

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

Sérgio Petry de Paula

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

Santa Maria, RS
2020

Sérgio Petry de Paula

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E ADIÇÃO DE FIBRAS DE
POLIPROPILENO 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**.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Cattelan Antochaves de Lima

Santa Maria, RS
2020

Sérgio Petry de Paula

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E ADIÇÃO DE FIBRAS DE
POLIPROPILENO 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 17 de dezembro de 2020:

Rogério Cattelan Antochaves de Lima, Dr. (UFSM)
(Orientador)

Alexandre Silva de Vargas, Dr. (UFRGS)

Silvane Santos da Silva, Me. (UFSM)

Santa Maria, RS
2020

Dedico aos meus pais, Claudia e Paulo, pelo constante incentivo, suporte e pelo amor que recebo.

Agradecimentos

Antes de tudo agradeço aos meus pais e também aos meus irmãos, Élisson e Clarice, pois sem eles o caminho teria sido mais árduo. Obrigado pela compreensão durante todos esses anos, vocês foram incríveis em me apoiar nos finais de semestres, mesmo de longe, eu sentia vocês perto de mim dizendo que eu era capaz de realizar grandes feitos e que nada era impossível, mas isso quando se corre atrás de seus objetivos de forma honesta e com empenho.

A minha imensa gratidão as Professoras do ensino fundamental Maria Inês, Janice e Viviane pelo incentivo e me mostrado que a continuação dos estudos era muito importante, agradeço ao Professor Jésus por ter me lembrado da inscrição do vestibular na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e também a professora “Verinha” por ter me ajudado a desistir do outro vestibular que seria no mesmo dia do vestibular da UFSM. Sem vocês, eu não teria chegado onde cheguei, e a Silvane e ao professor Rogério meus agradecimentos por terem me ajudado na elaboração deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria que garantiu suporte para minha moradia sem custos na Casa do Estudante Universitário II, ao auxílio de materiais para meus estudos, ao auxílio formação para meu aperfeiçoamento pessoal e acesso à alimentação gratuita. Serei eternamente grato.

Ao meu amigo Leã e sua namorada Gabi, agora engenheiro civil e ela futura médica que desde do início estiveram ao meu lado nas madrugadas de estudos para as avaliações e nas comemorações das aprovações, com vocês pude ser eu mesmo, obrigado por me acolherem como parte da sua família.

Aos meus amigos que encontrei ao final da graduação, obrigado por me fazerem enxergar que realmente aproveitei ao máximo a oportunidade de ter estudado em umas das melhores universidades do estado.

Ao GEPECON e as amigas que fiz durante a iniciação científica até o momento da realização deste trabalho, gratidão por me mostrarem o quanto a pesquisa pode ser apaixonante.

À REHAB da Caixa Econômica Federal e aos amigos que fiz durante o período, sou imensamente grato pelos ensinamentos à mim proporcionados.

"O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis"

- José de Alencar

RESUMO

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

AUTOR: Sérgio Petry de Paula

ORIENTADOR: Rogério Cattelan Antochaves de Lima

A cinza de casca de arroz (CCA) quando incorporada ao concreto resulta em benefícios no que diz respeito à durabilidade em situações de temperatura ambiente, isso devido a densificação da matriz cimentícia. No entanto, em situações de incêndio, a densificação da matriz cimentícia acaba se tornando um obstáculo para a saída dos vapores de água no momento em que o concreto é aquecido, elevando a pressão interna nos poros, o que pode acarretar no aparecimento do *spalling explosivo*. Pesquisas apontam que a utilização de fibras de polipropileno podem auxiliar na redução da probabilidade de aparecimento do *spalling* em concretos, pois criam canais interligados com os poros facilitando a saída dos vapores de água. Embora a incorporação de CCA no concreto seja abordada em inúmeras pesquisas, um número limitado se preocupa em analisar seu comportamento em altas temperaturas e, ainda mais limitado, com a adição de fibras de polipropileno. Nesta pesquisa, investiga-se a influência da substituição parcial de cimento Portland por CCA e a adição de fibras de polipropileno na resistência mecânica à compressão, 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 1,5 kg/m³ de fibras de polipropileno. 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, onde permaneceram por 60 minutos. Os ensaios foram realizados após o resfriamento lento 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. Por fim, a ocorrência de *spalling* não foi evidenciada nas amostras ensaiadas devido às condições de condicionamento de pré-aquecimento dos corpos de prova.

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

ABSTRACT

MECHANICAL BEHAVIOR OF CONCRETES WITH PARTIAL REPLACEMENT OF RICE RUSK ASH AND ADDITION OF POLYPROPYLENE FIBERS AT HIGH TEMPERATURES

AUTHOR: Sérgio Petry de Paula
ADVISOR: Rogério Cattelan Antochaves de Lima

The incorporation of rice hush ash (RHA) when incorporated into concrete create benefits with respect to durability in room temperatures situations, due to the densification of the cement matrix. However, on fire situations, the densification of the cement matrix ends up becoming an obstacle to the exit of water vapors when the concrete is heated, increasing the internal pressure in the pores, which can lead to the appearance of explosive spalling. Research shows that the use of polypropylene fibers can help reduce the likelihood of spalling in concrete, because they create channels interconnected with the pores facilitating the exit of water vapors. Although the incorporation of RHA in concrete is addressed in numerous researches, a limited number are concerned with analyzing its behavior at high temperatures and, even more limited, with the addition of polypropylene fibers. In this research, the influence of the partial substitution of Portland cement by RHA and the addition of polypropylene fibers on the mechanical resistance to compression, weight loss and occurrence of spalling in concrete after being submitted to high temperatures is investigated. For this, specimens with a/w fixed ratio of 0,45, 25% substitution of cement by RHA and addition of 1,5 kg/m³ of polypropylene fibers were molded. The samples were heated at a rate of 1°C/min, according to RILEM TC 129-MHT (RILEM Technical Committee, 2004) until they reached the temperature levels of 200°C, 400°C, 600°C and 900°C, where they remained for 60 minutes. The tests were performed after the specimens were slowly cooled down. With the results obtained, it was noticed that the incorporation of RHA improves the performance regarding the mechanical resistance to residual compression and loss of mass. Finally, the occurrence of spalling was not evidenced in the samples tested due to the preheating conditions of the specimens.

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

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de redução da resistência à compressão conforme a norma brasileira NBR 15200 (ABNT, 2012)	26
Tabela 2 - Composição química e perda ao fogo do cimento CPV-ARI	34
Tabela 3 - Características físicas do cimento CPV-ARI	34
Tabela 4 - Composição química e perda ao fogo da cinza da casca de arroz	35
Tabela 5 - Características físicas da CCA.....	36
Tabela 6 - Características físicas do agregado miúdo	37
Tabela 7 - Propriedades físicas do agregado graúdo.....	38
Tabela 8 - Propriedades do aditivo utilizado	39
Tabela 9 - Características da fibra de polipropileno utilizada	40
Tabela 10 - Traços unitários.....	41
Tabela 11 - Consumo de materiais	41
Tabela 12 - Resistência média à compressão axial em MPa	48
Tabela 13 - Análise ANOVA da resistência mecânica à compressão residual.....	49
Tabela 14 - Teste Tukey para a resistência à compressão residual	49
Tabela 15 - Análise ANOVA para a massa residual.....	53
Tabela 16 - Teste Tukey para a perda de massa.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Microfibras de polipropileno: (a) Fibriladas; (b) Monofilamento.....	21
Figura 2 - Macrofibras de polipropileno	21
Figura 3 - Ganho de tenacidade aos 7 dias	22
Figura 4 - Redução da resistência à compressão com o aumento da temperatura em concretos submetidos a diferentes resfriamentos	24
Figura 5 - Redução da resistência à compressão com o aumento da temperatura em concretos submetidos a diferentes resfriamentos	24
Figura 6 - Resistência à compressão de concretos de diferentes resistências após serem aquecidos	25
Figura 7 - Resistência à compressão de concretos com substituição de cimento por CCA e CV em diferentes temperaturas	27
Figura 8 - Formas de ocorrência do spalling no concreto: (a) Tensões térmicas; (b) Poro-pressão.....	29
Figura 9 - Ação das fibras de polipropileno na ocorrência do spalling	30
Figura 10 - Influência de diferentes concretos na perda de massa quando expostos a elevada temperatura	31
Figura 11 - Fluxograma do programa experimental do trabalho.....	32
Figura 12 - Difratograma da cinza de casca de arroz.....	36
Figura 13 - Curva granulométrica do agregado miúdo	38
Figura 14 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	39
Figura 15 - Fibra de polipropileno utilizada	40
Figura 16 - Betoneira de eixo inclinado	42
Figura 17 - Abatimento do tronco de cone	42
Figura 18 - Acondicionamento dos corpos de prova após moldagem.....	43
Figura 19 - Caixa metálica de proteção.....	44
Figura 20 - Forno industrial	44
Figura 21 - Ensaio de resistência a compressão axial sendo realizado	46
Figura 22 - Fatores de redução das resistências mecânicas à compressão	48
Figura 23 - Coeficientes de redução de resistência mecânica	52
Figura 24 - Fatores de redução de massa	53

LISTA DE ABREVIATURAS

a/agl Relação água aglomerante

ABCP Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA *Analysis of variance*

C₂S Belita

C₃S 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+FP Traço de concreto com cinza de casca de arroz e fibras de polipropileno

CH Hidróxido de cálcio

C-S-H Silicato de cálcio hidratado

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+FP Traço de concreto de referência com fibras de polipropileno

S Dióxido de silício

UFSM Universidade Federal de Santa Maria

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
1.1 Considerações iniciais	14
1.2 Justificativa	15
1.3 Objetivos.....	17
1.3.1 Objetivo geral.....	17
1.3.2 Objetivos específicos	17
1.4 Delineamento	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Comportamento da cinza de casca de arroz no concreto.....	18
2.2 Concreto reforçado com fibras de polipropileno.....	20
2.3 O comportamento do concreto em altas temperaturas	23
2.3.1 Resistência à compressão	23
2.3.2 O spalling	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Materiais	33
3.1.1 Aglomerantes.....	33
3.1.1.1 Cimento	34
3.1.1.2 Cinza de casca de arroz	35
3.1.2 Agregados	36
3.1.2.1 Agregado miúdo	37
3.1.2.2 Agregado graúdo.....	38
3.1.3 Aditivo	39
3.1.4 Fibra de polipropileno	39
3.1.5 Água	40
3.2 Etapas da pesquisa	40
3.2.1 Traços utilizados.....	40
3.2.2 Preparação, moldagem e cura dos corpos de prova	41

3.2.3 Exposição às altas temperaturas	43
3.2.4 Ensaio realizados	45
3.2.4.1 Resistência à compressão axial	45
3.2.4.2 Perda de massa.....	46
3.2.4.3 Análise estatística e tratamento de dados	46
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	48
4.1 Resistência mecânica à compressão residual.....	48
4.2 Perda de massa	52
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
5.1 Conclusões.....	55
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	56
REFERÊNCIAS.....	57
APÊNDICE A – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO	66
APÊNDICE B – RESULTADOS DE PERDA DE MASSA	68

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

De acordo com a *Brazilian Rice*, fora da Ásia, o Brasil é o país com maior produção e consumo de arroz. Em 2017/2018 a safra atingiu valores de produção próximo a 12,1 milhões de toneladas de arroz, onde o estado do Rio Grande do Sul produziu 70,1% desse total, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2019).

A casca de arroz removida durante o beneficiamento do grão, é um resíduo derivado do descasamento do arroz e considerado um rejeito agrícola. No entanto, por possuir poder calorífico elevado, a queima da casca é utilizada para gerar energia à empresa (POUEY, 2006; GONÇALVES, 2009).

Logo depois da queima para a geração de energia, quase 20% da casca converte-se em cinza. A densidade dessa cinza é de 200 kg/m³ aproximadamente, e afirma Armesto et al. (2002), que devido a essa característica ocorre problemas de estocagem e transporte, além de contribuir para a poluição ambiental. Partindo disso, é imprescindível encontrar formas de destinação correta para a cinza de casca de arroz (CCA).

Uma das destinações corretas para o subproduto proveniente da queima da casca de arroz evitando, desse modo, o seu descarte no meio ambiente, é a utilização da CCA em substituição parcial do cimento para a confecção de concretos. Com isso ocorre a redução do consumo de cimento, que é um dos produtos mais consumidos do mundo, provocando assim, a diminuição de energia para sua confecção e a mitigação de gases na atmosfera (SILVA, 2012).

A incorporação de CCA promove melhorias nas propriedades do concreto em seu estado endurecido, como na resistência à compressão, conforme constataram Silveira (1996), Pereira et al. (2015) e Isaia et al. (2017), já Silva (2012) conseguiu constatar que ocorre redução quanto à penetração de cloretos e Nunes (2014) o aumento no desempenho frente à carbonatação. Essas melhorias nas propriedades se justificam pelo refinamento na estrutura dos poros e, conseqüentemente, pelo efeito fíler e efeito pozolânico da CCA (LONDERO, 2017). No entanto, em uma situação extraordinária, como é a de um incêndio, a diminuição da porosidade, promovida pelo refinamento dos poros, pode evitar a saída do vapor d'água quando

o concreto é aquecido, gerando grandes pressões internas nos poros, e, se eventualmente essa pressão superar a resistência à tração do concreto, ocorrerá o *spalling* explosivo (KIRCHHOF,2010; ALMEIDA 2017).

