



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Larissa Cavalcante de Araújo Mello

**EFEITOS DAS ELEVADAS TEMPERATURAS EM CONCRETOS
AUTOADENSÁVEIS COM ALTOS TEORES DE RESÍDUO DA BIOMASSA DA
CANA-DE-AÇÚCAR E METACULIM**

Natal

2019

Larissa Cavalcante de Araújo Mello

**EFEITOS DAS ELEVADAS TEMPERATURAS EM CONCRETOS
AUTOADENSÁVEIS COM ALTOS TEORES DE RESÍDUO DA BIOMASSA
DA CANA-DE-AÇÚCAR E METACAULIM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – ênfase em Materiais e Processos Construtivos.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

Coorientadora: Prof^a. Dra. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

Natal

2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Mello, Larissa Cavalcante de Araujo.

Efeitos das elevadas temperaturas em concretos autoadensáveis com altos teores de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim / Larissa Cavalcante de Araujo Mello. - 2019.

90 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, RN, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.

Coorientador: Profa. Dra. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá.

1. Concreto sustentável - Dissertação. 2. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar - Dissertação. 3. Durabilidade - Dissertação. 4. Temperatura alta - Dissertação. I. Anjos, Marcos Alyssandro Soares dos. II. Sá, Maria das Vitórias Vieira Almeida de. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 691.3

LARISSA CAVALCANTE DE ARAÚJO MELLO

**EFEITOS DAS ELEVADAS TEMPERATURAS EM CONCRETOS
AUTOADENSÁVEIS COM ALTOS TEORES DE RESÍDUO DA BIOMASSA
DA CANA-DE-AÇÚCAR E METACAILIM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – ênfase em Materiais e Processos Construtivos.

BANCA EXAMINADORA

– Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos – Orientador (IFPB/UFRN)

– Prof. Dra. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá - Coorientadora (UFRN)

– Prof. Dr. Luciana de Figueiredo Lopes Lucena - Examinadora Interna (UFRN)

– Prof. Dr. Wendell Rossine Medeiros de Souza - Examinador Externo à
Instituição (UFERSA)

Natal, 29 de julho de 2019.

**EFEITOS DAS ELEVADAS TEMPERATURAS EM CONCRETOS
AUTOADENSÁVEIS COM ALTOS TEORES DE RESÍDUO DA BIOMASSA
DA CANA-DE-AÇÚCAR E METACAULIM**

Larissa Cavalcante de Araújo Mello

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

Coorientadora: Prof. Dra. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

RESUMO

Os finos adicionados ao concreto autoadensável (CAA) como alternativa de diminuir o alto teor de cimento contribuem para tornar o CAA um compósito sustentável tendo em vista a minimização da produção de CO₂ pela indústria cimentícia. Além disso, as adições minerais podem proporcionar melhorias nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. Um dos parâmetros de durabilidade é o comportamento do material frente às situações extremas como quando submetidos às elevadas temperaturas, equiparadas às atingidas em um incêndio. Nesta situação, a diminuição da resistência e do módulo de elasticidade, alterações na coloração e porosidade, além do efeito *spalling*, podem ocorrer no concreto em virtude da perda de água e de alterações microestruturais. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o comportamento em altas temperaturas de concretos autoadensáveis com elevados teores de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) e metacaulim (MK). Para tal, houve substituição do cimento de 30% a 50% pelas adições minerais. No estado fresco, as propriedades foram avaliadas comprovando a trabalhabilidade dos concretos confeccionados. No estado

endurecido, as amostras foram avaliadas a temperatura ambiente, 200°C, 400°C, 600°C e 800°C e analisadas quanto à inspeção tátil-visual, perda de massa, resistência à compressão, velocidade do pulso ultrassônico, absorção de água por imersão, índice de vazios, massa específica, absorção por capilaridade e difração por raios-X. Os resultados mostraram que CAAs com até 40% de adições minerais são menos sensíveis às alterações devido a altas temperaturas e que a maior inserção de metacaulim os deixam mais sensíveis. Outrossim, mudanças de fase são visualizadas e o alto teor de adições minerais consome o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ do meio, formando gismondina e margarite.

Palavras-chave: Concreto sustentável; cinza do bagaço da cana-de-açúcar; durabilidade; elevadas temperaturas.

EFFECT OF HIGH TEMPERATURES ON SELF-COMPACTING CONCRETE WITH HIGH LEVELS OF RESIDUES OF SUGARCANE BIOMASS AND METAKAOLIN

Larissa Cavalcante de Araújo Mello

Advisor: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

Co-advisor: Prof. Dra. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

ABSTRACT

The fines added to the self-compacting concrete (SCC) as an alternative to lower the high content of cement contribute to make the SCC a sustainable composite in order to minimize the production of CO₂ by the cement industry. Furthermore, mineral additions can provide improvements in the mechanical properties and durability of the concrete. One of the parameters of durability is the behavior of the material in extreme situations such as when subjected to high temperatures, similar to those reached in a fire. In this situation, the decrease of the resistance and modulus of elasticity, changes in color and porosity, besides the spalling effect, can occur in the concrete due to the loss of water and microstructural changes. In this context, the present study aims to evaluate the behavior at high temperatures of self-compacting concrete with high levels of residues sugarcane biomass (SBA) and metakaolin (MK). For this, cement was substituted for 30% to 50% by mineral additions. In the fresh state, the properties were evaluated proving the workability of the concretes made. In the hardened state, the samples were evaluated at room temperature, 200 °C, 400 °C, 600 °C and 800 °C and analyzed by visual and tactile

inspection, mass loss, compressive strength, ultrasonic pulse velocity, absorption by immersion, void index, specific mass, absorption by capillarity and X-ray diffraction. The results showed that SCCs with up to 40% of mineral additions are less sensitive to high temperatures and that higher metakolin insertion makes them more sensitive to high temperatures. Moreover, phase changes are visualized and the high content of mineral additions consumes $\text{Ca}(\text{OH})_2$ from the medium, forming gismondine and margarite

Keywords: Self-compacting concrete; residue biomass sugarcane; metakaolin; durability; high temperatures.

*Aprender é a única
coisa de que a
mente nunca se
cansa, nunca tem
medo e nunca se
arrepende.*

(Albert Schweitzer)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde, força, coragem e por sempre iluminar a minha jornada.

Aos meus pais e irmãos pelo apoio e ensinamentos diários.

Ao meu orientador, Marcos Alyssandro, pelos ensinamentos e principalmente compressão durante uma fase de transição de minha vida, inserção no mercado de trabalho, onde deu total apoio para o término deste trabalho, por ser um grande exemplo de professor e ser humano.

À minha coorientadora, Maria das Vitórias, pelos ensinamentos, apoio e carinho desde a graduação.

Às minhas amigas Nathaly e Evilane por toda parceira durante o mestrado, pelo compartilhamento das agonias e alegrias, pelo grande suporte que me deram durante a pesquisa, essa jornada se tornou mais leve e possível com a presença de vocês, amigades que levarei para a vida.

À equipe de pesquisa Amanda, Pedro, Anne e Aretusa pelo suporte nos ensaios e pelos momentos descontraídos que tornaram o dia a dia no laboratório mais leve.

Às minhas amigas Natália, Joyce e Anna Carla pela amizade e entenderem a minha ausência.

Às minhas amigas de mestrado Lanna Celly e Adna pelo ombro amigo e auxílio no mestrado.

À Ruan Landolfo pela presteza em ajudar, mesmo distante, nas instalações de programas e análises de resultados.

Aos meus amigos de trabalho Altieris (Altis), Daniele (Dani), Darlan, Carmo (Carmito), Hudson, Alex Matias, Ailson, Cássio (Garotinho), Leís, Luciene (Lú) e Erivan Júnior (Eri) pela animação diária que deixam o dia a dia mais leve, e

em especial a João Maria, Aline e Isadora (Isa) pelo apoio, risadas e me aguentarem nos momentos de estresse.

À servidora Viviane do PEC pela ajuda e esclarecimentos quando necessários.

Ao servidor Eduardo no laboratório de nutrição animal da EAJ/UFRN pela grande ajuda na procura do forno mufla.

À todas as pessoas que não foram citadas, mas que contribuíram direta e indiretamente para a finalização do trabalho.

À UFPB, IFRN e UFRN por ter cedido os laboratórios para a realização desta pesquisa.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
Introdução	1
1.1. Justificativa.....	3
1.2. Objetivos da pesquisa	4
1.2.1. Objetivos específicos	4
CAPÍTULO 2	6
Referencial teórico	6
2.1. Concretos autoadensáveis.....	6
2.2. Concretos autoadensáveis com altos teores de adições minerais	7
2.3. Concreto autoadensável com adições minerais sob elevadas temperaturas.....	12
CAPÍTULO 3	17
Materiais e métodos	17
3.1. Materiais utilizados.....	20
3.1.1. Cimento.....	20
3.1.2. Resíduo da biomassa da cana-de açúcar	20
3.1.3. Metacaulim	21
3.1.4. Aditivos superplastificante	21
3.1.5. Agregados miúdo e graúdo	21

3.1.6. Água de mistura	21
3.2. Caracterização dos materiais.....	21
3.2.1. Ensaio de caracterização dos agregados.....	21
3.2.2. Caracterização dos finos.....	23
3.3. Definição de traços e produção do concreto	26
3.4. Preparo e moldagem da mistura	26
3.5. Ensaio no estado fresco	27
3.6. Ensaio no estado endurecido	28
3.6.1. Aquecimento dos concretos autoadensáveis	28
3.6.2. Análise tátil-visual	30
3.6.3. Perda de massa.....	30
3.6.4. Velocidade do pulso ultrassônico	31
3.6.5. Resistência à compressão.....	31
3.6.6. Absorção de água por capilaridade, massa específica, absorção por imersão e índice de vazios.....	31
CAPÍTULO 4.....	33
Resultados e discussões.....	33
4.1. Caracterização dos finos.....	33
4.1.1. Composição química e mineralógica	33
4.1.2. Índice de Atividade Pozolânica com Cal.....	35
4.2. Avaliação do comportamento dos CAAs no estado fresco.....	35

4.3. Ensaio no estado fresco	36
4.5. Ensaio no estado endurecido	38
4.5.1. Aquecimento dos concretos autoadensáveis	38
4.5.2. Análise tátil-visual	39
4.5.3. Perda de massa.....	43
4.5.4. Velocidade do pulso ultrassônico	46
4.5.5. Resistência à compressão axial	47
4.5.6. Absorção de água por capilaridade, massa específica, absorção por imersão e índice de vazios.....	51
4.6. Análises microestruturais	54
4.6.1. Difractometria de Raio-X	54
CAPÍTULO 5.....	59
Considerações finais	59
5.1. Conclusões	60
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	61
Referências	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização dos corpos moedores.	20
Tabela 2 - Dados técnicos do MasterGlenium® SCC 160.	21
Tabela 3 - Ensaio de caracterização dos agregados e as respectivas normatizações.	22
Tabela 4 - Caracterização do agregado graúdo.	22
Tabela 5 - Caracterização do agregado miúdo.	23
Tabela 6 - Massa específica dos materiais finos.	23
Tabela 7 - BET dos finos.	24
Tabela 8 - Diâmetro médio dos materiais finos.	25
Tabela 9 - Traço das misturas realizadas.	26
Tabela 10 - Procedimento de mistura dos concretos.	27
Tabela 11 - Composição química dos finos inseridos nos concretos autoadensáveis.	33
Tabela 12 - IAP das adições.	35
Tabela 13 - Composição e parâmetros das misturas.	36
Tabela 14 - Resultados dos ensaios no estado fresco	37
Tabela 15 - Quantitativo de amostras que sofreram <i>spalling</i>	43
Tabela 16 - Relação entre velocidade do pulso ultrassônico e qualidade dos CAAs.	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da pesquisa.	19
Figura 2 - Curva granulométrica do agregado graúdo de acordo com NBR NM 248 (2003).	22
Figura 3 - Curva granulométrica do agregado miúdo de acordo com NBR NM 248 (2003).	23
Figura 4 - Granulometria a laser dos finos.	25
Figura 5 - Esquema de aquecimento das amostras de CAA.	29
Figura 6 - Esquema de aquecimento das amostras de CAA.	30
Figura 7 - Difração de DRX das adições minerais.	34
Figura 8 - Espalhamento e aspecto dos concretos autoadensáveis produzidos.	37
Figura 9 - Espalhamento dos concretos autoadensáveis no ensaio do Anel J.38	
Figura 10 - Consequências do aquecimento dos CAAs: a) <i>spalling</i> do REF; b) <i>spalling</i> do R30; c) empenamento da gaiola indicado por seta.	38
Figura 11 - Amostras do REF a temperatura ambiente e a 800°C.	39
Figura 12 - Amostras do REF nas temperaturas de ensaio.	39
Figura 13 - Amostras do R30 nas temperaturas de ensaio.	40
Figura 14 - Amostras do R20M20 nas temperaturas de ensaio.	40
Figura 15 - Amostras do R30M10 nas temperaturas de ensaio.	41
Figura 16 - Amostras do R30M20 nas temperaturas de ensaio.	41

Figura 17 - Amostras de CAA a 600°C e 800°C com indicação de trincas através de setas.	42
Figura 18 - Valores médios da perda de massas das amostras considerando o <i>spalling</i>	44
Figura 19 - Valores médios da perda de massas das amostras desconsiderando o <i>spalling</i>	44
Figura 20 - Valores da massa residual relativa dos CAAs que sofreram <i>spalling</i>	45
Figura 21 - Valores da massa residual relativa dos CAAs que não sofreram <i>spalling</i>	45
Figura 22 - Velocidade do pulso ultrassônico e velocidade residual dos CAAs aos 91 dias.	46
Figura 23 - Resistência à compressão do CAA a temperatura ambiente.	48
Figura 24 - Aumento da resistência dos CAAs x Idade dos CAAs.	48
Figura 25 - Resistência a compressão dos CAAs aos 91 dias em todas as temperaturas e resistência a compressão residual relativa.	49
Figura 26 - Coeficiente de capilaridade dos CAAs aos 91 dias.	51
Figura 27 - Coeficiente de capilaridade residual dos CAAs aos 91 dias.	52
Figura 28 - Massa específica dos CAAs aos 91 dias.	53
Figura 29 - Absorção e índice de vazios dos CAAs aos 91 dias.	53
Figura 31 - DRX do R30.	56
Figura 32 - DRX do R20M20.	57
Figura 33 - DRX do R30M10.	57

Figura 34 - DRX do R30M20. 58

CAPÍTULO 1

Introdução

A cadeia produtiva do concreto possui um alto gasto energético e de impactos ambientais, principalmente quando se trata da produção do cimento, que em seu processo libera gás carbônico, para cada tonelada produzida é liberado aproximadamente uma tonelada do CO₂ antropomórfico, além de extrair matérias-primas da natureza, tornando o cimento o material mais caro e poluente na produção de todo o processo produtivo do concreto. Nesse contexto, diversos pesquisadores procuram como solução ambiental e econômica a substituição do cimento por adições minerais a fim de reduzir o consumo do ligante. Além disso, estudos mostram que essas adições podem, de alguma forma, melhorar o comportamento mecânico e aumentar a durabilidade do concreto. Entende-se por durabilidade a capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em projeto (ABNT NBR 15575, 2013).

O concreto autoadensável (CAA) tem como característica ser de melhor qualidade, quando comparado com o concreto normalmente vibrado (CNV), em virtude da sua maior compacidade, gerando um material menos poroso e com menor permeabilidade. As adições minerais inseridas nele podem contribuir ainda mais para essa característica, resultado do efeito fíler, de nucleação heterogênea e das reações pozolânicas.

Essa maior compacidade deve ser considerada em situações em que o CAA é submetido a elevadas temperaturas, como as verificadas em um incêndio, podendo apresentar perda de resistência mecânica e lascamento. A temperatura de um incêndio varia, podendo atingir temperaturas acima dos

1000°C. Em um edifício, essa variação acontece devido à grande diversidade de materiais e compartimentos presentes nele, por isso pesquisadores elaboraram curvas tempo-temperatura de incêndio padrão a fim de padronizar os requisitos de resistência ao fogo para a construção de estruturas e para usar como base em experimentos de resistência ao fogo nos elementos do edifício. As curvas mais conhecidas são ASTM E-119 e a ISO 834, sendo esta a recomendada no Brasil.

Os fatores que influenciam o comportamento dos concretos sob elevadas temperaturas são os mais variados, como a forma e dimensão do elemento estrutural, os tipos de materiais que os constitui e até mesmo a forma de aquecimento e resfriamento.

A exposição de concretos a altas temperaturas gera mudanças físicas, químicas e mecânicas. A água contida nos seus poros evapora e resulta em uma acumulação de pressão dos poros em condições de alta temperatura. Esta alta pressão dos poros é suficiente para causar uma explosão dos concretos pouco permeáveis. A expansão diferencial entre o agregado e a pasta de cimento desenvolve tensões interfaciais mais elevadas e leva à fissuração na zona de transição. A alta temperatura na pasta de cimento remove a água quimicamente ligada e enfraquece a argamassa de cimento. Este fenômeno gera a perda de propriedades mecânicas e provoca o lascamento do compósito (REDDY; RAMASWAMY, 2017).

A perda das propriedades mecânicas devido a temperaturas extremas se dá principalmente pela desidratação e decomposição do hidrato de silicato de cálcio (CSH) (RAFIEIZONOOZ *et al.*, 2017). A inserção das adições minerais no CAA pode contribuir ainda para essa perda em razão da maior compacidade gerada, dificultando a saída da água livre e gerando tensões internas mais severas e, conseqüentemente, lascamentos mais explosivos de parte da peça estrutural. Por outro lado, em pastas, o uso de materiais pozolânicos à base de sílica reduz a relação cálcio/sílica, observando-se a diminuição de fases ricas em cálcio e provocando menores perdas de resistência (LUKE, 2004). No entanto, a influência das adições em concretos

autoadensáveis expostos ao fogo é complexa devido a presença da zona de transição.

Diante do exposto, verifica-se a importância do estudo do desempenho de concretos autoadensáveis com adições minerais expostos a altas temperaturas.

1.1. Justificativa

O grupo de pesquisa de Durabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (IFRN/PEC) tem estudado desde 2015 a durabilidade de concretos autoadensáveis (CAAs) com baixo consumo de cimento. Como continuidade dos estudos, uma das análises a ser feita é o comportamento de CAAs a elevadas temperaturas com baixo consumo de cimento e altos teores de adições minerais.

O que motiva tal análise é o fato das estruturas de edifícios e obras viárias poderem ser submetidas a situações de incêndios e terem sua durabilidade comprometida, mesmo havendo uma constante prevenção a este tipo de situação. No Brasil, na última década ocorreram os incêndios no Museu Nacional (Rio de Janeiro, 2018), no Museu da Língua Portuguesa (São Paulo, 2015), na ponte do Jaguaré (São Paulo, 2019), na boate Kiss (Rio Grande do Sul, 2013) e no prédio residencial Alto do Tirol (Rio Grande do Norte, 2011).

Para prever a resposta da estrutura de concreto após a exposição a temperaturas elevadas, como as verificadas em um incêndio, é essencial que as propriedades submetidas a tais temperaturas sejam claramente compreendidas. A ação do fogo sobre o concreto está associada, principalmente, a dois tipos de degradação: a perda de resistência mecânica e o destacamento de material ou lascamento do concreto; o lascamento do concreto depende de sua porosidade, o que provoca a perda de resistência, depende da sua porosidade (ROBERT; COLINA; DEBICKI, 2014).

As alterações nas propriedades mecânicas do concreto durante a exposição ocorrem especialmente por três fatores: alterações físico-químicas

na pasta de cimento; alterações físico-químicas no agregado; e, incompatibilidade entre o agregado e a pasta de cimento. Além de outros, dois fatores que também interferem em tais alterações são a intensidade da temperatura e a taxa de aquecimento (KHOURY, 2000).

O conhecimento das alterações ocorridas no concreto convencional normalmente vibrado quando submetidos a altas temperaturas já é consolidado por diversos trabalhos como os de Kizilkanat, Yüzer e Kabay (2013), Zhai *et al.* (2014) e Rafieizonooz *et al.* (2017). No que se refere às alterações em CAA os estudos não são tão usuais, principalmente quando se trata de CAA com adições minerais do tipo metacaulim (MK), não tendo sido encontrado trabalhos que tratam de CAA com resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) submetidos a elevadas temperaturas.

Portanto, faz-se necessário avaliar o comportamento de concretos autoadensáveis com altos teores de RBC e MK submetidos a elevadas temperaturas.

1.2. Objetivos da pesquisa

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar concretos autoadensáveis com adições minerais, do tipo resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim, em substituição ao cimento submetidos à altas temperaturas.

