos	12	285,331	23,778		
Total	15	697,604			

Tabela 38 - Matriz de correlação entre os concretos (valores-p) aos 56 dias

	0%	10%	15%	20%
0%				
10%	0,01809			
15%	0,83475	0,07761		
20%	0,04707	0,94548	0,18850	

6.8.2. Índice de desempenho do RVM no concreto

Os índices de desempenho do RVM no concreto são apresentados na Tabela 39. De acordo com a NBR 12653 (2014), apenas o C15RVM possui desempenho acima do limite estipulado (90% aos 28 dias). Se consideradas as normas americana (ASTM C 618) e europeia (EN 450-1, 2012), que admitem índices de desempenho mínimo de 75%, todos os tratamentos investigados atendem a este critério.

Tabela 39 - Índice de desempenho do RVM no concreto aos 7, 28 e 56 dias e limites admitidos pelas normas brasileira, americana e europeia

	C10RVM	C15RVM	C20RVM	NBR 12653 (2014)	ASTM C 618	EN 450-1
7 dias	85%	81%	81%			
28 dias	84%	94%	87%	> 90%	> 75%	> 75%
56 dias	80%	95%	83%			

6.8.3. Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de cura estão representados graficamente na Figura 51. Como na compressão, a resistência à tração também apresenta tendência a possuir um teor ótimo de substituição parcial de cimento. Tanto para a compressão quanto para a tração, o valor ótimo obtido é de 15% de RVM. No entanto, diferentemente da resistência à compressão axial, o C15RVM apresentou resistência à tração superior ao C0RVM. Este incremento é de 0,26 MPa, o que representa, aproximadamente 12%. Para as demais substituições, a perda de resistência foi de 2% para o C10RVM e de 13% para o C20RVM. Por análise de variância (ANOVA), percebe-se que não há diferenças estatísticas significativas apenas entre os tratamentos C0RVM e C10RVM (Tabelas 40 e 41).

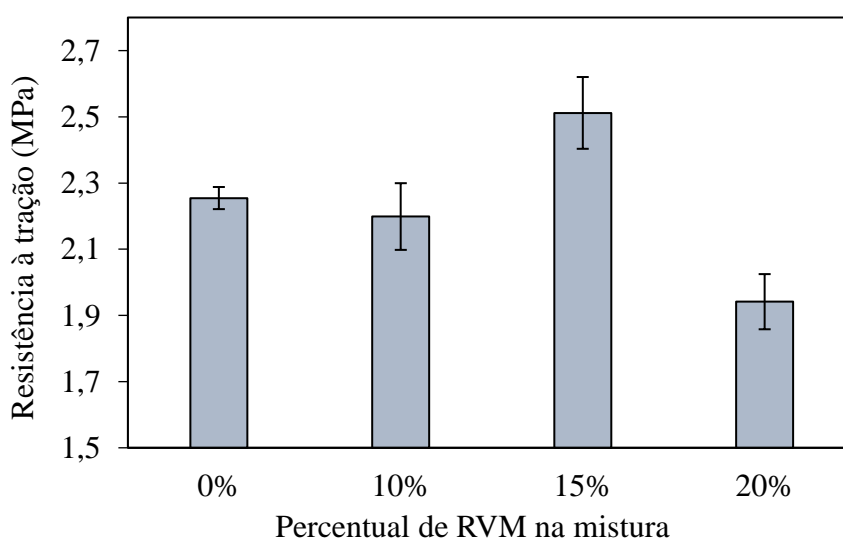


Figura 51 - Representação gráfica das médias das resistências à tração por compressão diametral

Tabela 40 - Análise de variância das médias de resistência à tração dos concretos aos 28 dias

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Valor-p
Tratamentos	3	0,657	0,219	5,483	0,013187
Resíduos	12	0,479	0,040		
Total	15	1,137			

Tabela 41 - Matriz de correlação entre os concretos (valores-p) aos 28 dias

	0%	10%	15%	20%
0%				
10%	0,97824			
15%	0,31118	0,17442		
20%	0,17394	0,31043	0,00776	

6.8.4. Absorção de água

A absorção média de água por imersão aos 28 dias está representada na Figura 52. Ficou evidenciado que a absorção de água é maior no concreto controle, onde não há presença de RVM e decresce conforme o aumento de RVM na mistura. Este resultado era esperado, pois a adição de um material com partículas de tamanho inferior ao do cimento na matriz cimentícia ocasionam densificação da matriz (LOHTIA & JOSHI, 1995; NASSAR & SOROUSHIAN, 2012; NEVILLE, 2016). Assim, quanto mais densa for a matriz, menor será a absorção de água e de agentes deletérios e maiores serão as resistências esperadas. Este resultado é compatível com as resistências observadas nos ensaios de tração e compressão. No entanto, o C10RVM, por meio de análise de variância, se mostra estatisticamente comparável ao C0RVM (Tabelas 42 e 43). O mesmo comportamento ocorre com as misturas C15RVM e C20RVM.

