

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Henrique dos Santos Kramer

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS COM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E
ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO EM ALTAS TEMPERATURAS**

Santa Maria, RS
2020

Henrique dos Santos Kramer

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO EM
ALTAS TEMPERATURAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Engenheiro Civil**.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Larissa Degliuomini Kirchhof

Santa Maria, RS
2020

Henrique dos Santos Kramer

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO EM
ALTAS TEMPERATURAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Engenheiro Civil**.

Aprovado em 09 de Janeiro de 2020:

Larissa Degliuomini Kirchof, Dr^a. (UFSM)
(Orientadora)

André Lübeck, Dr. (UFSM)

Silvane Santos da Silva, Me. (UFSM)

Santa Maria, RS
2020

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais e meu irmão, pois sempre foram meus alicerces e meu prumo durante a minha vida. Obrigado pelo apoio, pelas palavras e pelo amor, mesmo que distantes sinto vocês comigo.

Aos professores que passaram por mim durante todos os anos de educação, em especial a Prof^a. Sonilda que me incentivou a ser curioso e a amar os números, aos Professores André, Larissa e Rogério, por terem me ajudado com seu conhecimento e nas dificuldades encontradas durante a realização deste trabalho, e aos Professores que acreditam que a melhor arma para enfrentar os problemas da sociedade atual se encontra na educação.

À Universidade Federal de Santa Maria que garantiu infraestrutura para meus estudos e minhas pesquisas, alimentação acessível, auxílio para o meu aperfeiçoamento pessoal e acesso a programas como o ANIMA e o coral Polivozes. Serei sempre grato.

Aos meus amigos de Ijuí que mesmo após anos e a distância o carinho e a conexão continuam intactos. Airton, Goi, Tita e Lou amo vocês.

Aos colegas desde o início desses 5 anos e meio, obrigado por terem me acolhido na família de vocês e por terem estado do meu lado nos altos e baixos.

Aos colegas dos últimos semestres da graduação, obrigado por terem me acolhido e me ajudarem a enfrentar os medos e inseguranças do amanhã.

Aos amigos que surgiram inesperadamente na minha vida e se tornaram essenciais, que me motivam no dia a dia e que estão comigo para tudo. Jefe, Pile, Carol e Bia, amo vocês.

Ao GEPECON e aos amigos que fiz desde a iniciação científica até este trabalho, obrigado pela amizade e também por me fazerem perceber que nem sempre resultados negativos são ruins.

À GIGOV da Caixa Econômica Federal e as amizades realizadas no período.

*"Não pedimos este salão ou esta música.
Fomos convidados a entrar.
Portanto, porque a escuridão nos rodeia,
voltamos nossos olhos para a luz.
Suportamos os momentos de dificuldade para
agradecer os de abundância.
Foi nos dada a dor para nos surpreendermos
com a alegria.
Foi nos dada a vida para não aceitarmos a
morte.
Não pedimos este salão ou esta música.
Mas já que estamos aqui,
vamos dançar."*

- Stephen King

RESUMO

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO EM ALTAS TEMPERATURAS

AUTOR: Henrique dos Santos Kramer
ORIENTADORA: Larissa Degliomini Kirchhof

A incorporação de cinza de casca de arroz (CCA) ao concreto gera benefícios para a sua durabilidade em situações usuais, pois acarreta o refinamento de estrutura de poros. Entretanto, em situações excepcionais, como as de um incêndio, o refinamento dos poros dificulta a saída dos vapores de água que surgem quando o concreto é aquecido, aumentando a pressão interna nos poros, o que pode auxiliar no aparecimento do *spalling* explosivo. Pesquisas mostram que a utilização de fibras de aço pode auxiliar na redução da susceptibilidade ao aparecimento do *spalling* em concretos, pois auxiliam no controle do surgimento das fissuras. Apesar da incorporação de CCA no concreto ser discutida em inúmeras pesquisas, poucas se preocupam em analisar seu comportamento em altas temperaturas e, muito menos, com a adição de fibras de aço. Nesta pesquisa, analisa-se a influência da substituição parcial de cimento Portland por CCA e a adição de fibras de aço na resistência mecânica à compressão, módulo de elasticidade, perda de massa e ocorrência de *spalling* em concretos após serem submetidos a altas temperaturas. Para isso, foram moldados corpos de prova com relação fixa de a/agl de 0,45, 25% de substituição de cimento por CCA e adição de 10 kg/m³ de fibras de aço. As amostras foram aquecidas a uma taxa de aquecimento de 1°C/min, de acordo com RILEM TC 129-MHT (*RILEM Technical Committee*, 2004) até atingirem os patamares de temperatura de 200°C, 400°C, 600°C e 900°C, nos quais permaneceram por 60 minutos. Os ensaios foram realizados após o resfriamento dos corpos de prova. Com os resultados obtidos, percebeu-se que a incorporação de CCA melhora o desempenho quanto à resistência mecânica à compressão residual e à perda de massa, porém não influenciou no módulo de elasticidade residual. Já a adição de fibras de aço apresentou melhorias na resistência à compressão, sendo estas evidentes acima de 400°C, mas, por outro lado, não influenciaram os resultados quanto ao módulo de elasticidade e à perda de massa. Por fim, não foi evidenciado a ocorrência de *spalling* nas amostras ensaiadas devido às condições de acondicionamento de pré-aquecimento dos corpos de prova, bem como devido à taxa de aquecimento utilizada.

Palavras-chave: Concreto. Cinza de casca de arroz. Fibras de aço. Altas temperaturas.

ABSTRACT

MECHANICAL BEHAVIOR OF CONCRETES WITH PARTIAL REPLACEMENT OF RICE HUSK ASH AND ADDITION OF STEEL FIBERS AT HIGH TEMPERATURES

AUTHOR Henrique dos Santos Kramer
ADVISOR: Larissa Degliuomini Kirchhof

The incorporation of rice husk ash (RHA) into concrete create benefits for its durability in usual situations, because it leads to the refinement of the pore structure. However, on unusual situations, such as a fire, the refinement of the pore structure makes it difficult for water vapor that arise when the concrete is heated to escape, increasing the pore's internal pressure, that may contribute to the appearance of explosive spalling. Researches show that the using of steel fibers may help to decrease the susceptibility of appearance of spalling on concrete, because they help controlling the occurrence of cracks. Despite the incorporation of RHA in concrete is discussed in many researches, just a few worries about analyzing its behavior at high temperatures and even less when steel fibers are added. In this research, the influence of the partial replacement of Portland cement for RHA and the addition of steel fibers on mechanical compressive strength, modulus of elasticity, weight loss and occurrence of spalling in concretes, after its exposed to high temperatures, are analyzed. For this purpose, it was made specimens with fixed water and binder ratio of 0,45, 25% of replacement of cement for RHA and addition of 10 kg/m³ of steel fibers. The specimens were heated with a heat rate of 1°C/min, according to the RILEM TC 129-MHT (RILEM Technical Committee, 2014), till the temperatures levels of: 200°C, 400°C, 600°C and 900°C, in which they remained for 60 minutes. The tests were made after its cooling. Based on the tests, it was noted that the incorporation of RHA improves performance in terms of residual mechanical resistance to compression and mass loss, however it did not influence on modulus of elasticity. The addition of steel fibers showed improvement on mechanical compressive strength, this benefit was evident above 400°C, but, in the other hand, it did not influence the result of modulus of elasticity and weight loss. Finally, the occurrence of spalling was not observed on the specimens due to its pre-heat stowage conditions, as well as due to the heating rate used

Keywords: Concrete. Rice husk ash. Steel fibers. High temperatures.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Principais modificações físico-químicas que ocorrem no concreto devido ao aumento da temperatura	21
Tabela 2 - Fatores de redução da resistência à compressão conforme a norma brasileira NBR 15200 (ABNT, 2012)	24
Tabela 3 - Composição química e perda ao fogo do cimento CPV-ARI	33
Tabela 4 - Características físicas do cimento CPV-ARI	33
Tabela 5 - Composição química e perda ao fogo da cinza de casca de arroz	34
Tabela 6 - Características físicas da CCA.....	35
Tabela 7 - Características físicas dos agregados miúdos e graúdos	36
Tabela 8 - Traços unitários.....	39
Tabela 9 - Consumo de materiais	39
Tabela 10 – Resistência mecânica à compressão em MPa	47
Tabela 11 – Análise ANOVA da resistência mecânica à compressão residual	48
Tabela 12 - Teste <i>Tukey</i> para a resistência mecânica à compressão residual	48
Tabela 13 - Módulo de elasticidade (GPa)	51
Tabela 14 - Análise ANOVA para o módulo de elasticidade	52
Tabela 15 - Teste <i>Tukey</i> para o módulo de elasticidade	52
Tabela 16 - Análise ANOVA para a massa residual	54
Tabela 17 - Teste <i>Tukey</i> para a perda de massa	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geometria de fibras de aço para reforço de concreto	18
Figura 2 - Comportamento das linhas de tensões em concretos com e sem fibras ..	19
Figura 3 - Ganho de módulo de elasticidade aos 7 dias.....	20
Figura 4 - Redução da resistência à compressão com o aumento da temperatura ..	22
Figura 5 - Resistência à compressão de concretos de diferentes idades após serem aquecidos	23
Figura 6 - Resistência à compressão de concretos com substituição de cimento por CCA em diferentes temperaturas	25
Figura 7 - Resistência à compressão de concretos com fibra de aço	26
Figura 8 - Relação tensão-deformação de concretos convencionais em função do aumento de temperatura	27
Figura 9- Mecanismos de ocorrência do spalling no concreto (a) Tensões térmicas (b) Poro-pressão	29
Figura 10 - Fluxograma do programa experimental	32
Figura 11 - Difratograma da cinza de casca de arroz.....	35
Figura 12 - Curva granulométrica do agregado miúdo	37
Figura 13 - Curva granulometria do agregado graúdo	37
Figura 14 - Fibra de aço utilizada.....	38
Figura 15 - Betoneira de eixo inclinado	40
Figura 16 - Acondicionamento dos corpos de prova após moldagem.....	41
Figura 17 - Caixa de proteção	42
Figura 18 - Forno industrial	43
Figura 19 - Ensaio de resistência a compressão axial sendo realizado	44
Figura 20 - Corpo de prova com LVDT posicionado	45
Figura 21 - Fatores de redução das resistências mecânicas à compressão	48
Figura 22 - Coeficientes de redução de resistência mecânica	51
Figura 23 - Fatores de redução dos módulos de elasticidade	52
Figura 24 – Fatores de redução de massa.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS

a/agl	Relação água aglomerante
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	<i>Analysis of variance</i>
C ₂ S	Belita
C ₃ S	Alita
CaO	Óxido de cálcio
CaOH	Hidróxido de Cálcio
CCA	Cinza de casca de arroz
CCA	Traço de concreto com cinza de casca de arroz
CCA+FA	Traço de concreto com cinza de casca de arroz e fibras de aço
CH	Hidróxido de cálcio
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
E _{ci}	Módulo estático de elasticidade tangente inicial da curva tensão-deformação
f _c	Resistência à compressão
GEPECON	Grupo de Estudos e Pesquisa em Concretos
H	Água
LAPAM	Laboratório de Processos Ambientais
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
MPa	Mega Pascal
REF	Traço de concreto de referência
REF+FA	Traço de concreto de referência com fibras de aço
S	Dióxido de silício
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
ε _a	Deformação correspondente ao carregamento de 0,5 MPa
ε _b	Deformação correspondente ao carregamento de 30% de f _c
σ _b	Carregamento correspondente a 30% de f _c

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1.1 Considerações iniciais	12
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivo geral.....	13
1.2.2 Objetivos específicos	13
1.3 Justificativa	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 Comportamento da cinza de casca de arroz no concreto	15
2.2 Concreto reforçado com fibras de aço	17
2.3 O comportamento do concreto em altas temperaturas	20
2.3.1 Resistência à compressão	21
2.3.2 Módulo de elasticidade	26
2.3.3 O <i>spalling</i>	28
3 MATERIAIS E METODOLOGIA	31
3.1 Materiais	32
3.1.1 Aglomerantes.....	32
3.1.2 Agregados.....	35
3.1.3 Aditivo	38
3.1.4 Fibras de aço	38
3.1.5 Água	38
3.2 Etapas da pesquisa.....	39
3.2.1 Traços utilizados	39
3.2.2 Preparação, moldagem e cura dos corpos de prova	40
3.2.3 Perda de massa.....	42
3.2.4 Exposição às altas temperaturas	42
3.2.5 Ensaios realizados.....	44
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	47
4.1 Resistência mecânica à compressão.....	47

4.2 Módulo de elasticidade	51
4.3 Perda de massa	54
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
5.1 Conclusões	56
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	57
REFERÊNCIAS.....	58
APÊNDICE A – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À	
COMPRESSÃO.....	65
APÊNDICE B – RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE	67
APÊNDICE C – RESULTADOS DE PERDA DE MASSA	69

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Quase um quarto da alimentação brasileira é constituída por arroz e feijão. Esse fato faz com que o Brasil seja destaque no consumo e produção de arroz. Segundo a *Brazilian Rice*, o Brasil é o maior produtor e consumidor de arroz fora da Ásia. Na safra de 2017/18, foram produzidas cerca de 12,06 milhões de toneladas de arroz, sendo 70,13% desse montante, apenas no estado do Rio Grande do Sul, como informado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2019).

Ao serem realizadas as primeiras operações de beneficiamento do arroz, a casca surge como subproduto. Por possuir um alto poder calorífico, esta é utilizada como fonte de energia na própria indústria que beneficia o grão (POUEY, 2006).

Após ser queimada para a geração de energia, cerca de 20% da casca se torna cinza. A cinza possui uma baixa densidade, em torno de 200 kg/m³ e, segundo Armesto et al. (2002), essa característica gera problemas de estocagem e transporte, além de gerar poluição ambiental. Por isso, deve-se buscar maneiras de dar um destino final e correto para a cinza de casca de arroz (CCA).

Uma das soluções comumente utilizadas para se dar um destino final adequado ao subproduto proveniente da queima da cinza casca de arroz (CCA), evitando, dessa forma, sua deposição no meio ambiente, é o aproveitamento da CCA em substituição parcial ao cimento para a confecção de concretos. Isso promove a redução do consumo de cimento, considerado o insumo mais caro na confecção de concretos, além de melhorar as propriedades no estado endurecido desse material, tais como a resistência à compressão, conforme constatado por Isaia et al. (2017), Pereira et al. (2015) e Silveira (1996), a redução quanto à penetração de cloretos, segundo Silva (2012), e uma melhoria no desempenho frente à carbonatação (NUNES, 2014). As melhorias nas propriedades se devem pelo refinamento da estrutura de poros e diminuição da porosidade total da pasta de cimento, devido ao efeito fíler e efeito pozolânico da CCA (LONDERO, 2017). Entretanto, em uma situação excepcional com a de um incêndio, a diminuição da porosidade, promovida pela substituição parcial da CCA, pode dificultar a saída do vapor de água quando o concreto é aquecido, gerando pressões internas nos poros, e, se essa pressão superar a resistência à tração do

concreto, haverá a ocorrência de *spalling* explosivo (KIRCHHOF, 2010; ALMEIDA, 2017).

O *spalling* explosivo ou *spalling* pode causar deslocamentos pontuais e com grande liberação de energia, assim como deslocamentos de grandes áreas superficiais de concreto, deixando as camadas internas de concreto expostas à ação de altas temperaturas. Essas perdas de partes do concreto comprometem a segurança da estrutura, visto que poderá expor as camadas mais internas do concreto, onde se encontram as armaduras, podendo leva-la à ruína (KIRCHHOF, 2010; SOUZA, 2014).

