



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Trabalho de Conclusão de Curso

**“Estudo do Compósito de Concreto com Fibras de Polipropileno
Submetido a Altas Temperaturas”**

Autor: Jhony Lucio da Silva Olegario

**Outubro
2013**

Jhony Lucio da Silva Olegario

**Estudo do Compósito de Concreto com Fibras de Polipropileno
Submetido a Altas Temperaturas**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia Civil
do Centro de Tecnologia e Geociência da
Universidade Federal de Pernambuco para
obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. José Jeferson do Rego
Silva

**Outubro
2013**

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

- O45e Olegario, Jhony Lucio da Silva.
Estudo do compósito de concreto com Fibras de Polipropileno submetido a altas temperaturas / Jhony Lucio da Silva Olegario. – Recife: O Autor, 2013.
57p., il., figs., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. José Jeferson do Rego Silva.
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Civil, 2013.
Inclui Referências.
1. Engenharia Civil. 2. Concreto. 3. Fibras. 4. Polipropileno. I. Silva, José Jeferson do Rego (Orientador). II. Título.
- 624 CDD (22.ed) UFPE/BCTG-2013-287

FOLHA DE APROVAÇÃO

“ESTUDO DO COMPÓSITO DE CONCRETO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO
SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS”

Jhony Lucio da Silva Olegario

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE
DO CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA (CTG) DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DE PERNAMBUCO (UFPE) COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM
ENGENHARIA CIVIL.

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: Prof. José Jéferson do Rego Silva

Prof. Tibério Wanderley Correia de Oliveira Andrade

Coorientador: Prof. Tiago Ancelmo de C. P. de Oliveira

Recife

Outubro de 2013

Aos meus pais com muito
carinho dedico este
trabalho, que são e sempre
serão tudo na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Aos pais e familiares de que forma direta e indireta nos conduziram a esta grande vitória.

A empresa MACCAFERRI DO BRASIL., que nos disponibilizou todo o aparato técnico e material para a realização dos experimentos.

A empresa TECOMAT, que realizou os ensaios de compressão axial.

A Universidade Federal do Pernambuco - UFPE, por ter nos disponibilizado o local de para ensaio e os seus técnicos de laboratório.

Ao nosso orientador Prof. José Jeferson do Rego Silva, que me orientou de forma séria e responsável.

Aos meus colegas de curso de Engenharia Civil, na compartilhção de conhecimento.

Aos meus amigos Igor Ferraz, Tiago, Cleandro, Ezequiel, Cazuza, Heitor, Cesar, Rafael, Robson, Josinaldo Leandro, Moisés Miranda.

Resumo

O comportamento do concreto frente a temperaturas elevadas vem se tornando um tópico de interesse nos últimos anos. Esta preocupação justifica-se pela crescente demanda nos últimos anos de concretos cada vez mais resistentes e mais duráveis. Este trabalho pretende abordar a influencia da adição de fibra de polipropileno ao concreto quando submetido a altas temperaturas. Foram avaliados nesse estudo apenas duas composições de traços de concreto, onde cada um deles foi produzido com e sem a adição de fibras de polipropileno. Para a confecção dos corpos de prova foram realizados vários procedimentos padrão, os quais estão todos descritos nesse estudo, além de relatar sobre todos os materiais utilizados. Como se trata de um concreto que será submetido ao calor, há a obrigatoriedade do estudo de curvas de calor normatizadas, as quais serão todas mencionado, assim como as condições adotadas para cada situação avaliada. Serão apresentadas também todas as metodologias empregadas para os ensaios e os respectivos equipamentos utilizados. Como os ensaios geram uma grande quantidade de dados, todos os resultados serão apresentados em gráficos, assim como as considerações e conclusões tomadas.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETO. FIBRAS. POLIPROPILENO. TEMPERATURA.

ABSTRACT

The behavior of the concrete against high temperatures has become a topic of interest in recent years. This concern is justified by the increasing demand in recent years increasingly concrete more resistant and more durable . This study aims to address the influence of the addition of polypropylene fiber concrete when subjected to high temperatures. Were used in this study only two compositions concrete mix , each of which was produced with and without the addition of polypropylene fibers . For the preparation of the specimens were performed several standard procedures , all of which are described in this study , and report on all materials used . As this is a concrete that will be subjected to heat , there is the obligatory study of curves normalized heat , which will all be mentioned , as well as the conditions adopted for each situation assessed . Will be presented all our methodologies for testing and related equipment used . As the tests generate a large amount of data , all results will be presented in graphs as well as the considerations and conclusions reached .

KEYWORDS: CONCRETE. FIBRE. POLYPROPYLENE. TEMPERATURE

Lista de Figuras

Figura 1: Peneiras para Ensaio de Granulometria da Brita.....	22
Figura 2: Brita Utilizada.....	23
Figura 3: Peneiras para Ensaio de Granulometria da Areia.....	24
Figura 4: Equipamento utilizado para o peneiramento.....	24
Figura 5: Areia Utilizada.....	25
Figura 6: Cimento Utilizado.....	25
Figura 7: Separação e pesagem de materiais.....	27
Figura 8: Betoneira utilizada para mistura do concreto.....	28
Figura 9: Ensaio “Slump Test”.....	28
Figura 10: Formas Lubrificadas.....	28
Figura 11: Preenchimento das Formas.....	29
Figura 12: Corpos de Prova Desmoldados.....	29
Figura 13: Ensaio “Slump Test”.....	30
Figura 14: Fibra Utilizada para os Copos de Prova.....	30
Figura 15: Concreto com Adição de Fibras.....	31
Figura 16: Ensaio “Slump Test” para o Concreto com Fibras de polipropileno.....	31
Figura 17 – Execução dos furos no corpo de prova.....	32
Figura 18 – Colocando material isolante ao redor do termopar.....	33
Figura 19 – Corpo de Prova monitorado dentro do Forno.....	33
Figura 20– Todos os Corpos de Prova dentro do Forno.....	33
Figura 21 – Equipamentos instalados.....	34

Figura 22 – Disposição dos furos no corpo de prova.....	35
Figura 23 – Disposição dos furos no corpo de prova.....	37
Figura 24 – Disposição dos furos no corpo de prova.....	38
Figura 25 – Disposição dos furos no corpo de prova.....	40
Figura 26: Concreto de 30MPA retirado do forno a 350°C e resfriado ao ar livre.....	42
Figura 27: Concreto de 30MPA retirado do forno a 450°C e resfriado ao ar livre.....	42
Figura 28: Concreto de 30MPA retirado do forno a 550°C e resfriado ao ar livre.....	43
Figura 29: Concreto de 40MPA retirado do forno a 350°C e resfriado ao ar livre.....	43
Figura 30: Concreto de 40MPA retirado do forno a 450°C e resfriado ao ar livre.....	44
Figura 31: Concreto de 40MPA retirado do forno a 550°C e resfriado ao ar livre.....	44
Figura 32: Pesagem dos CP.....	45
Figura 33: Prensas utilizadas nos ensaios de ruptura a compressão axial.....	47

Lista de Gráficos

Gráfico 1: Curvas-padrão para incêndio de materiais celulósicos mais usados no meio técnico internacional (COSTA C. N., 2002).....	19
Gráfico 2: Curvas de incêndio americanas UL 1709 e ASTM E1529 e a curva europeia “H” para materiais hidrocarbonetos (COSTA C. N., 2002).....	19
Gráfico 3 – Curvas dos incêndios-padrão e “H”(Eurocode 1)	20
Gráfico 4 – Fases de um incêndio natural comparado ao incêndio-padrão (ISO 834, 2002).....	20
Gráfico 5: Granulometria da Brita Utilizada.....	23
Gráfico 6: Composição Granulométrica da Areia Utilizada.....	24
Gráfico 7 – Comparação entre as Curvas de Calor.....	35
Gráfico 8 – Curva de Calor Externa (Ensaio 1).....	36
Gráfico 9 – Curva de Calor no interior do Copo de Prova de Sacrifício de (ensaio 1)...	36
Gráfico 10 – Curva de Calor Externa (Ensaio 2).....	37
Gráfico 11 – Curva de Calor no interior do Copo de Prova de Sacrifício de (ensaio 2)...	38
Gráfico 12 – Curva de Calor Externa (Ensaio 3).....	39
Gráfico 13 – Curva de Calor no interior do Copo de Prova de Sacrifício de (ensaio 3)...	39
Gráfico 14 – Curva de Calor Externa (Ensaio 4).....	40
Gráfico 15 – Curva de Calor no interior do Copo de Prova de Sacrifício de (ensaio 4)...	41
Gráfico 16: Perda de Massa dos Corpos de Prova (Ensaio 1).....	45
Gráfico 17: Perda de Massa dos Corpos de Prova (Ensaio 2).....	45
Gráfico 18: Perda de Massa dos Corpos de Prova (Ensaio 3).....	46
Gráfico 19: Perda de Massa dos Corpos de Prova (Ensaio 2).....	46
Gráfico 20: Resistência a Compressão do concreto com e sem adição de fibra no estado natural 30MPa.....	47

Gráfico 21: Resistência a Compressão do concreto com e sem adição de fibra no estado natural 40MPa.....	47
Gráfico 22: Resistência a Compressão do concreto sem adição de fibra, submetido à alta temperatura.....	48
Gráfico 23: Perda de Resistência a Compressão do concreto sem adição de fibra, submetido à alta temperatura.....	48
Gráfico 24: Resistência a Compressão do concreto com adição de fibra, submetido à alta temperatura.....	49
Gráfico 25: Perda de Resistência a Compressão do concreto com adição de fibra, submetido à alta temperatura.....	49
Gráfico 26: Comparação por CP com resistência aproximada de 30MPa.....	49
Gráfico 27: Resistência a Compressão do concreto sem adição de fibra, submetido à alta temperatura.....	50
Gráfico 28: Perda de Resistência a Compressão do concreto sem adição de fibra, submetido à alta temperatura.....	50
Gráfico 29: Resistência a Compressão do concreto com adição de fibra, submetido à alta temperatura.....	50
Gráfico 30: Perda de Resistência a Compressão do concreto com adição de fibra, submetido à alta temperatura.....	51
Gráfico 31: Comparação por CP com resistência aproximada de 40MPa.....	51

Sumário

Resumo.....	7
ABSTRACT.....	8
1. Introdução	15
1.1. Objetivo.....	16
2. Revisão Bibliográfica.....	17
2.1. Comportamentos do concreto em altas temperaturas.....	17
2.2. Comportamentos com concreto com fibras em altas temperaturas.....	18
2.3. Curvas de Incêndio.....	19
3. Método	22
3.1. Materiais para composição concreta	23
3.1.1. Brita.....	23
3.1.2. Areia	24
3.1.3. Cimento	26
3.1.4. Água	26
3.1.5. Fibras de Polipropileno	27
3.2. Composições de traço do concreto.....	27
3.3. Preparam do concreto e confecção dos corpos de prova.....	28
3.3.1. Primeira Mistura.....	28
3.3.2. Segunda Mistura.....	30
3.3.3. Terceira Mistura	31
3.3.4. Quarta Mistura.....	32
3.4. Equipamentos.....	33
3.5. Montagens dos ensaios de aquecimento.....	33
4. Resultados	35
4.1. Curvas de aquecimento do forno.....	35
4.1.1. Ensaios 1: Concreto com Resistência aproximada de 30MPa sem adição de Fibras	36
4.1.2. Ensaios 2: Concreto com Resistência aproximada de 40MPa sem adição de Fibras	37
4.1.3. Ensaios 3: Concreto com Resistência aproximada de 30MPa com adição de Fibras	39

4.1.4. Ensaios 4: Concreto com Resistência aproximada de 40MPA com adição de Fibras	41
4.2. Avaliações das Fissuras.....	42
4.3. Avaliações da Perda de Massa dos Corpos de Prova	45
4.3.1. Gráficos com Demonstrativo da Perda de Massa dos CP	46
4.4. Avaliações de Resistência a Compressão Axial.....	47
4.4.1. Avaliação de Resistência do concreto com e sem Fibras de Polipropileno.....	48
4.4.2. Ensaio 1: Concreto com Resistência aproximada de 30MPA sem adição de Fibras.	49
4.4.3. Ensaio 3: Concreto com Resistência aproximada de 30MPA com adição de Fibras	50
4.4.4. Ensaio 2: Concreto com Resistência aproximada de 40MPA sem adição de Fibras.	51
4.4.5. Ensaio 4: Concreto com Resistência aproximada de 40MPA com adição de Fibras	51
5 Conclusão.....	53
5.1. Curva de calor.....	53
5.2. Surgimentos de Fissuras.....	53
5.3. Perdas de Massa.....	53
5.4. Resistência a Compressão	54
6. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	55
Referências.....	56

1. Introdução

Os vários materiais que constituem o concreto trabalham em conjunto como um único material – “concreto armado endurecido” – apresentando boas características térmicas para o intervalo de temperatura dentro das condições normais de uso. A natureza polifásica do concreto confere-lhe um comportamento complexo quando submetido a temperaturas elevadas. Em incêndios, as transformações na microestrutura do concreto podem levar os elementos estruturais à ruptura precoce. Em situação de incêndio, as estruturas devem atender a um tempo mínimo (padrão) de resistência requerido por normas ou legislação, a fim de garantir a segurança na fuga dos ocupantes da edificação e, quando necessário, as operações de combate. As alterações físicas e mecânicas do concreto podem ser minimizadas se certos parâmetros de dosagem e geometria dos elementos estruturais forem respeitados, assegurando a resistência da estrutura durante o tempo requerido (COSTA, C. N. et al, 2002).