1.2.1. Objetivos específicos

- Caracterizar as adições minerais inseridas no CAA;
- Avaliar o comportamento dos CAAs, sem e com 30%, 40% e 50% de adições minerais, no estado fresco;
- Avaliar o comportamento dos CAAs, sem e com 30%, 40% e 50% de adições minerais, no estado endurecido sob temperatura ambiente;
- Avaliar o comportamento dos CAAs no estado endurecido após exposição às temperaturas de 200°C, 400°C, 600°C e 800°C;

- Identificar os compostos hidratados presentes nos CAA, após cura, na temperatura ambiente e após exposição às temperaturas de 400°C e 600°C;
- Avaliar e identificar as mudanças de fases ocorridas nos CAA após cura, na temperatura ambiente e após a exposição às temperaturas de 400 °C e 600 °C.

CAPÍTULO 2

Referencial teórico

2.1. Concretos autoadensáveis

O concreto autoadensável é capaz de se modelar e preencher, sem o uso de vibrador, as fôrmas destinadas a ele. Quando comparado com o concreto convencional normalmente vibrado, ele possui maior volume de pasta, adições minerais, proporção agregado graúdo para finos próximo de um, superplastificantes e aditivos modificadores de viscosidade (FARES *et al.*, 2010; BENZAID; BENMARCE, 2017).

Para Mehta e Monteiro (2014) a principal diferença entre o CNV e o CAA são as melhores características reológicas deste. Assim como o CNV, o CAA deve atender especificações técnicas para o seu uso tanto no estado fresco como no endurecido.

O concreto autoadensável tem três características principais: (a) capacidade de fluir sob seu peso próprio sem vibração, (b) capacidade de fluir através de um reforço fortemente congestionado sob seu peso próprio, (c) capacidade de se tornar homogêneo sem que haja segregação dos agregados. O alto nível de coesão significa que o concreto pode fluir sem vibração, já a viscosidade ajuda a evitar que os agregados segreguem e obstruam o fluxo do concreto (SUA-IAM; MAKUL, 2015). Os ensaios usuais do CAA no estado fresco são *slump flow*, T500, anel J e funil V.

No estado endurecido, a resistência à compressão é considerada a propriedade mais importante. Contudo, atualmente, tal propriedade está

diretamente relacionada a outra, a durabilidade. Entende-se por durabilidade a expectativa de vida de um material sob determinadas condições ambientais e segurança da estrutura. De maneira geral o CAA é mais durável por ser mais compacto, possuir menos poros. Uma estrutura de concreto pode estar exposta às mais variadas condições ambientais, dentre elas a de altas temperaturas em situações de incêndio.

2.2. Concretos autoadensáveis com altos teores de adições minerais

Uma das finalidades do uso das adições minerais é a viabilização do custo do concreto autoadensável, pois muitas vezes substituem parte do cimento, material mais caro na composição. Essa diminuição no consumo de cimento torna o concreto mais sustentável já que reduz a geração de CO₂ no processo de fabricação do aglomerante, bem como minimiza a exploração de sua matéria-prima. As adições minerais podem ser as mais variadas, escórias de alto-forno, fíler calcário, metacaulim e inclusive agroindustriais, como o resíduo a biomassa da cana-de-açúcar. Elas são frequentemente utilizadas no CAA para reduzir o teor de cimento, melhorar a viabilidade e as propriedades mecânicas e/ou de durabilidade.

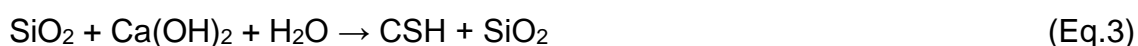
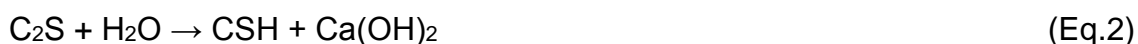
Os finos são necessários para manter a fluidez do concreto autoadensável sem ocorrer a segregação, garantindo a qualidade do material ou da estrutura final (PELISSER; VIEIRA; BERNARDIN, 2018). As partículas finas preenchem os poros capilares e a zona de transição fazendo com que haja o empacotamento eficaz e melhor dispersão de grãos de cimento, assegurando um concreto fluido com maior coesão e microestrutura mais densa (DIVAKAR; MANJUNATH; ASWATH, 2012; KELEŞTEMUR *et al.*, 2014).

Como finos, as adições minerais podem ser inertes ou ativas. As inertes aumentam a compacidade do concreto em virtude do efeito fíler e de nucleação heterogênea. O efeito fíler é dado pela presença de pequenas partículas oriundas das adições que, quando devidamente utilizadas, refinam a estrutura porosa. Com isso, há uma redução na quantidade e tamanho de poros, tornando um concreto mais compacto. Já na nucleação, os finos quebram a

inércia do sistema, aumentando a velocidade de reação entre as partículas de cimento e a água (MORAES, 2001).

Em relação às adições ativas, elas são materiais pozolânicos que consistem predominantemente de sílica e alumina. Na presença de água, a pozolana reage quimicamente com o hidróxido de cálcio (CH) para formar compostos com propriedades parecidas com as do cimento (KAVITHA *et al.*, 2015). As inclusões de pozolanas reduzem a demanda de cimento, o tamanho dos poros, a permeabilidade e a retração. Além disso, melhoram a resistência à compressão, à tração e à flexão e o módulo de elasticidade do concreto (DVORKIN *et al.*, 2012).

O ganho de resistência de um concreto com adições minerais pode ser atribuído à transformação da fase de CH nas fases de silicatos de cálcio hidratados (CSH) mediante reação pozolânica (MUANGTONG *et al.*, 2013). As equações de 1 a 3 resumem a formação de CSH em concretos com pozolanas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).



O CH é o produto de hidratação mais solúvel, possuindo uma ligação fraca no concreto do ponto de vista da durabilidade. Quando o concreto é exposto à água, o CH se dissolve aumentando a porosidade, isso o torna mais vulnerável a uma maior lixiviação e ataque químico (KAVITHA *et al.*, 2016).

Observou-se que a utilização de metacaulim como substituto parcial do cimento em CAA causa diminuição da capacidade de preenchimento à medida em que se aumenta o teor de substituição de cimento por metacaulim e mantem-se a relação água/finos e o teor de aditivo superplastificante. Para manter o padrão de espalhamento, nota-se maior demanda de aditivo para o uso do maior teor da adição (MEHDIPOUR *et al.*, 2016; AHARI; ERDEM; RAMYAR, 2015; MEHDIPOUR *et al.*, 2013; ALCANTARA; SANTOS, 2012).

Segundo Perlot *et al.* (2013), além de ter elevada atividade pozolânica, a hidratação do cimento favorecida pelo metacaulim é devido ao efeito físico. A sua elevada área superficial acelera a hidratação do cimento através da composição química e da modificação da composição iônica da solução dos poros. Em curto prazo, a ativação de cimento anidro na presença de metacaulim acelera o endurecimento dos materiais cimentícios.

De acordo com Kannan e Ganesan (2014), a substituição de cimento por metacaulim em teores de até 30% proporciona resistências à compressão maiores que as composições com cimento. Entretanto, as resistências evoluem com o aumento do teor de substituição até 20%, e decrescem com o aumento do teor de substituição de cimento por metacaulim entre 20% e 30%.

Teores de substituição de cimento por metacaulim até 30% geram menores absorções por capilaridade e maior resistência à migração de íons cloreto, sendo a menor absorção observada para substituição de 5% de metacaulim e a maior resistência a cloretos para a substituição de 30% (KANNAN; GANESAN, 2014).

Ahari, Erdem e Ramyar (2015) afirmam que o metacaulim melhora a estabilidade das misturas devido à alta coesão gerada e motivada pela alta área superficial, além da alta atividade química, justificada por Mehdipour *et al.* (2013). Outrossim, a alta coesão pode melhorar a ligação entre a pasta e o agregado (MEHDIPOUR *et al.*, 2016). Além disso, a microestrutura e a alta microporosidade das partículas são as responsáveis pela grande mudança de viscosidade, deixando menor quantidade de água livre na mistura. Verificou-se ainda que o aumento da tixotropia é relacionada à alta finura e ao efeito de nucleação.

Mehdipour *et al.* (2016) observaram que a substituição parcial de cimento por MK em CAA leva a uma melhoria substancial na resistividade elétrica e absorção de água. Isto é devido ao alto efeito de enchimento e à reação de hidratação secundária do MK, o que resulta em refinamento dos

poros capilares e maior densidade da microestrutura. O aumento na resistividade elétrica pode ser atribuído ao alto teor de alumina do MK.

O uso de 20% de metacaulim em concretos com substituição parcial do cimento em mistura binária apresenta melhor desempenho em relação à sorvidade e à densidade aparente. Já a substituição de 30% apresenta melhor resistência à absorção de água, porosidade e ataque de ácido aos 28 e 56 dias. A natureza pozolânica do MK faz com que os CAA tivessem ganho de resistência lenta nas primeiras idades, porém em idades avançadas (28 e 45 dias) a durabilidade e a resistência melhoraram sensivelmente (VIVEK; DHINAKARAN, 2017).

Hernández *et al.* (1998) estudaram a atividade pozolânica de pasta com relação cal/RBC de 30%/70% em massa. Os resultados mostram que a presença de CH nas amostras aos 28 dias indica uma reação não concluída entre a sílica reativa e CH. Existem duas possibilidades para o CH reagir, a primeira é com a sílica reativa da pozolana para formar fases CSH, a segunda é com CO₂ do ar para formar CaCO₃. Na pasta com cinza do resíduo, o CH permanece presente mesmo em idades tardias e a intensidade do pico para portlandita (CH) tende a diminuir dependendo do tempo, indicando assim que o CH está sendo consumido.

Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009) afirmaram que o resíduo do bagaço da cana-de-açúcar pode ser usado como pozolana em pasta à base de cimento, argamassa e concreto devido a sua composição rica em sílica.

Alcântara e Santos (2012) avaliaram o comportamento de CAA com incorporação de cinzas de bagaço-de-cana e concluíram que as composições com cinza requerem altos valores de água em composição - em decorrência da sua finura e superfície específica elevada - influenciando nos valores de resistência mecânica, mas, por outro lado, tem-se o efeito da segregação atenuado pela presença das cinzas.

Medeiros (2016) estudou CAA com baixo consumo de cimento e alto teores de adições minerais e observou que o metacaulim, a pozolana da casca

de arroz e o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar proporcionam redução na absorção capilar e na penetração acelerada de íons cloreto, com manutenção das propriedades mecânicas, para teores de substituição de 40% e 50%. Essa redução foi atribuída ao avanço das reações pozolânicas e ao efeito fíler provocado pela elevada finura das adições. Além disso, as adições proporcionaram ao CAA maior compactidade e menores módulos de elasticidade.

Barluenga, Palomar e Puentes (2015) avaliaram o efeito da microssílica (MS), nanossílica (NS) e metacaulim (MK), consideradas como adições minerais ativas, em concretos autoadensáveis com presença de fíler calcário (FC). Imagens microestruturais mostram que os concretos de referência (sem adições) possuem grandes cristais de portlandita e que a presença da MS reduz significativamente o tamanho de tais cristais na zona de transição (ZT). Quando há incorporação de NS e do MK no concreto os cristais não são visualizados na ZT. O efeito de redução dos cristais é atribuído à atividade pozolânica das adições, sendo a morfologia e composição da ZT dependente do tipo e do tamanho das partículas das adições.

Silva e Brito (2015) analisaram a absorção por capilaridade de misturas binárias e ternárias de CAA com fíler calcário e cinza volante (CV). Eles observaram que o coeficiente de absorção capilar das misturas binárias aumenta com o incremento do teor de adição substituindo o cimento. Além disso, ainda foi verificado que os coeficientes de absorção por capilaridade das misturas binárias com FC foram maiores do que das com CV. Tal fato foi justificado pelas misturas com fíler apresentarem tamanhos de poros maiores que as misturas com cinza volante, apesar de terem menor porosidade total.

A relação entre tamanho dos poros e absorção por capilaridade pode ser fundamentada pela lei de Jurin, onde a ascensão capilar da água no concreto é o inverso dos raios dos poros que, possivelmente, são menores nos compósitos cimentícios com grãos mais finos e menores. No entanto, a altura do corpo de prova, na ordem de dezenas de centímetros, é muito inferior à

altura de ascensão máxima dada pela lei de Jurin (OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

2.3. Concreto autoadensável com adições minerais sob elevadas temperaturas

Para prever a resposta da estrutura de concreto após a exposição a temperaturas elevadas, é essencial que as propriedades de resistência submetidas a tais temperaturas sejam claramente compreendidas. A variação da resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, porosidade e perda de massa são algumas das propriedades importantes a serem investigadas quando as estruturas de concreto são submetidas a temperaturas elevadas (PATHAK; SIDDIQUE, 2012).

Em geral, um concreto de baixa permeabilidade pode ser mais propenso a fragmentação, sendo o grau de deterioração dependente de diversos fatores. Alguns dos fatores influentes na resistência do concreto ao calor são a temperatura e duração do fogo, tipo de cimento, tipo e tamanho dos agregados utilizados na mistura, umidade relativa do concreto, tamanho e forma da peça estrutural, poro-pressão, permeabilidade, idade e resistência do concreto, e craqueamento (MAJORANA *et al.*, 2010; RAFIEIZONOOZ *et al.*, 2017).

Para entender melhor as consequências das altas temperaturas no concreto, é fundamental o conhecimento das possíveis alterações que a temperatura pode gerar na microestrutura. Entre 70 °C e 90 °C a etringita se desidrata e decompõe (TAYLOR; FAMY; SCRIVENER, 2001). A partir de 105°C toda a água evaporável é expelida, para além da água contida nos agregados. De 180 °C a 850 °C a desidratação do CSH ocorre com maior intensidade a 200 °C e a decomposição começa a aproximadamente aos 700°C. De 400 °C a 600 °C há dissociação do hidróxido de cálcio, sendo mais intenso entre 450 °C e 500 °C (KHOURY, 2000).

Rafieizonooz *et al.* (2017) verificaram que quando a temperatura ultrapassa 100 °C, a água existente na argamassa evapora aumentando a pressão interna no interior do concreto. Essa pressão excessiva provoca

fissuras e fragmentação do concreto. Aproximadamente aos 500 °C, o hidrato de silicato de cálcio do compósito começa a se desidratar e decompor. Perto dos 900°C o gel de CSH decompõe-se completamente. A resistência à compressão do concreto diminui em virtude da decomposição do gel e do desenvolvimento das fissuras.

A alta temperatura na pasta de cimento remove a água quimicamente ligada e enfraquece a argamassa. Este fenômeno leva à perda de propriedades mecânicas do concreto e provoca desprendimento térmico (REDDY; RAMASWAMY, 2017).

Em relação ao agregado, quando ele ocupa 65-75% do volume do concreto, o comportamento deste a altas temperaturas é fortemente influenciado pelo tipo agregado. Os materiais agregados comumente utilizados são termicamente estáveis até 300-350°C (XING *et al.*, 2011). A expansão térmica dos agregados influencia na incompatibilidade de deformação entre a pasta e eles. Essa incompatibilidade desenvolve altas tensões interfaciais e leva a fissuras na zona de transição em condições de alta temperatura.

Os agregados siliciosos sofrem degradação térmica transformando o quartzo (SiO_2) α em β aos 573 °C e induzindo tensões internas, gerando expansão significativa de volume. Ainda sobre os siliciosos, há diferentes comportamentos, enquanto alguns estão sujeitos ao *spalling*, tornam-se instáveis termicamente aos 300 °C, outros, como o quartzito, podem suportar temperaturas de até 750 °C sem qualquer instabilidade (ROBERT; COLINA, 2009). O volume dos agregados também influencia na sua estabilidade térmica, maiores volumes dificultam a perda de água.

Em relação aos agregados calcários, sua descarbonatação começa a partir dos 700 °C. No resfriamento, a cal livre (CaO) oriunda da descarbonatação se combina com a umidade atmosférica para formar Ca(OH)_2 , gerando um aumento no volume de aproximadamente 44%, seguido por craqueamento e expansão do concreto (HAGER, 2013; OZGUVEN; OZCELIK, 2014).

Frías, Villar-Cociña e Valencia-Morales (2007) estudaram a atividade pozolânica do RBC e verificaram que há um efeito endotérmico detectado aos 700 °C correspondente ao fenômeno de descarbonatação devido à presença de carbonato de cálcio na amostra inicial. No entanto, quando os valores de perda de peso são tomados como totais (soma de vários fenômenos de desidratação), informações valiosas podem ser obtidas relacionadas à decomposição de fases hidratadas. O intervalo principal para calcular essas perdas de peso é entre 100 °C e 400 °C, sendo atribuído à decomposição do CSH.

A incorporação de 59% de RBC sobre a massa de cimento em pastas para cimentação de poço, submetidas a altas temperaturas de cura, juntamente com a baixa relação a/c previnem a perda de resistência. Isso ocorre devido à menor relação CaO/SiO₂ e à menor quantidade de água evaporável na suspensão, baixando a pressão interna dos produtos gasosos capazes de decompor a pasta. Os produtos de hidratação formados são os xilotólitos de silicato de cálcio e tobermorita que é um silicato de cálcio hidratado altamente cristalino, formado apenas quando a razão CaO/SiO₂ da pasta anidra é menor ou igual a 1,0 e a temperatura está acima de 110 °C. Estes produtos de hidratação são responsáveis pela manutenção das resistências à compressão da pasta endurecida (ANJOS; MARTINELLI; MELO, 2011).

No estudo de ANJOS *et al.* (2013) as pastas com RBC possuem desidratação entre 105 °C e 460 °C devido à perda de água combinada quimicamente com todas as fases hidratadas presentes, incluindo etringita e silicato de cálcio hidratado. A descarbonatação ocorre entre 600 °C e 700 °C e a desidroxilação do Ca(OH)₂ entre 460 °C e 520 °C.

No estudo de Moraes *et al.* (2015) com pastas de RBC, a desidratação dos compostos formados através da reação pozolânica, principalmente o gel CSH, ocorre na faixa de temperatura de 100-180 °C, enquanto a perda de massa ocorrida pela desidratação do Ca(OH)₂ é na faixa de 520-560 °C.

A perda de massa, relacionada com os compostos formados através da reação pozolânica, aumenta com o tempo de cura devido à alteração da composição destes compostos: o gel CSH inicialmente formado tem uma alta relação Ca/Si. No decorrer do tempo, essa relação diminui porque mais sílica do RBC reage e está ligada ao gel CSH. Assim, a quantidade de gel aumenta e então a quantidade de água liberada no aquecimento torna-se maior (MORAES *et al.*, 2015).

Fares, Noumowe e Remond (2009) observaram um aumento da resistência à compressão em CAA com filer calcário entre 150-300 °C. No entanto, a resistência à flexão e módulo de elasticidade diminuíram de forma semelhante às evoluções observadas entre 20 °C e 150 °C, motivado pela saída da água, correspondendo a uma grande perda de massa. O aumento de resistência foi atribuído a uma modificação das propriedades de ligação dos hidratos de pasta de cimento (reidratação da pasta devido à migração de água nos poros).

Nos concretos aquecidos estudados por Fares, Noumowe e Remond (2009) houve aumento da porosidade e permeabilidade decorrentes da alteração da rede porosa (liberação da água adsorvida e decomposição dos hidratos) e do microcraqueamento. Essas mudanças fizeram com que a conectividade dos poros e microfissuras aumentassem, aumentando a permeabilidade do concreto.

Fitos *et al.* (2015) realizaram análises térmicas no metacaulim e observaram que em temperaturas inferiores a 200 °C há liberação de água absorvida nos poros e nas superfícies. O pico endotérmico a 540 °C é devido à decomposição de caulinita e à ausência da formação de metacaulinita, indicando uma desidroxilação completa de caulinita. A perda de cristalinidade é regida pela perda de grupos hidroxila na superfície do espaço entre camadas e a migração do alumínio para os locais vazios. A perda de peso menor que 0,5%, em vários intervalos de temperatura, indica que a ilita e a alunita, quando presentes, não se decompõem totalmente. O pico exotérmico devido à

formação de novas fases é ligeiramente deslocado para temperaturas mais baixas devido à deformação das ligações Si-O-Al.

Nuruddin, Azmee e Yung (2014) verificaram que a presença de cinzas volante e da casca do arroz geram menor fragmentação do concreto, e conseqüentemente menor perda de massa, devido a menor quantidade de água livre na mistura que elas estavam presentes. Além disso, concretos com essas adições tem diminuição mais significativa da resistência à compressão ao 800 °C, enquanto o sem adição ocorre aos 400°C.

Rukavina, Bjegovic e Gabrijel (2015) notaram que há uma tendência muito semelhante de diminuição do valor do módulo de elasticidade estático, da resistência à compressão e da velocidade do pulso ultrassônico em CAA com cinza volante, metacaulim e calcário. Em relação a resistência à compressão residual, as adições têm uma influência significativa entre a temperatura ambiente e 400°C.

Benzaid e Benmarce (2017) observaram que CAA com adições de fíler calcário e escória de alto forno expostos entre 105-800 °C tiveram aumento importante na resistência à compressão entre 250°C e 400°C. Esse incremento foi oriundo da modificação das propriedades de ligação da pasta de cimento. A alteração se deu em virtude dos grupos silanol perderem parte das suas ligações com água, induzido a criação de elementos de siloxano mais curtos e mais fortes (Si-O-Si) com energias de superfície provavelmente maiores contribuindo para o aumento da resistência.