Para reduzir o efeito do *spalling* no concreto, Lima (2005) constatou que a adição de fibras de aço na matriz cimentícia melhora a resistência residual do concreto após a exposição a altas temperaturas e que a adição de fibras de polipropileno também pode reduzir a probabilidade de surgimento do deslocamento.

Nesse contexto, é imprescindível a realização de estudos para a verificação do comportamento de concretos com adição de CCA frente a altas temperaturas, pois o material tem se mostrado como uma ótima solução técnica e sustentável em condições normais, no entanto, ainda existem poucos estudos quanto ao seu uso em situações excepcionais, como as provocadas por um incêndio. Além disso, também é necessário possuir conhecimento quanto à eficácia da utilização de fibras de aço na matriz de concretos produzidos com CCA.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral investigar o comportamento mecânico de concretos com incorporação de CCA e adição de fibra de aço em altas temperaturas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar os efeitos da variação de temperatura no comportamento macroestrutural do concreto, expresso em termos de resistência à compressão simples e módulo de elasticidade, de corpos de prova cilíndricos;

- Aferir a ocorrência do *spalling* a partir da quantificação da perda de massa dos corpos de prova após o aquecimento;
- Investigar a eficácia da utilização de fibras de aço, tanto nas propriedades mecânicas residuais do concreto quanto na ocorrência de *spalling*.

1.3 Justificativa

Na indústria da construção civil, o material mais empregado é o concreto, devido a sua resistência, ao custo de produção e à facilidade de encontrar sua matéria prima (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Porém, para a sua fabricação, é utilizado comumente o cimento Portland que consome altíssimas quantidades de energia e de matérias primas naturais, além de emitir CO₂ na atmosfera (MAURY e BLUMENSCHHEIN, 2012). Por isso, convém substituir parte do cimento por resíduos de outras indústrias, como a cinza de casca de arroz (CCA), que ainda não possuem um destino correto para o seu descarte.

A incorporação de CCA no concreto foi discutida ao longo dos últimos anos e é unânime que são garantidos benefícios tanto com relação à durabilidade do concreto quanto ao meio ambiente. Por outro lado, pouco é pesquisado sobre seu efeito em concretos após serem expostos à ação de elevadas temperaturas. Almeida (2017) observou que a incorporação de CCA no concreto tende a facilitar o aparecimento do *spalling*, o que se torna preocupante.

Pesquisas mostram que a utilização de fibras de aço ajuda a prevenir o aparecimento do *spalling* em concretos, diminuindo o surgimento e propagação de fissuras na matriz cimentícia, garantindo maior integridade do concreto após ser aquecido (LIMA, 2005; ANUMALA e SHARMA, 2011).

O que se nota, na bibliografia consultada, é que estudos sobre concretos com substituição parcial de cimento por CCA expostos a altas temperaturas são escassos, porém estudos sobre o comportamento mecânico residual de concretos com a utilização em conjunta de CCA e fibras de aço são mais escassos ainda.

Portanto, este trabalho se justifica não só pela necessidade de se avaliar experimentalmente o comportamento mecânico de concretos com substituição parcial de cimento por CCA, como também a necessidade de avançar nos estudos das propriedades de concretos com adição de fibras de aço após serem submetidos a altas temperaturas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os fundamentos teóricos utilizados para desenvolver e sustentar este trabalho, a fim de apresentar as alterações das propriedades do concreto acarretadas pela adição de CCA e fibra de aço, assim como o aquecimento.

2.1 Comportamento da cinza de casca de arroz no concreto

O arroz, ao se desenvolver, absorve sílica do solo e a incorpora em sua estrutura. O grão de arroz é coberto por uma camada, chamada de casca, que possui alta concentração de sílica, em torno de 80-85%, além de celulose e lignina. Ao ser queimada, a parte orgânica da casca é removida, restando a sílica (MAJIDI, 2011).

A casca é utilizada na indústria como fonte de energia, quando utilizado o processo de combustão, por possuir poder calorífico próximo a 3000 kcal/kg, gerando energia térmica e elétrica. Sua utilização na geração de energia se torna benéfica ao meio ambiente por substituir parte da energia elétrica disponível que, em sua maioria, é gerada através de usinas que consomem matérias não renováveis, evitando, dessa forma, que seja emitido o gás metano da decomposição da casca (POUEY, 2006; SILVA, 2019).

O subproduto gerado da queima da casca é a cinza de casca de arroz (CCA), utilizada na construção civil, na agropecuária, e até na indústria petroquímica. Na indústria da construção civil, sua utilização é como adição mineral. Em 2018, por exemplo, foram produzidas 53,5 milhões de toneladas de cimento no Brasil (SNIC, 2018). Porém, Silva (2019) aponta que sua utilização está abaixo do ideal, no estado do Rio Grande do Sul, por exemplo, é adicionado 10% de cinza ao cimento produzido, sendo o valor ideal próximo a 15% de substituição em massa de clínquer.

Segundo Isaia et al. (2017) e Silva (2019), quando há o controle de temperatura de queima (500°C por 2 horas), pode-se produzir cinza com quantidade de sílica amorfa superior a 90%, com adequada porosidade e área específica entre 50 e 100 m²/g. Essas características fazem com que a cinza produzida a partir de queima controlada sejam mais reativas, sendo adequada a sua utilização em concretos. Porém, Pouey (2006), Isaia et al. (2010) e Isaia (1995, apud SILVA, 2019) apontam que é possível a obtenção de resultados satisfatórios, em termos de durabilidade e

resistência à compressão dos concretos, utilizando CCA sem controle de temperatura durante a queima.

Quanto à sílica proveniente da CCA, sabe-se que esta reage com o hidróxido de cálcio (CH), produto da hidratação do cimento, formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). O C-S-H, produzido pela reação pozolânica, é semelhante ao C-S-H produzido na hidratação do cimento Portland, porém mais estável (CORDEIRO, 2009). A reação de hidratação do cimento está descrita pela Equação 1 e a reação pozolânica na Equação 2 (MEHTA e MONTEIRO, 2014).



A adição de CCA não contribui apenas na reação química, mas também no efeito físico. O efeito físico, ou também chamado de efeito fíler, acontece, pois as partículas de CCA com diâmetro em torno de 0,1 µm se alocam entre os grãos de cimento, reduzindo o espaço para a água e atuando como pontos de nucleação dos produtos da hidratação do cimento, contribuindo para a formação de pastas mais densas pelo refinamento dos poros (DUART, 2008).

Pelo conjunto das ações químicas e físicas, Mehta e Monteiro (2014) afirmam que a CCA e a sílica ativa são as únicas adições minerais que contribuem para a resistência mecânica à compressão de concretos nas idades de 1 a 3 dias. Essa afirmação é confirmada nos trabalhos de Ludwig (2014) e Zunino e Lopez (2014).

Duart (2008) ainda verificou, ao se comparar traços de concretos com e sem CCA, que no traço de referência, houve pouco ganho de resistência à compressão entre as idades de 28 e 91 dias, já nos traços com CCA, houve um ganho de até 20% nessa mesma faixa de idade para todas as relações água/ aglomerante (a/agl). Além disso, percebeu-se que a porosidade dos traços com CCA, medida através do volume intrudido de mercúrio, diminuiu consideravelmente conforme a relação a/agl diminuía, o que não foi verificado nos traços referência.

No Grupo de Estudos e Pesquisas em Concretos (GEPECON) da UFSM foram realizados alguns trabalhos e apontam as seguintes vantagens do uso da CCA: é possível atingir bons resultados em termos de resistência mecânica e durabilidade utilizando CCA tanto com ou sem moagem; a CCA com moagem melhora a resistência

à compressão, diminui a permeabilidade, a absorção de água e a resistência elétrica; (COPETTI, 2019; DUART, 2008; HOPPE, 2005; JÚNIOR, 2010; LIMA, 2018; ; TRINDADE, 2012).

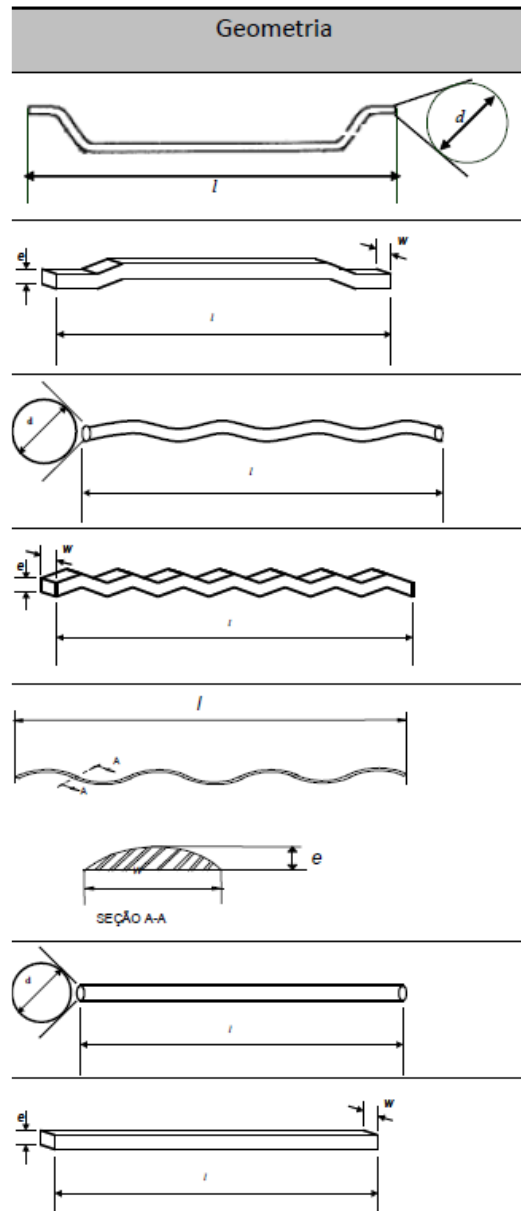
Por possuir área específica muito maior do que do grão de cimento, a CCA implica em um maior consumo de água na mistura do concreto, acarretando a diminuição da resistência. Isso pode ser corrigido adicionando aditivos superplastificantes, garantindo os benefícios ao concreto da utilização da CCA.

2.2 Concreto reforçado com fibras de aço

O concreto de cimento Portland é considerado um material compósito constituído principalmente pelos seguintes componentes: pasta de cimento, agregado graúdo e miúdo. Este possui um ótimo comportamento mecânico a tensões de compressão, sendo esse um dos fatores principais para a sua utilização na construção civil. Entretanto, a resistência do concreto a tensões de tração é muito inferior à de compressão, pois naturalmente o concreto já possui microfissuras, principalmente na zona de transição, e não é necessária muita energia para que se dê o aumento e a propagação dessas fissuras (GARCEZ, 2005; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Quando a estrutura de concreto está submetida à tração ou flexão, as tensões se acumulam nas extremidades das microfissuras, aumentando o seu tamanho, podendo culminar na ruptura frágil da estrutura. A adição de fibras à matriz cimentícia auxilia no desempenho quanto às tensões de tração, diminuindo o comportamento frágil do concreto. As fibras podem ser produzidas com diferentes materiais como, por exemplo, aço, aramida, vidro e polipropileno. Sendo que na construção civil as fibras de aço possuem maior destaque, e essas possuem diferentes geometrias, como mostrado na Figura 1 (FIGUEIREDO, 2011).

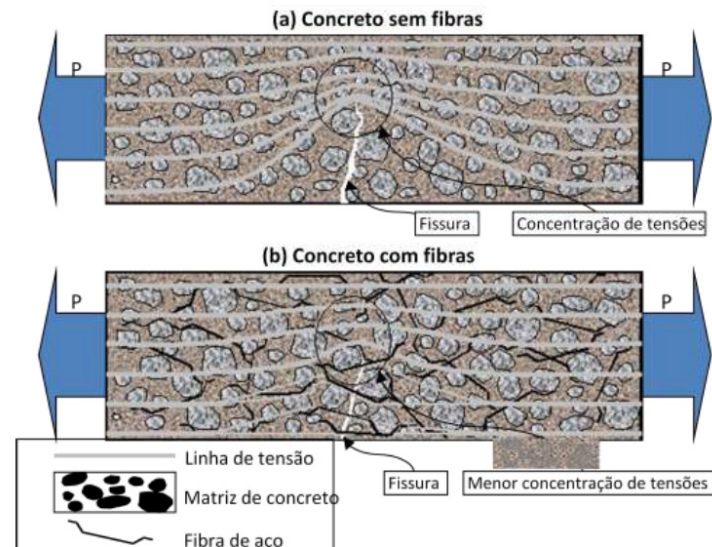
Figura 1 - Geometria de fibras de aço para reforço de concreto



Fonte: Adaptado Figueiredo, 2011.

As fibras costuram as fissuras e agem como pontes de transferência de tensões, diminuindo a concentração de tensões nas extremidades. Essas pontes de transferência fazem com que seja necessária uma quantidade maior de energia para que ocorra o aumento e a propagação de fissuras, concedendo um comportamento dúctil ao concreto (GARCEZ, 2005; FIGUEIREDO, 2011). O comportamento da fibra está exemplificado na Figura 2.

Figura 2 - Comportamento das linhas de tensões em concretos com e sem fibras



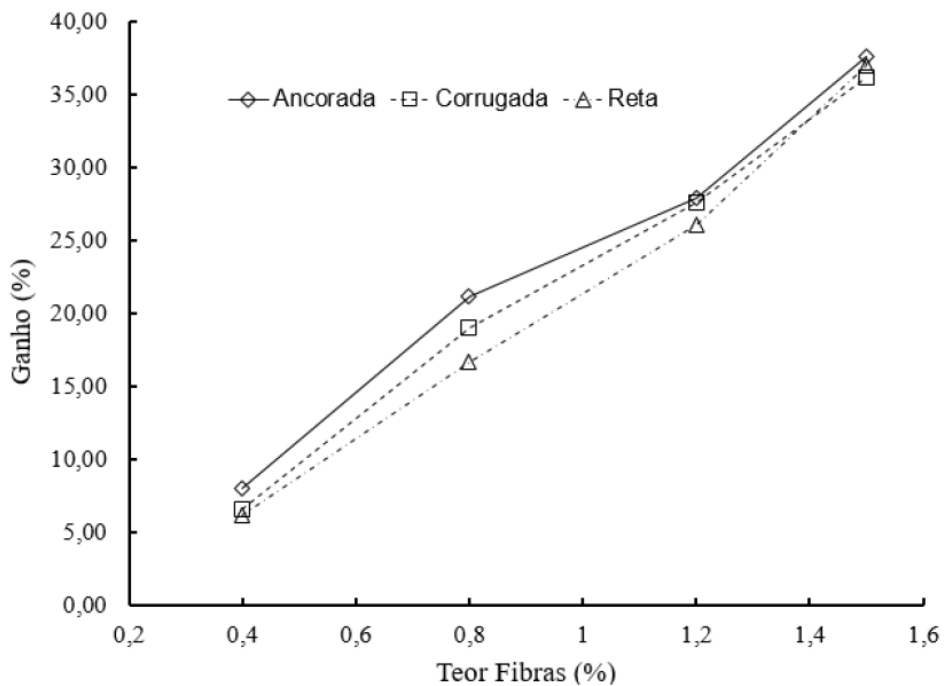
Fonte: Figueiredo, 2011.

As mudanças causadas pela adição de fibras de aço na microestrutura geram, por consequência, mudanças no comportamento da macroestrutura. Segundo Nunes e Agopyan (1998), diferente do concreto convencional, os concretos com adição de fibras resistem a tensões acima da resistência última do concreto e com deformações maiores.