A utilização de fibras nos compósitos é uma opção já utilizada há vários anos e ainda pode ser amplamente explorado para agregar benefícios a estruturas de concreto. Há, inclusive, relatos de seu uso no Egito, quando o povo utilizava palha como argamassa. Como dito no livro sagrado, “[...] *não continueis a fornecer palha ao povo, como antes, para o fabrico de tijolos*”. Na Antiga China, há indícios de seu uso para a construção da mundialmente conhecida muralha da China. Seu estudo científico sobre o comportamento destes deu-se apenas na década de 50 com a entrada das fibras de aço e vidro. (TANESI; FIGUEIREDO, 1999).

Na atualidade o emprego das fibras vem se difundindo por todo o mundo, ela vem sendo largamente utilizada para vários setores da construção civil com o intuito de gerar propriedades benéficas em termos de segurança aos compósitos. Sua finalidade é minimizar deficiências dos compósitos convencionais que não conseguem o desempenho desejado. Sua procura também se deve ao ser requerido em locais ou condições adversas às quais também não se consegue o resultado esperado de compósitos convencionais.

Compósitos, como já diz o nome, são materiais compostos basicamente por duas fases: a matriz e as fibras. As fibras podem atuar como um reforço da matriz em função das propriedades desta e das próprias fibras. (FIGUEIREDO, 2000). Concreto é um

exemplo de composto, composto por uma fase agregado e outra fase pasta, que é a matriz, cujo comportamento consiste na combinação das propriedades dos materiais que o constituem. (FIGUEIREDO, 2000).

Segundo Figueiredo (2000), é sabido que a qualidade dos componentes de matrizes de cimento não é mais caracterizada apenas pela resistência à compressão que apresentam, mas devem refletir outras propriedades que influenciam o desempenho do material como um todo.

Recentemente, um número crescente de estudos vem sendo realizados em laboratórios de todo o mundo visando melhorar o desempenho do material concreto, ou seja, produzir concreto com propriedades especiais. Os pesquisadores se deparam com variadas possibilidades de melhoramentos desse desempenho: aumento da durabilidade, redução do peso específico, minimização de aberturas de fissuras internas, restrição à penetração de substâncias agressivas, aprimoramentos no processo de fabricação, aumento da capacidade de absorção de energia ou tenacidade, aumento da resistência à compressão e aumento da resistência à tração. Tais estudos envolvem tanto a concepção do material em função da sua estrutura, como a determinação da sua vida útil, numa tentativa de se minimizar o seu desgaste, a presença de fraturas e problemas diversos, ocasionados pelo envelhecimento do composto (Bezerra A. C. S., 2012).

1.1. Objetivo

O principal objetivo desse trabalho consiste em estudar o comportamento mecânico de concreto com e sem adição de fibras de polipropileno e submetido a altas temperaturas. Para a avaliação do comportamento mecânico do concreto será considerado o valor de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos, considerando também formas de resfriamento (brusco e lento) após o aquecimento. Também será feita uma avaliação da curva de calor gerada pelo forno utilizado para o estudo.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Comportamentos do concreto em altas temperaturas.

O efeito das altas temperaturas sobre as propriedades mecânicas do concreto tem sido investigado desde 1940 e, desde então, tem-se constatado sua influência sobre o comportamento destes materiais. Quando expostos às altas temperaturas, materiais à base de cimento sofrem mudanças físico-químicas que prejudicam suas propriedades mecânicas e comprometem sua resistência à transferência de calor (D. Matesová, D. Bonen, S. P. Shah, 2006).

As alterações de comportamento na presença de calor são resultantes da evaporação da água presente na matriz cimentícia, sob forma livre ou combinada, durante o processo de aquecimento. Quando a estrutura de poros é aberta, o vapor liberado pode escapar facilmente, resultando num alívio de parte das tensões geradas com o calor (Kutzing, 2002). No entanto, pesquisas realizadas em concretos de alta resistência, expostos a temperaturas elevadas, tem demonstrado que existem substâncias diferentes de comportamento frente ao calor quando se lida com concretos de mais alta densidade (Phan & Carino, 1998; Kodur, 1997).

Quando um material à base de cimento como o concreto é aquecido, diversos fenômenos químicos e físicos ocorrem na faixa de temperatura entre 100 °C e 900°C. Até aproximadamente 550 °C, apenas a pasta de cimento passa por mudanças físicas e químicas, enquanto a maioria dos agregados comumente utilizados é pouco influenciada pelo aquecimento. Nesta faixa de temperatura, as reações endotérmicas ocorrem seguindo a ordem: liberação da água da pasta de cimento (água capilar), desidratação da etringita, do monossulfoaluminato de cálcio e do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), do C-S-H e do carbonato de cálcio (Castro A. L. *et al*, 2011).

Com relação aos agregados, os efeitos das altas temperaturas sobre o agregado de sílica são distintos daqueles sobre os calcários: na temperatura ambiente, a forma estável do quartzo é a forma α , que se transforma em β -quartzo a 573 °C, que posteriormente se transforma em β -tridimita a 867 °C e que, para temperaturas superiores a 900 °C, se transforma em β -cristobalita; por outro lado, os agregados calcários apenas se dissociam para temperaturas variando entre 700 °C e 970 °C (D. Matesová, 2006, A. Noumowe, 2005).

O comportamento de concretos expostos às altas temperaturas não pode ser relacionado com um fator único, sendo na verdade influenciado por diversos aspectos, tais como a taxa de aquecimento, a temperatura máxima de exposição, a relação água/cimento, o tipo de agregado, o teor de umidade, a porosidade, a resistência do concreto, o tamanho e a idade da amostra, o tipo de cura, a adição mineral e/ou o tipo de fibra incorporada, o carregamento aplicado etc., de maneira que a alta temperatura

influencia o seu comportamento tensão-deformação e a transferência de umidade e calor no seu interior (D. Matesová *et al*, 2006).

2.2. Comportamentos com concreto com fibras em altas temperaturas.

A tecnologia do emprego de fibras de polipropileno como elementos de reforço no concreto vem experimentando significativo crescimento de demanda nos últimos anos e essas tem experimentado nos últimos 2 ou 3 anos, no Brasil, um aumento significativo de uso. Atualmente é possível relatar obras diversas que tiveram de alguma forma a incorporação de fibras de polipropileno. Contudo, a dosagem desse material para utilização no concreto, ainda vem sendo trabalhada, para se chegar a uma utilização desse material de forma eficiente e econômica.

A fibra é um material fino, fibrilado e alongado. Elas podem ser aproveitadas para diversas finalidades, dependendo da sua origem e composição. Podem ser encontradas fibras naturais, artificiais e sintéticas. As naturais são as fibras encontradas prontas na natureza, as artificiais são produzidas pelo homem através das materiais da natureza e as sintéticas são também produzidas pelo homem, porém, oriundas de produtos químicos.

As fibras de polipropileno fazem parte da classe das fibras sintéticas, sendo produzida pelo homem, através de material petroquímico reciclado. É mais conhecida pela sua sigla PP (Polipropileno).

A produção das fibras de polipropileno acabou por ter sido desenvolvida e ter o seu processo patenteado pela empresa de produtos petrolíferos Shell. Seu método foi o de produzir fibras fibriladas picotadas, como também concretos contendo tais fibras. (FIGUEIREDO; TANESI, 1999).

A permeabilidade do concreto é determinada por sua microestrutura e/ou porosidade e é esta propriedade que controla a expulsão de água do material submetido a temperaturas variadas. Dessa maneira, a estrutura de poros e o teor de aglomerante têm um efeito considerável sobre o comportamento de concretos expostos ao fogo, especialmente sobre o lascamento observado sob altas temperaturas. Como a incorporação de fibras altera a microestrutura de um concreto, as propriedades inerentes dos diferentes tipos de fibras também influenciam as propriedades destes materiais sob ação do fogo (A. Noumowe, 2005; P. Raivio 1994).

Os efeitos da fusão e da degradação das fibras contribuem para o aumento do volume de poros. Como a espessura da fibra corresponde à espessura da zona de interface, a utilização destas aparentemente introduz uma zona de interface adicional, resultando em uma maior permeabilidade do concreto (M. Zeiml *et al*, 2006).

Do ponto de vista industrial, uma dosagem de fibra de 2 kg/m³ de concreto, com comprimento entre 10 mm e 20 mm e diâmetro entre 50 µm e 200 µm normalmente é adotada como regra para evitar o lascamento em concretos de alta resistência. Porém,

estes valores não são otimizados e não podem ser extrapolados para uma ampla variação de concreto – com maior resistência, menor permeabilidade ou partículas menores – sem se conhecer exatamente como a fibra atua, em particular quando ela própria não constitui uma rede interconectada (P. Kalifa, 2001).

Os resultados de ensaios desenvolvidos por diversos pesquisadores e apresentados na literatura indicam efeitos contraditórios da adição de fibra de polipropileno sobre as resistências à compressão e à tração do concreto, sendo essas diferenças atribuídas às variações na composição da matriz, no tipo e na quantidade de fibra adicionada, nas condições de produção do material e nos métodos de ensaio adotados (A. M. Alhozaimy, 1996).

2.3. Curvas de Incêndio

Os primeiros estudos sobre o ramo ascendente das curvas temperatura-tempo de um incêndio natural compartimentado foram realizados no final da década de 50 (1958), pelo pesquisador japonês chamado Kunio Kawagoe, do Building Research Institute do Japão e por K. Odeen, do Royal Institute of Technology da Suécia, em trabalhos independentes.

Para a Engenharia Civil, a resistência ao fogo de materiais é avaliada por meio da reação ao calor do elemento influenciando a resistência da estrutura aquecida. A reação ao calor do material depende do carregamento térmico imposto à estrutura, condicionado a severidade da ação térmica.

As mudanças no comportamento das estruturas, quando submetidas a altas temperaturas do incêndio são devidas à ação térmica. O aumento da temperatura do elemento estrutural é um efeito da ação térmica; as características mecânicas do material aquecido são reduzidas e esforços solicitantes de origem térmica são desenvolvidos sobrecarregando a estrutura aquecida.

O concreto é um material composto, onde diferentes materiais que o compõem não reagem da mesma forma em contato com o fogo, tornando seu efeito sobre as estruturas de concreto um problema. O tempo de exposição, nível de temperatura alcançado e as proporções na mistura do concreto, influenciarão no grau de alteração que poderá ser produzido no concreto afetado por esses fatores. Para estudar os efeitos do fogo, onde cada incêndio tem suas características, é necessário realizar um fogo real, devido às variáveis.

O incêndio-padrão é o modelo de incêndio idealizado para análises experimentais, admitindo-se que a temperatura dos gases quentes no compartimento em chamas obedeça às curvas padronizadas. Na ausência de dados realísticos, as curvas padronizadas podem ser consideradas como a função temperatura da atmosfera do ambiente compartimentado. Na atualizada é utilizada uma variedade de curvas temperatura-tempo para descrever o incêndio e seu material combustível.

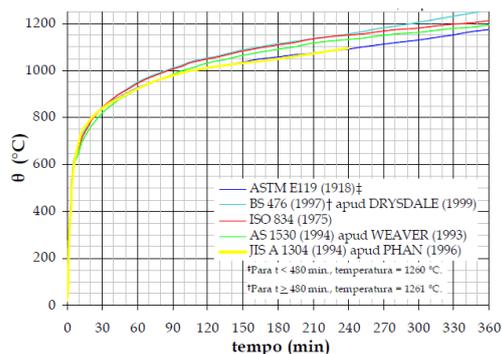


Gráfico 1: Curvas-padrão para incêndio de materiais celulósicos mais usados no meio técnico internacional (COSTA C. N., 2002).

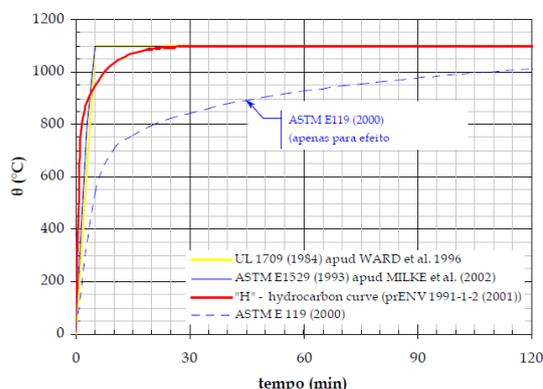


Gráfico 2: Curvas de incêndio americanas UL 1709 e ASTM E1529 e a curva europeia "H" para materiais hidrocarbonetos (COSTA C. N., 2002).

