

# ANÁLISE MACRO E MICROESTRUTURAL DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO SUBMETIDO A ELEVADAS TEMPERATURAS

Andreia Vieira (1), Daiane dos Santos da Silva Godinho (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
(1)[deiahydro@hotmail.com](mailto:deiahydro@hotmail.com), (2)[dss@unesc.net](mailto:dss@unesc.net)

## RESUMO

O concreto apresenta elevada resistência ao fogo, devido sua baixa condutividade térmica, entretanto o mesmo sofre alterações físico-químicas na sua microestrutura durante o processo de aquecimento, causando danos como lascamentos e pipocamentos que promovem a degeneração progressiva da estrutura, podendo levar ao colapso estrutural (SILVA, FIGUEIREDO & COSTA, 2002). O lascamento explosivo ocorre devido ao aumento das pressões nos poros, pela evaporação da água no interior do concreto, podendo ser evitado com a adição de fibras de polipropileno na matriz cimentícia, que se fundem próximo a 160°C, criando uma rede de canais permeáveis que permitem a migração dos gases quentes para a superfície do concreto, reduzindo a poro pressão e os deslocamentos explosivos (PANDOLFELLI, TIBA & CASTRO, 2011). Diante do exposto, a presente pesquisa tem por objetivo o estudo das propriedades mecânicas residuais do concreto de classe C50, bem como da microestrutura do mesmo, submetido a elevadas temperaturas. Para isso foram moldados um total de 64 corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm, divididos em dois traços (com e sem adição de fibra de polipropileno), e aquecidos em mufla nos patamares de temperatura de 100°C, 400°C e 800°C. Após aquecimento, foram realizados os ensaios para análise macro e microestrutural do concreto como Perda de Massa, Compressão Axial, Módulo de Elasticidade, Difração de Raio X e ensaio Termogravimétrico da fibra de polipropileno. Com os resultados observa-se que tanto o concreto com fibra quanto o de referencia sofrem reduções significativas em suas propriedades durante o aquecimento. Os deslocamentos devido a ação da temperatura não foram verificados em nenhum dos concretos com fibras, entretando as mesmas não interferiram na queda de resistência, módulo de elasticidade e perda de massa.

*Palavras-chave: Concreto. Fibra de Polipropileno. Elevadas Temperaturas. Propriedades Residuais*

## 1. INTRODUÇÃO

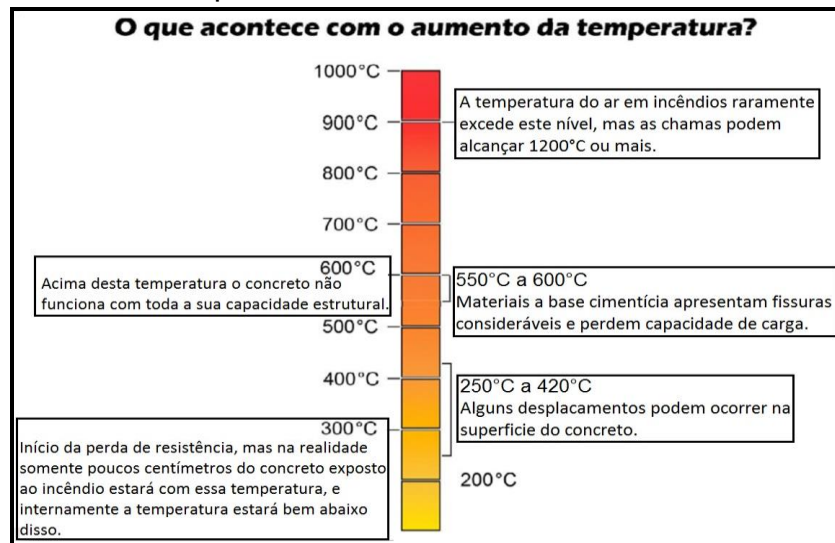
O comportamento do concreto diante a elevadas temperaturas vem se tornando tema de diversas pesquisas desenvolvidas por autores como LIMA (2005), RODRIGUES (2009), COSTA & SILVA (2002), SILVA (2009), FIGUEIREDO & COSTA (2002) e PANDOLFELLI, TIBA & CASTRO (2011). Há uma preocupação crescente com o efeito da alta temperatura em concreto de alta resistência, muito utilizado atualmente, que “permite a concepção de elementos estruturais cada vez mais esbeltos” (LIMA, 2005). Estruturas de menor massa e volume tendem a se aquecer mais rapidamente, causando instabilidade e sérios danos como os lascamentos explosivos e pipocamentos, que causam deslocamentos, deixando a armadura exposta a ação da temperatura (RODRIGUES, 2009; COSTA & SILVA, 2002).

O concreto é reconhecido pela boa resistência diante a elevadas temperaturas, devido as suas características térmicas: é incombustível, possui baixa condutividade térmica e não emite gases tóxicos. Entretanto o efeito da alta temperatura nos elementos de concreto pode causar danos significativos na sua capacidade de resistência e no módulo de elasticidade devido a perda de rigidez, ocasionando um grave problema estrutural (NEVILLE, 1997; METHA & MONTEIRO, 2008; RODRIGUES, 2009; SILVA, 2009; COSTA, 2002).

Com o aumento da temperatura o concreto sofre mudanças físico-químicas, devido a ação térmica da mesma, que podem influenciar as propriedades macroestruturais, como a perda de resistência, módulo de deformação, porosidade e lascamentos explosivos, comprometendo a estabilidade da estrutura (SILVA, 2009; SILVA, FIGUEIREDO & COSTA, 2002; PANDOLFELLI, TIBA & CASTRO, 2011).

Esse processo físico-químico do concreto pode ser simplificado na Figura 1.

Figura 1: Processo físico-químico do concreto submetido a elevadas temperaturas.