O *spalling* explosivo ou *spalling* pode acarretar em deslocamentos pontuais com grande liberação de energia ou deslocamentos de grandes cavidades do concreto, deixando assim, expostas as camadas internas do concreto sob à ação das altas temperaturas. As perdas de fragmentos do concreto deixam a estrutura fragilizada ao ponto de comprometê-la, uma vez que pode ocorrer a exposição de camadas mais internas do concreto, onde estão as armaduras, podendo levá-la ao colapso (KIRCHHOF, 2010; SOUZA, 2014).

Para a redução do efeito *spalling* no concreto, Lima (2005) afirma que a adição de fibras de polipropileno pode reduzir a probabilidade do aparecimento do deslocamento em concretos com microestrutura densa, bem como promover a estabilidade das estruturas sob ação de elevadas temperaturas até que seja realizada toda a evacuação e operações de resgate.

Nesse âmbito, é essencial a realização de estudos para a verificação do comportamento mecânico de concretos com adição de CCA sob a ação de altas temperaturas, uma vez que o material tem se revelado uma ótima solução técnica e sustentável em condições normais, se faz necessário o estudo do seu uso em situações extraordinárias, como é o caso de um incêndio, pois ainda existem poucos estudos sobre esse assunto. Além da necessidade de adquirir e fomentar estudos sobre a eficiência da utilização de fibras de polipropileno na confecção de concretos com CCA.

1.2 Justificativa

No campo da tecnologia e durabilidade dos concretos, o comportamento do concreto sob ação de agentes agressivos já há muito tempo é tema de estudos (PETRUCCI, 1981). Porém, incêndios de grandes proporções já comprometeram severamente inúmeras estruturas no decorrer da história (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Por esse motivo uma das considerações mais importantes a serem aplicadas nas construções é a segurança estrutural contra incêndios (KHALAF e HUANG, 2016).

A adição de fibras em concreto vem se popularizando, essencialmente pelo ganho de tenacidade, resistência à fissuração e retração plástica (ALHOZAIMY et al.,

1996; KURTZ e BALAGURU, 2000; POON et al., 2004; EZZIANE et al., 2015).

Através de estudos foi comprovado que a adição de fibras de polipropileno são efetivas na mitigação do deslocamento (spalling) em concretos expostos a altas temperaturas (LIMA, 2005; XIAO e FALKNER, 2006; BEHNOOD e GHANDEHARI, 2009; BANGI e HORIGUCHI, 2012; AKCA; ZIHNIOĞLU, 2013; EZZIANE et al., 2015, DIAS et al., 2020).

Quando comparada com outros materiais disponíveis no mercado, a aplicação das fibras de polipropileno no concreto é muito fácil, não há formação de aglomerados, tornando possível sua utilização na prática. Um problema comum nas fibras de aço é o risco de corrosão, o que não se observa nas fibras de polipropileno por serem inertes. São extremamente leves e praticamente não influenciam no peso próprio da estrutura. O baixo custo do polipropileno torna a solução ainda mais interessante, aliando desempenho com baixo custo (BENTUR e MINDESS, 2007).

A incorporação de CCA no concreto foi e ainda é bastante discutida nesses últimos anos, mas é unanimidade entre os pesquisadores, que os benefícios em relação à durabilidade do concreto e ao meio são garantidos. Entretanto, não há um grande número de pesquisas sobre o seu efeito em concretos após a exposição em elevadas temperaturas. Almeida (2017) apontou que a incorporação de CCA no concreto tem a tendência de facilitar o aparecimento do spalling, o que gera preocupação.

Através da bibliografia consultada é possível perceber a carência de trabalhos que abordam o tema sobre concretos com substituição parcial de cimento por CCA expostos a altas temperaturas, mas quando os estudos são sobre o comportamento mecânico residual de concretos com a utilização conjunta de CCA e fibras de polipropileno essa carência é aumentada.

Sendo assim, se justifica a elaboração deste trabalho para suprir a falta de pesquisas nesse tema, tendo em vista avaliação experimental do comportamento mecânico de concretos com substituição parcial de cimento por CCA e também estudo das propriedades de concretos com adição de fibras de polipropileno após serem submetidos a altas temperaturas. Adicionalmente, os resultados poderão complementar na construção de uma base de dados mais consistente e confiável, ao mesmo tempo que o trabalho contribui para o enriquecimento da produção bibliográfica nacional, abrindo questionamentos para trabalhos futuros.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

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

1.3.2 Objetivos específicos

- Avaliar os efeitos da variação de temperatura no comportamento mecânico do concreto, expresso em termos de resistência à compressão simples, 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 polipropileno, tanto nas propriedades mecânicas residuais do concreto quanto na ocorrência de *spalling*.

1.4 Delineamento

No **Capítulo I** é apresentado um breve relato sobre a importância da utilização de subprodutos industriais na redução do impacto ambiental, a relevância e justificativa do tema e os objetivos propostos para este trabalho.

No **Capítulo II** é abordado o referencial teórico que mostra algumas características da adição mineral empregada na pesquisa, bem como a influência das mesmas nas propriedades da microestrutura, utilização de fibra de polipropileno e seu comportamento frente a exposição de altas temperaturas.

No **Capítulo III** diz a respeito sobre o programa experimental adotado, metodologia empregada e materiais utilizados no presente trabalho.

O **Capítulo IV** são expostos os resultados do programa experimental bem como análises e discussões dos mesmos.

No **Capítulo V** contém as considerações finais e sugestões para futuros trabalhos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

São abordados neste capítulo referenciais utilizados para o embasamento teórico do estudo experimental realizado, ou seja, as alterações das propriedades do concreto com adição de CCA e fibra de polipropileno, bem como elevações térmicas.

2.1 Comportamento da cinza de casca de arroz no concreto

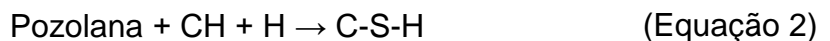
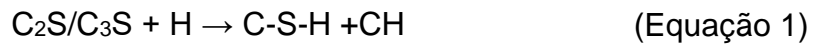
A casca de arroz, retirada durante o beneficiamento do grão, é um resíduo derivado do descascamento do arroz e considerado um rejeito agrícola (GONÇALVES, 2009). Na indústria, esse rejeito é utilizado como fonte de energia térmica e elétrica, quando utilizado o processo de combustão, pois possui poder calorífico aproximadamente de 3000 kcal/kg. A energia elétrica em sua maior parte, é produzida através de recursos não renováveis, então quando uma parte da geração de energia ocorre da queima de casca de arroz, esse processo se torna um benefício para o meio ambiente e evita a emissão de gás metano decorrente da decomposição da casca (POUEY, 2006; SILVA, 2019).

A cinza de casca de arroz (CCA) é um subproduto originado da queima da casca e é utilizada na indústria da construção civil como adição mineral. No ano de 2019, foram produzidas 54,5 milhões de toneladas de cimento no Brasil (SNIC, 2019). Entretanto somente 10% de cinza de casca de arroz é adicionada ao cimento produzido, este valor está abaixo do ideal, no estado do Rio Grande do Sul, sendo o valor ideal em massa de clínquer aproximadamente 15% de substituição (SILVA, 2019).

De acordo com Isaia et al. (2017) e Silva (2019), é possível chegar a uma produção de cinza de casca de arroz com quantidade de sílica amorfa superior a 90%, com porosidade e superfície específica entre 50 e 100 m²/g, esses valores são obtidos quando ocorre controle de temperatura de queima, de 500°C por 2 horas, por exemplo. Com essa queima controlada, a cinza produzida é mais reativa e atinge tais propriedades que possibilitam seu uso em concretos. No entanto, Pouey (2006), Isaia et al. (2010) e Isaia (1995, apud SILVA, 2019) sustentam que pode-se obter bons resultados em questão de durabilidade e resistência à compressão de concretos, utilizando CCA sem controle de temperatura durante a queima.

A sílica procedente da CCA reage com o hidróxido de cálcio (CH), resultante da reação de hidratação do cimento, formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H).

O C-S-H adicional, produzido pela reação pozolânica, é similar ao C-S-H produzido pela hidratação do cimento Portland, entretanto mais estável (CORDEIRO, 2009). A reação de hidratação do cimento e da reação pozolânica está descrita pela Equação 1 e 2, respectivamente (MEHTA e MONTEIRO, 2014).



A adição de CCA empregada no concreto não possui somente contribuição na ação química (efeito pozolânico), mas também na ação física (efeito fíler). O efeito fíler ocorre devido as partículas de CCA medirem em torno de 0,1 μm de diâmetro e se alocaem entre as partículas de cimento, diminuindo o espaço para água e formando pontos de nucleação dos produtos da hidratação do cimento, ocorrendo assim o refinamento dos poros e a produção de pastas mais densas (DUART, 2008).

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que as únicas adições minerais que acarretam no melhoramento da resistência mecânica à compressão de concretos em idades de 1 a 3 dias, são a CCA e a sílica ativa. Essa afirmação é comprovada nos trabalhos de Ludwig (2014) e Zunino e Lopez (2014).

Duart (2008) verificou, ao comparar dosagens de concretos com e sem CCA que o traço referência apresentou pouco acréscimo na resistência à compressão entre as idades de 28 e 91 dias, mas nos traços com CCA, houve um acréscimo de no máximo 20% na mesma faixa de idade para todas as relações a/agl (água/aglomerante). Ainda, através do ensaio de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM), foi possível notar que a porosidade dos traços com CCA diminuiu significativamente conforme o decréscimo da relação a/agl, o que não foi verificado nos traços referência.

No Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON) da UFSM foram realizados diversos trabalhos (COPETTI, 2019; DUART, 2008; HOPPE, 2005; JÚNIOR, 2010; TRINDADE, 2012; LIMA, 2018;) e elencam algumas vantagens do uso da CCA no concreto:

- a) Resultados satisfatórios em questão de resistência mecânica e durabilidade utilizando CCA tanto com ou sem moagem;
- b) Melhoramento na resistência à compressão;

- c) Diminuição da permeabilidade;
- d) Diminuição da absorção de água;
- e) Diminuição da resistência elétrica.

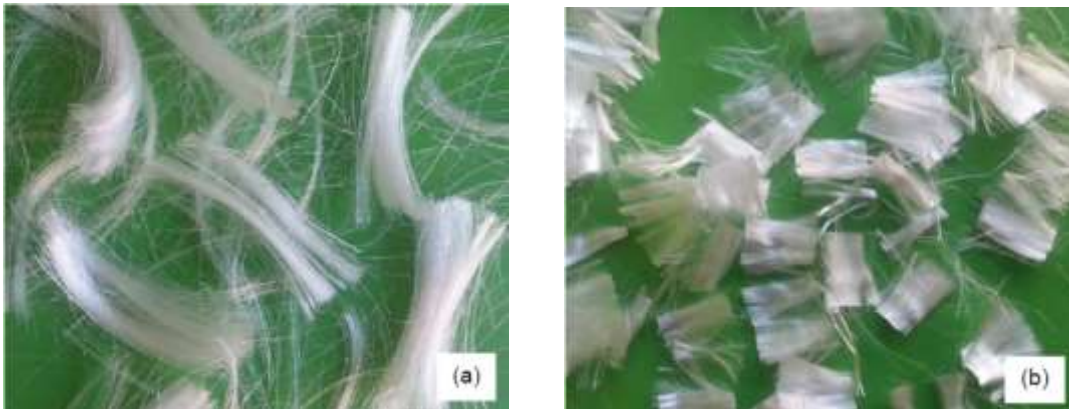
A CCA por ter uma superfície específica maior do que a do grão de cimento, resulta em uma quantidade maior de água na dosagem do concreto, provocando a diminuição da resistência. Entretanto, isso pode ser corrigido acrescentando aditivos superplastificantes, assegurando os benefícios da utilização de CCA em concretos. (SILVA, 2007).

2.2 Concreto reforçado com fibras de polipropileno

O concreto é material que apresenta um comportamento notoriamente frágil e uma capacidade de deformação relativamente baixa antes da ruptura quando submetido a esforços de tração. A capacidade de resistir aos esforços de tração é perdida uma vez que fissurado. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a resistência à compressão geralmente é superior em torno de 7 a 11% quando comparada com a resistência à tração. Uma das técnicas para o melhorar o desempenho do concreto à tração é a utilização de fibras no concreto (PLIZZARI e MINDESS, 2019).

Assim como as de aço, as fibras de polipropileno são utilizadas como reforço de concretos em escala industrial, como por exemplo, em obras de barragens, túneis, pontes, canais de irrigação, estações de tratamento de águas e esgoto e, principalmente, em pavimentos e pisos de concreto. Entretanto, por possuírem baixo módulo de elasticidade, ou seja, inferior ao do concreto endurecido, as fibras são utilizadas para o controle de fissuras por retração que aparecem durante a hidratação inicial do concreto (MINDESS, 1995; apud MONTEIRO, 2014).