CAPÍTULO 3

Materiais e métodos

Nesta seção serão descritos os materiais utilizados e os procedimentos adotados a fim de avaliar o comportamento no estado fresco, além das propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade dos concretos autoadensáveis com adições minerais do tipo resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) e metacaulim (MK) submetidos a altas temperaturas.

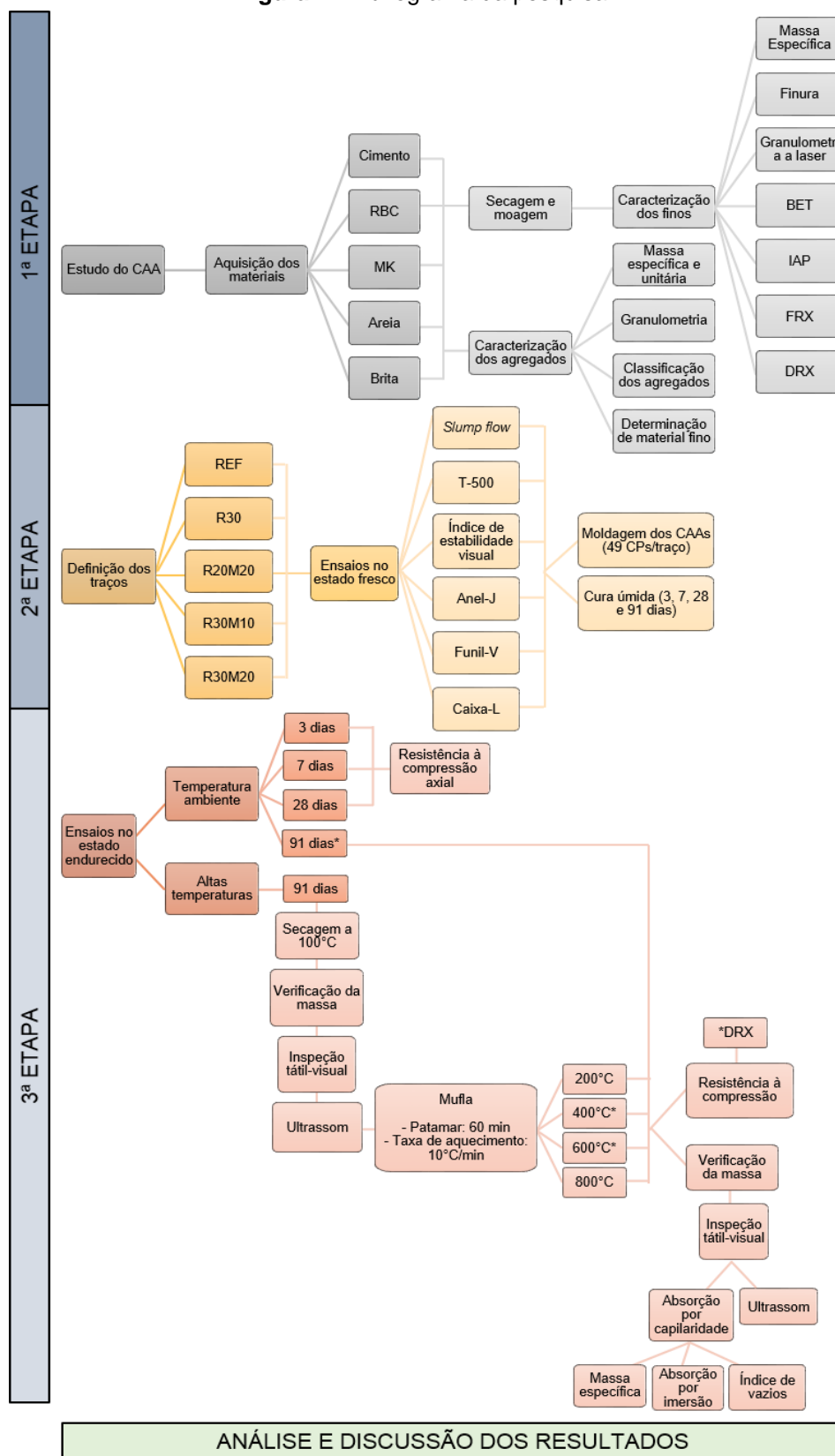
Foram produzidas cinco misturas de autoadensável (CAA), uma mistura de referência sem adições, uma com 30%, duas com 40% e uma com 50% de adições em substituição parcial do cimento. As misturas receberam a seguinte nomenclatura:

- a. REF – mistura de referência apenas com cimento Portland;
- b. R30 – substituição do cimento por 30% de RBC;
- c. R20M20 – substituição do cimento por 40% de adições minerais, sendo utilizado 20% de RBC e 20% de MK;
- d. R30M10 – substituição do cimento por 40% de adições minerais, sendo utilizado 30% de RBC e 10% de MK;
- e. R30M20 – substituição do cimento por 50% de adições minerais, sendo utilizado 30% de RBC e 20% de MK.

A fase experimental foi dividida em três etapas. A primeira, coleta e moagem do RBC e caracterização dos materiais necessários. Na segunda, os concretos autoadensáveis foram confeccionados, moldados e observado o comportamento no estado fresco. As misturas foram definidas com base em pesquisas anteriores do grupo de estudo do IFRN e PEC/UFRN. Na terceira etapa, os CAA foram avaliados no estado endurecido a temperatura ambiente e a temperaturas elevadas.

Na Figura 1 estão apresentadas, de forma resumida, as etapas realizadas na pesquisa.

Figura 1 - Fluxograma da pesquisa.



*DRX realizados em amostras a temperatura ambiente com 91 dias de idade e nas submetidas a 400 °C e 600 °C.

Fonte: Autoria própria.

3.1. Materiais utilizados

3.1.1. Cimento

O cimento utilizado nos traços foi o CP-V ARI RS, de alta resistência inicial e resistência a sulfatos, da marca Nacional. A escolha desse tipo de cimento foi motivada por ele não conter, ou conter um percentual muito pequeno de adições minerais (menor que 5% de fíler calcário) em sua composição, fazendo com que o concreto fabricado não houvesse influência de outras adições além do RBC e MK.

O cimento utilizado foi proveniente de um único lote, onde foram ensacados e lacrados em porções menores e guardados em bombonas a fim de manter as características iniciais.

3.1.2. Resíduo da biomassa da cana-de açúcar

O resíduo utilizado foi proveniente de uma usina açucareira localizada na cidade de Arêz/RN, sendo coletado a partir da descarga que ocorre na limpeza das caldeiras e passou por um processo de secagem em estufa a $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24h com posterior moagem para obtenção da finura adequada. O beneficiamento foi baseado nos estudos de Anjos, Martinelli e Melo (2011), Anjos *et al.* (2013) e Diniz (2018), sendo realizado no Laboratório LABEME – UFPB com utilização de moinho rotativo SONNEX, marca PAVITEST. O processo durou aproximadamente 3 horas, a 62 RPM, para uma carga de 2000 g de material para cada 33,54 kg de corpos moedores esféricos de aço. A Tabela 1 apresenta a caracterização dos corpos moedores.

Tabela 1 - Caracterização dos corpos moedores.

Diâmetro (mm)	Massa (g)	Quantidade
20	29,55	503
25	56,81	101
30	105,08	44
40	266	20

Fonte: Autoria própria.

3.1.3. Metacaulim

O metacaulim utilizado na pesquisa como adição mineral foi Metacaulim BZ com fabricação em Ipojuca (PE). O processo de armazenamento foi semelhante ao do cimento.

3.1.4. Aditivos superplastificante

O aditivo utilizado foi do tipo superplastificante com cadeia de éter carboxílico modificado BASF MasterGlenium® SCC 160. Na Tabela 2 estão descritos os dados técnicos do aditivo utilizado conforme informações do fabricante.

Tabela 2 - Dados técnicos do MasterGlenium® SCC 160.

Teste	Método BASF	Especificação
Aspecto (visual)	TM 761B	Líquido branco turvo
pH	TM 112B	7 - 9
Densidade (g/cm ³)	TM 103B	1,067 - 1,107
Sólidos (%)	TM 613B	38,00 – 42,00

Fonte: Informações do fabricante em ficha técnica do produto.

3.1.5. Agregados miúdo e graúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia quartzosa proveniente da região metropolitana de Natal, enquanto o graúdo foi a brita granítica de tamanho comercial B0 (9,5mm) oriunda do município de Serrinha/RN, na região metropolitana de Natal.

3.1.6. Água de mistura

A água usada nas misturas foi oriunda da rede pública de abastecimento local.

3.2. Caracterização dos materiais

3.2.1. Ensaio de caracterização dos agregados

Os ensaios de massa específica dos agregados foram executados no Laboratório de Durabilidade do IFRN – Campus Natal Central.

Os agregados miúdo e graúdo foram separados previamente conforme a NBR NM 26 (ABNT, 2009), com posterior caracterização segundo as normas apresentadas na Tabela 3.

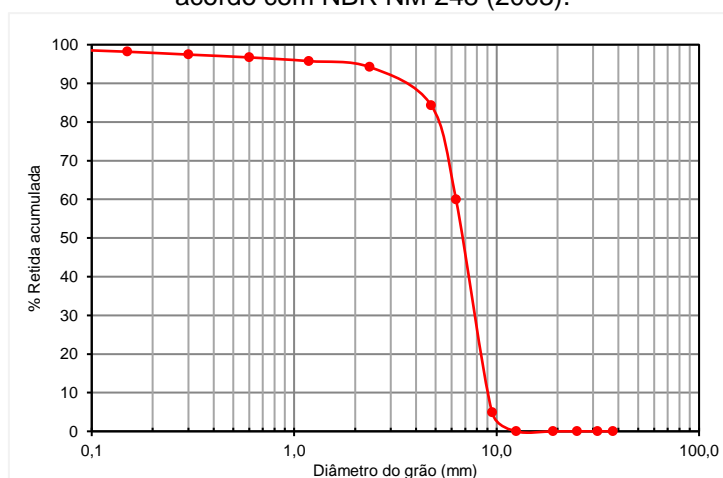
Tabela 3 - Ensaio de caracterização dos agregados e as respectivas normatizações.

Característica	Norma
Dimensão máxima característica	NBR NM 248 (2003)
Módulo de finura	NBR NM 248 (2003)
Massa unitária do agregado solto	NBR NM 52 (2009)
Massa específica	NBR NM 52 (2009)

Fonte: Autoria própria.

A princípio, a análise granulométrica foi realizada determinando-se o módulo de finura e consequente classificação do agregado. A caracterização da brita está apresentada na curva granulométrica da Figura 2. Na Figura 3 e Tabela 4 são apresentados os dados do módulo de finura, diâmetro máximo e massa específica do agregado graúdo.

Figura 2 - Curva granulométrica do agregado graúdo de acordo com NBR NM 248 (2003).



Fonte: Autoria própria.

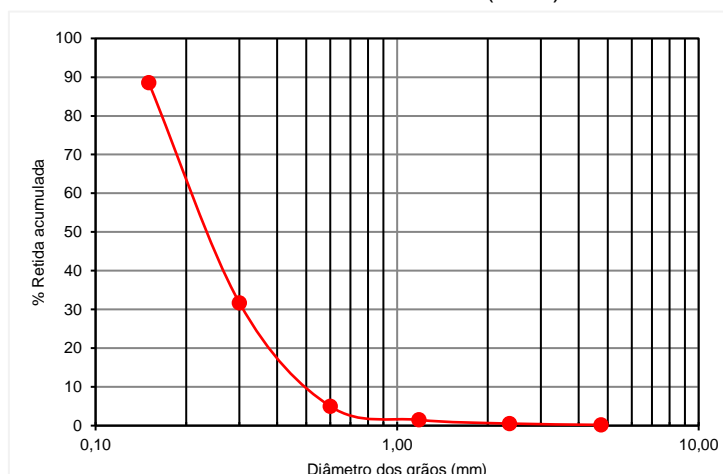
Tabela 4 - Caracterização do agregado graúdo.

Característica	Valores
Dimensão máxima característica (mm)	12,50
Módulo de finura	5,72
Massa unitária do agregado solto (kg/m ³)	1,41
Massa específica (kg/m ³)	2,61

Fonte: Autoria própria.

A Figura 3 apresenta a curva granulométrica da areia e a Tabela 5 apresenta as características do agregado miúdo.

Figura 3 - Curva granulométrica do agregado miúdo de acordo com NBR NM 248 (2003).



Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 - Caracterização do agregado miúdo.

Característica	Valores
Dimensão máxima característica (mm)	1,18
Módulo de finura	1,28
Massa unitária do agregado solto (kg/m ³)	1,51
Massa específica (kg/m ³)	2,63

Fonte: Autoria própria.

3.2.2. Caracterização dos finos

a) Massa específica

Os ensaios de massa específica dos materiais finos foram realizados no Laboratório de Durabilidade do Instituto Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte (IFRN) – Campus Natal Central e seguiram as orientações da NBR NM 23 (ABNT, 2001). Os resultados da massa específica dos materiais finos utilizados na pesquisa são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Massa específica dos materiais finos.

Material	Massa específica (kg/m ³)
Cimento	3110,84
MK	2593,51
RBC	2004,90

Fonte: Autoria própria.

b) Área superficial (BET)

A área superficial das partículas finas foi definida pelo método BET com o objetivo de entender a microestrutura e o empacotamento das misturas. Para isso, foi separada uma amostra de aproximadamente três gramas e ensaiada no Laboratório de Análises Térmicas do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN, com uso do equipamento da JAPAN modelo BERLSORP-mini II e utilizando gás nitrogênio.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados do BET, indicando indiretamente a morfologia, porosidade e finura das partículas.

Tabela 7 - BET dos finos.

Material	Cimento	MK	RBC
Área superficial específica BET (m ² /g)	2,76	14,51	60,32
Volume total dos poros (cm ³ /g)	4,61x10 ⁻³	2,97x10 ⁻²	3,91x10 ⁻²

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que o cimento possui menor área superficial e menor número de vazios corroborando com o resultado da granulometria a laser que indica diâmetro médio das partículas maior que as adições.

c) Fluorescência de Raios-X (FRX)

Para a análise da composição química dos materiais finos foi realizada a análise por meio de fluorescência de raios-x (FRX) com utilização de aproximadamente 300 mg de cada material depositado em um porta amostra formado por um filme plástico de polietileno, pois ele apresenta baixa absorção de raio-X para os materiais analisados. O equipamento utilizado foi Shimadzu modelo EDX-720 do Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais da UFRN.

d) Difração de Raios-X (DRX)

Com o objetivo de identificar a estrutura e as fases cristalinas das adições minerais foi realizada uma análise por meio de difração de raios-X. O equipamento utilizado foi o Rigaku Mini Flex II com detector D'Tex-Ultra e

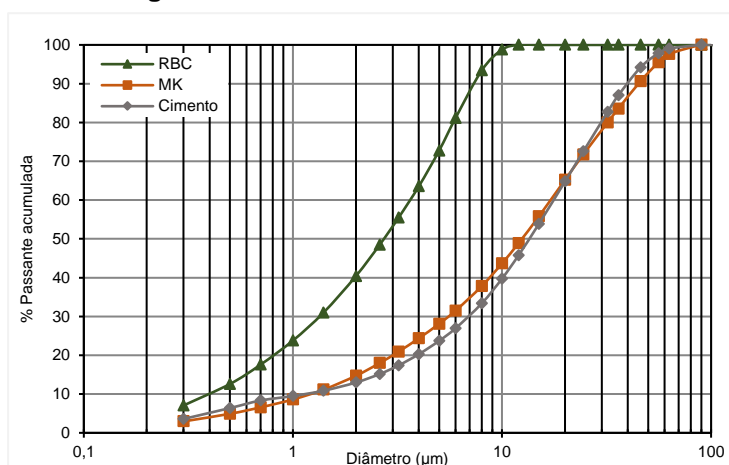
emissão de onda de comprimento $\lambda = 1,545 \text{ \AA}$ do Laboratório de Nanoestruturas Magnéticas e Semicondutoras (LNMS) da UFRN. A coleta de dados se deu com um ângulo inicial (2θ) de 5° a 70° passo de $0,02^\circ$ e velocidade $1^\circ/\text{min}$.

e) Granulometria à laser

O ensaio de granulometria à laser foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) utilizando o equipamento CILAS 1090 com faixa de leitura de $0,10$ a $500 \mu\text{m}$.

A Figura 4 apresenta os resultados da granulometria do cimento, MK e RCB, observa-se uma distribuição granulométrica das partículas através da curva, verificando-se a classificação dos materiais como finos. A Tabela 8 apresenta os valores médios dos diâmetros das partículas.

Figura 4 - Granulometria a laser dos finos.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - Diâmetro médio dos materiais finos.

Material	Diâmetro médio (μm)
Cimento	20,32
MK	14,37
RBC	2,99

Fonte: Autoria própria.

f) Índice de atividade pozolânica (IAP)

O índice de atividade pozolânica, da cinza do bagaço da cana-de-açúcar e metacaulim, foi importante para auxiliar no entendimento do comportamento do concreto no estado endurecido, com isso, o IAP foi determinado pelo método com cal seguindo a NBR 5751 (ABNT, 2015), onde foi obtida a consistência padrão e realizado o ensaio aos 7 dias. A quantidade de água na mistura foi suficiente para o índice de consistência de 225 ± 5 mm, medido pelo ensaio de espalhamento em mesa (ABNT NBR 7215, 1996).

3.3. Definição de traços e produção do concreto

Inicialmente o traço de CAA de referência foi baseado no estudo de Diniz (2018) com consumo de cimento de $442,6 \text{ Kg/m}^3$. Em seguida foi calculado um novo traço em relação ao consumo de cimento para as composições com redução e utilizando as massas específicas dos materiais. A relação água/ligantes manteve-se constante a fim de avaliar a influências das adições nas propriedades dos CAAs. Os traços são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Traço das misturas realizadas.

Traços	Ligantes			Agregados		Água/Lig.em massa
	Cim (%)	RBC (%)	MK (%)	Areia	Brita	
REF	100	0	0	1,64	2,16	0,48
R30	70	30	0	1,64	2,16	0,48
R20M20	60	20	20	1,64	2,16	0,48
R30M10	60	30	10	1,64	2,16	0,48
R30M20	50	30	20	1,64	2,16	0,48

Fonte: Autoria própria.

3.4. Preparo e moldagem da mistura

As misturas foram delineadas para ter um nível total de ligantes (*binder*) de, aproximadamente, 450 kg/m^3 e constância da relação água/*binder* de 0,48, sendo a dosagem do superplastificante alterada para obter espalhamento (flow) próximo ao do REF. As substituições de cimento pelas adições foram realizadas em peso e em seguida recalculado o traço levando em consideração

suas massas específicas para apresentar os traços em relação ao consumo de cimento por metro cúbico.

Os concretos foram produzidos, em temperatura ambiente, no IFRN - Campus Natal Central e a moldagem dos corpos de prova (CP) seguiu as diretrizes da NBR 5738 (2016), onde foram confeccionados 49 moldes cúbicos de 10x10x10 cm por mistura. A escolha do tipo de CP se deu para diminuir o volume de concreto utilizado na pesquisa e otimizar o tempo em relação ao aquecimento dos concretos tendo em vista as dimensões do forno utilizado.

A produção dos concretos autoadensáveis iniciou-se com a pesagem do material necessário para o volume total de cada traço dividido por duas betonadas. A divisão se deu em virtude de a betoneira suportar cerca de 30 litros, totalizando aproximadamente 56 litros de concreto por traço. Esse volume foi necessário para a realização dos ensaios no estado fresco e moldagem dos corpos de prova. Após a pesagem a parte interna da betoneira foi umedecida para receber os materiais.

Para garantir concretos com boa homogeneização, sem segregação e com a capacidade de garantir que os agregados tivessem um bom envolvimento da pasta foram adotados os procedimentos descritos na Tabela 10, nos quais se basearam no estudo de Diniz (2018).

Tabela 10 - Procedimento de mistura dos concretos.

Ordem	Materiais e teores	Tempo
1º	50% Brita + 30% Água	30 s
2º	50% Brita + 20% Água	30 s
3º	Cimento + Metacaulim + 40% Água (2 min*) + 50% Areia	2 min
4º	50% Aditivo	2 min
5º	RBC + 50% Aditivo + 10% Água	3 min

*Adição de 50% de areia nos primeiros 30 segundos.

Fonte: Autoria própria.

3.5. Ensaios no estado fresco

Os ensaios no estado fresco foram realizados no laboratório de materiais de construção do IFRN – Campus Natal Central.

Para a verificação da autoadensabilidade dos CAAs foram realizados os ensaios de espalhamento, tempo de escoamento e funil V segundo as normas NBR 15823-2 (ABNT, 2017), NBR 15823-1 (ABNT, 2017) e NBR 15823-5 (ABNT, 2017), respectivamente. A capacidade do concreto autoadensável de passar por obstáculos foi verificada segundo a NBR 15823-4 (ABNT, 2017) enquanto para a avaliação do fluxo do concreto na presença de obstáculos foi realizado o teste do anel J conforme a NBR 15823-3 (ABNT, 2017).