Fonte: Isaia (2011)

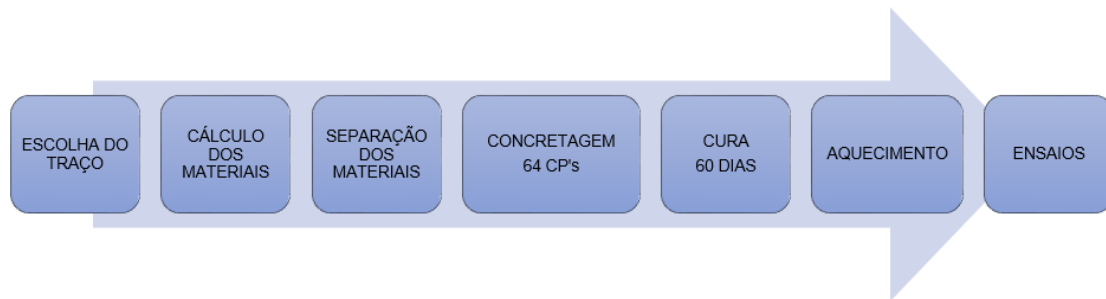
Tais problemas podem ser evitados adicionando-se fibra de polipropileno na matriz cimentícia, a fim de minimizar os danos causados pela ação da temperatura, visto que a mesma se funde com a elevação da temperatura criando poros, reduzindo a pressão no interior desses poros e eliminando os deslocamentos (LIMA, 2005). Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo a análise das propriedades macro e microestruturais do concreto de classe C50 com e sem a adição de fibra de polipropileno na matriz cimentícia, submetido a elevadas temperaturas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir o objetivo do trabalho foi realizado um estudo experimental baseado nas normas técnicas da ABNT NBR 15200:2011, NBR 5738:2003, NBR 5739:2007, NBR 8522:2003 e NBR 9939:2011, desenvolvido nos laboratórios de Materiais de Construção Civil (LMCC), de Cerâmica e Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Conforme fluxograma esquemático do procedimento experimental (Figura 2) foi realizado a escolha do traço baseado em trabalhos já realizados no ano de 2015 por CIMOLIN e SILVA, com o intuito de dar continuidade às pesquisas, além do cálculo dos quantitativos de materiais utilizados para a mistura do concreto.

Figura 2: Fluxograma simplificado do procedimento experimental



Fonte: Autora, 2016

As propriedades dos materiais utilizados nessa pesquisa podem ser observadas na Tabela 1, sendo os mesmos fornecidos pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC).

Tabela 1: Propriedades dos materiais

Material	Tipo	Dimensão máxima característica	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
Cimento	CP IV-32	-	2,82
Agregado graúdo	Diábasio (Brita)	19	2,83
Agregado miúdo	Areia média	6,3	2,54
Fibra	Polipropileno	-	0,90
Hiper plastificante	TEC-FLOW 8000	-	1,10

Fonte: Autora, 2016

O concreto produzido para os ensaios foi dosado para atingir uma resistência característica de 50 Mpa. O traço de referência utilizado para confecção dos corpos-de-prova de concreto foi 1:1,70:2,30 com fator água/cimento de 0,42. Foi adicionado às amostras um teor de 0,5 % de fibra de polipropileno do volume total do concreto, conforme estudo realizado por BONIFÁCIO (2014), com exceção dos corpos-de-prova que serviram de referência. Para manter boa trabalhabilidade no concreto com a adição de fibra, foi incorporado um teor de 0,2 % de aditivo hiperplastificante. A Tabela 2 apresenta os quantitativos de materiais necessários para a produção dos 32 corpos-de-prova cada traço.

Tabela 2: Quantidade de materiais para a produção das amostras.

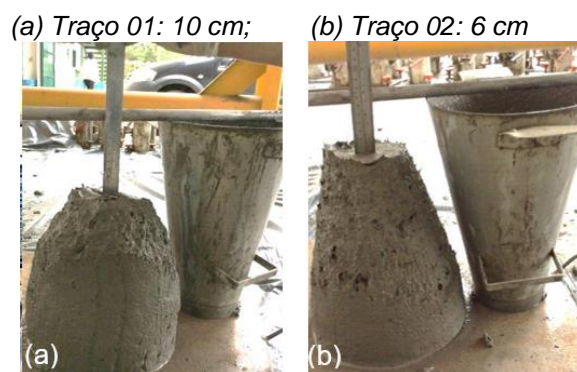
MATERIAL	TRAÇO 01	TRAÇO 02
	Referência (kg)	Polipropileno (kg)
Cimento	28,90	28,90
Areia	49,13	49,13
Brita	66,48	66,48
Água	12,14	12,14
Fibra de Polipropileno	-	0,28
Hiper Platificante	-	0,06
<b>Massa (Kg)</b>	<b>156,65</b>	<b>156,65</b>
<b>Quantidade CP's</b>	<b>32,00</b>	<b>32,00</b>

Fonte: Autora, 2016

## 2.1 DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Após secagem (NBR 9939:2011), pesagem e separação dos materiais, foi realizada a concretagem, mecanicamente, com o auxílio de uma betoneira com capacidade de 400 litros. Foram moldados 32 corpos-de-prova cilíndricos para cada traço, de dimensões 10x20 cm, totalizando 64 amostras. A moldagem foi realizada por adensamento manual, respeitando-se as orientações da NBR 5738 (ABNT, 2003) e NBR NM67 (ABNT, 1998), sendo verificado o abatimento de todos os traços através do ensaio de *slump test* (Figura 3) para verificação da consistência do concreto em estado fresco.

Figura 3: Teste de abatimento de cone.



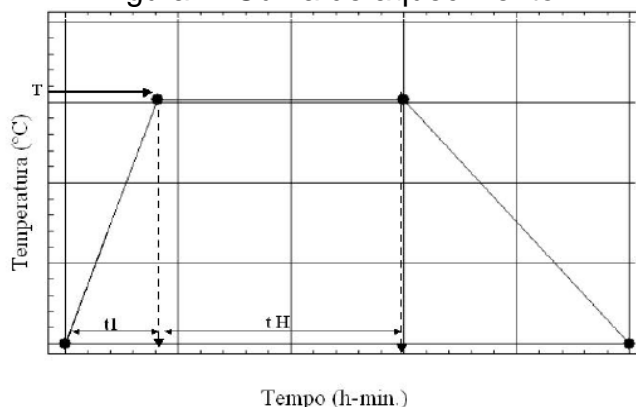
Fonte: Autora, 2016.

Concluída a moldagem e aguardado o tempo de 24 horas, os corpos-de-prova foram desmoldados e mantidos em cura submersa por 60 dias, sendo retirados da água e armazenados em ambiente de laboratório por mais 30 dias, até completarem 90 dias. Todo o processo de produção, secagem, pesagem, concretagem, preparação dos moldes e cura dos corpos-de-prova foi realizado no LMCC – UNESC.