As fibras de polipropileno podem ser separadas em duas categorias: as macrofibras e microfibras, as microfibras, por sua vez, são fornecidas em monofilamentos ou fibriladas. As fibriladas (Figura 1a) apresentam-se como uma malha de finos filamentos de seções retangulares, que devido ao efeito de intertravamento, promovem o aumento da adesividade entre a fibra e a matriz. Já as fibras de monofilamentos (1b) possuem como característica fios cortados em comprimento padrão (FIGUEIREDO, 2011).



Fibriladas; (b) Monofilamento.

Figura 1 - Microfibras de polipropileno: (a)

Fonte: Figueiredo, 2011.



As macrofibras de polipropileno (Figura 2) foram desenvolvidas com a mesma finalidade que as fibras de aço, reforço estrutural (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 2 - Macrofibras de polipropileno

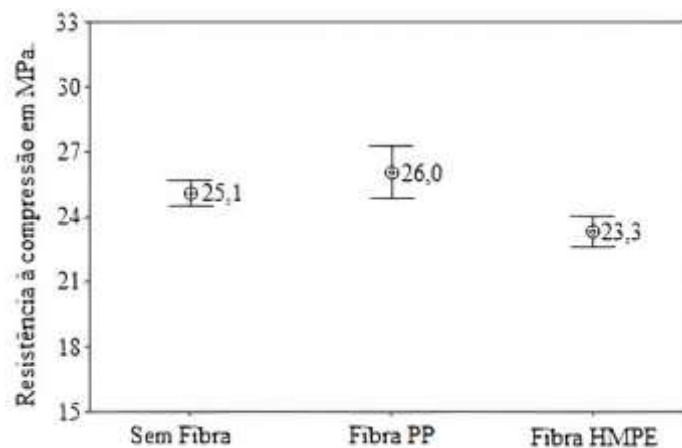
Fonte: Figueiredo, 2011.

Ainda sobre as fibras de polipropileno, sua utilização possui diversos benefícios como já mencionado antes, mas alguns sobressaem-se aos outros, como: alta resistência a álcalis; ponto de fusão um tanto elevado (aproximadamente 165°C), baixa massa específica e baixo custo (MAGALHÃES e REAL, 2011; PLIZZARI MINDESS, 2019).

Diferentemente do concreto convencional, o rompimento de um corpo de prova de concreto reforçado com fibras não ocorre após o aparecimento da primeira fissura. Em decorrência do escorregamento ou arrancamento da fibra, ocorrem pequenas fissuras que gradualmente aumentam de tamanho. Com isso, o tempo de fratura é prolongado e esse efeito é conhecido como tenacidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Júnior, Silva e Moravia (2017) em sua pesquisa observaram um ganho significativo de 16,3% na tenacidade em relação ao concreto convencional, esse ganho está associado a capacidade que a fibra de polipropileno possui de aumentar a absorção de energia do concreto antes da ruptura, ou seja, consegue-se maior deformação até a ruptura. Os resultados quanto ao ganho de tenacidade aos 7 dias estão apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Ganho de tenacidade aos 7 dias



Onde:

PP – Polipropileno

HMPE – Polietileno de alto módulo

Fonte: Adaptado Júnior, Silva e Moravia, 2017.

De acordo com Bentur e Mindess (2007), as maiores limitações das fibras de polipropileno são:

- Baixa resistência ao fogo;
- Sensibilidade à exposição solar;
- Presença de oxigênio;
- Baixo módulo de elasticidade;
- Baixa capacidade de aderência à matriz cimentícia.

Apesar disso, essas desvantagens não são necessariamente críticas. A mistura de material cimentício com polímero, por exemplo, possui características de módulo de elasticidade, ductilidade, resistência mecânica, tenacidade e desempenho pós-fissuração mais adequados aos diversos usos, quando comparados às propriedades de seus componentes separadamente. O material cimentício é responsável pelo preenchimento dos espaços vazios e o polímero por realçar as propriedades mecânicas do material (LUCENA, 2017).

2.3 O comportamento do concreto em altas temperaturas

Quando uma estrutura é projetada, a prioridade máxima é a segurança dos indivíduos que irão ocupar a edificação, por este motivo devem ser analisadas as inúmeras combinações possíveis de ações que podem levar uma estrutura ao colapso, mesmo as extraordinárias, como é o caso de um incêndio. O concreto tem se apresentado um aliado importante na segurança contra incêndio, isso se deve pelo seu comportamento ser superior ao do aço e da madeira quando submetidos a altas temperaturas. O melhor comportamento é justificado pelo concreto ser incombustível, não emitir gases tóxicos, apresentar baixa condutividade térmica e alto calor específico, ou seja, mesmo sendo exposto a temperaturas na ordem de 700 a 800°C, o concreto consegue conservar uma resistência suficiente por um período satisfatório, de tal modo a prolongar a vida útil da estrutura até que as operações de resgate e evacuações sejam finalizadas (MEHTA e MONTEIRO, 2014; DIAS, 2019).

As alterações estruturais sofridas pelo concreto em decorrência das altas temperaturas podem ser categorizadas em dois níveis; micro e macro. As microestruturais ocorrem na pasta de cimento hidratada e nos agregados, já as macroestruturais são mensuradas em termos de fissuração, propriedades físicas e mecânicas e coloração do concreto (ROCHA et al., 2017).

A palavra complexa descreve bem a análise do concreto aquecido, pelo mesmo ser um compósito de diversas fases e possuir diferentes comportamentos. Hager (2013) e Qianmin et al. (2015) relatam que a resistência de concretos está diretamente relacionada à composição dos agregados na dosagem, relação a/agl, adição de pozolanas, presença de fibras, taxa de aquecimento e tempo de exposição.

Devido ao somatório de todos esses fatores mencionados, ocorre alterações nas propriedades do concreto, sobretudo, na resistência mecânica e na perda de massa.

2.3.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto possui a tendência de decrescer com o aumento de temperatura (LIMA, 2005). O decréscimo da resistência de diferentes concretos após tratamento térmico está apresentado na Figura 4 e na Figura 5.

Figura 4 - Redução da resistência à compressão com o aumento da temperatura em concretos submetidos a diferentes resfriamentos

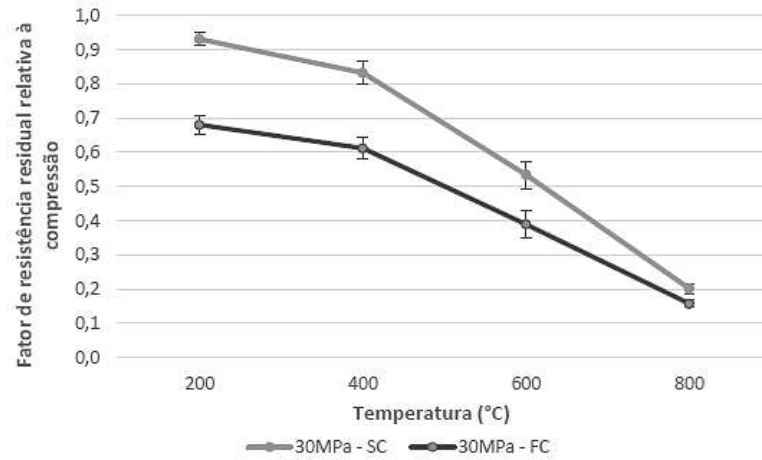
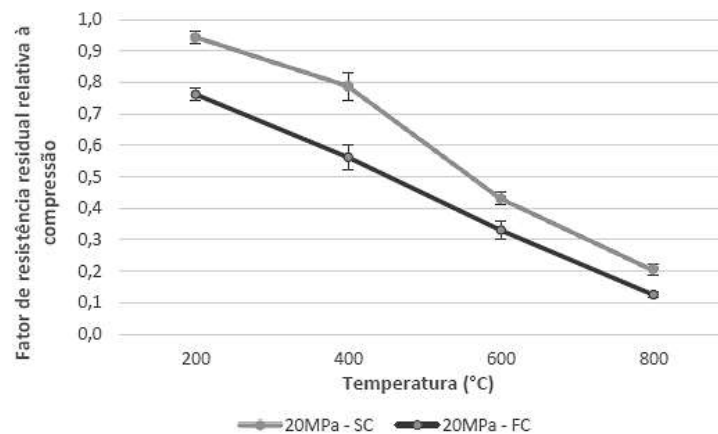


Figura 5 - Redução da resistência à compressão com o aumento da temperatura em concretos submetidos a diferentes resfriamentos



Onde:

SC – Resfriamento lento;

FC – Resfriamento brusco.

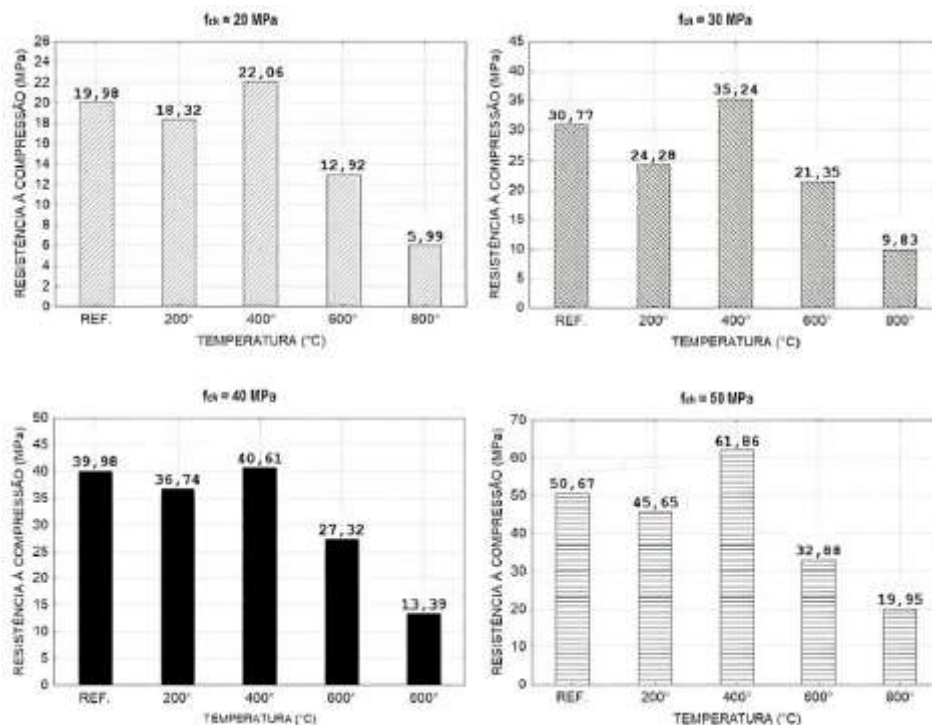
Fonte: Adaptado Teixeira, 2018.

Durante o aquecimento os componentes que fazem parte da matriz do concreto sofrem inúmeras reações químicas e físicas. Por exemplo, quando atingida a temperatura de 100°C, se inicia a evaporação da água livre, as primeiras fissuras capilares surgem e a abertura dos poros se fazem presente, que geram aumento da porosidade do concreto. Em decorrência desse fenômeno, o acúmulo de vapor de água nos poros aumentam e se concentram nas extremidades das fissuras levando ao aumento das tensões e propagando-as. Dessa maneira, reduzindo levemente a resistência do concreto (GUO e SHI, 2011).

Já entre 200°C e 400°C, ocorre a evaporação completa da água livre. Em

função dos coeficientes de dilatação térmica da pasta e do agregado serem diferentes, ocorre o surgimento de fissuras na matriz pasta-agregado, as quais são responsáveis pela diminuição da resistência (GUO e SHI, 2011). Entretanto nestas faixas de temperatura é notado um aumento de resistência, essa possibilidade de ocorrência se dá devido à liberação da água combinada do gel de cimento, que proporciona o endurecimento do gel ou o aumento das forças de atração entre as camadas de C-S-H (CASTILLO e DURRANI, 1990; GUO e SHI, 2011; Dias et al. 2020). A extensão do ganho de resistência varia e depende das propriedades dos materiais e dos traços utilizados. A elevação da resistência a medida que a temperatura aumenta depende da porosidade do concreto, ou seja, essa manifestação tende a acontecer em temperaturas mais altas quando se têm um concreto com baixa porosidade. Este comportamento pode ser notado nos estudos de Lima (2005), Kirchhof (2010), Ma et al. (2015) e Dias et al. (2020). Na figura 6 estão apresentados os resultados obtidos por Dias et al. (2020).

Figura 6 - Resistência à compressão de concretos de diferentes resistências após serem aquecidos



Fonte: Adaptado Dias et al. (2020).

Acima de 400°C, as fissuras em volta do agregado gráudo começam a crescer e se expandir. Nesse meio tempo, conforme o aumento de volume acontece a

liberação da água presente nos produtos de hidratação, fazendo com que as fissuras se expandam ainda mais, gerando a rápida diminuição da resistência do concreto (GUO e SHI, 2011).

Segundo Lorenzon (2014), nas faixas de temperaturas entre 500°C e 600°C há dissociação do C-S-H, que é a razão de manter a pasta de cimento unida, em CaOH e água, reduzindo as ligações químicas e as forças de *Van der Waals*. Fora que têm a abrupta expansão dos agregados silicosos em temperaturas próximas a 570°C, decorrente da mudança de fase α para β do quartzo (NEVILLE, 2015).

Nas temperaturas acima de 600°C, a desidratação do cimento e a decomposição dos agregados formam os compostos de quartzo com grande volume. No interior do agregado se inicia o aparecimento de fissuras, e a resistência do concreto decresce de forma acelerada (GUO e SHI, 2011).