Embora as fibras auxiliem consideravelmente com o aumento da ductibilidade do concreto e da resistência à tração, sua adição não modifica da mesma maneira outra propriedade importante do concreto, como sua resistência à compressão. A pouca interferência da adição da fibra de aço na resistência à compressão do concreto pode estar ligada a ação da fibra se dar após o início das fissurações; e o pequeno ganho de resistência à compressão é devido ao controle das fissuras (BENTUR e MINDESS, 2007; FIGUEIREDO, 2011; BRÁZ e NASCIMENTO, 2015; SHIMOSAKA, 2017)

Já para o módulo de elasticidade, ainda que seja inferior aos ganhos de resistência à tração, consegue-se obter resultados satisfatórios. Shimosaka (2017) em sua pesquisa observou um ganho de até 36,12% do módulo de elasticidade em comparação ao convencional, e associa esse aumento à combinação do concreto, o qual possui módulo de elasticidade em torno de 25 GPa, com a fibra que possui módulo de elasticidade de 200 GPa. Os resultados da pesquisa de Shimosaka (2017) quanto aos ganhos de módulo de elasticidade para cada tipo de fibra aos 7 dias estão expostos na Figura 3.

Figura 3 - Ganho de módulo de elasticidade aos 7 dias



Fonte: Adaptado Shimosaka, 2017.

Afroughsabet, Biolzi e Monteiro (2018) também observaram que a utilização de fibras de aço acarreta no aumento do módulo de elasticidade do concreto, sendo o aumento proporcional aos teores de fibras incorporados. Para o teor de adição de fibras de 1% o concreto apresentou 10,32% de ganho de módulo em relação ao concreto de referência aos 28 dias.

2.3 O comportamento do concreto em altas temperaturas

Quando se projeta uma estrutura, a segurança humana é uma das principais preocupações, por isso devem ser consideradas todas as possíveis situações em que a estrutura estará submetida, mesmo as excepcionais, como é o caso da ocorrência de um incêndio. Diferentemente da madeira e do aço, o concreto possui melhor comportamento em altas temperaturas. Seu melhor desempenho se deve pelo material não ser combustível, não liberar gases tóxicos, possuir baixa condutibilidade térmica, e mesmo após ser submetido a temperaturas entre 700°C e 800°C, conservar resistência suficiente por períodos razoavelmente longos, permitindo operações de resgate com redução do risco de colapso estrutural (COSTA, 2008; MEHTA e

MONTEIRO, 2014).

A análise do concreto aquecido é complexa, pois é um compósito constituído de diferentes fases, com diferentes comportamentos. Hager (2013) e Qianmin et al. (2015) apontam que a resistência de concretos aquecidos está relacionada à composição dos agregados utilizados na mistura, relação a/agl, presença de pozolanas, adição de fibras, taxa de aquecimento, e ao tempo de exposição.

O aumento da temperatura promove a evaporação da água, a desidratação do C-S-H, a degradação dos outros produtos provenientes da hidratação do cimento, e alterações no agregado. Devido às modificações mencionadas, as propriedades mecânicas do concreto também são alteradas, principalmente, a resistência mecânica e o módulo de elasticidade. Almeida (2017) aborda sucintamente na Tabela 1 o que ocorre na microestrutura do concreto convencional conforme o aumento da temperatura.

Tabela 1 -Principais modificações físico-químicas que ocorrem no concreto devido ao aumento da temperatura

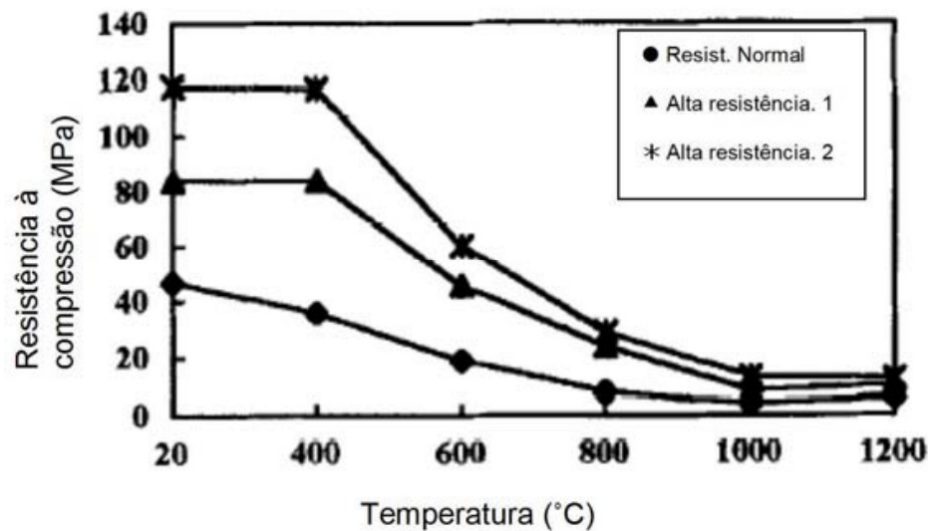
Temperatura (°C)	Transformações físico-químicas
Até 100	Evaporação da água livre e aumento da permeabilidade
100 a 300	Início da evaporação da água quimicamente combinada e da desidratação do C-S-H
A partir de 200	Retração da pasta de cimento
A partir de 300	Aumento acentuado da porosidade e microfissuras
400 a 550	Decomposição do CH: $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
570	Expansão dos agregados silicosos
600 a 800	Decomposição do C-S-H com formação de $\beta\text{-C}_2\text{S}$ e descarbonatação do agregado calcário
780	Recristalização das partículas de cimento não hidratadas
800 a 1000	Perda total da água quimicamente combinada. Decomposição da calcita.
1100 a 1200	Derretimento do concreto

Fonte: Adaptado Almeida, 2017.

2.3.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto tende a decrescer com o aumento da temperatura (LIMA, 2005). A redução da resistência de concretos com resistência convencional e de alta resistência está exemplificado na Figura 4.

Figura 4 - Redução da resistência à compressão com o aumento da temperatura

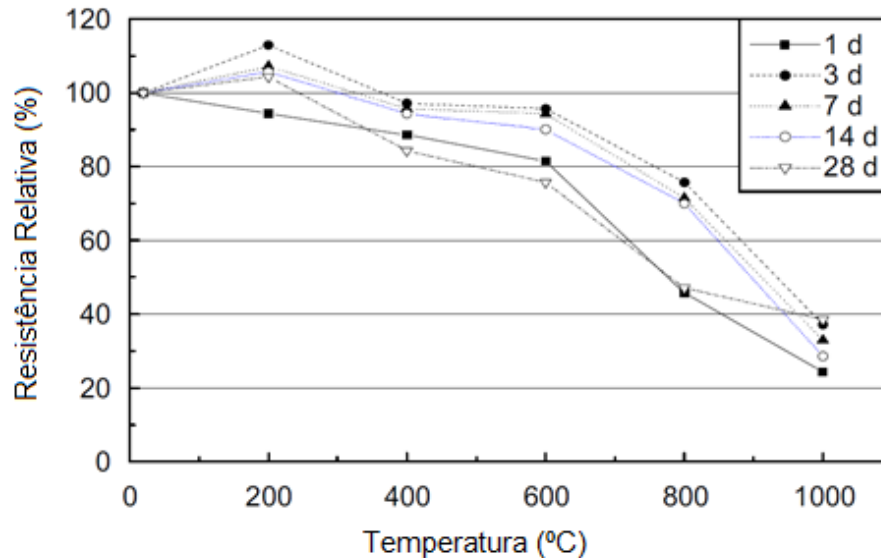


Fonte: Chan, Peng e Anson, 1999 apud Fonseca, 2010.

Segundo Guo e Shi (2011) durante o aquecimento os componentes do concreto sofrem uma série de reações químicas e físicas. Quando é atingida a temperatura de 100°C, a água livre evapora gradualmente, há surgimento de fissuras capilares e começa a aumentar a porosidade do concreto. As tensões provocadas pelo acúmulo de vapor de água nos poros aumentam, se concentrando nas extremidades das fissuras, aumentando-as e propagando-as. Com isso, a resistência do concreto é reduzida levemente.

Entre 200°C e 300°C, toda a água livre já se evaporou. Em razão da argamassa e do agregado gráudo possuírem diferentes coeficientes de dilatação térmica, são geradas fissuras em torno do agregado gráudo, causando a diminuição da resistência (GUO e SHI, 2011). Nesta faixa de temperatura é evidenciado em alguns casos um incremento de resistência, é acreditado que isto ocorre devido à liberação da água combinada do gel de cimento, que aumenta as forças de atração entre as camadas de C-S-H ou ao endurecimento do gel de cimento (CASTILHO e DURRANI, 1990; GUO e SHI, 2011). A amplitude de ganho de resistência é variável e depende das propriedades dos materiais utilizados e dos traços. A temperatura em que a resistência começa a elevar depende da porosidade do concreto, tendendo ser em temperaturas maiores para concretos com baixa porosidade. Este comportamento pode ser observado nas pesquisas de Lima (2005), Chen, Li e Chen (2009), Kirchof (2010). Os resultados de Chen, Li e Chen (2009) estão expostos na Figura 5.

Figura 5 - Resistência à compressão de concretos de diferentes idades após serem aquecidos



Fonte: Adaptado Chen, Li e Chen, 2009.

Acima de 400°C, as fissuras entorno do agregado graúdo crescem e se expandem. Enquanto isso, a água presente nos produtos de hidratação é liberada com aumento de volume, fazendo com que as fissuras se expandam mais ainda e diminuem a resistência do concreto mais rapidamente (GUO e SHI, 2011). Lau (2003) e Lima (2005) citam que a partir dessa temperatura são observados os maiores decréscimos de resistência no concreto. Porém, Lorenzon (2014) ressalta que as perdas mais consideráveis são observadas entre 500°C e 600°C, pois nessa faixa de temperatura, há a dissociação do C-S-H, que é o responsável por manter a pasta de cimento unida, em CaOH e água, diminuindo as ligações químicas e as forças de *Van der Waals*. Além de haver expansão súbita dos agregados silicosos em temperaturas próximas de 570°C, causada pela transformação de fase α para β do quartzo (NEVILLE, 2015).

Em temperaturas superiores a 600°C, compostos de quartzo com grande volume são formados a partir de partículas de cimento desidratado e dos agregados decompostos. Fissuras começam a surgir no interior do agregado, e a resistência do concreto decresce violentamente (GUO e SHI, 2011). A norma brasileira NBR 15200 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio (ABNT, 2012) prevê fatores de redução para a resistência à compressão de concretos com agregados,

principalmente silícicos, e de massa específica normal. Os valores estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores de redução da resistência à compressão conforme a norma brasileira NBR 15200 (ABNT, 2012)

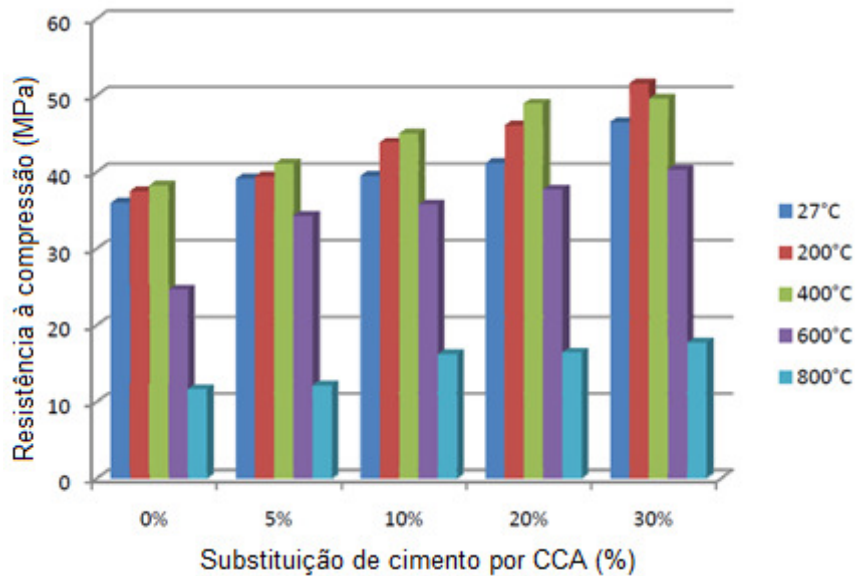
Temperatura (°C)	$f_{c, \theta} / f_{ck}$
20	1
100	1
200	0,95
300	0,85
400	0,75
500	0,60
600	0,45
700	0,30
800	0,15
900	0,08

Fonte: adaptado NBR 15200, 2012.

Os materiais que compõem o concreto influenciam na resistência pós aquecimento, pois são degradados com o calor. Além disso, a permeabilidade do concreto e a taxa de aquecimento também são influentes, pois estão diretamente ligados à dissipação das pressões internas ocasionadas pelos gases oriundos das decomposições dos produtos hidratados do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

As adições minerais, embora que ainda sejam pouco pesquisadas, tem-se mostrado fatores importantes para a resistência de concretos em altas temperaturas. Concretos que tiveram reações pozolânicas possuem maior quantidade de gel de C-S-H do que concretos convencionais. Isso faz com que, quando aquecido, há maior quantidade liberada em forma de vapor. Como esses concretos possuem menor permeabilidade, há uma concentração de tensões, devida às poro-pressões, principalmente na zona de transição, gerando maior degradação da resistência mecânica e módulo de elasticidade do concreto (BERTZ, 2000 apud ALMEIDA, 2017). Entretanto, Majindi (2011) observou que concretos com adição de CCA obtiveram melhores resultados de resistência à compressão em relação ao concreto de referência. Segundo o autor, o melhor desempenho pode estar ligado ao fato de haverem novas reações pozolânicas durante o aquecimento. Seus resultados estão expostos na Figura 6.

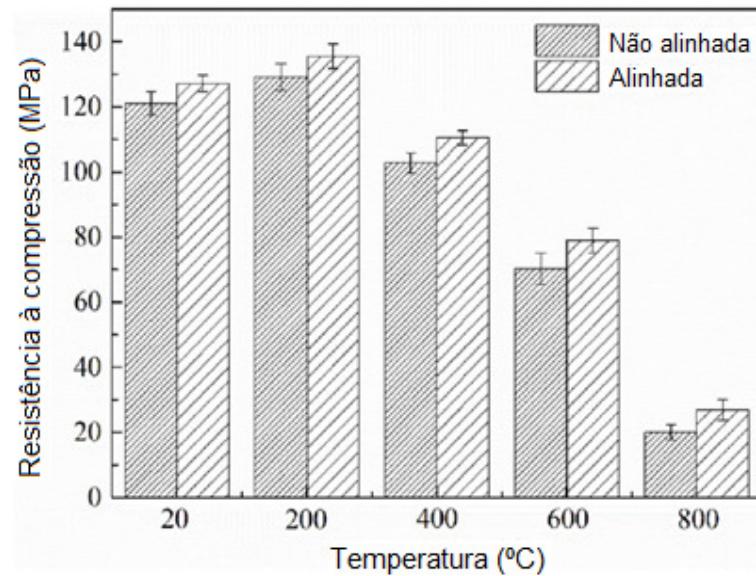
Figura 6 - Resistência à compressão de concretos com substituição de cimento por CCA em diferentes temperaturas



Fonte: Adaptado Majidi, 2011.