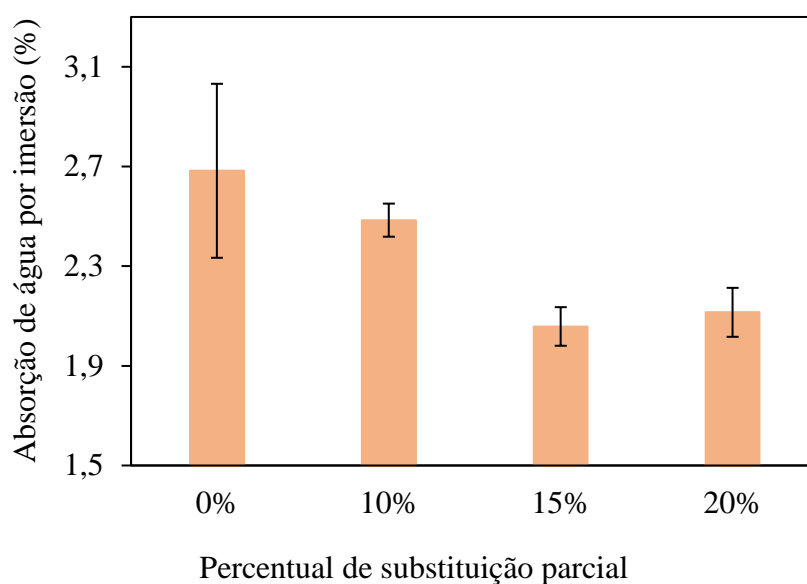


Figura 52 - Representação gráfica das médias da absorção por imersão

Tabela 42 - Análise de Variância da absorção de água aos 28 dias

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Valor P
Tratamentos	3	0,806	0,269	7,568	0,010086
Resíduos	8	0,284	0,035		
Total	11	1,090			

Tabela 43 - Matriz de correlação entre os tratamentos (valores-p) para absorção de água

	0%	10%	15%	20%
0%				
10%	0,59443			
15%	0,01534	0,09156		
20%	0,02526	0,15331	0,98169	

Pelo ensaio de absorção por imersão também foram obtidos outros dados como índice de vazios real das amostras e massa específica (Tabela 44). Observa-se que o maior índice de vazios pertence ao concreto de referência e diminui com a substituição parcial do cimento pelo RVM. O menor índice é observado no concreto C15RVM. Pela massa específica, todos os concretos investigados classificam-se como concretos normais (massa específica seca entre 2,0 g/cm³ e 2,8 g/cm³).

Tabela 44 - Resultados obtidos no ensaio de absorção

Tratamento	Absorção (%)	Índice de vazios real (%)	Massa específica seca (g/cm³)	Massa específica real (g/cm³)
C0RVM	2,68a	6,43	2,40	2,56
C10RVM	2,48a	5,92	2,38	2,53
C15RVM	2,06b	4,90	2,38	2,50
C20RVM	2,11b	5,02	2,38	2,50

Onde: Médias de “Absorção (%)” com letras iguais apresentaram valores-p > 0,5 (Tabela 43).

7. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa conclui-se que:

- a) O resíduo de vidro moído durante 24h em moinho de bolas é considerado um material pozolânico de atividade intermediária e atende aos requisitos previstos na NBR 12653 (2014);
- b) Com a metodologia de dosagem proposta por Le *et al.* (2015) adaptada é possível produzir CAAD, com RVM como material cimentício suplementar, aplicável para a maioria dos tipos de elementos estruturais: pilares, vigas, lajes, fundações;
- c) A resistência à compressão do concreto não depende apenas do empacotamento de partículas, mas também do teor de RVM utilizado como substituição parcial do cimento;
- d) Do ponto de vista do empacotamento de partículas, era esperado que o RVM influenciasse positivamente no ganho de resistência, uma vez que este possui distribuição granulométrica inferior ao cimento. No entanto, quando finamente moído, as reações pozolânicas prevalecem ao fator empacotamento;
- e) Quando utilizado juntamente com o cimento Portland pozolânico, o RVM passou a atuar como material de preenchimento, pois o material pozolânico do cimento foi suficiente para reagir com todo o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) liberado durante o processo de hidratação. Por este motivo, menores resistências foram observadas em relação ao CAAD de controle;
- f) Conforme observado no ensaio de eficiência da argamassa e comprovado pela análise térmica das pastas de cimento, por serem utilizados juntamente com o cimento CP-IV, para todos os teores de RVM estudados não houve consumo significativo o hidróxido de cálcio liberado durante o processo de hidratação do cimento em relação ao concreto de referência;
- g) Existe um teor ótimo para substituição parcial do cimento por RVM onde, a partir deste, qualquer aumento representa um decréscimo, principalmente, nos parâmetros de resistência;
- h) No estado endurecido, tanto na argamassa, quanto no concreto o maior índice de desempenho foi obtido para a substituição parcial de 15% de cimento por RVM, sendo esse o teor ótimo;
- i) O teor ótimo de RVM também é evidenciado na resistência à tração e coincide com o teor encontrado para a resistência à compressão (15%);