3.6. Ensaios no estado endurecido

Os ensaios no estado endurecido foram realizados após a cura úmida por imersão em água a $22 \pm 2^\circ\text{C}$ dos corpos de prova até a idade requerida, tanto em temperatura ambiente quanto a altas temperaturas. Nas idades de 3, 7 e 28 dias as amostras foram ensaiadas somente à resistência a compressão axial após cura em temperatura ambiente. Aos 91 dias as amostras foram ensaiadas antes e após as elevadas temperaturas.

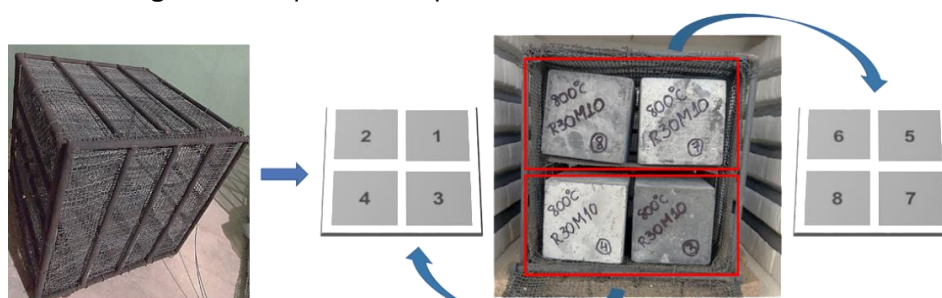
3.6.1. Aquecimento dos concretos autoadensáveis

Para melhor uniformização das amostras quanto a umidade de cada composição, todas as amostras moldadas foram retiradas da cura úmida e permaneceram por 24h em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ antes da submissão ao forno. Foram utilizados 32 corpos de prova de concreto por mistura. As temperaturas de análise para os concretos foram 200°C , 400°C , 600°C e 800°C . A escolha das temperaturas foi motivada pelas importantes alterações na microestrutura do concreto e pelo momento crítico em um incêndio. A 200°C há uma desidratação mais intensa do CSH (KHOURY, 2000), a 400°C o concreto tem uma perda brusca de resistência, a 600°C ocorre o *flashover* (LIMA, 2005) - conhecido como incêndio generalizado - e a 800°C é a temperatura em que ocorre a decomposição de carbonatos (NURUDDIN; AZMME; YUNG, 2014). Em cada temperatura foram aquecidas oito amostras por traço.

Antes da submissão em elevadas temperaturas, as amostras foram colocadas em uma gaiola confeccionada com barras de aço de 6,3 mm e envolvida com tela de aço usada para peneiras da construção civil. A finalidade

do uso da gaiola foi para a proteção do forno em caso de *spalling*. Dentro do aparato de proteção os corpos de provas eram mapeados (Figura 5 -) a fim de não perder a identificação deles em caso da não visualização das marcações realizadas previamente.

Figura 5 - Esquema de aquecimento das amostras de CAA.

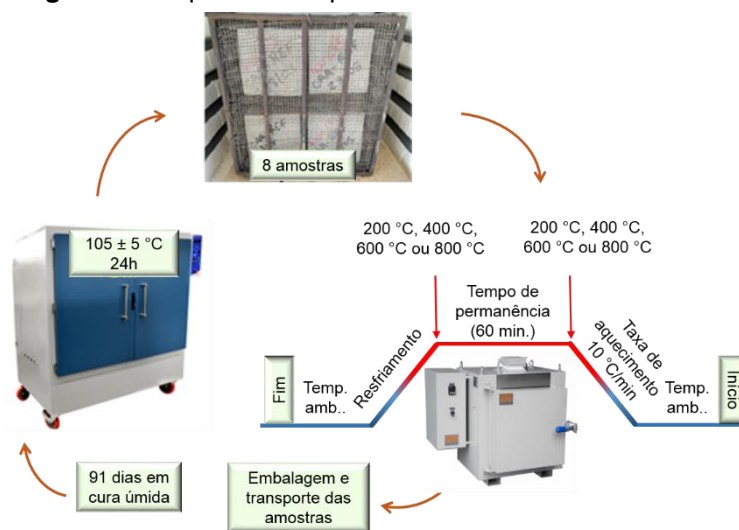


Fonte: Autoria própria.

O aquecimento dos corpos de prova foi realizado em um forno mufla da marca Jung, modelo LF0713 do Laboratório de Nutrição Animal da Escola Agrícola de Jundiaí da UFRN. A taxa de aquecimento adotada foi de 10 °C/min tentando simular a situação mais próxima do incêndio real e mantendo a segurança do equipamento. Os CPs foram mantidos por 60 minutos nas temperaturas requeridas a fim de garantir a estabilidade da temperatura conforme recomenda RILEM 129-MHT (2004). Passado o referido tempo, as amostras permaneceram na mufla até manter-se em equilíbrio com a temperatura ambiente. Não sendo possível aferir a taxa de aquecimento devido a variação dos tempos de resfriamento inclusive para uma mesma temperatura.

Após o resfriamento os CPs eram envolvidos em papel filme para minimizar a absorção da umidade e transportados em caixotes com forração de isopor entre as amostras a fim de não os fragilizar. Na Figura 6 está apresentado o esquema de preparação para aquecimento dos corpos de prova, o esquema de aquecimento e a etapa após retirada do forno. Ensaios a temperatura ambiente foram realizados em amostras de mesma idade sendo tomadas como referência, utilizando-se oito amostras por mistura em tal temperatura.

Figura 6 - Esquema de aquecimento das amostras de CAA.



Fonte: Autoria própria.

3.6.2. Análise tátil-visual

Após o esfriamento do forno, as amostras foram retiradas do aparato de proteção e submetidas a análise tátil-visual, onde eram analisadas as alterações como esfarelamento, som cavo, *spalling*, mudança da coloração e fissuração nos CAAs após aquecimento e resfriamento em cada uma das temperaturas. Tais alterações tinham como padrão de comparação os corpos de prova à temperatura ambiente.

3.6.3. Perda de massa

O ensaio teve como objetivo verificar a perda de massa ocorrida após o aquecimento do material. Cada amostra foi pesada antes e depois do aquecimento, sendo o percentual de perda de massa dado pela expressão $\Delta M = 1 - (M_{\text{final}}/M_{\text{inicial}})$, onde M_{final} e M_{inicial} são, respectivamente, a massa após e antes do aquecimento. A verificação da massa foi realizada em balança de precisão do Laboratório de Materiais de Construção do IFRN – Campus Natal Central

3.6.4. Velocidade do pulso ultrassônico

O pulso ultrassônico foi medido através do ensaio de velocidade do pulso ultrassônico segundo a C597-02 (ASTM, 2002) com a metodologia direta. Esse ensaio se deu nos CPs com idade de 91 dias e ocorreu no Laboratório de Materiais e Produtos Cimentícios do IFRN – Campus Natal Central utilizando o aparelho Pundit Lab+, da marca Proceq® SA, com dois transdutores de 54 kHz e resolução de 0,1 μ s. Anterior as leituras, o aparelho foi calibrado e utilizado gel para ultrassom em cada uma das faces que o transdutor era posicionado.

3.6.5. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi avaliado nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias. Foi executado conforme a NP EM 12390-3 (EUROPEAN STANDARD, 2012) e realizado no Laboratório de Materiais de Construção do IFRN – Campus São Paulo do Potengi com uma prensa elétrica servo-controlada HD-200T, hidráulica, com capacidade de 200 toneladas e velocidade de carga de 0,45 MPa/s.

3.6.6. Absorção de água por capilaridade, massa específica, absorção por imersão e índice de vazios

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado em quatro amostras por temperatura conforme preconiza a NBR 9779 (ABNT, 2012) e LNEC E 393 (LNEC, 1993). O ensaio de massa específica, absorção por imersão e índice de vazios seguiu as orientações da NBR 9778 (2009) e utilizou-se os mesmos corpos de prova do ensaio de absorção por capilaridade. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Durabilidade e Química dos Materiais do IFRN - Campus Natal Central.

3.6.7. Difração de Raios-X (DRX)

Para identificar a estrutura e as fases cristalinas dos CAAs foi realizada uma análise por meio de difração de raios-X. O material foi retirado do centro do corpo de prova, nomeado de amostra externa, e a 5 cm da face externa nomeado de amostra interna. Após a retirada o material foi moído em um

almofariz cerâmico, com posterior peneiramento em peneira de 200 μm . O equipamento utilizado foi o Rigaku Mini Flex II com detector D'Tex-Ultra e emissão de onda de comprimento $\lambda = 1,545 \text{ \AA}$ do Laboratório de Nanoestruturas Magnéticas e Semicondutoras (LNMS) da UFRN. A coleta de dados se deu com um ângulo inicial (2θ) de 5° a 60° passo de $0,02^\circ$ e velocidade $1^\circ/\text{min}$.

CAPÍTULO 4

Resultados e discussões

4.1. Caracterização dos finos

4.1.1. Composição química e mineralógica

Na Tabela 11 estão apresentados os resultados obtidos através da análise por FRX do cimento CP-V ARI RS, metacaulim e resíduo da biomassa da cana-de-açúcar após a moagem (RBC-M) utilizados na pesquisa, sendo também apresentado a análise do RBC antes da moagem (RBC-S). Destaca-se os teores de óxido de cálcio (CaO), dióxido de sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃).

Tabela 11 - Composição química dos finos inseridos nos concretos autoadensáveis.

Substância química	Teor de cada material (%)			
	Cimento	MK	RBC-M	RBC-S
CaO	70,10	0,12	1,79	10,35
SiO ₂	13,80	55,34	75,58	39,75
Al ₂ O ₃	4,00	33,55	2,50	4,49
Fe ₂ O ₃	7,60	7,14	9,91	19,20
MgO	-	0,83	2,82	2,95
P ₂ O ₅	-	0,27	2,51	4,80
SO ₃	3,32	0,09	0,78	0,84
Outros	1,18	2,66	4,11	17,62

Fonte: Autoria própria.

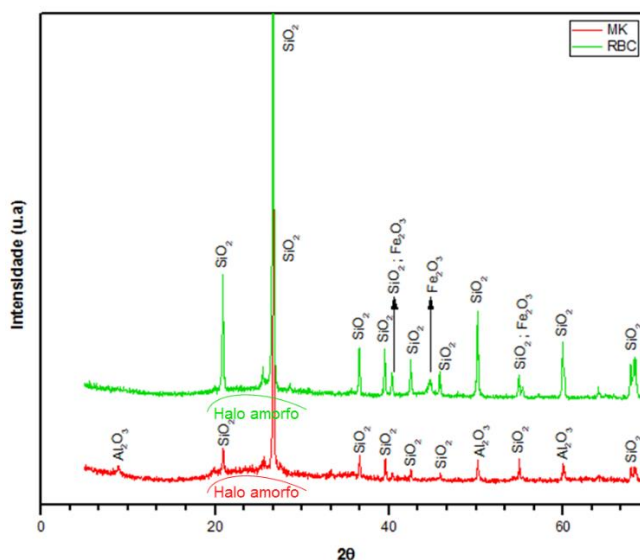
Ao comparar os teores de sílica do RBC antes da moagem (RBC-S) e do RBC após moagem (RBC-M) observa-se o seu aumento percentual após a moagem. Tal fato é justificado pelo procedimento preparatório da amostra, onde todo o material foi passado na peneira de 75 µm, excluindo assim grande quantidade dos grãos de areia presentes juntamente com o resíduo, conseqüentemente, há a ocultação da real quantidade de sílica presente na amostra, influenciando assim nos demais teores dos compostos químicos. Por

sua vez, a amostra do RBC-M não foi necessária passar por peneiramento antes do FRX visto que o material possui finura adequada para a análise.

Relacionando os dois tipos de RBC é possível perceber que a amostra sem moagem contém óxido de ferro que, como citado por Soares (2014), possivelmente é proveniente do solo da região. De acordo com Soares (2017) para cada 100 mg da parte comestível da cana-de-açúcar, 0,8 mg é de óxido de ferro. Desde modo, é admissível que haja contaminação durante a moagem, porém a quantidade de óxido de ferro presente não é exclusivamente devido a esta situação. No que diz respeito a redução do teor de óxido de ferro após a moagem, pode ser explicado pelos teores dos compostos químicos serem dependentes entre si, como houve um aumento do teor de outros componentes, ocorre uma redução numérica do teor de Fe_2O_3 .

Na Figura 7 está apresentado o DRX das adições minerais inseridas nos concretos. O alto teor de sílica nos compostos indica uma tendência à reação pozolânica. Há um halo amorfo da faixa de $16^\circ 2\theta$ à $30^\circ 2\theta$ devido a presença da sílica, outro indicativo de pozanilicidade.

Figura 7 - Difração de DRX das adições minerais.



Fonte: Autoria própria.

4.1.2. Índice de Atividade Pozolânica com Cal

Na Tabela 12 são apresentados os resultados das resistências à compressão das argamassas confeccionadas para a determinação do índice de atividade pozolânica (IAP).

Tabela 12 - IAP das adições.

Material	IAP - 7 dias (MPa)
Resistência requerida	6
Metacaulim BZ	14,51
RBC	2,63

Fonte: Autoria própria.

O valor mínimo para IAP exigidos por norma que caracterizam as adições como pozolânicas foi atingindo apenas para o metacaulim. O fato do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar não ter atingindo pode ser atribuído a baixa idade do ensaio, não havendo tempo suficiente para as reações serem desenvolvidas, fato evidenciado nos estudos de Diniz (2018) e Medeiros (2016). Entretanto, Medeiros (2016) apresentou através de análise de DRX que o RBC apresenta pozolanicidade.

4.2. Avaliação do comportamento dos CAAs no estado fresco

No estado fresco as misturas foram analisadas com a finalidade de validar a autoadensabilidade dos concretos e compará-los entre sim. O volume da pasta e a quantidade de finos e agregados variaram de acordo com o nível de adições devido às diferenças nas massas específicas dos materiais. Podem ser observados na Tabela 13 o consumo e os parâmetros utilizados na produção dos CAAs.

A quantidade de finos das misturas variou de 432 a 444 kg/m³ decorrente da massa específica dos materiais e das diferenças dos teores de substituição, encontrando-se dentro da faixa, de 380 a 600 kg/m³, estabelecida pela EFNARC (2002) para concretos alcançarem a autoadensabilidade.

Tabela 13 - Composição e parâmetros das misturas.

		Traços	REF	R30	R20M20	R30M10	R30M20
Consumo (kg/m ³)	Cimento	444,13	303,20	258,76	259,68	215,74	
	Metacaulim	0,00	0,00	86,17	43,37	86,30	
	RBC	0,00	130,38	86,17	129,84	129,44	
	Areia (A)	728,37	709,49	706,41	708,93	707,62	
	Brita (B)	959,32	936,90	931,53	934,85	931,99	
	Água	213,18	209,21	215,55	207,74	207,11	
	Aditivo	2,31	5,76	12,93	13,81	14,12	
	% de aditivo sobre os ligantes	0,52	1,33	3,00	3,19	3,27	
Parâmetros EFNARC	água/ligantes	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	
	Ligantes	444,13	433,58	431,09	432,89	431,48	
	Pasta (l/m ³)	355,95	371,71	374,93	372,70	374,30	
	Água(l/m ³)	213,18	209,21	215,55	207,74	207,11	
	Ag. graúdo (kg/m ³)	959,32	936,90	931,53	934,85	931,99	
	% argamassa seca	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	
	(A + B) / ligantes	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80	

Fonte: Autoria própria.

Observa-se a maior necessidade de aditivo à medida que aumenta o teor de adições minerais nas misturas para atingir uma mesma classificação. Tal fato deve-se a maior área superficial das partículas e pela hidroscofia característica do resíduo da biomassa da cana de açúcar devido à presença de matéria orgânica. Além disso, de acordo com Le, Sheen e Lam (2018) as partículas de RBC tem formato irregular e alta porosidade, absorvendo água da mistura e diminuindo a trabalhabilidade do concreto, necessitando de mais superplastificante para manter um nível ideal de trabalhabilidade em relação a mistura de referência.

4.3. Ensaio no estado fresco

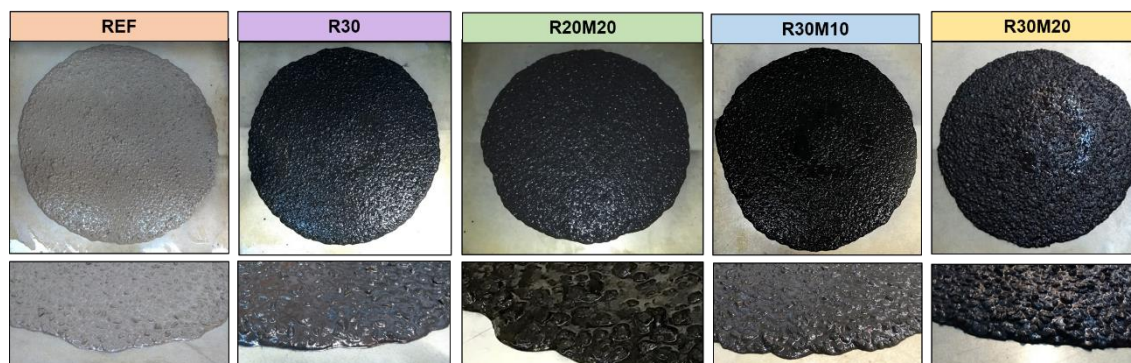
Na Tabela 14 são apresentados os resultados dos ensaios no estado fresco e os critérios normativos adotados para aceitação da autoadensabilidade das misturas. Observa-se que os resultados do *slump flow* variou de 680 a 740 mm, sendo os CAAs classificados como SF2, enquanto os ensaios T500 e Funil V são classificados como VS1 e VF1. Em relação à habilidade passante todos os CAAs são classificados como PJ2, respectivamente, segundo a NBR 15823 (ABNT, 2017).

Tabela 14 - Resultados dos ensaios no estado fresco

ID da mistura	SF: <i>Slump flow</i> (mm)	T500 (s)	V funil (s)	JF (mm)	JF - SF (PJ)	L box
REF	740,0	1,17	4,86	710,0	30,0	0,98
R30	716,7	1,36	5,39	668,5	48,2	0,97
R20M20	715,0	1,48	6,93	680,0	35,0	1,00
R30M10	723,3	1,32	7,36	687,5	35,8	1,00
R30M20	680,0	1,63	7,66	632,5	47,5	0,92
Critério de aceitação do CAA						
	Class	SF 2	VS 1	VF 1	PJ 2	PL 2
NBR 15823 (ABNT, 2017)	Min	660	0	0	25	0,8
	Max	750	2	9	50	1,0
EFNARC (2002)	Min	650	2	6		0,8
	Max	800	5	12		1,0

Fonte: Autoria própria.

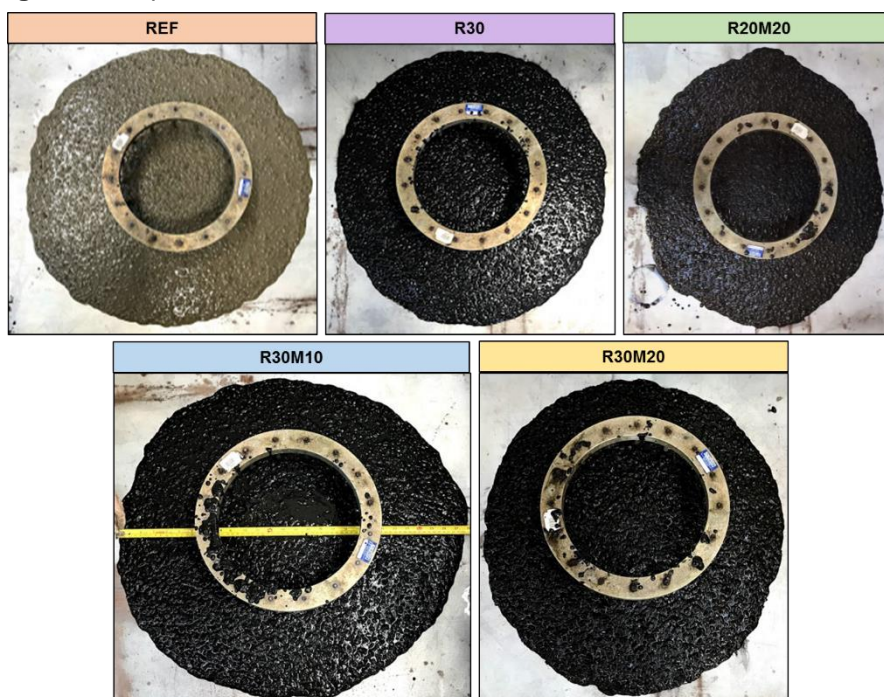
Na Figura 8 é possível observar que os CAA atendem aos critérios viscosidade aparente e coesão determinado pelo índice de estabilidade visual IEV 0, não apresentando indícios de segregação e exsudação, e presença de agregados até a borda das circunferências.