Assim como em temperatura ambiente, a presença de fibras na matriz cimentícia apresenta pouca melhoria na resistência residual para concretos expostos a altas temperaturas. Purkiss (1984) afirma que essa pequena melhoria é observada até a temperatura de 600°C e, para temperaturas mais elevadas, o comportamento é semelhante ao concreto sem fibras. Entretanto, Huang, Wang e Gao (2019) observaram que se pode melhorar os resultados da adição de fibras ao induzir uma direção preferencial. Os autores utilizaram 2% em volume de fibras de aço com 13 mm de comprimento e 0,22 mm de diâmetro, relação a/agl de 0,22 e superplastificante com base de polycarboxilato. Para o direcionamento das fibras, foi utilizado um aparato que auxiliava a controlar do fluxo de concreto na preparação dos corpos de prova. E seus resultados estão expostos na Figura 7.

Figura 7 - Resistência à compressão de concretos com fibra de aço

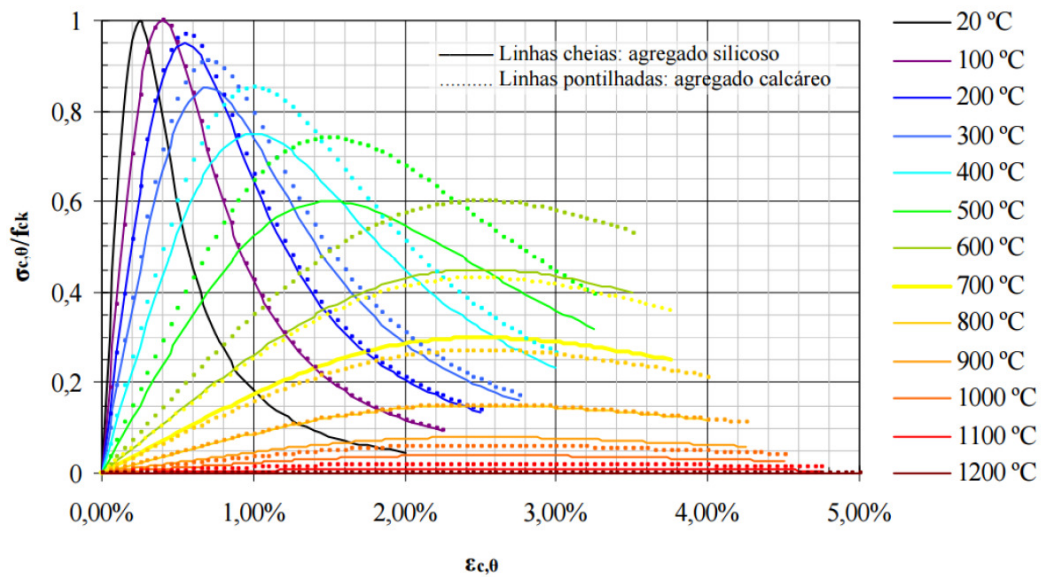


Fonte: Adaptado Huang, Wang e Gao, 2019.

2.3.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade pode ser definido como sendo a razão entre a tensão aplicada e a deformação instantânea apresentada pelo material (ALMEIDA, 2017). É comumente utilizado como parâmetro para a identificação da rigidez do concreto. Assim como a resistência à compressão, o módulo de elasticidade é influenciado pelo aquecimento, porém de maneira mais acentuada. Na Figura 8 está apresentada a relação tensão deformação de concretos convencionais com agregados sílicos e calcários, proposta pela norma europeia Eurocode 2 – “*Design of concrete structures – Part 1-2 – General rules: Structural fire design*” (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004).

Figura 8 - Relação tensão-deformação de concretos convencionais em função do aumento de temperatura



Fonte: Costa, 2008 apud Almeida (2017).

A redução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura se deve principalmente pelas fissuras que surgem na zona de transição entre o agregado gráúdo e a pasta de cimento, sendo os concretos convencionais mais susceptíveis ao surgimento de fissuras, além da desintegração dos produtos de cimento hidratados e a quebra das ligações químicas na microestrutura da pasta de cimento. A intensidade da redução é influenciada pelo módulo de elasticidade inicial, pelo tipo de agregado e pela taxa de aquecimento (SCHNEIDER, 1988 apud SANTOS, 2012; WENDT, 2006; KODUR, 2014; XIE et al., 2019).

Outro fator importante é o tipo de concreto utilizado, sendo que até 400°C, a classe de resistência do concreto é fator importante a ser considerada para o módulo de elasticidade, visto que quanto maior a sua resistência, melhor o seu comportamento após o aquecimento. No entanto, para temperaturas acima de 400°C, a resistência inicial dos concretos pouco influencia, já que a variação do módulo de elasticidade acontece de maneira parecida entre os diferentes tipos de concretos (BAMONTE e GAMBAROVA, 2007 apud SANTOS, 2012).

Majidi (2011) observou que a adição de CCA melhorou o módulo de elasticidade do concreto após o aquecimento. Utilizando 5, 10, 20 e 30% de substituição de cimento Portland por CCA, todos os traços contendo CCA obtiveram resultados de módulo acima do concreto de referência, sendo a taxa de 20% de

substituição a que apresentou melhor desempenho entre todas.

Almeida (2017) observou que, após o aquecimento, o concreto em que foi utilizado CCA amorfa apresentou redução no módulo de elasticidade parecida com o concreto de referência. E o concreto com CCA cristalina apresentou desempenho inferior ao concreto com CCA amorfa e ao de referência.

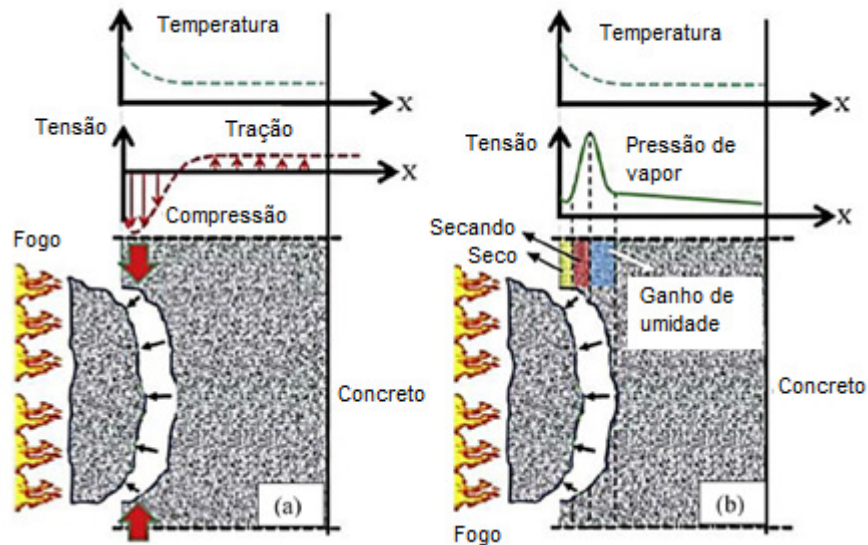
Diferente da resistência à compressão, a adição da fibra não é significativa para o módulo de elasticidade do concreto. Lau e Anson (2006) testaram o efeito da adição 1% de fibras de aço em concretos de alta resistência e de resistência convencional após serem submetidos ao aquecimento. Foi constatado que os concretos de alta resistência apresentaram desempenho superior ao de resistência convencional, e a adição de fibras pouco influenciou no módulo de elasticidade.

2.3.3 O *spalling*

Ao serem expostas ao incêndio, as estruturas de concreto podem apresentar a ocorrência de um fenômeno, conhecido como *spalling*, que afeta a sua integridade, comprometendo, especialmente, as armaduras, o que pode causar o colapso parcial ou total da estrutura (MEMON et al., 2019). O teor de umidade, a porosidade e distribuição dos poros, a resistência do concreto, tipo de agregado e a taxa de aquecimento, são as principais causas do *spalling* (COSTA, FIGUEIREDO e SILVA, 2002; KIRCHHOF, 2010; MEMON et al., 2019).

O *spalling* pode ocorrer por poropressões e/ou tensões térmicas. As poropressões surgem quando água interna do concreto aquece e se torna vapor, tendendo a migrar das regiões internas do concreto para o exterior. A vaporização da água gera poropressão na estrutura do concreto. E se a taxa de aquecimento e a estruturas dos poros é suficientemente densa, a migração do vapor de água não ocorrerá de maneira suficientemente rápida. Isso causará tensões nos poros elevadas, e quando superada a resistência à tração do concreto, há a ocorrência do *spalling* (MEMON et al., 2019; MAIER, ZEIML e LACKNER, 2020). Já as tensões térmicas surgem quando a temperatura na superfície do concreto aumenta, há tensões de compressão paralelas a superfície aquecida, simultaneamente surgem tensões de tração perpendiculares a ela. Essa combinação de tensões acarreta no *spalling* quando supera a resistência à tração do concreto (MAIER, ZEIML e LACKNER, 2019). Esses mecanismos estão ilustrados na Figura 9.

Figura 9- Mecanismos de ocorrência do spalling no concreto (a) Tensões térmicas (b) Poro-pressão



Fonte: Maier, Zeiml e Lackner, 2019.

Muitas pesquisas têm apontado o uso de fibras, de polipropileno e de aço, como solução para a prevenção do aparecimento do *spalling*. A fibra de polipropileno é um polímero termoplástico que se funde ao atingir em torno de 160°C, diminuindo drasticamente de tamanho, o que auxilia na interligação dos poros do concreto e, por consequência, acaba aliviando as poro-pressões. Já a fibra de aço auxilia reduzindo a formação e propagação de microfissuras causadas pelas tensões térmicas (CASTELLOTE (2003), apud LIMA, 2005; ANUMALA e SHARMA, 2011).

Segundo Connoly (1995, apud Kirchhof, 2010), o *spalling* pode ser classificado em quatro categorias, e elas:

- Lascamento do agregado ou *aggregate spalling*;
- Quebra das extremidades ou *corner spalling*;
- Formação de sulcos na superfície ou *surface spalling* ou *surface pitting*;
- Lascamento explosivo ou *explosive spalling*.

Para Purkins (2007), o *spalling* pode ocorrer de duas maneiras: *sloughing* e *spalling* explosivo. O *sloughing* é o desprendimento de uma porção considerável de concreto e de grande superfície, deixando novas camadas de concreto expostas à exposição a altas temperaturas, podendo ocorrer o fenômeno novamente. Já o *spalling* explosivo é a perda parcial de material, com grande liberação de energia, formando grandes cavidades (SOUZA, 2014).

Khoury (1992, apud ALMEIDA, 2017) aponta que taxas de aquecimento

superiores a 10°C/min favorecem a ocorrência de *spalling* no concreto.

Almeida (2017) afirma que, por possuir maior quantidade de gel de C-S-H, em concretos com CCA, há maior liberação de vapor de água quando aquecido acima de 150°C do que em concretos convencionais. Ainda, por possuir menor porosidade, há maiores tensões internas na pasta de cimento, gerando fissurações. O que de fato foi observado em sua pesquisa, visto que o autor utilizou CCA amorfa e taxa de aquecimento de 27,4°C/min. O concreto com CCA amorfa obteve menor resistência residual do que o concreto de referência, e foi evidenciado *spalling* na superfície do corpo de prova.

Anumala e Sharma (2011) observaram, que em concretos convencionais, o início das primeiras fissurações ocorreram em 400°C. Entre 400°C e 600°C, as fissuras aumentaram, e o *spalling* foi evidenciado em 800°C. Para os concretos com fibra de aço, o início do aparecimento de fissuras aconteceu na temperatura de 600°C, e não se evidenciando a ocorrência do fenômeno.

Deshpande, Kumar e Ranade (2019) utilizaram de forma híbrida, fibras de aço e de álcool polivinílico (PVA). Os concretos com as fibras mantiveram quase toda sua resistência inicial até a temperatura de 400°C, devido às fibras resistirem as fissurações e ao *spalling*.

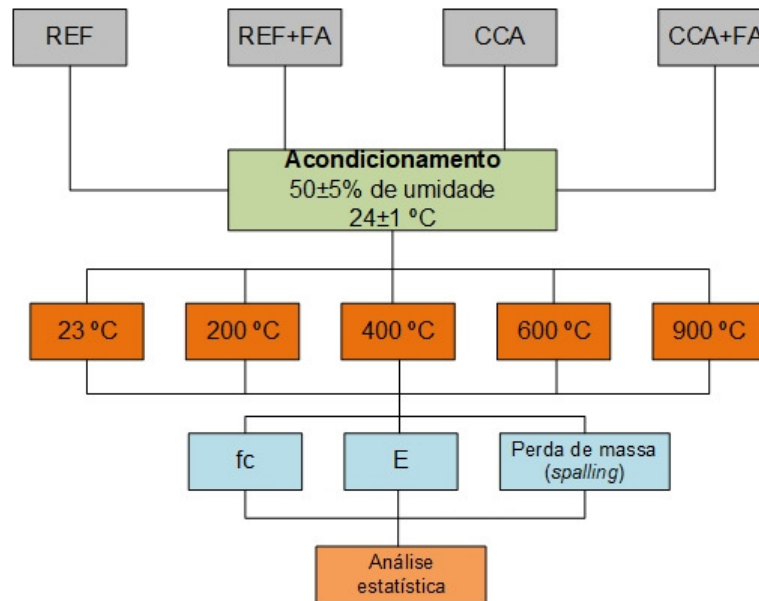
3 MATERIAIS E METODOLOGIA

Neste capítulo, serão detalhados os materiais utilizados na pesquisa e as atividades desenvolvidas no programa experimental proposto. Salienta-se que toda a preparação, moldagem e o acondicionamento das amostras, bem como a execução dos ensaios foram desenvolvidos e realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), da Universidade Federal de Santa Maria, na cidade de Santa Maria – RS.

Para responder os objetivos propostos, a Figura 10 apresenta um fluxograma geral das atividades desenvolvidas no programa experimental.

Para tanto, foram utilizados quatro traços, baseados na pesquisa de Silva (2019), e são eles: referência (REF), 25% de substituição de cimento Portland por CCA (CCA), referência com adição fibras de aço (REF+FA) e 25% de substituição de cimento Portland por CCA com adição de fibras de aço (CCA+FA). Após moldados, os corpos de prova de cada traço foram mantidos por 7 dias em cura submersa, e então foram acondicionados até a idade de 91 dias em câmara climatizada, mantendo a umidade em $50\pm 5\%$ e temperatura em $24\pm 1^\circ\text{C}$. Ao fim do acondicionamento, os corpos de prova foram aquecidos a uma taxa de $1^\circ\text{C}/\text{min}$ até atingirem os patamares de temperatura de 200°C , 400°C , 600°C e 900°C , onde permaneceram por 1 hora. E por fim foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, verificação da perda de massa dos corpos de prova e análise estatística dos dados obtidos no programa experimental.

Figura 10 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Autor, 2019.

3.1 Materiais

3.1.1 Aglomerantes

O cimento utilizado foi o cimento Portland CPV – ARI, de alta resistência inicial. Este foi escolhido por apresentar o menor teor de filer e não possuir adição de pozolanas disponível no mercado regional.

A cinza de casca de arroz (CCA) utilizada é proveniente de processo industrial de combustão com queima sem controle de temperatura, de uma indústria da cidade de Santa Maria – RS. A CCA foi moída no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), da UFSM, em moinho de bolas por 60 minutos.