- j) Conforme o aumento de teor de RVM em substituição parcial ao cimento nas argamassas, maior sua influência na mitigação dos efeitos das expansões provocadas pelas RAS;
- k) Maiores reduções das expansões ocorreram com 20% de RVM, sendo este o único teor que não apresentou potencial reativo aos 14 dias, mas ultrapassou o limite da norma brasileira conforme a evolução do ensaio;
- l) O desempenho do RVM foi considerado satisfatório, uma vez que o concreto produzido alcançou as propriedades desejadas no estado fluido e no estado endurecido;
- m) A incorporação do RVM proveniente da lapidação de vidro plano do Polo Industrial de Manaus no CAAD pode ser uma alternativa viável para a redução do impacto ambiental causado pelo descarte deste resíduo e pelo impacto gerado pelas emissões de gases de efeito estufa durante a produção de cimento.

8. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Para dar continuidade às pesquisas com a incorporação de resíduo de vidro moído como material cimentício suplementar para o concreto, recomenda-se:

- a) Estudar a moagem por via úmida;
- b) Melhorar a eficiência da moagem para reduzir o tamanho e tempo de moagem das partículas de RVM às dimensões da sílica ativa a fim de comparar seus desempenhos;
- c) Estudar a influência de outros tipos de vidro, como vidros de lâmpadas, de para-brisas de automóveis, principalmente os vidros provenientes de pós consumo como garrafas e potes, nas propriedades do concreto autoadensável de alto desempenho;
- d) Investigar o desempenho de um ou mais materiais cimentícios suplementares produzidos no estado do Amazonas, como a metacaulinita e as cinzas do caroço de açaí em conjunto com o RVM;
- e) Avaliar o desempenho mecânico de concretos com RVM em substituição parcial ao cimento em longos períodos de cura como 90, 180 e 360 dias;
- f) Avaliar a mitigação das reações álcalis-sílica utilizando o cimento Portland CP-IV em combinação com o RVM;
- g) Avaliar a durabilidade por meio de outros ensaios acelerados como a carbonatação e a penetração de íons cloreto;
- h) Realizar um estudo de custos de produção do CAAD com RVM;
- i) Utilizar o RVM como adição em CAAD;

REFERÊNCIAS

- ACI Committee 363. 363.2R-11 Guide to Quality Control and Assurance of High-Strength Concrete. ISBN: 9780870317033. 2011.
- AFSHINNIA, K.; RANGARAJU, P. R. Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*. v. 117, p. 263 - 272, 2016.
- AFSHINNIA, K.; RANGARAJU, P. R. Influence of fineness of ground recycled glass on mitigation of alkali-silica reaction in mortars. *Construction and Building Materials*. v. 81, p. 257 - 267, 2015.
- AÏTCIN, P. C. The durability characteristics of high performance concrete: a review. *Cement & Concrete Composites*. v. 25, p. 409 - 420, 2003.
- 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.
- ALIABDO, A. A.; ELMOATY, A. E. M. A.; 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.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. *ASTM C150 / C150M-18: Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- _____. *ASTM C618 - 17a: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- _____. *ASTM C1585 - 13. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- APRIANTI, E. A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production - a review part II. *Journal of Cleaner Production*. v. 142, n. 4, p. 4178 - 4194, 2017.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Guia básico de utilização do cimento Portland. BT-106. 7ª ed. São Paulo, 2002.*
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.*
- _____. *NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.*
- _____. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.*
- _____. *NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.*
- _____. *NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.*
- _____. *NBR 7681-2: Calda de cimento para injeção. Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.*
- _____. *NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.*
- _____. *NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.*
- _____. *NBR 9775: Agregado miúdo - Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.*
- _____. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.*
- _____. *NBR 10908: Aditivos para argamassa e concreto - Ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, 2008.*
- _____. *NBR 11578: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1991.*
- _____. *NBR 11579: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.*
- _____. *NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.*
- _____. *NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.*

- _____. *NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. *NBR 15577-1: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto*. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. *NBR 15577-4: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado*. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. *NBR 15577-5: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado*. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. *NBR 15823-1. Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco*. Rio de Janeiro, 2017.
- NBR 15823-2: Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams*. Rio de Janeiro, 2010.
- _____. *NBR 15823-4: Concreto autoadensável - Parte 4: Determinação da habilidade passante - Método da caixa L*. Rio de Janeiro, 2010.
- _____. *NBR 15823-5: Concreto autoadensável - Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V*. Rio de Janeiro, 2010.
- _____. *NBR 16607: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega*. Rio de Janeiro, 2017.
- _____. *NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. *NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. *NBR NM49: Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas*. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. *NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. *NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro, 2009.