Figura 8 - Espalhamento e aspecto dos concretos autoadensáveis produzidos.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 9 são apresentados os CAAs no ensaio de Anel J, assim como no ensaio de *slump flow*, os concretos não apresentaram segregação, neste caso, na presença de obstáculo.

Figura 9 - Espalhamento dos concretos autoadensáveis no ensaio do Anel J.



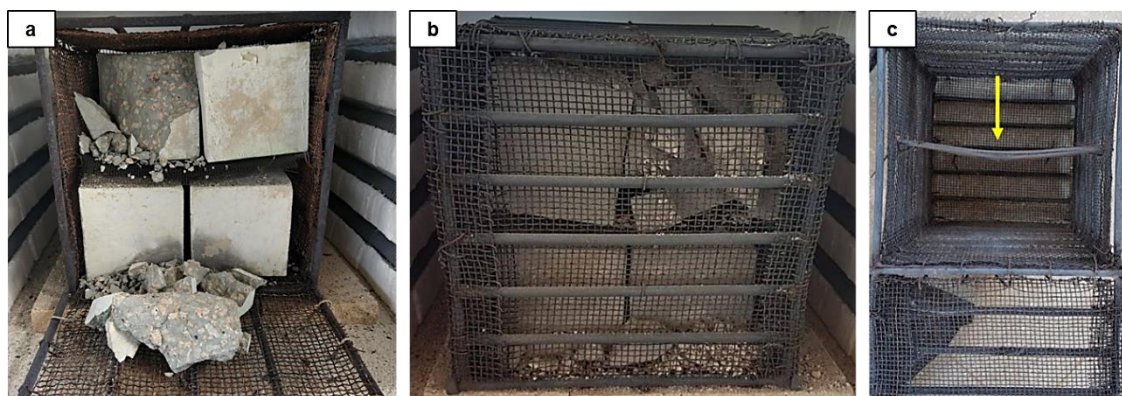
Fonte: Autoria própria.

4.5. Ensaios no estado endurecido

4.5.1. Aquecimento dos concretos autoadensáveis

Após o aquecimento dos concretos nas temperaturas de 200°C, 400°C, 600°C e 800°C foi possível visualizar o efeito *spalling* apenas nas temperaturas de 600°C e 800°C, exemplificado nas Figura 10a e Figura 10b e o empenamento da estrutura da gaiola devido ao calor e impacto das amostras durante o *spalling* explosivo (Figura 10).

Figura 10 - Consequências do aquecimento dos CAAs: a) *spalling* do REF; b) *spalling* do R30; c) empenamento da gaiola indicado por seta.

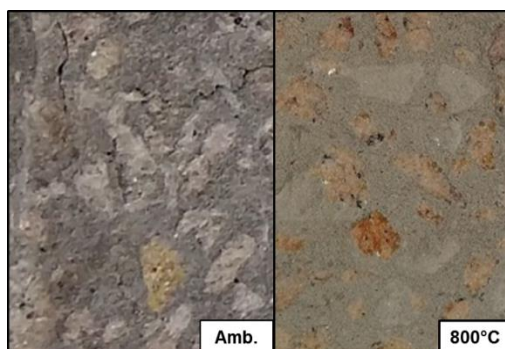


Fonte: Autoria própria.

4.5.2. Análise tátil-visual

Ao analisar visualmente os concretos autoadensáveis moldados, verificou-se a diferença mais acentuada nas temperaturas de 600°C e 800°C, sendo nesta última a mais acentuada. Nessas temperaturas notou-se a mudança na coloração do agregado graúdo, de cinza para cor rosa, como exemplifica a Figura 11 e também mudança da coloração na pasta.

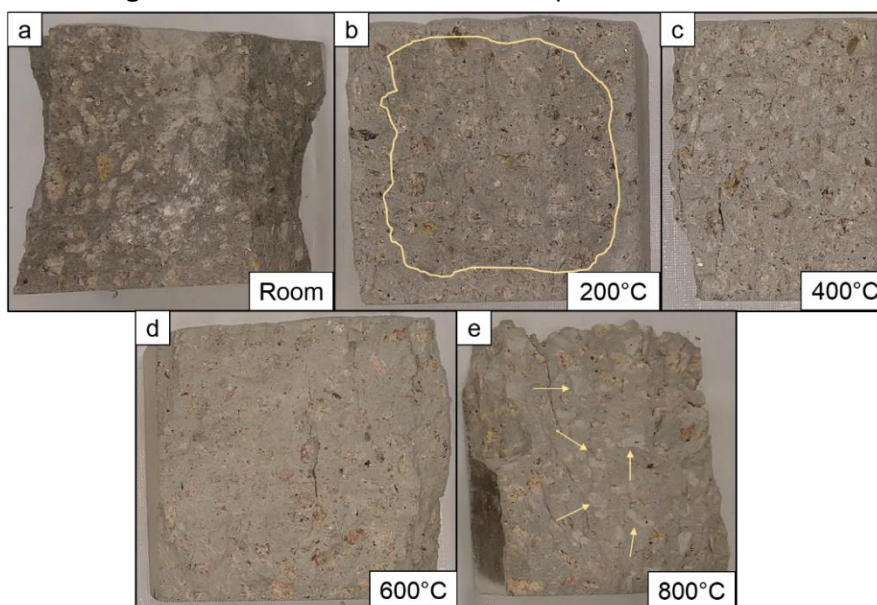
Figura 11 - Amostras do REF a temperatura ambiente e a 800°C.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 12b é possível observar, através da limitação desenhada, a diferença de cor da parte mais externa para a mais interna da amostra REF. Também foi possível verificar uma maior facilidade do desprendimento dos agregados graúdos aos 800°C como exemplificado e indicado na Figura 12e.

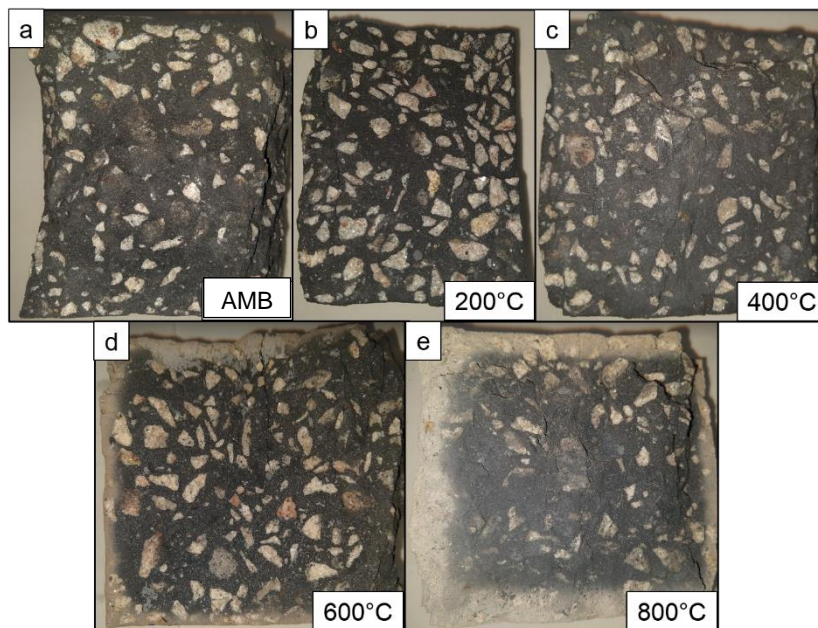
Figura 12 - Amostras do REF nas temperaturas de ensaio.



Fonte: Autoria própria.

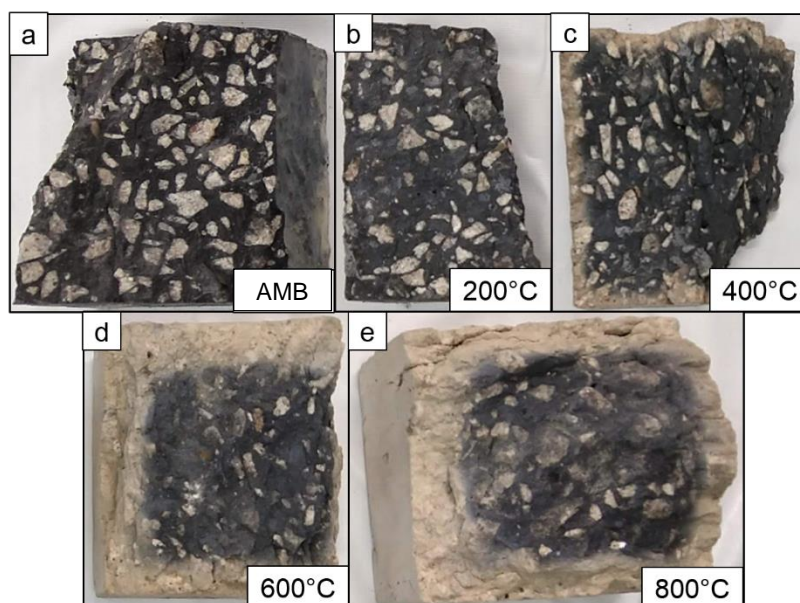
Observa-se das Figura 13 a 16 as alterações de cor nos traços de concreto R30, R30M20 e R30M10, sendo as alterações dos concretos com características semelhantes. O mesmo comportamento não é observado no R20M20 que aos 400°C é perceptível alteração da cor preta, devido a inserção do RBC, para rosa nos primeiros 0,5 cm da borda.

Figura 13 - Amostras do R30 nas temperaturas de ensaio.



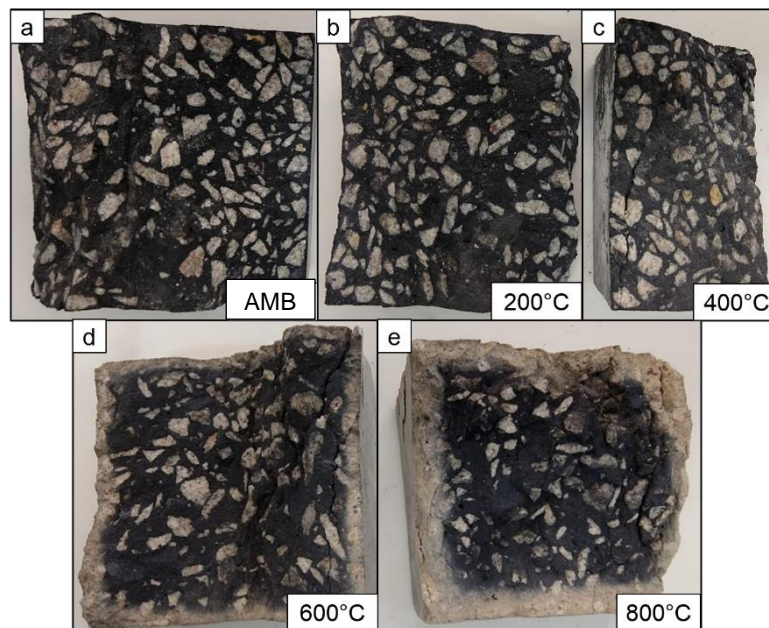
Fonte: Autoria própria.

Figura 14 - Amostras do R20M20 nas temperaturas de ensaio.



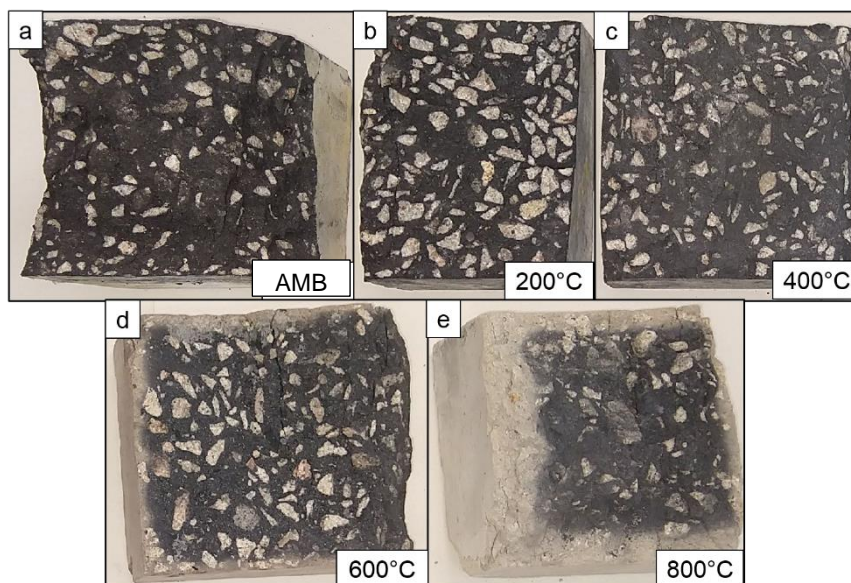
Fonte: Autoria própria.

Figura 15 - Amostras do R30M10 nas temperaturas de ensaio.



Fonte: Autoria própria.

Figura 16 - Amostras do R30M20 nas temperaturas de ensaio.



Fonte: Autoria própria.

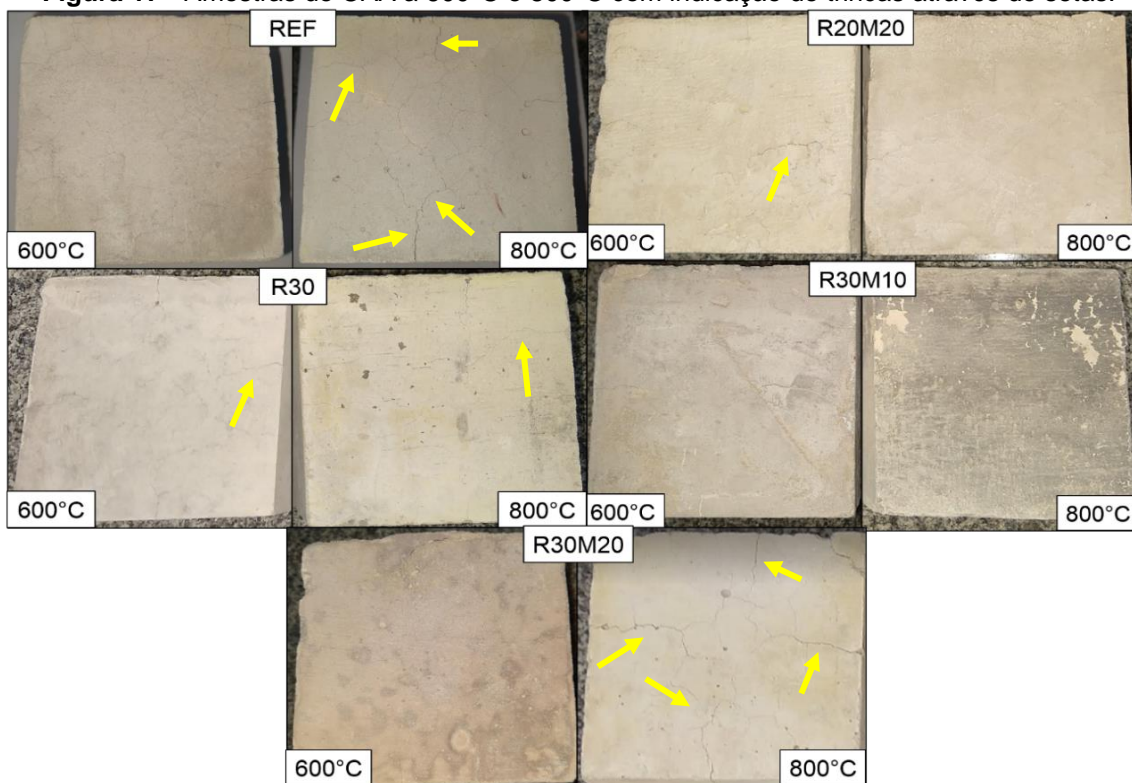
Observou-se em todas as composições analisadas uma variação de cor gradativa com o aumento da temperatura, podendo representar a frente de propagação de calor.

Nas temperaturas de 600°C e 800°C todos os corpos de prova apresentaram som cavo, sendo justificado pelo aumento de vazios no sistema

e pela presença de trincas e fissuras. Sendo as fissuras aberturas superficiais de no máximo 1 mm de espessura, enquanto as trincas possuem aberturas mais profundas e acentuadas e com espessura de 1 mm a 3 mm. Sobre o aparecimento de trincas e fissuras e visualização de vazios, percebeu-se que ao aumentar a temperatura a quantidade de trincas e fissuras se intensificou, bem como as arestas dos concretos tornaram-se mais frágeis e quebradiças. Aos 800°C o R30M20 apresentou trincas mais acentuadas, enquanto o REF teve maior processo de fissuração e as amostras do R30M10 não apresentam trincas.

Na Figura 17 é possível observar que as trincas nos CAAs com adições foi menos severo quando comparado com o REF, exceto o R30M20 a 800°C que apresentou fissuras mais acentuadas. Essa diminuição da fissuração tem relação com a redução do hidróxido de cálcio na pasta de cimento devido as reações pozolânicas como foi verificado nas análises de DRX apresentadas a seguir, onde se demonstra a redução gradativa do teor de CH com o aumento das adições, fato também verificado por XU *et al.*, 2001.

Figura 17 - Amostras de CAA a 600°C e 800°C com indicação de trincas através de setas.



Fonte: Autoria própria.

4.5.3. Perda de massa

As perdas de massa observadas incluíram tanto as amostras que sofreram lascamento explosivo como as que não sofreram. A Tabela 15 apresenta a quantidade de corpos de prova que sofreram *spalling* nas temperaturas de 600°C e 800°C.

Tabela 15 - Quantitativo de amostras que sofreram *spalling*.

Traço	600°C	800°C
REF	2	2
R30	2	2
R20M20	2	1
R30M10	0	1
R30M20	7	5

Fonte: Autoria própria.

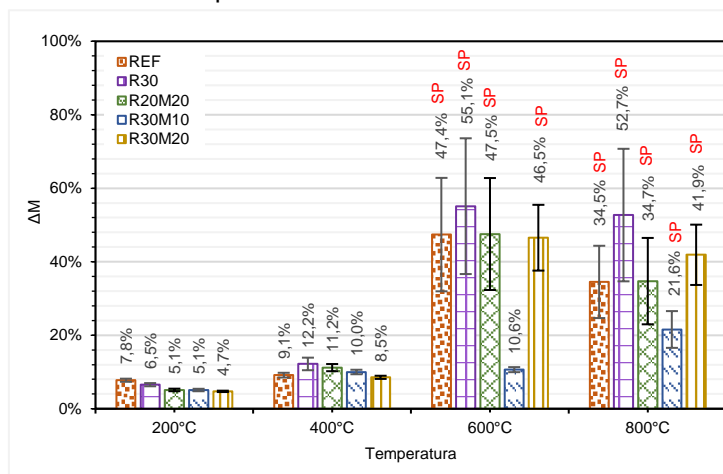
A fissuração ocorreu inicialmente devido a expansão térmica da pasta de cimento causando a quebra local de ligação entre o cimento e o agregado. Khan e Abbas (2015) e Chen *et al.* (2009) também relataram o motivo do lascamento aos 600°C pela dissociação do hidróxido de cálcio em torno de 530°C. É possível observar que as amostras com substituição do cimento por 40% de adições sofreram menos *spalling*, em especial a mistura com menor quantidade de metacaulim. Isso pode ser atribuído à liberação da pressão de vapor devido à perda de massa relacionada com a perda do bagaço queimado. Segundo Anjos *et al.* (2013), o RBC tem uma perda de massa de aproximadamente 18,9% em 313-575°C e está associada à decomposição de seus constituintes orgânicos (hemicelulose, celulose e lignina).

Na Figura 18 é apresentado os resultados médios e desvios padrões para a perda de massa (ΔM) considerando as amostras que sofreram *spalling*, enquanto na Figura 19 os resultados desconsideram as amostras que ocorreram tal fenômeno. Tal análise foi feita para aferir a interferência do efeito *spalling* na perda de massa.

Ao considerar todas as amostras há uma perda de massa de 5,1% a 55,1%. A 200°C existe uma tendência de quanto menor o teor de substituição do cimento maior a perda de massa. A 400°C as amostras de 30% e 40% de adição tendem a ter uma maior diminuição da massa. A 600°C o R30 teve

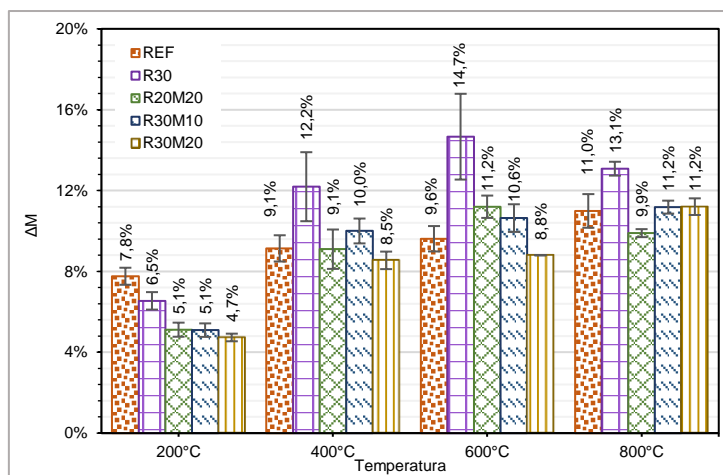
maior perda de massa, enquanto o R30M10 quase não diferiu da perda de massa a 400°C. Tendo em vista os altos desvios padrões apresentados nas temperaturas de 600°C e 800°C, pode-se considerar que as amostras de um mesmo traço não tiveram variações na perda de massa.