A norma brasileira NBR 15200 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio (ABNT, 2012) especifica os fatores de redução para a resistência à compressão de concretos com agregados, em especial os silicosos, e de massa específica normal, isto significa, concretos que apresentam densidade na ordem de 2000 kg/m³ a 2800 kg/m³. Os valores para cada faixa de temperatura estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - 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

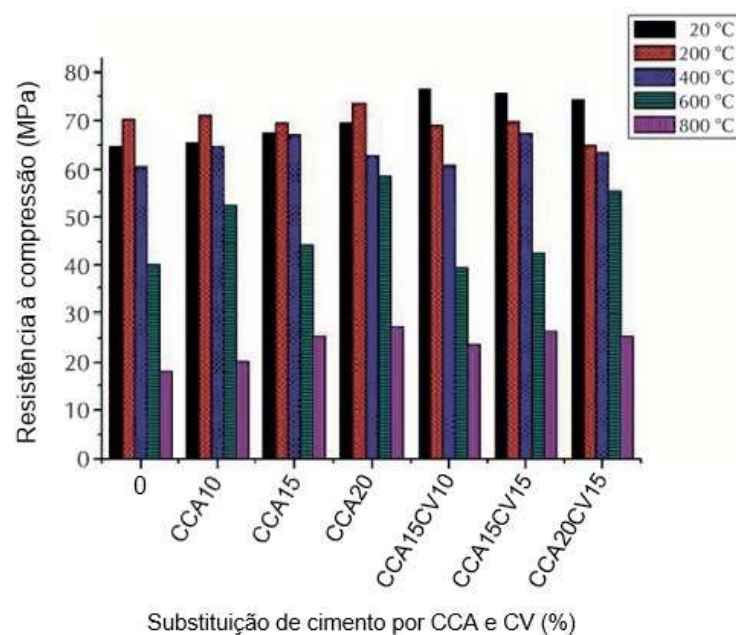
Fonte: adaptado NBR 15200, 2012.

A degradação dos materiais sob elevadas temperaturas afeta diretamente a resistência pós aquecimento. Além de que, está sob influência de mais dois fatores, a permeabilidade do concreto e taxa de aquecimento, pois estão intimamente associados à dissipação das pressões internas produzidas pelos gases resultantes

das decomposições dos produtos hidratados do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

As adições minerais têm-se tornado aliadas da resistência de concretos quando submetidos às altas temperaturas. Concretos convencionais possuem menor quantidade de gel de C-S-H comparados com os que possuem incorporação de pozolanas, pois os mesmos produzem através de reações pozolânicas, o gel de C-S-H adicional. Deste modo, quando aquecidos, se tem maior liberação dos compostos em forma de vapor. Por possuírem uma matriz mais densa, a permeabilidade desses concretos é menor e acarreta em concentração de tensões, em virtude das poropressões, principalmente na zona de transição, ocasionando a degradação acelerada da resistência (BERTZ, 2000 apud ALMEIDA, 2017). No entanto, Wang et al. (2017) observaram em sua pesquisa que o desempenho da resistência à compressão de concretos que continham incorporação de pozolanas, frente as altas temperaturas, eram superiores em relação aos concretos que não possuíam nenhuma incorporação de material pozolânico. Os autores apontam que o melhor desempenho pode estar associado ao fato de ocorrerem novas reações pozolânicas após a liberação de água livre que escapa pelos poros do concreto durante o aquecimento. Seus resultados podem ser observados na Figura 7.

Figura 7 - Resistência à compressão de concretos com substituição de cimento por CCA e CV em diferentes temperaturas



Fonte: Adaptado Wang et al. (2017).

O comportamento do concreto frente às altas temperaturas pode ser melhorado com a adição de fibras de baixo ponto de fusão, como é o caso das fibras de polipropileno (LIMA 2005; PLIYA, BEAUCOUR e NOUMOWÉ, 2011; XIONG e LIEW, 2015; LIU, TAN e YAO, 2018). Por via de regra, quando se utilizam teores elevados de fibras na preparação do concreto, pode ocorrer uma redução na resistência à compressão decorrente do aumento da porosidade e do teor de ar incorporado. Ainda, ocorre que a aderência entre as fibras e os agregados do concreto é muito baixa, colaborando para o decréscimo da resistência à compressão (ABAEIAN; BEHBHANI; MOSLEM, 2018).

Entretanto, quando se têm a combinação da utilização de teores adequados de fibras com misturadores e vibradores, é possível obter concretos com resistência à compressão superior aos que não possuem fibras. Porém, em grande parte dos estudos envolvendo a utilização de fibra de polipropileno, o acréscimo na resistência não foi expressivo. As pesquisas de Afroughsabet e Ozbakkaloglu (2015) e Wang et al. (2019) demonstram pequenos acréscimos na resistência à compressão de concretos, mas não ao ponto de serem significativas.

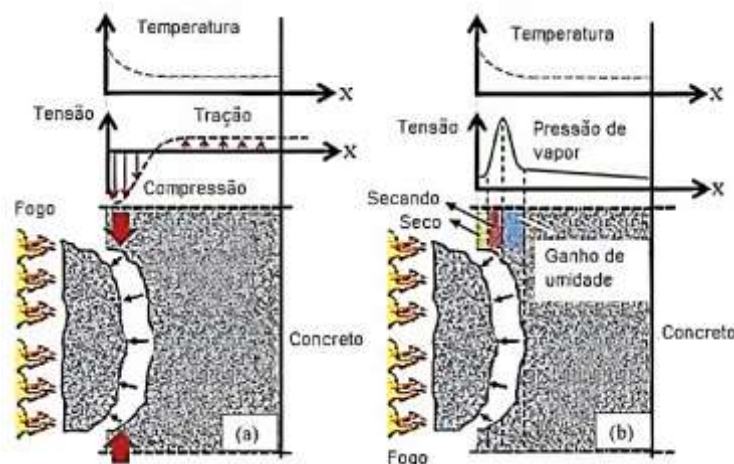
2.3.2 O *spalling*

Na ocorrência de um incêndio, as estruturas estão propensas a manifestar um fenômeno, conhecido como *spalling*, que afeta diretamente as armaduras e por consequência a integridade da estrutura, podendo levar ao seu colapso parcial ou até mesmo total (MENON et al., 2019). A porosidade, a rede dos poros, o teor de umidade, a resistência do concreto, o tipo de agregado, a taxa de aquecimento, o tempo de exposição ao fogo e o tipo de resfriamento, são os principais fatores relacionados ao surgimento do *spalling* (KHOURY, 1992; COSTA, FIGUEIREDO e SILVA, 2002; KIRCHHOF, 2010; MENON et al., 2019; DIAS et al., 2020; KIRCHHOF et al. 2020).

Existem duas formas que o *spalling* pode se manifestar, por poropressões e/ou por tensões térmicas. A origem da poropressão é quando a água presente no interior do concreto ferve e se torna vapor, e este tende a percolar da região interna para a exterior do concreto. A percolação desse vapor d'água não ocorrerá de forma rápida se a estrutura dos poros for densa e a taxa de aquecimento for lenta. Deste modo,

acarretará em acúmulo de tensões nos poros, e quando a resistência à tração for ultrapassada, é neste exato momento que ocorrerá o *spalling* (MEMON et al., 2019; MAIER, ZEIML e LACKNER, 2020). Por outro lado, as tensões térmicas se originam quando se têm aumento de temperatura na superfície do concreto, paralelamente existem tensões de compressão a superfície aquecida e concomitantemente tensões perpendiculares de tração a ela. E quando essa combinação de tensões supera a resistência à tração concreto resulta no *spalling* (MAIER, ZEIML e LACKNER, 2019). Essas formas estão ilustradas na Figura 8.

Figura 8 - Formas de ocorrência do spalling no concreto: (a) Tensões térmicas; (b) Poro-pressão.



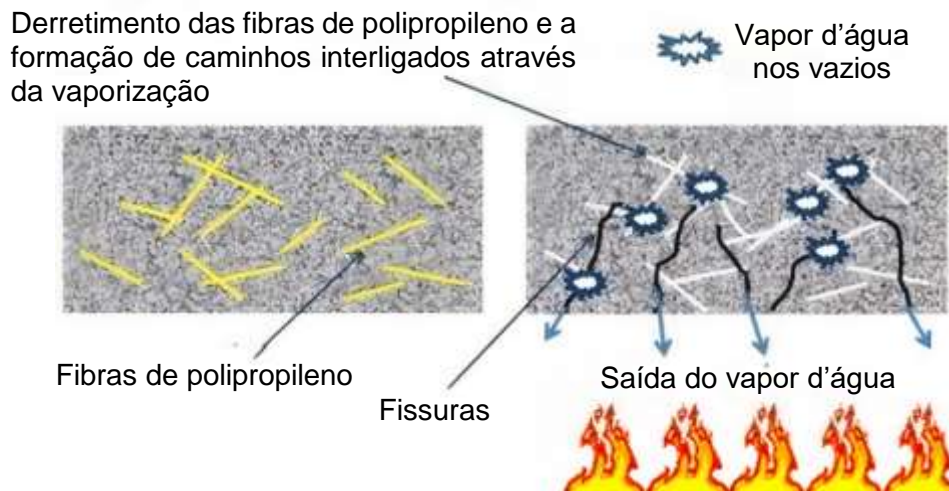
Fonte: Adaptado Memon et al., 2019.

O comportamento do concreto frente às altas temperaturas pode ser melhorado com a adição de fibras de baixo ponto de fusão, como é o caso das fibras de polipropileno. Entre 160 °C e 170 °C, começa-se o derretimento dessas fibras, ocorrendo assim, redução significativa do volume inicial ocupado. Em decorrência do aumento de temperatura, os filamentos se degradam e vaporizam por completo na faixa de 350 °C a 360°C, porém ainda sobram alguns resquícios e estes ocupam em torno de 5% do volume inicial (PLYA; BEAUCOUR; NOUMOWÉ, 2011, XIONG e LIEW, 2015; LIU, TAN e YAO, 2018).

Os vazios provocados na matriz cimentícia através do derretimento das fibras acabam facilitando que o vapor d'água seja dissipado. Além de criar novos poros, o derretimento promove microfissuras na ponta das fibras, criando uma conexão com os poros já existentes do concreto. Desse modo, as zonas de alta pressão são reduzidas e conseqüentemente o fenômeno spalling, conforme mostra a Figura 9 (BEHNOOD e

GHANDEHARI, 2009; OZAWA e MORIMOTO, 2014; YERMAK et al., 2017; MEMON et al., 2019; MAIER, ZEIML e LACKNER, 2020).

Figura 9 - Ação das fibras de polipropileno na ocorrência do spalling



Fonte: Adaptado de Ozawa e Morimoto (2014).

Entretanto, existem diversos fatores que devem ser levados em consideração para minimizar os efeitos ocasionados pelo *spalling*, e são eles: o fator de forma, a orientação, o diâmetro, o comprimento, o teor de fibras adicionado, o ponto de fusão, o ponto de fulgor e entre outros (SERRANO et al., 2016).

As fibras de polipropileno que se apresentaram mais eficientes são constituídas por monofilamentos com diâmetros na ordem de 10 a 100 μm e comprimento de 3 a 20 mm. Para a produção de concreto são mais usuais as proporções de 1 kg/m^3 a 3,5 kg/m^3 de fibras. Quantidades inferiores a 1 kg/m^3 a eficiência é diminuída (LURA e TERRASI, 2014; MAZZUCCO; MAJORANA; SALOMONI, 2015; SERRANO et al., 2016 ; KHALIQ e KODUR, 2018; GANASINI, 2019).

Connoly (1995, apud Kirchhof, 2010) categoriza o *spalling* em quatro níveis, e são eles:

- 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*.

Já para Purkiss (2007), o *spalling* pode ser categorizado em dois níveis: *sloughing* e *spalling* explosivo. O *sloughing* é quando acontece a desagregação de

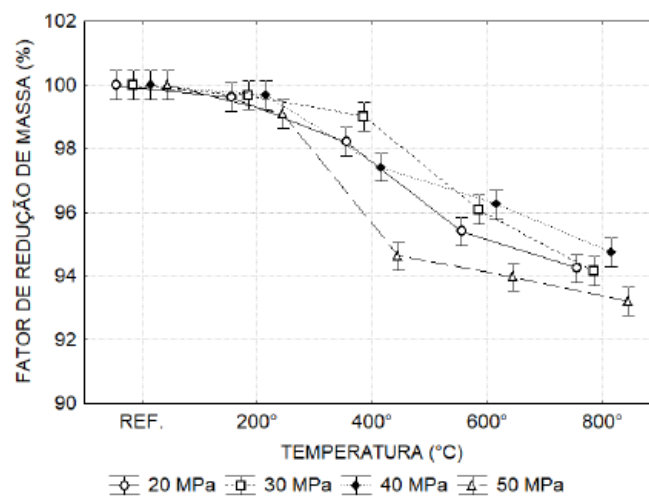
uma fração superficial considerável do concreto, fazendo com que novas camadas fiquem expostas à altas temperaturas e possibilitando o acontecimento do fenômeno novamente. No entanto, o *spalling* explosivo é o conjunto da grande liberação de energia com a perda parcial de material, acarretando na formação de grandes cavidades (SOUZA, 2014).