- _____. *NBR NM 248: Agregado - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. *NBR NM 294: Vidro float*. Rio de Janeiro, 2004.
- BARCELO, L.; KLINE, J.; WALENTA, G.; GARTNER, E. Cement and carbon emissions. *Materials and Structures*. v. 47, p. 1055 - 1065, 2014.
- BARROS, L. M. - Concreto de alta resistência a partir de matérias-primas amazônicas e vidro reciclado. *Tese (Doutorado)*. São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.
- BENHELAL, E.; ZAHEDI, G.; HASHIM, H. A novel design for green and economical cement manufacturing. *Journal of Cleaner Production*. v. 22, n. 1, p. 60 - 66, 2012.
- BERNSTEIN, L.; ROY, J.; DELHOTAL, K. C.; HARNISCH, J.; MATSUHASHI, R.; PRICE, L.; TANAKA, K.; WORRELL, E.; YAMBA, F.; FENGQI, Z. 2007: Industry. *In: Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- BIGNOZZI, M.C.; SACCANI, A.; BARBIERI, L.; LANCELLOTTI, I. Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition. *Cement & Concrete Composites*. v. 55, p. 45 - 52, 2015.
- BOSOAGA, A.; MASEK, O.; OAKLEY, J. E. CO₂ Capture Technologies for Cement Industry. *Energy Procedia*. v. 1, p. 133 - 140, 2009.
- BRASIL. DECRETO Nº 7.390, DE 9 DE DEZEMBRO DE 2010. Regulamenta os arts. 6º, 11 e 12 da Lei no 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC, e dá outras providências. Brasília, DF, dez 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato20072010/2010/Decreto/D7390.htm>. Acesso em: 05 jun. 2018.
- BRASIL. LEI Nº 12.187, DE 29 DE DEZEMBRO DE 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Brasília, DF, dez 2009. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20072010/2009/lei/12187.htm>. Acesso em: 05 jun. 2018.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*. 4ª Ed. p. 89, 2017.

- CALLISTER JR, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 8ª ed., New Jersey, Editora LTC, 2012.
- CARPENTER, A.J.; CRAMER, S.M. Mitigation of Alkali-Silica Reaction in Pavement Patch Concrete That Incorporates Highly Reactive Fine Aggregate. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. v. 1, p. 60 - 67, 1999.
- CARSANA, M.; FRASSONI, M.; BERTOLINI, L. Comparison of ground waste glass with other supplementary cementitious materials. *Cement & Concrete Composites*. v. 45, p. 39 - 45, 2014.
- CATTANEO, J. *U.S Glass Recycling: Market Outlook*. In *Resource Conservation Challenge (RCC) Workshop*. Arlington, VA, 2008.
- CHAI, H. W. Design and testing of self-compacting concrete. *Tese (Doutorado)*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of London. Londres, 1998.
- CHAPPEX, T.; SCRIVENER, K. L. The influence of aluminium on the dissolution of amorphous silica and its relation to alkali silica reaction. *Cement and Concrete Research*. v. 42, p. 1645 - 1649, 2012.
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I. MACHADO, G. *Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores* [recurso eletrônico] / Berenice Anina Dedavid, Carmem Isse Gomes, Giovanna Machado. - Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- DE LARRARD, F. *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*. E & FM Spon, London, 1999.
- DE LARRARD, F. SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*. v. 32, p. 1699-1704, 2002.
- DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. DIN EN 206-1: Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity. Berlin, 2001.
- DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. DIN 1045-2. Concrete specification, properties, production and conformity-application rules for DIN EN 206-1. Berlin, 2008.
- DU, H.; TAN, K. H. Properties of high volume glass powder concrete. *Cement and Concrete Composites*. v. 75, p. 22 - 29, 2017.