A maioria das normas internacionais utiliza o conceito de tempo requerido de resistência ao fogo no dimensionamento das estruturas. Por exemplo, no Brasil, esse TRRF é definido pela NBR 14432. Esse tempo é associado a curvas temperatura-tempo padronizadas. Essas curvas são definidas de forma similar em diversas normas internacionais. Originalmente foram criadas para ensaios de portas corta-fogo, elementos de vedação e de partes isoladas de uma estrutura (vigas, pilares, conexões etc.).

Embora as curvas-padrão, particularmente aquelas representativas de incêndio de materiais celulósicos, não permitam prognosticar o desempenho de elementos construtivos em incêndios reais, longe do controle laboratorial das condições de ensaio, elas permitem uma análise comparativa de resistência ao fogo entre elementos similares, servindo como indicadores qualitativas de resistência em função da severidade do aquecimento (COSTA & SILVA (2006)).

Para o presente trabalho, tomou-se como referência a curva padrão de incêndio baseada na ISO 834 (1994), ela é caracterizada pelo aumento contínuo da temperatura ao longo do tempo numa velocidade pré-estabelecida.

$$\theta_g = 345 \log(8t + 1) + 20$$

Onde:

θ_g é a temperatura dos gases, em °C;
 t é o tempo em minutos.

A curva-padrão é empregada em incêndios à base de materiais celulósicos. Há casos em que o material combustível armazenado no compartimento provoca um incêndio de maior intensidade do que incêndio-padrão, devido à presença de hidrocarbonetos. Nesse caso, utiliza-se a curva de incêndio chamada de curva “H”.

Essas curvas, a do incêndio padrão e a do hidrocarboneto, são denominadas pelo Eurocode 1 de curvas nominais de incêndio.

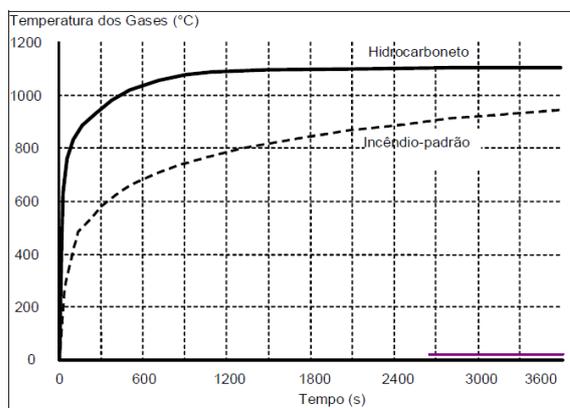


Gráfico 3 – Curvas dos incêndios-padrão e “H” (Eurocode 1)

Levando em conta que um incêndio seja composto essencialmente de três fases chamadas de ignição, aquecimento (aumento de temperatura) e resfriamento (diminuição da temperatura). O período de maior aumento da temperatura num incêndio compartimentado ocorre no período seguinte ao “flashover”, ponto esse onde todo material orgânico entra em combustão espontânea.

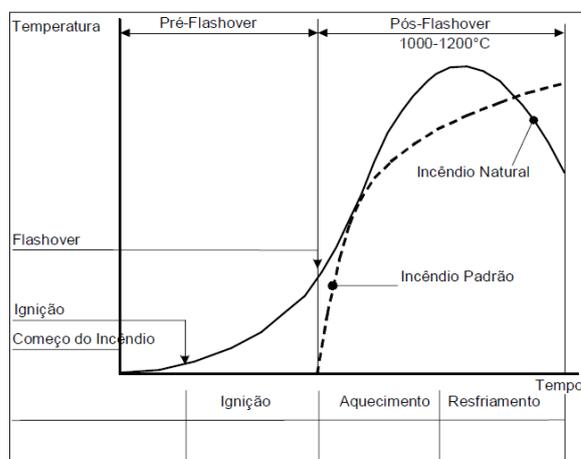


Gráfico 4 – Fases de um incêndio natural comparado ao incêndio-padrão (ISO 834, 2002).

A partir da curva temperatura-tempo dos gases quentes é possível determinar, a temperatura máxima atingida durante o incêndio. Essa temperatura pode ser utilizada para dimensionar o elemento estrutural.

3. Método

Para o desenvolvimento desse trabalho foi adotado o seguinte procedimento.

- 1) Quatro diferentes traços de concreto foram estabelecidos para o estudo, diferentes resistências a compressão e quantidade s de fibra de polipropileno.
 - Traço 1: 30 Mpa sem fibra.
 - Traço 2: 40 MPa sem fibra.
 - Traço 3: 30 MPa com fibra.
 - Traço 4: 40 MPa com fibra.
- 2) Para cada traço foram moldados 15 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento.
- 3) Os corpos de prova foram submetidos a altas temperaturas na seguinte forma:
 - 4 CPs foram aquecidos até a temperatura de 350°C no interior.
 - 4 CPs foram aquecidos até a temperatura de 450°C no interior.
 - 4 CPs foram aquecidos até a temperatura de 550°C no interior.
 - 1 corpo de prova foi utilizado para monitoramento da temperatura. Cada conjunto de 13 CPs de cada traço foram assim arrumados, mantendo 2 CPs para determinação da resistência à compressão sem aquecimento.
- 4) Após o aquecimento, os CPs foram submetidos a dois diferentes tipos de resfriamento:
 - Lento: resfriamento ao ar livre.
 - Brusco: resfriamento imediato, com imersão em água por 24 horas.

5) Após resfriamento dos CPs, foram realizados os ensaios para a determinação da resistência à compressão.

3.1. Materiais para composição concreta

Para o concreto foram utilizados os seguintes materiais.

3.1.1. Brita

Foi utilizado para esse estudo uma brita comercialmente encontrada no mercado. Apesar de aparentar possuir uma granulometria conhecida, foi preciso realizar um ensaio de peneiramento para se conhecer qual o tipo de material que iria fazer parte da composição do concreto. Esse procedimento foi realizado tomando como parâmetro a NBR 7211 [2009] E NBR NM 248 [2003], e sua execução se deu no laboratório de Engenharia Civil da UFPE, com a utilização de todas as peneiras recomendadas para esse tipo de ensaio.



Figura 1: Peneiras para Ensaio de Granulometria da Brita

O procedimento de peneiramento consiste basicamente em coletar uma amostra do material com peso conhecido e em seguida despeja-lo sobre o conjunto de peneiras de forma que elas estejam enfileiradas umas sobre as outras, em ordem crescente no que diz respeito a suas aberturas da malha. Após a execução dessa etapa, é coletado e pesado o material que fica retido em cada peneira, e assim compõe-se a curva granulométrica em função das porcentagens retidas de material.

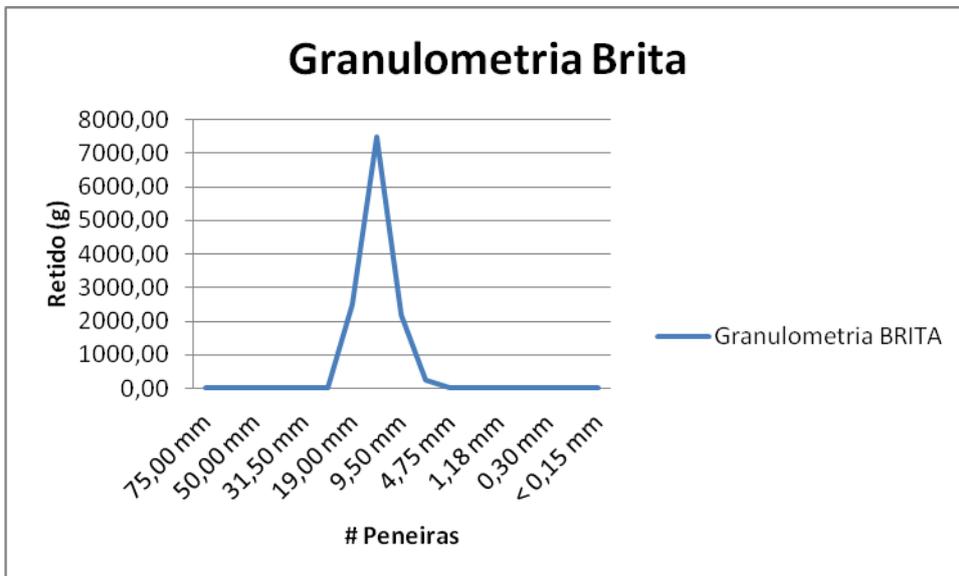


Gráfico 5: Granulometria da Brita Utilizada

A partir desses dados, podemos notar que se trata de um Brita em que sua composição possui a maioria das partículas com diâmetro equivalente a 19mm.



Figura 2: Brita Utilizada

3.1.2. Areia

O material arenoso utilizado para compor o concreto foi retirada de um rio, nas proximidades de Recife/PE. Sua composição granulométrica também era desconhecida, assim, foi realizado o mesmo ensaio de peneiramento desse material. Porém, com se

trata de um material mais fino, foi necessário à utilização de peneiras com uma abertura menor de suas malhas.



Figura 3: Peneiras para Ensaio de Granulometria da Areia

Com se está trabalhando com partículas pequenas, e em função do número de peneiras, foi utilizado para esse ensaio um equipamento para agitar as peneiras.



Figura 4: Equipamento utilizado para o peneiramento

Após a execução dessa etapa, chegou-se a seguinte distribuição granulométrica da areia utilizada para esse estudo.

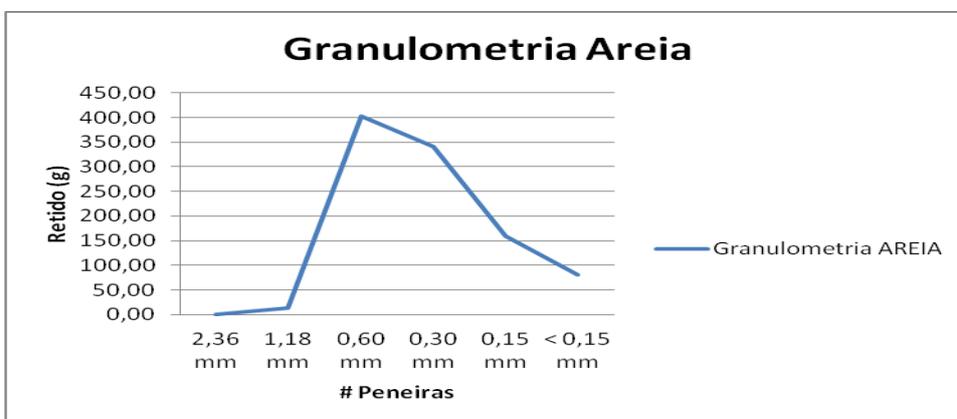


Gráfico 6: Composição Granulométrica da Areia Utilizada



Figura 5: Areia Utilizada

3.1.3. Cimento

O cimento utilizado para esse estudo foi adquirido no mercado comercial, de forma que atendesse a solicitação do traço de concreto estipulado. De acordo com o fabricante, se trata de um Cimento Portland Pozolânico Resistente a Sulfato (CP IV 32 RS), o qual estava dentro do prazo de validade e não aparentava visualmente problemas de umidade.



Figura 6: Cimento Utilizado

3.1.4. Água

A água utilizada foi a água potável, regularmente distribuída pela companhia distribuidora estadual de água.

3.1.5. Fibras de Polipropileno

Para esse estudo foram utilizadas fibras fornecidas pela empresa Maccaferri, que informou as seguintes especificações.

FibroMac® 12

Fibras para Reforço do Concreto

Características técnicas

FibroMac® 12 é uma fibra de polipropileno produzida a partir de multifilamentos indicada para o reforço de concretos e argamassas com a finalidade de gerar um composto homogêneo e controlar a fissuração por retração.



Propriedades Físicas		
Diâmetro	µm	18
Seção		Circular
Comprimento	mm	12
Alongamento	%	80
Matéria-prima		polipropileno
Peso Específico	g/cm ³	0.91

Propriedades Mecânicas		
Temperatura de fusão	°C	160
Temperatura de ignição	°C	365
Resistência à tração	MPa (Nmm ²)	300
Módulo de Young	MPa	3 000

Aplicação		
Campos de aplicação indicados		concreto projetado, pré-fabricados, pavimentos, pisos, revestimentos.
Quantidade de fibras por kilo		360 000 000
Área superficial específica	m ² / kg	244
Dosagem (recomendação mínima)	g / m ³	600

3.2. Composições de traço do concreto.

Para a definição do traço de concreto seguiu-se o método proposto por ABCP/ACI. Foram os seguintes traços em volume adotado para os concretos estudados.

- 1) Concreto sem fibra com resistência à compressão estimada em 30 MPa.

Água (l)	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Brita (Kg)
0,55	1	1,8	2,7

Tabela 1: Traço Unitário para concreto com aproximadamente 30MPa sem fibra.

2) Concreto sem fibra com resistência à compressão estimada de 40 MPa.