Almeida (2017) sustenta que concretos com CCA possuem maior quantidade de gel C-S-H do que em concretos convencionais e por este motivo há maior liberação de vapor d'água quando são aquecidos em temperaturas acima de 150 °C. Ainda em sua pesquisa observou que a menor resistência residual era em concretos com incorporação de CCA e foi notado o fenômeno *spalling* na camada superficial do corpo de prova.

Abaeian, Behbahani e Moslem (2018) estudaram teores de fibras entre 1 kg/m³ e 3 kg/m³ em concretos de alto desempenho. Genericamente, todos os traços estudados possuíram suas propriedades alteradas em função da exposição às altas temperaturas. No entanto, concretos sem fibras tiveram maiores danos do que os demais.

Dias et al. (2020) constataram que ocorre perda de massa a medida que ocorre o aumento de temperatura e justificam que a perda de massa está ligada ao fato de água livre evaporar. O comportamento pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Influência de diferentes concretos na perda de massa quando expostos a elevada temperatura



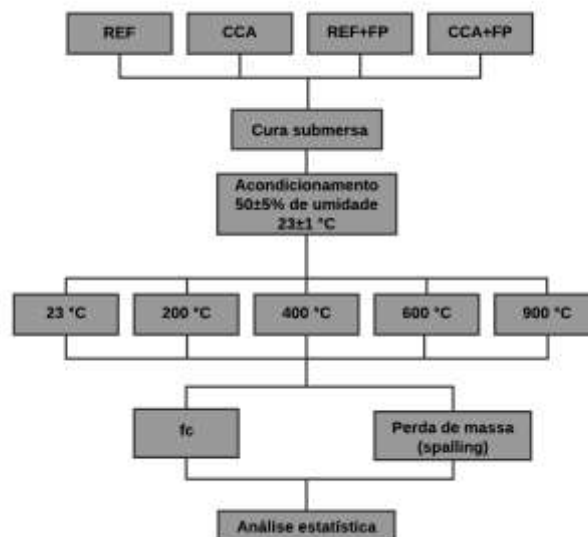
Fonte: Dias et al. (2020).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o programa experimental, os materiais utilizados e as atividades realizadas, afim de atingir os objetivos propostos no capítulo 1, relacionado ao estudo do comportamento de concretos com substituição parcial de cinza de casca de arroz e adição de fibra de polipropileno em situação de altas temperaturas.

De acordo com o programa experimental é definido os ensaios e as etapas necessárias para a execução em laboratório. Para isso, segue a figura 11 onde está representada uma programação estabelecida.

Figura 11 - Fluxograma do programa experimental do trabalho



Fonte: Autor, 2020.

Para a realização desta pesquisa utilizou-se o Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), da Universidade Federal de Santa Maria, na cidade de Santa Maria – RS. No mesmo foi feita a preparação, moldagem, acondicionamento e a realização dos ensaios das amostras.

Foram executados 4 traços, baseados nas pesquisas de Silva (2019) e Kramer (2019), onde os traços ficaram definidos como: referência (REF), 25% de substituição de cimento Portland por CCA (CCA), referência com adição de fibra de polipropileno (REF+FP) e 25% de substituição de cimento Portland por CCA com adição de fibras de polipropileno (CCA+FP).

Cada um dos traços possuem 40 corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm, sendo o primeiro traço de concreto referência (REF), o segundo com 25% de

substituição de cimento Portland por cinza de casca de arroz (CCA), o terceiro sendo o traço referência com adição de fibra de polipropileno (REF+FP), e o último traço com 25% de substituição de cimento Portland por CCA com adição de fibras de polipropileno (CCA+FP).

As variáveis dependentes e independentes foram definidas da seguinte forma: materiais componentes como adições, dosagem (traço e relação água/aglomerante) e temperatura foram consideradas como variáveis independentes, todas definidas inicialmente no projeto de pesquisa.

As variáveis dependentes são os parâmetros apresentados pelo concreto após a sua produção, sendo elas:

- a) Resistência à compressão axial;
- b) Perda de massa.

Os processos de reidratação dos CPs através do resfriamento por água ou exposição ao ar por longos períodos não estão sendo contemplados nesta pesquisa.

3.1 Materiais

3.1.1 Aglomerantes

O cimento utilizado foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CPV – ARI. Este foi selecionado por apresentar o mais baixo teor de adições quando comparado aos demais tipos de cimento.

A cinza de casca de arroz (CCA) utilizada é um sub-produto industrial proveniente da queima sem controle de temperatura, de uma indústria localizada em Santa Maria – RS. A CCA passou pelo processo de moagem em moinho de bolas e permaneceu por uma hora no equipamento, no LMCC, da UFSM.

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

- Composição química (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);
- Difração de raios-x (ABCP, LAPAM);
- Finura por peneiramento (NBR 11579, 2013);
- Índice de desempenho da CCA com cimento Portland (IAP) (NBR 5752, 2014);

- Massa específica (NBR 16605, 2017)
- Resistência à compressão axial com argamassa normal a 3, 7 e 28 dias (NBR 7215, 2019);
- Superfície específica BET (LAPAM, LACER).

Os resultados de caracterização dos aglomerantes serão apresentados a seguir:

3.1.1.1 Cimento

Na Tabela 2 e 3 são apresentados, respectivamente, a composição química e perda ao fogo e as características físicas do cimento CPV-ARI.

Tabela 2 - Composição química e perda ao fogo do cimento CPV-ARI

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

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

Tabela 3 - 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

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

A composição química e a perda ao fogo da CCA se encontram na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição química e perda ao fogo da cinza da casca de arroz

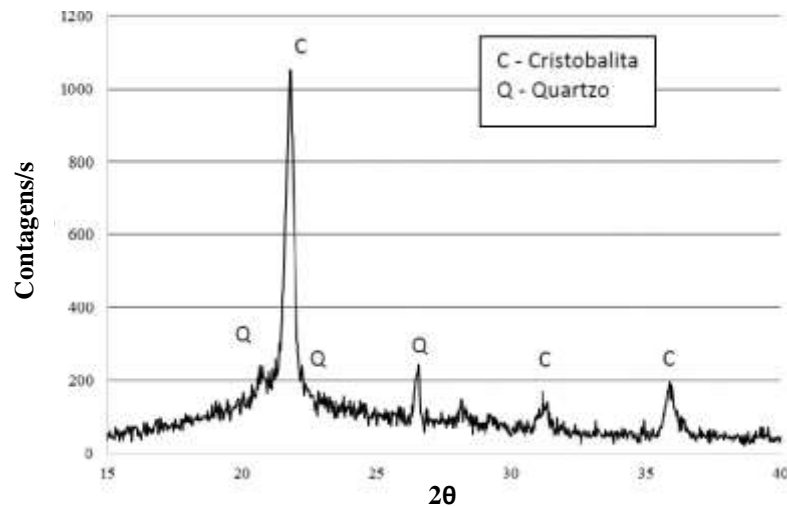
Composição química	Teor em massa (%)
Oxido de Cálcio (CaO)	2,19
Dióxido de Silício (SiO ₂)	87,72
Oxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	0,46
Oxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	0,41
Anidrido Sulfúrico (SO ₃)	0,01
Óxido de Magnésio (MgO)	0,53
Óxido de Potássio (K ₂ O)	1,60
Óxido de Titânio (TiO ₂)	-
Óxido de Estrôncio (SrO)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

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

Com a Tabela 4 pode-se classificar a CCA como pozolana Classe E, e atende os requisitos de acordo com a norma brasileira NBR 12653: Materiais pozolnânicos – Requisitos (ABNT, 2014).

No difratograma da cinza de casca de arroz apresentado na Figura 12, percebe-se poucos picos cristalinos de cristobalita e que se trata de CCA predominantemente amorfa, concluindo-se que a queima foi realizada sem controle de temperatura.

Figura 12 - Difratoograma da cinza de casca de arroz



Fonte: Silva, 2019.

As características físicas da CCA estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - 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.

Na Tabela 5 é possível observar que a CCA apresenta elevada superfície específica, se justifica pela a estrutura interna ser bastante porosa e com diversos vazios. Sendo assim, para manter a mesma razão a/agl e mesmo abatimento, fez-se necessário a utilização de aditivo superplastificante quando incorporada a CCA na produção de concreto.

3.1.2 Agregados

Conforme classificada, foi utilizada brita graduada n° 0 ($D_{máx} \leq 12,5$ mm) com origem de rocha diabásica, fornecida pela pedreira Brita Pinhal, localizada na cidade de Itaara – RS.

Como agregado miúdo, utilizou-se areia média ($D_{máx} \leq 2,4$ mm) procedente do areal de Santa Maria – RS. Assim como o agregado miúdo, o agregado graúdo

atende os requisitos estabelecidos pela norma brasileira NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação (ABNT,2009).

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

- Absorção de água do agregado miúdo (NBR NM 30, 2001);
- Absorção de água do agregado graúdo (NBR NM 53, 2009);
- Abrasão Los Angeles do agregado graúdo (NBR NM 51, 2001);
- Composição granulométrica (NM 248, 2001);
- Determinação da massa específica e da massa aparente do agregado miúdo (NM 52, 2009);
- Determinação da massa específica e massa aparente do agregado graúdo (NBR NM 53, 2009);
- Determinação da massa unitária e massa aparente do agregado graúdo (NBR NM 45, 2006);
- Índice de forma do agregado graúdo (NBR 7809, 2019).

3.1.2.1 Agregado miúdo

As características físicas do agregado miúdo são apresentados na tabela 6.

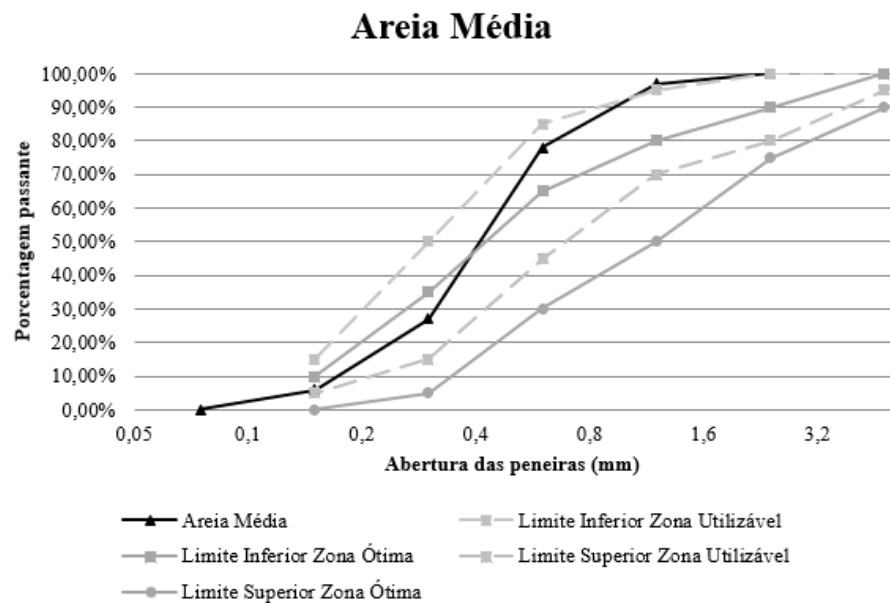
Tabela 6 - Características físicas do agregado miúdo

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

Fonte: Autor, adaptado Silva (2019).

Na distribuição do tamanho das partículas do agregado miúdo apresentada na Figura 13, observa-se que o agregado miúdo está dentro dos parâmetros aceitáveis da norma brasileira NBR 7211 (2009).

Figura 13 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor, adaptado Silva (2019).

3.1.2.2 Agregado graúdo

As propriedades físicas do agregado graúdo são mostrados na tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades físicas do agregado graúdo

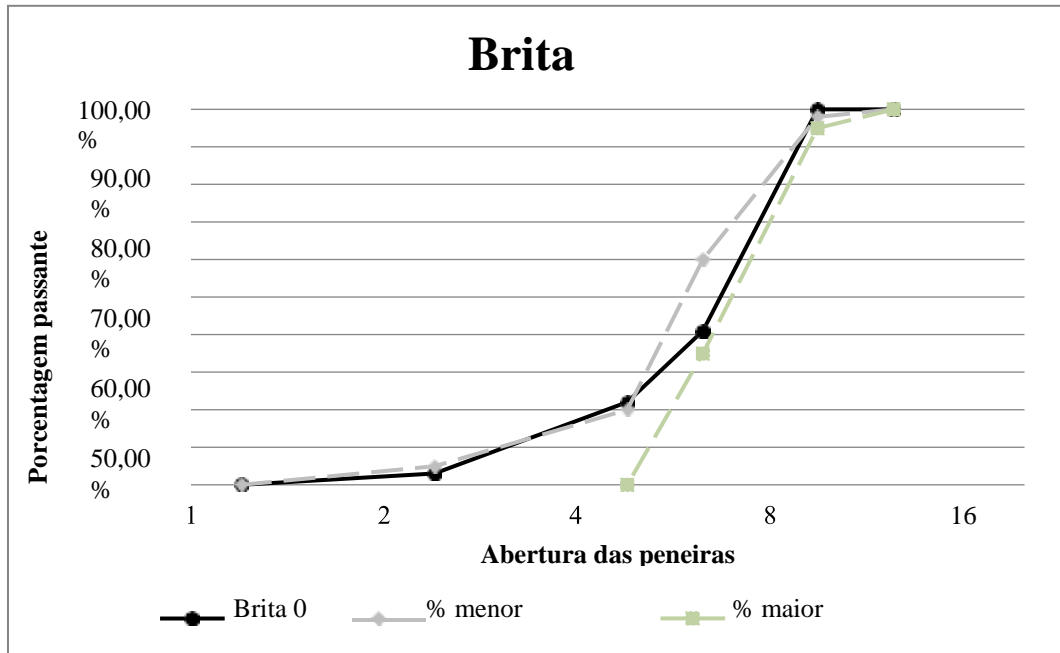
Propriedades	Brita 0
Módulo de finura	3,23
Diâmetro máximo característico (mm)	9,50
Massa específica (g/cm ³)	2,46
Massa aparente (g/m ³)	3,36
Massa unitária (g/cm ³)	1,22
Volume de vazios (%)	50,40
Perda de massa por abrasão Los Angeles (%)	11,07
Índice de forma	2,09
Absorção de água (%)	3,17

Fonte: Autor, adaptado Silva (2019).