- DYER, T. D.; DHIR, R. K. Chemical reactions of glass cullet used as cement component. *Journal of Materials in Civil Engineering*. v. 13, p. 412 - 417, 2001.
- DWECK, J.; CUNHA, A. L. C.; PINTO, C. A.; GONÇALVES, J. P.; BÜCHLER, P. M. Thermogravimetry on calcined mass basis - Hydrated cement phases and pozzolanic activity quantitative analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. v. 97, n. 1, p. 85 - 89, 2009.
- EFNARC. *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. Association House, Farnham, 2002. Disponível em: < <http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF> >. Acesso em 05 mar. 2018.
- EUROPEAN STANDARD. EN 450-1: Fly ash for concrete. Definition, specifications and conformity criteria. 2012.
- FAIRBAIRN, E. M. R.; AMERICANO, B. B.; CORDEIRO, G. C.; PAULA, T. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; SILVOSO, M. M. Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO2 emissions reduction and potential for carbon credits. *Journal of Environmental Management*. v. 91, p. 1864 - 1871, 2010.
- FEDERICO, L. M.; CHIDIAC, S. E. Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete - Critical review of treatment methods. *Cement & Concrete Composites*. v. 31, p. 606 - 610, 2009.
- FISCHEDICK, M.; ROY, J.; ABDEL-AZIZ, A.; ACQUAYE, A.; ALLWOOD, J. M.; CERON, J.-P.; GENG, Y.; KHESHGI, H.; LANZA, A.; PERCZYK, D.; PRICE, L.; SANTALLA, E.; SHEINBAUM, C.; TANAKA, K. 2014: Industry. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Editores: Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova Iorque, NY, USA.
- FUNK, J.E; DINGER, D. R. *Predictive process control of crowded particulate suspension, applied to ceramic manufacturing*. New York, Kluwer Academic Press, 1994.

- GALVÃO, A. C. P.; DE FARIAS, A. C. M.; MENDES, J. U. L. Caracterização do rejeito de vidro sodo-cálcico proveniente do processo de lapidação. *21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*. Cuiabá, 2014.
- GARTNER, E. Industrially interesting approaches to “low-CO2” cements. *Cement & Concrete Research*. v. 34, nº 9, p. 1489 - 98, 2004.
- GÓMES, J. F.; MAESTRO, M.B. *Guía práctica para la utilización del hormigón autocompactante*. Instituto Español del cemento y sus aplicaciones. Madrid, 2005.
- HELENE, P.; TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle de concreto. São Paulo: PINI; Brasília, DF: SENAI, 1992.
- HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. Dosagem de concretos de cimento Portland. In: *ISAIA, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 12, v. 1, p. 415 - 451.
- HENDRIKS, C.; WORRELL, E.; DE JAGER, D.; BLOK, K.; RIEMER, P.. Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry, *Proceedings of the 4th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, Interlaken, Switzerland. p. 939 - 944, 1998.
- HORIBA. *A guidebook to particle size analysis*. Horiba Scientific. p. 29, 2016.
- HUNTZINGER, D. N.; EATMON, T. D. A life-cycle assessment of cement manufacturing: comparing traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*. v. 17, p. 668 - 675, 2009.
- IPCC, 1990: Climate Change - The IPCC Scientific Assessment Report Prepared for IPCC by Working Group 1. Ed. J.T.Houghton, G.J.Jenkins e J.J.Ephraums. Meteorological Office, Bracknell, Reino Unido. p. 365, 1990.
- ISHAK, S. A.; HASHIM, H. Low carbon measures for cement plant - a review. *Journal of Cleaner Production*. v. 103, p. 260 - 274, 2015.
- ISLAM, G. M. S.; RAHMAN, M. H.; KAZI, N. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*. v. 6, p. 37 - 44, 2017.
- JIN, W.; MEYER, C.; BAXTER, S. “Glasscrete” - Concrete with glass aggregate. *ACI Materials Journal*. v. 97, n. 2, p. 208 - 213, 2000.

- KAJASTE, R.; HURME, M. Cement industry greenhouse gas emissions - management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*. v. 112, n. 5, p. 4041 - 4052, 2016.
- KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste - a miniature slump test. *Cement, Concrete, and Aggregates*. v. 2, p. 95-108, 1980.
- KHALEEL, O. R.; AL-MISHHADANI, S. A.; RAZAK, H. A. The Effect of Coarse Aggregate on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete (SCC). *Procedia Engineering*, v. 14, p. 805 - 813, 2011.
- KOEHLER, E.; FOWLER, D. Aggregate in self-consolidating concrete. In: *ICAR Project 108*. University of Texas at Austin: International Center for Aggregates Research; 2007. p. 353.
- KOSTRZANOWSKA-SIEDLARZ, A; GOŁASZEWSKI, J. Rheological properties and the air content in fresh concrete for self compacting high performance concrete. *Construction and Building Materials*. v. 94, p. 555-564, 2015.
- KRAUSMANN, F.; GINGRICH, S.; EISENMENGER, N.; ERB, K. H.; HABERL, H.; FISCHER-KOWALSKI, M. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*. v. 68, n. 10, p. 2696 - 2705, 2009
- ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK, B. Influence of Antifoaming Admixture Type on Several Properties of High-Performance Self-Compacting Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. v. 17, 2015
- LE, H. T.; MÜLLER, M.; SIEWERT, K.; LUDWIG, H. M. The mix design for self-compacting high performance concrete containing various mineral admixtures. *Materials and Design*. v. 72, p. 51 - 62, 2015.
- LI, C.; GONG, X.; CUI, S.; WANG, Z.; ZHENG, Y.; CHI, B. CO2 emissions due to cement manufacture. *Materials Science Forum*. v. 685, p. 181 - 187, 2011.
- LIEW, K. M.; SOJOBI, A. O.; ZHANG, L. W. Green concrete: Prospects and challenges. *Construction and Building Materials*. v. 156, p. 1063 - 1095, 2017.
- LIPPIATT, B.; AHMAD, S. Measuring the life-cycle environmental and economic performance of concrete: the BEES approach. *International workshop on sustainable development and concrete technology*. Pequim, p. 213 - 230, 2004.