Figura 18 - Valores médios da perda de massas das amostras considerando o *spalling*.



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 - Valores médios da perda de massas das amostras desconsiderando o *spalling*.

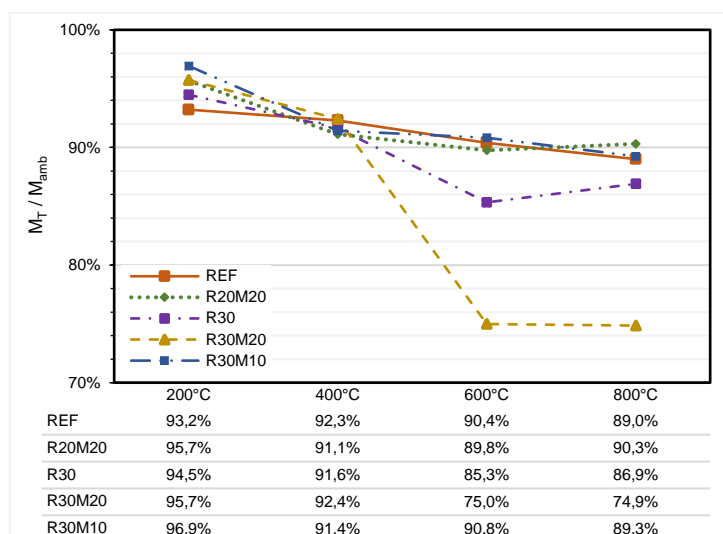


Fonte: Autoria própria.

Quando é considerado apenas as amostras íntegras, há uma tendência da diminuição da massa com o aumento da temperatura.

Na Figura 20 é apresentado a massa residual relativa M_{resid} dos concretos autoadensáveis – inclusive os que sofreram *spalling* - sendo a relação da massa a alta temperatura M_T com a massa a temperatura ambiente M_{amb} .

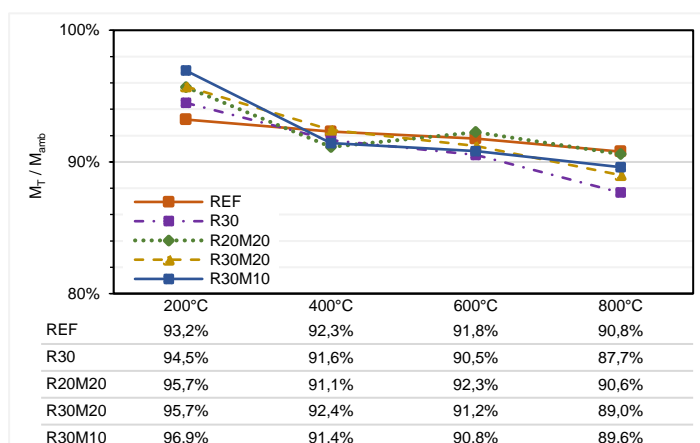
Figura 20 - Valores da massa residual relativa dos CAAs que sofreram *spalling*.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que a massa residual dos CAAs diminui com o aumento da temperatura e que a 200°C e 400°C a porcentagem residual é próxima. A 600°C as amostras de R30 e R30M20 foram mais sensíveis a altas temperaturas, tendo menores massas residuais. A massa residual a 800°C foi próxima daquelas a 600°C. Pode haver muitas causas de perda de peso após exposição a altas temperaturas no concreto, no entanto, a liberação de pedaços ou lascas de concreto das camadas superficiais são as principais razões da perda de peso como observado na Figura 21 que não considera as amostras que sofreram *spalling* (YÜKSEL; SIDDIQUE; ÖZKAN, 2011).

Figura 21 - Valores da massa residual relativa dos CAAs que não sofreram *spalling*.



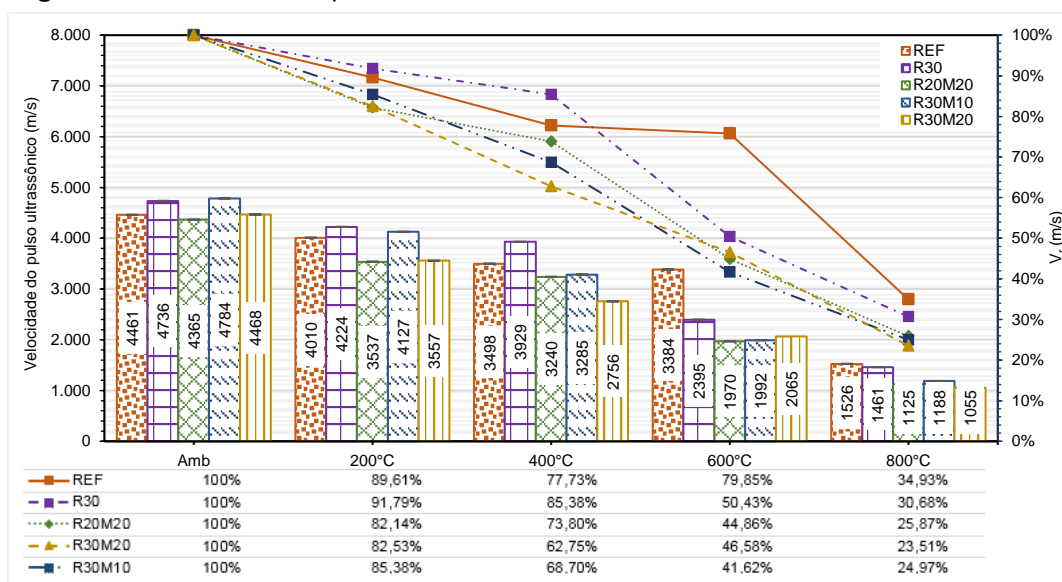
Fonte: Autoria própria.

Analisando apenas as amostras que não sofreram *spalling*, a massa residual dos concretos diminuiu com o aumento da temperatura, havendo uma linearidade de 400°C a 600°C e um pequeno aumento de massa a 600°C do R20M20. Pode-se considerar que a perda de massa de cada traço não houve interferência da temperatura.

4.5.4. Velocidade do pulso ultrassônico

A Figura 22 apresenta a porcentagem da velocidade residual (V_r) do pulso ultrassônico nos concretos autoadensáveis após submissão a altas temperaturas.

Figura 22 - Velocidade do pulso ultrassônico e velocidade residual dos CAAs aos 91 dias.



Fonte: Autoria própria

Para todas as temperaturas a velocidade do pulso diminuiu com o aumento da temperatura, sendo perceptível que a transmissão de ondas de pulso através dos CAAs é bastante influenciada pelo fissuramento verificado na análise visual e na perda de massa, esta diminuição da velocidade da propagação de ondas com o aumento da fissuração foi relatada em outros trabalhos (YÜKSEL; SIDDIQUE; ÖZKAN, 2011; UYSAL, 2012).

A partir das velocidades dos pulsos encontradas definiu-se a qualidade dos CAAs conforme estabelece a BS EN 12504-4 (BRITISH STANDARDS, 2004). A Tabela 16 apresenta tal relação.

Tabela 16 - Relação entre velocidade do pulso ultrassônico e qualidade dos CAAs.

Traço	Velocidade longitudinal do pulso ultrassônico (m/s)				
	Amb.	200°C	400°C	600°C	800°C
REF	4461 ^{MB}	4010 ^{MB}	3498 ^M	3384 ^M	1526 ^{MF}
R30	4736 ^E	4224 ^{MB}	3929 ^B	2395 ^{MF}	1461 ^{MF}
R20M20	4365 ^{MB}	3537 ^B	3240 ^M	1970 ^{MF}	1125 ^{MF}
R30M10	4784 ^E	4127 ^{MB}	3285 ^M	1992 ^{MF}	1188 ^{MF}
R30M20	4468 ^{MB}	3557 ^B	2756 ^F	2065 ^F	1055 ^{MF}

MF: Muito Fraca; F: Fraca; M: Média; B: Boa; MB: Muito boa; E: Excelente.

Fonte: Autoria própria

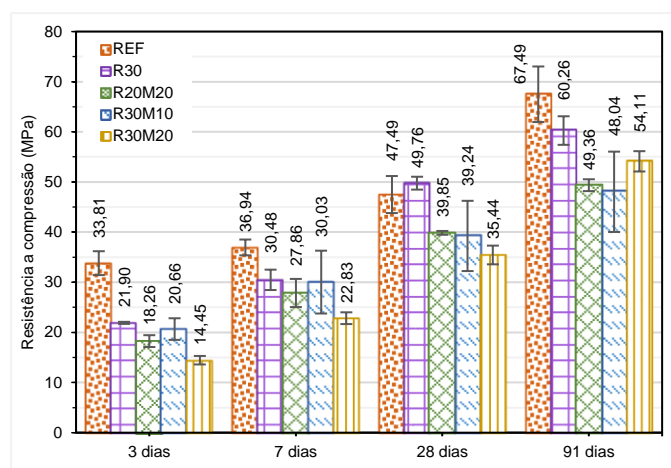
Observa-se que com o aumento da temperatura há uma diminuição da qualidade dos concretos, inclusive mudando de uma situação excelente para muito fraca como nos casos dos traços R30 e R30M10. O CAA REF foi o que obteve melhor qualidade aos 800°C em relação a temperatura ambiente, com uma velocidade residual de aproximadamente 34%.

4.5.5. Resistência à compressão axial

Após aquecimento em forno mufla os corpos de prova foram resfriados até temperatura ambiente e submetidos ao ensaio de determinação da resistência à compressão. Na Figura 23 são apresentados os resultados da resistência à compressão dos CAAs a temperatura ambiente, enquanto a Figura 23 mostra o aumento percentual da resistência (ΔR_c) com o tempo.

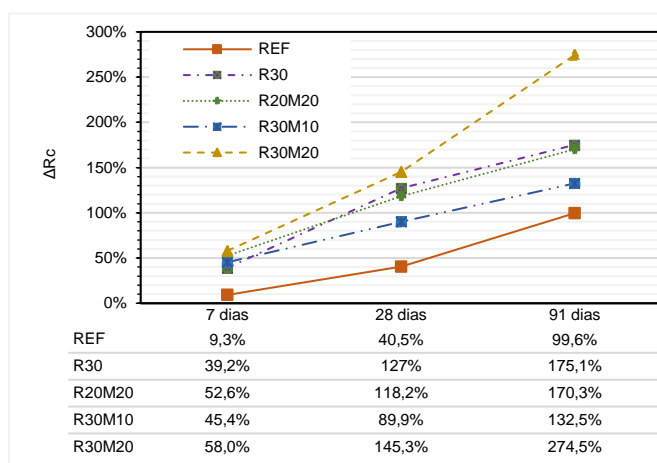
É possível observar que o CAA REF possuiu maiores resistências que os demais CAAs com substituição do cimento por adições minerais de RBC e MK em todas as idades. Porém, o aumento na resistência à compressão com o tempo foi maior em todas as formulações com adições minerais. Isso se dá devido a reação pozolânica que ocorre com o tempo, além de proporcionar aos CAAs uma microestrutura mais densa (ARIF; CLARK; LAKE, 2017).

Figura 23 - Resistência à compressão do CAA a temperatura ambiente.



Fonte: Autoria própria.

Figura 24 - Aumento da resistência dos CAAs x Idade dos CAAs.



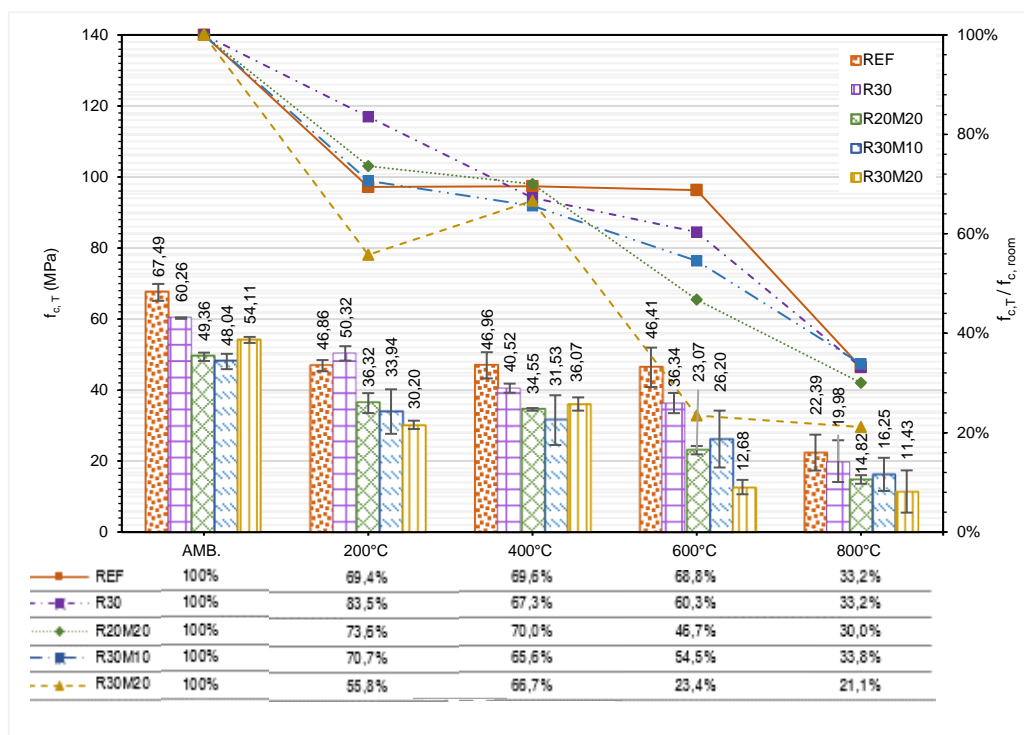
Fonte: Autoria própria.

Destaca-se o ganho de resistência dos CAA R30M20, R20M20 e R30, com aumentos de 274,5%, 175,1% e 170% de resistência entre 3 e 91 dias, respectivamente, fato que demonstra a eficiência da adição de RBC isolada ou em conjunto com MK em promover resistência a longas idades por efeito conjunto de reação pozolânica e efeito fíler, atingindo resistências acima de 45 MPa com consumos de cimento entre 215 e 300 kg/m³.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são apresentadas as resistências à compressão após exposição em altas temperaturas ($f_{c,T}$) e também a resistência a compressão residual relativa, calculada como a relação

entre a resistência em alta temperatura e a temperatura ambiente ($f_{c,T} / f_{c,amb}$) e representada pelo gráfico de linhas.

Figura 25 - Resistência a compressão dos CAAs aos 91 dias em todas as temperaturas e resistência a compressão residual relativa.



Fonte: Autoria própria.

Verifica-se que há uma redução acentuada na resistência à compressão em todos os CAAs submetidos a elevadas temperaturas quando comparadas a resistência a temperatura ambiente. A temperaturas de 200°C e 400°C a menor redução da resistência foi observada na composição R30, mantendo 83,5% e 67,3% da resistência em relação a temperatura ambiente.

As composições REF, R20M20, R30M10 apresentaram os mesmos percentuais de perdas de resistência quando submetidos a 200°C e 400°C, ou seja, as substituições de 40% são benéficas por manterem a resistência. Gar, Suresh e Bindiganavile (2017) verificaram que substituições de até 15% de RBC em concretos convencionais foram satisfatórias, havendo uma taxa de queda de resistência menor quando comparado com o concreto de referência.

Ao se ter menor teor de CH ou não se ter, ocorre a conversão deste CH em silicato de cálcio hidratado (CSH) e aluminato de cálcio hidratado (CASH) durante a reação pozolânica. Essa conversão é benéfica pois os produtos da reação tornam a matriz menos suscetível as transformações de fase a temperaturas entre 450-550°C e conseqüente menor perda de resistência. Além disso, os produtos se depositam no sistema de poros protegendo do efeito prejudicial da reidratação de CH durante o resfriamento (ADEFEMI *et al.*, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Ainda aos 400 °C, pode-se considerar o percentual de resistência residual dos CAAs igual, aproximadamente 70%, para todas as substituições. Almeida (2017) estudou o comportamento de concretos convencionais com substituição do cimento em massa por 15% da cinza da casca do arroz e verificou resistência residual de 80%. Em relação ao traço R30M20 houve um incremento de resistência como ocorreu no estudo de Benzaid e Benmarce (2017) que avaliou CAAs com fíler calcário e escória de alto forno e justificou pela modificação das propriedades de ligação dos hidratos da pasta de cimento. Esse aumento é devido aos grupos silanol que perdem uma parte de suas ligações com a água, o que induz a criação de elementos de siloxano mais curtos e mais fortes (Si-O-Si) com energias superficiais provavelmente maiores que contribuem para o aumento da força, ou ainda, pela reidratação da pasta devido à migração de água nos poros (KHOURY, 1992; DIAS *et al.*, 2005).

Aos 600°C, a resistência residual diminuiu com o aumento de adições, observando-se que entre os CAAs com 40% de substituição os com maior teor de metacaulim obtiveram menor resistência residual. A resistência residual dos concretos com adições foi menor que a do CAA de referência. Essa diminuição pode ser atribuída a quantidade de adições nas misturas que produz uma zona de transição muito mais densa entre agregados e pasta devido às suas partículas finas.

Notou-se uma queda maior de resistência entre 600°C a 800°C mostrando que a diminuição da resistência está relacionada com a principal

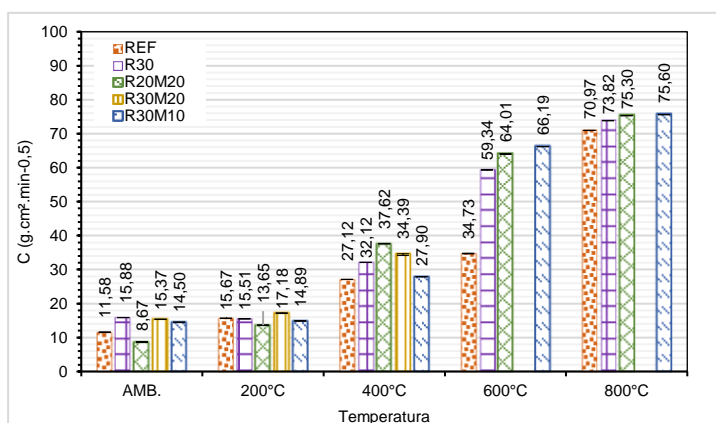
estrutura danificada que é o CSH (RAJA, 2014). A 800°C os concretos autoadensáveis REF, R20M20, R30M10 apresentaram uma resistência residual de aproximadamente 34%, fato relacionado com a decomposição completa dos hidratos. Substituições de até 40% possuíram percentual de resistência residual próximo ao do REF – aproximadamente 30%, diferindo do R30M20 que teve 21,1%.

4.5.6. Absorção de água por capilaridade, massa específica, absorção por imersão e índice de vazios

Os valores do coeficiente de absorção capilar (C), para as primeiras 24h, obtidos através do ensaio de absorção de água por capilaridade estão apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Observa-se que à temperatura ambiente os traços R30, R30M10 e R30M20 obtiveram coeficientes de capilaridade semelhantes e o R20M20 teve o menor coeficiente

Figura 26 - Coeficiente de capilaridade dos CAAs aos 91 dias.

de absorção.



Fonte: Autoria própria.

Ressalta-se que não foi possível analisar a absorção de água por capilaridade, massa específica, absorção total e o índice de vazios da composição R30M20, após a exposição a 600°C e 800°C, pois não restaram amostras suficientes para estes testes devido ao efeito *spalling* acentuado.

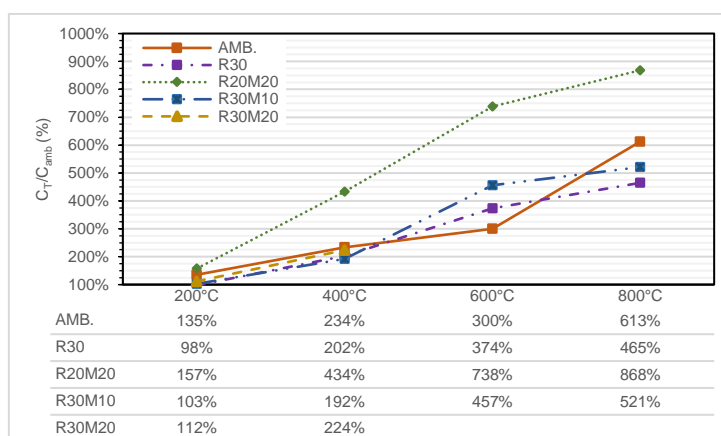
O acréscimo da temperatura provocou um aumento exponencial no coeficiente de absorção capilar em todos os CAAs analisados a partir da

temperatura de 200°C até 800°C, esse aumento exponencial com a temperatura também foi observado em outras pesquisas (KOU; POON; ETXEBERRIA, 2014; TOUMI; RESHEIDAT, 2010).