A tabela 7 apresenta os índices de forma dos grãos e o desgaste por abrasão “Los Angeles”, os quais atendem os parâmetros estabelecidos pela norma brasileira NBR 7211 (2009).

A composição granulométrica do agregado graúdo é mostrada na Figura 14.

Figura 14 - Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Silva, 2019.

3.1.3 Aditivo

Em todos os traços produzidos, utilizou-se o aditivo superplastificante *Tec Flow 8000*[®], fabricado pela empresa *Grace Construction Products*[®]. As características fornecidas pelo fabricante encontram-se na tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades do aditivo utilizado

Aditivo Superplastificante Tec-Flow 8000	
Aspecto	Líquido
Cor	Alaranjado
Dosagem recomendada (%)	0,3 a 2,0
Massa específica (g/m ³)	1,08 -1,12

Fonte: Autor, adaptado GCP (2020).

3.1.4 Fibra de polipropileno

Foram utilizadas fibras de polipropileno *FibroMac*[®] 12, fabricado pela empresa *Macafferr*[®]. As características fornecidas pelo fabricante referente as fibras se encontram na tabela 9. A fibra utilizada está representada na figura 15.

Tabela 9 - Características da fibra de polipropileno utilizada

Fibra de polipropileno	
Diâmetro (μm)	18
Comprimento (mm)	12
Massa específica (g/cm^3)	0,91
Temperatura de fusão ($^{\circ}\text{C}$)	160
Ponto de ignição ($^{\circ}\text{C}$)	365
Resistência à tração MPa (N/mm^2)	300

Fonte: Autor, adaptado GIM (2020).

Figura 15 - Fibra de polipropileno utilizada



Fonte: Autor, 2020.

3.1.5 Água

Para as concretagens foi utilizada água da 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 25% de substituição de CCA, foram os mesmos utilizados por Silva (2019) em seus ensaios preliminares. A decisão se ateve por duas razões: a resistência a compressão axial superior a 40 MPa, indicando grandes chances de refinamento dos poros, e pelos materiais utilizados em sua pesquisa estarem disponíveis em laboratório.

A quantidade de fibra de polipropileno (FP) foi utilizada na proporção de 1,5

Kg/m³.

Sendo assim, na Tabela 10 são apresentados os traços unitários utilizados neste trabalho, e na Tabela 11 o consumo de materiais por m³ de concreto.

Tabela 10 - Traços unitários

Traços	Cimento	CCA	Areia Média	Brita 0	a/agl	Superplastificante
REF	1	0	1,893	2,291	0,45	0,175%
REF+FP	1	0	1,893	2,291	0,45	0,530%
CCA	0,75	0,25	1,893	2,291	0,45	0,300%
CCA+FP	0,75	0,25	1,893	2,291	0,45	0,720%

Fonte: Autor, adaptado Silva (2019).

Tabela 11 - Consumo de materiais

Traços	Cimento (kg/m ³)	CCA (kg/m ³)	Areia Média (kg/m ³)	Brita 0 (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	FP (kg/m ³)	SP (kg/m ³)
REF	504,40	0	954,93	1155,71	227,22	0	0,883
REF+FP	504,40	0	954,93	1155,71	227,22	1,5	1,158
CCA	378,05	126,34	954,93	1155,71	227,22	0	1,134
CCA+FP	378,05	126,34	954,93	1155,71	227,22	1,5	1,588

Fonte: Autor, adaptado Silva, 2020.

3.2.2 Preparação, moldagem e cura dos corpos de prova

A produção do concreto foi realizada em betoneira de eixo inclinado (Figura 16). Os materiais foram colocados na seguinte ordem dentro da betoneira: agregado graúdo, 50% da água, aglomerante, agregado miúdo e, por fim, os outros 50% da água. A consistência foi verificada por meio do teste de abatimento de tronco de cone, de acordo com a NBR NM 67: Concreto – Determinação da Consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT, 1998). Todos os traços produzidos utilizaram a mesma relação a/agl de 0,45 e, afim de atingir o abatimento de 100±20 mm (Figura 17) foi necessária a utilização de aditivo superplastificante em todos os traços.

Figura 16 - Betoneira de eixo inclinado



Fonte: Autor, 2020.

Figura 17 - Abatimento do tronco de cone



Fonte: Autor, 2020.

Após verificação do abatimento do tronco de cone, utilizou-se uma mesa vibratória para adensar o concreto nos moldes, em duas camadas. Os corpos de prova permaneceram nos moldes por 24 horas e cobertos por plástico, conforme a Figura 17, com a finalidade do concreto não perder umidade para o meio externo. Ao término das 24 horas, foram desmoldados e armazenados em uma caixa d'água com cal para a cura submersa.

Figura 18 - Acondicionamento dos corpos de prova após moldagem



Fonte: Autor, 2020.

Ao terminar os 7 dias de cura submersa, os corpos de prova foram enxugados e acondicionados em ambiente controlado com termo-higromêtros, com finalidade de estabilizar a umidade interna dos corpos de prova, até atingirem a idade para realização dos ensaios. Os parâmetros controlados foram: temperatura e umidade, respectivamente, $50\pm 5\%$ e $23\pm 1^\circ\text{C}$, conforme a recomendação europeia RILEM TC 129-MHT: *Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures* (RILEM Technical Committee, 2004).

Segundo Metha e Monteiro (2014), concretos com adições pozolânicas apresentam estabilidade em sua resistência mecânica após 90 dias, e anteriormente a este período as reações químicas podem interferir na resistência à compressão, sendo assim, decidiu-se realizar os ensaios 91 dias de idade.

3.2.3 Exposição às altas temperaturas

Quando os corpos de prova atingiram 91 dias, as faces menores foram retificadas e, em seguida, expostos aos patamares de temperaturas em 200°C , 400°C , 600°C e 900°C , de acordo com a literatura, são as temperaturas mais utilizadas afim de analisar o comportamento do concreto em elevadas temperaturas.

Os corpos de prova foram distribuídos dentro da caixa metálica de proteção (Figura 19), de tal modo, a ficarem igualmente espaçados, para que a temperatura

fosse distribuída uniformemente, e a utilização da caixa para prevenir da danificação interna do forno em uma possível ocorrência de spalling.

Figura 19 - Caixa metálica de proteção



Fonte: Autor, 2020.

A taxa de aquecimento programada no forno elétrico industrial, modelo Sanchis (Figura 20), foi de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, conforme a recomendação europeia RILEM TC 129-MHT (2004), para corpos de prova com diâmetro de 100 mm, a mesma também recomenda que, ao chegar no patamar de temperatura desejado para a realização do ensaio, os corpos de prova devem se manter expostos por 60 min para a melhor uniformização da temperatura por todo o corpo de prova. O controle de temperatura interna do forno se deu através de um módulo de registro (*fieldlogger*) da marca Novus®.

Figura 20 - Forno industrial



Fonte: Autor, 2020.

O resfriamento ocorreu de forma lenta e, para garantir que a liberação de calor ocorresse da forma mais gradual possível, a porta do forno ficou entre-aberta de 2 à 3 cm, eliminando a ocorrência de choque térmico até atingir a temperatura ambiente, para que pudessem ser então retirados para posterior ensaio de resistência.

3.2.4 Ensaio realizados

3.2.4.1 Resistência à compressão axial

A determinação da resistência à compressão ocorreu depois que os corpos de prova passaram pelo resfriamento lento, ou seja, em torno de 24 horas após serem submetidos as altas temperaturas. A realização do ensaio foi de acordo com a norma brasileira NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (ABNT, 2007), e para a obtenção da resistência média a compressão, foram utilizados 4 corpos de provas. A resistência à compressão axial foi avaliada com a finalidade de se obter uma análise da perda de resistência entre os corpos de prova que não foram levados ao forno e dos corpos de provas degradados pelas altas temperaturas.

A prensa utilizada para aplicar o carregamento de carga foi uma Instron®, modelo 500HDX-64-67B, com capacidade de força de 1500 kN (Figura 21). Os corpos de prova foram até a ruptura, sendo a tensão máxima a compressão um dos parâmetros utilizados para controle do desempenho mecânico do concreto.

Figura 21 - Ensaio de resistência a compressão axial sendo realizado



Fonte: Autor, 2020

3.2.4.2 Perda de massa

A determinação da perda de massa relacionada ao spalling foi realizada com a pesagem dos corpos de provas de cada traço, antes e após a exposição em altas temperaturas, e aferida a diferença entre as pesagens. Em todas as pesagens, uma balança eletrônica com precisão de 0,01 g, foi utilizada.

3.2.4.3 Análise estatística e tratamento de dados

A coleta de dados, filtragem e tratamento dos dados desta pesquisa se deu através da metodologia utilizada por Silva (2019). Sendo assim, os dados coletados nos ensaios foram filtrados com a finalidade de eliminar os valores espúrios das amostras. Foram considerados suspeitos quando o valor da resposta subtraído da média de suas repetições, era menor que o desvio padrão. Uma vez identificados, foram calculadas novas médias e novos desvios padrões, porém sem considerar esses valores singulares.

Após o tratamento dos dados amostrados, os mesmos foram analisados por

método estatístico. A partir da análise de variância dos ensaios realizados é possível examinar se existem diferenças expressivas entre os tratamentos. Foram analisados por estatística descritiva e análise de variância (ANOVA), de tal modo em que os resultados se apresentassem dentro de um intervalo de confiança de 95%. O Teste de Tukey também foi realizado, com o intuito de evidenciar quais dados tiveram resultados mais significantes.

O valor de “F crítico” ($F_{\text{crít}}$) é um parâmetro para o valor F. Se $F > F_{\text{crít}}$, logo o fator exerce um efeito estatístico significativo sobre o parâmetro, sendo que, quanto maior a distância entre os valores F e $F_{\text{crít}}$, maior a influência do fator sobre este parâmetro. A coluna com o “valor-P” (nível de significância) expressa a chance de que qualquer correlação entre a variável explicada (traços) e o fator (temperatura e perda de massa) seja ao caso. Quando o valor-P < erro do experimento (neste caso, 5%), existem indicativos de que o fator exerça influência estatística significativa sobre o parâmetro, uma vez que, quanto menor este valor, maiores os indicativos de que a correlação entre o fator e a variável explicada não sejam ao caso.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados, analisados e discutidos os resultados de resistência mecânica à compressão residual e a perda de massa em função do aumento de temperatura.

4.1 Resistência mecânica à compressão residual

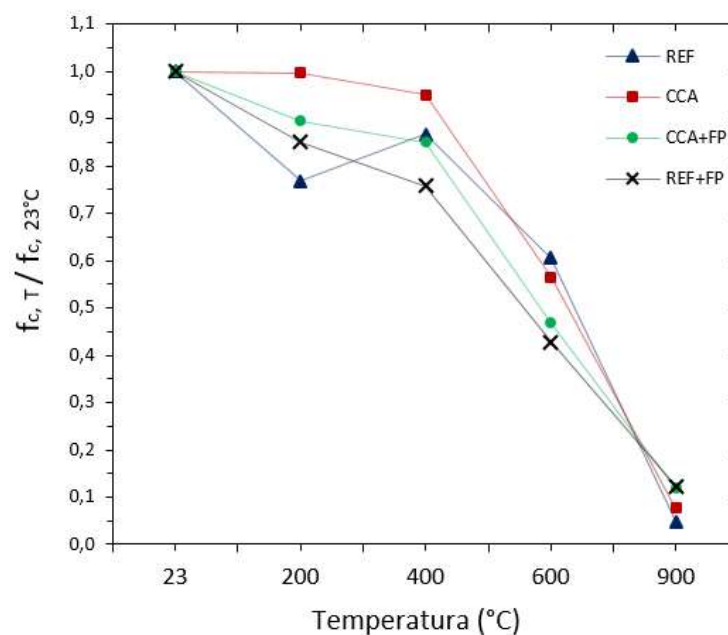
Na Tabela 11 estão apresentados os resultados, e para melhor entendimento do comportamento dos concretos, foram plotados, na Figura 22, os fatores de redução das resistências ($f_{c,T}/f_{c,23^{\circ}\text{C}}$) de cada traço em determinada temperatura.