Silva (2019) realizou os seguintes ensaios de caracterização dos aglomerantes:

- Massa específica (NBR 16605, 2017);
- Finura por peneiramento (NBR 11579, 2013);
- Composição química (ABCP, LAPAM);
- Difração de raios-x (ABCP, LAPAM);
- Determinação da água de consistência normal (NBR 16606, 2018);
- Determinação do início e fim de pega pelo aparelho de Vicat (NBR 16607, 2018);

- Resistência à compressão axial com argamassa normal a 3, 7 e 28 dias (NBR 7215, 2019);
- Superfície específica BET (LAPAM, LACER);
- Índice de desempenho da CCA com cimento Portland (IAP) (NBR 5752, 2014).

Os resultados de caracterização dos aglomerantes serão apresentados a seguir:

3.1.1.1 Cimento

A Tabela 3 e 4 apresentam, respectivamente, a composição química e perda ao fogo e as características físicas do cimento do cimento CPV-ARI.

Tabela 3 - Composição química e perda ao fogo do cimento CPV-ARI

Composição química	Teor em massa (%)
Óxido de Cálcio (CaO)	60,18
Dióxido de Silício (SiO ₂)	19,89
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	4,87
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	2,83
Anidrido Sulfúrico (SO ₃)	3,45
Óxido de Magnésio (MgO)	3,40
Óxido de Potássio (K ₂ O)	1,04
Óxido de Titânio (TiO ₂)	0,30
Óxido de Estrôncio (SrO)	0,22
Anidrido Fosfórico (P ₂ O ₅)	0,16
Óxido de Manganês (Mn)	0,04
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	-
Perda ao fogo (PF)	3,98

Fonte: Silva (2019), adaptado Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2019.

Tabela 4 - Características físicas do cimento CPV-ARI

Características físicas	CPV-ARI	
Massa específica (g/cm ³)	3,03	
Material retido na peneira # 75 µm (%)	0,54	
Início de pega (h)	3h:25min	
Fim de pega (h)	4h:15min	
Consistência normal (%)	30,40	
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	36,7 MPa
	7 dias	46,8 MPa
	28 dias	53,3 MPa

Fonte: Adaptado Silva, 2019.

3.1.1.2 Cinza de casca de arroz

Para a caracterização da CCA, foram realizados os ensaios de composição química, difração de raios-x, superfície específica BET e índice de desempenho com cimento Portland.

A composição química e a perda ao fogo da CCA se encontram na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química e perda ao fogo da cinza de casca de arroz

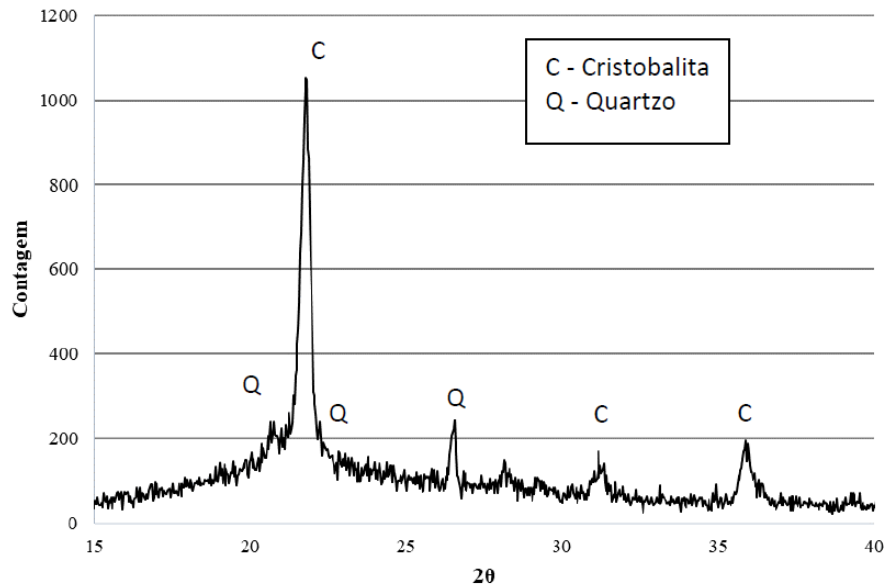
Composição química	Teor em massa (%)
Óxido de Cálcio (CaO)	2,19
Dióxido de Silício (SiO ₂)	87,72
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	0,46
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	0,41
Anidrido Sulfúrico (SO ₃)	0,01
Óxido de Magnésio (MgO)	0,53
Óxido de Potássio (K ₂ O)	1,60
Óxido de Titânio (TiO ₂)	-
Óxido de Estrôncio (SrO)	-
Anidrido Fosfórico (P ₂ O ₅)	-
Óxido de Manganês (Mn)	-
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	0,04
Perda ao fogo (PF)	4,96

Fonte: Silva (2019), adaptado Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2019.

Pode-se observar, pelos resultados obtidos na Tabela 5, que a CCA atende os requisitos da norma brasileira NBR 12653: Materiais pozolânicos — Requisitos (ABNT, 2014), e é classificada como pozolana Classe E.

Na Figura 11, está apresentado o difratograma da cinza de casca de arroz, no qual foi possível perceber poucos picos cristalinos de cristobalita, concluindo-se que se trata de CCA predominantemente amorfa, e que a queima foi realizada sem controle de temperatura.

Figura 11 - Difratoograma da cinza de casca de arroz



Fonte: Silva, 2019.

As características físicas da CCA estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Características físicas da CCA

Características físicas	CCA
Massa específicas (g/cm ³)	2,07
Material retido na peneira # 75 μm (%)	0,18
Superfície específica BET (m ² /g)	21,38
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (IAP) (%)	95,77

Fonte: Silva, 2019.

A CCA apresenta elevado valor de superfície específica, como mostrado na Tabela 6, isto se deve ao fato de a estrutura interna ser altamente porosa e com múltiplos vazios. Devido ao elevado valor de superfície específica, a incorporação de CCA no concreto demandou a necessidade de ser adicionado aditivo superplastificante para manter a mesma razão a/agl e mesmo abatimento.

3.1.2 Agregados

A areia média ($D_{máx} \leq 2,4$ mm) foi utilizada como agregado miúdo, provinda de jazida do areal de Santa Maria – RS, e esta atendeu os requisitos estabelecidos pela norma brasileira NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação (ABNT,

2009).

Como agregado graúdo, utilizou-se rocha britada de origem diabásica, fornecida pela pedreira Brita Pinhal, localizada na cidade de Itaara – RS. O agregado graúdo foi classificado como brita 0 ($D_{m\acute{a}x} \leq 12,5$ mm). Assim como o agregado miúdo, o agregado graúdo atendeu os requisitos da norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

Para a caracterização dos agregados, foram realizados os seguintes ensaios:

- a) Composição granulométrica (NM 248, 2001);
- b) Determinação da massa específica e da massa aparente do agregado miúdo (NM 52, 2009);
- c) Determinação da massa específica e massa aparente do agregado graúdo (NBR NM 53, 2009);
- d) Determinação da massa unitária e massa aparente do agregado graúdo (NBR NM 45, 2006);
- e) Abrasão Los Angeles do agregado graúdo (NBR NM 51, 2001);
- f) Absorção de água do agregado miúdo (NBR NM 30, 2001);
- g) Absorção de água do agregado graúdo (NBR NM 53, 2009);
- h) Índice de forma do agregado graúdo (NBR 7809).

Na Tabela 7, são apresentadas as características físicas dos agregados miúdos e graúdos.

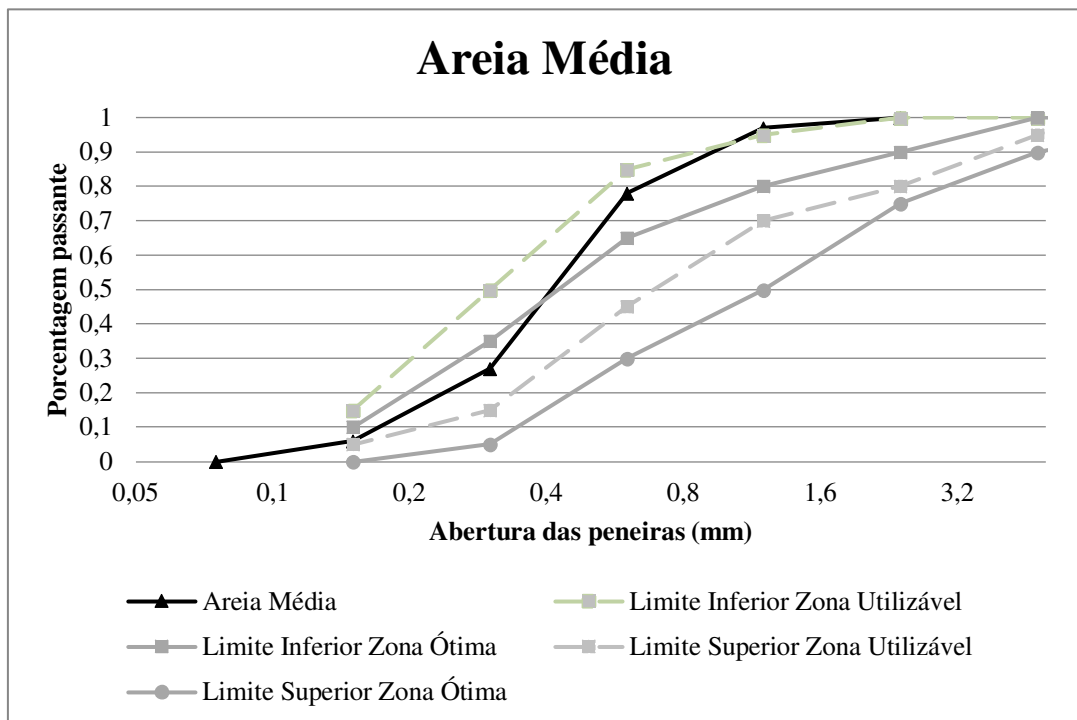
Tabela 7 - Características físicas dos agregados miúdos e graúdos

Propriedades	Areia média	Brita 0
Módulo de finura	1,92	3,23
Diâmetro máximo característico (mm)	1,20	9,50
Massa específica (g/cm ³)	2,62	2,46
Massa aparente (g/m ³)	2,61	3,36
Massa unitária (g/cm ³)	1656,76	1,22
Volume de vazios (%)	36,76	50,40
Perda de massa por abrasão Los Angeles (%)	-	11,07
Índice de forma	-	2,09
Absorção de água (%)	0,33	3,17

Fonte: Adaptado Silva, 2019.

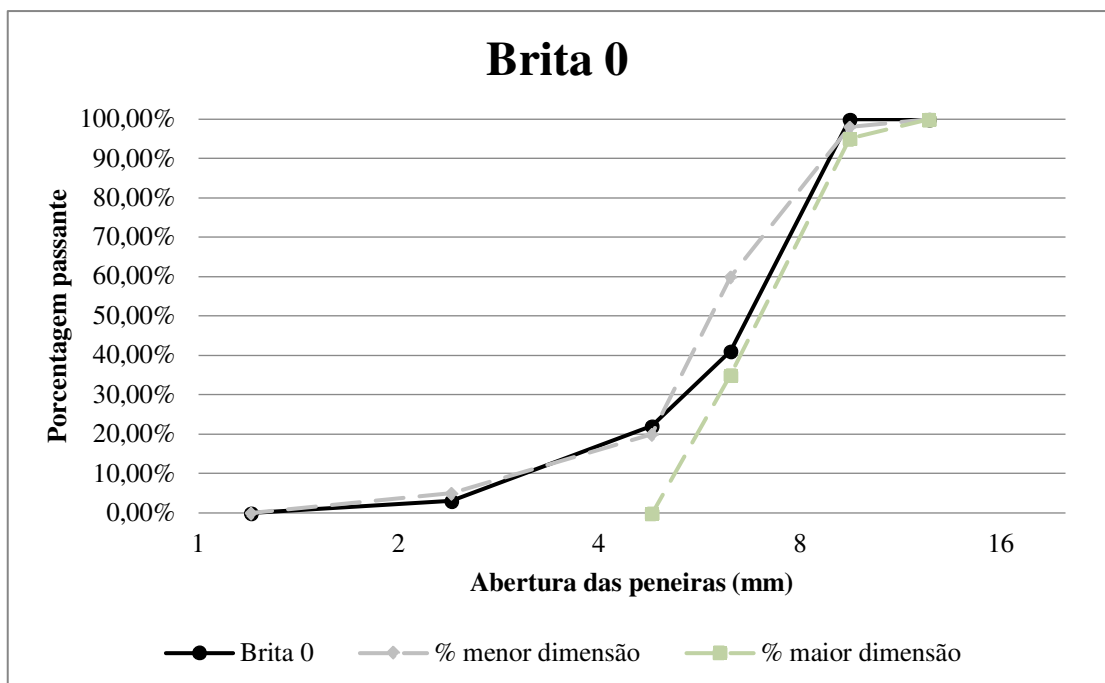
A composição granulométrica do agregado miúdo e do agregado graúdo estão apresentados nas Figuras 12 e 13, respectivamente.

Figura 12 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Adaptado Silva, 2019.

Figura 13 - Curva granulometria do agregado graúdo



Fonte: Silva, 2019.

A distribuição granulométrica do agregado miúdo se encontra dentro dos limites da norma brasileira NBR 7211 (2009). As características do agregado graúdo utilizado

são satisfatórias, já que o índice de forma não deve ser superior a 3, e o índice de desgaste por abrasão Los Angeles deve ser inferior a 50% em massa do material.

3.1.3 Aditivo

Foi utilizado o aditivo superplastificante a base de policarboxilato, da marca *Tec Flow 8000*[®], produzido pela empresa *Grace Construction Products*[®].

3.1.4 Fibra de aço

Foram utilizadas fibras de aço de baixo carbono, com resistência à tração de 1.100 N/mm², e com as seguintes dimensões: 0,75 mm (diâmetro) x 60 mm (comprimento). A fibra utilizada está apresentada na Figura 14.

Figura 14 - Fibra de aço utilizada



Fonte: Autor, 2019.

3.1.5 Água

A água utilizada foi potável, disponibilizada pela rede de abastecimento do campus da UFSM.

3.2 Etapas da pesquisa

3.2.1 Traços utilizados

Os traços utilizados para o concreto de referência e para o concreto com incorporação de CCA, foram os mesmos utilizados por Silva (2019) em seus ensaios preliminares. A escolha se teve por dois motivos: o resultado obtido com o traço foi satisfatório, pois obteve-se resistência a compressão axial acima de 40 MPa, indicando que houve um possível refinamento dos poros, e a disponibilidade no laboratório dos mesmos materiais utilizados em sua pesquisa.

Não foi realizada a dosagem do teor ideal de fibras de aço, optando-se, então, por seguir a recomendação do fabricante, que é a utilização de 10 kg/m³.

Os traços foram previamente testados com o intuito de verificar a trabalhabilidade e a quantidade necessária de aditivo superplastificante para os traços com adição de fibra de aço. Dessa forma, os traços unitários utilizados neste trabalho se encontram na Tabela 8 e o consumo de materiais por m³ de concreto está apresentado na Tabela 9.

Tabela 8 - Traços unitários

Traços	Cimento	CCA	Areia Média	Brita 0	Água	Superplastificante
REF	1	0	1,893	2,291	0,45	0,175%
REF+FA	1	0	1,893	2,291	0,45	0,420%
CCA	0,75	0,25	1,893	2,291	0,45	0,300%
CCA+FA	0,75	0,25	1,893	2,291	0,45	0,420%

Fonte: Autor, adaptado Silva, 2019.