- LIU, T. C.; CHERN, J. C. Sustainable concrete technology for the 21th century. *The 3rd ACF International Conference - ACF/VCA*. p. 1168 - 1174, 2008.
- LOHTIA, R. P.; JOSHI, R. C. Mineral Admixtures. In: RAMACHANDRAN, V. S. *Concrete Admixtures Handbook. Properties, Science and Technology*. 2^a Ed. Nova Jersey: Noyes Publications, 1995. Cap. 10.
- MALHOTRA, V. M. Global warming, and role of supplementary cementing materials and superplasticisers in reducing greenhouse gas emissions from the manufacturing of portland cement. *International Journal of Structural Engineering*. v. 1, n. 2, p. 116 - 130, 2010.
- MALHOTRA, V.M.; MEHTA, P.K. *Pozzolanic and Cementitious Materials*. Gordon & Breach Publishers, Amsterdam, 1996.
- MALVAR, L.J.; CLINE, G.D.; BURKE, D.F.; ROLLINGS, R.; SHERMAN, T.W.; GREENE, J.L. Alkali-silica reaction mitigation: state of the art and recommendations. *ACI Materials Journal*. v. 99, n. 5, p. 480 - 489, 2002.
- MARAGHECHI, H.; SHAFIATIAN, S. M. H.; FISCHER, G. RAJABIPOUR, F. The role of residual cracks on alkali silica reactivity of recycled glass aggregates. *Cement & Concrete Composites*. v. 34, p. 41 - 47, 2012.
- MCLELLAN, B. C.; CORDER, G. D.; GIURCO, D. P.; ISHIHARA, K. N. Renewable energy in the minerals industry: a review of global potential. *Journal of Cleaner Production*. v. 32, p. 32 - 44, 2012.
- MEHTA, P. K. Reducing the environmental impact of concrete. *Concrete International*. v. 23, n. 10, p. 61 - 66, 2001.
- MEHTA, K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. McGraw-Hill, New York, 2006.
- METWALLY, I. M. Investigations on the performance of concrete made with blended finely milled waste glass. *Advances in Structural Engineering*. v. 10, p. 47 - 53, 2007.
- MEYER, C.; XI, Y. Use of recycled glass and fly ash for precast concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. v. 11, p. 89 - 90, 1999.

- MIRZAHOSSEINI, M.; RIDING, K. A. Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM). *Cement & Concrete Composites*. v. 56, p. 95 - 105, 2015.
- MOHAJERANI, A.; VAJNA, J.; CHEUNG, T. H. H.; KURMUS, H.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S. Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review. *Construction and Building Materials*. v. 156, p. 443 - 467, 2017.
- NASSAR, R.U.D., SOROUSHIAN, P. Field investigation of concrete incorporating milled waste glass. *Journal of Solid Waste Technology and Management*. v. 37, n. 4, p. 307 - 319, 2011.
- NASSAR, R. U. D.; SOROUSHIAN, P. 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.
- NEVILLE, A. Consideration of durability of concrete structures: Past, present, and future. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 34, p. 114 - 118, 2001.
- NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- NEVILLE, A.; AİTCIN, P. C. High performance concrete - An overview. *Materials and Structures*, v. 31, n. 2, p. 111 - 117, 1998.
- OBLA, K.H.; HILL, R.L.; THOMAS, M.D.A.; SHASHIPRAKASH, S.G.; PEREBATOVA, O. Properties of concrete containing ultra-fine fly ash, *ACI Materials Journal*. v. 100, n.5, p. 426 - 433, 2003.
- OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. v. 1, n.1, p. 5 - 15, 2003.
- OMRAN, A.; SOLIMAN, N.; ZIDOL, A.; TAGNIT-HAMOU, A. Performance of Ground-Glass Pozzolan as a Cementitious Material - A Review. *Advances in Civil Engineering Materials*. v. 7, n. 1, 2018.
- PAIVA, O. A. Resíduo industrial de vidro moído em argamassa de Cimento Portland. *Dissertação (Mestrado)*. Manaus, Universidade Federal do Amazonas, 2009.