Observa-se que a temperatura ambiente os traços R30, R30M10 e R30M20 obtiveram coeficientes próximos e o R20M20 teve menor absorção. Nas temperaturas de 200°C e 800°C os coeficientes tiveram valores próximos entre misturas. Para todas as temperaturas a mistura sem adição mineral obteve menores valores de coeficiente de absorção. Kou, Poon e Etxeberria (2014) visualizaram o aumento do coeficiente de capilaridade em misturas de concreto preparadas com substituição do cimento de 35% e 55% por cinza volante e escória granulada de alto forno, respectivamente, apresentaram maiores coeficientes de absorção de água capilar devido ao *spalling*.

Na Figura 27 são apresentados os resultados dos coeficientes residuais, tomados como a relação do coeficiente a altas temperaturas com a temperatura ambiente (C_T/C_{amb}).

Figura 27 - Coeficiente de capilaridade residual dos CAAs aos 91 dias.



Fonte: Autoria própria.

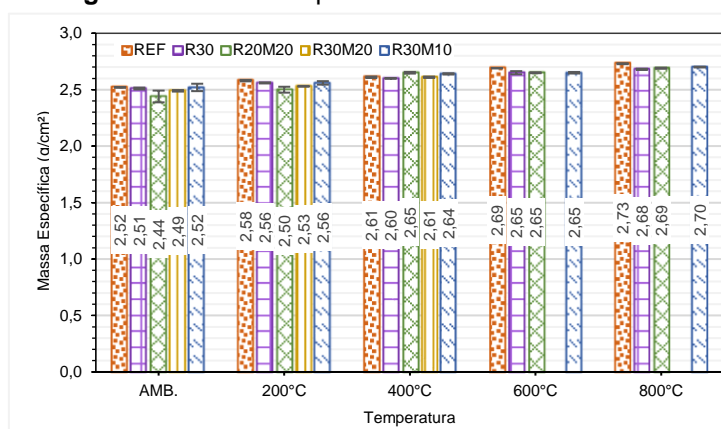
Nota-se que as amostras de REF, R30, R30M20 e R30M10 até 400°C obtiveram coeficientes de capilaridades residuais semelhantes. A 600°C os concretos que não possuíam metacaulim obtiveram menores coeficientes. De 600°C a 800°C o REF foi mais sensível ao incremento do calor, aumentando aproximadamente 300% do coeficiente residual. A mistura que obteve maiores

coeficientes residuais foi o R20M20, absorvendo até 8,68 vezes a mais na temperatura mais extrema do estudo.

Os resultados obtidos através do ensaio de massa específica são apresentados na Figura 28, enquanto na Figura 29 são mostrados os de absorção por imersão e índice de vazios. Nota-se que a massa específica das amostras apresentou um leve acréscimo com o aumento da temperatura e que em cada temperatura a massa das misturas foram próximas.

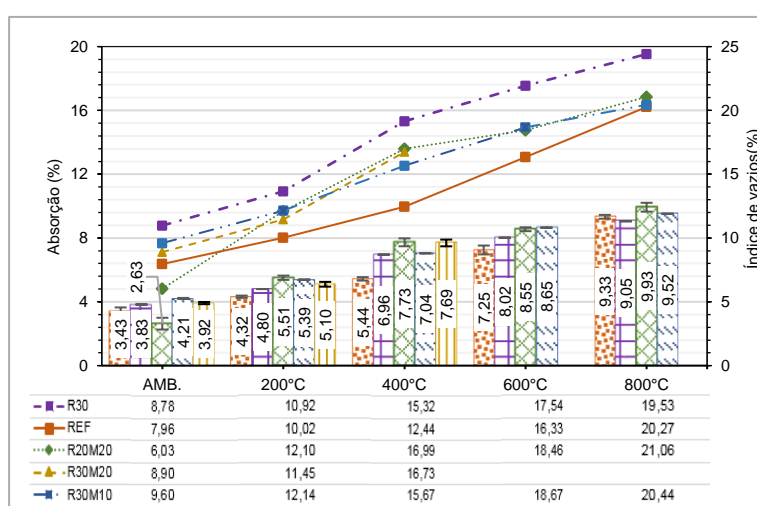
Os resultados de massa específica foram diferentes do esperado, pois com o aumento da perda de massa e do processo de fissuração as amostras apresentam mais vazios e consequentemente diminuiria a massa específica. Tal comportamento observado sugere que estudos aprofundados sejam realizados em uma pesquisa futura, objetivando melhor compressão do comportamento da massa específica dos concretos autoadensáveis.

Figura 28 - Massa específica dos CAAs aos 91 dias.



Fonte: Autoria própria.

Figura 29 - Absorção e índice de vazios dos CAAs aos 91 dias.



Fonte: Autoria própria.

Assim como nos ensaios de absorção capilar e massa específica, as medidas de índice de vazios (porosidade aberta) e absorção total apresentaram valores maiores à medida que a temperatura de submissão dos corpos de provas aumentou, este fato está relacionado com a maior fissuração verificada nos CAAs.

Na temperatura ambiente o R20M20 obteve menores valores de absorção capilar e índice de vazios, no entanto até 600°C aumentou de forma mais intensa que os demais traços, como visualizado na inclinação da reta. A 600°C as misturas R20M20 e R30M10 tiveram porcentagens próximas. Já a 800°C todas as misturas, exceto R30, obtiveram valores próximos. Em todas as temperaturas o R30 teve maior absorção e maiores índices de vazios.

4.6. Análises microestruturais

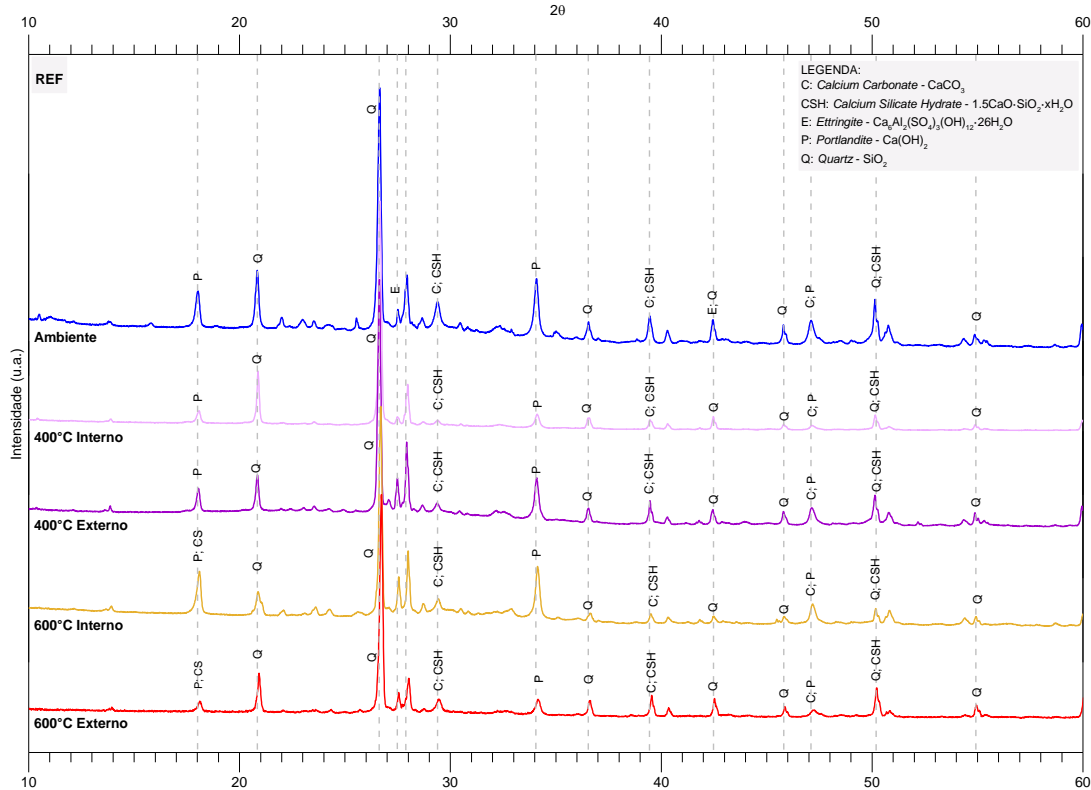
4.6.1. Difratometria de Raio-X

Nas Figura a Figura **33** são apresentados os difratogramas de raios-X dos traços analisados com a indicação dos picos analisados e as temperaturas analisadas.

Na Figura , observa-se no REF a decomposição da etringita (E) em altas temperaturas, se desidratando a 110-150 °C (TAYLOR, 1997). Uma diminuição, em relação a temperatura ambiente, dos picos de portlandita (P) em 400°C Interno e 600°C Externo indicando uma decomposição do CH. No entanto, em 400°C Externo houve um aumento oriundo da hidratação tardia provocado pela ação térmica assim como no estudo de Righi *et al.* (2013) que avaliaram o comportamento de concretos especiais com incorporação de 15% de cinza da casca do arroz moída e natural.

O CH perde água entre 400 e 500 °C pois se decompõe em CaO e se houver CO₂ disponível acima de 400 °C pode formar carbonato de cálcio (CaCO₃) (TAYLOR, 1990). A temperatura em que ocorre o início do desprendimento da água do hidróxido de cálcio situa-se em 370°C, sendo praticamente decomposto na temperatura de 580°C com total perda de água de sua estrutura química (TAYLOR, 1990).

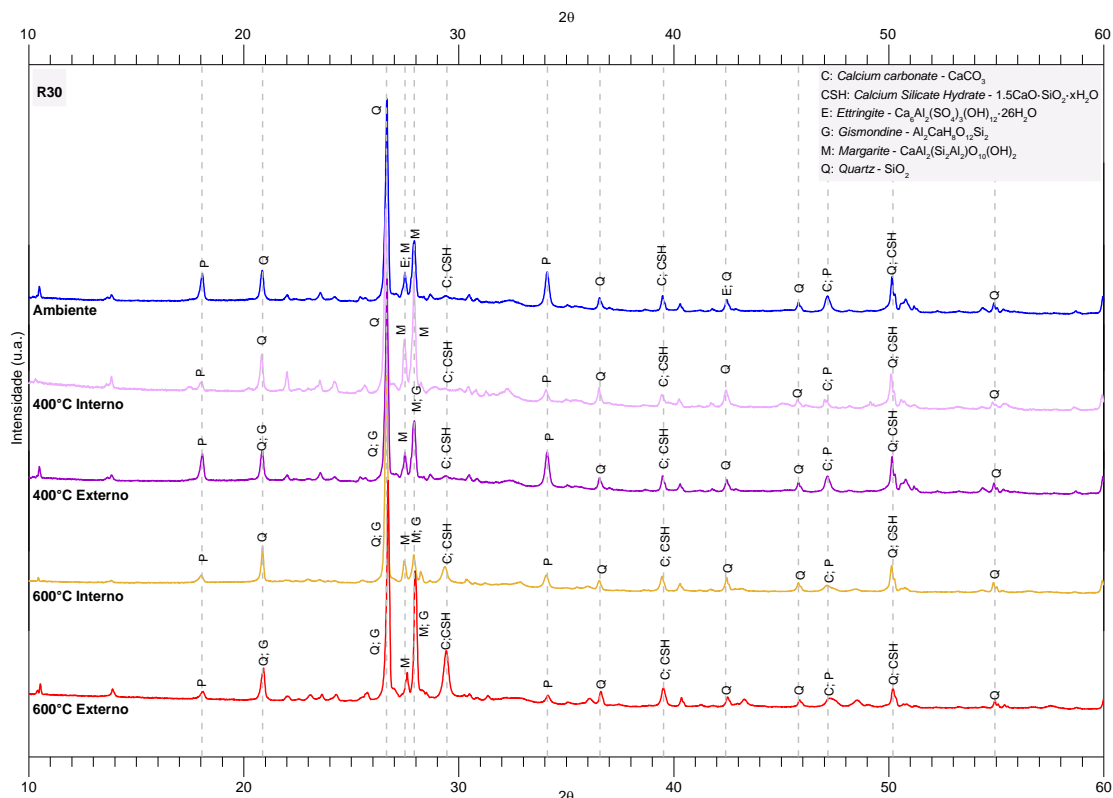
Figura 30 - DRX do REF.



Fonte: Autoria própria.

NaErro! Autoreferência de indicador não válida., no DRX do R30 observa-se o mesmo comportamento da etringita e portlandita ocorrido no REF. A partir dos 400°C Externo há formação da gismondina (G) a partir da reação do Al₂O₃ e SiO₂ contido no RBC com o CaO liberado no início da decomposição da portlandita.

Figura 30 - DRX do R30.

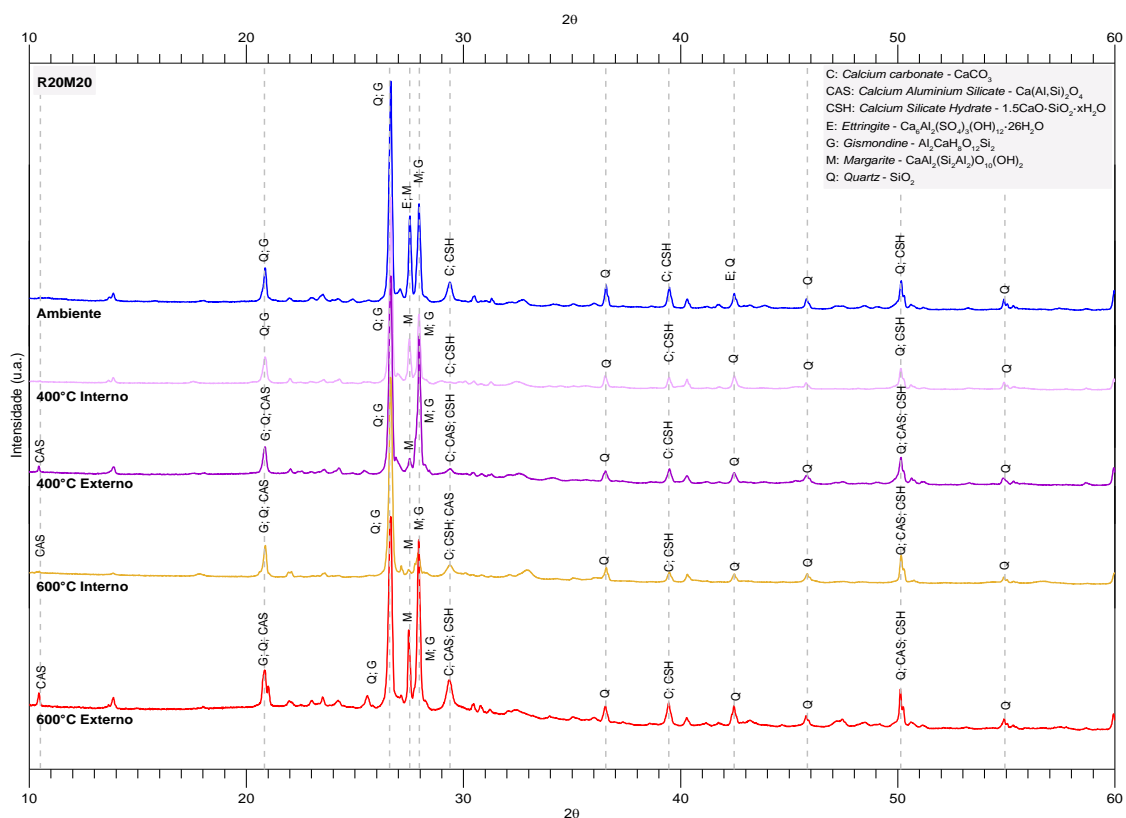


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 31, correspondente ao R20M20, nota-se a ausência de portlandita acarretada pela reação pozolânica com o consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ já em temperatura ambiente, e a decomposição da etringita a altas temperaturas. A 400°C Externo, o silicato de alumínio e cálcio (CAS) e margarite (M) podem ter sido formados a partir da reação CH com MK. A diminuição do pico 6 a 400°C Interno deveu-se à dissociação da CSH e seu aumento nas temperaturas mais altas foi motivado pela formação de CAS. A diminuição do pico 7 a 400°C Interno foi decorrente da dissociação de CSH e o seu aumento nas temperaturas maiores motivou-se pela formação de CAS.

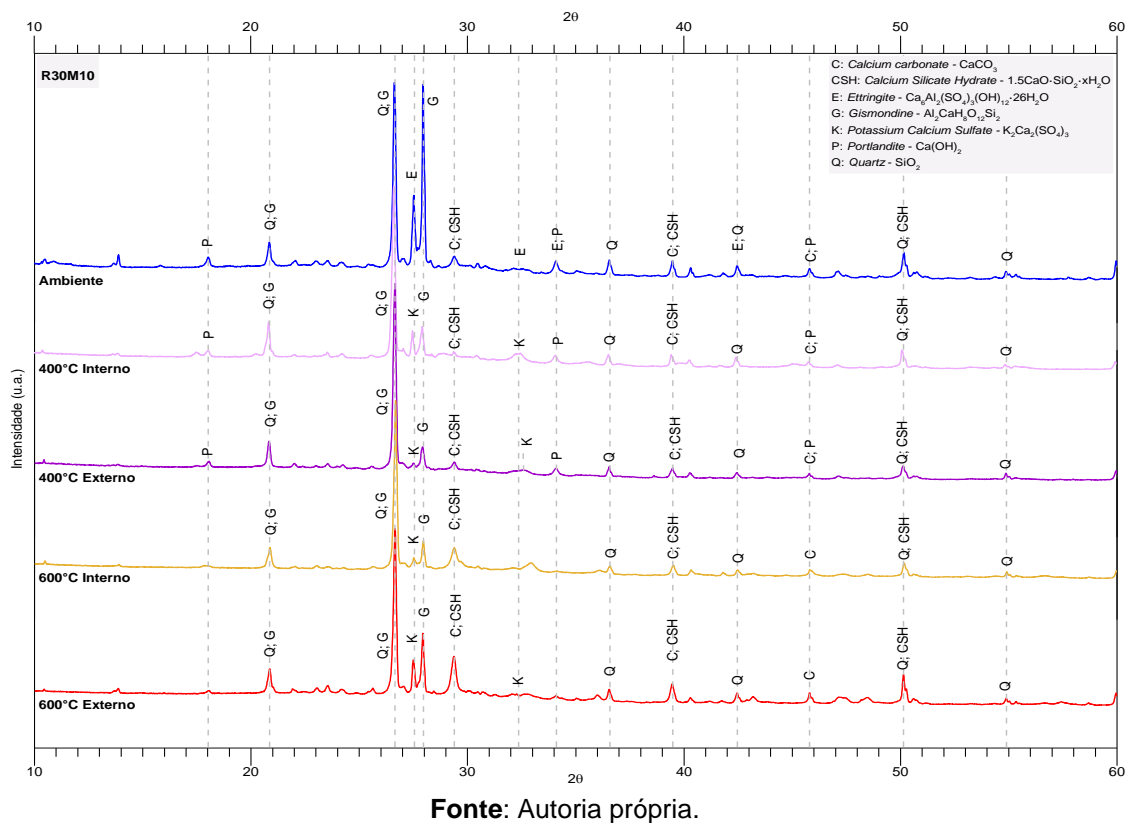
Na Figura 32, o traço R30M10 possui etringita apenas em na temperatura ambiente, formando em temperaturas elevadas o composto com potássio intersticial (K). Verifica-se os picos de portlandita (P) diminuindo com o aumento da temperatura pelo motivo já mencionado, no entanto no pico 13 há um crescimento, mas devido ao aumento do carbonato de cálcio.

Figura 31 - DRX do R20M20.



