

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JANAINA DE BARROS WEIRICH

**ANÁLISE DA PERDA DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO LEVE, COM
ARGILA EXPANDIDA E FIBRAS DE POLIPROPILENO, APÓS
EXPOSIÇÃO A ELEVADAS TEMPERATURAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

JANAINA DE BARROS WEIRICH

**ANÁLISE DA PERDA DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO LEVE, COM ARGILA
EXPANDIDA E FIBRAS DE POLIPROPILENO, APÓS EXPOSIÇÃO A ELEVADAS
TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão, do curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Mário Arlindo Paz Irrigaray.

PATO BRANCO

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DA PERDA DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO LEVE, COM ARGILA EXPANDIDA E FIBRAS DE POLIPROPILENO, APÓS EXPOSIÇÃO A ELEVADAS TEMPERATURAS

Janaina De Barros Weirich

No dia 23 de novembro de 2017, às 14h45min, na SALA O 202 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após argüição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº40-TCC/2017.

Orientador: Prof^ª. Dr. MARIO ARLINDO PAZ IRRIGARAY (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof^ª. Esp. ANA CLAUDIA DAL PRÁ VASATA (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof^ª. Dr^ª. HELOIZA PIASSA BENETTI (DACOC/UTFPR-PB)

AGRADECIMENTOS

Muitos tiveram participação na minha caminhada até aqui e nessa fase tão importante da minha vida. Sei que não conseguirei citar todos, mas jamais esquecerei o apoio que recebi, principalmente em orações.

Primeiramente agradeço a Deus, pelo dom da vida e por estar comigo em cada dia dela, me sustentando nos momentos de dificuldade e não deixando me abater quando elas surgiram. Tudo que tenho e sou devo a Ele. Obrigada Senhor!

Agradeço aos meus pais, Eloir José Weirich e Marines Machado de Barros Weirich, por todo esforço para que nada me faltasse, por acreditarem no meu potencial e investirem no meu sonho. Ao meu irmão Alan Cauê de Barros Weirich, pela companhia nas noites que fiquei até tarde estudando e pelos momentos de diversão que passamos juntos. Obrigada por estarem sempre ao meu lado e me incentivar, mesmo quando pensei que não iria conseguir. Eu amo vocês!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Mário Arlindo Paz Irrigaray, agradeço por todo auxílio e sugestões ao longo deste trabalho, pela paciência e atenção dedicadas, além das conversas que sempre me motivacionaram e mostraram minha capacidade. Muito obrigada mesmo! Também, as professoras Ana Claudia Dal Pra Vasata e Heloiza Piassa Benetti, membros da banca examinadora, pelas considerações.

Ao Vitor Baldin, técnico do laboratório de máquinas térmicas da UTFPR-PB, por me auxiliar nos ensaios de simulação de incêndio. A Karolyne Amaral, estagiária do laboratório de materiais da UTFPR-PB pelo auxílio no rompimento dos corpos de prova e ao Roberto Carneiro, mestrando da Universidade, por todas as dicas e sugestões durante a confecção dos corpos de prova.

Ao Eng. Civil Tobias Luiz Marchioro Toassi, pela amizade e pela compreensão nas vezes que precisei faltar ao estágio para realização dos ensaios. A amiga Larissa de Andrade Comann, que me auxiliou nos ensaios e sempre esteve pronta para me ajudar. A Gabriela Arendt, por sempre me apoiar e me animar, por me ajudar em todos os momentos que precisei e me acalmar nos dias que pensei que nada daria certo. Aos demais amigos que me fizeram companhia nos dias que estava rodando concreto, que me distraíram nos momentos que estava quase surtando, ou que simplesmente me ouviram quando precisei desabafar. A todos vocês, meus mais sinceros agradecimentos!

RESUMO

WEIRICH, Janaina de Barros. **Análise do comportamento do concreto leve, com argila expandida e fibras de polipropileno, após exposição a elevadas temperaturas.** 2017. 94p. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Pato Branco, 2017.

O concreto é um material amplamente consumido no mundo por oferecer fácil moldabilidade no estado fresco e devido suas propriedades quando endurecido, como resistência e durabilidade. Também apresenta bom desempenho térmico, devido sua incombustibilidade e baixa condutibilidade térmica. Nesse contexto, estudou-se o comportamento do concreto leve com adição de fibras de polipropileno, após exposição as temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C, por 90 minutos, simulando um caso de incêndio. Foram moldados 72 corpos de prova cilíndricos, com 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, para três traços com relação água/cimento distintas: 0,45, 0,50 e 0,55. Na idade de 7 dias cada traço foi submetido ao ensaio de simulação de incêndio para as três temperaturas e, após resfriamento lento, os corpos de prova foram analisados quanto a massa específica e aparência, e então rompidos na idade de 8 dias. Quanto maior a temperatura a qual o concreto foi exposto, menor foi sua massa específica e, conseqüentemente, a resistência a compressão. Para a temperatura de 900°C a resistência encontrada foi inferior a 25% da resistência original. As fibras de polipropileno melhoraram o desempenho do concreto para a temperatura ambiente e para as temperaturas de 300°C e 600°C, reduzindo a fissuração e aumentando sua resistência a compressão. Além disso, não se observou a ocorrência do efeito *spalling* para o concreto com adição de fibras.

Palavras-chave: Concreto leve. Concreto com fibras. Incêndio. Resistência a elevadas temperaturas.

ABSTRACT

WEIRICH, Janaina de Barros. **Behavior analysis of lightweight concrete with expanded clay and polypropylene fibers after exposure to high temperatures.** 2017. 94p. Civil Engineering Course Completion Work – Academic Construction Department, Federal Technological University of Paraná – UTFPR, Pato Branco.

Concrete is a worldwide consumed material due to its fresh state easy moldability and its properties when hardened, such as strength and durability. It also presents good thermal performance, due to its incombustibility to low thermal conductivity. In this context, the behavior of lightweight concrete with polypropylene fibers addition after exposure to temperatures of 300 °C, 600 °C and 900 °C for 90 minutes, simulating a fire situation, was the object of this study. Seventy two cylindrical concrete specimens, 5 centimeters in diameter and 10 centimeters of height, were molded for three different water/cement ratios: 0.45, 0.50 and 0.5. After seven days, each mix ratio was submitted to the fire simulation test for the three temperatures and, after slow cooling, the specimens were analyzed for specific mass and appearance, and then ruptured on the eighth day. The higher the temperature at which the concrete was exposed, the lower its specific mass and, consequently, the compressive strength. For the temperature of 900 °C, its resistance was less than 25% of the original resistance. Polypropylene fibers improved the performance of the concrete to the ambient temperature and to the temperatures of 300 °C and 600 °C, reducing cracking and increasing its compressive strength. In addition, the occurrence of spalling was not observed for fiber-added concrete.

Keywords: Lightweight concrete. Fiber-reinforced concrete. Fire. Resistance to high temperatures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de concentração de tensões para um concreto simples e com reforço de fibras	26
Figura 2 - Fator de redução da resistência do concreto em função da temperatura .	28
Figura 3 - Etapas de um incêndio.....	31
Figura 4 - Temperatura em relação a profundidade da superfície de uma parede de concreto de alta resistência.....	35
Figura 5 - Efeito da temperatura na difusividade térmica do concreto	36
Figura 6 - Efeito da temperatura na condutividade térmica do concreto	37
Figura 7 - Efeito da temperatura no calor específico do concreto	38
Figura 8 - Variação da condutividade térmica em função da massa específica	40
Figura 9 - Argila expandida	45
Figura 10 - Fibras de polipropileno agrupadas	47
Figura 11 - Fibras de polipropileno separadas	47
Figura 12 - Argila expandida saturada	50
Figura 13 - Argila expandida saturada com superfície seca (SSS)	50
Figura 14 - Concreto sem adição de fibras	52
Figura 15 - Concreto com adição de fibras	52
Figura 16 - Corpos de prova moldados	53
Figura 17 - Corpos de prova na cura.....	53
Figura 18 - Mufla utilizada nos ensaios de simulação de incêndio.....	54
Figura 19 - Disposição dos corpos de prova no interior da mufla.....	57
Figura 20 – Interior da mufla com os corpos de prova a temperatura de 600°C	58
Figura 21 - Prensa EMIC.....	59
Figura 22 - Corpo de prova ensaiado a compressão	59
Figura 23 - Diferença na coloração dos corpos de prova em relação a temperatura, para o traço B sem fibras	70
Figura 24 - Diferença na coloração dos corpos de prova em relação a temperatura, para o traço B com fibras	70
Figura 25 - Corpo de prova após ruptura por spalling dentro da mufla	71
Figura 26 - Seção de ruptura por spalling	71
Figura 27 - Fissuração nos corpos de prova sem adição de fibras, em relação ao aumento da temperatura	72

Figura 28 - Fissuração nos corpos de prova com adição de fibras, em relação ao aumento da temperatura	72
Figura 29 - Corpo de prova de referência após ruptura	74
Figura 30 - Corpo de prova ensaiado a 300°C após ruptura.....	74
Figura 31 - Corpo de prova ensaiado a 600°C após ruptura.....	74
Figura 32 - Corpo de prova ensaiado a 900°C após ruptura.....	74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva padronizada de incêndio para edificação	32
Gráfico 2 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo	44
Gráfico 3 - Distribuição granulométrica do agregado leve.....	46
Gráfico 4 - Elevação da temperatura para o ensaio a 300°C	55
Gráfico 5 - Elevação da temperatura para o ensaio de 600°C	56
Gráfico 6 - Elevação da temperatura para o ensaio a 900°C	57
Gráfico 7 - Massa específica em relação ao aumento da temperatura para o traço A Fonte: autoria própria.	62
Gráfico 8 - Massa específica em relação ao aumento da temperatura para o traço B	62
Gráfico 9 - Massa específica em relação ao aumento da temperatura para o traço C	62
Gráfico 10 - Resistência a compressão em relação ao aumento da temperatura para o traço A.....	64
Gráfico 11 - Resistência a compressão em relação ao aumento da temperatura para o traço B.....	65
Gráfico 12 - Resistência a compressão em relação ao aumento da temperatura para o traço C.....	65
Gráfico 13 - Resistência a compressão em relação a massa específica para o traço A	68
Gráfico 14 - Resistência a compressão em relação a massa específica para o traço B	68
Gráfico 15 - Resistência a compressão em relação a massa específica para o traço C	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistência a compressão e massa específica aparente para concretos leves.....	23
Tabela 2 - Composição granulométrica dos agregados leves.....	24
Tabela 3 - Massa específica do agregado leve.....	24
Tabela 4 - Relações da resistência a compressão dos concretos em condições normais e submetidos a diferentes temperaturas, para massa específica normal....	28
Tabela 5 - Massa específica do agregado miúdo.....	44
Tabela 6 - Amostragem de corpos de prova.....	48
Tabela 7 - Proporção de materiais para cada traço.....	49
Tabela 8 - Consumo de material por metro cúbico de concreto.....	60
Tabela 9 - Massa específica no estado endurecido.....	61
Tabela 10 - Resistência a compressão.....	63
Tabela 11 - Relação entre resistência a compressão máxima do concreto submetido a altas temperaturas e em situação normal.....	66
Tabela 12 - Relação entre resistência a compressão máxima do concreto submetido a altas temperaturas e do concreto sem fibras em situação normal.....	66
Tabela 13 - Comparação entre a relação $f_{c\theta}/f_{ck}$ para os diferentes tipos de agregados.....	67
Tabela 14 - Quantidade de materiais para o traço A.....	87
Tabela 15 - Proporções do traço A.....	87
Tabela 16 - Quantidade de fibras para confecção do traço A.....	87
Tabela 17 - Quantidade de materiais para o traço B.....	87
Tabela 18 - Proporções do traço B.....	88
Tabela 19 - Quantidade de fibras para confecção do traço B.....	88
Tabela 20 - Quantidade de materiais para o traço C.....	88
Tabela 21 - Proporções do traço C.....	88
Tabela 22 - Quantidade de fibras para confecção do traço C.....	88
Tabela 23 - Dados complementares ao Erro! Fonte de referência não encontrada. .	92
Tabela 24 - Dados complementares ao Gráfico 2.....	92
Tabela 25 - Dados complementares ao Gráfico 6, Gráfico 7, e Gráfico 9.	93
Tabela 26 - Dados complementares à Tabela 11.....	93
Tabela 27 - Dados complementares ao Gráfico 12.....	93

Tabela 28 - Dados complementares ao Gráfico 13	94
Tabela 29 - Dados complementares ao Gráfico 14	94

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos Específicos	16
1.2 JUSTIFICATIVA	17
2. CONCRETO	19
2.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO	19
2.1.1 Propriedades do Concreto no Estado Fresco.....	19
2.1.2 Propriedades no Estado Endurecido	20
2.1.3 Massa Específica	21
2.2 TIPOS DE CONCRETO	22
2.2.1 Concreto Leve	22
2.2.1.1 Concreto leve com argila expandida	23
2.2.2 Concreto com fibras	25
2.2.3 Concreto com Fibras de Polipropileno	26
2.2.4 Concreto Em Situação De Incêndio	27
3 O FOGO	29
3.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	29
3.2 INCÊNDIO, PROPAGAÇÃO E EXTINÇÃO.....	30
4 AÇÃO DAS ALTAS TEMPERATURAS SOBRE AS ESTRUTURAS DE CONCRETO	33
4.1 DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO CONCRETO.....	34
4.2 ALTERAÇÕES MACRO E MICROESTRUTURAIS DO CONCRETO EM ALTAS TEMPERATURAS.....	35
4.2.1 Difusividade Térmica.....	36
4.2.2 Condutividade Térmica.....	37
4.2.3 Calor Específico	37
4.2.4 Massa Específica	38
4.3 EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS NOS AGREGADOS.....	39
4.3.1 Efeito das Altas Temperaturas na Argila Expandida	39
4.3.2 Efeito das Altas Temperaturas no Concreto com Fibras de Polipropileno	40