## 2.2 AQUECIMENTO DOS CORPOS DE PROVA

Após a cura e completados os 90 dias, os corpos-de-prova foram aquecidos nos patamares de temperatura de 100°C, 400°C e 800°C. A taxa de aquecimento adotada foi de 12°C/min até atingirem o patamar de temperatura desejada, mantidos nesta temperatura por 30 minutos. A mufla foi desligada e os corpos-de-prova permaneceram no interior da mesma por cerca de 24 horas até seu resfriamento natural. Não foi possível simular o resfriamento brusco com água, como acontece em incêndios reais, pois a mufla só poderia ser aberta com temperaturas abaixo de 150°C para não danificá-la. O equipamento utilizado para aquecimento foi um forno mufla CT095 com controle digital de temperatura, dimensões de 500x470x500 mm e capacidade de aquecimento de até 1200°C. Para melhor acompanhamento e monitoramento da temperatura foram colocados três termopares do tipo K no interior da mesma durante o aquecimento. Devido a condições limitantes do equipamento, não foi possível adotar a taxa de aquecimento de 3 °C/min recomendada por Rilem TC129 MHT (2000 *apud* SILVA, 2009), nem mesmo a taxa média de 27,4 °C/min adotada por Lima (2005) referente a taxa média de acréscimo na temperatura prevista na curva de incêndio-padrão da ISO 834 nos primeiros 30 min de ensaios. Dessa forma a curva de aquecimento (Figura 4) de cada temperatura foi calculada em função da taxa de aquecimento, mesmo procedimento adotado por Silva (2009) e Silva (2015). Conforme Tabela 03, pode-se observar que o programa de aquecimento está em função do tempo.

Figura 4: Curva de aquecimento



Fonte: Silva, 2009



Onde:

T: temperatura que representa o patamar desejado;

t1: tempo necessário para que atinja o patamar desejado;

tH: tempo de exposição do concreto na temperatura desejada.

Tabela 3: Programa de aquecimento

Temperatura (°C)	T (°C)	t1 (hr:min)	t H (hr:min)	Tempo Total (min)
100	100	00:07	00:30	37
400	400	00:32	00:30	62
800	800	01:05	00:30	95

Fonte: Autora, 2016

### 2.3 ANÁLISE VISUAL E DETERMINAÇÃO DA PERDA DE MASSA DOS CORPOS-DE-PROVA

Segundo Neville (2016), com a exposição a elevadas temperaturas os concretos produzidos com agregados silicosos ou calcários apresentam mudanças gradativas de coloração, que dependem da presença de certos componentes ferrosos. A análise da coloração de uma estrutura de concreto após incêndio é de fundamental importância, podendo ser utilizado como parâmetro para a estimativa da máxima temperatura atingida e do tempo de duração do fogo num incêndio real, correlacionando com a perda de resistência da estrutura.

Nos corpos-de-prova submetidos ao aquecimento, observou-se a alteração na tonalidade das amostras bem como a ocorrência de danos causados no material, como esfarelamentos e lascamentos, que segundo Morales, Campos & Faganello (2011) “costumam ocorrer nos primeiros 30 minutos da ação do fogo, a temperaturas entre 250°C e 400°C.

A determinação da perda de massa dos corpos-de-prova foi obtida pela diferença entre as massas antes do aquecimento e 24 hs após o mesmo. A balança utilizada para a pesagem dos corpos de prova foi da marca Marte, modelo AS 5000 com capacidade de 5000 g, disponibilizada pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil – UNESC.

## 2.4 ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E MÓDULO DE ELASTICIDADE

Após aquecimento e resfriamento, os corpos-de-prova cilíndricos foram submetidos a realização dos ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade, com finalidade de avaliar o desempenho dos elementos expostos aos diferentes patamares de temperatura. Os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, por meio de uma prensa hidráulica da marca EMIC modelo PC200I, monitorada por computador, com capacidade máxima de 2000 kN (Figura 5).

Figura 5: Ensaio de compressão axial e módulo de elasticidade



Fonte: Autora, 2016

Foram ensaiados três corpos-de-prova de cada temperatura, com e sem a adição da fibra de polipropileno, totalizando 24 amostras por ensaio (Tabela 5).

Tabela 5: Quantidade de corpos-de-prova para realização dos ensaios

Ensaio	Temperatura de exposição (°C)	Qtde de CP's sem fibra de polipropileno	Qtde de CP's com fibra de polipropileno
Compressão axial	23	3	3
	100	3	3
	400	3	3
	800	3	3
Módulo de Elasticidade	23	3	3
	100	3	3
	400	3	3
	800	3	3
<i>Qtde total de CP's</i>		24	24

Fonte: Autora, 2016



O procedimento de ensaio de compressão foi realizado segundo recomendações da norma NBR 5739:2007, sendo calculado a resistência a compressão axial através da média dos resultados dos ensaios de três corpos-de-prova.

O ensaio do módulo de elasticidade foi realizado conforme a NBR 8522:2003, sendo a medição da deformação dos corpos-de-prova feita por dois extensômetros eletrônicos acoplados à prensa.

## **2.5 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)**

A difratometria de raio-x (DRX) permitiu identificar as fases cristalinas presentes na amostra e possíveis mudanças que ocorreram nas mesmas com a elevação da temperatura, através de picos gerados na difração dos raios produzidos pelos átomos característicos do mineral. O resultado da análise foi apresentado sob a forma de gráfico, cujas variáveis são o ângulo  $2\theta$  (eixo horizontal) e a intensidade dos picos difratados (eixo vertical). Para realização do ensaio as amostras dos corpos-de-prova foram fragmentadas, moídas e peneiradas, obtendo-se um material fino. A análise por DRX foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais do IDT/UNESC, no equipamento Shimadzu Lab X modelo XRD-6000, ângulo de varredura de 0 a  $80^\circ$  em  $2\theta$ .

## **2.6 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DA FIBRA DE POLIPROPILENO (TGA)**

A análise térmica da fibra (TG) foi realizada no LabValora/UNESC, em atmosfera de ar sintético, no intervalo de temperatura de 20 a  $600^\circ\text{C}$  e taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ . A curva obtida através do ensaio possibilitou a análise das temperaturas de fusão e degradação da fibra.

## **3. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados oriundos do programa experimental, observando a influência da fibra de polipropileno na resistência do concreto em estudo, assim como as alterações do mesmo devido a exposição a diferentes patamares de temperatura. Os ensaios de compressão axial, perda de

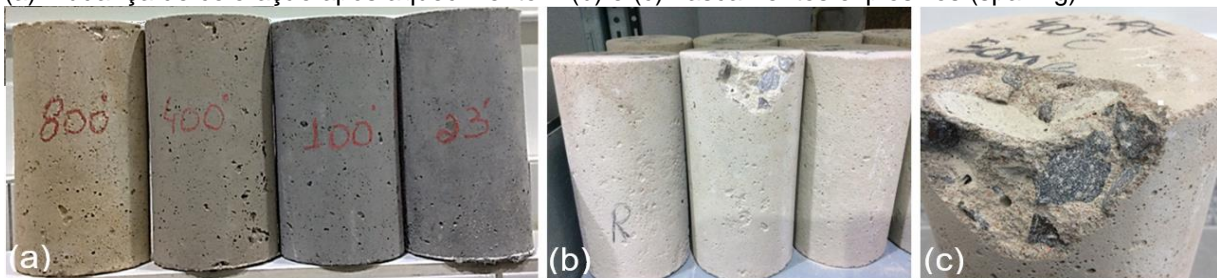
massa e módulo de elasticidade foram analisados através de gráficos e pelo método estatístico de análise da variância (ANOVA) com nível de confiança de 95%, permitindo verificar se há ou não diferenças significativas entre as médias dos grupos. Os demais resultados foram interpretados de forma comparativa ou qualitativa, por suas características peculiares.