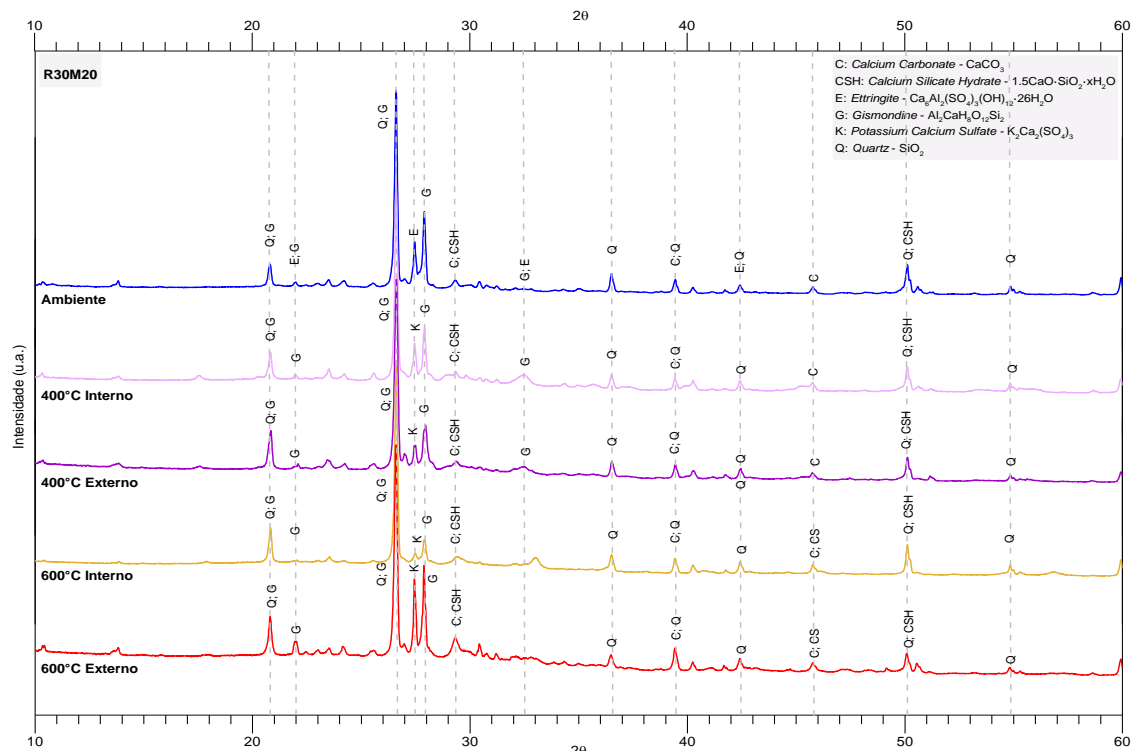
Fonte: Autoria própria.

Figura 32 - DRX do R30M10.



Por fim, na Figura 32, assim como no R20M20, a etringita é presente somente a temperatura ambiente e a portlandita é ausente em todas as temperaturas. A partir de 400°C o potássio é presente, podendo ser formado a partir da desintegração da etringita. Observa-se que nos traços de 40% e 50% há gismondina a partir da temperatura ambiente devido a contribuição do metacaulim na mistura como cita Nita (2007).

Figura 33 - DRX do R30M20.



Fonte: Autoria própria.

CAPÍTULO 5

Considerações finais

5.1. Conclusões

Após a análise e discussão dos resultados das propriedades físicas e químicas de concretos autoadensáveis submetidos a temperatura ambiente e a altas temperaturas com elevados teores de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim realizadas neste trabalho, pontua-se as seguintes conclusões:

- Os CAAs com baixo consumo de cimento e elevados teores de adições possuem propriedades no estado fresco satisfatórias conforme as regulamentações vigentes;
- A incorporação das adições minerais nas misturas interfere significadamente na viscosidade do CAA, fato que pode ser contornado pelo adequado fator água/finos e teor de aditivos;
- CAAs com adições minerais possuem um maior aumento da resistência à compressão com o tempo devido a reação pozolânica e consequente microestrutura mais densa;
- Os CAAs com as adições RBC e MK nas porcentagens de 40% apresentaram menor fissuração e mudanças táteis e visuais em temperaturas de 600°C e 800°C;
- O processo de fissuração e *spalling* foi menos severo nos CAAs com adições quando comparado com ao CAA sem adição;
- CAAs com teores de 50% de adições em substituição ao cimento são mais susceptíveis ao efeito *spalling* devido sua maior compactidade;
- O teor de 40% de adições contribui para a minimização do *spalling* e o maior teor de metacaulim deixa o CAA mais sensível ao *spalling* devido o aumento de temperatura;
- A substituição do cimento por altos teores de RBC e MK mostrou-se mais eficiente quanto a resistência residual e índices de vazios quando comparado ao CAA sem adição e com maior teor de cimento;
- A propagação de ondas de pulso nos CAAs foi bastante influenciada pelas altas temperaturas nos concretos;

- Os coeficientes de capilaridade aumentaram com o aumento da temperatura. Até 400°C, os traços REF, R30, R30M10 e R30M20 obtiveram coeficientes de capilaridades residuais próximos;
- De 600 °C a 800°C o uso de adições diminui a sensibilidade dos concretos ao incremento do calor, diminuindo o coeficiente de capilaridade residual, no entanto, concretos com maior teor de metacaulim são mais sensíveis;
- A massa específica não teve o comportamento esperado de diminuir com o aumento da temperatura;
- O índice de vazios e a absorção total dos CAAs aumentou com a elevação da temperatura;
- As alterações nos picos dos DRX mostram que o alto teor de adições minerais consome o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formando gismondina e margarite;
- Ocorreu mudanças de fase com o aumento da temperatura dos concretos.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros tem-se:

- Realizar análises microestruturais, internamente e externamente, dos CAAs com RBC e MK a temperatura ambiente e após submissão às temperaturas de 200 °C, 400 °C, 600 °C e 800 °C;
- Aumentar o campo amostral dos concretos desde estudo e analisar a massa específica;
- Inserir nas misturas avaliadas neste trabalho fibras naturais.

Referências

ADEFEMI, A. *et al.* Effect of Admixture on Fire Resistance of Ordinary Portland Cement Concrete. **Civil and Environmental Research**, [s.l.], v. 3, p. 105-114, abr. 2013. IISTE.

AHARI, Reza Saleh; ERDEM, Tahir Kemal; RAMYAR, Kambiz. Time-dependent rheological characteristics of self-consolidating concrete containing various mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 88, p.134-142, jul. 2015. Elsevier BV.

ALCANTARA, Marco Antônio de Moraes; SANTOS, Bruno Verdradini dos. Concreto auto-adensável com cinzas de bagaço de cana como finos: reologia do concreto fresco e comportamento no estado endurecido. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [s.l.], v. 5, n. 1, p.17-35, 25 set. 2012. Universidade Federal de Goiás.

AL-JELAWY, N.M.F.. **Study of Microstructure Properties of Self Compacting Concrete Reinforced with Fibers and subjected to Elevated Temperatures**. Tese de Doutorado, 153p. Departamento of Civil Engineering, University of Baghdad. 2013.

Almeida, J. M. A. Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinza de casca de arroz. Tese (Doutorado), 340p. Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2017.

LONSO, C.; FERNANDEZ, L.. Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. **Journal Of Materials Science**, [s.l.], v. 39, n. 9, p.3015-3024, maio 2004. Springer Nature.

ANJOS, M. A. S. Adição do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados. 171p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação

em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

ANJOS, Marcos A.S.; MARTINELLI, Antonio E.; MELO, Dulce M.a.. Effect of sugarcane biomass waste in cement slurries submitted to high temperature and pressure. **Materials Science and Engineering: A**, [s.l.], v. 529, p.49-54, nov. 2011. Elsevier BV.

ANJOS, Marcos A.S. *et al.* Hydration of oil well cement containing sugarcane biomass waste as a function of curing temperature and pressure. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, [s.l.], v. 109, p.291-297, set. 2013. Elsevier BV.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E – 119: **Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials**. West Conshohocken, PA, 2000.

____ASTM C597 - 02: **Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete**. West Conshohocken, PA, 2002.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR NM 23: **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica**. Rio de Janeiro, 2001.

____NBR NM 26: **Agregados - Amostragem**. Rio de Janeiro, 2009

____NBR NM 52: **Agregado miúdo – Determinação da 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: **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

____NBR 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2016.

____NBR 5751: **Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cal aos 7 dias.** Rio de Janeiro, 2015.

____NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014. 256p.

____NBR 7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 2014. 256p.

____ NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2009.

____ NBR 9779: **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, 2012.

____ NBR 12653: **Materiais pozolânicos – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2014.

____ NBR 15575: **Edificações habitacionais – Desempenho.** Rio de Janeiro, 2013.

____ NBR 15823: **Concreto autoadensável.** Rio de Janeiro, 2017.

____ NBR 15823-1: **Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e aceitação 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, 2017.

____ NBR 15823-3: **Concreto autoadensável - Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J.** Rio de Janeiro, 2017.

____ NBR 15823-4: **Concreto autoadensável - Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L.** Rio de Janeiro, 2017.

____ NBR 15823- 5: **Concreto autoadensável - Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V.** Rio de Janeiro, 2017.

ARIF, Elisabeth; CLARK, Malcolm W.; LAKE, Neal. Sugar cane bagasse ash from a high-efficiency co-generation boiler as filler in concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 151, p.692-703, out. 2017. Elsevier BV.

BARLUENGA, Gonzalo; PALOMAR, Irene; PUENTES, Javier. Hardened properties and microstructure of SCC with mineral additions. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 94, p.728-736, set. 2015. Elsevier BV.

BENZAID, Mehdi; BENMARCE, Abdelaziz. Behaviour of Self Compacting Concrete mixed with different additions at high-temperature. **Journal of Materials and Environmental Sciences**, Oujda, v. 8, n. 9, p.3081-3092, 2017.

British Standards EN 12504. **Testing concrete**. Determination of ultrasonic pulse velocity. United Kingdom, 2004.

CHEN, Bing; LI, Chunling; CHEN, Longzhu. Experimental study of mechanical properties of normal-strength concrete exposed to high temperatures at an early age. **Fire Safety Journal**, [s.l.], v. 44, n. 7, p.997-1002, out. 2009. Elsevier BV.

CORDEIRO, G.c.; TOLEDO FILHO, R.d.; FAIRBAIRN, E.m.r.. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 10, p.3301-3303, out. 2009. Elsevier BV.

DIAS, W.P.S., KHOURY, G.A., SULLIVAN, P.J.E. **Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700 °C**. ACI Materials Journal, v. 87, n. 2, p. 160-166, 1990.

DINIZ, H. A. A. **Estudo das propriedades mecânicas e dos parâmetros de durabilidade de concretos autoadensáveis com elevados teores de adições minerais submetidos à carbonatação**. Dissertação de Mestrado, 159p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2018.

DIVAKAR, Y; MANJUNATH, S; ASWATH, M.U, Experimental investigation on behaviour of concrete with the use of granite fines. **International Journal of Advanced Engineering Research and Studies**, v. 1, n. 4, p. 84-87, 2012.

DVORKIN, L. *et al.* Using mathematical modeling for design of self compacting high strength concrete with metakaolin admixture. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 37, p.851-864, dez. 2012. Elsevier BV.

EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, Rep. from Eur. Fed. Spec. Constr. Chem. Concr. Syst. 44 (2002) 1–32.

EUROPEAN STANDARD. NF EN 12390-3: **Test for hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens**. ISSN 0335-3931. The French Association of Standardization (AFNOR). Saint-Denis, 2012.

FARES, Hanaa; NOUMOWE, Albert; REMOND, Sébastien. Self-consolidating concrete subjected to high temperature. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 39, n. 12, p.1230-1238, dez. 2009. Elsevier BV.

FARES, Hanaa *et al.* High temperature behaviour of self-consolidating concrete. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 40, n. 3, p.488-496, mar. 2010. Elsevier BV.

FITOS, Michalis *et al.* Pozzolanic activity of thermally and mechanically treated kaolins of hydrothermal origin. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 116-117, p.182-192, nov. 2015. Elsevier BV.

FRÍAS, Moisés; VILLAR-COCIÑA, E.; VALENCIA-MORALES, E.. Characterisation of sugar cane straw waste as pozzolanic material for construction: Calcining temperature and kinetic parameters. **Waste Management**, [s.l.], v. 27, n. 4, p.533-538, jan. 2007. Elsevier BV.

FONSECA, T. V. **Avaliação de concretos autoadensáveis com baixos consumos de cimento incorporando metacaulim, pozolana da casca do arroz, fíler calcário e adição de cal hidratada**. Dissertação de Mestrado,

119p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2016.

GAR, Parisa Setayesh; SURESH, Narayana; BINDIGANAVILE, Vivek. Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic admixture in concrete for resistance to sustained elevated temperatures. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 153, p.929-936, out. 2017.

HAGER, I.. Behaviour of cement concrete at high temperature. **Bulletin of The Polish Academy of Sciences: Technical Sciences**, [s.l.], v. 61, n. 1, p.1-10, 1 jan. 2013. Walter de Gruyter GmbH.

HERNÁNDEZ, J.F M. *et al.* Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 28, n. 11, p.1525-1536, nov. 1998. Elsevier BV.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 834: fire resistance tests: elements of building construction: part 1. General requirements. Geneva, 1999.

KANNAN, V.; GANESAN, K.. Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 51, p.225-234, jan. 2014.

KAVITHA, O.R. *et al.* Fresh, micro- and macrolevel studies of metakaolin blended self-compacting concrete. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 114, p.370-374, set. 2015. Elsevier BV.

KAVITHA, O.R. *et al.* Microstructural studies on eco-friendly and durable Self-compacting concrete blended with metakaolin. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 124-125, p.143-149, maio 2016. Elsevier BV.

KELEŞTEMUR, Oğuzhan *et al.* Performance evaluation of cement mortars containing marble dust and glass fiber exposed to high temperature by using Taguchi method. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 60, p.17-24, jun. 2014. Elsevier BV.

KHAN, M. S.; ABBAS, H.. Effect of elevated temperature on the behavior of high volume fly ash concrete. **Ksce Journal Of Civil Engineering**, [s.l.], v. 19, n. 6, p.1825-1831, 12 dez. 2014. Springer Science and Business Media LLC.

KHOURY, Gabriel Alexander. Effect of fire on concrete and concrete structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, [s.l.], v. 2, n. 4, p.429-447, out. 2000. Wiley-Blackwell.

KIZILKANAT, Ahmet B.; YÜZER, Nabi; KABAY, Nihat. Thermo-physical properties of concrete exposed to high temperature. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 45, p.157-161, ago. 2013. Elsevier BV.

KOU, Shi Cong; POON, Chi Sun; ETXEBERRIA, Miren. Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 53, p.73-82, out. 2014. Elsevier BV.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. LNEC E 393. **Betões: Determinação da absorção da água por capilaridade**. Lisboa, 1993.

LE, Duc-hien; SHEEN, Yeong-nain; LAM, My Ngoc-tra. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete with sugarcane bagasse ash-slag blended cement. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 185, p.138-147, out. 2018. Elsevier BV.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 241p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

LUKE, K.. Phase studies of pozzolanic stabilized calcium silicate hydrates at 180 °C. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 34, n. 9, p.1725-1732, set. 2004. Elsevier BV.

MAJORANA, C.E. *et al.* An approach for modelling concrete spalling in finite strains. **Mathematics and Computers In Simulation**, [s.l.], v. 80, n. 8, p.1694-1712, abr. 2010. Elsevier BV.

MEDEIROS, F. K. **Estudo de concretos autoadensáveis com reduzidos teores de cimento e elevados teores de adições minerais**. Dissertação de Mestrado, 134p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2016.

MEHDIPOUR, Iman *et al.* Effect of mineral admixtures on fluidity and stability of self-consolidating mortar subjected to prolonged mixing time. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 40, p.1029-1037, mar. 2013. Elsevier BV.

MEHDIPOUR, Iman *et al.* Linking stability characteristics to material performance of self-consolidating concrete-equivalent-mortar incorporating fly ash and metakaolin. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 105, p.206-217, fev. 2016. Elsevier BV.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MORAES, R. C. **Efeitos físicos e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto**. Dissertação de Mestrado, 178p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Santa Maria. 2001.

MORAES, J.c.b. *et al.* Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: Microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 94, p.670-677, set. 2015. Elsevier BV.

MUANGTONG, P. *et al.* Effects of fine bagasse ash on the workability and compressive strength of mortars. **Chiang Mai J. Sci**, [s.l.], v. 40, p.126-134, jan. 2013.

NITA, Clovis. Materiais Pozolânicos: metacaulim e sílica ativa/ Clovis Nita, Vanderley Moacyr John. São Paulo: EPUSP, 2007. 13 p. – Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Construção Civil; BT/PCC/451.

NURUDDIN, Muhd Fadhil; AZMEE, Norzaireen Mohd; YUNG, Chang Kok. Effect of fire flame exposure on ductile self-compacting concrete (DSCC) blended with MIRHA and fly ash. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 50, p.388-393, jan. 2014.

OLLIVIER, J.P.; TORRENTI, J.M.. A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte. In: OLLIVIER, J.P.; VICHOT, A. (Eds.). **Durabilidade do Concreto**: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. IBRACON: São Paulo, 2014. p. 41-112.

OZGUVEN, A.; OZCELIK, Y.. Effects of high temperature on physico-mechanical properties of Turkish natural building stones. **Engineering Geology**, [s.l.], v. 183, p.127-136, dez. 2014. Elsevier BV.

PATHAK, Neelam; SIDDIQUE, Rafat. Effects of elevated temperatures on properties of self-compacting-concrete containing fly ash and spent foundry sand. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 34, p.512-521, set. 2012. Elsevier BV.

PELISSER, Fernando; VIEIRA, Alexandre; BERNARDIN, Adriano Michael. Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 175, p.324-332, fev. 2018. Elsevier BV.

PERLOT, Céline; ROUGEAU, Patrick; DEHAUDT, Sylvain. Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete. Application for precast industry. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 44, p.50-57, nov. 2013. Elsevier BV.

POON, Chi-sun *et al.* Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated

temperatures. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 31, n. 9, p.1291-1300, set. 2001.

RAFIEIZONOOZ, Mahdi *et al.* Toxicity characteristics and durability of concrete containing coal ash as substitute for cement and river sand. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 143, p.234-246, jul. 2017. Elsevier BV.

RAJA, K. B. Behaviour of sugarcane bagasse ash concrete when exposed to various temperature and cooled at room temperature. Dissertação (Mestrado), 94p. Departamento de Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia Gitam. Índia, Gitam University. 2014.

REDDY, D. Harinadha; RAMASWAMY, Ananth. Influence of mineral admixtures and aggregates on properties of different concretes under high temperature conditions I: Experimental study. **Journal of Building Engineering**, [s.l.], v. 14, p.103-114, nov. 2017. Elsevier BV.

RIGHI, D., LIMA, R. C. A., KIRCHHOF, L. D., ISAÍÁ, G. C. **Análise do comportamento de concretos com cinza de casca de arroz expostas a elevadas temperaturas**. 2º CILASCI, Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança contra Incêndio, Coimbra, 2013.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. **RILEM TC 129-MHT**: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. 2004.

ROBERT, F.; COLINA, H.. The influence of aggregates on the mechanical characteristics of concrete exposed to fire. **Magazine of Concrete Research**, [s.l.], v. 61, n. 5, p.311-321, jun. 2009. Thomas Telford Ltd.

ROBERT, F.; COLINA, H.; DEBICKI, G. A Durabilidade do Concreto Mediante ao Fogo. In: OLIVIER, J. P.; VICHOT, A. (Eds.). **Durabilidade do Concreto**: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. IBRACON: São Paulo, 2014. p. 510-557.

RUKAVINA, Marija Jelcic; BJEGOVIĆ, Dubravka; GABRIJEL, Ivan. Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete with Different Mineral Aditives After

High Temperature Exposure. **Journal of Structural Fire Engineering**, [s.l.], v. 6, n. 3, p.177-184, set. 2015. Emerald.

SILVA, P.r. da; BRITO, J. de. Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 86, p.101-112, jul. 2015. Elsevier BV.

SHI, X., XU, G. **Environmentally Friendly Pervious Concrete for Treating Deicer-Laden Stormwater (Phase II Report)**. 178p. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Washington. 2018.

SOARES, L. A.. **Síntese, ativação e caracterização de carvão obtido a partir de bagaço de cana de açúcar e avaliação da capacidade de adsorção**. 2014. 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SOARES, E. A. **Avaliação físico-química e sensorial de caldo de cana-de-açúcar**. 2017. 49f. Dissertação (Mestrado em Agroecologia e Desenvolvimento Rural) - Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2017.

SUA-IAM, Gritsada; MAKUL, Natt. Utilization of coal- and biomass-fired ash in the production of self-consolidating concrete: a literature review. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 100, p.59-76, ago. 2015. Elsevier BV.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. London: Academic Press, 1990. 475p.

TAYLOR, H. R.W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K.L. Delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 31, p. 683-693, mai. 2017. Elsevier BV.

TOUMI, B., RESHEIDAT, M. Influence of High Temperatures on Surface Cracking of Concrete Studied by Image Scanning Technique, **Jordan J. Civ. Eng.** 4 (2010) 155–163.

UYSAL, Mucteba. Self-compacting concrete incorporating filler additives: Performance at high temperatures. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 26, n. 1, p.701-706, jan. 2012. Elsevier BV.

VIVEK, S.s.; DHINAKARAN, G.. Durability characteristics of binary blend high strength SCC. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 146, p.1-8, ago. 2017. Elsevier BV.

XING, Zhi *et al.* Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 41, n. 4, p.392-402, abr. 2011. Elsevier BV.

XU, y *et al.* Impact of high temperature on PFA concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 31, n. 7, p.1065-1073, jul. 2001. Elsevier BV.

YÜKSEL, İsa; SIDDIQUE, Rafat; ÖZKAN, Ömer. Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 2, p.967-972, fev. 2011.

ZHAI, Yue *et al.* Study on compressive mechanical capabilities of concrete after high temperature exposure and thermo-damage constitutive model. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 68, p.777-782, out. 2014. Elsevier BV.