4.4 SPALLING NO CONCRETO	41
5 METODOLOGIA	42
5.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	42
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	42
5.2.1 Cimento Portland.....	43
5.2.2 Agregado Miúdo	43
5.2.3 Agregado Graúdo Leve	44
5.2.4 Água.....	46
5.2.5 Fibras de Polipropileno.....	46
5.3 AMOSTRAGEM DE CORPOS DE PROVA.....	48
5.4 DOSAGEM	49
5.5 FABRICAÇÃO, MOLDAGEM E CURA.....	50
5.6 ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO	54
5.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	58
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
7.1 CONSUMO DE MATERIAL POR METRO CÚBICO	60
7.2 MASSA ESPECÍFICA.....	60
7.3 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	63
7.4 ANÁLISE VISUAL DOS CORPOS DE PROVA.....	69
8 CONCLUSÃO	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
ANEXOS	83
ANEXO A - TEMPOS REQUERIDOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF), EM MINUTO	83
ANEXO B - BOLETIM DE ENSAIOS DE CIMENTO	84
ANEXO C - CARACTERÍSTICAS DA ARGILA EXPANDIDA.....	85
APÊNDICES	86
APÊNDICE A - TABELAS COM AS PROPORÇÕES E QUANTIDADE DE MATERIAIS PARA CADA TRAÇO CONFECCIONADO	87
APÊNDICE B - RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DO TRAÇO A	89
APÊNDICE C - RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DO TRAÇO B	90

APÊNDICE D - RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DO TRAÇO A	91
APÊNDICE E - TABELAS COMPLEMENTARES	92

1 INTRODUÇÃO

Pedroso (2009) comenta que o consumo anual de concreto no mundo é estimado em 11 bilhões de toneladas, cerca de 1,9 toneladas por habitante. O material é considerado o segundo produto mais consumido no mundo, perdendo apenas para a água e, algumas projeções indicam que o material possa assumir a primeira colocação a partir de 2025.

Tamanho utilização se justifica pelas propriedades do concreto, tanto no estado endurecido, quanto no estado fresco. Depois de endurecido, a resistência do material é similar às rochas naturais e, quando no estado fresco, tem comportamento plástico possibilitando sua moldagem em formas e dimensões variadas (PEDROSO, 2009). Outra grande vantagem do material é sua durabilidade e ao contrário da madeira e do aço comum, sua excelente resistência à água, sendo então o material ideal para utilização em estruturas de controle, estoque e transporte de água (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Ocorre, no entanto, que apesar das vantagens técnicas e econômicas, o concreto possui algumas limitações, dentre elas a elevada massa específica e a baixa resistência à tração. Em busca da solução dos principais problemas relacionados ao concreto, muitas pesquisas têm sido realizadas ao redor do mundo. A partir disso, foram sendo desenvolvidos concretos especiais, mais tecnológicos e eficientes, com a finalidade de suprir algumas necessidades que o concreto simples não atendia de forma eficaz. Dentre esses concretos chamados especiais, estão o concreto leve e o concreto com adição de fibras.

Toda edificação está sujeita a sinistros que colocam em prova sua estabilidade e resistência. No caso de incêndio, os danos gerados podem variar de simples descoloração ou mancha produzida pela fumaça, até a destruição total do edifício, proveniente da combustão total do material ou da perda de resistência de seus elementos estruturais (CÁNOVAS, 1988). Além de perdas materiais da própria edificação, os incêndios colocam em risco as edificações vizinhas e, principalmente, a vida de seus ocupantes.

Por se tratar de um sinistro, que nem sempre pode ser controlado, a maneira mais eficaz de garantir a segurança da estrutura é utilizando materiais resistentes ao

fogo. Cada material, em particular, apresenta comportamentos diferentes quando expostos a elevadas temperaturas.

O concreto apresenta boa resistência em altas temperaturas devido a sua baixa condutibilidade térmica e incombustibilidade (BRITZ e COSTA, 2011). Entretanto, o material merece atenção especial, pois cada tipo de concreto apresentará resultados diferentes quando expostos ao fogo, e isso dependerá exclusivamente dos materiais utilizados na sua constituição (BRITZ, 2011).

Neste trabalho, serão analisadas algumas das alterações das propriedades do concreto leve, com argila expandida e fibras de polipropileno, quando expostos a elevadas temperaturas, simulando o caso de incêndio.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a perda de resistência à compressão do concreto com argila expandida e fibras de polipropileno, exposto a elevadas temperaturas, e verificar a influência da adição das fibras.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Verificar o comportamento da resistência à compressão de concretos leves, com argila expandida, produzidos com diferentes níveis de resistência, após exposição às temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C, durante período de 90 minutos;
- Verificar se fibras de polipropileno, adicionadas ao concreto leve, com argila expandida, em teores de 0,5% em volume de concreto, produzem efeitos significativos no comportamento da resistência à compressão, após exposição às temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C, durante período de 90 minutos;
- Determinar a resistência residual das misturas de concreto, com e sem fibras de polipropileno, na idade de 8 dias, após exposição às temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C, durante período de 90 minutos;
- Analisar a perda de massa nas peças de concreto após a exposição às temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C;

- Analisar alterações possíveis de serem identificadas visualmente;
- Constatar a influência da adição das fibras de polipropileno no concreto, em relação ao desempenho perante as elevadas temperaturas.

1.2 JUSTIFICATIVA

O concreto leve apresenta-se como um material de construção consagrado no mundo, com aplicações em diferentes áreas da construção civil. Por ser um material que vem ganhando maior visibilidade no mercado construtivo, é necessário saber mais sobre seu comportamento em situações peculiares.

Sabe-se que as propriedades macro e microestruturais do concreto são modificadas quando exposto a elevadas temperaturas. Portanto, conhecer as mudanças que ocorrem nas propriedades do concreto em diferentes níveis de temperatura, é essencial para avaliar as propriedades residuais desse material após incêndio, por exemplo.

O diferencial deste trabalho é o tipo de concreto especial escolhido, pois existem estudos do concreto com adição de fibras poliméricas após exposição a elevadas temperaturas, ou estudos de concreto leve com argila expandida após exposição a elevadas temperaturas, mas sem a utilização dos dois materiais em conjunto. Por haver pouco material sobre este tipo de concreto, foram utilizados dados de estudos com concreto convencional, concreto leve e concreto com adição de fibras, como parâmetros para os ensaios.

Com o objetivo de verificar o comportamento do concreto leve com argila expandida, em diferentes níveis de resistência, foram escolhidas três relações água/cimento para produção do concreto, com a finalidade de observar a influência das elevadas temperaturas para misturas diferentes, com resistências diferentes. Essas relações foram escolhidas com a intenção de extrair o máximo de desempenho do material. Por ser um concreto especial e de custo mais elevado, torna-se viável a utilização em estruturas que necessitam de resistências mais elevadas.

A escolha do concreto leve com argila expandida e adição de fibras, se deu, pois, a argila expandida possui propriedades como: baixa densidade, elevada porosidade interna, elevada resistência ao fogo e boa resistência à compressão que, além de garantirem a baixa massa específica do material, oferecem melhor

desempenho perante as elevadas temperaturas. A adição das fibras de polipropileno se baseia no fato de que elas possuem baixa temperatura de fusão, e quando expostas às temperaturas de estudo, derretem criando caminhos para a saída dos vapores de água do concreto em alta temperatura. Com isso, reduzem as tensões internas, principalmente às de tração, diminuindo a probabilidade de ocorrência de deslocamento (BRITZ e COSTA, 2011).

Além disso, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Pato Branco, tem disponível a argila expandida e as fibras de polipropileno, assim como existe, no curso de engenharia mecânica, uma mufla (forno para a elaboração dos ensaios a elevadas temperaturas), em dimensões compatíveis com as adotadas para os corpos de prova de concreto, tornando viável o estudo.

2. CONCRETO

Segundo a ABNT NBR 12655 - Concreto de cimento Portland – preparo, controle e recebimento – procedimentos (ABNT, 2006), o concreto é o material resultante da mistura homogênea de cimento, agregados e água, com ou sem a incorporação de aditivos. Amplamente utilizado em todo o mundo devido suas propriedades tanto no estado fresco, quando no endurecido.

Apesar de ser um material menos resistente e tenaz que o aço, é mais utilizado na engenharia devido sua durabilidade e capacidade de resistir à ação da água, sem apresentar deteriorações preocupantes (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Outra vantagem de sua utilização é a possibilidade de adicionar o aço ao elemento estrutural.

2.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO

O conhecimento sobre as propriedades do concreto é o resultado de experiências práticas, que fornecem explicações sobre como e porque o material se altera influenciado por outros fatores (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Diferentes tipos de concreto possuem diferenças também em suas propriedades, variando em função de seus materiais constituintes e da proporção utilizada de cada um deles. Além disso, são separadas em duas etapas, caracterizadas pelo estado em que a mistura se encontra: propriedades no estado fresco, e propriedades no estado endurecido.

2.1.1 Propriedades do Concreto no Estado Fresco

Duas das principais propriedades do concreto no estado fresco é a plasticidade e a trabalhabilidade, que conferem facilidade na mistura, transporte, lançamento, moldagem, adensamento e acabamento de elementos estruturais, em formas e dimensões variadas (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Em seu estado fresco, destaca-se a necessidade de evitar a segregação dos materiais, caracterizada pela separação de seus materiais constituintes. Quando ela ocorre, o material deixa de ter distribuição uniforme de seus componentes e, conseqüentemente depois de endurecido, as tensões também não serão distribuídas

de formas iguais, afetando a resistência do concreto. Esse fenômeno é facilmente observado, em concretos que utilizam materiais muito leves ou muito pesados, como concretos com agregados leves, ou quando o lançamento e adensamento não são realizados de forma adequada.

A pega do concreto é uma propriedade definida como o início da solidificação da mistura, após a hidratação do cimento, promovida pelas reações químicas entre o cimento e a água. Possui dois pontos característicos: o início e o fim de pega. O início de pega é caracterizado pelo limite de manuseio do material, momento a partir do qual este não pode mais ser misturado, lançado e compactado. Enquanto o fim de pega é, o ponto a partir do qual a mistura começa a desenvolver resistência, aumentando a uma taxa considerada fixa (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.1.2 Propriedades no Estado Endurecido

A resistência é a mais importante propriedade do concreto endurecido e, conseqüentemente, a mais valorizada pelos engenheiros. Segundo Mehta e Monteiro (1994, p.11) “[...] é a medida da tensão exigida para romper o material”. Está relacionada com o processo de hidratação do cimento Portland e possui relação fundamental com a porosidade, tanto da mistura em si, quanto dos agregados utilizados na mistura. A resistência à compressão é uma propriedade importante dado que várias outras propriedades do concreto podem ser correlacionadas com ela, tais como: resistência à tração, módulo de elasticidade e resistência ao cisalhamento. Além disso, a resistência tem, ainda que indiretamente, relação com a durabilidade, dado que para obter-se elevada resistência é indispensável produzir concreto com baixa porosidade, proporcionando aumento na sua durabilidade.

O módulo de elasticidade de um material é a relação entre a tensão e a deformação relativa. É uma propriedade importante do concreto, sendo empregada na etapa de dimensionamento das estruturas devido sua influência nas flechas das peças sujeitas a flexão, que devido às deformações deixam a peça susceptível ao surgimento de fissuras.

A vida útil é a medida do tempo em que se deseja que a estrutura apresente desempenho satisfatório, mantendo suas características, sem grandes intervenções. Depende das especificações de projeto, sendo possível definir diferentes vidas úteis de projeto a depender da relevância do mesmo. Barragens, pontes, túneis e obras

especiais, são projetadas para uma vida útil maior que das edificações, sendo no mínimo de 100 anos.

A durabilidade das estruturas de concreto armado está condicionada ao seu desempenho em serviço. Por essa razão, as estruturas são dimensionadas para atender aos estados limites de serviço e ao estado limite último. As especificações de projeto devem levar em consideração as condições a que a estrutura será exposta durante a sua vida útil de projeto, os critérios e procedimentos de execução e, procedimentos de uso e manutenção adotados durante a referida vida útil de projeto.

É importante ressaltar a importância da qualidade do concreto de cobrimento, bem como a espessura adotada para o cobrimento de armadura, uma vez que essas variáveis produzem significativo impacto na durabilidade das estruturas de concreto armado.

A permeabilidade do concreto depende das proporções da mistura, da compactação, da cura e da porosidade dos agregados utilizados na composição da mistura (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2011). Concretos impermeáveis apresentam maior durabilidade a longo prazo (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.1.3 Massa Específica

A massa específica está diretamente ligada a várias outras propriedades do concreto, tais como: porosidade, resistência e durabilidade. A massa específica do concreto é a relação entre a massa do concreto e o volume por ele ocupado. Pode ser determinada tanto no estado fresco, quanto no endurecido.

O tipo e a quantidade de agregados graúdos e miúdos utilizados na produção do concreto são as variáveis que mais afetam o valor da massa específica do concreto, não obstante, fibras de aço podem aumentar ainda mais esses valores.