### 3.1 ANÁLISE VISUAL

Conforme ilustra a Figura 6, foi notório a diferença de coloração dos corpos-de-prova após o aquecimento, assim como a presença de lascamentos explosivos (*spalling*) em algumas amostras de concreto sem a adição da fibra de polipropileno exposto à temperatura de 400°C.

Figura 6: Corpos de prova após aquecimento.

(a) Mudança de coloração após aquecimento. (b) e (c) Lascamentos explosivos (*spalling*).



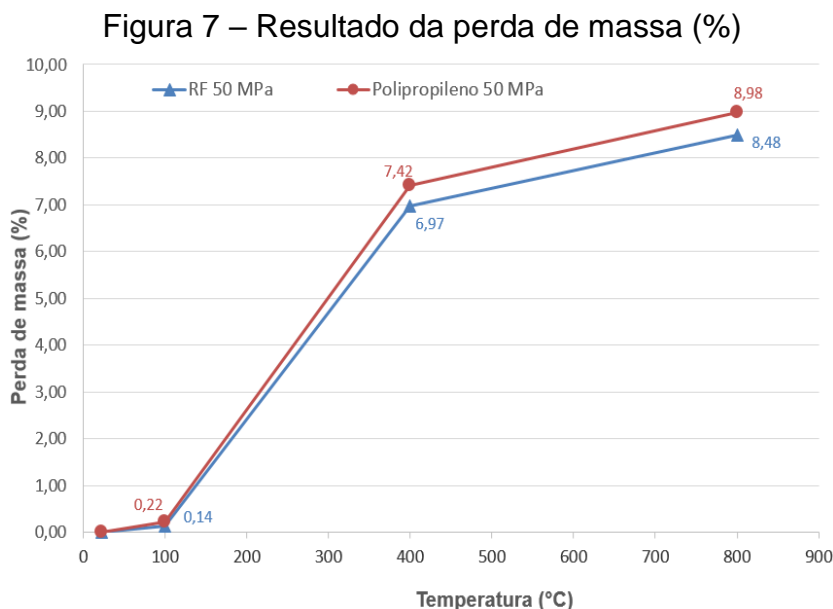
Fonte: Autora, 2016.

Nos corpos-de-prova com a adição de fibras não houve a ocorrência de *spalling*, que pode estar relacionado com a presença de caminhos deixados pela fibra de polipropileno ao se fundir e reduzir de volume, permitindo a migração dos gases quentes para a superfície da matriz cimentícia (PANDOLFELLI, TIBA & CASTRO, 2011; METHA & MONTEIRO, 2008; AİTCIN, 2000; FIGUEIREDO, 2011; NINCE & FIGUEIREDO, 2008; LIMA, 2005).

Nas amostras expostas à temperatura de 800°C verificou-se um esfarelamento superficial assim como a presença de fissuras, provenientes da ação da temperatura e da evaporação da água do interior do concreto.

### 3.2 PERDA DE MASSA

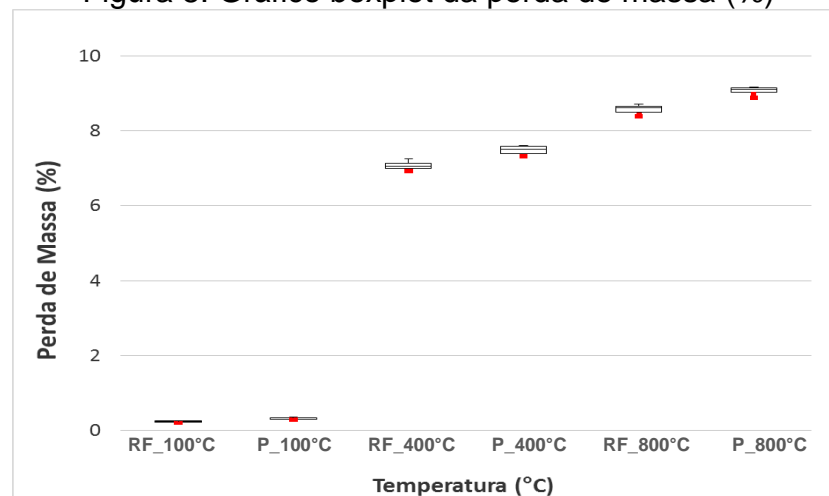
A figura 7 ilustra os valores das massas dos corpos-de-prova à temperatura ambiente e após aquecimento às temperaturas de 100°, 400° e 800°C.



Fonte: Autora, 2016

É possível verificar que o aumento da temperatura exerceu influência significativa na redução de massa dos corpos-de-prova, em ambos os traços, cujo principal fator é a perda de água por evaporação. Através da análise de variância e dos gráficos de linhas e boxplot, pôde-se constatar essa de redução de massa dos corpos-de-prova entre os níveis de temperatura a partir de 100°C, chegando a 7,42 % de redução a 400°C. Tal resultado pode ser atribuído à evaporação da água livre até 200°C e ao processo de desidratação do gel C-S-H e do C<sub>2</sub>S, que se intensifica a 300°C e prossegue até cerca de 400°C (Neville, 2016; Isaia, 2011; Morales, Campos & Faganello, 2011). À 800°C obteve-se a máxima redução, com 8,48 % e 8,98 % de perda para os traços de referencia e com a adição da fibra, respectivamente, que segundo PANDOLFELLI, TIBA & CASTRO (2011), pode estar relacionado pela “decomposição da pasta de cimento e dos agregados”. Através do gráfico boxplot ilustrado na Figura 8, pode-se verificar essa diferença estatística entre as massas dos corpos-de-prova nos diferentes níveis de temperatura com  $F=1304,6$  maior que  $F_{crit}=9,27$  e 99,9 % de confiança na análise ANOVA.