Tabela 9 - Consumo de materiais

							(Continua)
Traços	Cimento (kg/m ³)	CCA (kg/m ³)	Areia Média (kg/m ³)	Brita 0 (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Fibra de aço (kg/m ³)	Superplastificante (kg/m ³)
REF	504,40	0	954,93	1155,71	227,22	0	0,883
REF+FA	504,40	0	954,93	1155,71	227,22	10	1,158

							(Conclusão)
CCA	378,05	126,34	954,93	1155,71	227,22	0	1,134
CCA +FA	378,05	126,34	954,93	1155,71	227,22	10	1,588

Fonte: Autor, adaptado Silva, 2019.

3.2.2 Preparação, moldagem e cura dos corpos de prova

A mistura do concreto foi realizada com a utilização de uma betoneira de eixo inclinado (Figura 15). A ordem de colocação dos materiais na betoneira se deu da seguinte forma: agregado graúdo, metade da água, aglomerante, agregado miúdo e, por último, o restante da água. O controle da consistência do concreto foi por meio do teste de abatimento de tronco de cone, realizado conforme a NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT,1998). Todos os traços utilizaram a mesma relação a/agl de 0,45, e em todos os traços foi necessária a utilização de aditivo superplastificante para atingir o abatimento de 100 ± 10 mm.

Figura 15 - Betoneira de eixo inclinado



Fonte: Autor, 2019.

Foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm para cada

traço, e cada traço foi replicado 5 vezes devido aos patamares de temperatura dos ensaios, totalizando 80 corpos de prova. O concreto foi adensado nos moldes em duas camadas, em mesa vibratória.

Os corpos de prova foram mantidos por 24 horas nos moldes e cobertos por plástico (Figura 16), para não perderem a umidade. Após este período, foram retirados dos moldes e postos em tanque com água e cal para a realização da cura.

Figura 16 - Acondicionamento dos corpos de prova após moldagem



Fonte: Autor, 2019.

Após 7 dias de cura submersa, os corpos de prova foram secos e acondicionados em ambiente controlado, em câmara climática automatizada da marca Caron®, para a estabilidade da umidade interna dos corpos de prova, até a idade de realização dos ensaios. A umidade e temperatura na câmara controlada foram, respectivamente, $50\pm 5\%$ e $23\pm 1^\circ\text{C}$, seguindo o recomendado pela norma europeia RILEM TC 129-MHT: *Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures* (RILEM Technical Committee, 2004). A idade para a realização dos ensaios foi de 91 dias, pois para Mehta e Monteiro (2014), a resistência mecânica de concretos com adição de pozolanas se mostra estável após 90 dias, podendo as reações químicas interferirem na resistência à compressão antes disso.

3.2.3 Perda de massa

Para saber o quanto de massa os corpos de prova perderam, inclusive a perda de massa relacionada ao *spalling*, cada corpo de prova de cada traço foi pesado antes e depois de ser exposto a altas temperaturas, e verificada a diferença entre as duas pesagens. Todas as pesagens ocorreram em uma balança eletrônica com precisão de 0,01 g.

3.2.4 Exposição às altas temperaturas

Aos 91 dias, os corpos de prova tiveram suas menores faces retificadas e, então, foram expostos aos seguintes patamares de temperatura: 200°C, 400°C, 600°C e 900°C, comumente utilizadas na literatura.

Os corpos de prova foram dispostos espalhados uniformemente dentro da caixa metálica de proteção, com o intuito de não se causar danos internos no forno, em razão da ocorrência de *spalling* (Figura 17).

Figura 17 - Caixa de proteção



Fonte: Autor, 2019.

O aquecimento foi realizado em forno elétrico industrial, modelo Sanchis (Figura 18), sem aplicação de carga simultânea. A taxa de aquecimento foi de 1°C/min, conforme recomendação da norma europeia RILEM TC 129-MHT (2004), para corpos de prova com diâmetro de 100 mm. A norma também instrui que, ao atingir-se o patamar de temperatura de ensaio, se mantenha a temperatura por 60 minutos para uniformizar a temperatura por todo o corpo de prova. A temperatura foi controlada por termopares e o registro das temperaturas foi através de um módulo de registro (*field logger*) da marca Novus®.

Figura 18 - Forno industrial



Fonte: Sanchis Fornos Industriais, Disponível em: <http://www.sanchis.com.br/index.php/produtos/mufla-37> . Acesso em: 20 nov. 2019.

Após o fim do ensaio, a porta do forno foi aberta, cerca de 2 cm, para que houvesse a liberação do calor e o resfriamento ocorresse de maneira lenta, sem a ocorrência de choque térmico.

3.2.5 Ensaios realizados

3.2.5.1 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência a compressão axial seguiu as recomendações da norma brasileira NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (ABNT, 2007). Todos os procedimentos para esse ensaio foram aplicados da mesma maneira, independente da temperatura de ensaio.

Com o intuito de distribuir o carregamento de maneira mais uniforme possível, os corpos de prova tiveram suas faces menores retificadas.

A prensa utilizada para a aplicação da carga foi da marca Instron®, modelo 500HDX-64-67B, com capacidade de força de 1500 kN (Figura 19).

Figura 19 - Ensaio de resistência a compressão axial sendo realizado



Fonte: Autor, 2019.

3.2.5.2 Módulo de elasticidade estático

O ensaio foi realizado seguindo as recomendações da norma brasileira NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão (ABNT, 2017), com o intuito de se determinar o módulo de

elasticidade estático, que é correspondente ao módulo tangente inicial especificado na referida norma.

Inicialmente, foi necessária a determinação da resistência à compressão do concreto, antes da realização do ensaio de módulo de elasticidade. A norma exige a utilização de 3 corpos de prova e, então, toma-se uma média aritmética. Porém, devido às limitações de tempo de realização deste trabalho e a limitação de espaço para o acondicionamento, a resistência à compressão foi realizada com apenas 1 corpo de prova. Porém, para a determinação do módulo de elasticidade, foi atendida a quantidade de amostras necessárias, que são 3 corpos de prova.

Os corpos de prova foram instrumentados com dois transdutores de deslocamento do tipo *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) (Figura 20). Os corpos de prova, após instrumentados, foram posicionados na prensa, tomando-se o cuidado para que o eixo do corpo de prova estivesse alinhado com o eixo de aplicação da carga.

Figura 20 - Corpo de prova com LVDT posicionado



Fonte: Autor, 2019.

Foram realizados dois ciclos de pré-carregamento, manualmente, em velocidade constante. O primeiro variou de 0 MPa até 30% da resistência à compressão do concreto (f_c) e, depois, descarregado até 0,5 MPa. Logo em seguida,

fez-se o segundo, partindo-se de 0,5 MPa até 30% f_c e, então, descarregando-se até 0 MPa. Depois dos ciclos, realizou-se o ensaio. As leituras foram realizadas com auxílio do *software* próprio da prensa.

Após as leituras, foram realizadas as determinações dos módulos de elasticidade estático, utilizando-se a Equação 3 da norma NBR 8522 (ABNT, 2017).

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\epsilon_b - \epsilon_a} \quad (\text{Equação 3})$$

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados de resistência mecânica à compressão residual, módulo de elasticidade residual e perda de massa.

Para avaliar a influência da temperatura e dos traços nos resultados, foram realizadas duas análises estatísticas. A primeira é a Análise de Variância de Fator Duplo (ANOVA *two-way*). A ANOVA é utilizada para verificar se estatisticamente existe diferença significativa entre as médias e se os parâmetros de ensaio influenciam na variável dependente. Entretanto, a análise ANOVA apenas informa se os parâmetros utilizados são significantes ou não, não apresentando quais são os responsáveis pela influência na variável estudada. Dessa forma, a análise foi realizada através do *software* Excel, e foram considerados como significantes, os parâmetros com valores de valor-P inferior a 0,05, correspondendo a um intervalo de confiança de 95%.

Para avaliar dentre as variações dos parâmetros quais foram que tiveram efeito significativo no resultado, utilizou-se o teste *Tukey* por meio do *software Past*, que comparou os resultados de cada parâmetro, par a par.

4.1 Resistência mecânica à compressão

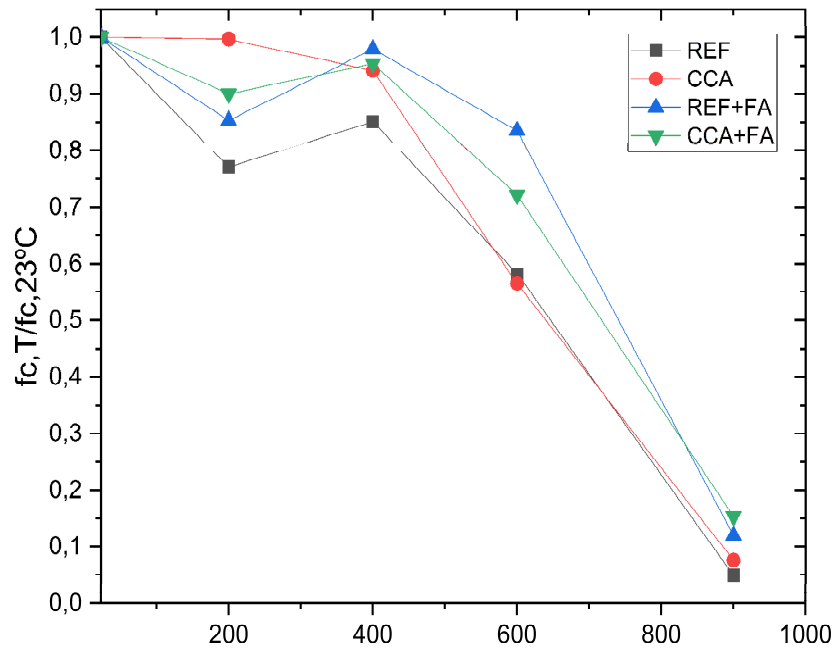
Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 10, e para a melhor visualização do comportamento dos concretos, foram plotados, na Figura 21, os fatores de redução das resistências ($f_{c,T}/f_{c,23^{\circ}\text{C}}$) de cada traço para cada temperatura.

Tabela 10 – Resistência mecânica à compressão em MPa

	23°C	200°C	400°C	600°C	900°C
REF	47,41	36,56	40,34	27,62	2,3
CCA	50,53	50,37	47,56	28,54	3,84
REF+FA	46,09	39,33	45,13	38,49	5,53
CCA+FA	49,18	44,28	46,91	35,50	7,57

Fonte: Autor, 2019.

Figura 21 - Fatores de redução das resistências mecânicas à compressão



Fonte: Autor, 2019.

Na Tabela 11, estão resumidos os resultados do ANOVA para a resistência mecânica à compressão residual.

Tabela 11 – Análise ANOVA da resistência mecânica à compressão residual

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Traços	0,0344	3	0,0115	2,4272	0,11602437	3,4903
Temperatura	2,1417	4	0,5354	113,48	1,9984E-09	3,2592
Erro	0,0566	12	0,0047			
Total	2,2327	19				

Fonte: Autor, 2019.

Os resultados do teste Tukey se encontram na Tabela 12. Os valores sublinhados são as diferenças entre os pares que possuem valor menor que o valor de significância adotado, indicando assim que foram influentes na resistência residual.

Tabela 12 - Teste *Tukey* para a resistência mecânica à compressão residual

	23 °C	200 °C	400 °C	600 °C	900 °C
23 °C		0,3349	0,7821	0,0007	0,0001
200 °C	2,758		0,9244	0,0241	0,0001

(Continua)

				(Conclusão)
400 °C	1,616	1,142		0,0051
600 °C	7,674	4,916	6,058	0,0001
900 °C	21,17	18,41	19,55	13,49

Fonte: Autor, 2019.

Os resultados demonstram que o aquecimento decresce a resistência, indiferentemente do tipo de concreto. Até a temperatura de 400°C há um leve decréscimo na resistência e após este patamar acontecem as perdas de resistência mais significativas. A tendência dos resultados está de acordo com o relatado na literatura (LIMA, 2005).

Embora a análise de variância tenha apontado que os traços não foram influentes nas resistências, pode-se ressaltar alguns pontos. Em 200°C os traços sem a adição de fibras, o traço CCA manteve 99% de sua resistência inicial e o REF 77%. Neste patamar há pouca queda de resistência, pois há apenas a perda de água (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Em 400°C, o traço CCA apresentou pequena queda de resistência, mantendo 94% de sua resistência inicial, já o de referência obteve ganho e manteve 85% da resistência. O comportamento do traço sem adição se deve provavelmente ao fato da água do gel de C-S-H ser liberada e ocasionar o aumento das forças de *Van der Waals* ou ao enrijecimento do gel de cimento, como evidenciado por outros autores (CASTILHO e DURRANI, 1990; LIMA, 2005; KIRCHHOF, 2010).

Na temperatura de 600°C, as resistências de todos os traços decaíram consideravelmente, atingindo 56% e 58% das resistências iniciais, para o traço REF e CCA, respectivamente. O intervalo entre 500-600°C, é a faixa em que é evidenciada as maiores diminuições de resistência na literatura, isto porque o calor desassocia o C-S-H em CaOH e água, e a decomposição do hidróxido de cálcio tornam a pasta de cimento menos coesa. A diminuição da coesão e o aumento das fissuras justificam a perda de resistência dos concretos (CHEN, LI e CHEN, 2009; SOUZA e MORENO, 2010; MEHTA e MONTEIRO, 2014; SEGALIN, 2018). E em 900°C, a redução é mais acentuada ainda, visto que o traço REF manteve apenas 4% de sua resistência original e o CCA 7%.

Entre os traços com a adição de fibras de aço, para a temperatura de 200°C, o traço CCA+FA foi o que apresentou melhor desempenho, mantendo 90% da resistência inicial e o REF+FA 85%.

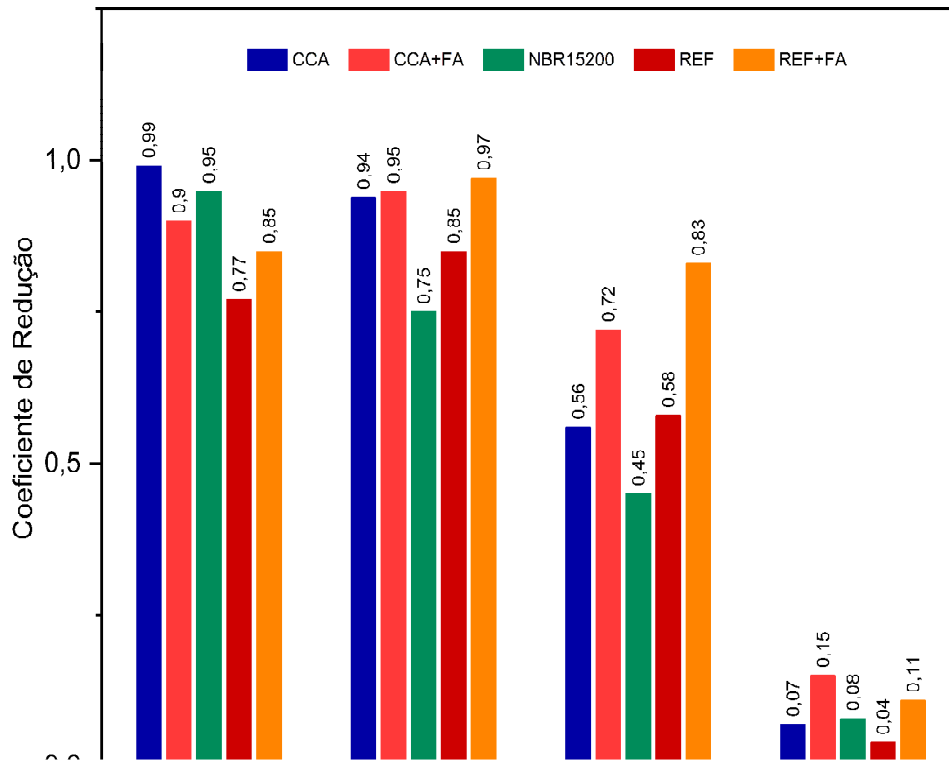
Em 400°C, ambos traços apresentaram ganho de resistência, tendo o traço REF+FA 97% e o CCA+FA 95% da resistência inicial. Nesse patamar de temperatura, as fissuras começam se expandir no concreto. Anumala e Sharma (2011) observaram que a adição de fibras de aço ao concreto manteve 94% da resistência inicial neste patamar de temperatura. Portanto, os resultados estão coerentes com a literatura.