Entretanto, alguns fatores causam consideradas variações na massa específica do concreto, como o aumento da temperatura. A perda de água da peça se intensifica a medida que aumenta a temperatura a que o concreto está exposto. Para temperaturas em torno dos 100°C começa a evaporação da água livre e a perda de massa por evaporação da água do concreto. Entre 200°C e 300°C a perda da água livre e adsorvida, que está na superfície dos sólidos da pasta, é completa, sem afetar consideravelmente a resistência do concreto. A partir desses valores, identifica-se o início da perda da água quimicamente combinada, diminuindo significativamente a

resistência e aumentando a fissuração no material. Conseqüentemente a massa da peça seca diminui, influenciando diretamente no valor da massa específica (CÁNOVAS, 1988).

2.2 TIPOS DE CONCRETO

O concreto convencional de cimento Portland, água e agregados (grãos e miúdos), apresenta deficiências que desfavorecem sua utilização em determinadas estruturas. Na busca de superar essas deficiências e potencializar algumas de suas propriedades, novas tecnologias e materiais foram aplicados ao concreto, resultando no desenvolvimento dos concretos especiais.

2.2.1 Concreto Leve

A NBR 12655 (ABNT, 2006. p. 3), define concreto leve como “concreto endurecido que, quando seco em estufa, apresenta massa específica maior do que 800 kg/m^3 , mas não excede 2800 kg/m^3 ”. Os concretos leves são caracterizados pela redução da massa específica, consequência da substituição de parte dos materiais sólidos do concreto por ar e podem ser classificados em concreto com agregados leves, concreto celular e concreto sem finos (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2011).

Sua principal função é a redução do peso próprio da estrutura e, conseqüentemente, dos esforços atuantes sobre ela. Com isso, ocorre a diminuição da seção dos elementos estruturais, bem como das fôrmas e cimbramento. Segundo Mehta e Monteiro (1994), o peso específico do concreto leve é cerca de dois terços do peso específico de concretos confeccionados com agregados típicos.

O concreto estrutural com agregado leve deve atender aos valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias, para cada massa específica aparente, expressos no Tabela 1, de acordo com a NM 35 – Agregados leves para concreto estrutural – Especificação (ANM, 1995).

Tabela 1 - Resistência à compressão e massa específica aparente para concretos leves

Resistência a compressão aos 28 dias (Mpa) (Valores mínimos)	Massa específica (kg/m³) (Valores máximos)
28	1840
21	1760
17	1680

Fonte: NM 35,1995.

A norma ASTM C 330-77 - *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete* (ASTM, 1991) estabelece que, para o concreto leve ser classificado como concreto leve estrutural, deve apresentar valores de massa específica entre 1400 kg/m³ e 1800 kg/m³ e resistência à compressão aos 28 dias superior a 17 MPa.

2.2.1.1 Concreto leve com argila expandida

A NM 35 (ANM, 1995) separa os agregados leves para o concreto em agregados constituídos por materiais naturais ou, agregados preparados por expansão, calcinação ou sinterização. A argila expandida é um agregado leve de origem cerâmica, preparado pela queima da argila natural em fornos rotativos, a temperaturas de até 1250°C, com aditivos piro-expansivos (CINEXPAN). Possui forma arredondada regular, variação na sua granulometria e uma camada envoltória de baixa permeabilidade, que impede a absorção excessiva de água, como a que ocorre em agregados leves fabricados por sinterização (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2011).

Além da condição da superfície do agregado, sua umidade, porosidade e conectividade entre poros, também são relevantes na elaboração do concreto, pois estão associadas à sua elevada absorção de água, que afeta a trabalhabilidade e, principalmente, altera a relação água/cimento da mistura. Por esse motivo, concretos com argila expandida necessitam de mais cimento para oferecer boa resistência, tornando o metro cúbico desse concreto mais caro. Entretanto, aumentar demasiadamente a resistência da matriz de cimento, não garante que a resistência do concreto leve com argila expandida será maior, pois as partículas do agregado são fracas e não resistem a elevadas cargas, rompendo em direção normal a aplicação desta (SOUSA JUNIOR et al. 2016).

Outras vantagens provenientes de sua leveza se mostram de forma a compensar a desvantagem do preço do produto, como: redução do custo em fôrmas

e cimbramento; redução do peso próprio da estrutura e do peso no solo; aumento na produtividade da execução dos serviços e redução nos custos com transporte, devido a leveza do material (SOUSA JUNIOR et al. 2016).

Para utilização da argila expandida como agregado leve no concreto, o material deve atender alguns requisitos exigidos pela NM 35 (ANM, 1995). A composição granulométrica do agregado leve deve estar dentro dos limites expressos na Tabela 2, e a massa específica aparente deve obedecer aos limites da Tabela 3, de acordo com sua faixa granulométrica.

Tabela 2 - Composição granulométrica dos agregados leves

Graduación del agregado		Porcentaje, en masa, acumulado en tamices de malla cuadrada								
Gradação do agregado		Porcentagem, em massa, acumulada em peneiras de malha quadrada								
Faixa	Dimensión Dimensão mm	25 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	300µm	150µm
1	12,5 a 0	-	0	0 - 5	-	20 - 50	-	-	80 - 95	85 - 98
2	9,5 a 0	-	-	0	0 - 10	10 - 35	35 - 65	-	75 - 90	85 - 95
3	4,75 a 0	-	-	-	0	0 - 15	-	20 - 60	65 - 90	75 - 95
4	25 a 12,5	0 - 5	-	90 - 100	-	-	-	-	-	-
5	25 a 4,75	0 - 5	-	40 - 75	-	90 - 100	-	-	-	-
6	19 a 4,75	0	0 - 10	-	40 - 80	90 - 100	-	-	-	-
7	12,5 a 4,75	-	0	0 - 10	20 - 60	80 - 100	90 - 100	-	-	-
8	9,5 a 2,36	-	-	0	0 - 20	60 - 95	80 - 100	-	-	-

Fonte: NM 35: 1995.

Tabela 3 - Massa específica do agregado leve

Graduación del agregado	Densidad aparente máxima del agregado en el estado seco y suelto
Gradação do agregado (faixa)	Massa específica aparente máxima do agregado no estado seco e solto kg/m³
1 e 2	1 040
3	1 120
4, 5, 6, 7 e 8	880

Fonte: NM 35: 1995.

Para o ensaio de abatimento *slump test*, o concreto leve apresenta abatimento menor que o concreto tradicional, produzido nas mesmas condições de dosagem, porém com mesma trabalhabilidade (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2011).

De acordo com Rossignolo e Agnesini (2011), para a produção de concreto leve estrutural a argila expandida pode ser adicionada na mistura com a umidade natural,

sem a necessidade de saturação prévia, indicada para agregados leves que apresentam altos valores de absorção de água. Entretanto, para a NBR 12821 – Preparação de concreto em laboratório (ABNT, 1993) a argila expandida deve ser utilizada após sua saturação. Deve-se levar em consideração também, a relação água/cimento, o teor de argamassa e de argila expandida, para evitar a flutuação do agregado leve e garantir a resistência e durabilidade da estrutura.

2.2.2 Concreto com fibras

As fibras são materiais descontínuos caracterizados por apresentar seção transversal bem menor que o comprimento, onde o material de constituição define seu módulo de elasticidade e resistência mecânica. Tais propriedades são as principais levadas em consideração para aplicação em concretos estruturais. Concretos com adição de fibras são também definidos como compósitos, pois são constituídos de duas fases principais: a matriz de concreto e as fibras. (FIGUEIREDO, 2011).

O concreto apresenta naturalmente inúmeras microfissuras provenientes das reações químicas da hidratação do cimento, chamadas de fissuras plásticas, e sua rápida propagação é a responsável pela limitação da resistência mecânica a tração do material (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Mehta e Monteiro (1994) afirmam que o rompimento de peças de concreto submetidas a esforços de tração, ocorre devido a união de fissuras e não pela quantidade delas, como ocorre no rompimento de peças comprimidas. As fissuras atrapalham a distribuição uniforme das tensões dentro da peça, por ocasionarem desvios das chamadas linhas de tensões. Com isso, ocorrem acúmulos de tensões nas extremidades das fissuras, aumentando seu tamanho e velocidade de propagação, até levar a ruptura do material. As fibras atuam como ponte de transferência de tensões nas fissuras, contribuindo na distribuição uniforme das linhas de tensão, como mostra a Figura 1. Conseqüentemente, haverá um acréscimo de resistência à tração, seja ela pura, ou por esforços de flexão (FIGUEIREDO, 2011).

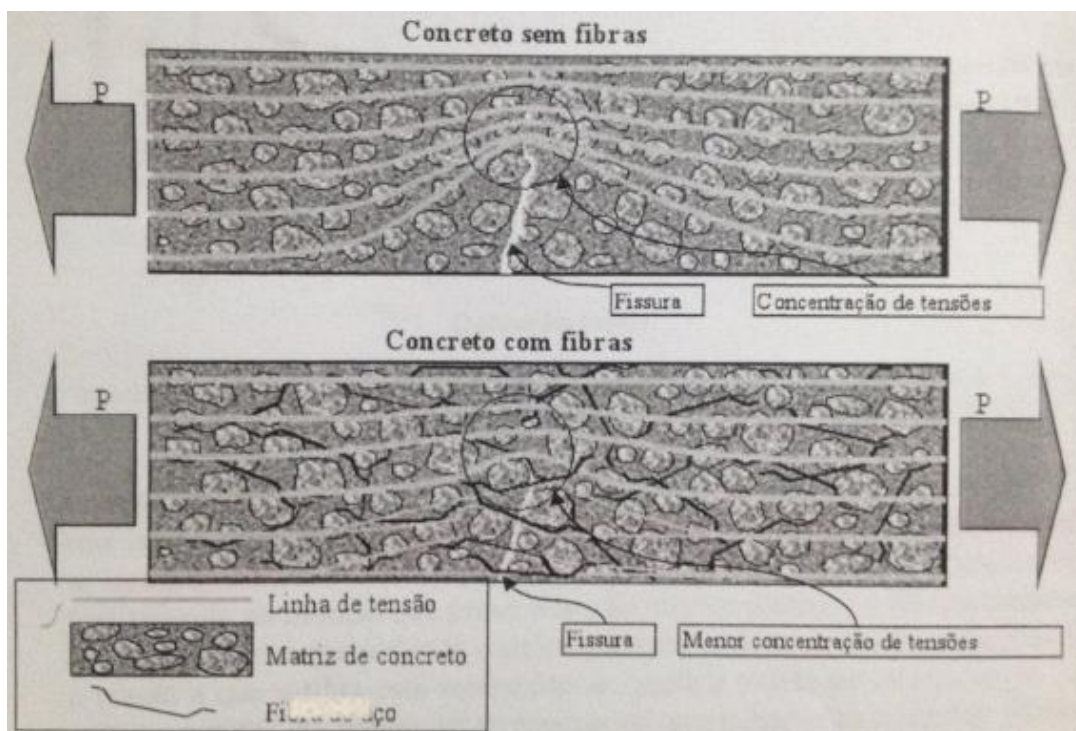


Figura 1 - Esquema de concentração de tensões para um concreto simples e com reforço de fibras
 Fonte: adaptada de FIGUEIREDO, 2011.

2.2.3 Concreto com Fibras de Polipropileno

De acordo com Rodrigues e Montardo (2002, p.9) “[...] o concreto e as fibras de polipropileno são materiais que se complementam porque ao serem combinados formam um material mais completo e versátil”. Muitas são as vantagens de sua utilização em estruturas de concreto, observadas tanto no estado plástico quanto no endurecido.

Para o estado plástico a presença de fibras na mistura do concreto impede a exsudação, pois sustenta o agregado, fornecendo resistência ao assentamento do agregado graúdo convencional, bem como impede a segregação de agregados leves utilizados na confecção de concreto leve estrutural. Além disso, devido ao aumento de resistência à tração, proporcionado com a adição das fibras, auxiliam na redução da fissuração por retração plástica (RODRIGUES E MONTARDO, 2002).

Em consequência, na redução da fissuração do concreto nas primeiras idades, o concreto reforçado com as fibras de polipropileno deixa de ser extremamente frágil. O reforço proporcionado pelas fibras de polipropileno também está relacionado à sua distribuição aleatória no material, reforçando toda a peça.

Tanesi e Figueiredo (1999) verificaram em seus estudos que houve redução na fissuração por retração plástica com teores de fibras a partir de 0,1% em volume de concreto. Entretanto, teores acima de 0,5% (4,5 kg/m³) comprometem o adensamento do concreto, e não proporcionam maiores aumento na resistência. Dessa forma, para obtenção de concretos mais resistentes, recomenda-se a redução da relação água/cimento, ao invés de utilizar altos teores de fibras de polipropileno.

A fundamental vantagem da utilização de fibras de polipropileno em estruturas de concreto leve estrutural é a baixa densidade, associado ao fato de não interferirem na modelagem das peças desejadas. As fibras de polipropileno dividem-se em macrofibras e microfibras, onde as microfibras podem se apresentar na forma de monofilamentos ou na estrutura de malhas (GORNINSKI, 2011).

2.2.4 Concreto Em Situação De Incêndio

De acordo com a NBR 15200 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio (ABNT, 2004), os principais objetivos de garantir a segurança de estruturas contra incêndio são: limitar o risco à vida, risco da vizinhança e da propriedade exposta ao fogo. Para alcançar esses objetivos, uma estrutura de concreto deve demonstrar função corta-fogo, ou seja, não deve permitir que o fogo ou o calor, ultrapassem a estrutura de forma a gerar combustão no lado oposto e deve exercer função de suporte, de forma a evitar o colapso da estrutura.