Figura 8: Gráfico boxplot da perda de massa (%)

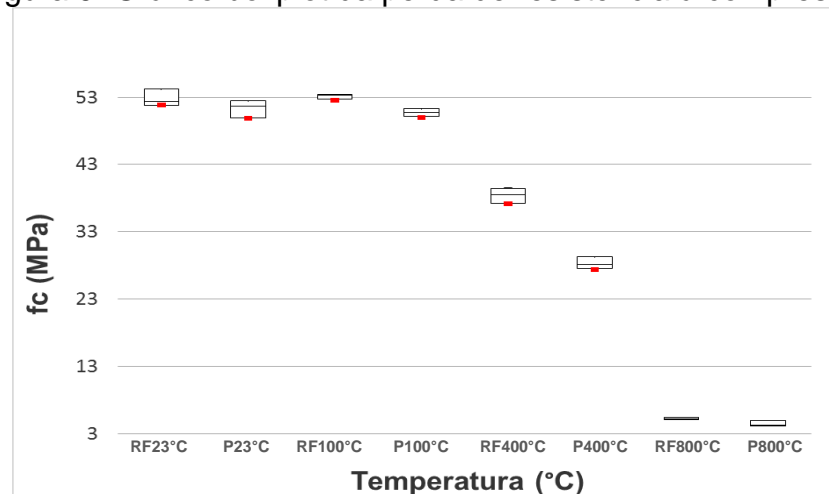


Fonte: Autora, 2016

### 3.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Através dos resultados obtidos foi possível observar que a resistência à compressão do concreto diminuiu à medida que a temperatura aumentou, e tanto o concreto de referência quanto o concreto com adição de fibras, após aquecimento, apresentaram tendências similares de comportamento, porém os corpos-de-prova de referência tiveram melhor desempenho, conforme pode-se constatar no gráfico boxplot da Figura 9.

Figura 9: Gráfico boxplot da perda de resistência à compressão

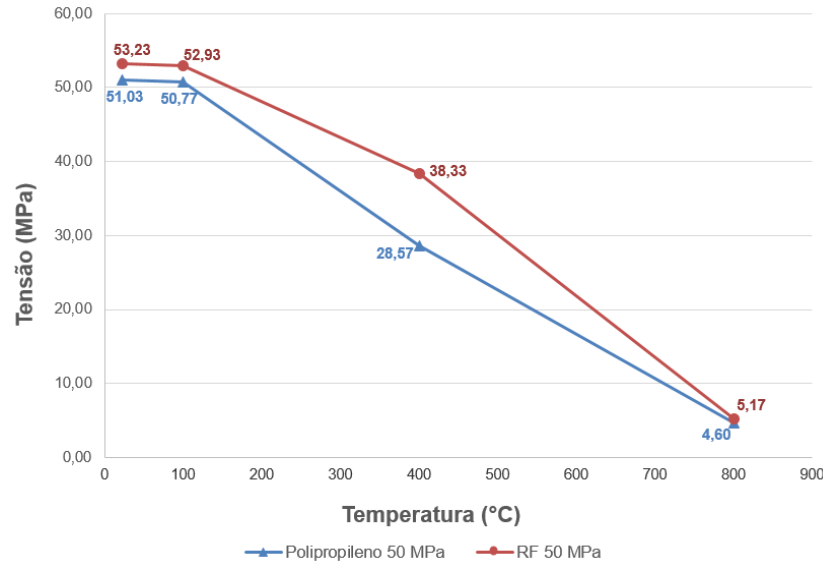


Fonte: Autora, 2016

O gráfico da Figura 10 ilustra o comportamento da resistência à compressão dos corpos-de-prova nos diferentes patamares de temperatura, onde foi possível

observar que esta redução se intensificou a partir de 400°C, com a curva do gráfico mais acentuada, principalmente no concreto com a adição da fibra.

Figura 10: Resistência à compressão axial



Fonte: Autora, 2016

A Tabela 6 apresenta a porcentagem de perda de resistência característica para os dois traços nas diferentes temperaturas, que chegou a 90 % em ambos os traços na temperatura de 800 °C.

Tabela 6: Redução de resistência característica dos corpos de prova (%)

Temperatura (°C)	RF 50 MPa (%)	Polipropileno 50 MPa (%)
100	0,56	0,52
400	27,99	44,02
800	90,29	90,99

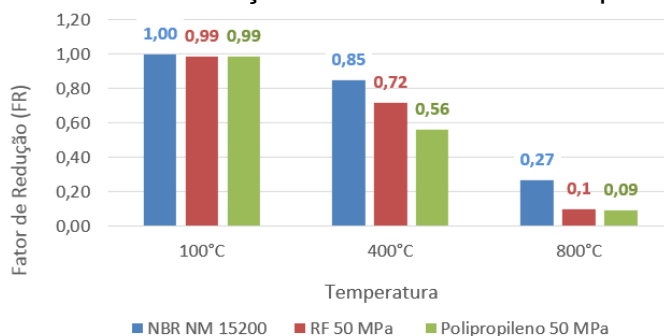
Fonte: Autora, 2016

Esta perda de resistência pode ser sido originada por vários fatores, como a desidratação do concreto pela evaporação da água livre, transformações químicas do C-S-H que tornam sua estrutura mais frágil, e do hidróxido de cálcio que após desidratação e reidratação contribuem para o aparecimento de fissuras.

A norma NBR 15200:2004 apresenta valores mínimos de fator de redução da resistência do concreto em função da temperatura, sendo uma referência muito importante para consideração, ainda em projeto, do comportamento de elementos estruturais após exposição e diferentes patamares de temperaturas. Porém fazendo uma análise comparativa entre os resultados obtidos da pesquisa e os fatores

previstos pela norma (Figura 11), foi possível observar que ambos apresentaram a mesma tendência, contudo o fator de redução obtido experimentalmente, em todos os patamares de temperatura, foi superior aos prescritos pela norma.

Figura 11: Fator de redução da resistência à compressão axial



Fonte: Autora, 2016

Esta diferença foi estatisticamente significativa à temperatura próximo a 800 °C, onde apresentaram mais de 60 % de redução em comparação com os valores mínimos estabelecidos pela norma. Desta forma as indicações da norma mostraram-se superiores e mais exigentes, sendo os resultados da pesquisa favoráveis à segurança. Contudo os valores da norma foram obtidos com ensaios padronizados, obedecendo as taxas de aquecimento padrão e a curva de incêndio ISO 834, com controle preciso da temperatura e as amostras submetidas a um carregamento constante durante o aquecimento. Porém na presente pesquisa o ensaio de aquecimento não foi realizado com os elementos sob carregamento assim como não foi possível obedecer a taxa de aquecimento padrão devido a condições limitantes da mufla, fato que pode ter ocasionado a diferença de valores do fator de redução da pesquisa comparado a norma NBR 15200:2004.