Água (l)	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Brita (Kg)
0,45	1	1,19	2,11

Tabela 2: Traço Unitário para concreto com aproximadamente 40MPa sem fibras.

3) Concreto com fibra e resistência à compressão estimada de 30 MPa.

Água (l)	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Brita (Kg)	Fibra (Kg)
0,55	1	1,8	2,7	0,005

Tabela 3: Traço Unitário para concreto com aproximadamente 30 MPa com fibra.

4) Concreto com fibra e resistência à compressão estimada de 40 MPa.

Água (l)	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Brita (Kg)	Fibra (Kg)
0,45	1	1,19	2,11	0,004

Tabela 4: Traço Unitário para concreto com aproximadamente 40 MPa com fibra.

3.3 Preparam do concreto e confecção dos corpos de prova.

Os procedimentos para preparo do concreto e confecção dos corpos de prova seguiu o estabelecido nas normas NDR 12655/96 e HBR respectivamente.

3.3.1. Primeira Mistura

O primeiro traço foi feito com o intuito de se obter um concreto com resistência à compressão aproximadamente de 30MPa sem a adição de fibras. Foram utilizados para essa composição os materiais e as proporções de traço.

A quantidade de corpos de prova para essa primeira situação foi de 15 unidades. Logo, o material foi separado e pesado de forma que pudesse suprir a demandas das formas cilíndricas 10x20 cm.



Figura 7: Separação e pesagem de materiais.



Figura 8: Betoneira utilizada para mistura do concreto

Após a separação do material foi realizada a mistura na betoneira. Quando o concreto estava pronto, foi feito ensaio “Slump Test”, para observar se atendia o 100mm de abatimento que foi especificado pelo laboratório.



Figura 9: Ensaio “Slump Test”

Após a realizar o ensaio do “Slump” e observar que atendia a solicitação do laboratório, já que os resultados foram 11,10 e 9, foi feito o preenchimento das formas, onde todas estavam devidamente lubrificadas. Para o processo de compactação foi utilizado o vibrador mecânico.



Figura 10: Formas Lubrificadas



Figura 11: Preenchimento das Formas

Após concluir o preenchimento das formas, os corpos de prova forma deixados ao ar livre secando por 24 horas, até que em seguida foram desmoldados e colocados na câmara úmida, onde permaneceram por mais de 28 dias em cura.



Figura 12: Corpos de Prova Desmoldados

3.3.2. Segunda Mistura

Para essa segunda mistura forma utilizados os mesmos matérias mencionado anteriormente, assim como os procedimentos utilizados para a primeira misturas. Porém, nesse caso em especial o traço unitário possui composição diferente, já que o intuito foi desenvolver um concreto com resistência a compressão de aproximadamente 40MPa e sem a adição de fibras. É importante ressaltar que para essa situação também foram confeccionados 15 corpos de prova com dimensão 10x20.

Nessa segunda mistura, além do traço unitário ser diferente da primeira, também possuía seu abatimento diferente. Após a finalização da concretagem foi realizado o ensaio de “Slump Test” e obtido os resultados 7,8,9 centímetros.



Figura 13: Ensaio “Slump Test”

3.3.3. Terceira Mistura

A terceira mistura se trata do mesmo traço unitário utilizado para o concreto de 30MPa, porém, para essa situação será empregada à adição da Fibra de Polipropileno em sua composição. Essa dosagem foi desenvolvida em função do traço unitário fornecido pelo laboratório e as informações enviadas pelo fabricante da fibra. Foram produzidos 15 corpos de prova com dimensões 10x20.

Para compósitos produzidos com a adição de Fibromac 12, o fabricante aconselha a utilização de 1 a 2 kg/m³ de concreto. Sendo esse dado empírico, sem muitos estudos na área, porém, para o presente trabalho foi adotado uma dosagem de 2 kg/m³ de concreto.



Figura 14: Fibra Utilizada para os Copos de Prova

A adição das fibras no concreto foi realizada juntamente com a água, ou seja, os materiais foram pesados e em seguida misturados, pois dessa forma há uma dispersão da fibra em contato com a água, ajudando na homogeneização da mistura.



Figura 15: Concreto com Adição de Fibras

Para esse mistura o abatimento teve grande diferença em relação à primeira, pois, apesar de serem mantidas as mesmas proporções de traço unitário, nessa situação houve a adição da fibra de polipropileno, material esse, que dá maior consistência a mistura. O Slump obtido para essa mistura foi 6,5 e 6 centímetros.

3.3.4. Quarta Mistura

Na produção dessa mistura foi utilizado o traço unitário para o concreto de aproximadamente 40 MPa, e junto com ele a fibra de polipropileno. A dosagem dessa fibra também foi feita em função da orientação do fabricante, utilizando 30 kg/M³ de concreto.



Figura 16: Ensaio “Slump Test” para o Concreto com Fibras de polipropileno.

O principal problema para esse compósito foi à falta de trabalhabilidade, pois como o traço unitário possui baixa relação água cimento, sem adição de aditivos, e também a presença da fibra aumenta a área de contato, proporcionando um mistura

pouco moldável. Essa observação pode ser bem notada na formação perfeita do cone de concreto no ensaio de “Slump Test”, o qual teve com resultados 4,4 e 5 centímetros.

3.4. Equipamentos

Para o aquecimento dos CPs e coleta de dados (temperatura), foram utilizados os seguintes equipamentos.

- Forno Linn Elektro Therm GMBH.
- Sete termopares tipo “K”.
- Coletor de dados Spider 8 (HBM).
- Notebook com software Catman (HBM).

3.5. Montagens dos ensaios de aquecimento

O início das atividades se deu logo após a confecção dos corpos de prova (CP) e passado o seu tempo de cura. Como foram confeccionados 15 CP para cada tipo de traço, somando-se no total 60 amostras, foi estipulado o seguinte plano de atividades; para cada tipo de traço iria ao forno 13 CP, onde um serviria de sacrifício, pois o mesmo seria fura para a colocação dos termopares, sobrando nesse caso 12 dentro do forno e 2 fora para serem ensaiados. Os copos de prova foram retirados do forno em parte, usando como parâmetro a temperatura interna do CP sacrificado. Essa temperatura foi estipulada em 350°C, 450°C e 550°C, onde intuito era avaliar o concreto submetido a diferentes variações de temperatura.

O primeiro passo foi furar um dos corpos de prova. Esse procedimento se deu com a utilização de uma furadeira normal, assim, foram feito 3 furos, onde cada um tinha 5cm de profundidade e estavam dispostos conforme figura abaixo.



Figura 17 – Execução dos furos no corpo de prova

Após a perfuração nos corpos de prova, foi feita a instalação dos equipamentos, depois foi colocado três termopares nos furos do CP, e em seguida foi colocado em volta dos buracos um material isolante para evitar a transferência de calor externo. Ao todo, se tinha sete termopares, onde todos foram interligados ao Speed 8 e ao

computador. Como três desses termocensores foram colocados no CP de sacrifício, os outros quatro foram colocados nas superfícies dos outros corpos de prova, para uma avaliação da temperatura externa.



Figura 18 – Colocando material isolante ao redor do termopar



Figura 19– Corpo de Prova monitorado dentro do Forno



Figura 20 – Todos os Corpos de Prova dentro do Forno

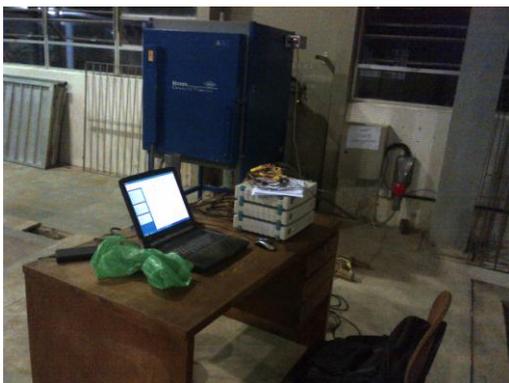


Figura 21 – Equipamentos instalados

O aquecimento dos CPs foram organizados na seguinte forma:

- Ensaio 1 → aquecimento do concreto 1 (Traço 1)
- Ensaio 2 → aquecimento do concreto 2 (Traço 2)
- Ensaio 3 → aquecimento do concreto 3 (Traço 3)
- Ensaio 4 → aquecimento do concreto 4 (Traço 4)

4. Resultados

4.1. *Curvas de aquecimento do forno*

Para esse trabalho tentou-se chegar a uma curva o mais próximo possível da ISO 834, 1994, porém, em virtude das condições do forno utilizado, não foi possível chegar a uma condição semelhante. O forno utilizado possui um sistema de programação, o qual controla a taxa de crescimento da temperatura, assim, foi feito algumas tentativas para se chegar às condições mais próximas possíveis do que é estipulado pela norma.

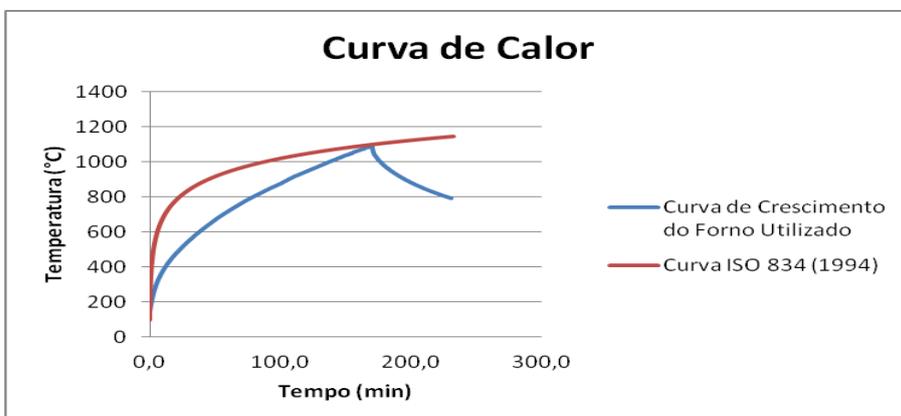


Gráfico 7 – Comparação entre as Curvas de Calor

4.1.1. Ensaios 1: Concreto com Resistência aproximada de 30MPA sem adição de Fibras

Quando todos os procedimentos de instalação dos termopares foram finalizados, deu-se início ao ensaio. A programação adotada para o forno foi à mesma mencionada anteriormente.

A retirada dos corpos de prova do forno foi realizada em etapas, porém, essa retirada se dava em função de dados fornecidos pelos termocensores colocados no interior do corpo de prova de sacrifício. Quando a temperatura chegou ao 350°C, foram retirados 4 CP, sendo dois para resfriamento brusco e ou outros dois para resfriamento lento. O resfriamento bruto se trata de retirar o CP do forno e coloca-lo quase instantaneamente em contato com água, já o resfriamento lento se trata de retirar o corpo de prova do forno e deixar o mesmo resfriando ao ar livre. Após a retirada dos primeiros corpos de prova, aguardou-se até que a temperatura chegasse a 450°C para retirar mais 4 CP e fazer o mesmo procedimento anterior, metade para resfriamento brusco e a outra metade para resfriamento lento. O mesmo procedimento foi feito quando se atingiu a temperatura de 550°C.

Para esse ensaio, durante a retirada dos corpos de prova, a temperatura de leitura para os termopares colocados na face externa, se apresentaram da seguinte forma: na primeira retirada dos CP a 350°C de temperatura nos termopares internos, os externos apresentavam 460°C; para a segunda retirada dos CP a 450°C de temperatura interna, os externos apresentavam 600°C; e por ultimo, a terceira retirada a temperatura de 550°C de temperatura interna, os externos apresentavam 720°C.

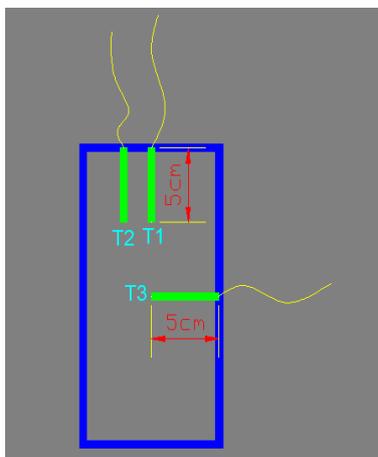


Figura 22 – Disposição dos furos no corpo de prova

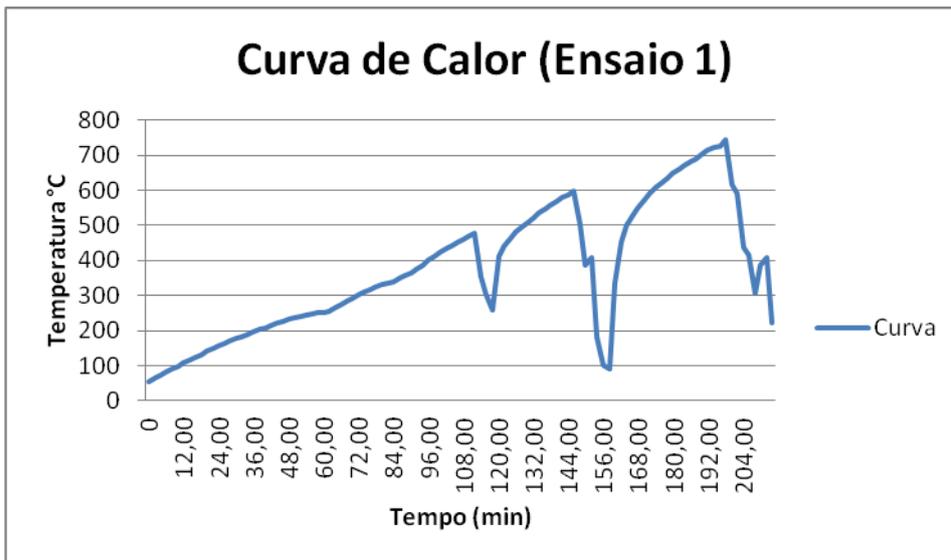


Gráfico 8 – Curva de Calor Externa (Ensaio 1)

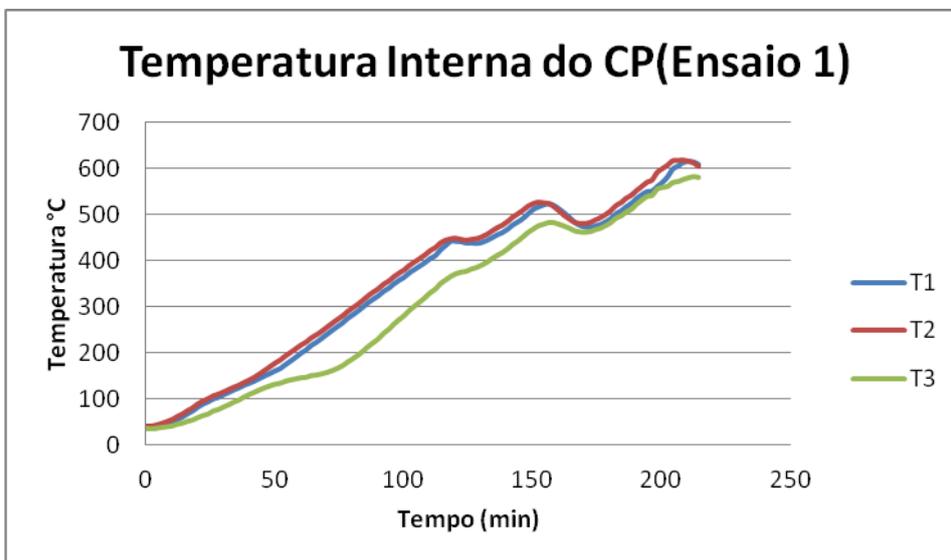


Gráfico 9 – Curva de Calor no interior do Copo de Prova de Sacrifício de (ensaio 1)

Devido à retirada dos corpos de prova em etapa, com várias aberturas do forno, ocorreram algumas variações nas leituras da temperatura externa, porém, não foi observados grandes variações nas temperaturas apresentadas para os termopares conectados ao corpo de prova de sacrifício, com exceção das leituras próximas aos 550°C. Pois como se tratava do primeiro ensaio, e pela falta de experiência, houver grande perda de calor durante a retirada dos corpos de prova.

4.1.2. Ensaios 2: Concreto com Resistência aproximada de 40MPA sem adição de Fibras

O procedimento de ensaio para essa situação é o mesmo utilizado anteriormente, porém, com algumas alterações. Para esse caso foram utilizados 15CP, os termopares

também foram colocados no interior de um dos CP, mas com distribuição diferente, conforme figura abaixo.

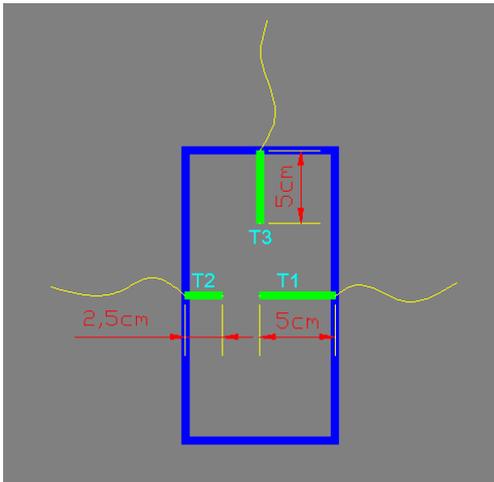


Figura 23 – Disposição dos furos no corpo de prova

Para esse ensaio, durante a retirada dos corpos de prova, a temperatura de leitura para os termopares colocados na face externa, se apresentaram da seguinte forma: na primeira retirada dos CP a 350°C de temperatura nos termopares internos, os externos apresentavam 490°C; para a segunda retirada dos CP a 450°C de temperatura interna, os externos apresentavam 600°C; e por ultimo, a terceira retirada a temperatura de 550°C de temperatura interna, os externos apresentavam 710°C.

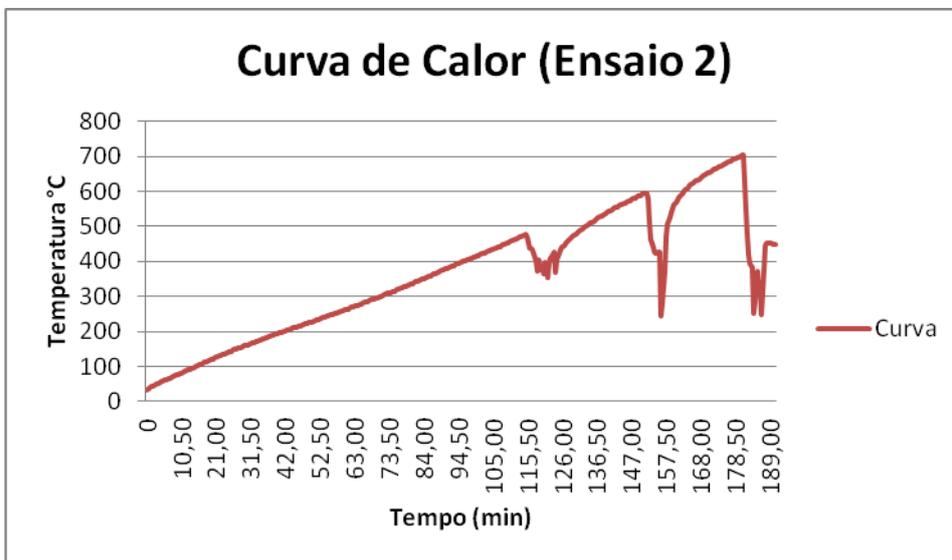


Gráfico 10 – Curva de Calor Externa (Ensaio 2)

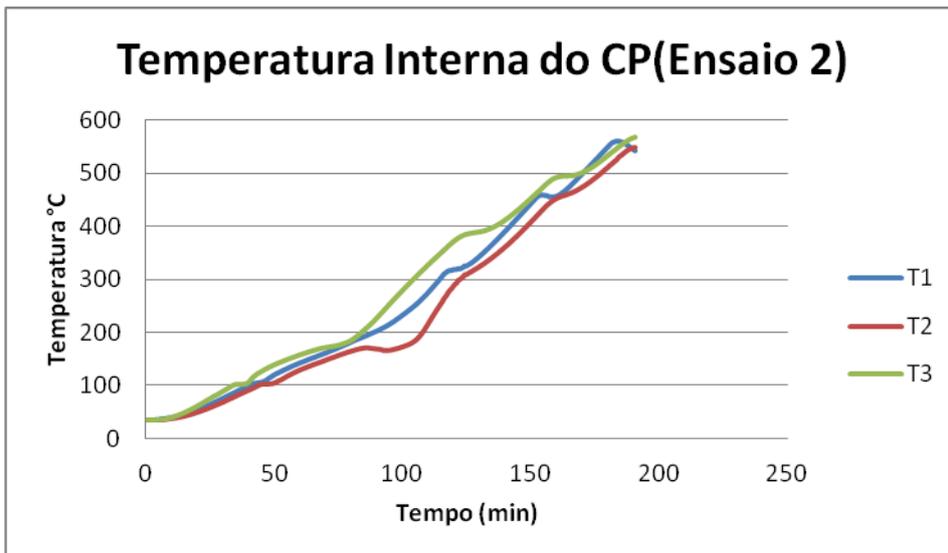


Gráfico 11 – Curva de Calor no interior do Copo de Prova de Sacrifício de (ensaio 2)

Como o tempo de retirada dos corpos de prova não são iguais, pois em cada situação há difernetes variáveis, e também a composição do concreto é difente, os gráfico podem não ser iguais ao anterior, porém, possui grande semelhança.

4.1.3. Ensaio 3: Concreto com Resistência aproximada de 30MPA com adição de Fibras

Foram avaliados nesse ensaio 15 CP com os mesmos procedimentos descritos anteriormente. Sua disposição dos termopares no interior do corpo de prova e suas curvas de calor se apresentaram conforme figuras abaixo.

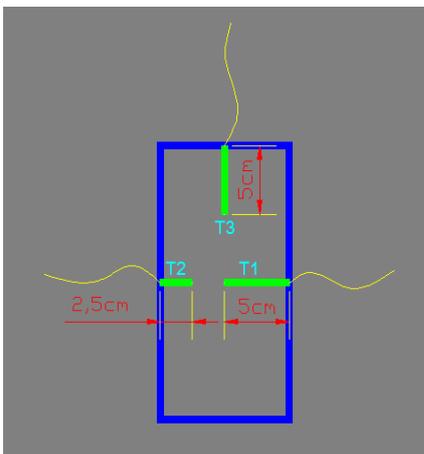


Figura 24 – Disposição dos furos no corpo de prova

Para esse ensaio, durante a retirada dos corpos de prova, a temperatura de leitura para os termopares colocados na face externa, se apresentaram da seguinte forma: na primeira retirada dos CP a 350°C de temperatura nos termopares internos, os externos aprsentavam 500°C; para a segunda retirada dos CP a 450°C de temperatura interna, os

externos apresentavam 610°C; e por ultimo, a terceira retirada a temperatura de 550°C de temperatura interna, os externos apresentavam 700°C.

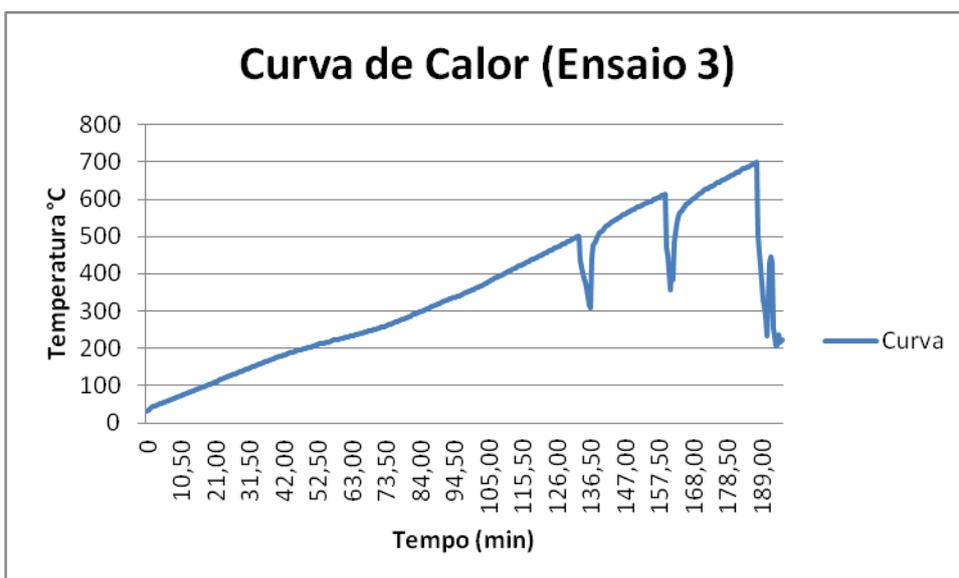


Gráfico 12 – Curva de Calor Externa (Ensaio 3)

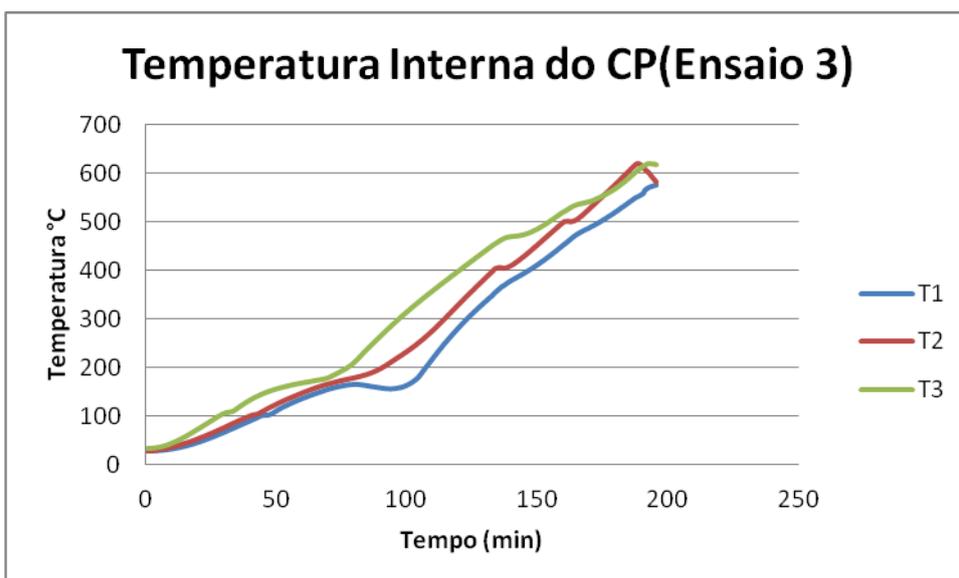


Gráfico 13 – Curva de Calor no interior do Copo de Prova de Sacrificio de (ensaio 3)

Para esse ensaio, há presença de caimento da temperatura interna dos corpos de prova, porém, ao contrário do primeiro ensaio, esse decaimento está ocorrendo próximo às leituras de 200°C, e o motivo não foi devido ao procedimento de retirada dos CP, já que esse procedimento só ocorreu aos 350°C. Como as fibras de polipropileno em grande maioria são fundidas a aproximadamente 160°C, pode ter ocorrido alguma perda de temperatura em função desse fenômeno.

4.1.4. Ensaio 4: Concreto com Resistência aproximada de 40MPa com adição de Fibras

Para essa situação foram avaliados nesse ensaio 15 CP com os mesmos procedimentos descritos anteriormente. Sua disposição dos termopares no interior do corpo de prova e suas curvas de calor se apresentaram conforme figuras abaixo.

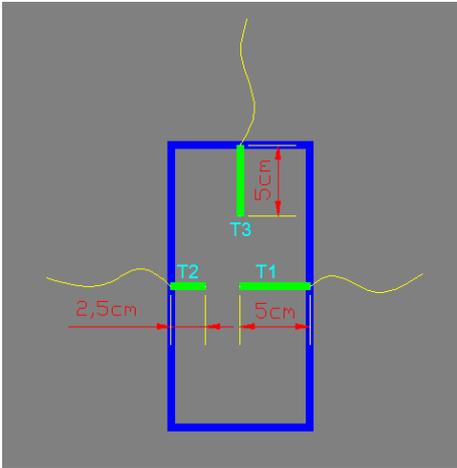


Figura 25 – Disposição dos furos no corpo de prova

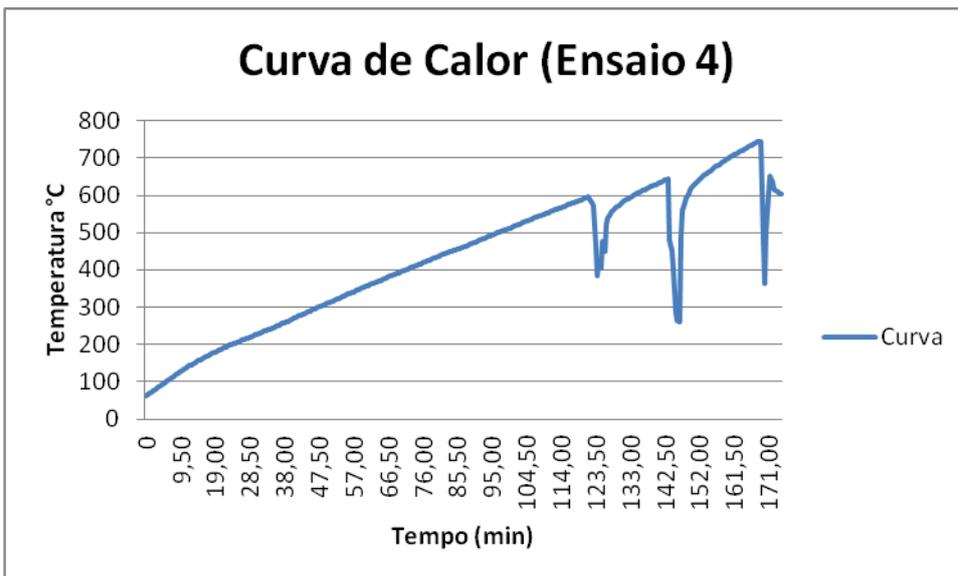


Gráfico 14 – Curva de Calor Externa (Ensaio 4)

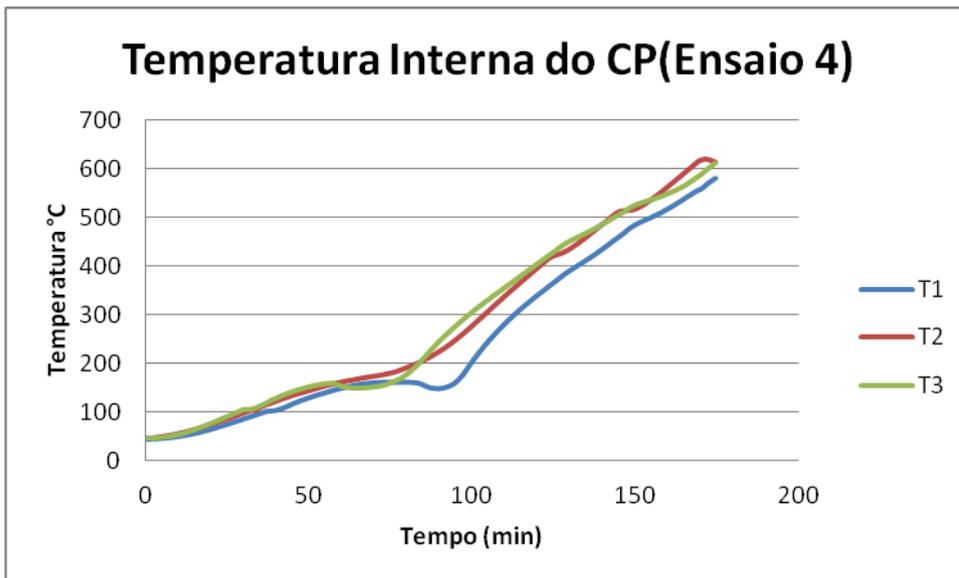


Gráfico 15 – Curva de Calor no interior do Copo de Prova de Sacrifício de (ensaio 4)

Para esse ensaio ocorreu à mesma perda de temperatura interna próxima as leituras de 200°C, ou seja, como esses CP também possuíam a adição de fibras em sua mistura, há um certo envolvimento desse material com esse decaimento.

4.2. Avaliações das Fissuras

Durante o processo de aquecimento do concreto, há o acréscimo de pressão interna nos poros, decorrente da evaporação da água presente na matriz cimentícia, associada às tensões geradas pelos gradientes de deformações térmicas, ocasionando o surgimento das fissuras. Como para esse trabalho foram utilizados quatro tipos diferentes de concreto, e também devido ao fato deles terem sido submetidos a temperaturas variáveis, foi feita a avaliação do surgimento das fissuras.

Para essa situação da figura(26) foi possível observar que os dois CPs possuíam mesma quantidade de fissuras, mesmo com um deles apresentando fibras de polipropileno em sua mistura.



Figura 26: Concreto de 30MPa retirado do forno a 350°C e resfriado ao ar livre.
Lado esquerdo CP sem adição de Fibras / Lado Direito CP com adição de Fibras

Para a situação da figura(27), mesmo o CP tendo sido submetido a uma temperatura 450°C, ele não apresentou uma grande diferença em suas fissuras se coparado ao de 350°C, assim como também não apresentou diferenças devido à adição de fibras de polipropileno.



Figura27: Concreto de 30MPa retirado do forno a 450°C e resfriado ao ar livre.
Lado esquerdo CP sem adição de Fibras / Lado Direito CP com adição de Fibras

No concreto submetido a 550°C, conforme figura(28), foi possível obsevar um grande ganho de fissuras em relação às outras amostras anteriores, porém, a presença da fibra em uma de suas composições não apresentou melhoras de desempenho.



Figura 28: Concreto de 30MPa retirado do forno a 550°C e resfriado ao ar livre.
Lado esquerdo CP sem adição de Fibras / Lado Direito CP com adição de Fibras

Apesar do concreto mostrado na figura (29) possuir maior resistência que os anteriores, seu numero de fissuras pode ser considerado com aproximadamente equivalente ao de menor resistência e submetido a mesmas condições de temperatura.



Figura 29: Concreto de 40MPa retirado do forno a 350°C e resfriado ao ar livre.
Lado esquerdo CP sem adição de Fibras / Lado Direito CP com adição de Fibras

Para a situação da figura(30), o desempenho foi semelhante ao anterior, mesmos sendo submetido a temperaturas superiores.



Figura 30: Concreto de 40MPa retirado do forno a 450°C e resfriado ao ar livre.
Lado esquerdo CP sem adição de Fibras / Lado Direito CP com adição de Fibras

No CP apresentado na figura(31), foi observado um grande aumento de fissura para os dois casos, com e sem fibras. Em virtude de ele ter sido submetido a uma temperatura superior aos demais, suas fissuras estavam bem aparentes e em um número bem maior que os outros.



Figura 31: Concreto de 40MPa retirado do forno a 550°C e resfriado ao ar livre.
Lado direito CP sem adição de Fibras / Lado esquerdo CP com adição de Fibras

4.3. Avaliações da Perda de Massa dos Corpos de Prova

Como estamos trabalhando com concreto submetido a elevadas temperaturas, é natural que se tenha perda de peso dos materiais após receber calor. Com tudo, foi feita uma avaliação de massa perdida pelo CP em função da temperatura que o mesmo foi submetido. Para cada situação estudada, se trabalhou com duas amostras de corpos de provas, como forma de garantir maior qualidade ao estudo.

O procedimento de ensaio consistiu em pesar os corpos de prova antes e depois de serem submetidos ao calor. Porém, em virtude do tempo, foram avaliados apenas os CP que tinham sido submetidos à secagem ao ar livre, já que os resfriados bruscamente estavam umedecidos.



Figura 32: Pesagem dos CP

4.3.1. Gráficos com Demonstrativo da Perda de Massa dos CP

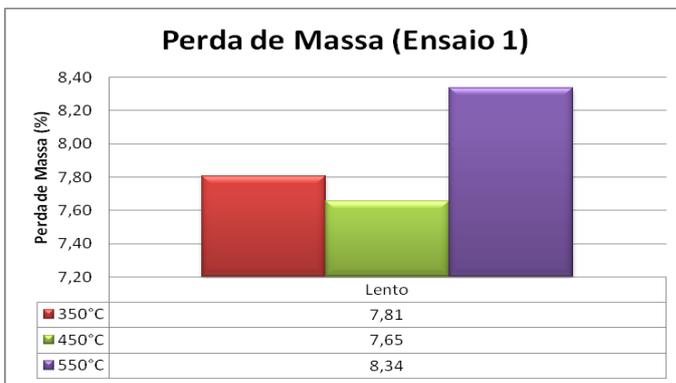


Gráfico 16: Perda de Massa dos Corpos de Prova (Ensaio1)

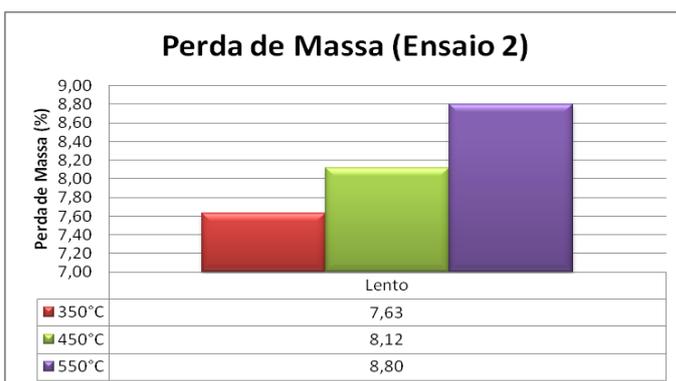


Gráfico 17: Perda de Massa dos Corpos de Prova (Ensaio 2)

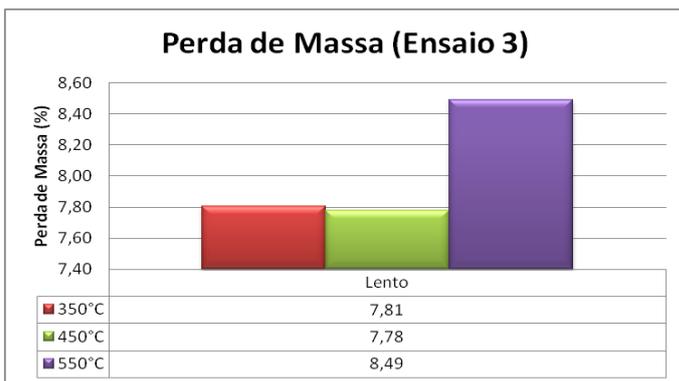


Gráfico 18: Perda de Massa dos Corpos de Prova (Ensaio 3)

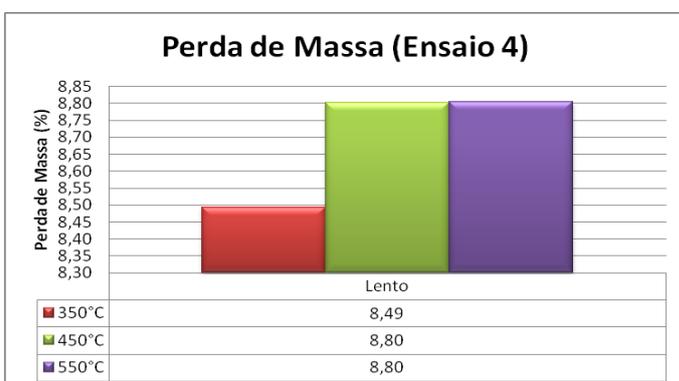


Gráfico 19: Perda de Massa dos Corpos de Prova (Ensaio 2)

Apesar de se ter diferentes composições de concreto e variações nas temperaturas aos quais eles foram submetidos, com tudo, as temperaturas estudadas foram todas superiores a 100°C, que já é suficiente para vaporização à água adsorvida. Esse fato proporciona a grande semelhança na perda de massa em todos os CP, mesmo os que possuíam em sua composição as fibras de polipropileno, pois a massa desse material é irrelevante se comparada a dos agregados, água e cimento.

4.4. Avaliações de Resistência a Compressão Axial

Um dos principais objetivos desse trabalho foi avaliar as propriedades de resistências à compressão do concreto em diferentes situações. Após os CP terem sido submetidos a altas temperaturas e terem passado pelo processo de resfriamento brusco ou lento durante 48 horas, foi realizada a ruptura a compressão. Para cada situação estudada, foram rompidos dois corpos de provas, como forma de garantir maior qualidade ao estudo.

No dia do ensaio de ruptura a compressão dos corpos de prova, os mesmo já estavam com um bom tempo de cura. O traço com resistência aproximada de 20MPa com e sem adição de fibras estava com 90 dias, o de resistência aproximada de 40MPa sem fibras estava com 70 dias e o com adição de fibras estava com 60 dias. Apesar de

terem sido moldados em datas diferentes, as correlação feitas nesse estudo, se deram em função do concreto moldado nas mesmas data.



Figura 33: Prensas utilizadas nos ensaios de ruptura a compressão axial

4.4.1. Avaliação de Resistência do concreto com e sem Fibras de Polipropileno

O presente estudo fez uma avaliação da resistência do concreto com e sem a adição de fibras em seu estado natural, ou seja, sem que ele fosse submetido ao calor. A avaliação foi feita para os dois tipos de concreto, com resistência aproximada de 30MPa 40MPa.

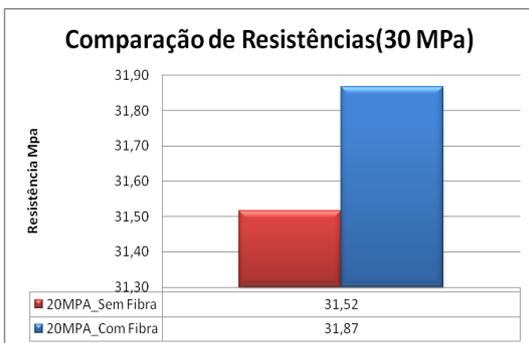


Gráfico 20: Resistência a Compressão do concreto com e sem adição de fibra no estado natural

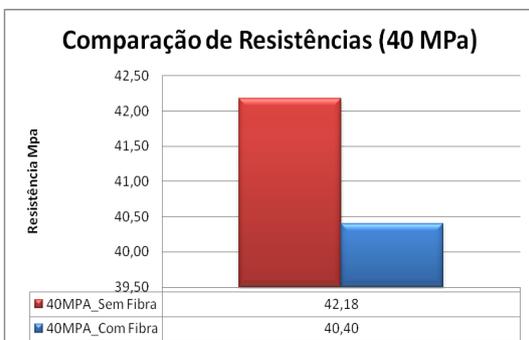


Gráfico 21: Resistência a Compressão do concreto com e sem adição de fibra no estado natural

Nas duas situações, o concreto de resistência aproximada de 30MPa ou 40MPa, a adição das fibras não proporcionaram grandes alterações nos resultados. Apesar de se ter certa diferença na resistência dos CPs, não é possível responsabilizar as fibras de polipropileno como responsáveis por essa diferença.

4.4.2. Ensaio 1: Concreto com Resistência aproximada de 30MPa sem adição de Fibras

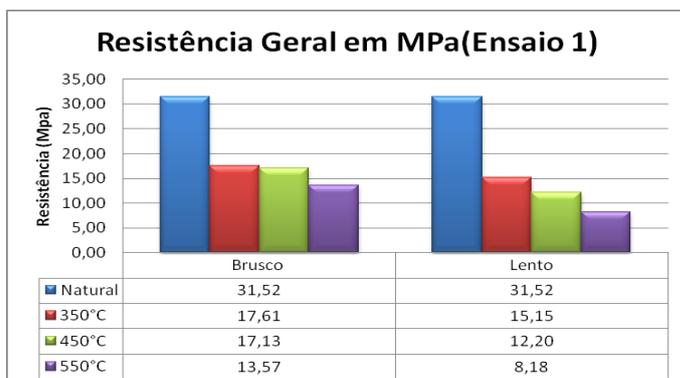


Gráfico 22: Resistência a Compressão do concreto sem adição de fibra, submetido à alta temperatura.

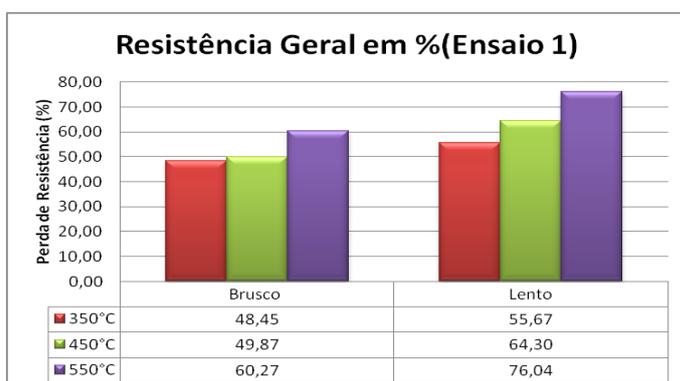


Gráfico 23: Perda de Resistência a Compressão do concreto sem adição de fibra, submetido à alta temperatura.

Os ensaios de compressão foram realizados em todos os corpos de provas com resfriamento brusco, lento e no estado natural, para cada situação foram confeccionados dois corpos de prova. O primeiro gráfico mostra a resistência à compressão obtida em cada um dos CP analisados. O segundo gráfico mostra a perda de resistência de cada CP se comparado a maior resistência obtida, ou seja, a resistência obtida com o CP no seu estado natural.

Através dos resultados representados nos gráficos acima, foi possível observar as devidas perdas de resistência dos CP em função do aumento da temperatura. Para o resfriamento brusco, foi visto que suas resistências possuem grande proximidade para as duas primeiras temperaturas, em 350 e 450°C, vindo a sofrer um acréscimo de perda apenas na última etapa do ensaio, com temperatura de 550°C. O comportamento do

resfriamento lento se deu de forma escalonada, tendo um decaimento de resistência em função da elevação de temperatura. As amostras se comportaram em parte conforme o previsto, com uma queda de resistência em função da submissão a altas temperaturas.

4.4.3. Ensaio 3: Concreto com Resistência aproximada de 30MPa com adição de Fibras

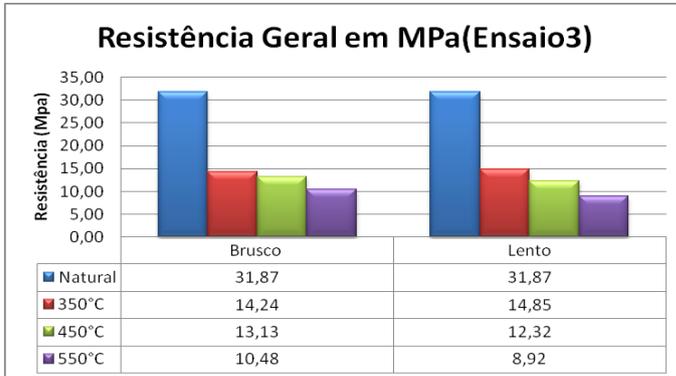


Gráfico 24: Resistência a Compressão do concreto com adição de fibra, submetido à alta temperatura.

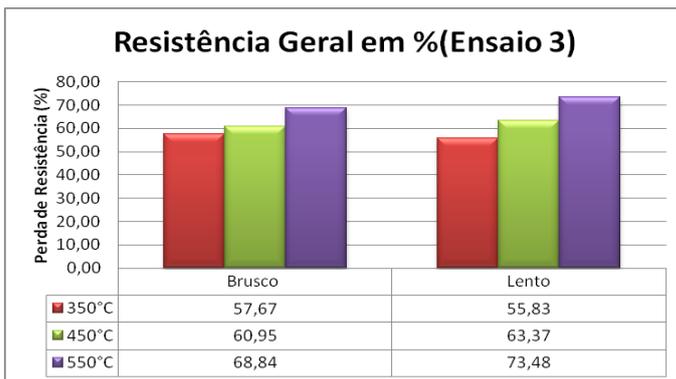


Gráfico 25: Perda de Resistência a Compressão do concreto com adição de fibra, submetido à alta temperatura.

Para esse caso, as resistências as compressão tiveram um resulta semelhante ao concreto sem adição de fibras, porém, suas perdas foram um pouco mais elevadas que o primeiro ensaio, ver planilha abaixo.



Gráfico 26: Comparação por CP com resistência aproximada de 30MPa.

4.4.4. Ensaio 2: Concreto com Resistência aproximada de 40MPa sem adição de Fibras

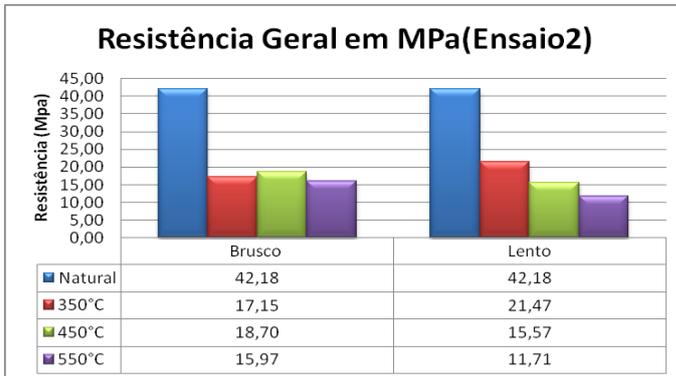


Gráfico 27: Resistência a Compressão do concreto sem adição de fibra, submetido à alta temperatura.

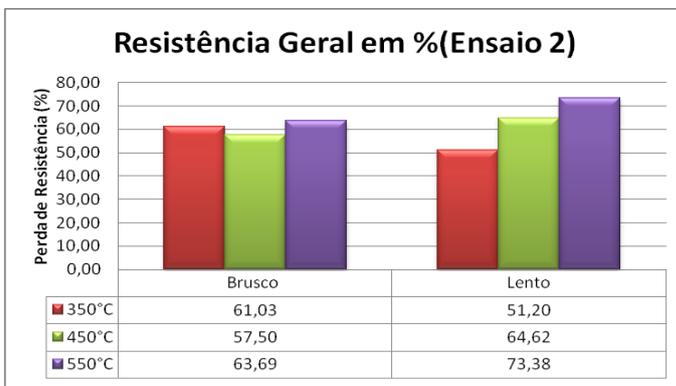


Gráfico 28: Perda de Resistência a Compressão do concreto sem adição de fibra, submetido à alta temperatura.

Apesar de se tratar de um concreto com maior resistência que o primeiro, em consequência uma composição diferente, suas perda de resistência em termos percentuais não ficaram tão distante do primeiro caso.

4.4.5. Ensaio 4: Concreto com Resistência aproximada de 40MPa com adição de Fibras

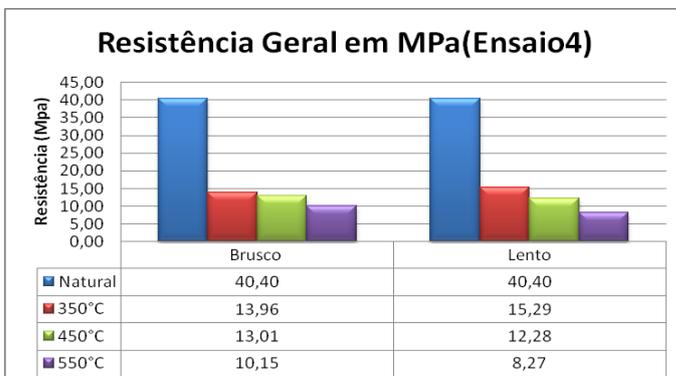


Gráfico 29: Resistência a Compressão do concreto com adição de fibra, submetido à alta temperatura.

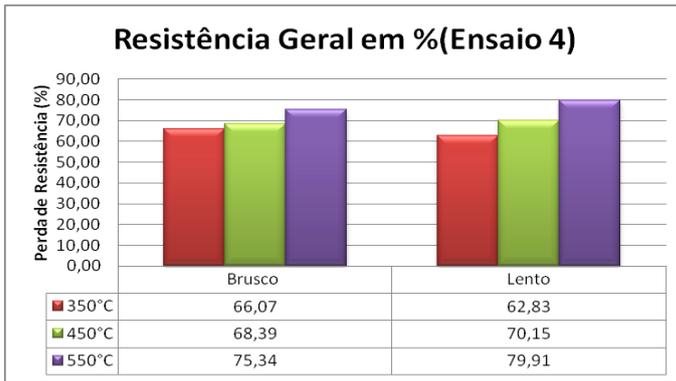


Gráfico 30: Perda de Resistência a Compressão do concreto com adição de fibra, submetido à alta temperatura.

Com se pode ver no gráfico acima, a dição das fibras ao concreto não proporcionaram uma diminuição na perda de resistência a compressão, já que os resultados de perda em termos percentuais possuem grande semelhança com os anteriores.

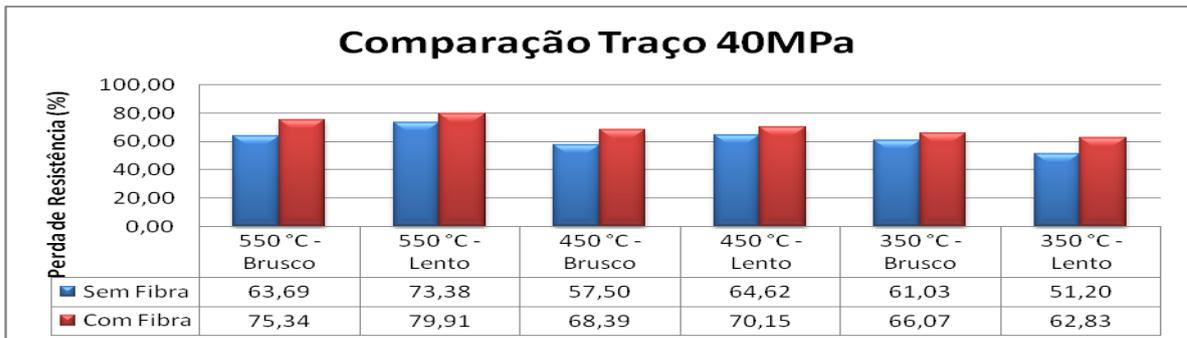


Gráfico 31: Comparação por CP com resistência aproximada de 40MPa.

Apesar da comparação entre perdas de resistência do concreto com e sem fibras, para a situação apresentada, ter resultados um tanto equivalentes, o concreto com fibras apresentou em sua grande maioria, perdas maiores que o sem fibras. Esse fato pode se dar em virtude de estarmos trabalhando com um concreto convencional, com um grau de porosidade relevante. Ou seja, com o aumento da temperatura as fibras se fundem, deixando espaços vazios, e se o concreto já possui uma porosidade suficiente para suprir a necessidade de evitar o crescimento da pressão interna, aumentar esses espaços só torna o concreto mais frágil.

5 Conclusão

5.1. Curva de calor

O incêndio é modelado por expressões que relacionam o crescimento da temperatura dos gases quentes do compartimento, com o tempo de duração do incêndio. A curva-padrão de materiais celulósicos (ISO 834 /1994) é mundialmente difundida por meio de códigos normativos.

Para o presente estudo tentou-se chegar o mais próximo possível de uma curva que tivesse um taxa de crescimento semelhante à curva ISO 834 (1994). Devido às limitações do forno disponível para ensaio, não foi possível conseguir desenvolver uma programação que tivesse uma taxa de crescimento compatível com a estipulada por norma. Entretanto, foi desenvolvido uma curva de calor experimental com suas características conhecidas, tornando o trabalho apresentado como um modelo de ensaio submetido a altas temperaturas com taxa de crescimento do calor conhecida.

5.2. Surgimentos de Fissuras

No processo de aquecimento do concreto, já se esperava o acréscimo de pressão interna nos poros, decorrente da evaporação da água presente na matriz cimentícia, associada às tensões geradas pelos gradientes de deformações térmicas, ocasionando o surgimento das fissuras. Porém, no concreto com adição das fibras de polipropileno, queria se obter uma comprovação de desempenho em comparação com o concreto sem a adição de fibras.

Embora as características térmicas de um concreto de alta densidade sejam semelhantes aos de um concreto convencional. O concreto denso possui uma maior sensibilidade às altas temperaturas devido à sua porosidade reduzida, apresentando uma maior perda relativa das propriedades mecânicas e a ocorrência do lascamento explosivo na faixa de temperatura entre 100 °C e 400 °C (M. Li, C. X. Qian, W. Sun, Mechanical properties of high-strength concrete after fire, Cement Concrete Res. 34, 6 '2006'). O concreto utilizado nesse estudo não se caracteriza com de alta densidade. Portanto, não foi observado diferenças entre a quantidade de fissuras de um concreto com e sem a adição de fibras, o que é coerente com a literatura revisada.

5.3. Perdas de Massa

Apesar de se ter diferentes composições de concreto e variações nas temperaturas aos quais eles são submetidos, com tudo, as temperaturas estudadas foram todas superiores a 100°C, que já é suficiente para vaporização à água adsorvida. Esse fato proporciona a grande semelhança na perda de massa em todos os CP, até mesmo os que possuíam em sua composição as fibras de polipropileno, pois a massa desse material é irrelevante se comparada a dos agregados, água e cimento.

5.4. Resistência a Compressão

Nos concretos de densidade normal, a quantidade de poros existentes permite a migração do vapor para a superfície com relativa facilidade e, da mesma forma, a migração da umidade para as camadas mais internas. A baixa permeabilidade do concreto de alta densidade faz com que o vapor gerado durante o aquecimento não encontre porosidade suficiente na matriz para atingir superfície, ocasionando a saturação dos poros existentes e elevando as pressões internas (Anderberg, 1997; Kodur, 1997).

O concreto convencional, já possui uma porosidade suficiente para permitir a migração facilitada do vapor criado no seu interior, quando há um aumento de temperatura. Esse estudo avaliou dois tipos de concreto, um com resistência aproximada de 30MPa e outro de 40MPa. Os dois traços foram avaliados com e sem a adição de fibras de polipropileno. Para o de menor resistência os resultados foram obtidos conforme o esperado, ou seja, a adição das fibras em sua composição não alterou suas características de resistência à compressão no estado natural. Quando submetido a altas temperaturas, sua perda de resistência foi bem notável, porém, o concreto com e sem a adição de fibras se comportaram da mesma forma, suas perdas de resistências foram semelhantes. Mesmo trabalhando com resfriamento brusco e lento, após o ganho de calor, o comportamento dos materiais, em se tratando de resistência, não tiveram grandes variações, suas perdas foram de valor aproximado, no que diz respeito a uma comparação entre o concreto com e sem fibras. A variação da temperatura a qual os corpos de prova foram submetidos, não proporcionou variações de resistência tão severas. Esse fato deve ter ocorrido devido a proximidades entre elas e também pelo fato da primeira temperatura já possuir um valor elevado. Ou seja, o corpo de prova que recebeu a menor quantidade de calor, já estava submetido a um alto valor de deterioração, que o deixou em um estado bastante frágil, sem possibilidades de sofrer maiores perdas. Para o concreto de maior resistência, acreditava-se que haveria uma maior discrepância nos resultados de resistência a compressão obtida para o concreto com e sem fibras, submetido a altas temperaturas. Como se tratava de um material com maior quantidade de cimento, era de se esperar que houvesse uma maior dificuldade na migração do vapor de água, o que levaria a um resultado com grande perda de resistência após ser submetido ao calor. Porém, foi possível notar que o comportamento desse concreto se deu de forma semelhante ao de menor resistência, suas perdas foram em proporções semelhantes e o comportamento do concreto com e sem a adição de fibras, não foram divergentes. O concreto utilizado para esse estudo não continha agregados com granulometria apropriada para confecção de um material com alta densidade, o que leva a considerar esse concreto como sendo convencional.

6. Sugestões para Trabalhos Futuros

Na atualidade existe uma crescente demanda por concretos cada vez mais resistentes e duráveis, caracterizados por sua alta densidade e baixo volume de vazios. O concreto com sua matriz densa, em condições térmicas extremas, tende a sofrer grande perda de eficácia, ou seja, sua resistência à compressão sofre um elevado decaimento. Estudos recentes mostram que a utilização das fibras de polipropileno para essa situação proporcionam melhorias de desempenho bem notáveis. Uma análise com concretos desenvolvidos com essas características, em situações adversas de temperatura, com variação de dosagens, seria um estudo de grande valia para o mercado de trabalho.

Referências

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, (1994).
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, (2008).
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações – Procedimento. NBR 14432/00. ABNT. Rio de Janeiro, (2000).
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto – Rio de Janeiro, (2009).
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217: Determinação da composição granulométrica– Rio de Janeiro, (1987).
- ALHOZAIMY A. M., SOROUSHIAN P., MIRZA F., Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials, Cement Concrete Composites 18, 2, pp. 85-92 (1996). (Rec. 13/12/2008, Ac. 28/03/2009).
- BEZERRA A. C. S., Concreto com fibras curtas de aço submetido à alta temperatura, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, (2012).
- CASTRO A. L.; TIBA P. R. T.; PANDOLFELLI V. C., Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos expostos a altas temperaturas, Cerâmica 57, pp. 22-31 (2011).
- CHAN S. Y. N., G. F. PENG, J. K. W. CHAN, Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature, Materials and Structures 29, 10, pp. 616-619 (1996).
- COSTA, C. N.; FIGUEIREDO, A. D.; SILVA, V. P., Aspectos Tecnológicos dos Materiais de Concreto em Altas Temperaturas, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo – S.P., (2002).
- EUROPEAN COMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2002, Basis of design and actions on structures, actions on structures exposed to fire (parte 2.2). Eurocode 1 – ENV 2002-2-2, Bruxelas.
- FIGUEIREDO, A. D., Concreto com Fibras de Aço. Boletim Técnico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, (2000).

KALIFA P., CHÉNÉ G., GALLÉ C., High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibers: from spalling to microstructure, *Cement Concrete Res.* 31, 10, pp. 1487- 1499 (2001).

KODUR, V. K. R., Studies on the resistance of high strength concrete at the National Research Council of Canada. In: PHAN, L. T. *et al.* International Workshop on Fire Performance of High Strngth Concrete, NIST, Gaithersburg, MD, Feb. 13-14, 1997. Proceeding ... NIST. Gaithersburg (EUA), (Feb. 1997). P.75-82 [NIST Special Publication 919].

KODUR V. K. R., T. C. WANG, F. P. CHENG, Predicting the fire resistance behavior of high strength concrete columns, *Cement Concrete Composites* 26, 2, pp. 141-153(2004).

KÜTZING, L., Fire resistance of high performance concrete with fibre cocktails. (1999). Disponível em: <http://www.uni-leipzig.de/massivb/institut/lacer04/104_19.pdf> Acessado em: 17 set. 2013

ISO - International Organization for Standardization, ISO 834, Fire-resistance tests, Elements of building construction: Specific requirements for non-loadbearing vertical separating elements, (2002).

MACCAFERRI. Manual Técnico. Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto. 2º Ed., (2009), Disponível em: < <http://www.maccafferri.com.br>>. Acesso em: 15 ago 2013.

MATESOVÁ D., BONEN D., SHAH S. P., Factors affecting the resistance of cementitious materials at high temperatures and medium heating rates, *Materials and Structures* 39, 9, pp.919-935(2006).

NOUMOWE A., Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibers exposed to temperatures up to 200 °C, *Cement Concrete Res.* 35, 11, pp. 2192-2198 (2005).

PHAN, L. T.; CARINO, N. J.; Review of mechanical Properties of HSC at elevated temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Fev. 1998, p. 58-64, (1998).

PINHEIRO, LIBÂNIO M.; MUZARDO, CASSIANE D.; SANTOS, SANDRO P.; CATOIA, THIAGO; CATOIA, BRUNA. Estruturas de Concreto. USP – EESC – Departamento de Engenharia de Estruturas, (2010).

POON C.-S., S. AZHAR, M. ANSON, Y.-L. Wong, Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures, *Cement Concrete Res.* 31, 9, pp. 1291-1300 (2001).

RAIVIO P., SARVARANTA L., Microstructure of fiber mortar composites under fire impact – effect of polypropylene and polyacrylonitrile fibers, *Cement Concrete Res.* 24, 5, pp. 896-906 (1994).

TANESI, J.; FIGUEIREDO, A. D. Fissuração por retração em concretos reforçados com fibras de polipropileno (CRFP). *Boletim Técnico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, (1999).

ZEIML M., LEITHNER D., LACKNER R., MANG H. A., How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of insitu concrete, *Cement Concrete Res.* 36, 5, pp. 929-942 (2006).