A NBR 15200 estabelece a relação entre resistência à compressão do concreto submetido a diferentes temperaturas e a resistência característica a compressão do concreto em situação normal (temperatura ambiente) e também a relação entre os módulos de elasticidade, de acordo com a Tabela 4. Entretanto, essa relação é válida apenas para concretos com massa específica normal, entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³.

Tabela 4 - Relações da resistência à compressão dos concretos em condições normais e submetidos a diferentes temperaturas, para massa específica normal

Temperatura do concreto, θ °C	Agregado silicioso		Agregado calcáreo	
	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$E_{c,\theta}/E_c$	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$E_{c,\theta}/E_c$
1	2	3	4	5
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
1 000	0,04	0,00	0,06	0,00
1 100	0,01	0,00	0,02	0,00
1 200	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: NBR 15200, 2004.

Traçando um gráfico da redução da resistência do concreto em função da temperatura, conforme apresentado na Tabela 4, tem-se a curva da Figura 2.

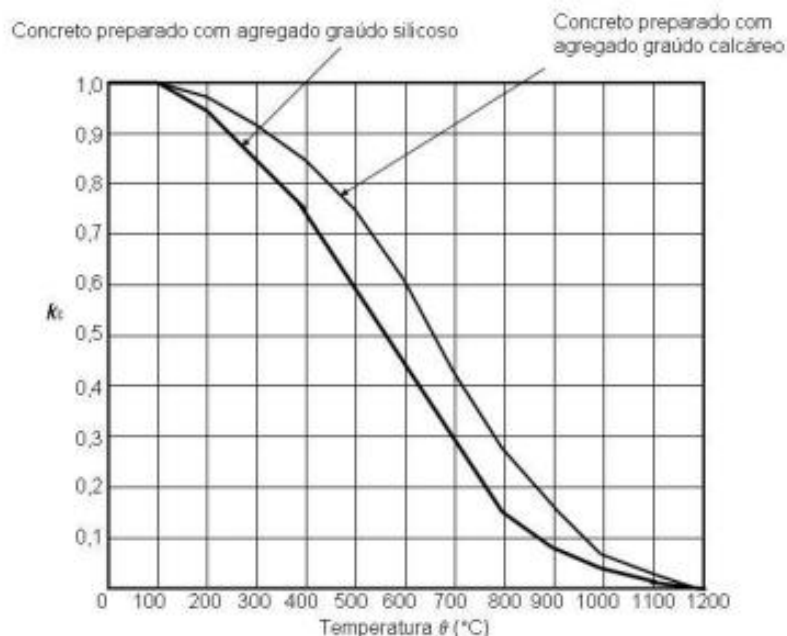


Figura 2 - Fator de redução da resistência do concreto em função da temperatura

Fonte: NBR 15200, 2004.

3 O FOGO

De acordo com a definição da NBR 13860 - Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio (ABNT, 1997. p. 6), fogo é o “processo de combustão caracterizado pela emissão de luz”. Para que isso ocorra, quatro fatores são essenciais: calor, comburente, combustível e reação em cadeia.

O calor tem a função de dar ignição ao fogo, que necessita de um material combustível para sua propagação e do comburente (oxigênio) para a combustão. Entretanto, esses três fatores ocorrendo aleatoriamente não são suficientes para iniciar o fogo, necessitando então de uma reação em cadeia, que é o quarto elemento do tetraedro do fogo, responsável por tornar o processo autossustentável.

3.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Calor é a energia transferida entre dois sistemas com temperaturas diferentes (HALLIDAY, 2009). São consideradas como maneiras de transferência de calor entre sistemas: condução, convecção e radiação.

Quando dois materiais com diferentes temperaturas se encostam, e o material que possuía menor temperatura começa a apresentar um aumento desta, ocorre o processo de transferência de calor por condução. Os elétrons e átomos do material com maior temperatura estão em vibração, e a energia associada a essas vibrações é transferida ao outro material através da colisão dos átomos, aumentando gradativamente sua temperatura até o equilíbrio térmico (HALLIDAY, 2009).

A transferência de calor por convecção ocorre quando um fluido, geralmente ar e água, funciona como elemento de transporte de calor para um material com temperatura inferior. O fluido entra em contato com um elemento mais quente, como o fogo, e se expande tornando-o mais leve. Com isso o fluido quente tende a subir carregando a energia que será transferida ao material com menor temperatura (HALLIDAY, 2009).

Ondas eletromagnéticas também é uma forma de transferência de calor, denominada radiação. As ondas de radiação térmica são capazes de transportar calor de um sistema com maior temperatura, para outro com menor temperatura que esteja próximo, sem que haja a necessidade de fluido entre os dois. O aquecimento da Terra

pela irradiação solar é um exemplo dessa forma de transferência de calor, pois o calor do Sol é transferido até a Terra através do vácuo.

3.2 INCÊNDIO, PROPAGAÇÃO E EXTINÇÃO

Incêndio é definido como fogo fora de controle, que consome material que não estava destinado a este fim, geralmente causando prejuízos ou deixando vítimas (NPT 003, 2014). Pode ter origens distintas, como curto circuito em rede elétrica ou em equipamentos eletrônicos, raio, fagulhas transportadas pelo vento, acidentes domésticos com fogo, além das origens criminosas, quando o incêndio é iniciado propositalmente.

A propagação de um incêndio pode se dar através das três formas de transferência de calor citadas anteriormente, além do contato direto com o fogo. Independente do meio de propagação necessita-se de comburente e material combustível para que o fogo se alastre. A velocidade de propagação é função da quantidade de combustível disponível e do calor de combustão, que varia de acordo com o material.

A NPT 003 - Terminologia de segurança contra incêndio (2014. p. 22) define extinção de incêndio como a “redução drástica da taxa de liberação de calor de um incêndio e prevenção de seu ressurgimento [...]” e pode se dar pela eliminação do material combustível, por abafamento ou arrefecimento. O abafamento elimina o fornecimento de comburente ao sistema, impedindo que o oxigênio entre em contato com o material incendiado, enquanto o arrefecimento limita a transferência de calor geralmente utilizando água, que resfria o combustível até temperatura menor que a temperatura de combustão.

Considerando que incêndios geralmente tem início em pequenas proporções, propagando-se de acordo com a quantidade e as propriedades do material combustível, a variação da temperatura pode ser representada por uma curva que apresenta três estágios separados por dois pontos: *flashover* e temperatura máxima (Figura 3).

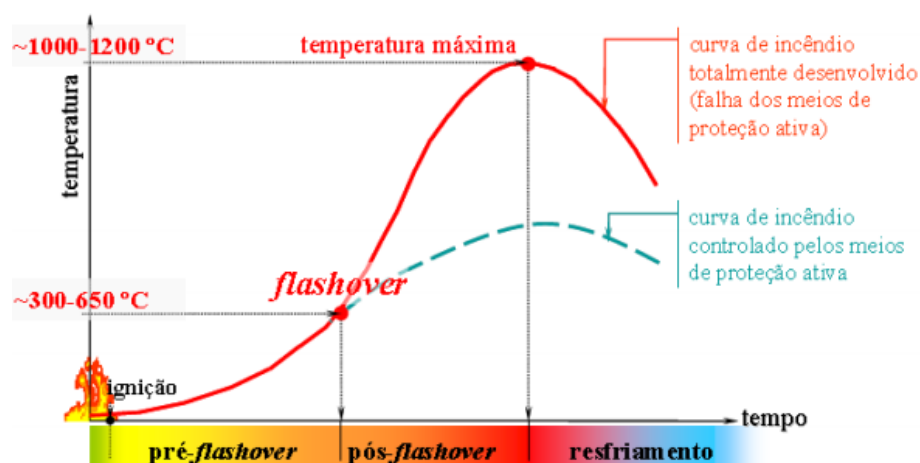


Figura 3 - Etapas de um incêndio
Fonte: COSTA, 2008.

A etapa inicial de um incêndio é a de ignição ou *pré-flashover*, onde ocorre aumento gradativo da temperatura até o ponto chamado *flashover*. Dá início então, a etapa de aquecimento ou *pós-flashover*, em que todo o combustível disponível está em chamas até a temperatura máxima do incêndio ser atingida. Não havendo mais combustível para o fogo se alimentar, começa a fase de resfriamento (BRITZ e COSTA, 2011).

Para ensaios de simulação de incêndio em laboratório, a ISO 834 *Fire resistance tests – Elements of building construction -- Part 11: Specific requirements for the assessment of fire protection to structural steel elements* (2014) recomenda a equação padronizada do aumento da temperatura em um incêndio ocasionado em edificações, representada pela Equação 1.

$$T - T_0 = 345 \cdot \log_{10} (8t + 1) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

t = tempo em minutos a contar do início do ensaio;

T = temperatura do forno em °C no instante “ t ”;

T_0 = temperatura inicial do forno em °C;

Da equação, encontra-se a curva padronizada de simulação de incêndio, plotada no Gráfico 1.

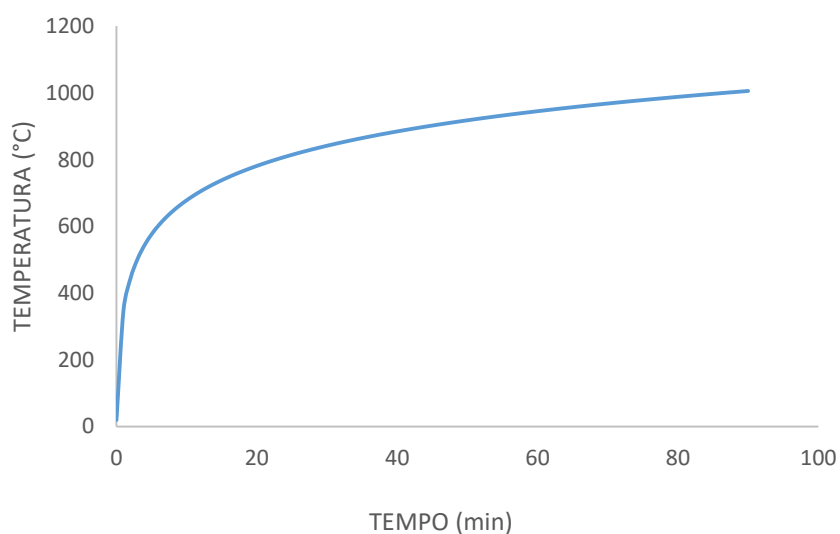


Gráfico 1 - Curva padronizada de incêndio para edificação
Fonte: ISO 834-11, 2014.

A curva padrão é adotada em ensaios experimentais de forma a padronizar os testes, e fornecer possibilidade de análise e comparação de resultados. A NBR 15200 (ABNT, 2004) considera a temperatura adotada para T_0 como 20°C.

A NBR 14432 - Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento (ABNT, 2000), traz uma tabela de Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF), em minutos, de acordo com a ocupação e a altura da edificação, presente no ANEXO A.

4 AÇÃO DAS ALTAS TEMPERATURAS SOBRE AS ESTRUTURAS DE CONCRETO

Devido as características de incombustibilidade e baixa condutibilidade térmica, o concreto é um material estrutural que apresenta boa resistência a ação do calor por longos períodos de tempo sem colapsar. Entretanto, ocorrem efeitos na macro e microestrutura do concreto endurecido que podem acarretar em danos nas estruturas. Na microestrutura, os efeitos iniciam com microfissuração, que causa redução considerável da resistência e do módulo de elasticidade do material. A resistência mecânica a compressão dos concretos reduz aproximadamente 25% quando atinge temperaturas próximas aos 300°C, e cerca de 75% para temperaturas em torno dos 600°C. Macroestruturalmente o calor reduz a resistência a abrasão do concreto, promove a propagação das fissuras e ocasiona o deslocamento, também chamado *spalling* (BRITTEZ e COSTA, 2011).

A diminuição da resistência se dá pela redução de sua massa específica através da perda por evaporação da água combinada, água livre e água adsorvida presentes no concreto. Contudo, devido a necessidade de grande quantidade de calor para transformação do estado físico da água, de líquida para vapor, o concreto só sofrerá aumento de temperatura após toda água evaporável ser removida (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Cánovas (1988. p. 181) afirma que “se a temperatura do concreto não ultrapassa os 500°C, este pode sofrer uma reidratação posterior que pode fazê-lo recuperar até 90% de sua resistência inicial após um ano”. Taylor (1990) explica esse fenômeno através de reações químicas que ocorrem na pasta de cimento para valores pontuais de temperatura, que pode ser verificado no Quadro 1.

Quadro 1 – Transformações sofridas por pastas de cimento durante o aquecimento

TEMPERATURA (°C)	TRANSFORMAÇÕES
20 - 80	Processo de hidratação acelerado, com perda lenta de água capilar e redução das forças de coesão
100	Marco no aumento da permeabilidade a água
80 - 200	Aumento na taxa de perda d'água capilar e fisicamente combinada
80 - 250	Perda da água quimicamente combinada
150	Pico do primeiro estágio de decomposição do C-S-H
300 +	Marco no aumento da porosidade e micro-fissuras
350	Decomposição de alguns tipos de agregados de rio
374	Ponto crítico da água, acima do qual não existe água livre
400 - 600	Dissociação do C-S-H em CaO e água
573	Transformação de fase α para β dos agregados quartzosos e ligeira expansão
550 - 600 +	Marco no aumento dos efeitos térmicos
700 +	Dissociação do CaCO ₃ em CaO e CO ₂ (pasta e agregados carbonáticos)
720	Segundo pico da decomposição do C-S-H em α - C ₂ S e β - CS
800	Modificação das ligações químicas, com substituição da estrutura hidráulica por uma estrutura cerâmica
1060	Começo do derretimento de alguns constituintes

Fonte: LIMA, 2005.