Tabela 12 - Resistência média à compressão axial em MPa

	23°C	200°C	400°C	600°C	900°C
REF	47,41	36,56	40,34	27,62	2,3
REF+FP	68,36	58,18	51,78	29,24	8,47
CCA	50,53	50,37	47,56	28,54	3,84
CCA+FP	61,54	55,09	52,38	28,85	7,31

Fonte: Autor, 2020.

Figura 22 - Fatores de redução das resistências mecânicas à compressão



Fonte: Autor, 2020.

É possível observar a partir dos resultados apresentados que a resistência é inversamente proporcional ao aquecimento, ou seja, a medida que a temperatura cresce a resistência decresce, independentemente do traço de concreto. O decréscimo até 400°C ocorre de forma menos agressiva, porém após esse patamar nota-se que a resistência apresenta perdas mais expressivas. O padrão dos resultados vai de encontro com o descrito por outros pesquisadores como Lima (2005), Kirchof (2010), Guo e Shi (2011) e Dias et al. (2020).

Na Tabela 13, estão resumidos os resultados da ANOVA para a resistência mecânica à compressão residual, assim como o teste de Tukey na Tabela 14.

Tabela 13 - Análise ANOVA da resistência mecânica à compressão residual

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Traços	0,0193	3	0,0064	1,7289	0,21415974	3,4903
Temperaturas	2,1771	4	0,5344	146,16	4,5546E-10	3,2592
Erro	0,0447	12	0,0037			
Total	2,2411	19				

Fonte: Autor, 2020.

Tabela 14 - Teste *Tukey* para a resistência à compressão residual

	23°C	200 °C	400 °C	600 °C	900 °C
23 °C		0,6038	0,3659	0,0003	0,0001
200 °C	2,059		0,9244	0,0032	0,0001
400 °C	2,666	0,6067		0,0073	0,0001
600 °C	8,464	6,405	5,798		0,0001
900 °C	15,34	13,28	12,68	6,877	

Fonte: Autor, 2020.

Por meio da avaliação dos resultados da Análise de Variância contida na Tabela 13, pode-se observar que o valor de F, foi relativamente inferior ao F crítico, para todos os traços analisados, apontando que os traços não exercem influência estatística significativa nos dados. Além disso, o elevado resultado obtido para o valor-P (menor que 0,05), para todos os traços indicando que não há significância entre os traços e a resistência mecânica à compressão residual, com 95% de confiança.

Já, quando se trata da temperatura, o valor de F foi muito superior ao F crítico, o que indica que há significância estatística nos dados. Ainda, o resultado do valor-P (menor que 0,05), foi extremamente baixo, ou seja, há significância entre a temperatura e resistência mecânica à compressão residual, num intervalo de 5% de chance de erro.

Os resultados do Teste Tukey confirmam que o aumento de temperatura pode resultar em variações significativas na resistência residual.

Quando realizada ANOVA (Tabela 13) evidenciou-se diferenças significativas entre as temperaturas. Porém, através do Teste Tukey, identificou-se em quais faixas de temperaturas que não foram evidenciadas diferenças significativas e são elas: de 23°C até 200°C, de 23°C até 400°C e ainda, entre a temperatura de 200°C à 400°C. Entretanto, para temperaturas acima de 600°C foram apresentadas diferenças significativas (valores menores que o erro adotado).

Apesar da análise de variância não ter indicado que os traços tiveram influência nas resistências, vale ressaltar alguns aspectos. Numa escala em que o fator 1,00 é a resistência em temperatura ambiente (resistência inicial), os traços sem adição de fibras, quando atingem 200°C, como é o caso do traço CCA e REF, os mesmos reduzem seus fatores para 0,99 e 0,77, respectivamente. Neste patamar têm-se pequena queda de resistência, em razão de existir apenas evaporação da água (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O traço CCA em 400°C mostrou leve perda de resistência, permanecendo ainda com fator 0,94, já o traço REF adquiriu ganho de 0,08 quando comparado ao fator 0,77 atingido na temperatura de 200°C, conservando-se assim, em 0,85 da resistência inicial. Esse comportamento do traço sem adição se justificava possivelmente pela água do gel de C-S-H ser liberada e provocar o aumento das forças de *Van der Waals* ou endurecimento do gel de cimento, como já constatado por diversos autores (CASTILLO e DURRANI, 1990; LIMA, 2005; KIRCHHOF, 2010, GUO e SHI, 2011; Dias et al. 2020).

O decaimento considerável em todos os traços foi notado quando atingiu-se a temperatura de 600°C, chegando ao valores de 0,56 e 0,58 de suas resistências originais, para o traço REF e traço CCA, respectivamente. Essas quedas consideráveis são apontadas na literatura entre 500°C e 600°C, pois é entre essas duas temperaturas que ocorre a dissociação do C-S-H em CaOH e água, e a decomposição do hidróxido de cálcio se perpetua ocasionando a inexistência de

coesão entre os compostos que formam a pasta de cimento. Essa sequência de fatores acabam aumentando as fissuras do concreto e justificam a perda de resistência. (CHEN, LI e CHEN, 2009; SOUZA e MORENO, 2010; MEHTA e MONTEIRO, 2014; SEGALIN, 2018). E em 900°C, a redução é bastante agressiva, principalmente para o traço REF, que acaba conservando apenas 0,04 de sua resistência inicial e o CCA com 0,07.

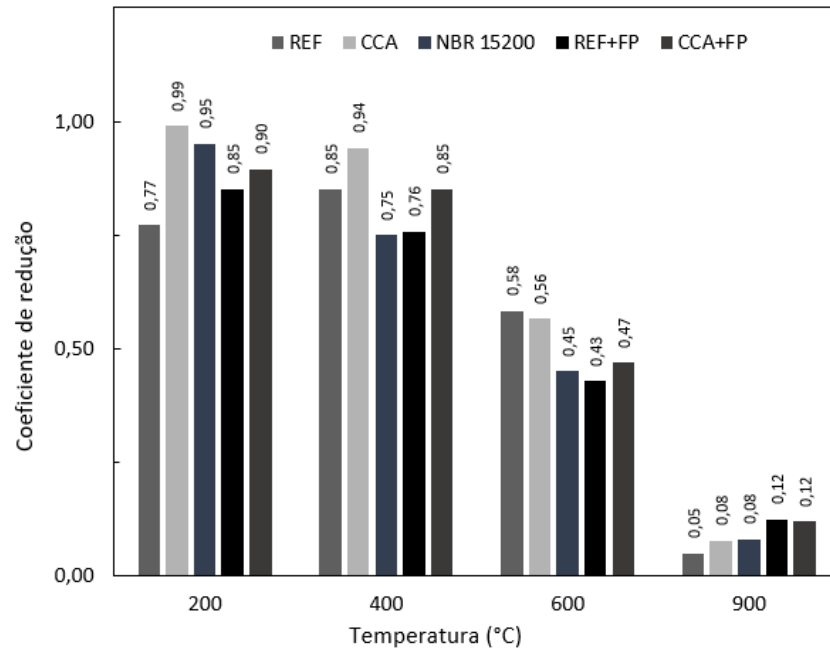
Já entre os traços com adição de fibras de polipropileno, em 200°C o traço CCA+FP foi o que obteve melhor desempenho, preservando 0,9 de sua resistência original enquanto o REF+FA, se manteve 0,85.

Na temperatura de 400°C continuaram apresentando perdas, porém perdas brandas, tendo o traço REF+FP fator de redução igual a 0,76 e o CCA+FP fator igual a 0,85. Na faixa de 300° a 400°C, conforme descrição do fabricante se tem o ponto de ignição da fibra de polipropileno, o que acarreta no derretimento das fibras de polipropileno e elas acabam propiciando a ligeira evaporação d'água, além de criar novos caminhos, reduzindo a pressão interna dos vazios, como ilustra a Figura 9.

Em 600°C, a diferença nos traços que possuem fibras e os que não possuem aumenta disparadamente, o traço REF+FP permaneceu com 0,43 e o CCA+FP com 0,47 da resistência inicial. Por fim, em 900°C, continuou a diferença entre os traços, mas esta conservou-se superior aos traços sem fibras.

De um modo 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 de polipropileno (REF e CCA) obtiveram valores muito próximos ou abaixo do exigido pela norma. Entretanto, os com fibras, em especial o CCA+FP obteve desempenho acima do exigido pela norma em todos os fatores, de acordo com a Figura 23.

Figura 23 - Coeficientes de redução de resistência mecânica



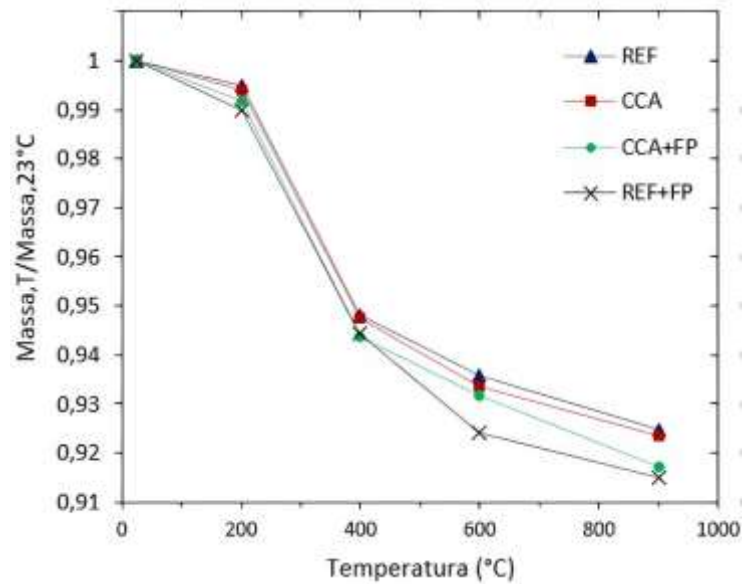
Fonte: Autor, 2020.

4.2 Perda de massa

Analisando todos os traços, de um modo geral eles possuem comportamentos semelhantes entre eles. Na faixa de 200°C a 400°C foi verificada a brusca perda de massa e para temperaturas superiores as perdas foram brandas.

Para o melhor entendimento do comportamento de cada traço em cada temperatura, o gráfico da Figura 24 demonstra os fatores de redução de suas massas ($Massa_{,T}/Massa_{,23^{\circ}C}$).

Figura 24 - Fatores de redução de massa



Fonte: Autor, 2020.

Na Tabela 15 estão apresentados resumidamente os resultados do ANOVA para a perda de massa.

Tabela 15 - Análise ANOVA para a massa residual

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Traços	1,17E-04	3	3,9E-057,4716	0,00441	3,4903	
Temperaturas	0,021033	4	0,005261015,2	4,6E-15	3,2592	
Erro	6,22E-05	12	5,2E-06			
Total	0,021212	19				

Fonte: Autor, 2020

Na Tabela 15, os valores destacados são as diferenças entre os dados que possuem valor abaixo do valor de significância adotado, apontando que os traços e as temperaturas exercem influência sobre a perda de massa.

Tabela 16 - Teste *Tukey* para a perda de massa

	23 °C	200 °C	400 °C	600 °C	900 °C
23 °C		0,0572	0,0001	0,0001	0,0001
200 °C	4,266		0,0001	0,0001	0,0001
400 °C	31,35	27,08		0,8885	0,0001
600 °C	39,88	35,62	8,534		0,0030
900 °C	46,34	42,07	14,99	6,458	

Fonte: Autor, 2020.

O teste Tukey destaca que as mais significativas perdas de massas aconteceram a partir da temperatura de 400°C (valores menores que 0,05).

Conforme constata-se na Figura 24, todos os traços apresentaram o mesmo comportamento quando iniciaram em temperatura ambiente (23°C) até a temperatura de 200°C, isso ocorre devido ao início da evaporação da água livre nos poros (ALMEIDA, 2017). Em 400°C, começam-se a se diferenciar os comportamentos entre os traços, onde o traço CCA+FP possuiu a maior perda, mas com mínima diferença quando comparado com os demais, nesta temperatura ocorre a liberação rápida do vapor d'água em decorrência do derretimento das fibras. Nas temperaturas entre 400°C e 600°C, as perdas estão associadas à desidratação do gel de C-S-H e de outras fases hidratadas (LIMA, 2005; SANTOS, 2012). Em temperaturas superiores a 600°C, o traço REF obteve desempenho superior a todos os traços e em contrapartida o traço REF+FP o pior. Em síntese, fica explícito que a adição de fibras no traços é significativa na perda de massa.

Durante a realização desta pesquisa, não foi notada a ocorrência de *spalling*. Isto pode ser justificado pelo modo em que os corpos de provas foram acondicionados, com controle de temperatura e umidade. Kirchhof (2010) afirma que para que haja a chance de ocorrer *spalling* é necessário que se tenha um teor superior a 75% de umidade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento mecânico de concretos com substituição parcial de cimento Portland por cinza de casca de arroz e adição de fibras de polipropileno no que diz respeito à resistência à compressão, perda de massa e o surgimento do efeito *spalling*, após a exposição a altas temperaturas. Em vista disso, os resultados experimentais permitem concluir para a pesquisa realizada que:

- Independente do traço de concreto exposto a elevadas temperaturas, ocorre a diminuição de resistência mecânica à compressão e o aumento da perda de massa, sendo 600°C a temperatura em que a resistência à compressão mais acentuou as perdas.