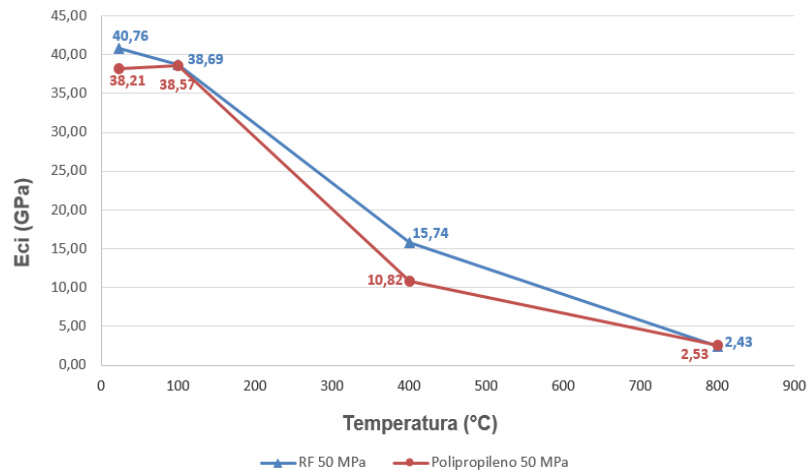
### 3.4 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE

Segundo Neville (2016), o comportamento da estrutura é influenciado pelo módulo de elasticidade do concreto, sendo significativamente afetado pela temperatura.

De acordo com os valores apresentados pelo gráfico da Figura 12, foi possível observar que o módulo de elasticidade do concreto em estudo decresceu com o aumento da temperatura, apresentando valores praticamente nulos a 800 °C.



Figura 12: Módulo de elasticidade



Fonte: Autora, 2016

Segundo METHA & MONTEIRO (2008), pode-se atrelar esse fato a perda de água durante o aquecimento, que desenvolve o aparecimento de microfissuras na zona de transição na interface e tem efeito mais danoso sobre a resistência a flexão e módulo de elasticidade.

À 100 °C a perda do módulo de elasticidade foi pouco significativa, condizente com Neville (2016) ao afirmar que não existe redução do módulo de elasticidade ou é pouco significativa nas temperaturas entre 21 °C a 96 °C, porém a partir de 121 °C a redução é progressiva, com maior intensidade a 400 °C, cuja redução fica em torno de 60 % a 70 % dos valores iniciais (Tabela 7).

Tabela 7: Redução do módulo de elasticidade dos corpos de prova (%)

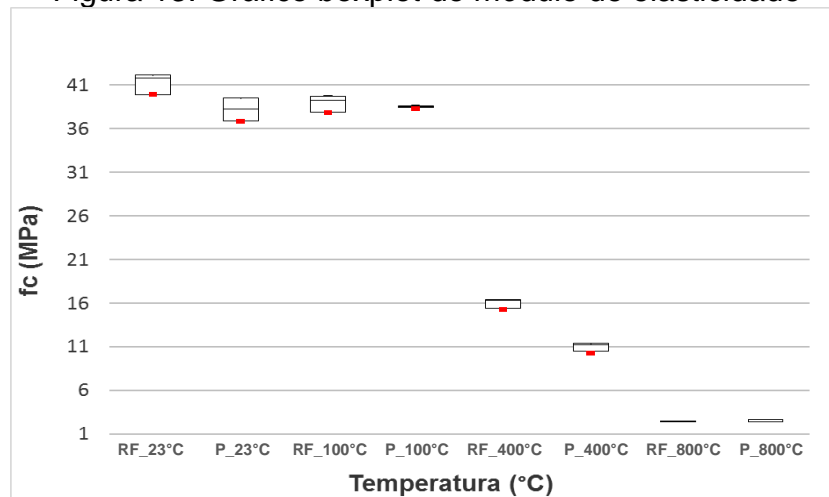
Temperatura (°C)	RF 50 MPa (%)	Polipropileno 50 MPa (%)
100	5,08	-0,94
400	61,38	71,68
800	94,04	93,38

Fonte: Autora, 2016

Segundo Lima (2005) esse comportamento pode ocasionar deformações nos elementos estruturais, tornando-os inadequados ao uso. Através do gráfico boxplot da Figura 13 pode-se constatar estatisticamente essa redução do módulo de elasticidade, bem como a discrepância dos resultados entre os dois traços a 400 °C, com  $F=246,75$  maior que  $F_{crit}=9,27$  e 99,96 % de confiança na análise ANOVA. Este fato pode ser explicado pela fusão da fibra que ocorreu a 410 °C, conforme ensaio termogravimétrico da mesma, no qual ocorreu a conversão dos vazios deixados pela

fibra em microfissuras, ocasionando a ruptura prematura, diminuindo a resistência e módulo de elasticidade.

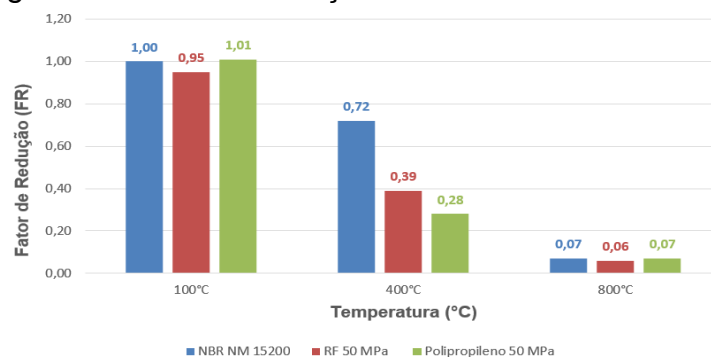
Figura 13: Gráfico boxplot do módulo de elasticidade



Fonte: Autora, 2016

Na Figura 14 encontram-se os fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura calculados a partir dos resultados obtidos nos ensaios, comparados com os valores indicados pela norma NBR NM 15200:2004, no qual apresentou diferença estatística na temperatura de 400 °C, com 46 % e 61 % de perda para os traços de referencia e com a adição de fibra, respectivamente. Assim as indicações da norma se mostraram novamente superiores e mais exigentes que os resultados da pesquisa.