A gravidade dos danos causados na estrutura depende de fatores relacionados a mistura, como tipo de agregado, teor de umidade e porosidade do concreto, e relação água/cimento. Condições a que a peça está sujeita também são de extrema importância, como a tensão a que estará submetida durante o incêndio e a relação superfície/volume, variáveis que não serão consideradas nessa pesquisa. Cada um desses fatores influencia, especificamente, na distribuição da temperatura no interior da peça de concreto (BRITZ e COSTA, 2011).

4.1 DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO CONCRETO

Inicialmente o calor do fogo incide sobre o concreto sendo transferido por convecção e irradiação. No interior do concreto a distribuição das temperaturas se dá por condução. A intensidade da condução depende essencialmente das dimensões do elemento estrutural, dos materiais utilizados na composição da mistura e de algumas propriedades do concreto, consequência da proporção de cada um desses

materiais. A porosidade, relação água/cimento, idade, teor de umidade e densidade, são os fatores que causam maior influência (BRITZ e COSTA, 2011).

Ongah, Mendis e Sanjayan (2002) elaboraram um gráfico para representar a variação da temperatura no interior de uma peça de concreto, em função da profundidade da superfície de uma parede de concreto de alta resistência, com uma das faces exposta ao fogo, e pode ser observado na Figura 4.

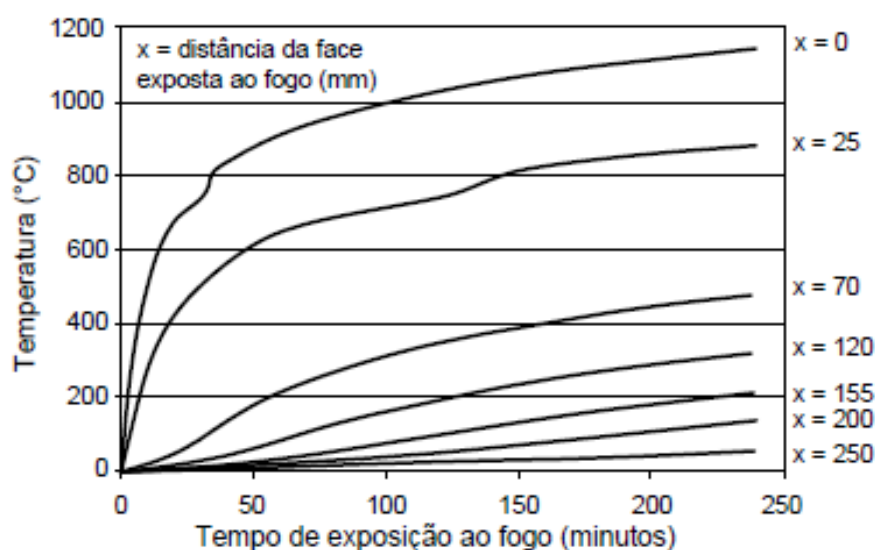


Figura 4 - Temperatura em relação a profundidade da superfície de uma parede de concreto de alta resistência

Fonte: ONGAH, MENDIS e SANJAYAN, 2002.

4.2 ALTERAÇÕES MACRO E MICROESTRUTURAIS DO CONCRETO EM ALTAS TEMPERATURAS

O comportamento macro e microestrutural do concreto em altas temperaturas dependem basicamente de seus materiais constituintes, e da proporção utilizada de cada um deles na dosagem. Britz e Costa apontam que até os 300°C, a pasta de cimento se expande, mas com a perda de água pela evaporação ela começa a contrair, enquanto os agregados continuam se expandindo. Essa variação volumétrica gera tensões resultantes no material, provocando a fissuração e o deslocamento, que resultam na perda de resistência mecânica.

4.2.1 Difusividade Térmica

A difusividade térmica “[...] fornece a medida da taxa de fluxo de calor sob condições térmicas transientes e, conseqüentemente, a facilidade com que o concreto suporta as mudanças de temperatura” (BRITZ e COSTA, 2011. p. 1042). É ela que determina a propagação do calor no interior de um material em função das suas propriedades.

O aumento da temperatura no concreto diminui o fluxo de calor no seu interior, pois com temperaturas já elevadas o material apresenta maior resistência para aumentá-la ainda mais, caracterizando o decréscimo da difusividade térmica (BRITZ e COSTA, 2011). Essa influência da temperatura pode ser visualizada na Figura 5.

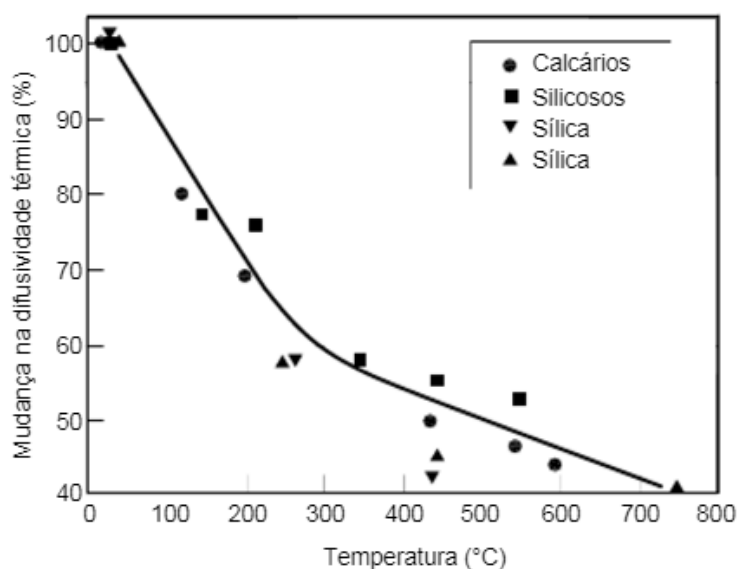


Figura 5 - Efeito da temperatura na difusividade térmica do concreto
Fonte: BRITZ E COSTA, 2011.

A composição mineralógica e a estrutura dos agregados também influenciam na difusividade térmica. Materiais diferentes apresentam maior ou menor resistência a alteração da temperatura. A argila expandida por ser um material mais poroso apresenta difusividade térmica menor que a brita, material aplicado em concretos convencionais e que permite maior fluxo de calor em seu interior. A facilidade do fluxo de calor é o que causa aumento na temperatura do agregado e, conseqüentemente, da peça de concreto (BRITZ e COSTA, 2011).

4.2.2 Condutividade Térmica

De acordo com Brites e Costa (2011), condutividade térmica a taxa de transferência de calor no interior do concreto e, assim como a difusividade térmica, decresce com o aumento da temperatura. Para temperaturas até 100°C a umidade do concreto possui grande influência, pois o valor de condutividade térmica da água é maior que do ar, no caso de os vazios não estarem preenchidos por água.

Na Figura 6 pode ser observado que a partir dessa temperatura há diminuição no valor da condutividade térmica do concreto, devido a evaporação da água livre (BRITTEZ e COSTA, 2011).

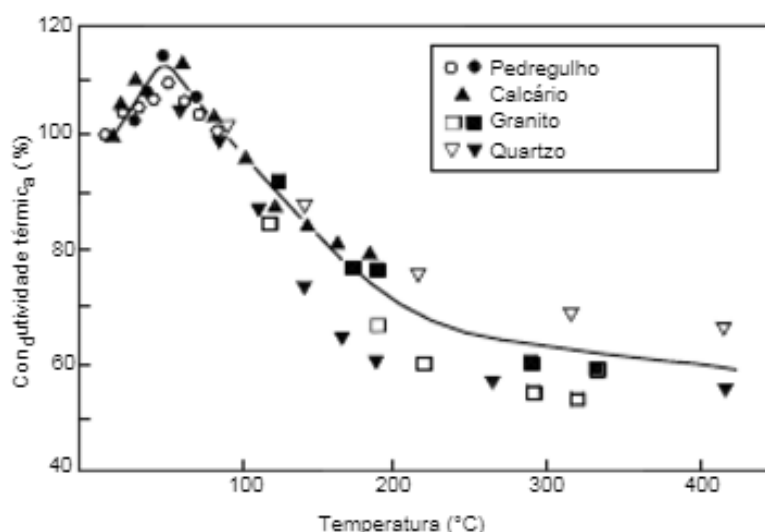


Figura 6 - Efeito da temperatura na condutividade térmica do concreto
Fonte: FIB, 2007.

No contexto do concreto escolhido no estudo desse trabalho, a CEB (1982) afirma que os concretos leves apresentam maiores reduções da condutividade térmica que os concretos de massa específica normal, pelo fato da argila expandida apresentar menor valor de condutividade térmica que os agregados graúdos convencionais.

4.2.3 Calor Específico

É descrito pela variação térmica de determinado material quando recebe certa quantidade de calor. Como nas outras propriedades, o calor específico do concreto sofre influência do teor de umidade, pois a água apresenta grande valor de calor

específico. Entretanto, os agregados utilizados na mistura apresentam pequenas variações de calor específico ao decorrer do aumento da temperatura, resultando também em pequenas variações da estrutura de concreto em si, como pode ser observado na Figura 7 (BRITZ e COSTA, 2011).

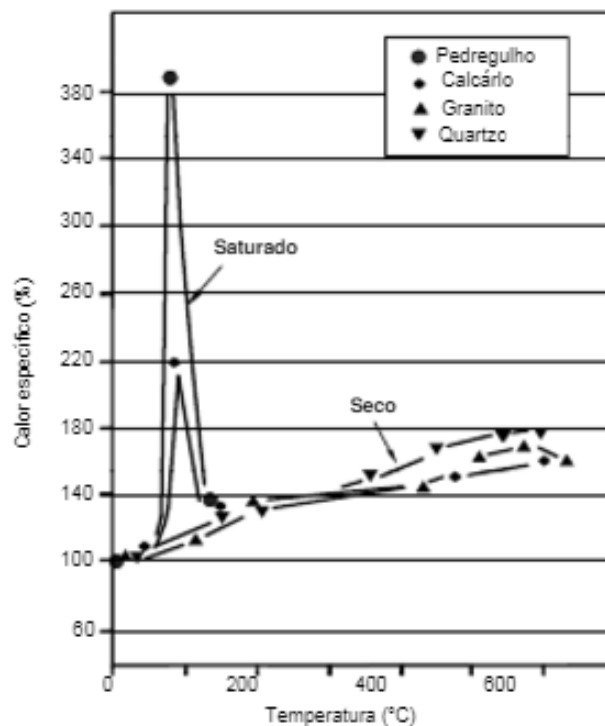


Figura 7 - Efeito da temperatura no calor específico do concreto
Fonte: FIB, 2007.

4.2.4 Massa Específica

A evaporação da água do concreto e o aumento volumétrico dos seus agregados, provocam significativas variações na massa específica do concreto exposto a elevadas temperaturas. Apenas pela perda de água, considera-se uma diminuição de aproximadamente 100kg/m³ na massa específica do material (BRITZ e COSTA, 2011). A redução da massa específica afeta na capacidade de resistência de estruturas pois gera aumento da porosidade e, conseqüentemente, influencia na sua durabilidade.

4.3 EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS NOS AGREGADOS

Os agregados ocupam cerca de 60% a 80% do volume do concreto normal. Por isso Cánovas (1988) ressalta a importância de conhecer as propriedades de cada agregado utilizado, principalmente a mineralogia e a porosidade, que são fatores determinantes na interpretação dos efeitos que as elevadas temperaturas causam ao concreto. A estabilidade química e física do agregado sob situações extremas é a grande responsável pela garantia da estabilidade da estrutura, já que ele também auxilia no controle da dilatação térmica da pasta de cimento (BRITEZ e COSTA, 2011).

A porosidade relacionada a permeabilidade do agregado interfere principalmente na quantidade de água do sistema. Para um agregado poroso com maior absorção, a água absorvida da pasta de cimento precisará evaporar, conseqüentemente levando mais tempo para aumentar a temperatura do agregado.

4.3.1 Efeito das Altas Temperaturas na Argila Expandida

O ar aprisionado na estrutura celular dos agregados leves torna as propriedades térmicas do concreto leve vantajosas em relação aos concretos tradicionais (ROSSIGNOLO, 2003). Esse fator faz com que a argila expandida apresente menor condutividade térmica em comparação ao agregado graúdo convencional, evitando que elevadas temperaturas causem grande influência na resistência a compressão de estruturas de concreto (TORRES e FERREIRA, 2003). Concretos com argila expandida como agregado leve possuem cerca de 1/15 da condutibilidade térmica de concretos feitos com brita (BAUER, 2012).

Para comprovar esse fato, Sach, Rossignolo e Santos (2010) encontraram uma relação entre a massa específica de concretos leves com argila expandida e a condutividade térmica, apresentado na Figura 8.