- PENG, J.; HUANG, L.; ZHAO, Y.; CHEN, P.; ZENG, L.; ZHENG, W. Modeling of carbon dioxide measurement on cement plants. *Advanced Material Research*. v. 610-613, p. 2120 - 2128, 2013.
- PERDIZ, R. Avaliação da utilização do granito da região de Moura do município de Barcelos como agregado graúdo em concreto. *Dissertação (Mestrado)*. Manaus, Universidade Federal do Amazonas, 2009.
- PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; CASTRO-GOMES, J. P.; SANTOS, P. M. S. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. *Construction and Building Materials*, v. 31, p. 197 - 203, 2012.
- PINHEIRO, S. C. Influência de sílica gel e de partículas micro e submicrométricas produzidas a partir da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na hidratação e estrutura de poros de pastas de cimento. *Tese (Doutorado)*. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.
- PLANO MUNICIPAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE MANAUS - PMGIRS*. Secretaria Municipal de Limpeza Urbana - SEMULSP. Manaus, 2015.
- PRICE, L.; DE LA RUE DU CAN, S.; SINTON, J.; WORRELL, E.; ZHOU, N.; SATHAYE, J.; LEVINE, M. *Sectoral trends in global energy use and greenhouse gas emissions*. LBNL-56144. Energy Analysis Department, Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA. 2006. Disponível em: <<https://www.osti.gov/servlets/purl/888753>> Acesso em: 10 abr 2018.
- REHMAN, S.; IQBAL, S.; ALI, A. Combined influence of glass powder and granular steel slag on fresh and mechanical properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. v. 178, p. 153 - 160, 2018.
- RIBEIRO, M. J. P. M.; ABRANTES, J. C. C. Moagem em moinho de bolas: Estudo de algumas variáveis e otimização energética do processo. *Cerâmica Industrial*. v. 6, n. 2, p 7 - 11, 2001.
- RODRIGUES, P. P. F. Parâmetros de Dosagem de Concreto. Estudo Técnico (ET-67). 2ª ed. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 32p. 1998.
- SAFIUDDIN, M. Development of self-consolidating high performance concrete incorporating rice husk ash. *Tese (Doutorado)*. Canada: University of Waterloo, 2008.

- SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). Emissões de GEE do setor de energia, processos industriais e uso de produtos. 48 p., 2016. Disponível em: <http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2016/09/FINAL-16-09-23-RelatoriosSEEG-PIUP_.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2018.
- SHAO, Y.; LEFORT, T.; MORAS, S.; RODRIGUEZ, D. Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*. v. 30, p. 91 - 100, 2000.
- SHAYAN, A; XU, A. Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*. v. 34, p. 81 - 89, 2004.
- SHI, C.; WU, Z.; LV, K.; WU, L. A review on mixture design methods for self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. v. 84, p. 387 - 398, 2015.
- SHI, C.; WU, Y.; RIEFLER, C.; WANG, H. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cement and Concrete Research*. v. 35, n. 5, p. 987-993, 2005.
- 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, p. 234 – 247, 2007.
- SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder - Towards ecofriendly concrete. *Construction and Building Materials*. v. 125, p. 600 - 6012, 2016.
- SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: Filling the micro gap. *Construction and Building Materials*. v. 139, p. 374 - 383, 2017.
- SOUSA NETO, L. M. Utilização do Resíduo de Vidro Moído como Adição Mineral para Produção de Concreto Autoadensável e de Alto Desempenho. *Dissertação (Mestrado)*. Manaus, Universidade Federal do Amazonas, 2014.
- SU, N.; HSU, K.C.; CHAI, H.W. A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*. v. 31, p. 1799 - 1807, 2001.
- TAHA, B.; NOUNU, G. Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*. v. 22, p. 713 - 720, 2008.
- TAYLOR, H. F. W. *Cement chemistry*. 2ª Edição. London, Academic Press, 1997.

- TOPÇU, I. B.; CANBAS, M. Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research*. v. 34, p. 267-274, 2004.
- TURNER, L. K.; COLLINS, F. G. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*. v. 43, p. 125 - 130, 2013.
- TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. Comparative assessment of self-compacting concretes (SCC) with fly ash and fine sand. *IBRACON Structure and Materials Journal*. v. 4, n. 2, p. 247-276, 2011.
- TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. *Concreto autoadensável*. 2 ed. Pini. São Paulo, 2015.
- UNITED NATIONS. KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. UNITED NATIONS, 1998. Disponível em: <<https://unfccc.int/sites/default/files/kpeng.pdf>>. Acesso em: 07 jun 2018.
- US EPA. *Global Anthropogenic Non-CO2 Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020 (EPA Report 430-R-06-003)*. United States Environmental Protection Agency. Office of Atmospheric Programs - Climate Change Division. Washington, D.C., USA. p. 274, 2006. Disponível em: < https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-05/documents/epa_global_nonco2_projections_dec2012.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2018.
- U.S. GS. *Mineral commodity summaries 2018: U.S. Geological Survey*, p. 200, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3133/70194932>>. Acesso em: 26 jun. 2018.
- VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V. *Zement-Taschenbuch*. Düsseldorf, 2002. ISBN 3-7640-427-4. Disponível em: < https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Zement-Taschenbuch/Zement-Taschenbuch_2002.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2018.
- VISHWAKARMA, V.; RAMACHANDRAN, D. Green Concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives - A review. *Construction and Building Materials*. v. 162, p. 96 - 103, 2018.
- WALZ, K. Beziehung zwischen Wasserzementwert, Normfestigkeit des Zements (DIN 1164, Juni 1970) und Betondruckfestigkeit. In: *Beton*. p. 499-503, 1970. Disponível em: < <https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Fachauf>