Figura 14: Fator de redução do módulo de elasticidade



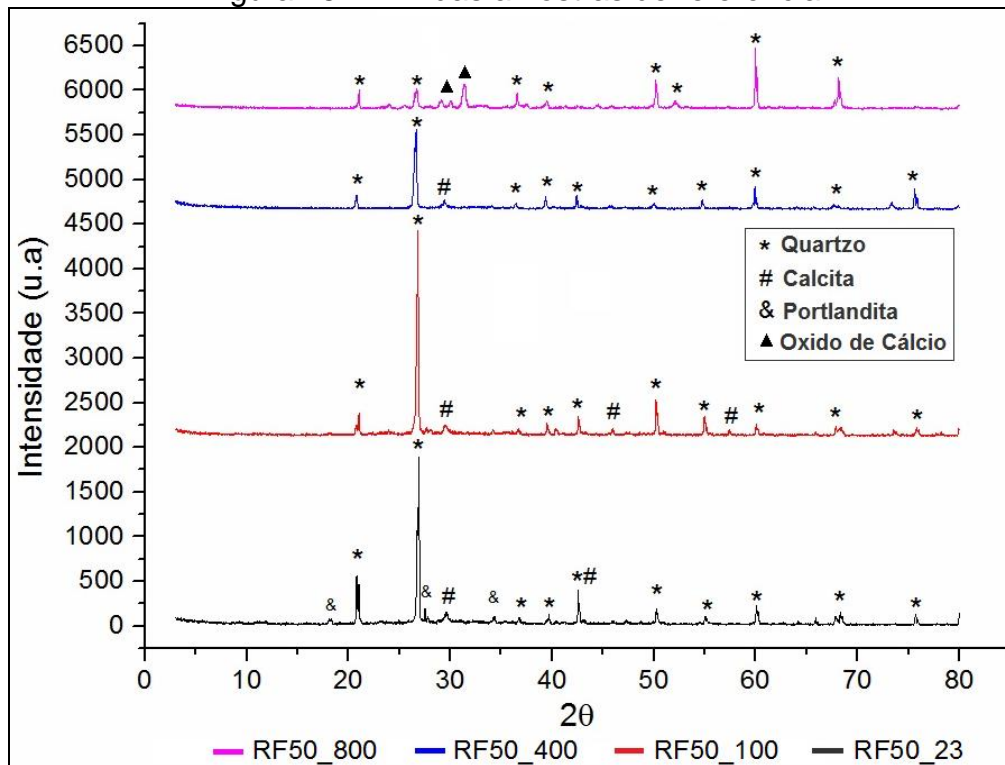
Fonte: Autora, 2016

Os fatores de redução do módulo de elasticidade se mostraram mais intensos que os fatores da resistência à compressão, demonstrando que o processo de degradação do módulo ocorre mais rapidamente que o da compressão.

### 3.5 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

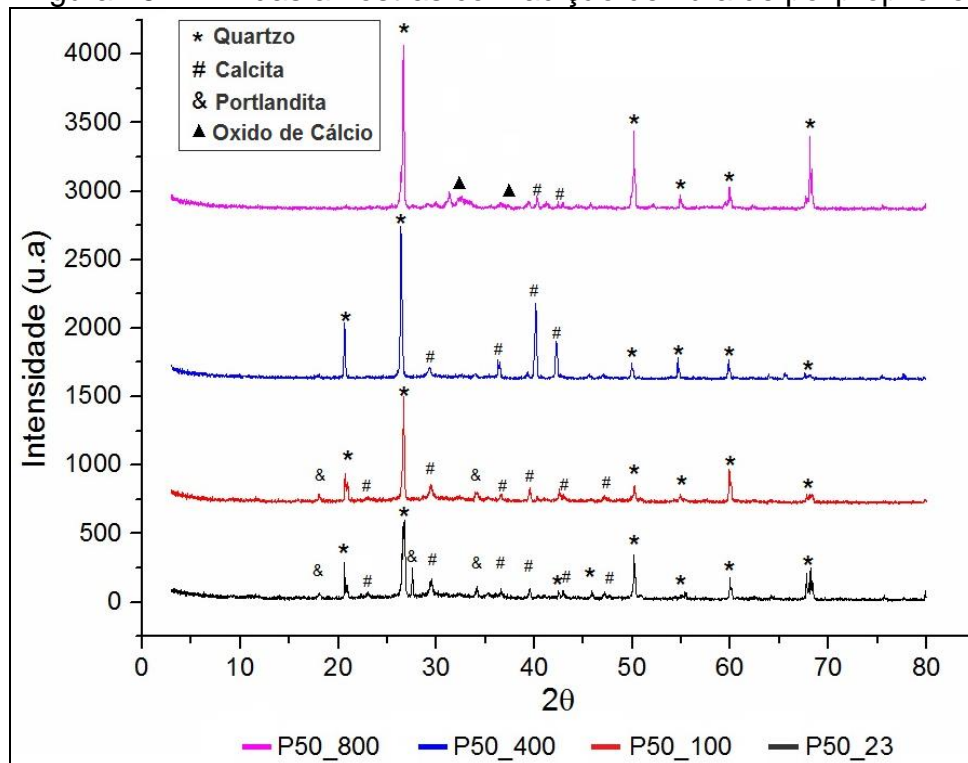
As Figuras 15 e 16 apresentam os difratogramas das amostras dos dois traços avaliados nessa pesquisa, nos quatro patamares de temperatura, onde foi possível analisar comparativamente as principais alterações ocorridas com a elevação da temperatura.

Figura 15: DRX das amostras de referência



Fonte: Autora, 2016

Figura 16: DRX das amostras com adição de fibra de polipropileno



Fonte: Autora, 2016

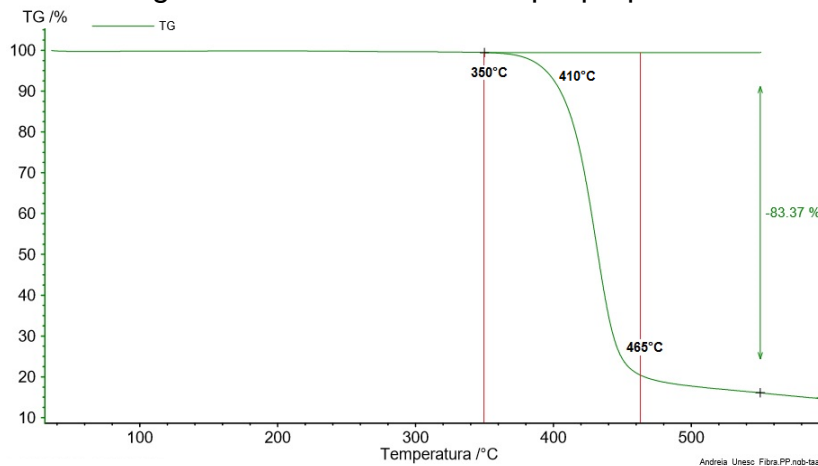
A análise das amostras dos dois traços mostra que realmente ocorreram mudanças de fase e decomposição de alguns compostos do concreto, condizente com a pesquisa realizada por Lima (2005). A portlandita ( $\text{CA}(\text{OH})_2$ ), um dos componentes que contribuem para a resistência do concreto, apresenta-se estável até a temperatura de  $400^\circ\text{C}$ , porém desaparece totalmente a  $800^\circ\text{C}$  dando lugar ao óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), entre os picos de 30 a 40  $\theta$ , em virtude da secagem. A calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) está presente em todas as temperaturas, porém em maior quantidade nos patamares mais baixos. O óxido de cálcio, normalmente ausente em temperaturas mais baixas, aparece à  $800^\circ\text{C}$ , sendo formado pela decomposição da calcita e portlandita.

### 3.6 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DA FIBRA DE POLIPROPILENO (TGA)

A Figura 15 apresenta o resultado do ensaio TGA da fibra de polipropileno, no qual pôde-se observar que a massa da fibra diminuiu com o aumento da temperatura em torno de 83,37%. Também foi possível analisar uma perda significativa da massa da fibra de polipropileno entre as temperaturas de  $350^\circ\text{C}$  a  $465^\circ\text{C}$ , que continuam com o aumento da temperatura, reduzindo seu volume e deixando os espaços vazios no interior do concreto endurecido. Essa perda de massa se dá pela mudança de fase

da fibra, do estado sólido passando para o líquido, à temperatura de 410°C, conforme pode-se observar no gráfico.

Figura 15 – TGA da fibra de polipropileno



Fonte: Autora, 2016

## 4. CONCLUSÕES

- Os resultados desta pesquisa demonstram que os concretos submetidos à elevadas temperaturas perdem consideravelmente sua resistência mecânica, porém à 400°C a perda é inferior a 50 %, aumentando conforme a elevação da temperatura, até se tornar praticamente nula à 800 °C.
- Ocorre também a redução de massa dos corpos-de-prova devido a evaporação da água livre e a redução do módulo de elasticidade, sendo este fortemente afetado com o incremento da temperatura, chegando a 60 % e 70 % de perda à 400 °C, para os traços de referência e polipropileno.
- Comparando-se os resultados dos fatores de redução da resistência a compressão e do módulo de elasticidade obtidos na pesquisa com o prescritos pela NBR 15200:2004, conclui-se que os valores da norma se apresentam superiores e mais exigentes, sendo os fatores de redução da pesquisa favoráveis à segurança.
- A adição de fibras de polipropileno não interfere na queda da resistência à compressão e no módulo de elasticidade com o aumento da temperatura, no entanto contribui para a minimização do efeito *spalling*, sendo uma solução potencialmente indicada para evitar os deslocamentos explosivos.

- O ensaio da análise termogravimétrica da fibra permitiu identificar que o ponto de fusão ocorre a partir de 350 °C, com perda de massa gradativa nas temperaturas superiores, chegando a 83,37 % de perda de massa inicial à temperatura de 550 °C. A partir desta temperatura de fusão, a fibra reduz seu volume deixando espaços vazios e criando uma rede de canais que favorecem a dissipação da poropressão, deixando o concreto um material poroso. Se esses poros ocasionados pela dissipação da fibra constituir uma rede de canais conectadas, o concreto também pode se tornar um material permeável, diminuindo a resistência.
- O ensaio de difração de raio-x fornece dados importantes para análise microestrutural das amostras do concreto em estudo, pois possibilita a identificação de alguns compostos químicos como portlandita, calcita e óxido e cálcio, bem como as mudanças ocorridas nos mesmos com o aumento da temperatura e sua deterioração. Dessa forma é possível constatar que a perda de resistência e módulo de elasticidade se tornam mais acentuados a partir de 400°C, podendo estar associado, entre outros fatores, à desidratação da portlandita e decomposição do C-S-H.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Buscar outras alternativas técnicas ou alterar o tipo de fibra, para eliminar ou amenizar os lascamentos no concreto durante o aquecimento;
- Utilizar corpos de prova de concreto armado;
- Realizar pesquisa fixando a temperatura de exposição do concreto em duas horas.
- Realizar pesquisa com uso da fibra para verificação da resistência quanto ao gelo e degelo.

## 6. REFERÊNCIAS

\_\_\_\_\_. **NBR 5739: Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.



\_\_\_\_\_. **NBR 5738: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522: Concreto: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformações e da curva tensão-deformação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 9939: Agregado graúdo: Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 15200: Projeto de estrutura de concreto em situação de incêndio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

AÏTCIN, Pierre-Claude. **CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO.** 1. ed. São Paulo: Pini, 2000. 667 p.

BONIFÁCIO, Jéssica Spricigo da Rocha. **Estudo do Efeito das Fibras de Vidro e Polipropileno nas Propriedades Mecânicas do Concreto** (2014) 19p.

CASTRO, A. L. de; TIBA, P. R. T.; PANDOLFELLI, V. C. Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos expostos a altas temperaturas : revisão = Polypropylene fibers and their influence on the behavior of concretes exposed to high temperatures: review . **Cerâmica**, São Paulo, v. 57, n. 341 , p.22-31, mar. 2011.

CIMOLIN, Felipe Rocha. **Estudo do Efeito da Fibra de Polipropileno em Concreto Exposto a Altas Temperaturas** (2015) 23p.

COSTA, C. N.; FIGUEIREDO, A. D. de; SILVA, V. P. e. **O fenômeno do lascamento (“spalling”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio – uma revisão crítica.** In: 44º Congresso Brasileiro Concreto, Belo Horizonte, 2002.

FIGUEIREDO, A.D. de. Concreto com fibras. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: G.C.Isaia, 2011, v2. p.1327-1332.

FONSECA, Renato Olveira. **Concretos submetidos a ciclos de temperaturas elevadas. Estudo experimental em corpos de prova localizados em unidade de produção de uma usina siderúrgica.** 2010. 195p. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Univ. Fed. do Espírito Santo.

JUNIOR, Josué Coelho do Amaral. **Avaliação da influência da adição de fibras poliméricas nas propriedades térmicas e mecânicas do concreto.** 2016. 195p. Mestrado em Engenharia de Materiais, CEFET Minas Gerais.

LIMA, R. C. de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRS, Porto Alegre, RS, 2005.

LIMA, R. C. A. et al. **Efeito de altas temperaturas no concreto**. In: II SEMINÁRIO DE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES, 2004, Porto Alegre, 2004. v. 1, p. 1 - 15.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **CONCRETO: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **CONCRETO: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

MORALES, Gilson; CAMPOS, Alessandro; FAGANELLO, Adriana Patriota. A ação do fogo sobre os componentes do concreto. **Semina: Ciências Exatas e tecnológicas**, Londrina, v. 32, n. 1, p.47-55, mar. 2011. Semestral. Disponível em: <[www.uel.br](http://www.uel.br)>. Acesso em: 14 mar. 2016.

NEVILLE, Adam Matthew. **Propriedades do Concreto**. 2.ed. São Paulo: Pini, 1997. p.391.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. p.401-407.

SILVA, Daiane dos Santos da. **Propriedades Mecânicas Residuais Após Incêndio de Concretos Usados na Construção Civil na Grande Florianópolis**. 2009. 102p. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Univ. Fed. de Santa Catarina, Florianópolis.

SILVA, Kelen Cristina Luiz dos Santos. **Estudo do Efeito da Fibra de Polipropileno no Concreto Quando Submetido à Altas Temperaturas** (2015) 26p.