Na temperatura de 600°C, a discrepância entre os traços com fibra e os sem foi ainda maior, visto que o traço REF+FA manteve 83% e o CCA+FA 72% da resistência inicial. Finalmente, em 900°C, a diferença entre os traços diminuiu, porém esta manteve-se superior aos traços sem fibras.

Vale ressaltar que na realização da mistura do traço CCA+FA, foi necessário utilizar uma maior quantidade de aditivo superplastificante do que as outras misturas. Isto pode ter incorporado mais ar à mistura, podendo ser esta a razão do seu desempenho inferior ao traço REF+FA.

De uma maneira geral, quando comparado os fatores de redução obtidos neste trabalho com os valores recomendados pela norma brasileira NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio (2012), os concretos sem adição de fibras (REF e CCA) obtiveram valores muito próximos ou abaixo do exigido pela norma. Já os concretos com adição de fibras tiveram desempenho acima do exigido pela norma, conforme a Figura 22.

Figura 22 - Coeficientes de redução de resistência mecânica



Fonte: Autor, 2019.

4.2 Módulo de elasticidade

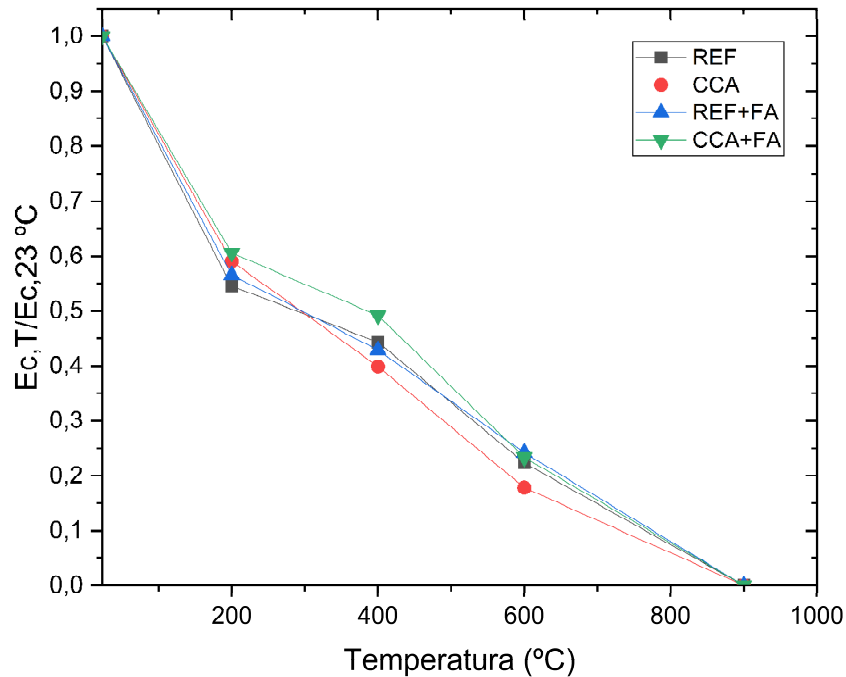
Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 14, e para a melhor visualização do comportamento dos concretos, foram plotados, na Figura 23, os fatores de redução dos módulos de elasticidade ($E_{c,T}/E_{c,23^{\circ}\text{C}}$) de cada traço para cada temperatura.

Tabela 13 - Módulo de elasticidade (GPa)

	23°C	200°C	400°C	600°C	900°C
REF	31,27	17,05	13,85	6,99	0,00
CCA	32,46	19,17	12,94	5,80	0,00
REF+FA	32,49	18,38	13,93	7,87	0,00
CCA+FA	30,05	18,21	14,77	7,02	0,00

Fonte: Autor, 2019.

Figura 23 - Fatores de redução dos módulos de elasticidade



Fonte: Autor, 2019.

Na Tabela 15, estão resumidos os resultados do ANOVA para o módulo de elasticidade.

Tabela 14 - Análise ANOVA para o módulo de elasticidade

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Traço	0,006433	3	0,002144	1,843581	0,193008	3,490295
Temperatura	2,652957	4	0,663239	570,2472	1,43E-13	3,259167
Erro	0,013957	12	0,001163			
Total	2,673346	19				

Fonte: Autor, 2019.

Os resultados do teste *Tukey* se encontram na Tabela 16. Os valores sublinhados são as diferenças entre os pares que possuem valor menor que o valor de significância adotado, indicando assim que foram influentes na resistência residual.

Tabela 15 - Teste *Tukey* para o módulo de elasticidade

	23 °C	200 °C	400 °C	600 °C
23 °C		0,0001991	0,0001991	0,0001991
200 °C	29,01		0,0002999	0,0001991
400 °C	38,41	9,4		0,0001992
600 °C	53,51	24,49	15,09	

Fonte: Autor, 2019.

Assim como observado por Lima (2005), Souza e Moreno Junior (2010) e Almeida (2017), a degradação do módulo de elasticidade ocorreu de maneira mais acentuada do que a perda de resistência mecânica. Pois com o aumento da temperatura há a desidratação dos compostos da matriz cimentícia e há a perda de ligação entre os materiais (CATILLO e DURRANI, 1990).

Tanto o traço CCA quanto o REF tiveram perdas consideráveis aos 200°C, mantendo 59% e 55% do módulo de elasticidade inicial, respectivamente. Diferente do observado por Almeida (2017), onde o concreto com CCA amorfa obteve apenas 6% de decréscimo do módulo de elasticidade.

Em 400°C, o traço CCA apresentou maior queda, manteve 39% do módulo e o REF 44%. Em 600°C, a diferença entre eles se manteve a mesma, sendo que o CCA acabou com 17% e o REF 22% do módulo em temperatura ambiente. E para o patamar de 900°C, os valores de módulo de elasticidade foram considerados nulos, pois para no traço de referência, o valor correspondente a 30% de f_c é muito próximo a 0,50 MPa, o que dificultaria a leitura dos valores de deformação. Apesar de valores diferentes, os traços apresentaram comportamentos parecidos em todas as temperaturas.

O desempenho inferior do traço CCA tem como causa provável, a suscetibilidade dos concretos com CCA a maiores tensões de poro-pressões, que fazem com que surjam mais fissuras (ALMEIDA, 2017).

Nota-se que, para o traço REF, a adição de fibras melhorou o desempenho do traço, porém houve pouco ganho no módulo de elasticidade residual, confirmando o que é afirmado em outros trabalhos (LAU e ANSON, 2006; MEHTA e MONTEIRO, 2014). Já para o traço CCA, a adição mostrou ser conveniente e apresentou os melhores resultados de todos os estudados.

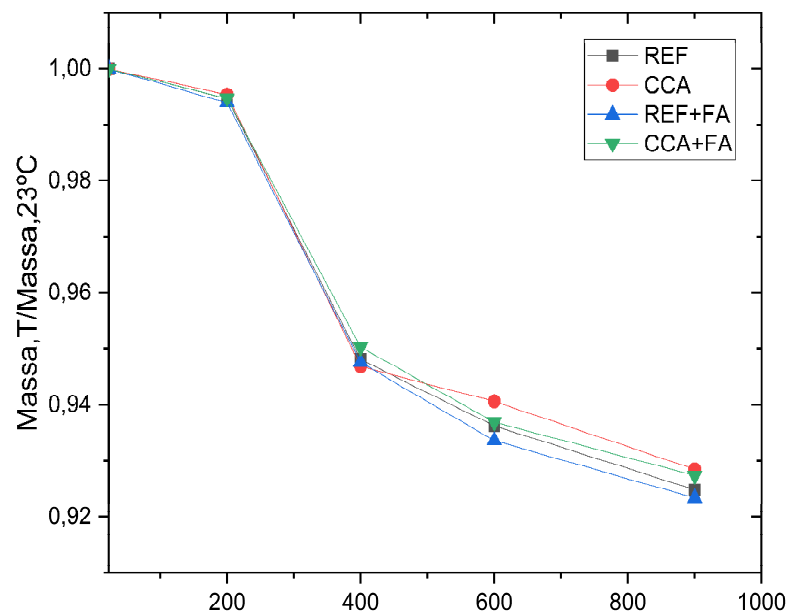
Não foi possível realizar a comparação dos fatores de redução do módulo de elasticidade deste trabalho com valores normativos, assim como foi realizado com a resistência mecânica à compressão, pois a norma brasileira NBR 15200 (ABNT, 2012) não aborda em seu escopo fatores de redução do módulo de elasticidade de concretos.

4.3 Perda de massa

De uma maneira geral, todos os traços tiveram comportamentos parecidos. Entre 200°C e 400°C foi observada a maior perda de massa e para temperaturas acima deste patamar as perdas foram suaves. Os traços CCA e REF+FA apresentaram o melhor e o pior desempenho dentre os traços estudados.

Para a melhor visualização do comportamento de cada traço em cada temperatura, foram plotados os fatores de redução de suas massas ($\text{Massa}_{,T}/\text{Massa}_{,23^{\circ}\text{C}}$) no gráfico da Figura 24.

Figura 24 – Fatores de redução de massa



Fonte: Autor, 2019.

Na Tabela 17, estão resumidos os resultados do ANOVA para a perda de massa.

Tabela 16 - Análise ANOVA para a massa residual

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Traços	2E-05	3	7E-06	2,7512	0,0888	3,4903
Temperaturas	0,0185	4	0,0046	1906,3	1E-16	3,2592
Erro	3E-05	12	2E-06			
Total	0,0186	19				

Fonte: Autor, 2019.

Os resultados do teste Tukey se encontram na Tabela 18. Os valores sublinhados são as diferenças entre os pares que possuem valor menor que o valor de significância adotado, indicando assim que foram influentes na resistência residual.

Tabela 17 - Teste Tukey para a perda de massa

	23 °C	200 °C	400 °C	600 °C	900 °C
23 °C		1	0,003	0,0006	0,0002
200 °C	0,1634		0,0024	0,0005	0,0002
400 °C	6,471	6,635		0,8885	0,0133
600 °C	7,759	7,923	1,288		0,0738
900 °C	11,83	11,99	5,356	4,068	

Fonte: Autor, 2019.

Pelos resultados do teste *Tukey*, percebe-se que as perdas de massa ocorreram significativamente para temperaturas a partir de 400°C.

Como observa-se na Figura 21, todos os traços tiveram o mesmo comportamento até a temperatura de 200°C, nessa temperatura ocorre à evaporação da água livre nos poros (ALMEIDA, 2017). Em 400°C, começam a ser percebidas as primeiras diferenças de comportamentos entre os traços, onde o traço CCA teve maior perda, mas com pequena diferença em comparação aos outros. As perdas de massa entre 400°C e 600°C estão ligadas à desidratação do gel de C-S-H e de outras fases hidratadas (LIMA, 2005; SANTOS, 2012). Acima de 600°C, o traço CCA teve desempenho superior a todos os traços, e o traço REF o pior. Por fim, fica evidente que a presença de fibras no concreto é indiferente no quesito perda de massa.

Em nenhum momento da realização desta pesquisa, observou-se a ocorrência de *spalling*. Isto pode ser explicado pelo fato de haver baixa umidade interna nos corpos de prova, devido ao acondicionamento em câmara climatizada. Kirchhof (2010) afirma que para que haja a probabilidade de ocorrência de *spalling* é necessário que haja um teor acima de 75% de umidade. Além disso, acredita-se que devido a taxa de aquecimento de 1°C/min ser muito baixa, haverá tempo suficiente para a umidade, que havia no interior do concreto, evaporar e conseguir se deslocar para o exterior.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

O objetivo deste trabalho foi contribuir com o entendimento do comportamento mecânico de concretos com substituição parcial de cimento Portland por cinza de casca de arroz e adição de fibras de aço quanto à compressão axial, módulo de elasticidade, perda de massa e o aparecimento do *spalling*, após corpos de prova serem expostos a altas temperaturas. Dessa maneira, conclui-se que:

- Independente do concreto utilizado, a exposição a elevadas temperaturas diminui a resistência mecânica à compressão, o módulo de elasticidade e aumenta a perda de massa. Sendo para a resistência à compressão a temperatura que mais acentuou as perdas foi de 400°C, e para o módulo de elasticidade, que apresentou a maior sensibilidade do aumento de temperatura, foi de 200°C;
- O concreto com CCA apresentou resistência superior ao de referência até a temperatura de 600°C, depois ambos tiveram valores parecidos. Quanto ao módulo de elasticidade, a utilização da CCA atrapalhou o desempenho do concreto, pois acima de 200°C, seus resultados foram os mais baixos de todos os traços estudados;
- A utilização de fibras de aço foi benéfica para os resultados de resistência. Porém foi evidente que sua utilização não interfere consideravelmente nos resultados de módulo de elasticidade.
- A utilização conjunta de CCA com fibras de aço se mostrou promissora, pois obteve bom desempenho quanto à resistência mecânica à compressão e ao módulo de elasticidade após o aquecimento.
- Até a temperatura de 400°C as perdas de massa tanto para o traço de referência quanto sem CCA foram muito próximas. Acima deste patamar o concreto com CCA obteve menor perda de massa, e a adição de fibras não influenciou nas perdas.
- Não foi observado *spalling*, podendo-se concluir que as condições de acondicionamento pré-aquecimento dos corpos de e a taxa de aquecimento ter sido lenta influenciaram neste resultado.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho ajudou a progredir com o conhecimento sobre o comportamento de concretos com substituição parcial de cimento Portland por CCA e adição de fibras após serem expostos às ações de altas temperaturas. Porém, durante a realização deste trabalho surgiram dúvidas que não puderam ser respondidas devido as limitações do programa experimental. Desta maneira, abaixo encontram-se sugestões de pesquisas para sanar estas dúvidas:

- a) Estudar diferentes teores de substituição, e também, tipos de CCA e outras relações a/agl;
- b) Analisar diferentes substituições minerais como, por exemplo, fíler calcário, escória de alto forno e cinza volante, que também se possui conhecimento em temperatura ambiente, porém pouco ou quase nada sobre seu comportamento em altas temperaturas;
- c) Verificar a influência da adição de diferentes teores de fibras de aço, assim como, outros tipos de fibra e também a mistura de dois tipos de fibra;
- d) Avaliar a influência do tipo de resfriamento nos resultados residuais de concretos com substituições minerais após serem aquecidos;
- e) Realizar mais ensaios de módulo de elasticidade com concretos convencionais, a fim de aumentar o banco de dados disponíveis para, assim, propor a incorporação de fatores de redução de módulo de elasticidade na norma brasileira NBR 15200 (2012), a qual não apresenta esses coeficientes.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, RS, Brasil, 2012.

_____. **NBR 15530**: Fibras de aço para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, RS, Brasil, 2007.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.

_____. **NBR 16606**: Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

_____. **NBR 16607**: Cimento portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

_____. **NBR 16697**: Cimento portland – Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

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

_____. **NBR 7809**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

_____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.

_____. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

_____. **NBR NM 51**: Agregado graúdo - Ensaio de Abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

AFROUGHSABET, V.; BIOLZI, L.; MONTEIRO, P. J. M. The effect of steel and polypropylene fibers on the chloride diffusivity and drying shrinkage of high-strength concrete. **Composites Part B**, n.139, p. 84-96, 2018.