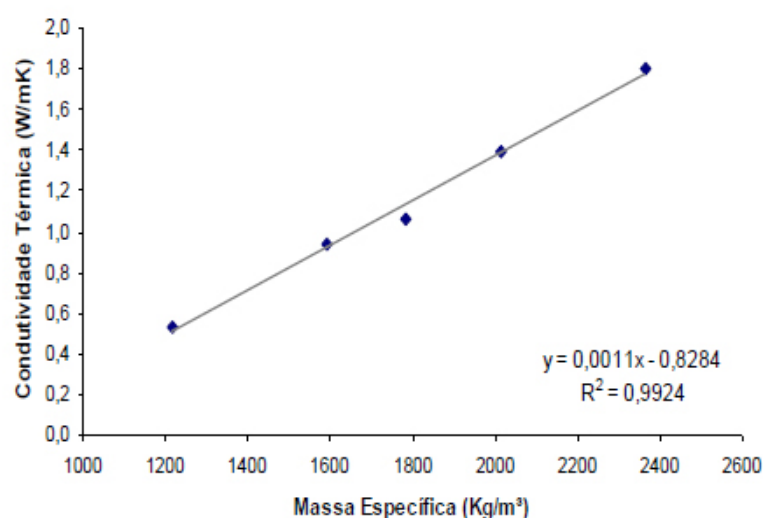


Figura 8 - Variação da condutividade térmica em função da massa específica do concreto com argila expandida
Fonte: SACH, ROSSIGNOLO e SANTOS (2010)

Estudos realizados por Torres e Ferreira (2003) indicam que a utilização da argila expandida em concretos tradicionais, apesar de reduzir sua resistência mecânica a compressão quando ensaiado em temperatura ambiente, impede o decréscimo acentuado da resistência do concreto ensaiado após a exposição às elevadas temperaturas.

4.3.2 Efeito das Altas Temperaturas no Concreto com Fibras de Polipropileno

Lima (2005) destaca a vantagem da presença das fibras de polipropileno em concretos que são expostos ao calor intenso. O polipropileno é um material que possui baixo ponto de fusão e derrete em temperaturas a partir de 160°C reduzindo de volume até que, em aproximadamente 360°C entra em ignição, sobrando apenas fuligem, que ocupa cerca de 5% do volume inicial das fibras.

Essa redução de volume deixa espaços vazios que funcionam como um caminho de saída do vapor d'água e dos gases em alta pressão para a superfície, fazendo com que a referida pressão não seja transformada em tensões de tração internas na peça de concreto, responsáveis pelo deslocamento e comportamento explosivo do material em altas temperaturas.

Contudo, Andrade *et al* (2003) levanta a possibilidade desses vazios não serem absolutamente vantajosos em relação a resistência do material pois, os vazios criados

pelo derretimento das fibras, quando interligados, podem causar maiores fissuras no concreto que já está com sua resistência comprometida.

4.4 SPALLING NO CONCRETO

Spalling é o fenômeno de deslocamento de camadas da superfície do concreto, geralmente violento e explosivo, quando sujeito a temperaturas elevadas em situação de incêndio. É ocasionado pelas tensões residuais no elemento de concreto, resultantes das variações volumétricas dos agregados e da pasta de cimento, e da evaporação da água livre do elemento.

Torres e Ferreira (2003) afirmam que o aumento de temperatura da peça eleva a pressão nos poros, devido a transição líquido-vapor do poro capilar e da pasta de cimento, além da tensão causada pela diferença de coeficiente de dilatação térmica entre a pasta e os agregados. O aumento continua até que a pressão interna se torne tão alta a ponto de resultar em uma explosão repentina (BENTZ, 2000).

Essa explosão pode provocar perda de seção transversal de elementos estruturais e, conseqüentemente, ocasionar a ruptura por cisalhamento ou flexão. Em alguns casos, o deslocamento é tão severo que pode deixar exposta a armadura, reduzindo ainda mais sua capacidade estrutural (BRITTEZ e COSTA, 2011).

A intensidade do *spalling* pode ser influenciada por diversos fatores referentes ao concreto como: idade, materiais da composição, teor de umidade, permeabilidade, presença de fibras, entre outros (BRITTEZ e COSTA, 2011). Morita *et al.* (2002) estudou a interferência da idade do concreto no fenômeno e, chegou à conclusão que elementos de idades prematuras são mais suscetíveis ao deslocamento que elementos de idades mais avançadas.

Como citado anteriormente, a adição de fibras de polipropileno altera a intensidade da ocorrência do *spalling*. Em altas temperaturas as fibras inicialmente derretem, podendo posteriormente virar cinzas e, o volume anteriormente ocupado pela fibra em seu estado físico original, passa a ser espaço vazio por onde o vapor d'água pode sair. Quando o vapor consegue chegar a superfície, não surgem pressões no interior do elemento, evitando o deslocamento (BRITTEZ e COSTA, 2011).

5 METODOLOGIA

5.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

O referente trabalho tem por finalidade explicar o resultado da pesquisa aplicada ao comportamento de concreto leves, com argila expandida, com e sem fibras de polipropileno, quando expostos a elevadas temperaturas. De acordo com o que cita Vianna (2013), tal pesquisa pode ser classificada como de objetivo exploratório, por abordar inicialmente os levantamentos bibliográficos de outros estudos, para posteriormente serem aplicados nos ensaios realizados e nos resultados obtidos.

Quanto ao procedimento da pesquisa, a execução dos ensaios e análise dos resultados da resistência e do comportamento do concreto em cada situação definida, bem como a relação entre causa e efeito de cada variável aplicada ao estudo, caracteriza o procedimento experimental, segundo Vianna (2013). O objetivo final desse procedimento consiste na justificada e demonstração dos fatos ocorridos em cada etapa da pesquisa.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para execução dos ensaios, inicia-se com a escolha dos materiais a serem utilizados na mistura do concreto, tomando por parâmetro as características de cada um, como dimensões e propriedades, levando em consideração o resultado final desejado.

Os materiais constituintes da mistura do concreto foram a argila expandida como agregado graúdo, areia natural como agregado miúdo, cimento e água, além da adição das fibras de polipropileno. Os agregados foram escolhidos principalmente em função de sua massa específica que, não deveria causar grandes influências na massa específica do concreto leve, e teriam de apresentar bom desempenho perante as elevadas temperaturas.

Após os materiais serem escolhidos e devidamente caracterizados, foi determinado o traço do concreto para cada uma das misturas que, posteriormente foram ensaiadas às diferentes condições de temperatura.

5.2.1 Cimento Portland

O cimento utilizado na confecção dos concretos foi o Cimento Portland CP V-ARI RS da marca Votorantin, atendendo aos requisitos da NBR 5737 – Cimentos Portland resistentes a sulfatos (ABNT, 1992) e NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial (ABNT, 1991), que apresenta elevada resistência nas primeiras idades e é indicado para situações que necessitam de desforma rápida. Além disso, a adição de escória de alto forno ou materiais pozolânicos fornece maior durabilidade ao concreto, principalmente em meios agressivos.

O CP V-ARI RS foi escolhido devido a necessidade de atingir alta resistência em poucas idades, para atender aos prazos dos ensaios e da conclusão da pesquisa, e por estar disponível na universidade. Além disso, os ensaios de elevadas temperaturas nas primeiras idades, torna possível a análise quanto a possibilidade da ocorrência de *spalling*, conforme cita Morita *et al.* (2002).

A massa específica do cimento, dado importante para a determinação do volume de concreto e consumo de material, foi disponibilizada pela empresa fabricante através do boletim de ensaios de cimento, contido no ANEXO B.

5.2.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado nos ensaios foi a areia natural, disponível no canteiro da Universidade e previamente seca em estufa. A massa específica da areia, utilizada para estimar o volume de concreto e posteriormente determinar a proporção de fibras a ser adicionada na mistura, foi determinada conforme a NBR 9776 – Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman (ABNT, 1987), apresentada na Tabela 5 - Massa específica do agregado miúdo.

Tabela 5 - Massa específica do agregado miúdo

Amostra	Massa (g)	Leitura Inicial (ml)	Leitura Final (ml)	ρ (g/cm ³)
1	500	200	389,6	2,637
2	500	200	389,4	2,640
Média ρ (g/cm³)				2,639

Fonte: autoria própria.

A distribuição granulométrica do agregado miúdo, apresentada no Gráfico 2 foi obtida através da NBR 7217 – Agregados – Determinação da composição granulométrica (ABNT, 1987).

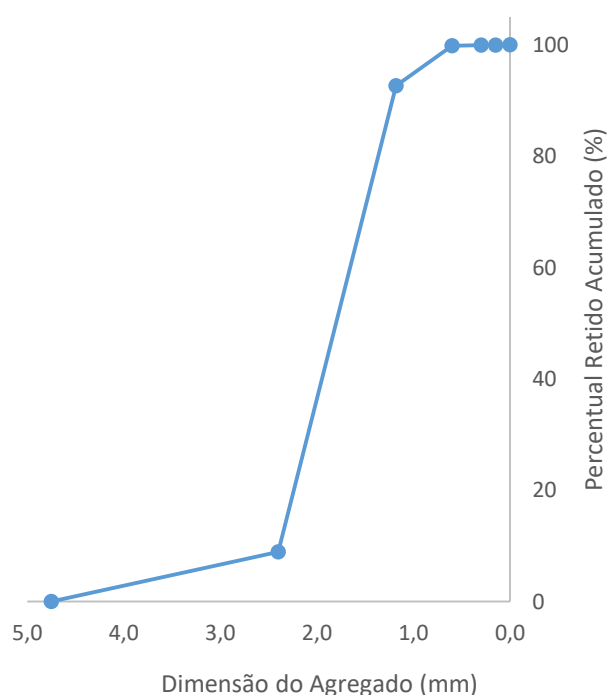


Gráfico 2 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo
Fonte: autoria própria.

5.2.3 Agregado Graúdo Leve

A argila expandida do tipo 1506 da CINEXPAN apresentada na Figura 9, foi o agregado graúdo leve utilizado na confecção dos corpos de prova.



Figura 9 - Argila expandida
Fonte: acervo do autor.

Devido à alta porosidade do material, não foi possível determinar a absorção e a massa específica pela NBR NM 53 – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ANM, 2002), pois o material flutuava na determinação do peso submerso, não sendo possível medir a massa total da amostra. Dessa forma, os dados necessários foram obtidos na ficha técnica fornecida pelo fabricante, apresentada nos ANEXO C.

A distribuição granulométrica do agregado leve, apresentada no Gráfico 3 foi obtida através da NBR 7217 – Agregados – Determinação da composição granulométrica (ABNT, 1987) e está dentro do intervalo exigido pela NM 35 (ANM, 1995).

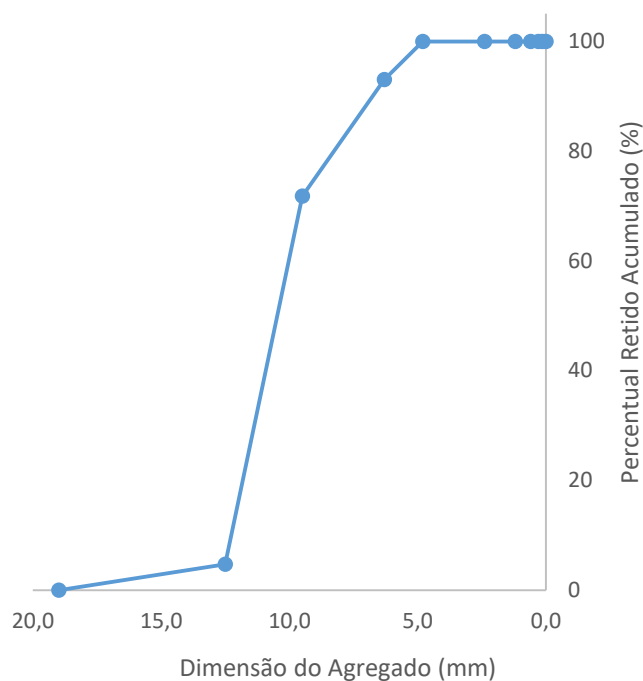


Gráfico 3 - Distribuição granulométrica do agregado leve
Fonte: autoria própria.

5.2.4 Água

A água utilizada na mistura do concreto é proveniente do abastecimento local, sendo pura e livre de impurezas que possam afetar a qualidade do concreto e o resultado dos ensaios.

5.2.5 Fibras de Polipropileno

As fibras adicionadas a mistura de concreto são os monofilamentos de microfibras de polipropileno da AWA. De acordo com o fabricante AWA, suas especificações são:

- Comprimento: 12 mm;
- Diâmetro: 18 μm ;
- Peso específico: 0,91 g/cm³;
- Ponto de fusão: 160°C a 170°C.

O teor de fibras de 0,5% em volume de concreto, (4,5 kg/m³) foi adotado por ser o valor limite para não causar problemas no adensamento do concreto (TANESI E FIGUEIREDO, 1999).

Como mostra a Figura 10, as fibras estavam agrupadas por serem monofilamentos muito finos.



Figura 10 - Fibras de polipropileno agrupadas
Fonte: acervo do autor.

Para melhor distribuição no concreto durante a mistura, as fibras foram separadas manualmente como mostra a Figura 11, evitando acúmulo de grande quantidade de fibras formando tufo, que poderiam interferir na resistência do concreto, principalmente após exposição às elevadas temperaturas, pois ao derreter deixariam um grande espaço vazio.



Figura 11 - Fibras de polipropileno separadas

Fonte: acervo do autor.

5.3 AMOSTRAGEM DE CORPOS DE PROVA

A amostragem total desta pesquisa foi calculada em 72 corpos de prova, conforme exemplificado na Tabela 6 considerando:

- 3 relações água/cimento: 0,45; 0,50; 0,55;
- 2 condições quanto a adição de fibras: sem fibras e 0,5% de fibras;
- 4 diferentes temperaturas: temperatura ambiente, considerada pela NBR 15200 (ABNT, 2004) como 20°C, 300°C, 600°C e 900°C;
- 3 corpos de prova para cada caso.

Tabela 6 - Amostragem de corpos de prova

Traço	Relação água/cimento	Temperatura (°C)	Nº de corpos de prova	
			Sem fibras	Com fibras
A	0,45	20	3	3
		300	3	3
		600	3	3
		900	3	3
B	0,5	20	3	3
		300	3	3
		600	3	3
		900	3	3
C	0,55	20	3	3
		300	3	3
		600	3	3
		900	3	3
TOTAL			72	

Fonte: autoria própria.

Para seguir o recomendado para ensaios no Brasil, bem como assegurar a transferência de calor uniforme no interior da peça ensaiada, adotou-se corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 50 mm x 100 mm, respeitando a dimensão básica prescrita na NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova (ABNT, 2008), e para que também sejam compatíveis com as dimensões da mufla utilizada no ensaio de simulação de incêndio.

5.4 DOSAGEM

Os três traços adotados para os corpos de prova foram baseados nos traços de Morávia (2004), dosados a partir do método do IPT, fixando um teor de argamassa de aproximadamente 65%. Teores de argamassa acima de 60% são os mais indicados para concretos com argila expandida, a fim de preencher os vazios entre os grãos e garantir a trabalhabilidade e melhor moldabilidade do concreto, já que a argila expandida apresenta grãos mais arredondados e não possui boa distribuição granulométrica, deixando mais espaços vazios que a brita, por exemplo.

Deve-se atentar ao fato de que a maior absorção de água da argila expandida, em comparação aos agregados graúdos normalmente utilizados, afetará diretamente na relação água/cimento, e conseqüentemente, a resistência do material no estado endurecido. Buscando diminuir esses efeitos, optou-se por utilizar a argila expandida na condição saturada com superfície seca (SSS)

Os três traços adotados apresentaram a mesma proporção de materiais secos, variando entre si apenas a relação água/cimento. A Tabela 7 apresenta a proporção de materiais para cada traço.

Tabela 7 - Proporção de materiais para cada traço

Traço	Cimento (kg)	Areia (kg)	Proporção			
			Argila Exp (kg)	Água (kg)	Fibra (%)	
A	Sem fibras	1	1,4	0,5	0,45	-
	Com fibras	1	1,4	0,5	0,45	0,5
B	Sem fibras	1	1,4	0,5	0,50	-
	Com fibras	1	1,4	0,5	0,50	0,5
C	Sem fibras	1	1,4	0,5	0,55	-
	Com fibras	1	1,4	0,5	0,55	0,5

Fonte: autoria própria.

Inicialmente desejava-se elaborar a mistura com as relações água/cimento de 0,45, 0,55 e 0,65. Entretanto, ao confeccionar o traço de relação água/cimento igual a 0,55, notou-se que a argila expandida estava segregando muito em comparação ao traço de 0,45, o que poderia causar problemas no adensamento e na distribuição das tensões no interior do corpo de prova, quando solicitado a cargas de compressão.

Optou-se então por substituir a relação de 0,65 pela de 0,50, para manter um intervalo padrão entre as relações água/cimento dos diferentes traços, manter o

número de ensaios e dados obtidos, e garantir que a segregação da argila expandida não viesse a interferir nos resultados.

O percentual adotado de fibras de polipropileno adicionadas foi de 0,5% em volume de concreto. A adição das fibras deve ser feita aos poucos, com a betoneira ligada, prestando atenção quanto ao tempo de mistura após a adição, e quanto ao adensamento do corpo de prova, evitando que fiquem tufo de fibras, o que poderia interferir no resultado final da resistência do concreto após exposição a elevadas temperaturas, já que eles derreteriam, deixando um grande espaço vazio na peça ensaiada.

5.5 FABRICAÇÃO, MOLDAGEM E CURA

Primeiramente foi realizado o processo de saturação da argila expandida, deixando-a submersa em água por 24 horas e retirando 3 horas antes do preparo da mistura. Nessas 3 horas a argila ficou exposta ao ar para evaporação da água de sua superfície, sendo atendida a condição de saturada com superfície seca (SSS).



Figura 12 - Argila expandida saturada
Fonte: acervo do autor.

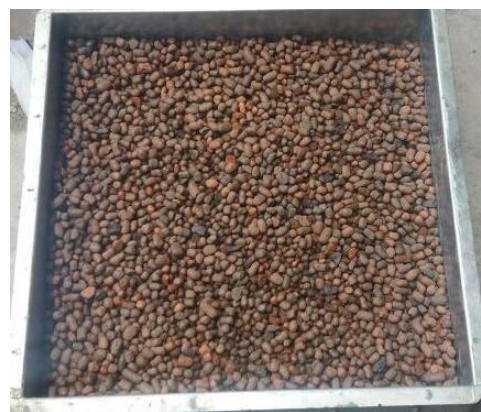


Figura 13 - Argila expandida saturada com superfície seca (SSS)
Fonte: acervo do autor.

Durante ensaios preliminares, constatou-se que parte da argamassa da mistura ficava retida na superfície da betoneira, deixando o concreto pouco argamassado. Para minimizar esse efeito, foi realizada imprimação da betoneira com pasta de cimento no mesmo teor água/cimento utilizado em cada traço a ser confeccionado, mais a adição de aditivo superplastificante, em quantidade proporcional a 0,5% da massa de cimento.

A melhor sequência encontrada para colocação dos materiais na betoneira, após a imprimação foi:

- 100% da argila expandida e homogeneizar por cerca de 1 minuto para absorver parte da argamassa da imprimação;
- 100% do cimento;
- 50% da areia;
- 50% da água;
- Homogeneização por 3 minutos;
- 50% da areia e 50% da água, com a betoneira ligada e, homogeneizar por 3 minutos.

Com essa mistura foram moldados 13 corpos de prova, inicialmente sem fibras de polipropileno. 12 destes para o ensaio de resistência a compressão, e um para ser utilizado no caso do surgimento de problema durante o desmolde ou retificação com algum dos demais corpos de prova.

Posteriormente, estipulou-se o volume restante de concreto na betoneira, diminuindo o volume dos 13 corpos de prova do volume inicial de concreto. Com esse resultado, foi determinado o volume de fibras de polipropileno a ser adicionado na mistura, pré-determinado em 0,5% do volume de concreto, e então foram moldados mais 13 corpos de prova.

Após a colocação das fibras percebeu-se alteração na consistência do concreto. A presença das fibras aumentou a consistência da mistura, impondo certa resistência à segregação da argila expandida, como pode ser observado na Figura 14 e Figura 15.



Figura 14 - Concreto sem adição de fibras
Fonte: acervo do autor.



Figura 15 - Concreto com adição de fibras
Fonte: acervo do autor.

O ensaio de abatimento por tronco de cone não foi realizado para não haver grandes perdas em volume de concreto, influenciando no cálculo do volume restante na betoneira para a colocação das fibras, e por não fazer parte dos objetivos da pesquisa.

Sendo os moldes cilíndricos utilizados com dimensões de 50 mm x 100 mm, o processo de moldagem e adensamento foi adotado igual ao estipulado na NBR 5738 (ABNT, 2008) para corpos de prova com dimensões de 100 mm x 200 mm, devido à dificuldade de adensamento da argila expandida e do concreto com as fibras de polipropileno. Destaca-se que o soquete utilizado no adensamento foi o determinado pela NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão (ABNT, 1996).



Figura 16 - Corpos de prova moldados
Fonte: acervo do autor.

A cura foi realizada de acordo com o indicado pela NBR (5738, 2008), para corpos de prova preparados com concreto leve, em tanque d'água, como mostra a Figura 17.



Figura 17 - Corpos de prova na cura
Fonte: acervo do autor.

Os corpos de prova foram retirados da câmara de cura e retificados 24h antes do ensaio de simulação de incêndio, que ocorreu aos 7 dias. A retificação foi realizada com a utilização da retífica do canteiro de obras da Universidade, e ocorreu antes da exposição às elevadas temperaturas, assumindo que o concreto estaria mais frágil, e correria o risco de quebrar durante o processo.

5.6 ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO

Para a simulação de incêndio foi realizado ensaio não destrutivo, com utilização de mufla para elevação da temperatura dos corpos de prova. A ISO 834-11 (2014) fornece a curva padronizada para simulação de incêndio, expressada através de função logarítmica da Equação 1. Entretanto nesta pesquisa não foi possível a utilização exata da equação pois, a mufla utilizada (Figura 18) apresenta controle linear do aumento da temperatura em função do tempo, não sendo possível ensaiar com precisão a simulação de incêndio. Isto posto, os ensaios apresentaram elevação da temperatura de forma adaptada, para cada temperatura adotada, a fim de mais se aproximar ao apresentado pela ISO 834-11 (2014).



Figura 18 - Mufla utilizada nos ensaios de simulação de incêndio
Fonte: acervo do autor.

O tempo de exposição escolhido de 90 min baseou-se no tempo total necessário para: início do fogo, propagação até se tornar incêndio, percepção e

acionamento do socorro, chegada do Corpo de Bombeiros e extinção do incêndio. Também, de forma a atender o tempo requerido de resistência ao fogo da NBR 14432 - Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações- Procedimento (ABNT, 2000) que atende a maioria dos grupos de edificações com altura inferior a 30 metros.

As temperaturas de 300°C e 600°C adotadas para os ensaios foram baseadas no processo físico químico do concreto convencional em situação de incêndio e, para cada uma delas, ocorrem consideráveis alterações no comportamento microestrutural. A temperatura limite de 900°C foi escolhida, por ser marcada pela dissociação do C-S-H das ligações químicas da reação de hidratação do cimento. É o C-S-H o principal responsável pela resistência da matriz de cimento.

De acordo com a equação padronizada de incêndio, fornecida pela ISO 834-11 (2014), a temperatura de 300°C é atingida com apenas 42 segundos. Porém, a máxima elevação da temperatura da mufla é a uma taxa linear de 100°C/min, conseguindo então atingir os 300°C apenas com 3 minutos. Após os 3 minutos iniciais, a temperatura permaneceu constante até o término dos 90 minutos determinados para o ensaio (Gráfico 4).

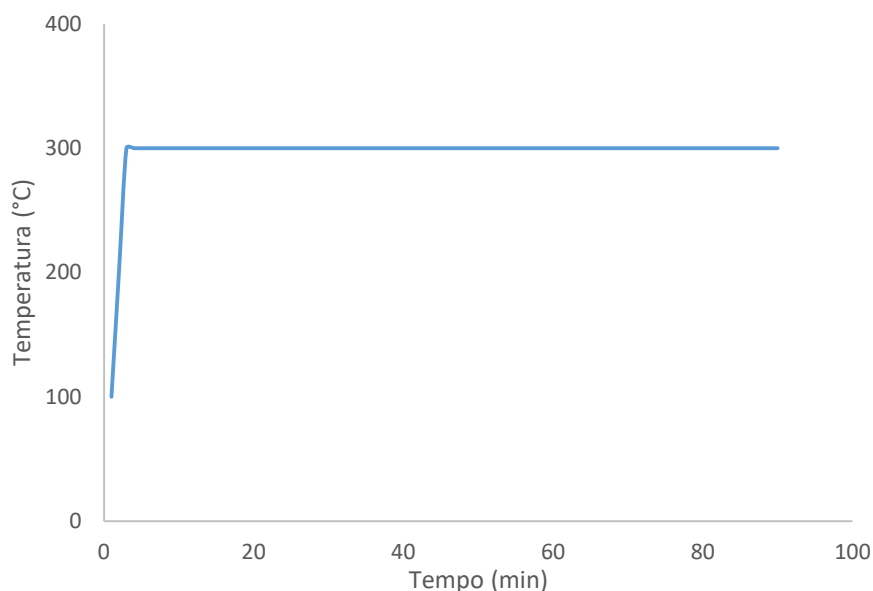


Gráfico 4 - Elevação da temperatura para o ensaio a 300°C
Fonte: acervo do autor.

Pela equação padronizada de incêndio a temperatura de 600°C é atingida aos 5 minutos e 53 segundos, com comportamento praticamente linear. Dessa forma, o aumento da temperatura se deu linearmente, a uma taxa de 100°C/min, durante

aproximadamente 6 minutos, até atingir a temperatura desejada de 600°C, onde se estabilizou e permaneceu constante até concluir os 90 minutos de ensaio, como pode ser observado no Gráfico 5.

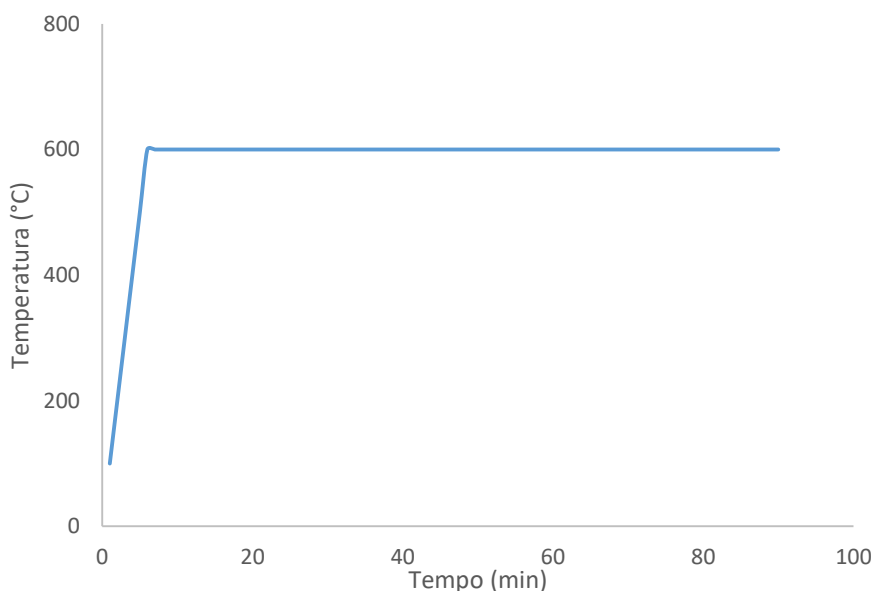


Gráfico 5 - Elevação da temperatura para o ensaio de 600°C

Fonte: acervo do autor.