saetze/1961_1970/Betontechnische_Berichte_70_Beziehung_zwischen_Wasserze
mentwert_Normfestigkeit_des_Zements_und_Betondruckfestigkeit.pdf>. Acesso
em: 15 jan. 2018.

WANG, H.-Y.; ZENG, H.-H.; WU, J.-Y. A study on the macro and micro properties of
concrete with LCD glass. *Construction and Building Materials*. v. 50, p. 664 -
670, 2014.

WONG, H. S.; ABDUL RAZAK, H. Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement
replacement material for strength performance. *Cement and Concrete Research*. v.
35, p. 696 - 702, 2005.

ZHENG, K. Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling álcali-silica reaction.
Cement and Concrete Composites. v. 67, p. 30 - 38, 2016.

ANEXO I - Resultados dos ensaios de granulometria à laser das partículas de vidro .

Tabela A1 - Tamanho das partículas da moagem M1

Tempo de moagem (horas)	Tamanho das partículas (μm)			Área de superfície específica (m^2/kg)
	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀	
0	14,475	44,866	226,539	312
24	7,449	27,719	90,052	515
32	6,823	26,959	88,661	528
36	7,67	27,349	90,763	509
48	6,342	25,558	83,528	553

Tabela A2 - Tamanho das partículas da moagem M2

Tempo de moagem (horas)	Tamanho das partículas (μm)			Área de superfície específica (m^2/kg)
	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀	
0	14,475	44,866	226,539	312
8	6,029	26,653	78,23	550
10	4,785	22,072	66,261	641
12	4,977	21,926	60,644	638
24	3,673	17,475	47,534	815

Tabela A3 - Tamanho das partículas da moagem M3

Tempo de moagem (horas)	Tamanho das partículas (μm)			Área de superfície específica (m^2/kg)
	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀	
0	14,475	44,866	226,539	312
1	4,957	25,561	84,798	579
2	4,013	22,655	74,259	661
4	3,004	19,086	62,983	820
8	2,803	17,677	66,843	887
10	2,877	14,952	47,725	945
12	2,321	13,388	47,626	1050
16	2,029	11,404	37,652	1180
18	1,834	10,135	34,676	1280
24	1,714	9,373	31,435	1370

Tabela A4 - Tamanho das partículas da moagem M4

Tempo de moagem (horas)	Tamanho das partículas (μm)			Área de superfície específica (m^2/kg)
	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀	
0	14,475	44,866	226,539	312
4	2,294	13,57	41,785	1050
8	1,914	10,92	33,384	1220
12	1,722	9,523	31,585	1350
16	1,674	9,117	30,372	1390
20	1,581	8,07	27,699	1490
24	1,456	7,26	26,574	1620

ANEXO II - Condições de ensaio de mitigação das reações álcalis-silica

Tabela B1 - Granulometria requerida do agregado para o ensaio acelerado

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	g
4,75 mm	2,36 mm	10	99
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5
1,18 mm	600 µm	25	247,5
600 µm	300 µm	25	247,5
300 µm	150 µm	15	148,5
Total	-	100%	990

Tabela B2 - Quantidade de material utilizada para fabricação das barras de argamassa

	REF	10% RVM	15% RVM	20% RVM
Cimento Padrão (g)	440	396	374	352
Agregado Padrão (g)	990	990	990	990
Resíduo de Vidro (g)	0	44	66	88
Água destilada (g)	206,8	206,8	206,8	206,8

Tabela B3 - Características do cimento CP-V ARI

Propriedade	Método de ensaio	Resultado	Especificação NBR 15577-4
Óxido de sódio (Na ₂ O)	NBR NM 17	0,32 %	-
Óxido de potássio (K ₂ O)	NBR NM 17	0,81 %	-
Equivalente alcalino em Na ₂ O*	-	0,85 %	(0,90 ± 0,10) %
Área específica Blaine	NBR 16372	4910 cm ² /g	(4900 ± 200) cm ² /g
Expansibilidade em autoclave	ASTM C 151	0,10%	< 0,20 %

* Na₂O_{eq} → 0,658 %K₂O + %Na₂O

**Resultados dos ensaios fornecidos pela Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP