ANÁLISE DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO QUANDO SUBMETIDO A ALTAS TEMPARATURAS E AO RESFRIAMENTO

CURITIBA
2018

LUAN MARLON BUENO SANTOS
MARCELO WOLFF CZERNIAK
UZIEL RODRIGUES DE BRITO

ANÁLISE DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO QUANDO SUBMETIDO A ALTAS TEMPARATURAS E AO RESFRIAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós Graduação em Gerenciamento e Execução de Obras, Pós-Graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Gerenciamento e Execução de Obras.

Orientador: Prof. Msc. Mauricio Bianchini.

CURITIBA
2018

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus por ter nos dado saúde e força para superar as dificuldades.

A esta Instituição de ensino, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbramos um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

Agradecemos em especial ao nosso orientador Professor Mauricio Bianchini, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pela paciência, correções e incentivos.

Agradecemos também ao Engenheiro Civil Cesar Daher por ter disponibilizado o laboratório para que pudéssemos realizar os ensaios.

Eu Luan, agradeço a minha família que torcem e dão todo o apoio e incentivo necessário durante esta caminhada tão importante. Também aos amigos aos quais convivemos e tivemos a experiência de uma produção compartilhada durante nossa formação acadêmica.

Eu, Uziel Rodrigues de Brito, agradeço em especial a minha família que tanto me incentivou nessa jornada e hoje torce por mim, a minha mãe e irmãos pelo apoio incessante. E finalmente a amigos que me encorajarão ao longo dessa jornada.

Enfim, agradecemos a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigado.

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO QUANDO SUBMETIDO A ALTAS TEMPARATURAS E AO RESFRIAMENTO

Por

LUAN MARLON BUENO SANTOS

MARCELO WOLFF CZERNIAK

UZIEL RODRIGUES DE BRITO

TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ESPECIALISTA EM GERENCIAMENTO E EXECUÇÃO DE OBRAS, DO INSTITUTO IDD, PELA COMISSÃO FORMADA PELOS PROFESSORES A SEGUIR MENCIONADOS.

Curitiba (PR) ___ de _____ de _____.

_____

Prof. Msc. Mauricio Bianchini

_____

Nome do Prof. Co-orientador

_____

Nome do terceiro professor integrante da banca

RESUMO

A exposição do elemento estrutural à ação de altas temperaturas causa alterações na micro e macroestrutura do concreto endurecido, as quais refletem nas propriedades mecânicas. O tempo de exposição, nível de temperatura alcançado e o traço do concreto, influenciam no grau de alteração que poderá ser produzido no elemento estrutural. Esse fenômeno provoca elevados gradientes de temperaturas nas camadas internas da estrutura fazendo com que a água presente no concreto se evapore causando efeitos negativos à estrutura. O efeito do resfriamento pode ser tão destrutivo quanto à exposição a altas temperaturas devido aos esforços gerados, contrações repentinas na estrutura que provocam danos estruturais. Neste trabalho realizou-se um estudo referente aos efeitos deletérios das altas temperaturas em concretos de 30 e 80 MPa com e sem adição de fibra de polipropileno propriamente dito. Os ensaios executados com corpos de provas cilíndricos 10 x 20 cm tornaram verídicos os indícios de que tanto o concreto convencional quanto o de alta resistência frente ao fogo apresenta um efeito degradativo com o incremento da temperatura a que estiveram sujeitos, bem como do efeito da água utilizada para o resfriamento da estrutura.

Palavras chave: Concreto, altas temperaturas, Degradação, Estrutura, Resistência.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Triangulo do Fogo (BRASIL ESCOLA, 2017) 25
Figura 2. Conceito de tempo equivalente (COSTA, 2008)..... 40
Figura 3. Fases de um incêndio (KAEFFER, 2003)..... 42
Figura 4. Curva da ISSO 834, ASTIME 119 e EUROCODE 1 1995 (SILVA, 2004)..... 43
Figura 5. Transformações físico-químicas (COSTA, 2008)..... 49
Figura 6. Spalling explosivo causado por pressão de poros (INTECHOPEN, 2013)..... 53
Figura 7. Distribuição de temperatura na seção do concreto (STUCCHI, 2005) 54
Figura 8 – Areia Fina (OS AUTORES, 2017) 63
Figura 9 – Areia Artificial (OS AUTORES, 2017)..... 65
Figura 10 – Brita 1 (OS AUTORES, 2017)..... 66
Figura 11 – Fibra de Polipropileno (OS AUTORES, 2017)..... 67
Figura 12 – Aditivo Polifuncional (OS AUTORES, 2017)..... 69
Figura 13 – Aditivo Superplastificante (OS AUTORES, 2017)..... 70
Figura 14 – Sílica (OS AUTORES, 2017)..... 70
Figura 15 - Slump Test (OS AUTORES, 2017)..... 72
Figura 16 - Moldagem dos Corpos de Prova (OS AUTORES, 2017) 72
Figura 17 - Corpos de Prova (OS AUTORES, 2017)..... 73
Figura 18 - Cura dos Corpos de Prova (OS AUTORES, 2017)..... 73
Figura 19 - Inspeção e Identificação (OS AUTORES, 2017)..... 75
Figura 20 - Ensaio de Compressão Axial (OS AUTORES, 2017) 75
Figura 21 - Aquecimento dos Corpos de Prova (OS AUTORES, 2017) 76
Figura 22 – Resfriamento (OS AUTORES, 2017)..... 78

Figura 23 – Rompimento (OS AUTORES, 2017) 78
Figura 24 – Porosidade do Concreto (OS AUTORES, 2017) 80
Figura 25 – Análise termogravimétrica da fibra de polipropileno – VELASCO (2002, *apud* BENTZ) 80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo dos fatores e suas influências (VARGAS, 2003) . 34

Tabela 2. Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) em minutos (NBR 14432, 2001) 38

Tabela 3. Cobrimento nominal para concreto armado (NBR 6118, 2014) 46

Tabela 4. Classes de agressividade ambiental (NBR 6118, 2014)..... 46

Tabela 5. Cobrimento mínimo em função do TRRF (CÁNOVAS, 1988) 46

Tabela 6. Fatores de redução de resistência do concreto (NBR 15200, 2012) 51

Tabela 7. Influência da temperatura na coloração do concreto (CÁNOVAS, 1988) 56

Tabela 8. Fator de redução de resistência do aço (NBR 15200, 2012) 58

Tabela 9 – Composição granulométrica da areia fina (OS AUTORES, 2017) 64

Tabela 10 – Composição granulométrica da areia artificial (OS AUTORES, 2017) 65

Tabela 11 – Composição Granulométrica Brita 1 (OS AUTORES, 2017) 67

Tabela 12 – Informações Técnicas do Fabricante – Fibras (OS AUTORES, 2017) 68

Tabela 13. Traços dos concretos utilizados (OS AUTORES, 2017) . 71

Tabela 14 - Identificação dos Corpos de Prova (OS AUTORES, 2017) 74

Tabela 15 - Temperatura e Peso (OS AUTORES, 2017) 77

Tabela 16 – Resistência a Compressão (OS AUTORES, 2017)..... 81
Tabela 17 – Índices da norma versus obtidos nos ensaios (OS AUTORES, 2017) 85
Tabela 18 – Análise estatística para amostra 30 MPa c/ Fibra (OS AUTORES, 2017) 86
Tabela 19 – Análise estatística para amostra 80 MPa c/ Fibra (OS AUTORES, 2017) 87
Tabela 20 – Análise estatística para amostra 30 MPa s/ Fibra (OS AUTORES, 2017) 88
Tabela 21 – Análise estatística para amostra 80 MPa s/ Fibra (OS AUTORES, 2017) 88

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Influência da temperatura na resistência do concreto (CÁNOVAS, 1988) 50
Gráfico 2 – Influência da temperatura na resistência do aço (CÁNOVAS, 1988) 59
Gráfico 3 – Análise granulométrica da areia fina (OS AUTORES, 2017) 64
Gráfico 4 – Análise granulométrica da areia artificial (OS AUTORES, 2017) 66
Gráfico 5 – Perda de Água Evaporável (OS AUTORES, 2017) 79
Gráfico 6 – Resistência a Compressão (OS AUTORES, 2017) 82
Gráfico 7 – Fator de redução da resistência (OS AUTORES, 2017) . 83

LISTA DE EQUAÇÕES

(1) Elevação padronizada de temperatura em função do tempo 43
(2) Determinação da resistência à compressão axial compreendido para temperaturas.....51
(3) Módulo de elasticidade do concreto.....52

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS ..... **III**
FOLHA DE APROVAÇÃO ..... **IV**
RESUMO ..... **V**
LISTA DE ILUSTRAÇÕES ..... **VI**
LISTA DE TABELAS ..... **VIII**
LISTA DE EQUAÇÕES ..... **XI**
SUMÁRIO ..... **XII**
1. INTRODUÇÃO **15**
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA 17
1.2. OBJETIVO GERAL 18
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 18
1.4. HIPÓTESE 18
1.5. JUSTIFICATIVAS 19
1.5.1. Tecnológicas 19
1.5.2. Econômicas 20
1.5.3. Sociais 20
1.5.4. Ecológicas 21
1.6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 22
1.7. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO 23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **25**
2.1. CONCEITUAÇÃO DO INCÊNDIO 25
2.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A LEGISLAÇÃO VIGENTE 26
2.3. GERENCIAMENTO DOS RISCOS DE INCÊNDIO 30
2.4. FATORES QUE INFLUENCIAM NA VIDA E NO PATRIMÔNIO 32
2.5. AVALIAÇÃO DE RISCO DE INCÊNDIO 35
2.6. EXIGÊNCIAS DE RESISTÊNCIA AO FOGO 36

2.6.1. Tempo requerido de resistência ao fogo - TRRF 36
2.6.2. Método Tabular – NBR 14432:2001 37
2.6.3. Método do tempo equivalente – Eurocode 1 39
2.7. INCÊNDIO PADRÃO 41
2.8. ASPECTOS TECNOLÓGICOS DO CONCRETO SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS 44
2.8.1. Efeito da ação térmica no concreto armado 45
2.8.2. Efeito da ação térmica no concreto com adição de fibra de polipropileno 47
2.8.3. Efeito da ação térmica no aço 57
2.8.4. Efeito do resfriamento brusco do concreto aquecido 60
3. MATERIAIS E MÉTODOS 62
3.1. IDENTIFICAÇÃO E ESCOLHA DOS TRAÇOS PARA OS ENSAIOS 62
3.1.1. Caracterização dos materiais 62
3.1.2. Dosagem do Concreto 71
3.1.3. Moldagem dos Corpos de Prova 71
3.2. PROCEDIMENTO DO ENSAIO 74
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 79
4.1. PERDA DE ÁGUA EVAPORÁVEL 79
4.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS A COMPRESSÃO 81
4.3. FATORES DE REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA 83
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 90
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 91
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 92
Anexo 1 – Boletim de Ensaio Cimento CPII-F-40 99

Anexo 2 – Qualificação de material – Areia Fina 100
Anexo 3 – Qualificação de material – Areia Artificial 101
Anexo 4 – Qualificação de material – Brita 1 102

1. INTRODUÇÃO

O homem, em seu crescente desenvolvimento, sempre buscou encontrar soluções que pudessem sanar os problemas que submergem a humanidade. Mas há certos tipos de empecilhos que são quase impossíveis de serem suprimidos (CARNEIRO & BRITO, 2014).

No âmbito geral, os fenômenos naturais são os que mais desafiam a ciência humana. Um exemplo clássico e bem comum de incidir é o incêndio. Em pequenas proporções são mais fáceis de serem extintos, mas em grande magnitude torna-se quase que inimaginável seu controle (SILVA, 2006).

A tecnologia até então desenvolvida de combate a incêndios ainda não é o suficiente para acabar com grandes incêndios e são estes os que causam os maiores danos não só materiais como também sentimentais (SILVA, 2006)

No Brasil, há indícios de algumas edificações que logo após o incêndio, foram constatadas rupturas localizadas comprometedoras para edificação, como segue apresentado (CARNEIRO & BRITO, 2014):

a) Condomínio Conjunto Nacional, de 25 pavimentos, em São Paulo, no ano de 1978;

b) Condomínio Edifício Cacique, de 26 pavimentos, em Porto Alegre, no ano de 1996;

c) Edifício Hern Stolz – Eletrobrás, de 22 pavimentos, no Rio de Janiero, no ano de 2004;

d) Shopping Total, de 4 pavimentos, em Porto Alegre, no ano de 2007.

O concreto armado e um dos materiais mais utilizados na construção civil moderna. Sabe-se ainda que dentre os materiais que compõe o concreto, estes possuem propriedades distintas e a junção destes agregados resulta em um material muito resistente a compressão enquanto a tração fica por conta do aço.

Quando em contato com altas temperaturas, o concreto sofre mudanças no que diz respeito à estrutura química, física e perda gradual de água evaporável (SILVA, 2006).

O desarranjo dessas características reduz as propriedades mecânicas da estrutura afetando a resistência e o módulo de elasticidade dos materiais. Avarias tais como trincas e rachaduras são manifestações da deterioração do concreto, e até mesmo lascamento pode ocorrer, conforme mencionado em diversas literaturas (LIMA *et al*., 2004).

A natureza polifásica do concreto, conduz à degradação diferencial do concreto armado afetando as propriedades mecânicas da estrutura. Somando-se a isto há perda na rigidez da estrutura podendo levar as peças estruturais à ruína vindo a ocasionar até o colapso de toda a estrutura da qual faz parte (LIMA *et al*., 2004).

> Na construção civil há uma extrema consciência, por parte dos profissionais da área, dos problemas e inconveniências que podem ser causados pela ação da água. Mas somente nos últimos anos passou a haver uma "curiosidade" maior em se observar e estudar a ação do fogo nas estruturas, não só de concreto armado como também nas de aço. Várias pesquisas passaram a ser elaboradas e os resultados aos quais chegaram são extremamente preocupantes (SILVA, 2006).

Esta preocupação citada por Silva quanto ao assunto pode ser notada devido à chegada das normas NBR 14323:2003 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio, NBR 14432:2001 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento e NBR 15200:2012 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.

Estas normas tratam exclusivamente do assunto sendo expostos na NBR 15200 (2012) fatores para alteração das propriedades de resistência a rigidez do concreto quando submetidos à compressão axial.

Há uma vasta quantidade de ensaios destrutivos e não destrutivos que podem auxiliar na obtenção de resultados das condições adversas da estrutura, mas estes ensaios, por muitas vezes, fazem uso de tecnologias avançadas encarecendo e inviabilizando o estudo (SILVA, 2006).

Esta pesquisa tem intuito de por meio de ensaios simples, mas suficientes, apresentar dados referentes ao comportamento da estrutura feita em concreto armado pós-incêndio, que possa auxiliar na análise da estrutura e seu grau de reutilização. O estudo é baseado em dados experimentais não substituindo quaisquer métodos de determinação das condições estruturais. A pesquisa visa contribuir como apenas mais uma ferramenta para análise estrutural pós-incêndio.

No que tange ao desenvolvimento deste tema, um estudo experimental foi realizado embasado primeiramente por literaturas expressivas a respeito do contexto. Com o programa experimental, foi aplicada a teoria em laboratório, com a moldagem de corpos de prova com diferentes traços de concreto e submetendo-os a altas temperaturas e posterior ensaio de compressão axial conforme NBR 5739 (2007). Na sequencia, foi feita a análise dos resultados obtidos com os ensaios e conclusões embasadas nas revisões bibliográficas.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Analisar o efeito da ação da alta temperatura e posterior resfriamento na resistência à compressão do concreto reforçado com fibras de polipropileno.

1.2. OBJETIVO GERAL

Analisar o efeito da ação da alta temperatura e do resfriamento na resistência à compressão do concreto reforçado com fibras de polipropileno.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho são:

a) Comparar o efeito da ação de altas temperaturas e do resfriamento em concretos com diferentes resistências à compressão.

b) Comparar o efeito da ação de altas temperaturas em concretos reforçados com fibras de polipropileno e concretos usuais;

c) Realizar um comparativo analisando o fator de redução de resistência prescritas na norma NBR 15200:2012 com os valores obtidos nos ensaios.

1.4. HIPÓTESE

Espera-se que a adição de fibras de polipropileno no concreto tem a capacidade de atenuar a redução da resistência quando exposto a altas temperaturas e posterior resfriamento.

1.5. JUSTIFICATIVAS

O assunto mais relevante para o desenvolvimento desta pesquisa e a escolha do tema, dá-se ao fato de, teoricamente, o concreto armado não ser muito resistente quando submetido a altas temperaturas e posterior resfriamento.

1.5.1. Tecnológicas

Mesmo com todo avanço tecnológico existente no cenário mundial, ainda não se pode afirmar que há uma estrutura de concreto que resista à ação de altas temperaturas numa situação de incêndio. As estruturas atuais podem sofrer até seu colapso estrutural dependendo da temperatura que estiver submetida ao fogo (COSTA, 2002).

> No passado, as estruturas de concreto eram mais robustas, ou seja, maior volume de concreto quando comparados aos elementos de hoje e a resistência ao fogo era maior. Antigamente o concreto usual permanecia estável durante um período apreciável, protegendo a armadura durante o incêndio para uma temperatura no elemento estrutural compreendida entre 200 °C e 400 °C, dependendo da intensidade do fogo (COSTA, 2002).

Nos países desenvolvidos, a segurança contra incêndio é considerada ciência e, como tal, é pesquisada e aplicada. No Brasil, embora estudado há vários anos, o tema só ganhou maior impulso, na área das estruturas, com a publicação da NBR 14432:2000.

Quando submetido à uma situação de incêndio o concreto perde suas propriedades mecânicas e por ser formado por vários constituintes cada material perde sua resistência de alguma forma (COSTA, 2002)

> Os materiais têm suas propriedades alteradas conforme ocorrem alterações de temperatura dos gases aos quais estão submetidos por ação do fogo, dessa maneira torna-se importante entender essas

> alterações e protegê-los a fim de garantir segurança para evacuação caso ocorra um incêndio (COSTA & SILVA, 2003).

Devido a estes fatores, de o concreto ainda não fornecer uma total garantia de segurança às estruturas, justifica-se a necessidade de verificar a perda da resistência do concreto através de testes com simulações de incêndio, comparando sua resistência submetida à diferentes temperaturas e ao resfriamento, analisando à que temperatura a estrutura chegaria à um colapso estrutural (COSTA & SILVA, 2003).

1.5.2. Econômicas

No decorrer dos últimos anos o concreto vem sendo estudado de forma criteriosa, com o intuito de encontrar novas maneiras de deixa-lo ainda mais resistente, mesmo que ainda não foi encontrada uma forma definitiva de evitar as perdas das propriedades do concreto submetido à alta temperatura, a evolução deste material vem sendo constante, e consequentemente seu valor também vem aumentando (SILVA, 2006).

A escolha de materiais que venham a fortalecer o concreto pode aumentar o seu valor, porém se provadas as teorias de que o concreto está mais resistente à ação do fogo, pode-se haver uma economia na manutenção de uma estrutura após sofrer um incêndio (COSTA & SILVA, 2003).

1.5.3. Sociais

Quando uma estrutura está em situação de incêndio o fator primário é a prevenção da vida humana. As consequências por uma estrutura que não resiste

à ação do fogo podem afetar diretamente a sociedade, por perdas de vidas humanas e também perdas materiais (DI BIASE, 2011).

A tecnologia até então desenvolvida de combate a incêndios ainda não é o suficiente para acabar com grandes incêndios, pois são estes os causadores dos maiores danos não só materiais como também pessoais e sentimentais (SILVA, 2006).

Um caso de grande repercussão foi o ataque ocorrido em 11 de setembro de 2001 ao WTC (World Trade Center). O National Institute of Standards and Tecnology, órgão responsável pelas investigações do evento deu sua explicação oficial para o colapso progressivo sendo o de que as colunas de uma das paredes curvaram-se em resposta ao calor do incêndio e foram ineficientes na tentativa de suportar as cargas gravitacionais (DI BIASE, 2011).

Casos de incêndios são muito comuns no Brasil e em vários países, isto mostra a necessidade de se aprofundar neste assunto, com o objetivo de trazer mais segurança para as estruturas, e assim proteger muitas vidas e toda a sociedade (DI BIASE, 2011).

A norma NBR 14432:2001 trata exclusivamente das exigências de resistência ao fogo de elemento construtivos de edificações, delineando aspectos de cunho técnico e fornecendo critérios de segurança que os tornem aceitáveis estruturas afim de minimizar perdas no âmbito social.

1.5.4. Ecológicas

O mundo tem procurado se adaptar a ideia do ecologicamente correto, é um tema que tem tomado grandes proporções em todo o mundo, é uma ideia que visa uma busca por mais qualidade de vida desta e das futuras gerações, principalmente quando se fala de meio ambiente (HÜTNER *et al.*, 2014).

O concreto é o segundo material mais consumido no mundo e responde por cerca de 5% da emissão global de gases que contribuem para o efeito estufa. Na avaliação de especialistas, cada tonelada de cimento criaria 0,8 toneladas de gás carbônico, o conhecido CO2. (HÜTNER *et al.*, 2014).

Porém com esta procura de evolução na questão ecológica, já há várias maneiras de diminuir a emissão de gás carbônico e ajudar o meio ambiente, existem vários materiais que estão sendo incorporados na fabricação do concreto para diminuir o impacto ambiental, para suportar altas temperaturas, por exemplo, é adicionado fibras de carbono e argamassa refratária, estas tecnologias tem ajudado na questão ecológica e também na resistência do concreto submetido à altas temperaturas (DI BIASE, 2011).

Na ocorrência de um incêndio, por muitas vezes não é viável a recuperação da estrutura afetada, acarretando na demolição da mesma. O concreto sendo um material inerte, demanda de uma destinação correta para redução dos impactos causados pelo mesmo. A busca pelo estudo de estruturas mais resistentes ao incêndio visa também um maior aproveitamento de estrutura pós incêndio (HÜTNER *et al.*, 2014).

1.6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

No presente trabalho optou-se em analisar os efeitos da elevação da temperatura em corpos de prova cilíndricos de argamassa, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

Foram moldados 16 corpos de provas, sendo 8 amostras com adição de fibra de polipropileno e 8 amostras sem adição de fibra, onde os traços definidos de resistência à compressão do concreto foram de 30 e 80 Mpa.

Após 24 horas, os mesmos foram desformados e colocados submersos em água para execução de cura úmida. O procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova seguiu conforme prescrito na NBR 5738:2015.

Após 28 dias de cura úmida, todos os 16 corpos de prova foram levados a laboratório onde foram concretizados os ensaios. No primeiro instante foram feitas a pesagem das amostras antes de ensaia-las, e depois colocadas em mufla submetidas a patamares de temperatura de 100ºC, 300ºC e 600ºC.

Posteriormente ao aquecimento das amostras, os mesmos foram submetidos a resfriamento lento em água corrente na temperatura ambiente de 25°C.

Após aquecidas e resfriadas as amostras, foi possível executar o ensaio de compressão axial em prensa hidráulica para obtenção dos resultados de resistência.

Com término dos procedimentos elencados acima, foi possível consolidar a real comparação entre as perdas de resistência à compressão do concreto quando em temperatura ambiente, e em situações de incêndio com até 600ºC de temperatura, e ainda, se a fibra de polipropileno pode ou não interferir na perda de resistência à compressão do concreto.

1.7. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Neste item será exposto de forma resumida acerca do conteúdo de cada capítulo, como se mostra a seguir:

O **Capítulo 1** apresenta o problema de pesquisa e seus objetivos, bem como delineia as principais justificativas para a realização deste estudo e os procedimentos metodológicos a serem adotados.

O **Capítulo 2** apresenta a revisão bibliográfica e discorre sobre os tema incêndio no âmbito social e técnico assim como fatores que influenciam junta a projetos correlacionados as normas pertinentes vigentes. Além deste tema, elencamos as características do concreto armado frente a altas temperaturas.

O **Capítulo 3** trata dos materiais e métodos utilizados para execução do ensaio, apresentando informações de cunho técnicas dos corpos de provas.

O **Capítulo 4** apresenta a análise dos resultados deste estudo.

O **Capítulo 5** apresenta a as considerações finais acerca da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desenvolvimento tecnológico surge gradualmente à medida que o homem busca soluções para novos problemas. A importância do planejamento nesta área é medida pelos sinistros evitados e não pelos incêndios extintos. Apesar disto, as criações arquitetônicas e muitos outros projetos derivados ainda não são feitos à margem do conhecimento da ciência da prevenção contra o fogo. Neste capítulo apresentam-se conceitos de cunho técnico e normativo referidos adiante a fim de fundamentar o estudo.

2.1. CONCEITUAÇÃO DO INCÊNDIO

O incêndio é modelado por expressões que relaciona o crescimento da temperatura dos gases quentes do compartimento, com o tempo de duração do incêndio, portanto, trata-se de uma catástrofe provocada pelo fogo onde ocorre uma manifestação de combustão rápida com emissão de luz e calor, ou ainda, a queima prolongada de um determinado produto em alto grau de intensidade (MORALES *et al.*, 2011).

Inúmeras são as formas de origem do incêndio. Para que haja fogo é preciso que existam três elementos distintos, que combinados compõem o chamado triângulo do fogo como mostrado na Figura 1 (SILVA, 2006).

Figura 1. Triangulo do Fogo (BRASIL ESCOLA, 2017)

Os três elementos compreendem:

a) **combustível:** que alimenta o fogo e serve de campo para sua propagação, como a madeira;

b) **comburente:** é o ativador de fogo que dá vida às chamas, como o oxigênio;

c) **calor:** que dá início ao fogo. O calor deriva de fontes que se encontram ao nosso redor como, por exemplo, um palito de fósforo ou uma brasa de um cigarro.

Se um desses elementos não existir, não haverá fogo. Dos três, o mais difícil de ser eliminado é o oxigênio, pois está em toda à parte. Se, por exemplo, acendermos uma vela e em seguida colocarmos um copo sobre ela, impedindo a entrada de ar, em poucos segundos ela se apagará, por falta de oxigênio. Mas não há condições de se utilizar um abafador para eliminar o oxigênio no incêndio, com isso faz-se uso do resfriamento da estrutura por meio de água (CARNEIRO & BRITO, 2014).

2.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A LEGISLAÇÃO VIGENTE

A relação entre edificações, incêndios e explosões forma um sistema bastante complexo, dificultando assim o seu entendimento e quantificação. Talvez devido a esta complexidade é comum que os critérios de segurança para a sociedade seja estabelecidos através da legislação vigente. Vemos a seguir os pontos mais relevantes neste aspecto (DUARTE *et al*., 1998):

a) A NBR 6118, a qual trata de projetos e execução de obras de concreto armado, tem por objetivo relacionar algumas recomendações relativas as condições gerais que devem ser seguidas no que se refere ao projeto, execução e controle de obras de concreto armado. O sub-

item 3.1.1.4, recomenda que a variação da temperatura do concreto armado seja em torno de 10°C à 15°C. É observado que o impacto ao calor não é considerado, visto que a temperatura durante o flashover poderá atingir aproximadamente 600°C. Por outro lado, casos especiais, como por exemplo na construção de poços para elevadores de segurança a NBR 6118 deve ser completada pela NBR 5627 e NBR 5628;

b) Segundo a NBR 5627 e NBR 5628, o tempo que as peças estruturais especiais, tais como, paredes estruturais, lajes, pilares e vigas devem resistir ao fogo esta baseado no poder calorífico da matéria em relação a dimensão dos elementos construtivos e na determinação da resistência ao fogo através de ensaios;

c) A NBR 5628 prescreve um método de ensaio destinado a definir a resistência ao fogo através da observação da resistência mecânica e deformações, estanqueidade e isolamento térmico das peças de concreto armado e protendido nas condições normais de uso das peças estruturais definidas em projetos. Vale ressaltar, que não estando especificado no projeto as condições em que as peças estruturais estejam submetidas, será seguida a NBR 6118, logo o impacto ao calor não será considerado. Como resultado, busca-se usar outras ferramentas para a proteção das pessoas, conforme recomenda a NBR 9077, Norma Regulamentadora n° 23, entre outras;

d) A NBR 9077, define as saídas de emergência em edifícios, a qual faz referência as condições exigíveis que as edificações devem possuir, tais como o abandono de pessoas das áreas em caso de incêndio e o acesso de auxílio externo (Corpo de bombeiros) para o combate ao fogo. Foi observado que esta norma não faz qualquer referência à resistência estrtutural ao fogo dos acessos as saídas de

emergência. Razão pela qual é de fundamental importância que as condições a que estarão submetidas os acessos as saídas de emergências sejam especificadas nos projeto, afim de que a NBR 5628 seja aplicada.

Em nível mundial, nos Estados Unidos existe a NFPA – Notorial Fire Protection Association (Associação Nacional de Proteção contra Incêndio) que trata exclusivamente sobre o tema fogo. A primeira legislação, sobre este assunto, é de 1905. A título de curiosidade, na ABNT (órgão responsável pela normalização técnica no Brasil) existem aproximadamente 80 normas que versam sobre incêndio, na NFPA, são mais de 400 normas a respeito deste tema.

Existe ainda a americana ASTM – American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para Materiais e Testes), a DIN - Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão para Normatização), a ISO – International Organization for Standardisation (Organização Internacional para Padronização) presente em vários países e os EUROCODES – European Committee for Standardisation (conjunto de norma técnicas harmonizadas desenvolvidas pelo comitê europeu de normatização para o projeto estrutural das obras de construção da União Europeia) que tratam do assunto. Muitas das normas brasileiras são embasadas nos códigos europeus.

No Brasil, a prevenção de incêndios no âmbito legal é de responsabilidade do Corpo de Bombeiros, conforme art. 144 da CF/88 – Constituição Federal de 1988.

As normas técnicas do corpo de bombeiros busca oferecer aos profissionais vinculados aos conselhos regionais de engenharia e arquitetura aspectos proeminentes perante a utilização da edificação bem com métodos de combate a incêndio.

O Corpo de Bombeiros adota o Código de Prevenção de Incêndios e Normas Brasileiras para o cumprimento da prevenção contra incêndios, por meio

de vistorias técnicas. “O Código de Prevenção de Incêndios fixa os requisitos mínimos de proteção contra incêndios, exigíveis em todas as edificações, tendo em vista a segurança de pessoas e bens” (FERNANDES, 2010).

Ainda neste domínio existem os Comitês Brasileiros. São eles:

a) **CB-02:** Comitê Brasileiro da Construção Civil;

b) **CB-09:** Comitê Brasileiro de Combustíveis;

c) **CB-24:** Comitê Brasileiro de Proteção Contra Incêndio.

Essas normas complementam o Código de Prevenção de Incêndio e dão uma definição mais completa e específica das normas de prevenção contra incêndio. Dentre as diversas normas existentes, que são de grande valia para o estudo, se destacam:

a) NBR 15200:2012 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio;

b) NBR 14432:2001 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento;

c) NBR 14323:2013 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio;

d) NBR 9077:2001 – Saídas de emergência em edifícios;

e) NBR 9442:1988 – Materiais de construção – Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante – Método de ensaio;

f) NBR 14880:2014 – Saídas de emergência em edifícios – Escadas de segurança – Controle de fumaça por pressurização.

Além das chamadas normas regulamentadoras, outro parâmetro a ser adotado é o Código de Posturas do Município. Em Curitiba, por exemplo, adota-se a Lei 11.095 de 08 de Julho de 2004, que é o Código de Posturas de Obras do Município de Curitiba (FERNANDES, 2010).

Contudo, vale advertir que solucionar problemas através da legislação vigente tem suas vantagens e limitações. Uma vantagem associada à legislação é decorrente do consenso necessário e a rapidez em identificar falhas. Por outro lado, os perigos que não estiverem mencionados na legislação não serão considerados (FERNANDES, 2010).

Outra vantagem é que as regulamentações são escritas de forma que um vasto e profundo conhecimento técnico sobre a engenharia de incêndio não é necessário. O mesmo não acontece com relação aos aspectos estruturais, mecânicos e elétricos da legislação para o projeto de edificações. Como resultado, a não necessidade de um conhecimento especializado com relação à proteção contra incêndio e explosão, nos mostra que o embasamento técnico desta é fraco e a avaliação de desempenho do sistema é difícil de prever (SILVA, 2006).

2.3. GERENCIAMENTO DOS RISCOS DE INCÊNDIO

No conjunto atual a sociedade é mais compassiva aos incêndios e explosões com o potencial de causar danos ao meio ambiente e estrutural, somam-se a isto muitas vezes as implicações humanas (DUARTE *et al.*, 1998).

O princípio fundamental da segurança contra incêndio consiste em minimizar os riscos à vida humana e reduzir o detrimento patrimonial. O risco a vida em uma situação de incêndio pode ser entendido como a exposição severa dos usuários da edificação à fumaça ou ao calor. Já como perda patrimonial, o mesmo pode ser entendido como a extinção total ou parcial de edificações de caráter histórico bem como documentos de grande relevância, dos equipamentos e até mesmo de estoques (SILVA, 2006).

Um sistema de segurança contra incêndio consiste em um conjunto de meios que podem ser definidos como sendo ativos, o qual inclui detectores de calor e fumaça, sistema de sprinklers, brigada de incêndio a postos, instalações de prevenção de incêndio providos de extintores e hidrantes seguindo normas vigentes; e passivos que compreendem a resistência ao fogo das estruturas, saídas de emergência distribuídas ao longo da edificação que possam garantir a fuga dos ocupantes da edificação em condições de segurança das operações de combate ao incêndio, quando essas forem necessárias (SILVA, 2006).

Para qualquer dimensionamento, deve-se realizar um estudo prévio dos riscos de propagação de incêndio, bem como suas consequências, a fim de selecionar o sistema mais adequado de combate ao incêndio, evitando uma situação incontrolável, podendo acarretar perdas expressivas (CARNEIRO & BRITO, 2014).

O risco de início de um incêndio, sua intensidade e duração estão associados a:

a) Atividade desenvolvida no edifício, tipo e quantidade de material combustível nele contido, tecnicamente denominada carga de incêndio;

b) Forma do edifício. Um edifício térreo com grande área de piso, sem compartimentação, pode representar um risco maior de incêndio do que um edifício, com diversos andares, de mesma atividade, subdividido em muitos compartimentos, que mantém confinado o incêndio;

c) Condições de ventilação do ambiente;

d) Propriedades térmicas dos materiais constituintes das paredes e do teto;

e) Sistemas de segurança contra incêndio. A probabilidade de início e propagação de um incêndio é reduzida nas edificações onde existam estes sistemas.

2.4. FATORES QUE INFLUENCIAM NA VIDA E NO PATRIMÔNIO

Os dois aspectos que assumem especial destaque são a preservação da integridade das pessoas e perdas materiais menores possíveis.

O sistema de prevenção contra incêndio vem evoluindo no decorrer dos anos, especialmente ao longo do nosso século, transformando o projeto de edificações em um processo muito mais complexo. Tal processo envolve o emprego de conhecimentos especializados e novas tecnologias (CARNEIRO & BRITO, 2014).

Hoje as atividades de segurança contra incêndio e pânico envolvem milhões de pessoas em todo o mundo, fazendo com que essa ciência cresça rapidamente, sendo uma tendência internacional a exigência de que todos os materiais, componentes, sistemas construtivos, equipamentos e utensílios usados nas edificações sejam analisados e testados laboratorialmente do ponto de vista da segurança contra incêndio (FERNANDES, 2010).

As perdas com incêndio nos países que adotam uma postura severa na questão da prevenção têm diminuído significativamente (FERNANDES, 2010).

Vale ressaltar que, apesar disso, ao comparar os vários tipos de acidentes, a probabilidade de uma pessoa se acidentar fatalmente no incêndio é pequena (SILVA, 2006). Porém a questão que permaneceu por muito tempo era: como evacuar o maior número de pessoas no menor espaço de tempo possível na ocorrência de um incêndio?

Sejam nos edifícios de pequeno ou grande porte, as escadas enclausuradas se tornaram uma realidade obrigatória. Adotadas com intuito de responder a questão supracitada, sendo providas de um sistema especial de ventilação permitindo que uma pessoa seja resgatada no último pavimento de uma edificação em chamas (SILVA, 2006).

Porém, não apenas as escadas enclausuradas fazem parte desse sistema de prevenção. Os extintores de incêndio, hidrantes, sistemas de sprinklers são alguns dos inúmeros dispositivos de prevenção disponíveis no mercado. A NR 23 (Proteção Contra Incêndio, 2011) é uma norma regulamentadora, que de tal forma orienta o projetista, estabelecendo alguns critérios de suma importância.

Para Vargas (2003), as medidas necessárias de segurança são diferentes quando aplicadas a:

a) Edifícios altos em relação a edifícios térreos;

b) Edifícios com alta densidade de pessoas (residências, escritórios), em relação àqueles com poucas pessoas (depósitos);

c) Edifícios concebidos para habitação de pessoas com mobilização limitadas (hospitais, asilos);

d) Àqueles com ocupantes saudáveis tais como complexos esportivos.

Em se tratando da segurança do patrimônio, Silva (2006), alega que o instante em que ocorre a generalização do incêndio é denominado de inflamação generalizada ou, como é internacionalmente conhecida, de “flashover”. Esse instante é visível, pois além do rápido crescimento do incêndio, podem ocorrer explosões, rompimento de vidraças das janelas, entre outros eventos.

O autor conclui ainda que antes do flashover não há riscos de colapso da estrutura, no entanto danos locais ao conteúdo da edificação são muito

prováveis de acontecerem que muitas vezes não resultam em perdas, sejam elas materiais ou monetária, consideráveis.

Na Tabela 1 apresentamos o resumo das influências no que se refere à severidade, segurança da vida e do patrimônio.

Fatores	INFLUÊNCIA		
	Severidade	Segurança da vida	Segurança do patrimônio
Tipo, quantidade e distribuição da carga de incêndio	A temperatura máxima de um incêndio dependendo da quantidade, tipo e distribuição do material combustível no edifício	O nível de esfumaçamento, toxidade e calor dependem da quantidade, tipo e distribuição do material combustível no edifício	O conteúdo do edifício é consideravelmente afetado por incêndios de grandes proporções
Características da ventilação do compartimento	Em geral, o aumento da oxigenação faz aumentar a temperatura do incêndio e diminuir sua duração	A ventilação mantém as rotas de fuga livres de níveis perigosos de esfumaçamento e toxidade	A ventilação facilita a atividade de combate a incêndio por evacuação da fumaça e dissipação dos gases quentes
Resistência ao fogo das estruturas	-	Tem pequeno efeito na segurança à vida em edifícios de pequena área ou altura, por serem de fácil desocupação. No caso de edifícios altos é essencial, para garantir a segurança ao escape dos ocupantes e as	É fundamental para garantir a estabilidade dos elementos estruturais. Geralmente o custo do conteúdo supera o da estrutura, mas o colapso estrutural pode fazer consequências danosas
Reserva de água	Água e disponibilidade de pontos de suprimento são necessários para extinção do incêndio, diminuindo os riscos de propagação e seus		
Detecção de fumaça ou calor	A rápida detecção do incêndio apoiada na eficiência da brigada contra incêndio e corpo de bombeiros reduz o risco da propagação do incêndio	A rápida detecção do início do incêndio por meio de alarme, dá aos ocupantes rápido aviso de ameaça, antecipando a desocupação	A rápida detecção do início de um incêndio minimiza o risco de propagação reduzindo a região afetada pelo incêndio
Hidrantes e extintores	Hidrantes, extintores e treinametno dos usuários de edificação, para rápido combate, reduzem o risco de propagação do incêndio e seu efeito ao patrimônio e à vida humana		
Corpo de Bombeiros (CB)	Proximidade, acessibilidade otimizam o combate	Em grandes incêndios o risco à vida é maior nos primeiros instantes. Um rápido e eficiente combate por parte do CB reduz o risco à vida	Proximidade e acessibilidade facilitam as operações de combate ao incêndio, reduzindo perdas estruturais e do conteúdo
Projetos de engenharia de incêndio	Um projeto de engenharia de segurança contra incêndio deve prever um sistema de segurança adequado ao porte e à ocupação da edificação, de foram a reduzir o risco do início e propagação de um incêndio, a facilitar a desocupação e as operações de combate. Dessa forma reduzem a severidade do incêndio, as perdasde vidas e patrimônio		

Tabela 1. Resumo dos fatores e suas influências (VARGAS, 2003)

2.5. AVALIAÇÃO DE RISCO DE INCÊNDIO

Diversos são os métodos disponíveis para avaliação de risco de incêndio, mas Silva (2005) destaca que o mais difundido método de avaliação de risco é o método de Gretener, que leva o nome do engenheiro suíço.

Max Gretener foi um engenheiro que passou a estudar a possibilidade de calcular o risco de incêndio em indústria e grandes edifícios, isso em 1960 na Suíça. Ainda segundo o autor, ‘em 1984 a SAI (Societé Suisse des Ingénieurs et des Architectes) publicou o documento “Métodos de Avaliação de Riscos de Incêndio”, tendo por base os trabalhos de Gretener’ (SILVA, 2004).

Diversos autores entre eles o Eng° Mário José de Magalhães Macedo que publicou um livro com o título Método de Gretener em 2008, assegura que este método tornou-se uma das principais ferramentas utilizadas para determinação da probabilidade de ocorrência de um incêndio. Devido à sua harmonização, uniformização de critérios e levando em conta os fatores de perigos essenciais, permite definir e avaliar medidas em termos de eficácia e análise de custos (SILVA, 2006).

Este método foi revisto e adaptado pelo Eng° Mário Macedo convertendo-o num instrumento de trabalho prático e aplicável à realidade nacional.

A NBR 14432:2001 permite o emprego do método de Gretener, desde que adequado à realidade brasileira. Essa adequação é o objetivo da Comissão de Estudos da ABNT CE-24:201-03, que, após anos de debates, optou por esse método para estabelecer um índice global de segurança γfi.

Existem muitos métodos para fazer essa verificação. Para os efeitos da norma NBR 15200:2004, são aceitos os quatros métodos mencionados abaixo:

a) Método tabular;

b) Método simplificado de cálculo;

c) Métodos gerais de cálculo;

d) Método experimental.

2.6. EXIGÊNCIAS DE RESISTÊNCIA AO FOGO

Uma construção considerada segura, em condições naturais, é aquela que tem grande probabilidade de resistir aos esforços normais internos provenientes das ações externa tais como vento e força da gravidade (DUARTE *et al*., 1998).

Já uma construção considerada segura na condição excepcional de um incêndio é aquela que tem grande probabilidade de resistir às exigências de um incêndio, com ou sem proteção, de modo a evitar o seu colapso (DUARTE *et al*., 1998).

Desta forma, serão citados alguns parâmetros de segurança estrutural utilizados no dimensionamento para fins de prevenção.

2.6.1. Tempo requerido de resistência ao fogo - TRRF

O efeito de um incêndio é a ação térmica nas estruturas, difere das ações normais da gravidade e eólica, por se tratar de uma ação excepcional, devido ao baixo período de recorrência (STUCCHI, 2005). Para tanto, faz-se necessário conhecer a exigência do fogo para cada elemento estrutural da qual compõe a estrutura, sejam elas vigas, pilares ou lajes.

Stucchi (2005) cita ainda que, o incêndio é caracterizado pela relação entre a temperatura dos gases quentes e o tempo, representada por meio de curvas temperatura versus tempo ou, simplesmente, curvas de incêndio. A severidade do mesmo, como apresentado anteriormente, depende do uso e

ocupação bem como das características geométricas dos elementos estruturais, consequentemente, variando de edificação para edificação.

A exigência de resistência ao fogo é estabelecida em forma de tempo, seja por meio do TRRF ou do tempo equivalente (SILVA, 2006). Essa escala varia de 30 a 120 minutos contendo intervalos de 30 minutos entre um e outro em função da altura da edificação, do tipo de ocupação e das medidas de prevenções disponíveis, conforme a NBR 14432:2001.

Portanto, à medida que o risco à vida humana aumenta, devido ao elevado índice de ocupação e a altura da edificação, a exigência se torna maior e o tempo requerido, de resistência ao fogo, também aumenta.

Stucchi (2005) só relembra que o TRRF não deve ser confundido com tempo de desocupação ou tempo de duração do incêndio. Há um consenso entre diversos autores, já citados neste trabalho, em dizer que se trata do tempo máximo que o elemento construtivo pode manter seu desempenho segundo os critérios de resistência ao fogo especificados na NBR 14432:2001.

2.6.2. Método Tabular – NBR 14432:2001

O método tabular de dimensionamento é o método mais simples a ser utilizado para as estruturas de concreto atender aos requisitos da verificação em situação de incêndio (COSTA, 2003). Segundo a NBR 14432:2001, não há necessidade de nenhuma verificação efetivamente, bastando atender dimensões mínimas apresentadas em tabelas, função do tipo de elemento estrutural, devendo respeitar, também, a NBR 6118:2014 – “Projeto de estruturas de concreto – Procedimento”, bem como a NBR 9062:2006 – “Projeto e execução de estruturas de concreto prémoldado”.

Segundo Silva (2006), embora o conceito do TRRF seja aplicado em vários países, os valores variam conforme o país. Na nova Zelândia o TRRF máximo é de 60 minutos. Nos EUA o TRRF pode atingir até 180 minutos para pilares de edifícios altos e no Reino Unido o TRRF máximo é de 120 minutos. No Japão o TRRF para edifícios altos é maior para os pavimentos inferiores e menor para os pavimentos superiores.

O 'método tabular' de dimensionamento apresentado em diversos códigos internacionais (BS 8110 Part. 2 (1985), ACI-216R (1989), NZS 3101 (1995), AS-3600 (2001), PREN 1992-1-2 (2002)) foi elaborado com base no conceito do TRRF (COSTA, 2003).

No Brasil, a Tabela A.1 da NBR 14432:2001, aqui apresentada na Tabela 2, auxilia de maneira prática a obtenção do TRRF. Norma esta que se baseia em critérios internacionais fruto de um consenso de valores adaptados à realidade brasileira.

Grupo	Ocupação/uso	Pronfundidade do subsolo						
		Classe S2	Classe S1	Classe P1	Classe P2	Classe P3	Classe P4	Classe P5
		hs > 10 m	hs ≥ 10 m	hs ≤ 6 m	6 m < h ≤ 12 m	12 m < h ≤ 23 m	23 m < h ≤ 30 m	h > 30 m
A	Residencial	90	60 (30)	30	30	60	90	120
B	Seviços de hospedagem	90	60	30	60 (30)	60	90	120
C	Comercial varejista	90	60	60 (30)	60 (30)	60	90	120
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
E	Educacional e cultura física	90	60 (30)	30	30	60	90	120
F	Local de reunião de público	90	60	60 (30)	60	60	90	120
G	Serviços automotivos	90	60 (30)	30	60 (30) / 30	60 / 30	90 / 30	120 / 60
H	Serviços de saúde e institucionais	90	60	30	60	60	90	120
I	Industrial	90 / 120	60 (30) / 90	30 / 60 (30)	30 / 60 (30)	60 / 90 (60)	90 / 120 (90)	120
J	Depósitos	90 / 120	60 (30) / 90	30 / 60	30 / 60	30 / 90 (60)	30 / 120 (90)	60 / 120

Nota: 1 – Para subsolos com h > 10 m = 90 minutos; h < 10 m, não podendo ser inferior ao TRRF dos pavimentos acima do solo;

2 – Os TRRF's entre parentes são aplicados para edificações em que cada pavimento acima do solo tenha área inferior a 750,00 m².

Tabela 2. Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) em minutos (NBR 14432, 2001)

Para fins de determinação do TRRF pelo método tabular, tomamos como exemplo uma edificação de uso residencial com 8 pavimentos, cada qual com pé direito de 3,00 m sem subsolo e uma área por pavimento de 400 m².

Inicialmente é preciso determinar a altura da edificação que, segundo a NBR 14432:2001, é a distância entre o ponto que caracteriza a saída, ou seja, o nível de saída na rua e o piso do último pavimento, excetuando zeladorias, barrilete, casa de máquinas, piso técnico e pisos sem permanência humana. Portanto, para este caso, a altura é igual a 24,00m.

A seguir, é determinada a classe a que se emprega a edificação especificada. Fazendo uso da Tabela 2, fornecida pela norma, temos: classe P4.

Combinando-se a classe com a coluna ocupação/uso, tem-se que o TRRF será igual há 90 minutos. Os elementos estruturais devem ter resistência ao fogo de 90 minutos. Isso inclui os elementos de compartimentação como, por exemplo, a parede corta fogo (escadas enclausuradas).

2.6.3. Método do tempo equivalente – Eurocode 1

Tanto a NBR 14432:2001 quanto a NBR 15200:2012, permitem determinar o TRRF pelo método tabular, já apresentado, ou pelo método do tempo equivalente.

> Diversos pesquisadores estudaram métodos para associar a curva-padrão, recomendada em diversas normas internacionais (ASTM E119-00a, ISSO 834:1975, SBN 67:1973, etc.), a curvas mais realistas. O método mais citado na literatura técnica internacional é o método do tempo equivalente (COSTA, 2008).

O método do tempo equivalente consiste, empiricamente, em calcular a temperatura do elemento estrutural a partir de uma curva-padrão considerando um tempo fictício denominado tempo equivalente correlacionando às

propriedades dos materiais de vedação, o valor da carga de incêndio, áreas de ventilação existentes e fatores de segurança contra incêndio, entre outros, conforme Figura 2.

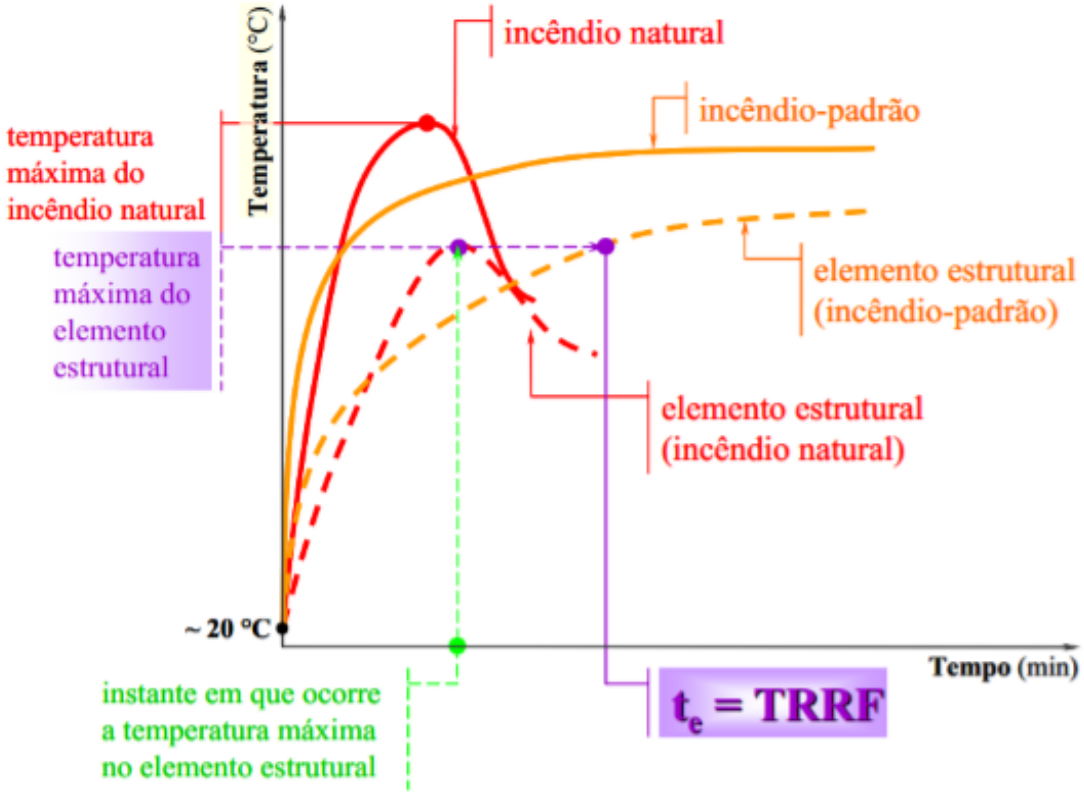


Figura 2. Conceito de tempo equivalente (COSTA, 2008)

Costa (2008) menciona que a ideia de correlacionar o incêndio padronizado a incêndios reais reporta-se ao século XX, isso significa que o método baseia-se em estudos feitos por outros pesquisadores como Ingberg, na década de 20, Petterson, na década de 70 até a versão mais recente do Eurocode 1 (EM 19911-2:2002).

2.7. INCÊNDIO PADRÃO

O aumento da temperatura nos elementos estruturais, em consequência da ação térmica, causa redução da resistência e redução da rigidez, consequentemente, o aparecimento de esforços adicionais solicitantes na estrutura hiperestática é inevitável (SILVA, 2004).

O incêndio, em seu crescimento ascendente, incide por três estágios que são eles:

a) **Ignição:** aumento de temperatura, esse estágio também chamado de préflashover termina no instante conhecido com flashover;

b) **Aquecimento:** mudança repentina de crescimento de temperatura até atingir o pico da curva, ou seja, a temperatura máxima dos gases do ambiente;

c) **Resfriamento:** ramo descendente que caracteriza a redução da temperatura dos gases no ambiente.

O período de maior crescimento da temperatura num incêndio compartimentado ocorre no período seguinte ao ‘flashover’, ponto esse onde todo material orgânico entra em combustão espontâneo (KAEFER, 2003).

Para Silva (2004), a principal característica de um incêndio, no que concerne ao estudo das estruturas, é, portanto, a curva que fornece a temperatura dos gases em função do tempo de incêndio, como apresentado na Figura 3.

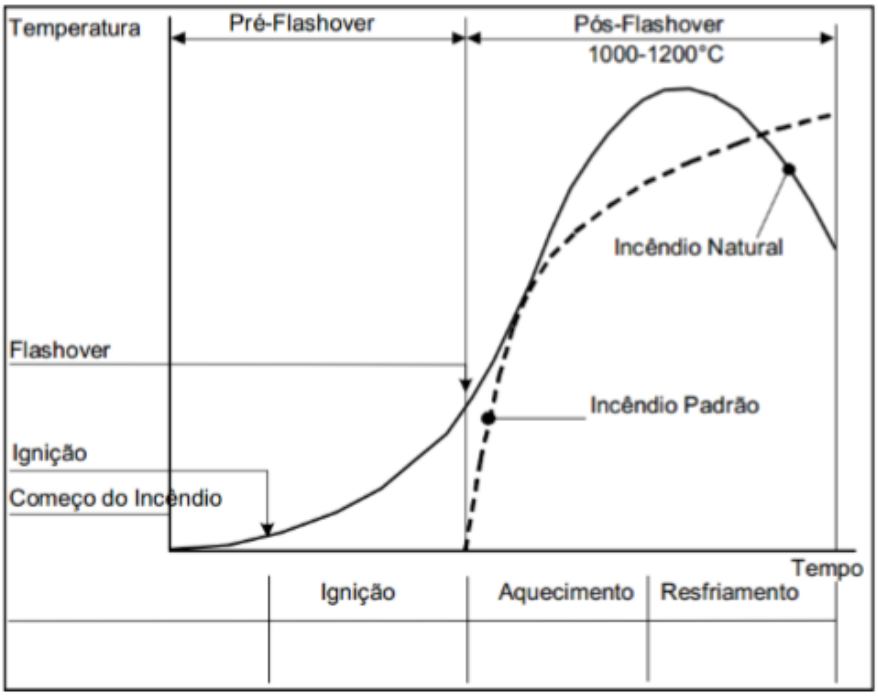


Figura 3. Fases de um incêndio (KAEFFER, 2003)

A curva incêndio natural exposta na Figura 3, apresenta uma região denominada começo do incêndio que se reporta a baixas temperaturas, em que o incêndio é considerado de pequenas proporções não causando risco, desta forma, à vida humana ou à estrutura. Nesse estágio, caso a edificação haja medidas de proteção contra incêndio eficiente para extinguir o fogo, nesse intervalo de tempo, nenhuma verificação adicional da estrutura será necessária (SILVA, 2004).

O momento após a elevação brusca de temperatura é conhecido como *flashover*, como mencionado anteriormente, trata-se de um estágio onde se torna visível o crescimento do incêndio podendo ser considerado de grandes proporções. Nesse estágio, a verificação da estrutura pós-incêndio torna-se necessária (KAEFFER, 2003).

Se analisarmos, a principal característica da curva incêndio-padrão é de possuir apenas um ramo ascendente, ou seja, a suposição é de que a

temperatura dos gases seja sempre crescente com o tempo, independentemente do ambiente ou da carga de incêndio. Alguns autores defendem que essa curva não representa um incêndio real, mas sim, uma suposição do comportamento do mesmo (KAEFER, 2003).

A NBR 14432 (2001) apresenta a equação que expressa à elevação padronizada de temperatura em função do tempo.

$$Øg = Ø0 + 345 \log (8\,t + 1) \qquad (1)$$

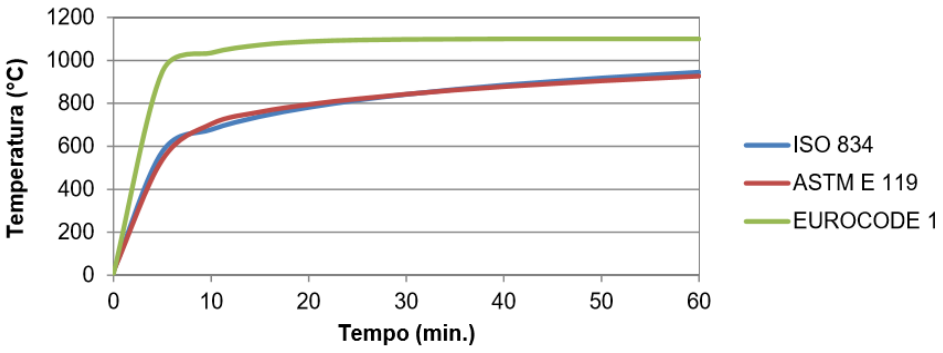
Onde:

t é o tempo, em minutos;

Ø0 é a temperatura do ambiente antes do início do aquecimento, em graus Celsius, geralmente tomada igual a 20 °C;

Øg é a temperatura dos gases, em graus Celsius, no instante t.

Dentre as curvas mais citadas nas bibliografias consultadas estão em destaque às curvas da ISO 834, ASTM E 119 e a da EUROCODE 1 (1995), conforme Figura 4.



Fonte: Silva, 2004.
Nota:
ISO 834 – *International Organization for Standardization* 834 (*Fire-resistance test – Elements of builfing construction*);
ASTM E 119 – *American Specification of Testing and Materials* E119 de 1988 (*Standard test methods for fire tests of builfing construction and materials*);
EUROCODE 1 de 1995 – Norma da União Europeia.

Figura 4. Curva da ISSO 834, ASTIME 119 e EUROCODE 1 1995 (SILVA, 2004)

Tanto a NBR 14432 (2001) quanto a NBR 5628 (2001) recomendam a curva ISO 834 para descrever a elevação padronizada de temperatura em função do tempo no projeto de elementos construtivos.

2.8. ASPECTOS TECNOLÓGICOS DO CONCRETO SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS

O concreto é constituído pela heterogeneidade dos agregados, pasta de cimento Portland e água. Todavia, as barras de aço incorporadas para absorção da tração possuem asperezas e saliências que promovem uma significativa aderência entre o aço e o concreto fazendo com que ambos trabalhem solidariamente (MORALES *et al*., 2011).

Tais estruturas estão sujeitas à ação de incêndios, dos quais podem causar danos de pequenas ou grandes proporções. Apesar de o concreto ter boa reputação quanto a esse aspecto (material incombustível e não emissor de gases tóxicos quando exposto a altas temperaturas), cabe salientar que as alterações não se restringem a fenômenos físicos, ocorrendo também transformações químicas importantes dos componentes responsáveis pelas características do concreto endurecido (LIMA *et al*., 2004).

Em se tratando de perda de resistência do elemento estrutural, o fato de que as propriedades do concreto são modificadas quando esse material é exposto ao calor já está bem consolidada no meio técnico (BRITEZ, 2011).

A medida mais efetiva para combater tais perdas é a construção de edifícios com materiais resistentes ao fogo, considerando-se que mesmo que se consiga a extinção rápida mediante o uso de detectores e extintores, não se poderá evitar a elevação de temperatura de algum elemento estrutural que, caso seja crítico, poderá ocasionar o colapso do edifício (CÁNOVAS, 1988).

Os principais cristais que formam a pasta endurecida são os silicatos hidratados de cálcio (genericamente denominados de C-S-H), responsáveis pela resistência do material, o hidróxido de cálcio (CH) e os compostos menores, que contém aluminatos e/ou sulfato. Todos sofrem transformações como a perda de umidade decorrente da ação de altas temperaturas (CASTRO, 2011).

Por tanto, para se construir edificações cada vez mais resistentes a incêndios, é indispensável conhecer o comportamento desses materiais frente à ação do fogo e de como eles se comportam em conjunto, como explicado a seguir.

2.8.1. Efeito da ação térmica no concreto armado

As propriedades mecânicas mais expressivas para a análise estrutural de uma edificação são a resistência à compressão, à tração, o módulo de elasticidade, bem como as relações tensão-deformação dos materiais (SILVA, 2006).

Se por efeito da elevação da temperatura, a resistência mecânica em um elemento estrutural se igualar as solicitações a que está submetida, dizemos que sua estabilidade está comprometida, ou seja, é o mesmo que afirmar que a tensão e a tensão limite, ambas, são as mesmas naquele instante. A este fenômeno, Cánovas (1988) classifica de tempo crítico.

Cabe compreendermos que o concreto armado, como o nome por si só já retrata, envolve a junção de dois materiais distintos: concreto e aço. Consequentemente, temos que considerar dois tempos críticos, pois se tratam de dois materiais com propriedades diferentes, o concreto com sua baixa condutividade térmica e o aço sensível ao calor. Com isso, percebe-se a importância no recobrimento do aço (CARNEIRO & BRITO, 2014).

A NBR 6118 (2014) apresenta na Tabela 7.2, representada neste trabalho pela Tabela 3, o cobrimento mínimo indicado para fins de proteção da armadura quanto a agentes externos.

Componente ou elemento	I	II	III	IV
	Cobrimento nominal (mm)			
Laje	20	25	35	45
Viga/pilar	25	30	40	50
Elementos estruturais em contato com o solo	30	30	40	50

Tabela 3. Cobrimento nominal para concreto armado (NBR 6118, 2014)

A Tabela 3 fundamenta-se a partir da classificação do tipo de agressividade à que será exposta, conforme segue apresentado na Tabela 4.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
		Marinha	
III	Forte	Industrial	Grande
IV	Muito forte	Respingos de maré	Elevado

Tabela 4. Classes de agressividade ambiental (NBR 6118, 2014)

Porém, Cánovas (1988) proporciona, por meio da Tabela 5, o recobrimento em função do TRRF.

Elemento estrutural	TRRF (em horas)			
	1	2	3	4
Pilares	2,5	4,5	6	7,5
Vigas isostáticas	4	6,5	8	9
Vigas contínuas	2,5	4	8	9
Lajes armadas em uma direção	2,5	4,5	6	7
Lajes armadas em duas direções	1	2	3	4

Tabela 5. Cobrimento mínimo em função do TRRF (CÁNOVAS, 1988)

Como mencionado anteriormente, o estudo isolado desses materiais tem suas particularidades quando expostos à altas temperaturas, existem outras mais complexas que atuam sobre o conjunto de concreto armado e que se complicam ainda mais quando estes formam elementos estruturais e estes estão unidos entre si (CÁNOVAS, 1988).

Os efeitos da dilação térmica desses materiais são bem similares, sendo o do concreto na ordem de 1,2 x 10−5 m/m°C e o aço próximo de 1,0 x 10−5 m/m°C, consequentemente, em temperaturas normais, não há aparição de grandes tensões. No entanto, Cánovas (1988) afirma que quando as temperaturas são elevadas, ambos os coeficientes se separam tanto que o coeficiente de dilatação térmica do aço pode chegar a 30 vezes superior ao do concreto, produzindo tensões importantes que estouram os cobrimentos.

Ainda segundo Cánovas (1988), o aço, ao ficar exposto diretamente ao calor se dilata, diminui seu limite elástico e sua tensão de ruptura, sua temperatura se aproxima da fase crítica e chega ao colapso próximo dos 500 °C, dependendo do tipo de aço.

2.8.2. Efeito da ação térmica no concreto com adição de fibra de polipropileno

Consensualmente falando a estrutura do concreto pode ser considerada altamente heterogênea e complexa, dificultando o estabelecimento de modelos exatos que permitem estimar, com segurança, como será o seu comportamento frente a algumas ações, visto que cada concreto tem suas particularidades, insumos e adições específicas, bem como o emprego de diferentes métodos de dosagem (LIMA *et al*., 2004).

Quando o concreto é aquecido, a água livre presente na pasta evapora-se. Somente após a vaporização da toda umidade, o concreto ultrapassa os 100 °C de aquecimento. A partir desse nível, a água absorvida e a água quimicamente combinada começam a evaporar, desidratando os silicatos de cálcio hidratados, responsáveis pela maior parte da resistência do concreto (COSTA, 2002).

Como consequência, o autor retrata que acima de 700 °C, os silicatos já estão completamente extintos, ou seja, a resistência do elemento estrutural fica ligeiramente comprometida.

Publicações relacionadas ao assunto indicam que a presença de fibras de polipropileno, em concreto de alta densidade, contribui para minimizar os danos físicos causados por temperaturas elevadas. As fibras derretem com o calor, criando poros adicionais, que podem ser preenchidos pelo vapor d'água, reduzindo desta forma a poro-pressão e os desplacamentos (CASTRO, 2011).

Os vazios deixados na matriz cimentícia do concreto de alta densidade pelo derretimento das fibras tornam o comportamento deste material frente ao calor mais semelhante ao do concreto de densidade convencional. Mesmo assim, a resistência de concretos após o aquecimento deve ser analisada, pois as alterações cristalinas podem alterar a sanidade do material, sendo necessário verificar a necessidade de reparar ou reforçar os elementos afetados pelo calor antes de voltar a utilizá-los. Os vazios deixados na matriz cimentícia do concreto de alta densidade pleo derretimento das fibras tornam o comportamento deste material frente ao calor mais semelhante ao do concreto de densidade convencial (LIMA *et al.*, 2004).

A eficiência dos mecanismos de alívio de pressão não depende apenas das características do material polipropileno, mas também das características da própria fibra relacionadas com suas dimensões (CASTRO, 2011).

As fibras de polipropileno sofrem mudanças de fases diretas à medida que são aquecidas, iniciando com a fase de transição vítrea (amolecimento),

seguida pela fase de fusão andotérmica que inicia a 150°C, atinge o pico a 165°C e se completa a 176°C, é o que afirma diversos autores mencionados neste trabalho (CASTRO, 2011).

Complementa-se, desta forma, que as massas de concreto com uma baixa permeabilidade, no caso do CAR e de alto desempenho, impedem a liberação da pressão interna de vapor durante o aquecimento, pois a porosidade é menor e a perda de resistência é maior (SILVA, 2006).

De maneira genérica, Costa (2008) expõe as transformações físicas e químicas que ocorrem no concreto conforme a temperatura, como mostra a Figura 5.

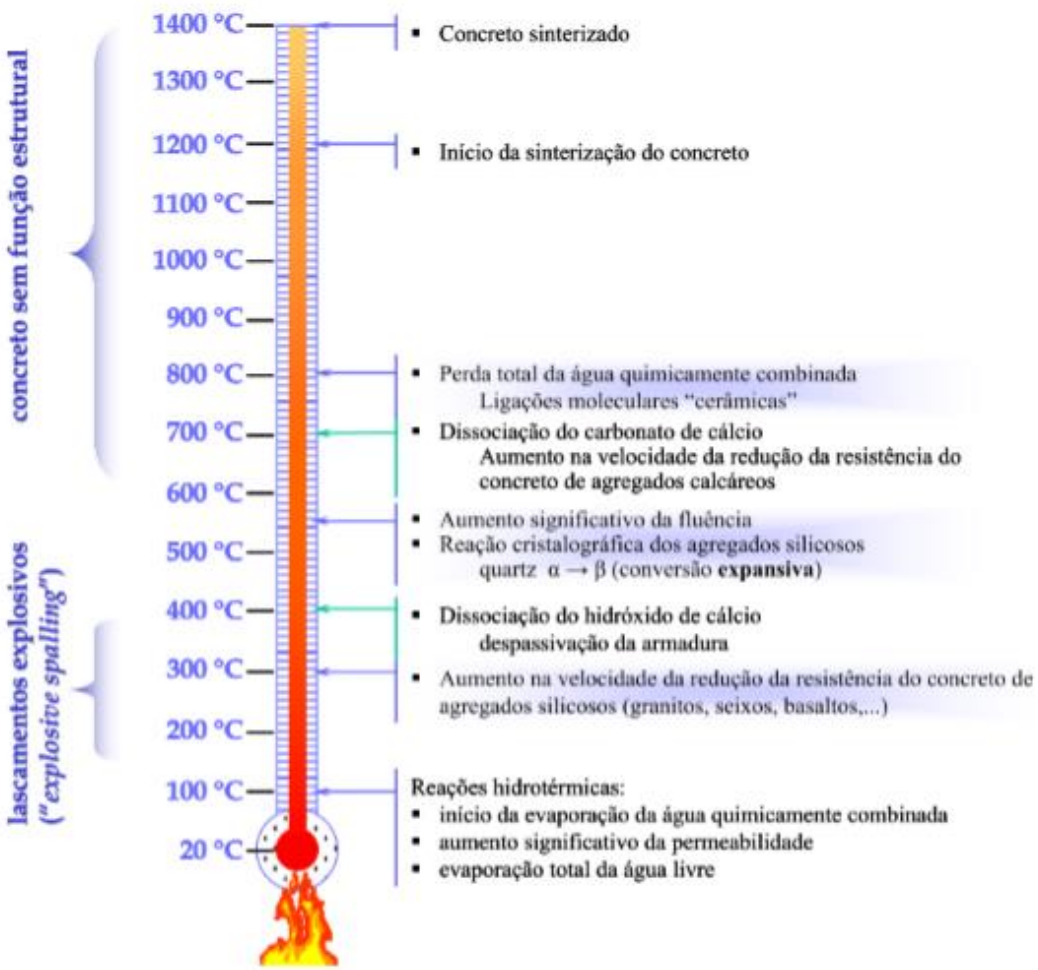


Figura 5. Transformações físico-químicas (COSTA, 2008)

As massas de ar e água presentes no concreto se movem de dentro para fora sendo liberadas por meio das trincas ou micro fissuras que aparecem no decorrer do aquecimento do concreto, mas Figueiredo (2002) defende que por muitas vezes “o vapor e o ar podem ainda migrar no sentido inverso, isto é, para o centro do elemento estrutural, onde o vapor d’água se condensa novamente até que as condições termodinâmicas estejam satisfeitas”.

De forma genérica, Castro (2011) afiança que depois de algum tempo, o elemento de concreto contém, a partir da superfície aquecida:

a) A uma região seca e desidratada;

b) Uma região em processo de secagem e desidratação;

c) Uma camada quase saturada que atua como uma parede impermeável, enquanto o restante do elemento estrutural não é alterado.

Para Neville (1982), o efeito da elevação da temperatura sobre a resistência do concreto é pequeno e um tanto irregular abaixo de 250 °C, mas acima de 300 °C ocorre uma queda da resistência bem definida. E o que se pode perceber no Gráfico 1 apresentado por Cánovas (1988).

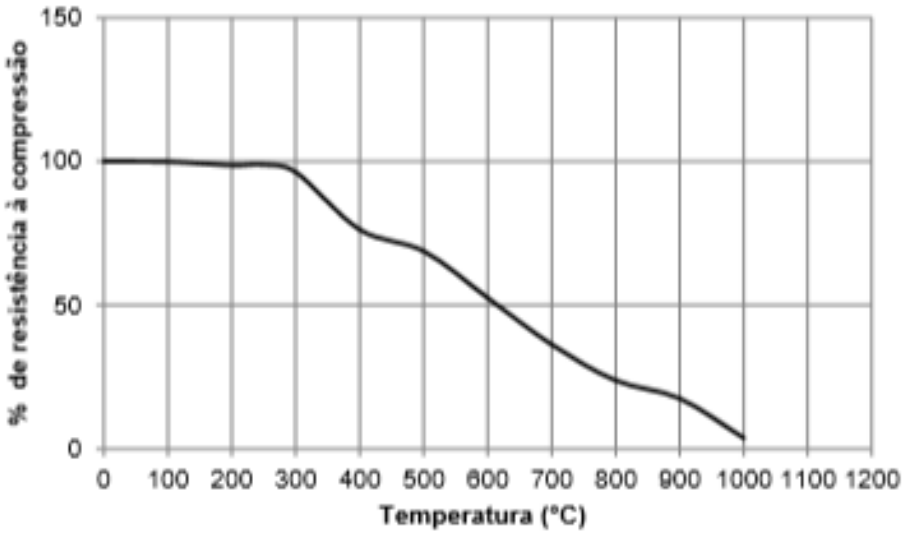


Gráfico 1 – Influência da temperatura na resistência do concreto (CÁNOVAS, 1988)

A NBR 15200:2012 é uma das inúmeras normas que remete ao assunto que trata especificamente do comportamento do concreto quando submetido a altas temperaturas, preconiza a alteração das propriedades de resistência e rigidez do concreto, quando submetido à compressão axial a elevadas temperaturas, que é obtido por meio da Tabela 6.

Temperatura do concreto Θ (°C)	Agregado silicoso		Agregado calcáreo	
	fc, Θ / fc, k	Ec, Θ / Ec	fc, Θ / fc, k	Ec, Θ / Ec
20	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00
200	0,95	0,90	0,97	0,94
300	0,85	0,72	0,91	0,83
400	0,75	0,56	0,85	0,72
500	0,60	0,36	0,74	0,55
600	0,45	0,20	0,60	0,36
700	0,30	0,09	0,43	0,19
800	0,15	0,02	0,27	0,07
900	0,08	0,01	0,15	0,02
1000	0,04	-	0,06	-
1100	0,01	-	0,02	-
1200	-	-	-	-

Nota: Valores das relações fc, Θ / fc, k e Ec, Θ / Ec para concretos de massa específica normal variando de 2.000 kg/m³ e 2.800 kg/m³.

Tabela 6. Fatores de redução de resistência do concreto (NBR 15200, 2012)

Para determinação da resistência à compressão axial compreendido para temperaturas não apresentadas na tabela, pode ser obtida pela seguinte equação (NBR 15200, 2012):

$$fc,\theta = kc,\theta \; fck \qquad (2)$$

Onde:

f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto em situação normal;

$k_{c,\theta}$ é o fator de redução da resistência do concreto na temperatura θ.

A norma orienta que para valores de temperaturas intermediários, os mesmo podem ser encontrados por meio da interpolação linear dos valores apresentados na Tabela 6. Segundo a norma, a capacidade de resistência dos elementos estruturais de concreto em situação de incêndio pode ser então, estimada a partir da resistência a compressão na temperatura θ.

Analogamente para o módulo de elasticidade do concreto que pode ser obtido pela seguinte equação (NBR 15200, 2012):

$$Eci,\theta = kcE,\theta\ Eci \qquad (3)$$

Onde:

Eci,θ é o módulo de elasticidade inicial do concreto a 20 °C;

kcE,θ é o fator de redução do módulo de elasticidade do concreto na temperatura θ.

O lascamento resulta de dois processos concomitantes: o processo termo-mecânico, associado com os gradientes de dilatação ou retração térmica que ocorrem dentro do elemento exposto a altas temperaturas; e o processo termo-hídrico, relacionado com a transparência de massa na rede de poros (ar, vapor e água líquida) (CASTRO, 2011).

Considerando apenas o comportamento do concreto como um material, pode-se notar que o fogo origina gradientes de temperatura elevados e, em consequência, as camadas da superfície quente tendem a se separar, em lascas, do interior mais frio das peças (SILVA, 2006). Ou seja, o concreto de menor resistência permite o transporte do vapor mais facilmente, por sua maior

porosidade, entretanto, se a concentração de umidade for muito elevada, poderá sofre dois fenômeno (COSTA *et al*., 2002):

a) Delaminção gradual ou Sloughin que é o desprendimento de uma porção considerável do concreto e de grande extensão da superfície do elemento (perda geral do material), de efeito progressivo, pois deixa novas camadas do concreto endurecido à exposição das chamas conduzindo a novos descascamentos sucessivos, a perda de aderência entre o cobrimento da armadura e a própria armadura (COSTA *et al*., 2002);

b) Lascamento explosivo ou Spalling, cuja perda do material é parcial, instantânea e violenta com grande liberação de energia, formando grandes cavidades nos primeiros 30 minutos do incêndio (COSTA *et al*., 2002).

A Figura 6 exemplifica o spalling, ou seja, desplacamento ocasionado pela pressão no interior do concreto.

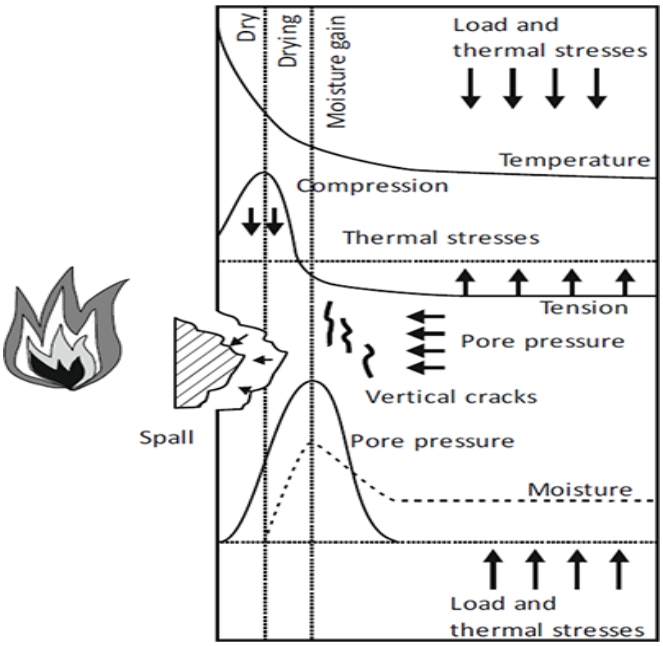


Figura 6. Spalling explosivo causado por pressão de poros (INTECHOPEN, 2013)

Essa é a principal razão dos concretos de alta resistência CAD ou CAR serem muito mais sujeitos a lascamentos explosivos quando aquecidos, do que os concretos usuais (COSTA *et al.*, 2002).

Consequentemente, essa fragmentação também provoca uma perda gradual de material na face exterior, expondo a armadura à ação direta ao fogo e ainda acelerando o aquecimento das camadas da qual compõe o elemento estrutural. Nesses casos, spalling ou lascamento explosivos podem ser observados nos primeiros 30 minutos do incêndio (COSTA *et al.*, 2002).

Lima (2004) afirma que uma das alternativas consideradas para controlar o desplacamento (degradação do cocnreto em nível macroestrutural) consiste no uso de aditivos incorporadores de ar. No entanto, deve-se ter consciência que a incorporação de ar ao concreto é vantajosa para minimizar a tendência ao desplacamento, mas ocasiona a redução da capacidade portante pela elevação do volume de vazios.

Sobre os gradientes térmicos formados ao longo da seção dos elementos estruturais, como mostra a Figura 7.

A diferença entre a temperatura das camadas internas e as mais superficiais do concreto produzem tensões térmicas, cuja intensidade pode superar a resistência à tração da matriz, provindo daí os lascamentos explosivos, pois há formação de fissuras nas zonas de transição entre as camadas do concreto tendendo-se separar (SILVA, 2005).

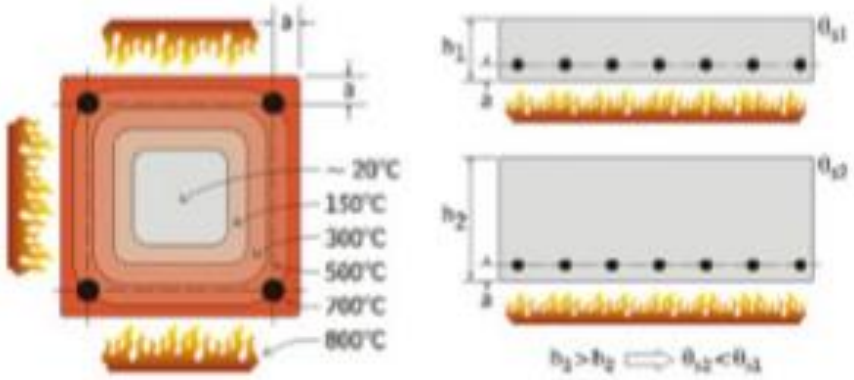


Figura 7. Distribuição de temperatura na seção do concreto (STUCCHI, 2005)

A cinética e a amplitude do processo de degradação são controladas pelas propriedades dos materiais, assim como pelas características do elemento estrutural e das solicitações térmicas e mecânicas (STUCCHI, 2005).

Além disso, existem as incompatibilidades de deformação entre os insumos que compõe o concreto. Os agregados também são afetados nessas condições, os mesmos sofrem variações volumétricas que dependem exclusivamente da taxa de aquecimento a qual está sendo submetido o elemento estrutural podendo ser de caráter destrutivo para o concreto. É o que afirma Costa (2002) quando diz que O aumento no volume dos agregados em razão da expansão térmica produzem *"pop outs"* (pipocamento) e *"spalling"* (lascamentos) no concreto. A composição mineralógica dos agregados governa a dilatação térmica e consequentemente, a resistência última da zona de transição.

Em estudos feitos com diversos agregados, Cánovas (1988) constatou que os concretos com boa granulometria e grande proporção agregados/cimento comporta-se muito melhor frente ao fogo que os pobres em agregados e com deficientes curvas granulométricas. Porém, a viabilidade do traço depende muito do consumo de cimento e da trabalhabilidade, um concreto com grande consumo de cimento ou pouca pasta de cimento torna-se inviável a olhos de muitos consumidores.

Silva (2006) defende, desta forma, que a perda de resistência em temperaturas elevadas é maior nos concretos saturados do que nos secos, e o teor de umidade, no momento da aplicação da carga, é o responsável pela diferença. Em geral, Cánovas (1988) relata que o comportamento do concreto frente ao fogo será tanto melhor quanto mais ocorram as seguintes condições:

a) Emprego de agregados de menor coeficiente de dilatação térmica;
b) Boa granulometria com alta proporção de dilatação térmica;
c) Utilização de agregados leves ou calcários;

d) Boa compactação do concreto;

e) Baixa condutividade térmica;

f) Alta resistência à tração;

g) Umidade não muito alta no concreto;

h) Emprego de cimentos com escórias ou pozolânicos, especialmente estes, pela facilidade de fixar a cal liberada.

Como consequência, o aparecimento de trincas é frequente, e na medida em que o concreto é submetido a temperaturas mais elevadas, ocorre uma série de mudanças, até mesmo em sua coloração, o que pode servir de índice de estágio de perda de resistência. A divulgação por literatura especializada como Almeida (1984), Bauer (1994) assim como Cánovas (1988), apresenta a mudança de cor do concreto em função da temperatura, como mostrado na Tabela 7. Apesar disso, Figueiredo (2002) defende que a natureza dos agregados dos concretos influi sobremaneira na coloração, pois eles constituem a maior parte do concreto.

Temperatura (°C)	Cor do concreto	Resistência residual em % da resistência inicial	Módulo de deformação resídual em % do módulo de deformação inicial
20	Cinza	100	100
200	Cinza	95	70
300	Rosa	95	50
400	Rosa	88	38
500	Rosa	75	35
600	Vermelho	55	20
900	Cinza avermelhado	10	0
1000	Amarelo alaranjado	0	0

Tabela 7. Influência da temperatura na coloração do concreto (CÁNOVAS, 1988)

Em se tratando de tensões térmicas, as mesmas aparecem quando as tensões térmicas de compressão são desenvolvidas na microestrutura da face

aquecida da peça de concreto e se propagam pela macroestrutura, confluindo para os cantos vivos da peça (COSTA *et al.*, 2002).

Subtende-se que as tensões podem atuar sozinhas ou sobrepostas à pressão de vapor nos canais existente no concreto. Normalmente ocorre a ação combinada dos gradientes de pressão (pressão de vapor nos poros) e gradientes térmicas (tensões térmicas) (COSTA *et al.*, 2002).

Na existência de pilares circulares submetidos ao incêndio, devido à própria forma, a ocorrência de lascamento e pouco notada, e o que afirma a literatura existente. Nessa seção não a acumulo de tensões nos cantos vivos (COSTA *et al.*, 2002).

2.8.3. Efeito da ação térmica no aço

Como já é de conhecimento, o concreto não apresenta boa condutividade térmica, mas dependendo da seção e do recobrimento, assim como eventuais ocorrências de spalling do tipo explosivo, bem como elevado tempo de exposição ao fogo, o aço sofre modificações em sua estrutura. As propriedades mecânicas do aço variam com um comportamento decrescente de acordo com o aumento da temperatura no interior do elemento de concreto (BRITEZ, 2011).

Este material entra em processo de fusão a partir de uma temperatura de aproximadamente 1550 °C. Conforme literaturas diversas, os incêndios normalmente não chegam a essa temperatura, as máximas temperaturas alcançadas aproximamse dos 1200 °C, afirma Ferreira (1988) apud Figueiredo (2002). O Eurocode 2 admite que a resistência do aço se anule completamente aos 1200 °C e o módulo de elasticidade do aço é influenciado pela natureza do aço e tensões residuais.

Assim como no concreto, a NBR 15200 (2012) apresenta de forma genérica o possível comportamento quando submetido às essas temperaturas, como mostra a Tabela 8.

Além disso, Queirós (1996 apud Silva 2005) relembra que o aço em relação ao concreto (massa) é um bom condutor térmico, absorvendo melhor o calor. Por isso, o aço contribui expressivamente para o aquecimento localizado dos elementos estruturais. Fato este que propicia a propagação mais rápida de temperatura enquanto o concreto se apresenta mais estável ocorrendo assim um diferencial de temperatura. Nesse estágio, a temperatura no aço aquecido se uniformiza rapidamente e as armaduras se dilatam mais do que o concreto. As barras flambam e comprimem a zona de aderência aço-concreto oprimindo a interface; por esta razão há perda de aderência e ancoragem (COSTA, 2002).

Temperatura do concreto Θ (°C)	fc, Θ / fc, k			Ec, Θ / Ec	
	Tração		Compressão	CA - 50	CA - 60
	CA - 50	CA - 60	CA - 50 ou CA - 60		
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,89	0,97	0,87
300	1,00	1,00	0,78	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,67	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,56	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,33	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,10	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,08	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,06	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
1200	-	-	-	-	-

Tabela 8. Fator de redução de resistência do aço (NBR 15200, 2012)

No gráfico 2 Cánovas (1988) apresenta, de maneira simplista, o comportamento da resistência à ruptura de um aço suave ensaiado a diferentes temperaturas, assim como as do mesmo aço que foi submetido às mesmas

temperaturas mas que foi ensaiado a ruptura depois de esfriado até a temperatura ambiente.

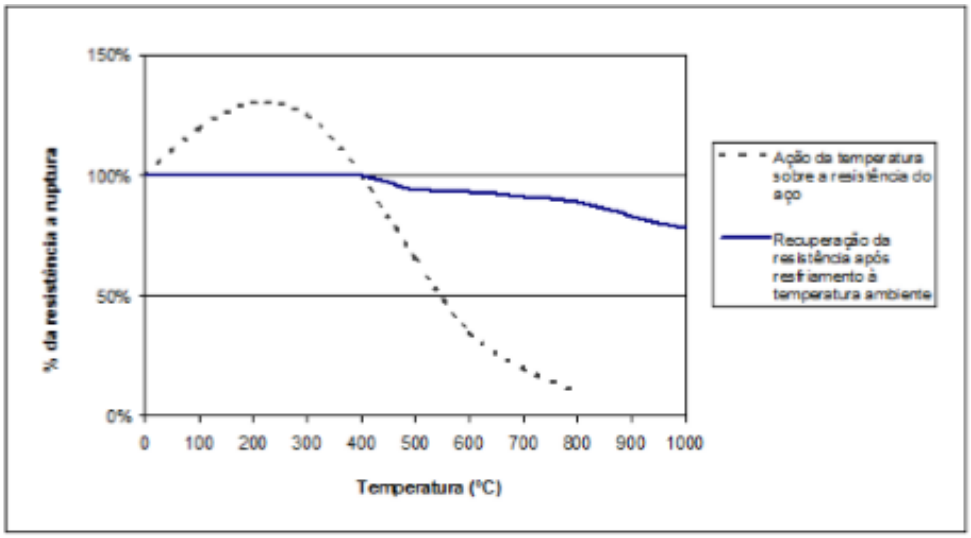


Gráfico 2 – Influência da temperatura na resistência do aço (CÁNOVAS, 1988)

Pode-se observar que no intervalo que varia de 0 °C a 400 °C o aço concentra um ganho significativo de resistência à ruptura, também de maneira inversa, ocorre uma perda gradativa de resistência à ruptura para temperaturas superiores a 400 °C. Isto se deve às mudanças que ocorrem na estrutura molecular do material, representadas através do aumento do tamanho dos grãos de aço e a consequência disso é o alongamento das barras de aço e a diminuição da resistência à ruptura (SILVA, 2006).

Vale ressaltar a importância do aço, que submetido a temperaturas de 0 °C a 400 °C tem um ganho de resistência à ruptura e ao ser resfriado volta a suas propriedades primitivas, como mostra o gráfico 3 apresentado por Cánovas. Fato, este, de suma importância quando se trata de tempo de evacuação da edificação. Por esse e por diversos outros motivos que este material está sendo cada vez mais difundido nas construções e ganhando espaço no mercado da construção civil (CANOVAS, 1988).

A densidade do aço não é afetada pela temperatura e pode ser considerada constante em torno de 7850 kg/m3. O módulo de elasticidade é outro fator que acarreta mudanças em sua estrutura, à medida que a temperatura se eleva, a taxa de redução do módulo de elasticidade do aço é maior que a observada na resistência. A redução do módulo de elasticidade dos aços laminados a quente é linear até os 400 °C e, a partir daí, decai acentualmente (FIGUEIRADO, 2002).

Silva (2006) afirma que quando ultrapassado a zona de 400 °C, o aço tende-se a dilatar-se demasiadamente, provocando deformações excessivas nas barras, valor esse significativo quando aplicado a Lei de Hook para o cálculo do módulo de elasticidade do aço que é o quociente da tensão aplicada pela deformação do material. Desta forma, pode-se concluir que quanto maior for à deformação, menor será o módulo de elasticidade do aço.

2.8.4. Efeito do resfriamento brusco do concreto aquecido

Toda e qualquer edificação, seja ela de uso residencial, industrial ou comercial está sujeita a ação devastadora do incêndio, não intervém o quesito carga ou densidade de utilização, principalmente as construções mais antigas, pois as mesmas, muitas vezes, não fazem uso de sistema de prevenção como as edificações mais recentes (CARNEIRO & BRITO, 2014).

A perda de resistência em temperaturas elevadas é maior em concretos saturados do que nos secos. A influência do teor de umidade na resistência se torna evidente também nos ensaios de resistência do concreto ao fogo, caso em que a umidade excessiva, no momento da exposição ao fogo, é a causa principal da desagregação, quando o concreto estiver em equilíbrio hidrométrico com ar, não ocorre desagregação (NEVILLE, 1982).

Mas, sabe-se que, na ocorrência de um incêndio a medida mais corriqueira é chamar o corpo de bombeiros. A entidade tem por objetivo extinguir o fogo o mais rápido possível, e a maneira mais eficaz é o emprego de água lançada sob pressão na superfície dos elementos estruturais que estão queimando. O objetivo maior é evitar que o fogo se alastre, esfriando a superfície da estrutura (SILVA, 2006).

Durante o incêndio, os materiais absorvem calor e dilatam-se causando estragos. A água, por sua vez, produz resfriamentos e contrações repentinas que provocam novos danos nos materiais. O efeito da água pode ser tão destrutivo como o do próprio fogo, afetando os materiais estruturais e as superfícies. Além disso, a água pode provocar sobrecargas nos andares, danificar as impermeabilizações etc (CÁNOVAS, 1988)

Não obstante, quando o concreto armado está em situação de incêndio elevado, muitas de suas propriedades já estão alteradas e, como citado anteriormente, o índice de fissuração e lascamentos são evidentes, devido aos altos gradientes de temperatura a que está sendo submetido (MORALES *et al*., 2011).

Conclui-se que, ao lançar água numa estrutura submetida ao fogo, ocorre um diferencial de temperatura, ou seja, surgem novos gradientes de temperatura, tornando a estrutura em suas faces externas resfriadas e nas faces internas com grau maior de temperatura. Essa intervenção provocará, nada mais nada menos, que uma desagregação acelerada do concreto, perdendo assim rapidamente sua seção. O aço ficará ainda exposto ao calor se dilatando e escoando mais rapidamente, podendo fazer com que o colapso da estrutura seja adiantado, além de sobrecarregar a estrutura (SILVA, 2006).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nas diversas literaturas nacionais e internacionais depara-se com uma vasta quantidade de métodos de dosagem para concretos, procedimentos e conceitos que fazem imaginar que encontrar um traço apropriado para tal, trata-se de uma atividade muito teórica e, ao mesmo tempo, muito experimental, sem levar em conta a grande diversidade de materiais existentes em nosso país.

Não se quer apresentar uma metodologia de dosagem nem analisar o melhor traço do concreto. O objetivo é estudar a ação do fogo e o efeito do resfriamento sobre o concreto convencional e de alta resistência.

Na sequência, foram compilados os processos experimentais dos ensaios de caracterização dos agregados utilizados, bem como a apresentação do traço adotado para composição do concreto.

3.1. IDENTIFICAÇÃO E ESCOLHA DOS TRAÇOS PARA OS ENSAIOS

Para realização dos ensaios optou-se por duas classes de concreto, com resistência desejada de 30,0 e 80,0MPa com e sem adição de fibra de polipropileno. A moldagem ocorreu no laboratório de uma central de concreto em Curitiba.

3.1.1. Caracterização dos materiais

A seguir, apresentaremos a caracterização dos materiais utilizados para confecção do concreto.

3.1.1.1. Cimento

Para o ensaio foi utilizado o cimento CP II F 40 Votorantim, o qual é empregado pela central de concreto para concretos com a característica a ser estudada.

Este cimento tem o comportamento de resistência elevado proporcionado pelo maior grau de finura. As informações técnicas estão apresentadas no Anexo 1 – Boletim de Ensaio Cimento CPII-F-40.

3.1.1.2. Areia fina

A areia fina utilizada na produção do concreto foi fornecida pela Mineração Bassani e pode ser observada na Figura 88.

Figura 8 – Areia Fina (OS AUTORES, 2017)

Com este material foram feitos ensaios de Análise Granulométrica, Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis, Teor de materiais Pulverulentos, Determinação de Massa Específica, Massa específica Aparente, Absorção de Água e Determinação de Massa Unitária, que podem ser observados no Anexo 2.

As principais características são apresentadas a seguir na Tabela 9. O modulo de finura da areia 1,4 indica ser mesmo uma areia fina.

Ensaios	Abertura da peneira (mm)	Porcentagem retida em massa		Normas
		Média Retida (%)	Acumulada (%)	
Granulometria	4,8	0	0	NBR NM 248
	2,4	0	0	
	1,2	2	2	
	0,6	9	11	
	0,3	29	40	
	0,15	43	83	
	< 0,15	17	100	
DMC (mm)		1,2		NBR NM 248
Módulo de Finura		1,4		NBR NM 248
Massa Específica		2,65 g/cm³		NBR NM 53
Massa unitária		1,46 g/cm³		NBR 7251

Tabela 9 – Composição granulométrica da areia fina (OS AUTORES, 2017)

No Gráfico 3 apresentamos a análise granulométrica da areia fina.

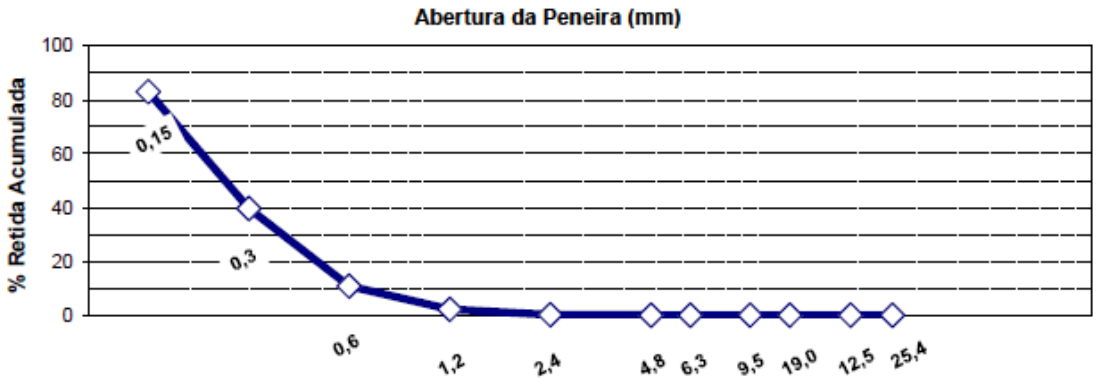


Gráfico 3 – Análise granulométrica da areia fina (OS AUTORES, 2017)

3.1.1.3. Areia artificial

A areia artificial foi fornecida pela Cimento Rio Branco e pode ser observada na Figura 9.

Figura 9 – Areia Artificial (OS AUTORES, 2017)

Com este material foram feitos ensaios de Análise Granulométrica, Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis, Teor de materiais Pulverulentos, Determinação de Massa Específica, Massa específica Aparente, Absorção de Água e Determinação de Massa Unitária, que podem ser observados no Anexo 3.

Ensaios	Abertura da peneira (mm)	Porcentagem retida em massa		Normas
		Média Retida (%)	Acumulada (%)	
Granulometria	4,8	0	0	NBR NM 248
	2,4	16	15	
	1,2	29	44	
	0,6	19	63	
	0,3	11	74	
	0,15	7	81	
	< 0,15	19	100	
DMC (mm)		4,8		NBR NM 248
Módulo de Finura		2,8		NBR NM 248
Massa Específica		2,75 g/cm³		NBR NM 53
Massa unitária		1,67 g/cm³		NBR 7251

Tabela 10 – Composição granulométrica da areia artificial (OS AUTORES, 2017)

As principais características são apresentadas na Tabela 10 e Gráfico 4. O modulo de finura da areia 2,8 indica ser uma areia média.

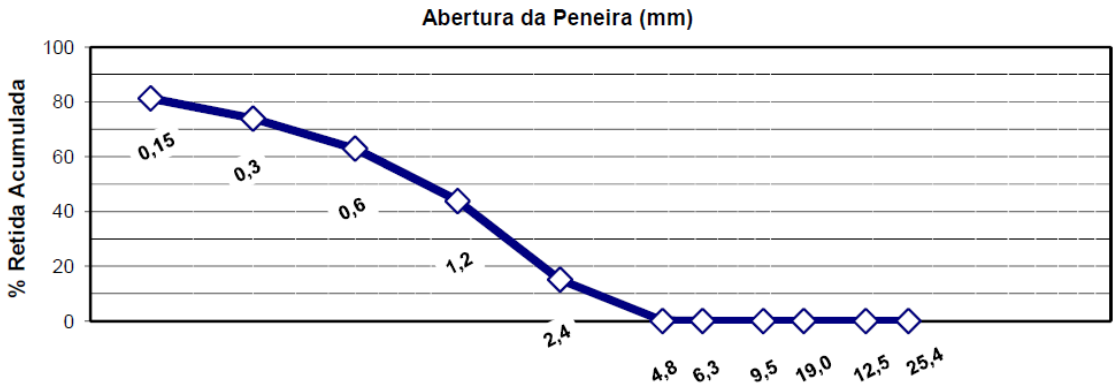


Gráfico 4 – Análise granulométrica da areia artificial (OS AUTORES, 2017)

3.1.1.4. Brita 1

O agregado graúdo teve o fornecimento da Pedreira Mandirituba Figura 100.

Figura 10 – Brita 1 (OS AUTORES, 2017)

Com este material foram feitos ensaios de Análise Granulométrica, Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis, Teor de materiais Pulverulentos, Determinação de Massa Específica, Massa específica Aparente, Absorção de

Água e Determinação de Massa Unitária, que podem ser observados no Anexo 4. As principais características são apresentadas a seguir na Tabela 11.

Ensaios	Sbertura da peneira (mm)	Porcentagem retida em massa		Normas
		Média Retida (%)	Acumulada (%)	
Granulometria	25,4	0,0	0,0	NBR NM 248
	19	5,4	5,4	
	12,5	56,0	61,4	
	9,5	31,2	92,6	
	6,3	7,2	99,8	
	4,8	0,1	99,9	
	2,4	0,1	100,0	
DMC (mm)		4,8		NBR NM 248
Módulo de Finura		2,8		NBR NM 248
Massa Específica		2,7 g/cm³		NBR NM 53
Massa unitária		1,30 g/cm³		NBR 7251

Tabela 11 – Composição Granulométrica Brita 1 (OS AUTORES, 2017)

3.1.1.5. Fibras

As fibras utilizadas foram as de polipropileno, é uma fibra sintética composta por hastes de multifilamentos de PET (Polietileno Tereftalato de alta viscosidade), e tem ponto de fusão a 235ºC conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Fibra de Polipropileno (OS AUTORES, 2017)

Adequadas para misturar ao concreto e ou argamassas e prover resistência à tração no estado plástico e endurecido e em todas as direções, propriedades que o concreto e argamassas convencionais não possuem. Suas Características podem ser observadas na Tabela 12.

Informações Técnicas	
Densidade	1,34 gr / cm³
Longitude das hastes	10 e 15 cm
Diâmetro das hastes	20 a 25 microns
Ponto de fusão	235ºC
Ponto de auto ignição	650ºC
Condutibilidade térmica rell	5,0 (Relativa do ar)
Resistência a água	Hidrófugo, nao acatável
Resistência aos ácidos	Boa
Resistência aos alcatis	Muito boa
Absorção de água (regain)	0,40%
Resistência a tração	0,3 - 0,5 Km / mm²
Módulo de young	2.500 km / mm²%

Tabela 12 – Informações Técnicas do Fabricante – Fibras (OS AUTORES, 2017)

3.1.1.6. Aditivos

O motivo do grande crescimento do uso dos aditivos é a capacidade de proporcionar ao concreto consideráveis melhorias físicas e econômicas. Essas melhorias incluem o uso em condições nas quais seriam difíceis ou até impossíveis usar concreto sem aditivos. Eles também tornam possível o uso de uma grande variedade de componentes na mistura.

A NBR 11768 de 2011 especifica requisitos para utilização desses aditivos químicos em concreto de cimento Portland. Segundo a norma, esses aditivos são classificados da seguinte forma:

a) Tipo P – Plastificantes;

b) Tipo R – Retardadores;

c) Tipo A – Aceleradores;

d) Tipo PR – Plastificantes retardadores;

e) Tipo PA – Plastificantes aceleradores;

f) Tipo IAR – Incorporadores de ar;

g) Tipo SP – Superplastificantes;

h) Tipo SPR – Superplastificantes retardadores;

i) Tipo SPA – Superplastificantes aceleradores.

No presente estudo utilizou-se Aditivo Polifuncional, conforme figura 12, que tem como principais característica redução da necessidade de água do concreto, dependendo do traço utilizado, promovendo um aumento das resistências mecânicas do concreto e/ou aumento da plasticidade facilitando a aplicação além da alta redução do consumo de cimento em concretos de plasticidade e resistência já pré determinados (BOCCHILE, 200).

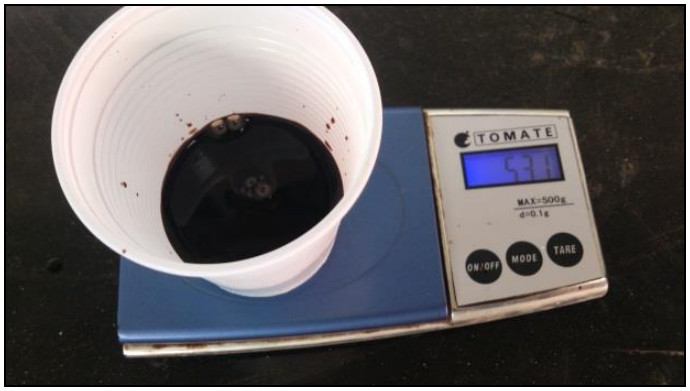


Figura 12 – Aditivo Polifuncional (OS AUTORES, 2017)

O Aditivo Superplastificante, conforme Figura 13, foi utilizado com intuito de envolver melhor os agregados, mantendo a trabalhabilidade. A diminuição do tamanho do agregado também reduz a quantidade de água presa sob o agregado, que enfraquece a pasta (BOCCHILE, 200).

O aditivo superplastificante, por ter um preço elevado, costuma ser combinado com o plastificante, compatível quimicamente (BOCCHILE, 200).

Figura 13 – Aditivo Superplastificante (OS AUTORES, 2017)

A sílica, conforme Figura 14, é uma das substancias químicas mais importantes quando queremos deixar o concreto mais resistente e durável. Além de elevar a resistência do concreto, ela também protege o aço da corrosão (BOCCHILE, 200). Para esse estudo foi utilizado 0,83 kg do material.

Figura 14 – Sílica (OS AUTORES, 2017)

3.1.2. Dosagem do Concreto

Para atingir a resistência desejada, foram adotadas dosagens empregadas pela empresa de serviço de concretagem para produção de concretos.

Todos os materiais foram cuidadosamente selecionados e aferidos suas quantidades para utilização exata da especificada para o traço como mostrado na Tabela 13.

Para realização dos ensaios, foi adicionado fibra de Polipropileno na quantidade de 600g/m³ para cada traço.

fcj (MPa)			
30,0		**80,0**	
A/C			
0,80		0,36	
Material	**Quantidade (Kg)**	**Material**	**Quantidade (Kg)**
Água	4,55	Água	5,00
Areia Natural	10,02	Areia Natural	7,04
Areia Artificial	15,30	Areia Artificial	10,56
Brita 1	24,20	Brita 1	26,95
Cimento	5,68	Cimento	13,75
Sílica	0,25	Sílica	0,83
Aditivo BF 38	0,05	Aditivo BF 38	0,13
		Aditivo Tecflow	0,08

Tabela 13. Traços dos concretos utilizados (OS AUTORES, 2017)

3.1.3. Moldagem dos Corpos de Prova

Após separados os materiais, iniciou-se a preparação do concreto em betoneira elétrica de 250 litros. Foram então inseridos os materiais secos: brita, areia fina, areia artificial, cimento, sílica e na sequencia os aditivos e água. Foi

então rodado o traço por aproximadamente 4 minutos acompanhando seu comportamento.

Anterior à moldagem, foi verificado o abatimento do concreto através do ensaio da consistência pelo abatimento do tronco de cone descrito na norma NBR 7223:1982 conforme verificado na Figura 155.

Figura 15 - Slump Test (OS AUTORES, 2017)

Prontamente definido o traço e verificado se o abatimento atendia ao estimado, foram utilizados corpos de provas cilíndricos 10 x 20 cm para realização dos ensaios conforme verificado na Figura 166. A moldagem respeitou as prescrições da NBR 5738:2003 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.

Figura 16 - Moldagem dos Corpos de Prova (OS AUTORES, 2017)

Após a execução dos ensaios foram encontrados os seguintes resultados:

a) 30MPa – 105mm;

b) 80MPa – 135mm.

Figura 17 - Corpos de Prova (OS AUTORES, 2017)

Após 24 horas da moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram retirados de suas formas e armazenados submersos em água para execução de cura úmida até a realização do ensaio de rompimento pelo período de 28 dias.

Figura 18 - Cura dos Corpos de Prova (OS AUTORES, 2017)

3.2. PROCEDIMENTO DO ENSAIO

Com todos os corpos de prova devidamente identificados, os mesmos foram pesados em uma balança eletrônica, sendo posteriormente comparadas com as respectivas massas depois de submetidas a elevadas temperaturas, como mostrado na Tabela 14.

Identificação C.P.	Resistencia de Projeto (MPa)	Peso Inicial (Kg)	Presença de Fibra
1	30,00	3,788	X
2	30,00	3,746	X
3	30,00	3,758	X
4	30,00	3,798	X
5	80,00	3,920	X
6	80,00	3,906	X
7	80,00	3,930	X
8	80,00	3,922	X
9	30,00	3,816	
10	30,00	3,838	
11	30,00	3,822	
12	30,00	3,776	
13	80,00	3,956	
14	80,00	3,960	
15	80,00	3,928	
16	80,00	3,950	

Tabela 14 - Identificação dos Corpos de Prova (OS AUTORES, 2017)

Separados, os corpos de prova foram submetidos à análise visual Figura 1919 para inspeção prévia aos ensaios, visando detectar diferenças na coloração e possíveis falhas de adensamento.

Figura 19 - Inspeção e Identificação (OS AUTORES, 2017)

Após a pesagem, os corpos foram levados à prensa hidráulica para coleta de resultados de resistência a compressão axial para as condições normais de temperaturas e pressão.

Como pode-se observar na Figura 200, para realização deste ensaio foi utilizada prensa EMIC com capacidade de compressão de 2000 kN. O ensaio respeitou as prescrições da NBR 5739:2007 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

Figura 20 - Ensaio de Compressão Axial (OS AUTORES, 2017)

Os corpos de prova foram capeados com enxofre antes do ensaio para obter uma melhor distribuição de carga na máquina do ensaio.

Os demais corpos de prova foram levados a mufla com capacidade calorífica de até 1200 °C. O ensaio de cada corpo de prova durou 30 minutos nas temperaturas de 100 °C, 300 °C e 600 °C, como mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Aquecimento dos Corpos de Prova (OS AUTORES, 2017)

Após os corpos de provas terem sido deixados na mufla durante aproximadamente 30 minutos, os mesmos foram novamente pesados, obtendo assim, a perda de água de cada amostra. Foram feitas análises visuais para detectar manifestações patológicas.

A temperatura de ensaio de cada corpo de prova, sua identificação e o peso após o ensaio podem ser observados na Tabela 15.

Identificação C.P.	Temperatura (ºC)	Peso Inicial (Kg)	Peso Final (Kg)
1	100	3,788	3,785
2	300	3,746	3,668
3	600	3,758	3,508
4	Temp. ambiente	3,798	3,788
5	100	3,920	3,918
6	300	3,906	3,856
7	600	3,930	3,662
8	Temp. ambiente	3,922	3,822
9	100	3,816	3,812
10	300	3,838	3,760
11	600	3,822	3,584
12	Temp. ambiente	3,776	3,776
13	100	3,956	3,954
14	300	3,960	3,908
15	600	3,928	3,656
16	Temp. ambiente	3,950	3,850

Tabela 15 - Temperatura e Peso (OS AUTORES, 2017)

Após aquecidos e aferido a pesagem, os corpos de prova foram submetidos a resfriamento com água corrente em temperatura ambiente por aproximadamente 5 minutos verificado na Figura 222.

Adotou-se o resfriamento em água corrente para simular uma situação real de resfriamento, onde os bombeiros realizam a aspersão de água sobre a estrutura até a extinção do fogo. Desta forma pretende-se aproximar de uma situação real de incêndio.

Figura 22 – Resfriamento (OS AUTORES, 2017)

Em seguida os mesmos foram submetidos a ensaio compressão axial em prensa hidráulica, tornando possível colher os resultados através do painel eletrônico do equipamento mostrado na Figura 233.

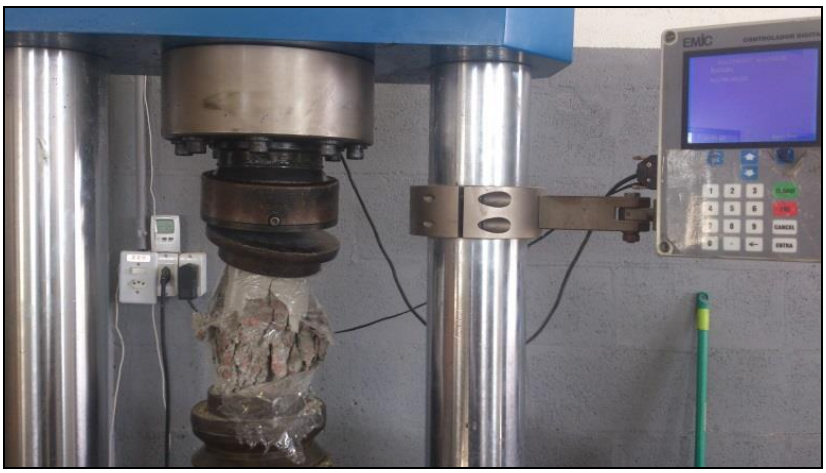


Figura 23 – Rompimento (OS AUTORES, 2017)

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados referentes aos ensaios. As amostras foram pesadas à temperatura ambiente, aquecidas, novamente pesadas, resfriadas com água à temperatura ambiente e na sequência submetidas ao ensaio de compressão para obtenção da resistência à compressão axial conforme as temperaturas a que foram submetidas.

4.1. PERDA DE ÁGUA EVAPORÁVEL

O Gráfico 5 ilustra a redução da água presente no concreto nas temperaturas de 100, 300 e 600ºC. Esta redução é referente ao comparativo realizado dos corpos de prova antes do ensaio de exposição à temperatura elevada e após o ensaio, possibilitando medir a perda de água durante o experimento.

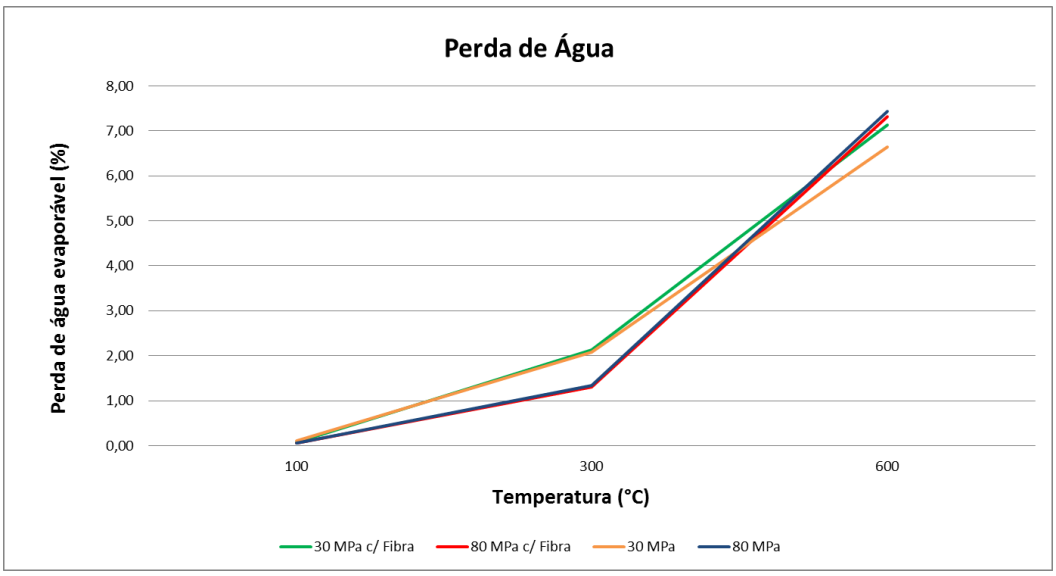


Gráfico 5 – Perda de Água Evaporável (OS AUTORES, 2017)

A evolução da temperatura em relação à evaporação da água demonstra a maior perda de água nos concretos de 30 MPa. Como visto na análise visual das amostras na Figura 244 o maior índice de vazios do concreto, assim como a alta relação água/cimento contribui para a acelerada evaporação nas amostras de 30 MPa até os 300ºC.

Figura 24 – Porosidade do Concreto (OS AUTORES, 2017)

A partir desta temperatura ocorre a volatilização das fibras de polipropileno como observado na Figura 255 e então abrem caminhos para liberação da pressão interna ocasionados pelo alto gradiente de pressão, e então se igualando os concretos de 30 e 80MPa. Esta analise demonstrada a seguir se faz possível a partir da comparação da variação de massa analisada em função da temperatura em um equipamento específico para este fim.

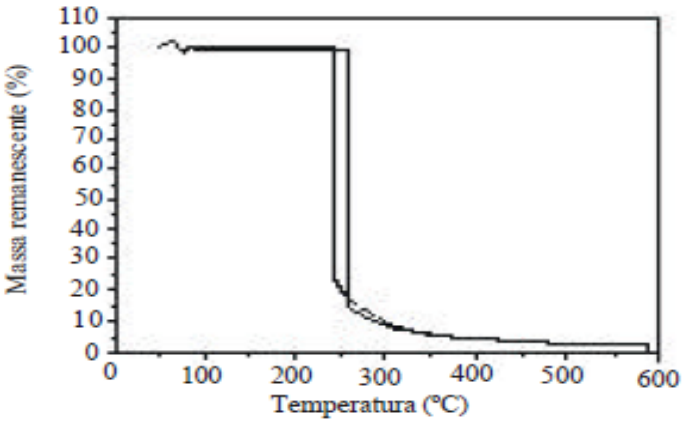


Figura 25 – Análise termogravimétrica da fibra de polipropileno – VELASCO (2002, *apud* BENTZ)

Para temperatura de 600ºC as amostras de 80 MPa apresentam maior perda de água, porém próximas as amostras de 30 MPa. Divergindo da bibliografia e do que esperávamos, a fibra teve melhor desempenho neste quesito nos traços de 30 MPa e não resultando em diferença significativa para o concreto de 80MPa.

4.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS A COMPRESSÃO

O ensaio de compressão foi efetuado com intuito de verificar a real resistência estimada a cada traço, com o emprego dos materiais supracitados com a adição ou não das fibras. Também a possível redução de resistência com a ação deterioradora do calor aplicado no concreto.

Os resultados obtidos pelos ensaios podem ser observados na Tabela 16.

	ID	Temperatura de Rompimento	Resistencia Real (KN)	Resistência (MPa)
30 MPa c/ Fibra	4	T.A	277,710	35,359
	1	100	272,780	34,731
	2	300	217,762	27,726
	3	600	104,270	13,276
80 MPa c/ Fibra	8	T.A	662,034	84,293
	5	100	689,220	87,754
	6	300	562,600	71,632
	7	600	250,510	31,896

	ID	Temperatura de Rompimento	Resistencia Real (KN)	Resistência (MPa)
30 MPa s/ Fibra	12	T.A	277,191	35,293
	9	100	248,300	31,615
	10	300	182,906	23,288
	11	600	111,314	14,173
80 MPa s/ Fibra	16	T.A	632,197	80,494
	13	100	625,418	79,631
	14	300	495,734	63,119
	15	600	212,060	27,000

Tabela 16 – Resistência a Compressão (OS AUTORES, 2017)

Os dados demonstrados na Tabela 16 mostram que foi atendida a expectativa adotada pelo traço do concreto quanto a sua resistência, onde nos

corpos de prova com expectativa de resistência de 30 MPa houve um acréscimo de aproximadamente 17% no resultado encontrado nos traços com e sem fibra. Já para os de 80 MPa, o traço sem fibra esteve muito próximo da resistência desejada com aumento de aproximadamente 0,06% e com fibra aumento de 5,37%.

Podemos observar graficamente (Gráfico 6) o comportamento da resistência a compressão axial das amostras mediante o incremento de temperatura.

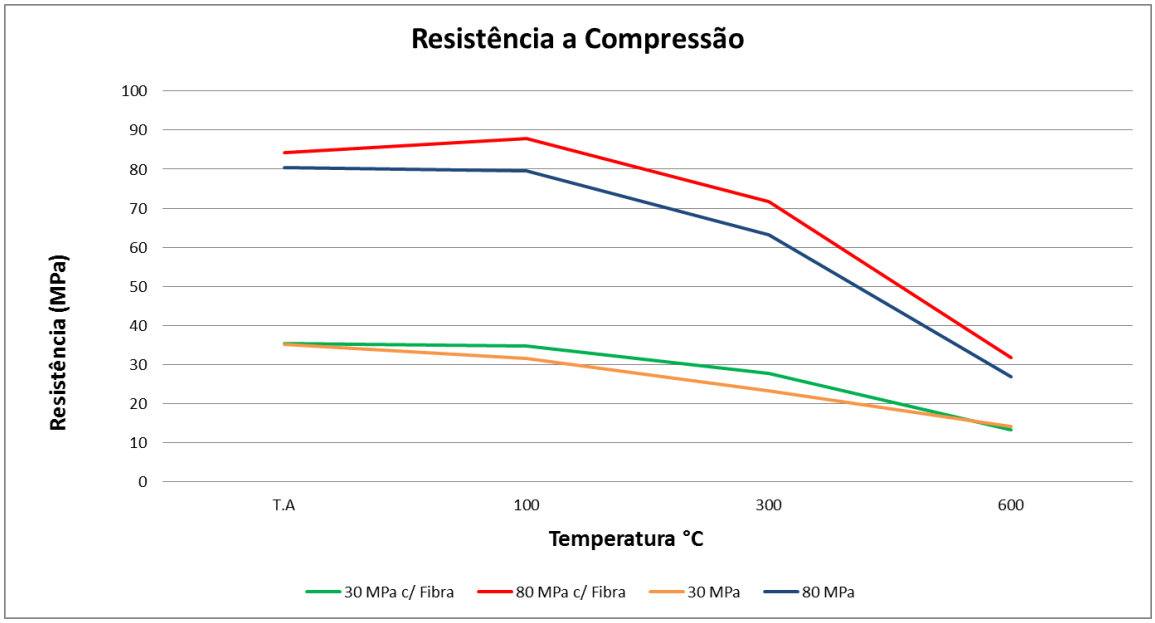


Gráfico 6 – Resistência a Compressão (OS AUTORES, 2017)

Observando os resultados obtidos, percebe-se que no traço de 30 MPa a presença da fibra melhorou o desempenho do concreto, no entanto se manteve bastante próximo no comportamento do traço original. A resistência à temperatura ambiente e 600ºC foram muito próximas e para as temperaturas de 100ºC e 300ºC o traço com fibra teve uma melhora de desempenho.

Para o concreto de 80 MPa a presença da fibra se mostrou bastante satisfatória em comparação com o traço original. Desde a temperatura ambiente,

passando por 100, 300 e 600ºC a resistência sempre se mostrou relevante entre os traços.

4.3. FATORES DE REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA

A NBR 15200:2012 expressa como fator de redução de resistência a relação entre a resistência à compressão do concreto submetido a diferentes temperaturas (fc,θ) e a resistência característica à compressão do concreto em situação normal (fck). O confrontamento de índices encontrados nos ensaios como o prescrito em norma podem ser observados por meio do Gráfico 7 abaixo.

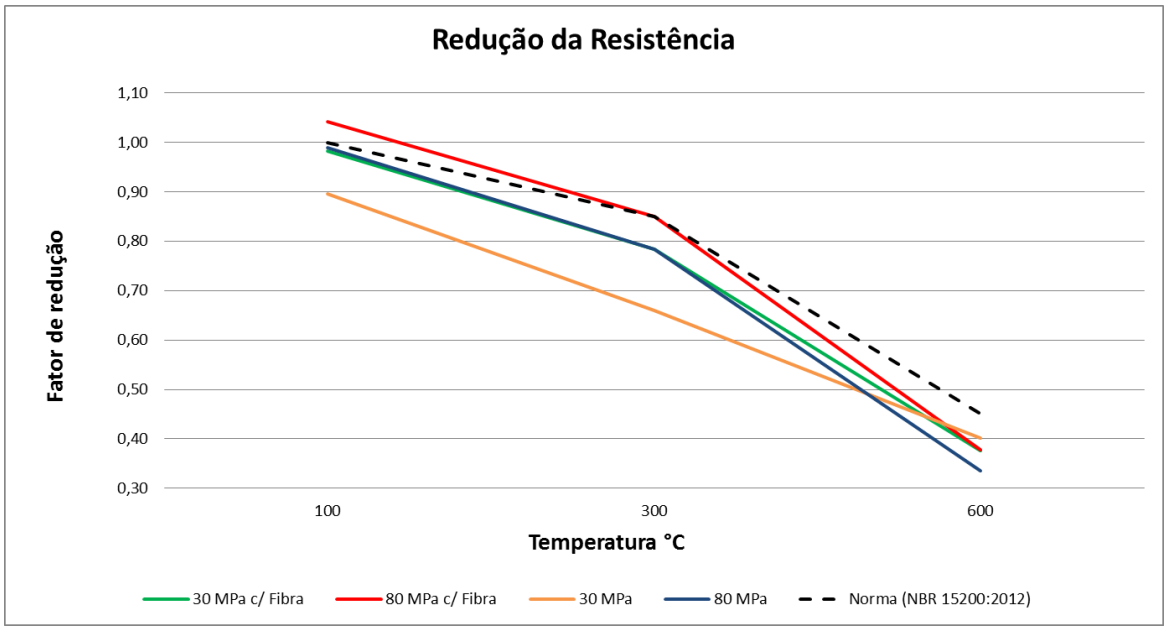


Gráfico 7 – Fator de redução da resistência (OS AUTORES, 2017)

Ponderando que a norma fornece fatores de redução de resistência para concretos de massa específica normal compreendida entre 2.000 kg/m³ a 2.800 kg/m³ preparados com agregados predominantemente silicosos ou calcários, aqui utilizados como critério de comparação, era previsível um

comportamento divergente dos fatores encontrados nos ensaios pelo fato do resfriamento do concreto não ser empregado na norma.

Entendendo que possa ser resultado de alguma falha do ensaio o resultado a 100ºC do traço de 80 MPa com fibra ter sido maior que o resultado a temperatura ambiente, observa-se no conjunto dos resultados um melhor desempenho no que se refere a resistência a altas temperaturas para este traço.

Também para o traço de 30 MPa, a presença da fibra demonstra uma eficácia na faixa de 100° a 300ºC superando o mesmo traço sem fibra para menor perda de resistência no ensaio a compressão.

Entre 100° e 200° C há uma perda de resistência atribuída à perda da água interlaminar causando uma instabilidade da pasta do concreto. A passa começa a se retrair e tende ao fissuramento pelo movimento da água evaporada. As amostras com presença de fibra apresentam maior eficácia na transferência dessas partículas de água presente no núcleo do corpo de prova mediante o seu derretimento.

A partir de 300°C ocorrem perdas significativas de resistência a compressão em todas as amostras, exceto a de 30 MPa sem presença de fibra, atribuída à progressiva desidratação dos silicatos de cálcio, conforme mencionado no capítulo 2.

Por volta de 400°C, começa o processo de expansão dos agregados e com isso o fissuramento é intensificado. Esse gradiente de tensões entre as fases do concreto reduz sua resistência (SILVA, 2006).

No concreto com fibra, o decréscimo na resistência se intensifica pela perda da massa molecular da fibra, e a rede de vazios que se forma por causa dessa perda, no entanto, percebe-se que a queda da resistência é menor para o concreto com presença de fibra.

Verifica-se que a temperatura de 600°C, a resistência do concreto já reduziu mais de 60% da resistência inicial, valor este bem próximo quando comparado com o da norma que chega da 55%.

Nessa temperatura já ocorreu à desidratação da calcita, conforme afirmado por Cánovas (1988). Nessa fase, de decomposição química dos produtos hidratados, ambos os tipos de concreto, tem resistência a compressão residual com valores muitos próximos.

Em síntese do descrito acima podem ser observados na Tabela 17 onde apresentamos os índices da norma confrontados com os valores obtidos nos ensaios.

30 MPa com fibra				
CP	**Temperatura submetida (°C)**	**Resistência após o resfriamento (MPa)**	**Fator de redução valores obtidos (MPa)**	**Fator de redução NBR 15200:2012 (MPa)**
4	25	35,36	1,00	1,00
1	100	34,73	0,98	1,00
2	300	27,73	0,78	0,85
3	600	13,28	0,38	0,45
80 MPa com fibra				
CP	**Temperatura submetida (°C)**	**Resistência após o resfriamento (MPa)**	**Fator de redução valores obtidos (MPa)**	**Fator de redução NBR 15200:2012 (MPa)**
8	25	84,29	1,00	1,00
5	100	87,75	1,04	1,00
6	300	71,63	0,85	0,85
7	600	31,90	0,38	0,45
30 MPa sem fibra				
CP	**Temperatura submetida (°C)**	**Resistência após o resfriamento (MPa)**	**Fator de redução valores obtidos (MPa)**	**Fator de redução NBR 15200:2012 (MPa)**
12	25	35,29	1,00	1,00
9	100	31,62	0,90	1,00
10	300	23,29	0,66	0,85
11	600	14,17	0,40	0,45
80 MPa sem fibra				
CP	**Temperatura submetida (°C)**	**Resistência após o resfriamento (MPa)**	**Fator de redução valores obtidos (MPa)**	**Fator de redução NBR 15200:2012 (MPa)**
16	25	80,49	1,00	1,00
13	100	79,63	0,99	1,00
14	300	63,12	0,78	0,85
15	600	27,00	0,34	0,45

Tabela 17 – Índices da norma versus obtidos nos ensaios (OS AUTORES, 2017)

Observa-se que amostras ensaiadas em temperatura de 100°C seguiram próximas ao exposto da norma, destoando apenas amostra de 30 MPa sem presença de fibra de polipropileno.

Entende-se também que 75% das amostras ensaiadas a 300°C se mostraram dispersas apresentando, na pior situação, um índice de 0,19. Já para amostras ensaiadas a 600°C a dispersão foi generalizada apresentando, no melhor situação, uma diferença de 0,05.

Nem sempre os erros grosseiros são perceptíveis. Mesmo com todas as variáveis controladas pela pessoa que irá executar o ensaio, falhas poderão surgir comprometendo a credibilidade do estudo. Para esses casos há métodos de tratamento de dados espúrios dos resultados obtidos nos experimentos.

Pautando a importância da aplicação de análises estatísticas na variabilidade dos dados, são apresentados na Tabela 18 os tratamentos dos dados espúrios para cada série em questão, levando em consideração o desvio padrão das amostras ensaiadas que se apresentaram de maneira elevada.

		Número de corpos de provas		4	Unidade
		Média		27,77	MPa
		Mediana		31,23	MPa
		Desvio Padrão		10,27	MPa
		Coeficiente de variação		36,96	%
	CP	**Tamamho (Ø x h cm)**	**Temperatura submetida (°C)**	**Resistência (MPa)**	**Queda de Resistência (%)**
	1	10x20	25	35,36	0%
	2	10x20	100	34,73	1,78%
	3	10x20	300	27,73	21,59%
	4	10x20	600	13,28	62,45%
	Análise dos dados estatísticos				
	CP	**Média (MPa)**	**Desvio Padrão (Mpa)**	**Média - Des. P. (MPa)**	**Média + Des. P. (MPa)**
1° Análise	4	27,77	10,27	17,51	38,04
2° Análise	3	32,61	10,27	22,34	42,87
	Redução de resistência em média			**7,79%**	

Tabela 18 – Análise estatística para amostra 30 MPa c/ Fibra (OS AUTORES, 2017)

Para amostras, na ocasião da 2° análise dos dados espúrios, o limite inferior (22,34 MPa) e o limite superior (42,87 MPa) limitaram as amostras a serem descartadas. Desta forma, o valor médio de resistência à compressão axial da série de amostras compreende a 32,61 MPa. Consequentemente este valor representa uma redução de resistência em média de 7,79% quando comparada a primeira amostra rompida em condições normais.

A análise foi repetida para as amostras de 80 MPa com adição de fibra conforme Tabela 19.

		Número de corpos de provas		4	Unidade
		Média		68,89	MPa
		Mediana		77,96	MPa
		Desvio Padrão		25,62	MPa
		Coeficiente de variação		37,19	%
	CP	**Tamamho (Ø x h cm)**	**Temperatura submetida (°C)**	**Resistência (MPa)**	**Queda de Resistência (%)**
	1	10x20	25	84,29	0%
	2	10x20	100	87,75	-4,11%
	3	10x20	300	71,63	15,02%
	4	10x20	600	31,90	62,16%
	Análise dos dados estatísticos				
	CP	**Média (MPa)**	**Desvio Padrão (Mpa)**	**Média - Des. P. (MPa)**	**Média + Des. P. (MPa)**
1° Análise	4	68,89	25,62	43,27	94,51
2° Análise	3	81,23	25,62	55,61	106,85
	Redução de resistência em média			**3,64%**	

Tabela 19 – Análise estatística para amostra 80 MPa c/ Fibra (OS AUTORES, 2017)

Análise estatística para as amostras de 30 MPa sem adição de fibra conforme Tabela 20.

		Número de corpos de provas		4	Unidade
		Média		26,09	MPa
		Mediana		27,45	MPa
		Desvio Padrão		9,40	MPa
		Coeficiente de variação		36,03	%
	CP	**Tamamho (Ø x h cm)**	**Temperatura submetida (°C)**	**Resistência (MPa)**	**Queda de Resistência (%)**
	1	10x20	25	35,29	0%
	2	10x20	100	31,62	10,42%
	3	10x20	300	23,29	34,02%
	4	10x20	600	14,17	59,84%
	Análise dos dados estatísticos				
	CP	**Média (MPa)**	**Desvio Padrão (Mpa)**	**Média - Des. P. (MPa)**	**Média + Des. P. (MPa)**
1° Análise	4	26,09	9,40	16,69	35,49
2° Análise	3	30,07	9,40	20,67	39,47
	Redução de resistência em média			**14,81%**	

Tabela 20 – Análise estatística para amostra 30 MPa s/ Fibra (OS AUTORES, 2017)

Análise estatística para as amostras de 80 MPa sem adição de fibra conforme Tabela 21.

		Número de corpos de provas		4	Unidade
		Média		62,56	MPa
		Mediana		71,38	MPa
		Desvio Padrão		25,02	MPa
		Coeficiente de variação		39,99	%
	CP	**Tamamho (Ø x h cm)**	**Temperatura submetida (°C)**	**Resistência (MPa)**	**Queda de Resistência (%)**
	1	10x20	25	80,49	0%
	2	10x20	100	79,63	1,07%
	3	10x20	300	63,12	21,59%
	4	10x20	600	27,00	66,46%
	Análise dos dados estatísticos				
	CP	**Média (MPa)**	**Desvio Padrão (Mpa)**	**Média - Des. P. (MPa)**	**Média + Des. P. (MPa)**
1° Análise	4	62,56	25,02	37,54	87,58
2° Análise	3	74,41	25,02	49,40	99,43
	Redução de resistência em média			**7,55%**	

Tabela 21 – Análise estatística para amostra 80 MPa s/ Fibra (OS AUTORES, 2017)

Os ensaios aqui apresentados tornaram definitivamente verdadeiros os indícios de que a ação do fogo juntamente com o resfriamento da estrutura provoca efeitos destrutivos ao concreto, como mencionado por Costa (2008), Silva (2002) e Cánovas (1988).

Quando a temperatura alcança 600 °C, Costa (2008) preconiza concreto sem função estrutural devido à perda total da água quimicamente combinada a pasta. Em análise ao Gráfico 7 podemos perceber uma queda acentuada a partir da temperatura de 300°C, onde o aumento da degradação do concreto e novamente acelerado.

Também podemos findar a partir do Gráfico 7 que a teoria exposta por Cánovas bem como a expressa na norma NBR 15200:2012 se assemelha a encontrada nos ensaios, onde ambos apresentam uma redução mais acentuada em temperaturas menores e uma elevada degradação a partir de 300 °C.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O problema de pesquisa foi atingido por meio da análise do comportamento do concreto (30 e 80MPa) com a presença ou não de fibras de polipropileno quando submetido à alta temperatura e ao resfriamento simulando um incêndio, onde para possibilitar as análises foram moldados corpos de prova de diferentes classes de concreto, passados pelo processo de cura, submetidos a diferentes temperaturas, resfriados e em seguida ensaiados a compressão axial para verificar sua resistência. Neste processo atingiu-se os objetivos propostos neste trabalho, onde a presença da fibra mostrou-se eficaz no que se refere ao desempenho do concreto frente a altas temperaturas.

Analisando o comportamento dos corpos de prova em relação a perda de água, observou-se uma maior perda de água nas temperaturas iniciais nos traços de menor resistência e maior relação água/cimento. Já nas temperaturas finais os corpos de prova ficaram bastante próximos neste quesito e não demonstrando grande influencia das fibras nos traços de maior resistência.

Quanto ao comportamento da fibra frente a resistência dos corpos de prova, pode-se verificar um melhor desempenho nos traços de 80MPa, os quais são mais afetados em eventos de exposição a altas temperaturas, demonstrando assim um importante indicativo na utilização de fibras de polipropileno para este fim.

Vale ressaltar a utilização da água para resfriamento repentino que causa ações deletérias na estrutura, tanto como o fogo. O procedimento de aspersão de água sobre os corpos de prova foi com objetivo de simular a ação dos bombeiros em situação de incêndio e tornar o ensaio mais próximo da realidade.

Observando os dados de redução da resistência e resistência a compressão, nota-se uma melhora de desempenho dos corpos de prova com

adição das fibras. Porém outros dados também devem ser levados em consideração para uma análise completa como os materiais empregados no concreto, consumo de água no traço, tempo de exposição ao fogo e resfriamento da estrutura.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir estão relacionadas algumas sugestões para trabalhos futuros, levantadas através de análises e conclusões retiradas a partir do trabalho realizado, onde poderão garantir uma maior precisão das informações para realização dos ensaios.

a) Empregar uma quantidade maior de fibras de polipropileno com a finalidade da obtenção de resultados melhores no desempenho das estruturas de concreto.

b) Analisar o módulo de elasticidade do concreto exposto ao fogo.

c) Aumentar o tempo de exposição do concreto ao fogo.

d) Realizar comparativo de estruturas com e sem resfriamento.

.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, J. E. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15200:2012 - **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.** Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118/2014** – **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739/2007 – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. United Kingdom. Elsevier, 1990.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção: novos materiais para construção civil**. 5ª Edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1994.

BOCCHILE, Cláudia. **Concreto turbinado. Téchne- PINI**, Edição 49, 2000. Disponível em: http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/49/concreto-turbinado-287208-1.aspx. Acesso em 28/04/2018.

BEZERRA, S. A. **Influência do tipo e da duração de cura nas propriedades mecânicas de concretos de alto desempenho (CAD) produzidos em períodos quentes (t > 25°C) e de baixa umidade relativa do ar (h < 50%)**. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, p. 1-120, 2005. Disponível em: < http://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tde/686/1/Dissertacao%20Simone%20 Ataid e%20Beserra.pdf>. Acesso em: 9 Mai. 2017.

BRITEZ, C. A. **Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011

CÁNOVAS, Manuel Fernández. **Patologia e terapia do concreto armado. 1ª Edição**. São Paulo: Editora Pini, 1988. 521 p.

CARNEIRO, Kimarrison Souza. BRITO, Uziel Rodrigues de. **Análise do concxreto de alta resistência (CAR) quando submetido à ação do fogo e ao resfriamento**. Trabalho de Conclusão de Curto – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, p.1-110, 2014.

COSTA, Carla Neves. **Estrutura de concreto armado em situação de incêndio. Jornada Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Brasília**, p.1-20, 2002. Disponível em: http://www.lmc.ep.usp.br/grupos/gsi/wp-content/artigos1/conc_fire_jornadas_brasilia.pdf. Acesso em 10/03/2014.

COSTA, Carla Neves.; SILVA, V. P**. Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio. Métodos tabulares apresentados em normas internacionais**. V Simpósio Epusp sobre estruturas de concreto. 2003.

COSTA, Carla Neves, Figueiredo, A. D. & Silva, V. P. (2002). **Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas.** Nutau 2002 – USP, pp. 1-12. Recuperado em 9 de Abril de 2014.

COSTA, Carla Neves. **Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas**. Natau – Universidade de São Paulo, São Paulo, p.1-12, 2002. Disponível em: http://www.lmc.ep.usp.br/grupos/gsi/wp-content/artigos1/tecno_conc_fire_NUTAU20002.pdf. Acesso em 10/03/2014.

COSTA, Carla Neves. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. Tese de mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, p.1-721, 2008. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-04092008-155911/pt-br.php. Acesso em 10/03/2014.

COSTA, Carla Neves, Figueiredo, A. D. & Silva, V. P. (2002). **O fenômeno do lascamento ("spalling") nas estruturas de cocnreto armado submetido a incêndio – uma revisão crítica**. Instituto Brasileiro do Concreto – 44° Congresso Brasileiro. Disponível em: http://www.lmc.ep.usp.br/grupos/gsi/wp-content/artigos1/spalling_ibracon.pdf. Acesso em 15/03/2014.

CASTRO, A. L. de, P. R. T. Tiba, V. C. Pandolfelli. **Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos expostos a altas**

temperaturas. Revisão. Universidade de São Paulo, São Carlos, p.22-31, 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132011000100003&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em 20/04/2017.

DUARTE, D. LEITE, Maria do Socorro. PONTES, Rosemeri. **Gerenciamento de Riscos de Incêndios.** Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1998. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1998_ART366.pdf. Acesso em 20/04/2017.

FERNANDES, Ivan Ricardo. **Engenharia de segurança contra incêndio e pânico. 22° edição**. Curitiba: CREA-PR, 2010. 92 páginas.

FIGUEIREDO, Antonio. **O fenômeno do lascamento ("spalling") nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio – uma revisão crítica**. Instituto Brasileiro do Concreto – 44° Congresso Brasileiro, São Paulo, p.1-15, 2002.

HELENE, P. e ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland.** Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. Capitulo 29. IBRACON. p. 905-944. 2010.

LAKATOS, Maria Eva. MARCONI, Maria de Andrade. **Metodologia do trabalho científico**. São Paulo: Atlas, 1992.

ISAIAS, Geraldo Cechella. **Concreto: ciência e tecnologia**. 1ª Edição. São Paulo: IBRACON, 2011. 1902 p.

ITAMBÉ. **Palestra Itambé Concretos**, p.1-145, 2012. Disponível em: < http://www.cimentoitambe.com.br/wpcontent/uploads/2012/12/Palestra_Itambe_Concreto.pdf>. Acesso em: 31 Mai. 2017.

LIMA, R. C. A., KIRCHHOF, L. D., CASONATO, C. A., FILHO, L. C. P. Silva.. **Efeito de altas temperaturas no concreto**. II Seminário de Patologias das Edificações. Disponível em: http://www.deecc.ufc.br/Download/TB819_Patologia_e_Recuperacao_de_Estruturas_de_Concreto/Efeito_do_fogo_no_concreto.pdf. Acesso em 15/03/2017.

KAEFER, Elka Cohen. **Análise paramétrica de um incêndio conforme o novo Eurocode 1**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Estruturas e Fundações, São Paulo, p.1-14, 2003. Disponível em: < http://www.lmc.ep.usp.br/grupos/gsi/wp-content/artigos1/incendio_CILAMCE.pdf>. Acesso em: 09 Mar. 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo, 2014.

MELO, C. H. A. S., AGUIAR, M. T. P., CORRÊIA, E. C. S., SANTOS, D. B., CETLIN, P. R.. **Influência da temperatura no desempenho de concretos reforçados com fibras curtas de aço.**. CBECIMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Disponível em: https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2002/arqs_pdf/pdf_100/tc101-088.pdf. Acesso em 15/03/2017.

MORALES, Gilson. CAMPOS, Alessandro. FAGANELLO, Adriana M. Patriota. **Ação do fogo sobre os componentes de concreto.** Ciências Exatas e

Tecnológicas, Londrina, V. 32, n. 1, p. 47-55, 2011. Disponível em: http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/view/4057. Acesso em 15/03/2017.

NETO, Manoel Altivo da luz. **Condições de segurança contra incêndio**. Ministério da Saúde, Brasília, p.1-100, 1995. Disponível em: < http://www.anvisa.gov.br/servicosaude/manuais/incendio.pdf >. Acesso em: 15 Mar. 2017.

NEVILLE, Adam Matthew. **Propriedades do concreto**. 2ª Edição. São Paulo: Editora Pini, 1997. 828 p.

HÜTNER JÚNIOR, Ormy; GARCIA, Luiz Carlos; NÉIA, José Augusto. **Reforço com fibra de carbono em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos antigos.** Maceio, 2014. Disponível em: http://www.infohab.org.br/entac2014/artigos/paper_719.pdf. Acesso em 08/12/2014.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do concreto e projetos de edifícios.** São Carlos, 2007.

SILVA, Valdir Pignatta e. **Estrutura de aço em situação de incêndio. 1ª Edição**. São Paulo: Zigurate Editora, 2004. 249 p.

SILVA, Luiz Carlos Klein da**. Análise do concreto armado quando submetidos à ação de temperaturas elevadas e ao resfriamento brusco de combate a incêndio**. Trabalho de Pós-Graduação – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, p.1-73, 2006.

SHUTTLEWORTH, Peter**. Fire Performance of Concrete for Tunnel Linings**. Channel Tunnel Rail Link Technical Report. RLE – Rail Link Engineering. London, April 24, 1997.

STUCCHI, Fernando Rebouças. **Estruturas de concreto em situação de incêndio. Téchne- PINI**, São Paulo, p. 1-9, 2005. Disponível em: http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/99/estruturas-de-concreto-em-situacao-de-incendio-285662-1.aspx. Acesso em 7/03/2017.

VELASCO, Reila Vargas. **Concreto de Alto Desempenho Reforçado com Fibras de Polipropileno e Sisal Submetidos a Altas Temperaturas**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

VARGAS, Mauri Resende. **Resistência ao fogo das estruturas de aço**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: CBCA, 2003. 76 p.

WALRAVEN, Joost C. **La Evolucion del Hormigón**. In: Structural Concrete. P1, N° 1. EB-FIP. Lausanne, 1999.

Anexo 1 – Boletim de Ensaio Cimento CPII-F-40

Boletim de Ensaios de Cimento

Votorantim Cimentos

Atualizado em:	20/04/2018	Produto:	CPIIF-40	Norma:	NBR 11578
Mês e ano de referência	abr/18	Marca:	Votoran	Unidade:	Rio Branco

Ensaios	Químicos				Físicos e mecânicos										
	Teores (%)				Finura (%)		Blaine	Água de	Tempo Pega		Expansib. a	Resist.à Compressão (MPa)			
	PF	MgO	SO3	RI	#200	#325	(cm²/g)	consist.(%)	Início (min)	Fim (min)	quente (mm)	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias
Limites de Norma	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 2,5	≤ 10,0	N/A	≥ 2800	N/A	≥ 60	≤ 600	≤ 5,0	N/A	≥ 15,0	≥ 25,0	≥40
01/04/2018															
02/04/2018	5,2	5,9	3,4	1,6	0,0	0,5	4420	30,6	210	370	0,0	23,0	33,8	42,2	
03/04/2018	5,0	5,7	3,3	1,0	0,0	0,4	4340	30,0	230	300	0,5	22,8	34,4	39,9	
04/04/2018	4,9	5,8	3,6	1,8	0,0	0,3	4320	30,4	240	300	1,0	22,9	32,8	39,2	
05/04/2018	5,2	5,7	3,4	1,3	0,0	0,1	4520	31,0	200	260	1,0	24,5	36,3	40,0	
06/04/2018	5,1	5,9	3,3	1,6	0,0	0,3	4360	30,2	205	265	0,0	24,4	32,2	39,3	
07/04/2018															
08/04/2018															
09/04/2018	5,3	5,6	3,3	1,5	0,0	0,3	4630	30,8	200	260	0,5	24,5	34,3	40,1	
10/04/2018	5,0	5,8	3,3	1,7	0,0	0,1	4390	30,6	220	280	0,0	24,0	36,4	40,3	
11/04/2018	5,0	5,6	3,3	1,6	0,1	0,8	4500	30,4	200	260	0,0	25,6	34,5	40,0	
12/04/2018	5,2	6,0	3,4	1,9	0,0	0,1	4620	30,8	190	250	0,0	25,2	34,5		
13/04/2018	5,1	5,7	3,4	1,4	0,0	0,3	4490	30,6	200	260	0,5	24,2	34,3		
14/04/2018															
15/04/2018															
16/04/2018	5,2	5,8	3,3	1,2	0,0	0,1	4570	30,8	210	270	0,5	24,5			
17/04/2018	5,0	5,7	3,3	1,3	0,0	0,2	4520	30,6	210	270	1,0	26,5			
18/04/2018	5,2	5,7	3,4	1,8	0,0	0,2	4450								
19/04/2018															
20/04/2018															
21/04/2018															
22/04/2018															
23/04/2018															
24/04/2018															
25/04/2018															
26/04/2018															
27/04/2018															
28/04/2018															
29/04/2018															
30/04/2018															
01/05/2018															
Média	5,11	5,74	3,36	1,51	0,01	0,28	4471,54	30,57	209,58	278,75	0,42	24,34	34,35	40,13	
Desvio Padrão	0,12	0,12	0,08	0,26	0,03	0,20	102,13	0,28	14,22	32,76	0,42	1,11	1,31	0,92	
Mínimo	4,94	5,56	3,26	1,04	0,00	0,10	4320,00	30,00	190,00	250,00	0,00	22,80	32,20	39,20	0,00
Máximo	5,28	5,99	3,57	1,86	0,10	0,80	4630,00	31,00	240,00	370,00	1,00	26,50	36,40	42,20	0,00

Observações:

ME = 3,06 g/cm³

Abílio Estevão Galli Junior
Nome
Responsável Controle de Qualidade
Votorantim Cimentos S/A

Thomas Rheinegger
Nome
Gerente da Fábrica
Votorantim Cimentos S/A

Central de Relacionamento com o Cliente: Capitais 4003 9894 | Demais localidades 0800 701 9894
Serviço de Atendimento ao Consumidor: 0800 701 9898
Site: www.vcimentos.com.br

Anexo 2 – Qualificação de material – Areia Fina

Votorantim | Cimentos

Gestão da Qualidade

Qualificação/Avaliação de Material

ENGEMIX

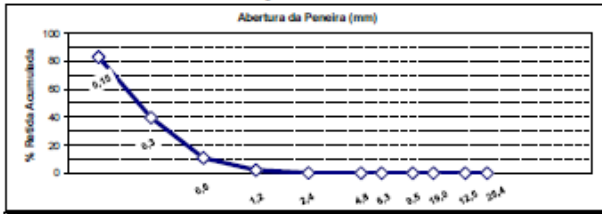
Filial:	Curitiba	Material:	Areia Natural Fina	Data Inic. Ensaio:	
Fornecedor:	Mineração Bassani	Data de Coleta:		Data Fim Ensaio:	

Análise Granulométrica (NBR NM 248)

Massa Inicial	1000,0	1000,0				
Malha (mm)	Amostra 1 (g)	Amostra 2 (g)	Variação (%)	Status da Variação	% Retida	% Retida Acumulada
25,4	0,0	0,0	0,0	Variação OK	0	0
19,0	0,0	0,0	0,0	Variação OK	0	0
12,5	0,0	0,0	0,0	Variação OK	0	0
9,5	0,0	0,0	0,0	Variação OK	0	0
6,3	0,0	0,0	0,0	Variação OK	0	0
4,8	0,0	0,0	0,0	Variação OK	0	0
2,4	2,0	2,0	0,0	Variação OK	0	0
1,2	20,0	19,0	0,1	Variação OK	2	2
0,6	87,0	87,0	0,0	Variação OK	9	11
0,3	289,0	287,0	0,2	Variação OK	29	40
0,15	433,0	434,0	0,1	Variação OK	43	83
< que 0,15	169,0	171,0	0,2	Variação OK	17	100
Totais	1000,0	1000,0				

Dimensão Máxima Característica (mm):	1,2
Módulo de Finura:	1,4

Distribuição Granulométrica



Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis (NBR 7218)

Peneiras (mm)		Massa Mínima da Amostra	Massa Inicial (g)	Peneira p/ remoção dos resíduos	Massa Final (g)	Teor de Argila da Fração (%)	Teor de Argila Parcial (%)	Teor de Argila da Amostra (%)
Passando	Retida							
76	38	—	0,0	4,8	0,0			
38	19	—	0,0	4,8	0,0			
19	4,8	—	0,0	2,4	0,0			
4,8	1,2	—	0,0	0,6	0,0			

Teor de Materias Pulverulentos (NBR NM 46)

Massa Mínima da Amostra	Ensaio	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Teor da Amostra (%)	Teor de Materiais Pulverulentos (%)
0,1 Kg	01	500,0	489,0	2,2	2,2
	02	500,0	489,0	2,2	

Det. da Massa Esp., Massa Esp. Aparente e Absorção de Água (NBR NM 53)

Massa Mínima da Amostra	Ensaio	Amostra (g)	Pic + Água (g)	Pic + Água + Amostra (g)	Absorção (%)	Massa Esp. Aparente	Massa Esp. Seca	Massa Esp. Sat. Superf. Seca
2,0 Kg	01	500,0	500,0	811,00			2,65	
	02	500,0	500,0	811,00			2,65	
	Temp. Ambiente (ºC):		0,0	Média:			2,65	

Det. da Massa Unitária (NBR 7251)

Ensaio	Massa da Amostra (kg)	Volume do Recipiente (dm3)	Massa Unitária (g/cm3)	Desvio da média (%)	Massa Unitária (g/cm3)
01	3390,00	2314,00	1,465	0,2	1,46
02	3385,00	2314,00	1,463	0,0	
03	3376,00	2314,00	1,459	0,2	

Obs.: A amostra ensaiada atende as especificações.

Nome do Técnico Responsável pelo ensaio: Vinicius Ribeiro	Assinatura do Técnico Responsável pelo ensaio:	Data:
Nome do Responsável pelo ensaio: João Victor Mendes	Assinatura do Responsável pelo ensaio:	Data:

Anexo 3 – Qualificação de material – Areia Artificial

Votorantim | Cimentos

Gestão da Qualidade

Qualificação/Avaliação de Material

ENGEMIX

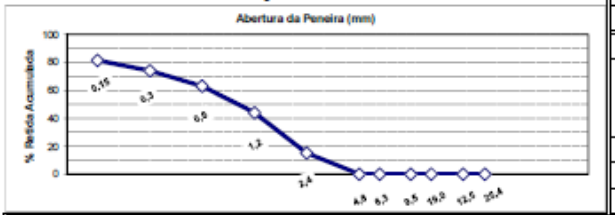
Filial:	Curitiba	Material:	Areia de Brita	Data Inic. Ensaio:	
Fornecedor:	Cimento Rio Branco - Salvá	Data de Coleta:		Data Fim Ensaio:	

Análise Granulométrica (NBR NM 248)

Massa Inicial	1000,0	1000,0				
Malha (mm)	Amostra 1 (g)	Amostra 2 (g)	Variação (%)	Status da Variação	% Retida	% Retida Acumulada
25,4	0,0	0,0	0,0	Variação OK	0	0
19,0	0,0	0,0	0,0	Variação OK	0	0
12,5	0,0	0,0	0,0	Variação OK	0	0
9,5	0,0	0,0	0,0	Variação OK	0	0
6,3	0,0	0,0	0,0	Variação OK	0	0
4,8	1,0	1,0	0,0	Variação OK	0	0
2,4	151,0	149,0	0,2	Variação OK	15	15
1,2	286,0	290,0	0,4	Variação OK	29	44
0,6	190,0	192,0	0,2	Variação OK	19	63
0,3	109,0	111,0	0,2	Variação OK	11	74
0,15	75,0	72,0	0,3	Variação OK	7	81
< que 0,15	188,0	185,0	0,3	Variação OK	19	100
Totais	1000,0	1000,0				

Dimensão Máxima Característica (mm):	4,8
Módulo de Finura:	2,8

Distribuição Granulométrica



Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis (NBR 7218)

Peneiras (mm)		Massa Mínima da Amostra	Massa Inicial (g)	Peneira p/ remoção dos resíduos	Massa Final (g)	Teor de Argila da Fração (%)	Teor de Argila Parcial (%)	Teor de Argila da Amostra (%)
Passando	Retida							
76	38	—	0,0	4,8	0,0			
38	19	—	0,0	4,8	0,0			
19	4,8	—	0,0	2,4	0,0			
4,8	1,2	0,2 Kg	0,0	0,6	0,0			

Teor de Materias Pulverulentos (NBR NM 46)

Massa Mínima da Amostra	Ensaio	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Teor da Amostra (%)	Teor de Materiais Pulverulentos (%)
0,5 Kg	01	500,0	407,0	18,6	18,5
	02	500,0	408,0	18,4	

Det. da Massa Esp., Massa Esp. Aparente e Absorção de Água (NBR NM 53)

Massa Mínima da Amostra	Ensaio	Amostra (g)	Pic + Agua (g)	Pic + Agua + Amostra (g)	Absorção (%)	Massa Esp. Aparente	Massa Esp. Seca	Massa Esp. Sat. Superf. Seca
2,0 Kg	01	500,0	500,0	818,00			2,75	
	02	500,0	500,0	818,00			2,75	
	Temp. Ambiente (ºC):		0,0	Média:			2,75	

Det. da Massa Unitária (NBR 7251)

Ensaio	Massa da Amostra (kg)	Volume do Recipiente (dm3)	Massa Unitária (g/cm3)	Desvio da média (%)	Massa Unitária (g/cm3)
01	3869,00	2314,00	1,672	0,0	1,67
02	3856,00	2314,00	1,666	0,3	
03	3882,00	2314,00	1,678	0,3	

Obs.: A amostra ensaiada atende as especificações.

Nome do Técnico Responsável pelo ensaio: Vinicius Ribeiro	Assinatura do Técnico Responsável pelo ensaio:	Data:
Nome do Responsável pelo ensaio: João Victor Mendes	Assinatura do Responsável pelo ensaio:	Data:

Anexo 4 – Qualificação de material – Brita 1

Votorantim Cimentos	Gestão da Qualidade Planilha de Coleta de Dados	ENGEMIX

Filial:	Curitiba	Registro:
Fornecedor:	Pedreira Mandirituba	
Material:	Brita 1	
Data de Coleta:		
Data Iníc. Ensaio:		
Data Fim Ensaio:		

Granulometria (NBR NM 248)

Massa Inicial	1000,0	1000,0
Malha (mm)	Amostra 1 (g)	Amostra 2 (g)
25,4		
19,0	55,0	52,0
12,5	559,0	560,0
9,5	309,0	315,0
6,3	74,0	70,0
4,8	1,0	1,0
2,4	1,0	1,0
1,2		
0,6		
0,3		
0,15		
< que 0,15	1,0	1,0

Determinação da Massa Unitária (NBR 7251)

Ensaio	Massa da Amostra (kg)	Volume do Recipiente (dm3)
01	3012,00	2314,00
02	3031,00	
03	2995,00	

Det. Massa Específica, Massa Esp. Aparente e Absorção de Água (NBR NM 53)

Ensaio	Amostra (g)	Pic+Agua (g)	Pic+Agua+Amostra (g)
01	500,0	500,0	808,0
02			808,0
Temp. Ambiente (ºC):			

Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis (NBR 7218)

Peneiras (mm) Pass.	Peneiras (mm) Retida	Massa Inicial (g)	Peneira p/ remoção dos resíduos	Massa Final (g)
76	38		4,8	
38	19		4,8	
19	4,8		2,4	
4,8	1,2		0,6	

Teor de Materiais Pulverulentos (NBR NM 46)

Ensaio	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)
01	500,0	498,0
02	500,0	498,0

Nome do Técnico Responsável pelo ensaio:	Assinatura do Técnico Responsável pelo ensaio:	Data:
Vinicius Ribeiro		
Nome do Responsável pelo ensaio:	Assinatura do Responsável pelo ensaio:	Data:
João Victor Mendes		