ALMEIDA, J. M. A. **Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinza de casca de arroz**. 2017. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

ANUMALA, S.; SHARMA, U. K. Residual Mechanical Properties of Fibre Reinforced Concrete after Exposure to Elevated Temperature. **Journal of Structural Fire Engineering**, v.2, n.2, p. 123-137, 2011.

ARMESTO, L.; BAHILLO, A.; VEIJONEN, K.; CABANILLAS, A.; OTERO, J. Combustion behavior of rice husk in a bubbling fluidized bed. **Biomass and Bioenergy**, V.23, p. 171-179, 2002.

BRAZILIAN RICE. **Sobre o Brasil**. Disponível em: <<http://brazilianrice.com.br/br/sobre-o-brasil/>>. Acessado em: 01 de mai. 2019.

BRÁZ, M. C. A.; NASCIMENTO, F. B. C. Concreto reforçado com fibra. **Ciências exatas e tecnológicas**, v.3, n.1, p. 43-56, 2015.

BENTUR, A; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. London and New York: Modern Concrete Technology Series, 2.ed. 2007

CASTELLOTE, M. Microstructure: solid phases. **In: COURSE ON EFFECT OF HEAT ON CONCRETE**, Udine, Itália: International Centre for Mechanical Sciences, 2003. 13p. Apostila.

CASTILLO, C.; DURRANI, A. J. Effect of Transient High Temperature on High-Strength Concrete. **ACI Materials Journals**, v. 87, n.1, 1990.

CHEN, B.; LI, C.; CHEN, L. Experimental study of mechanical properties of normal-strength concrete exposed to high temperatures at an early age. **Fire Safety Journal**, v.44, p. 997–1002, 2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>>. Acessado em: 01 de mai. 2019.

COPETTI, M. M. **Estudo de viabilidade de concreto estrutural com areia de descarte de fundição e adições minerais: propriedades mecânicas e análise de ciclo de vida**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2009.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008.

COSTA, C. N.; FIGUEIREDO, A. D.; SILVA, V. P. O fenômeno do lascamento (“*spalling*”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio – uma revisão crítica. **Anais...** Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: CBC, 2002.

DESHPAND, A. A.; KUMAR, D.; RANADE, R. Influence of high temperatures on the residual mechanical properties of a hybrid fiber-reinforced strain-hardening cementitious composite. **Construction and Building Materials**, V.208, p. 283–295, 2019.

DUART, M. A. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EUROCODE 2: **EN 1992-1-2: Design of concrete structures. Part 1-2: General rules - Structural fire design**. Eurocode 2, Brussels, Belgium, 2004.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2011.

GARCEZ, E. O. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a carga de impacto**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

GUO, Z.; SHI, X. Strength of Concrete at Elevated Temperature. **Experiment and Calculation of Reinforced Concrete at Elevated Temperature**, c.1, p. 1-16, 2011.

HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. **Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences Technical Sciences**, v.61, n. 1, 2013.

HOPPE, T. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

HUANG, H.; WANG, R.; GAO, X. Improvement effect of fiber alignment on resistance to elevated temperature of ultra-high performance concrete. **Composites Part B: Engineering**, v.177, 2019

ISAIA, G. C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: Um estudo de Durabilidade com Vistas à Corrosão da Armadura**. 1995. Tese (Doutorado)–Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1995.

ISAIA, G. C; GASTALDINI, A. L. G.; MEIRA, L.; DUART, M.; ZERBINO, R. Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural. Parte I: propriedades mecânicas e durabilidade. **Ambiente Construído**, v. 10, p. 121-137, jan./mar. 2010.

ISAIA, G. C; GASTALDINI, A. L. G.; MEIRA, L.; DUART, M.; ZERBINO, R. Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (Parte II): durabilidade. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 233-252, 2017.

JÚNIOR, L. A. M. **Carbonatação natural de protótipos de concreto com cinza de casca de arroz**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, 2010.

KHOURY G. A. Compressive strength of concrete at high temperatures: A reassessment. **Magazine of Concrete Research**, v. 44, n. 161, p. 291-309, 1992.

KIRCHHOF, L. D. **Estudo teórico-experimental da influência do teor de umidade no fenômeno de *spalling* explosivo em concretos expostos a altas temperaturas**. 2010. Dissertação (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

KODUR V. K. R. Properties of concrete at elevated temperatures. **ISRN Civil Engineering**, Hindawi Publishing Corporation, v. 2014, 2014.

LAU, A. **Effect of high temperatures on normal strength concrete and high performance concrete containing steel fibers**. 2003. Tese (Doutorado), The Hong Kong Polytechnic University, 2003.

LIMA, C. J. F. **Sustentabilidade de concretos com misturas binárias de pozolanas e resíduos de demolição de concreto com ênfase na avaliação e custo do ciclo de vida**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

LIMA, R.G.A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

LONDERO, C. **Valorização da cinza da casca de arroz com aplicação no concreto**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2017.

LUDWIG, D. G. **Concreto com adição de cinza de casca de arroz**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Centro Universitario UNIVATES, 2014.

MAIER, M.; ZEIML, M.; LACKNER, R. On the effect of pore-space properties and water saturation on explosive spalling of fire-loaded concrete. **Construction and Building Materials**, v.231, 2020.

MAJIDI, M. K. H. **Effects of exposure to elevated temperatures on properties of**

concrete containing rice husk ash. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia). School of Civil Enggineering, University Sains Malaysia. 2011.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHHEIN, R. N. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, v.3, n.1, p. 75-96, jan/jun, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – estrutura, propriedades e materiais.** 4ª edição, Ed. Pini, São Paulo, 2014.

MELO, C. H. A. S.; AGUILAR, M. T. P.; CORRÊA, E. C. S.; SANTOS, D. B.; CETLIN, P. R. Influência da temperatura no desempenho de concretos reforçados com fibras curtas de aço. **Anais... CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS**, 2002, Natal. Anais. Natal: CBECIMAT, 2002.

MEMON, S. A.; SHAH, S. F. A.; KHUSHNOOD, R. A.; BALOCH, W. L. Durability of sustainable concrete subjected to elevated temperature – A review. **Construction and Building Materials**, v.199, p. 435–455, 2019.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 5. ed. Bookman, São Paulo, 2016.

NUNES, D. G. **Carbonatação acelerada em concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico.** 2014. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

NUNES, N. L.; AGOPYAN, V. **A influência do fator de forma na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras de aço.** 1998. Boletim técnico. Escola Politécnica da USP, 1998.

PEREIRA, A. M.; SILVA, C. A. R.; QUEIROZ, D. C. A.; MORAES, M. J. B.; MELGES, J. L. P.; TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L. Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. **Revista Matéria**, São Paulo, V. 20, n.01, p. 227-238, 2015.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** 2006. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PURKISS, J. A. **Fire safety engineering design of structures.** 2. ed., Oxford: Butterworth Heinemann, 2007, 389 p.

PURKISS, J. A. Steel fiber reinforced concrete at elevated temperatures. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v.6, n.6, p. 179-184, 1984.

QIANMIN, M.; RONGXIN, G.; ZHIMAN, Z.; ZHIWEI, L.; KECHENG, H. Mechanical properties of concrete at high temperature—A review. **Construction and Building Materials**, V.93, p. 371-383, 2015.

RAJAWAT, D.; SIDDIQUE, S.; SHRIVASTAVA, S.; CHAUDHARY, S. GUPTA, T.

Influence of fine ceramic aggregates on the residual properties of concrete subjected to elevated temperature. **Fire and Materials**, 2018.

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

SANTOS, C. C. **Propriedades mecânicas residuais após incêndio de betões normais**. 2012. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2012.

SCHNEIDER, U. Concrete at high temperatures: A general review. **Fire Safety Journal**, v. 13, p 55-68, 1988.

SEGALIN, L. Z. **Influência do modo de resfriamento na resistência à compressão do concreto após exposição a elevadas temperaturas**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

SHIMOSAKA, T. J. **Influência do teor de diferentes tipos de fibras de aço em concretos autoadensáveis**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

SILVA, S. S. **Avaliação de propriedades mecânicas de concreto com altos teores de filler calcário e cinza de casca de arroz**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfato**. 1996. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Produção de cimento por regiões e estados**, 2018. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1573492857.pdf>. Acesso em: 27. nov. 2019.

SOUZA, A. A. A.; MORENO JR., A. L. **Efeito de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto**. Revista IBRACON de estruturas e materiais, v.3, n.4, p. 432-448, 2010.

SOUZA, L. A. A. **Comportamento do concreto frente à condição de altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

SOUZA, L. A. A. **Comportamento do concreto frente à condição de altas Temperaturas: análise das propriedades mecânicas residuais**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

TRINDADE, F. M. O. **Propriedades mecânicas de concretos com diferentes cimentos Portland e com cinza de casca de arroz natural e moída**. 2012.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2012.

WENDT, S. C. **Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

XIE, Q.; ZHANG, L.; YIN, S.; ZHANG, B.; WU, Y. Effects of High Temperatures on the Physical and Mechanical Properties of Carbonated Ordinary Concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, v.2019, 10p., 2019.

ZUNINO, F.; LOPEZ, M. Decoupling the physical and chemical effects of supplementary cementitious materials on strength and permeability: A multi-level approach. **Cement and Concrete Composites**, v.65, p. 19-28, 2015.

APÊNDICE A – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO

(Continua)

Temperatura (°C)	Traço	Resistência à compressão (MPa)
23	REF	47,36
	REF	47,26
	REF	47,62
	REF	48,71
	REF+FA	43,82
	REF+FA	46,59
	REF+FA	46,02
	REF+FA	45,64
	CCA	50,50
	CCA	50,56
	CCA	50,87
	CCA+FA	50,13
	CCA+FA	42,17
	CCA+FA	48,54
	CCA+FA	48,87
200	REF	36,66
	REF	36,03
	REF	36,56
	REF	35,57
	REF+FA	39,30
	REF+FA	40,61
	REF+FA	39,36
	REF+FA	37,54
	CCA	50,73
	CCA	49,40
	CCA	50,02
	CCA	51,51
	CCA+FA	44,91
	CCA+FA	44,10
	CCA+FA	43,03
CCA+FA	43,65	
400	REF	45,07
	REF	40,00
	REF	43,00
	REF	40,34
	REF+FA	48,38
	REF+FA	43,75
	REF+FA	32,89
	REF+FA	43,25
	CCA	47,56

(Conclusão)		
400	CCA	49,17
	CCA	36,65
	CCA	47,35
	CCA+FA	42,32
	CCA+FA	50,84
	CCA+FA	45,70
	CCA+FA	48,11
600	REF	31,63
	REF	26,89
	REF	27,62
	REF	32,45
	REF+FA	42,48
	REF+FA	37,46
	REF+FA	40,63
	REF+FA	37,37
	CCA	31,35
	CCA	28,04
	CCA	29,04
	CCA+FA	35,59
	CCA+FA	35,50
	CCA+FA	36,92
	CCA+FA	35,40
900	REF	1,71
	REF	1,30
	REF	5,22
	REF	3,98
	REF+FA	1,25
	REF+FA	5,69
	REF+FA	5,30
	REF+FA	5,59
	CCA	4,27
	CCA	3,74
	CCA	4,01
	CCA	3,84
	CCA+FA	7,03
	CCA+FA	8,10
	CCA+FA	8,01
CCA+FA	7,13	

Fonte: Autor, 2019.

APÊNDICE B – RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE

(Continua)

Temperatura (°C)	Traço	Módulo de elasticidade (GPa)
23	REF	31,23
	REF	32,13
	REF	31,31
	REF+FA	32,26
	REF+FA	31,63
	REF+FA	32,72
	CCA	32,84
	CCA	32,09
	CCA+FA	30,51
	CCA+FA	30,09
	CCA+FA	30,00
	200	REF
REF		16,94
REF		17,15
REF+FA		19,19
REF+FA		18,50
REF+FA		18,26
CCA		17,18
CCA		19,17
CCA		19,16
CCA+FA		18,22
CCA+FA		18,21
CCA+FA		18,36
400	REF	13,65
	REF	14,59
	REF	14,06
	REF+FA	13,36
	REF+FA	13,98
	REF+FA	13,88
	CCA	12,92
	CCA	12,97
	CCA	14,32
	CCA+FA	14,71
	CCA+FA	15,20
	CCA+FA	14,83
600	REF	6,92
	REF	6,60
	REF	7,07
	REF+FA	7,94
	REF+FA	7,79
	REF+FA	8,50

			(Conclusão)
	CCA	5,72	
	CCA	5,87	
600	CCA+FA	6,93	
	CCA+FA	7,11	
	CCA+FA	7,40	

Fonte: Autor, 2019.

APÊNDICE C – RESULTADOS DE PERDA DE MASSA

				(Continua)
Temperatura (°C)	Traço	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	
200	REF	3706,35	3687,92	
	REF	3666,80	3645,11	
	REF	3718,72	3695,77	
	REF	3654,63	3636,57	
	REF+FA	3788,43	3767,03	
	REF+FA	3768,58	3751,07	
	REF+FA	3798,95	3781,59	
	REF+FA	3786,03	3767,98	
	CCA	3692,95	3671,03	
	CCA	3733,12	3710,14	
	CCA	3680,72	3656,91	
	CCA	3735,88	3716,19	
	CCA+FA	3696,66	3677,26	
	CCA+FA	3711,05	3691,64	
	CCA+FA	3719,78	3700,70	
	CCA+FA	3705,15	3685,59	
400	REF	3773,48	3578,29	
	REF	3726,25	3533,52	
	REF	3722,26	3527,27	
	REF	3746,75	3558,67	
	REF+FA	3755,95	3556,24	
	REF+FA	3743,61	3544,49	
	REF+FA	3793,96	3568,64	
	REF+FA	3767,73	3596,47	
	CCA	3647,51	3456,79	
	CCA	3656,32	3464,01	
	CCA	3659,37	3460,66	
	CCA	3648,73	3468,90	
	CCA+FA	3720,53	3525,94	
	CCA+FA	3705,84	3521,20	
	CCA+FA	3675,7	3493,66	
	CCA+FA	3671,62	3488,58	
600	REF	3759,81	3507,38	
	REF	3657,34	3422,90	
	REF	3733,34	3492,60	
	REF	3708,94	3476,34	
	REF+FA	3754,91	3529,98	
	REF+FA	3832,18	3604,67	
	REF+FA	3820,90	3595,65	
	REF+FA	3797,45	3572,21	

(Conclusão)

600	CCA	3641,60	3402,31
	CCA	3630,85	3382,22
	CCA	3645,24	3400,73
	CCA	3626,36	3394,60
	CCA+FA	3707,72	3472,19
	CCA+FA	3646,19	3411,12
	CCA+FA	3726,73	3492,69
	CCA+FA	3718,91	3484,81
900	REF	3630,88	3357,70
	REF	3591,21	3293,51
	REF	3628,94	3356,14
	REF+FA	3536,91	3285,18
	REF+FA	3532,79	3285,22
	REF+FA	3546,57	3291,55
	CCA	3618,89	3342,68
	CCA	3630,7	3352,77
	CCA	3611,73	3333,00
	CCA	3607,51	3327,19
	CCA+FA	3754,58	3482,13
	CCA+FA	3766,42	3467,57
	CCA+FA	3720,47	3449,01
CCA+FA	3759,57	3487,27	

Fonte: Autor, 2019.