- O concreto com CCA apresentou resistência superior ao de referência até a temperatura de 400°C, depois ambos tiveram valores semelhantes.

- A utilização de fibras de polipropileno não interfere significativamente nos resultados de resistência. Entretanto, na perda de massa ficou evidente que contribuiu para o aumento da velocidade de dissipação do vapor d'água aprisionado nos poros do concreto, desta maneira acarretando maior perda de massa em concretos com adições de fibras e amenizando possivelmente a ocorrência de *spalling*.

- Até a temperatura de 400°C as perdas de massa tanto para o concreto referência quanto o para o concreto contendo CCA foram praticamente iguais. Este comportamento foi similar também para os os concretos contendo fibras de polipropileno, que apresentaram perda de massa da ordem de 6%. Porém, em temperaturas superiores a 400°C, o concreto referência apresentou a menor perda de massa (7%), e a adição de fibras influenciou nas perdas de forma significativa (9%).

- Não foi observado *spalling* nos corpos de concreto (cps) cilíndricos (100x200) estudados neste trabalho. Isto pode ter ocorrido devido ou a estas dimensões dos cp's e/ou as condições submetidas dos ensaios, em que não houve a o deslocamento de partes do concreto.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho colaborou com o avanço do conhecimento sobre o comportamento de concretos com substituição parcial de cimento Portland por CCA e adição de fibras após serem expostos às altas temperaturas. No entanto, durante a realização deste trabalho surgiram algumas dúvidas que não puderam ser sanadas devido as limitações do programa experimental. Sendo assim, abaixo encontram-se sugestões de pesquisas para tentar esclarecer estas dúvidas:

a) Estudar diferentes teores de substituição, e também, tempos de moagem para CCA e outras relações a/agl;

b) Analisar diferentes substituições minerais como, por exemplo, fíler calcário, escória de alto forno e cinza volante, além de analisar efeitos de misturas ternárias, pois se possui conhecimento em temperatura ambiente, mas pouco ou quase nada sobre seu comportamento em altas temperaturas;

c) Verificar a influência da adição de diferentes teores de fibras de polipropileno, bem 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.

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.

_____. **NBR NM 67: Concreto – Determinação da Consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998.

ABAEIAN, R.; BEHBAHANI, H. P.; MOSLEM, J. S. Effects of high temperatures on mechanical behavior of high strength concrete reinforced with high performance synthetic macro polypropylene (HPP) fibres. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 631-638, mar. 2018.

AFROUGHSAKET, 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.

AKCA, A. H.; ZIHNIÖĞLU, N. Ö. High performance concrete under elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 317–328, 2013.

ALHOZAIMY, A. M., SOROUSHIAN, P.; MIRZA, F. Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 18, p. 85–92, 1996.

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.

BANGI, M. R.; Horiguchi, T. Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 459–466, 2012.

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.

BEHNOOD, A.; GHANDEHARI, M. Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures. **Fire Safety Journal**, v. 44, n. 8, p. 1015-1022, nov. 2009.

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.

DIAS, A. R. O.; AMANCIO, F. A.; RAFAEL, M. F. C. and CABRAL, A. E. B. **Behavior of concrete subjected to high temperatures**. **Matéria** (Rio J.)1q\.. 2020, vol.25, n.2, e-12629. Epub July 24, 2020.

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.

EZZIANE, M. et al. High temperature behaviour of polypropylene fibres reinforced

mortars. **Fire Safety Journal**, v. 71, p. 324–331, 2015.

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

FONSECA, R. O. **Concretos submetidos a ciclos de temperaturas elevadas: estudos experimentais em corpos de prova localizados em unidades de produção de uma usina siderúrgica**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Espírito Santo, Vitória, 2010.

GANASINI, D. **Concretos de alto desempenho reforçados com microfibras de polipropileno e submetidos a elevadas temperaturas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade do Estado de Santa Catarina, 2019.

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.

GCP. GCP Applied Technologies. **Tipos de produtos disponíveis e principais características**. Disponível em: <https://gcpat.com.br/pt-br/solutions/products/tec-flow>. Acesso em: 11. out. 2020.

GIM. Gruppo Industriale Maccaferri. **Catálogos**. Disponível em: https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/maccaferri/POR_FibroMac_12.pdf. Acesso em 10. out. 2020.

GONÇALVES, E. G.; SABIONI, A. C. S.; FERRAZ, W. B.; COSTA, G. M.; BRITO, W.; DIAS, J. A.; GARCIA, F. A. C. Síntese e caracterização de mulita utilizando sílica obtida da casca de arroz. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, **Metalurgia & Materiais**, v. 62, n° 3, p. 367- 372, 2009.

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.
- JÚNIOR, J. C. A.; SILVA, L. C. F.; MORAVIA, W. G. Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto. **Revista Matéria**, v. 22, n° 01, 2020.
- KHALAF, J.; HUANG, Z. Analysis of the bond behaviour between prestressed strands and concrete in fire. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 12–23, 2016.
- KHALIQ, W.; KODUR, V. Effectiveness of polypropylene and steel fibers in enhancing fire resistance of high-strength concrete columns. **Journal of Structure Engineering**, v. 144, n. 3, p. 1-12, mar. 2018.
- 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.
- KIRCHHOF, L. D.; LIMA, R. C. A.; NETO, A. B. S. S.; QUISPE, A. C.; FIALHO, L. C. P. S. Effect of Moisture Content on the Behavior of High Strength Concrete at High Temperatures. **Revista Matéria**, v. 25, n° 01, 2020.
- KODUR V. K. R. Properties of concrete at elevated temperatures. **ISRN Civil Engineering**, Hindawi Publishing Corporation, v. 2014, 2014.
- KURTZ, S.; BALAGURU, P. Postcrack creep of polymeric fiber-reinforced concrete in flexure. **Cement and Concrete Research**, v. 30, 183–190, 2000.
- 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.

LIU, P. S.; CHEN, G. F. Characterization Methods: physical properties. **Porous Materials**, p. 495-532, 2014

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.

LUCENA, J. C. T. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 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.

LURA, P.; TERRASI, G. P. Reduction of fire spalling in high-performance concrete by means of superabsorbent polymers and polypropylene fibers: Small scale fire tests of carbon fiber reinforced plastic-prestressed self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.49, p. 36-42, 2014

MAGALHÃES, F. C.; REAL, M. V. Análise probabilística do concreto reforçado com fibras utilizado na construção do dique seco do Estaleiro Rio Grande. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 324-346, jun. 2011.

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.

MA, Q.; GUO, R.; ZHAO, Z.; LIN, Z.; HE, K. Mechanical properties of concrete at high temperature - a review. **Construction and Building Materials**, v. 93, n. 1, p. 371-383, set. 2015

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 Engineering, University Sains Malaysia. 2011.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHNEIN, 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.

MAZZUCCO, G.; MAJORANA, C. E.; SALOMONI, V. A. Numerical simulation of polypropylene fibres in concrete materials under fire conditions. **Computers & Structures**, v. 154, p. 17-28, jul. 2015

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 gráfico**. 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.

OZAWA, M.; MORIMOTO, H. Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 83-92, nov. 2014

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.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. 8ª ed. Rio de Janeiro: Globo, 1981.

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.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 2215–2222, 2004.

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

PLIYA, P., BEAUCOUR, A.-L., NOUMOW'E, A., 2011. **Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature**. *Construction and Building Materials* 25, 1926–1934.

PLIZZARI, G.; MINDESS, S. Fiber-reinforced concrete. **Developments in the Formulation and reinforcement of concrete (second edition)**, p. 257-287, 2019.

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.

SERRANO, R.; COBO, A.; PRIETO, M. I.; GONZÁLES, M. N. Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers. **Construction and Building Materials, Madrid**, v. 122, p. 302-309, set. 2016

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, I. O. **Influência da cinza de casca de arroz amorfa e cristalina e da sílica ativa na reação álcali-agregado**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

SILVA, M. P. **Retração total e penetração de cloretos de concretos compostos com CCA de diferentes teores de carbono grafíticos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

SILVA, S. S. **Avaliação de propriedades mecânicas de concreto com altos teores de filer 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/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=44>. Acesso em: 28. set. 2020.

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: análise das propriedades mecânicas residuais**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

TEIXEIRA, G. P. **Análise experimental da resistência e do módulo de elasticidade pós incêndio de concretos com agregados da Região de Viçosa-MG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Viçosa, 2018.

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.

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.

XIAO, J.; FALKNER, H. On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures. **Fire Safety Journal**, v. 41, p. 115–122, 2006.

XIONG, M.; LIEW, J. Y. Spalling behavior and residual resistance of fibre reinforced Ultra-High Performance concrete after exposure to high temperatures. **Materiales de construccion**, v. 65, n. 320, p. 1-10, out. 2015.

YERMAK, N.; PLIYA, P.; BEAUCOUR, A.-L.; SIMON, A.; NOUMOWÉ, A. Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: spalling, transfer and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 240-250, fev. 2017.

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+FP	75,06
	REF+FP	68,78
	REF+FP	64,74
	REF+FP	67,94
	CCA	50,50
	CCA	50,56
	CCA	50,87
	CCA+FP	64,37
	CCA+FP	61,09
	CCA+FP	61,45
	CCA+FP	62,09
	200	REF
REF		36,03
REF		36,56
REF		35,57
REF+FP		56,19
REF+FP		58,83
REF+FP		58,76
REF+FP		56,95
CCA		50,73
CCA		49,40
CCA		50,02
CCA		51,51
CCA+FP		54,94
CCA+FP		55,04
CCA+FP		55,29
CCA+FP		53,77
400	REF	45,07
	REF	40,00
	REF	43,00
	REF	40,34
	REF+FP	58,13
	REF+FP	49,35
	REF+FP	49,47
	REF+FP	56,52
	CCA	47,56

		(Conclusão)	
400	CCA	49,17	
	CCA	36,65	
	CCA	47,35	
	CCA+FP	64,37	
	CCA+FP	53,00	
	CCA+FP	51,88	
	CCA+FP	52,26	
	REF	31,63	
600	REF	26,89	
	REF	27,62	
	REF	32,45	
	REF+FP	28,16	
	REF+FP	28,81	
	REF+FP	30,08	
	REF+FP	28,83	
	CCA	31,35	
	CCA	28,04	
	CCA	29,04	
	CCA+FP	25,00	
	CCA+FP	27,63	
	CCA+FP	29,50	
	CCA+FP	29,41	
	900	REF	1,71
		REF	1,30
REF		5,22	
REF		3,98	
REF+FP		8,07	
REF+FP		8,54	
REF+FP		8,58	
REF+FP		8,29	
CCA		4,27	
CCA		3,74	
CCA		4,01	
CCA		3,84	
CCA+FP		7,25	
CCA+FP		7,18	
CCA+FP		7,50	
CCA+FP		7,91	

Fonte: Autor, 2020.

APÊNDICE B – 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+FP	3753,67	3712,68
	REF+FP	3782,33	3744,82
	REF+FP	3749,02	3713,38
	REF+FP	3755,90	3717,35
	CCA	3692,95	3671,03
	CCA	3733,12	3710,14
	CCA	3680,72	3656,91
	CCA	3735,88	3716,19
	CCA+FP	3625,58	3590,56
	CCA+FP	3642,30	3611,13
	CCA+FP	3652,06	3622,78
	CCA+FP	3586,61	3556,54
400	REF	3773,48	3578,29
	REF	3726,25	3533,52
	REF	3722,26	3527,27
	REF	3746,75	3558,67
	REF+FP	3766,61	3543,43
	REF+FP	3761,16	3545,97
	REF+FP	3802,93	3590,75
	REF+FP	3786,22	3575,89
	CCA	3647,51	3456,79
	CCA	3656,32	3464,01
	CCA	3659,37	3460,66
	CCA	3648,73	3468,90
	CCA+FP	3684,68	3475,04
	CCA+FP	3710,24	3501,36
	CCA+FP	3710,75	3501,95
	CCA+FP	3696,05	3486,6
600	REF	3759,81	3507,38
	REF	3657,34	3422,90
	REF	3733,34	3492,60
	REF	3708,94	3476,34
	REF+FP	3695,47	3411,34
	REF+FP	3679,96	3403,65
	REF+FP	3701,29	3423,38
	REF+FP	3717,07	3431,35

		(Conclusão)	
600	CCA	3641,60	3402,31
	CCA	3630,85	3382,22
	CCA	3645,24	3400,73
	CCA	3626,36	3394,60
	CCA+FP	3669,00	3418,59
	CCA+FP	3634,78	3385,73
	CCA+FP	3652,52	3403,75
	CCA+FP	3648,05	3408,31
	REF	3630,88	3357,70
	REF	3591,21	3293,51
	REF	3628,94	3356,14
	REF+FP	3701,05	3386,54
REF+FP	3746,37	3431,15	
REF+FP	3689,71	3378,03	
REF+FP	3696,49	3381,92	
900	CCA	3618,89	3342,68
	CCA	3630,7	3352,77
	CCA	3611,73	3333,00
	CCA	3607,51	3327,19
	CCA+FP	3638,41	3336,02
	CCA+FP	3625,65	3323,95
	CCA+FP	3606,62	3309,18
	CCA+FP	3638,53	3338,7

Fonte: Autor, 2020.