Para a maior temperatura adotada para os ensaios, 900°C, assumindo através da equação padronizada, que o tempo para atingi-la é de 44 minutos e 19 segundos, o aumento da temperatura foi dividido em três etapas para melhor se adequar ao comportamento da curva padronizada de incêndio. Até a temperatura de 600°C seguiu-se o adotado para os demais casos, com aumento linear da temperatura, a taxa de 100°C/min. A partir dos 600°C ocorre mudança no comportamento da curva, com aumento da temperatura de forma mais lenta.

Dessa forma, nos 18 minutos seguintes a taxa de aumento da temperatura foi alterada para 11°C/min, até atingir 800°C. A partir dessa temperatura, a taxa foi diminuída para 5°C/min por cerca de 20 minutos até atingir os 900°C, permanecendo constante até o final dos 90 minutos de ensaio, como mostra o Gráfico 6.

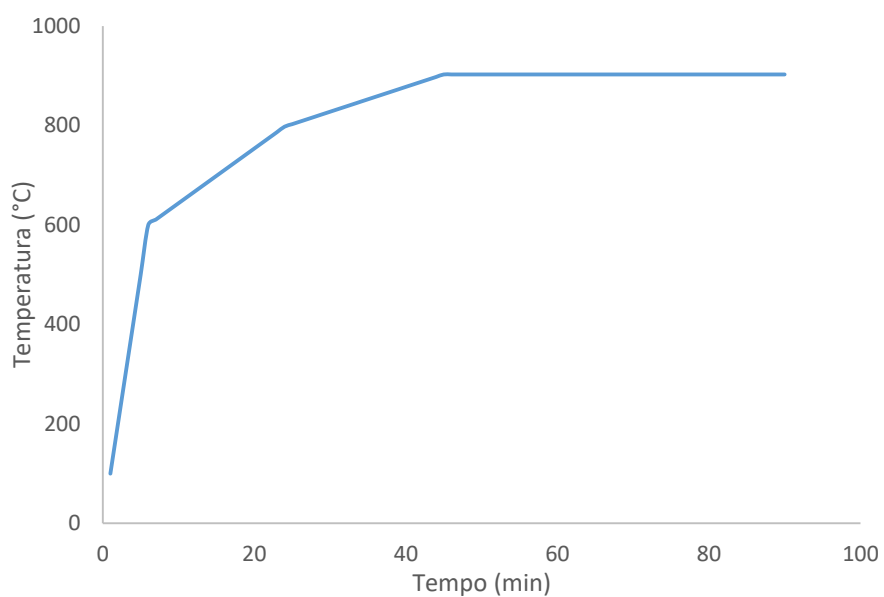


Gráfico 6 – Elevação da temperatura para o ensaio a 900°C
Fonte: acervo do autor.

A Figura 19 mostra a distribuição dos corpos de prova no interior da mufla, com um distanciamento de aproximadamente 2 cm, para permitir melhor circulação do calor entre as peças, tornando a distribuição mais uniforme.



Figura 19 - Disposição dos corpos de prova no interior da mufla
Fonte: acervo do autor.

Todas as amostras submetidas ao ensaio de simulação de incêndio foram resfriadas de forma lenta, sendo o início do resfriamento ainda dentro da mufla, levando em consideração a segurança para retirá-los sem causar queimaduras, já que a luva de manuseio não é capaz de resistir a temperaturas tão elevadas. A Figura 20 mostra o interior da mufla com os corpos de prova a temperatura de 600°C.



Figura 20 – Interior da mufla com os corpos de prova a temperatura de 600°C
Fonte: acervo do autor.

5.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

O ensaio de resistência a compressão foi realizado com o concreto na idade de 8 dias, um dia após o ensaio de simulação de incêndio. Após o completo resfriamento, as peças submetidas às elevadas temperaturas foram enumeradas, pesadas e medidas, com o propósito de verificar a massa específica de cada um após o ensaio de simulação de fogo, para encontrar a relação entre massa específica e resistência a compressão do concreto após incêndio. Os corpos de prova foram então rompidos com a utilização da prensa EMIC do laboratório de materiais de construção da Universidade (Figura 21).



Figura 21 - Prensa EMIC
Fonte: acervo do autor.

Durante a realização do ensaio de compressão, mostrado na Figura 22, o software ligado a EMIC gerou gráficos e tabelas com os resultados de resistência a compressão de cada corpo de prova ensaiado, que estão apresentadas nos Apêndices B, C e D.



Figura 22 - Corpo de prova ensaiado a compressão
Fonte: acervo do autor.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 CONSUMO DE MATERIAL POR METRO CÚBICO

A Tabela 8 apresenta o consumo de material por metro cúbico de concreto para cada um dos traços

Tabela 8 - Consumo de material por metro cúbico de concreto

Traço	Fator A/C	Adição de fibra	Consumo por metro cúbico de concreto			
			Cimento Portland (kg/m ³)	Areia Natural (kg/m ³)	Argila Expandida (kg/m ³)	Fibra de Polipropileno (kg/m ³)
A	0,45	Sem	569,66	797,53	284,83	-
		Com	566,83	793,56	283,41	4,55
B	0,50	Sem	553,89	775,44	276,94	-
		Com	551,13	771,58	275,56	4,55
C	0,55	Sem	538,96	754,54	269,48	-
		Com	536,28	750,79	268,14	4,55

Fonte: autoria própria.

Em todos os casos o consumo de materiais foi maior para os traços sem a adição das fibras de polipropileno, assim como para aqueles com menor relação água/cimento.

7.2 MASSA ESPECÍFICA

A Tabela 9, apresenta o resultado da massa específica dos concretos com e sem fibras no estado endurecido, a temperatura ambiente e após a exposição às elevadas temperaturas, obtida através da NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica (ABNT, 1987).

Tabela 9 - Massa específica no estado endurecido

TRAÇO	Massa Específica (kg/m ³)				
	20°C	300°C	600°C	900°C	
A		1561,98	1434,42	1403,16	1370,38
	Sem fibras	1547,13	1362,04	1394,59	1335,60
		1613,33	1412,42	1375,15	1373,09
	Com fibras	1689,95	1504,62	1434,46	1280,82
		1726,69	1476,44	1451,44	1421,29
		1614,78	1479,35	1448,95	1385,58
1524,82		1398,77	1265,30	1266,83	
B	Sem fibras	1527,32	1346,52	1314,53	1319,39
		1452,20	1347,77	-	1255,96
	Com fibras	1608,55	1439,37	1433,43	1415,00
		1668,49	1502,72	1428,72	1379,85
		1682,46	1430,72	1437,30	1424,14
		1445,13	1223,14	1235,90	1220,06
C	Sem fibras	1450,49	1231,96	1235,39	1270,49
		1544,51	1284,51	1264,88	1234,97
	Com fibras	1628,00	1457,70	1482,51	1441,70
		1696,79	1400,98	1397,08	1419,74
		1641,72	1450,79	1432,14	1363,77

Fonte: autoria própria.

A temperatura adotada como 20°C se refere ao concreto em situação normal, ou seja, a temperatura ambiente, de acordo com a NBR 15200 (ABNT, 2004).

A maior massa específica dos corpos de prova com adição de fibras é justificada pelo processo de moldagem destes. Durante a moldagem dos traços sem a adição de fibras, devido a segregação da argila expandida, ao coletar o concreto na betoneira com a colher de alumínio para amostragem, grande parte do material coletado era composto pelo agregado graúdo leve, tornando esses corpos de prova mais leves. Com isso, o concreto restante na betoneira estava mais argamassado e, ao adicionar as fibras que diminuíram a segregação da argila restante, maior quantidade de argamassa era coletada pela colher de alumínio, fazendo com que os corpos de prova do concreto com fibras ficassem mais pesados.

De acordo com a ASTM C 330-77 (1991), o concreto leve deve apresentar valores de massa específica entre 1400 kg/m³ e 1800 kg/m³. Os exemplares que não foram expostos às elevadas temperaturas apresentaram massa específica dentro desse intervalo, mesmo aqueles com a adição das fibras de polipropileno.

Os resultados para um dos corpos de prova do traço B, sem fibras e exposto a temperatura de 600°C, não estão presentes em nenhuma das tabelas, pois este não

suportou o aumento brusco da temperatura e rompeu ainda dentro da mufla, como será descrito posteriormente.

Para melhor visualização dos resultados foram elaborados gráficos da média dos valores de massa específica de cada traço, com e sem a adição de fibras, em relação ao aumento da temperatura, apresentados a seguir no Gráfico 7, Gráfico 8 e Gráfico 9.

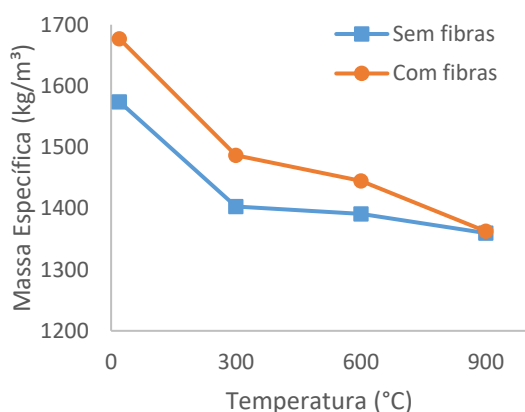


Gráfico 7 - Massa específica em relação ao aumento da temperatura para o traço A
Fonte: autoria própria.

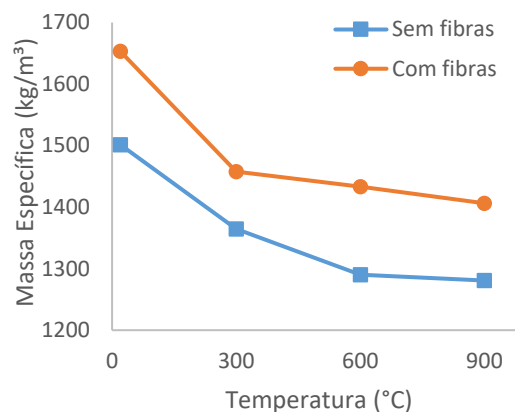


Gráfico 8 - Massa específica em relação ao aumento da temperatura para o traço B
Fonte: autoria própria.

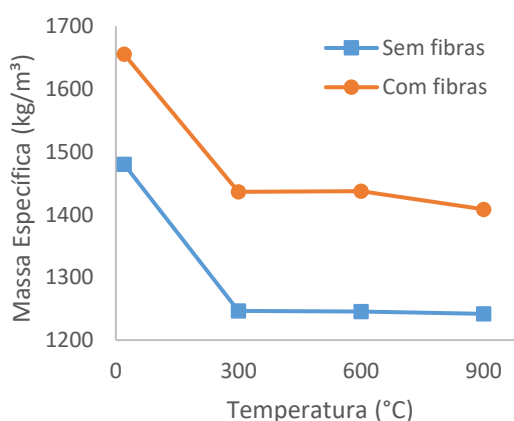


Gráfico 9 - Massa específica em relação ao aumento da temperatura para o traço C
Fonte: autoria própria.

Para todos os traços percebe-se diminuição da massa específica do concreto, à medida que aumenta a temperatura a qual os corpos de prova foram submetidos no ensaio de simulação de incêndio. Esse fato se deve à perda, através de evaporação,

da água combinada, água livre e água adsorvida presentes no concreto, que se intensifica com o aumento da temperatura.

7.3 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

A Tabela 10 traz os resultados da resistência a compressão do concreto rompido com 8 dias, para os três traços, sem e com a adição das fibras de polipropileno, após o completo resfriamento dos corpos de prova expostos as elevadas temperaturas.

Tabela 10 - Resistência a compressão

Temp. (°C)	Resistência (MPa)					
	Traço A		Traço B		Traço C	
	Sem fibras	Com fibras	Sem fibras	Com fibras	Sem fibras	Com fibras
20	15,42	25,17	15,07	20,31	14,04	19,27
	19,11	22,67	15,72	19,90	16,00	21,01
	20,67	21,97	11,72	19,92	19,47	19,34
300	15,20	11,93	13,87	15,27	13,33	15,31
	15,42	17,77	15,24	15,75	10,58	15,02
	14,93	15,26	12,72	15,69	12,05	16,55
600	7,64	9,36	4,13	5,32	4,10	5,78
	7,11	7,94	3,37	6,19	3,35	5,46
	6,69	9,45	-	5,66	2,93	5,33
900	4,13	3,52	2,49	2,86	2,93	3,60
	4,38	3,93	3,03	3,14	3,01	3,11
	4,10	3,24	3,43	3,74	2,74	3,38

Fonte: autoria própria.

De acordo com a norma ASTM C 330-77 (1991) além de estar dentro dos limites estabelecidos de massa específica, para que o concreto leve possa ser considerado concreto leve estrutural, a resistência a compressão aos 28 dias deve ser superior a 17MPa. Como os ensaios foram realizados aos 8 dias, é difícil estabelecer uma relação exata. Porém, mesmo com 8 dias, encontrou-se valores de resistência a compressão superiores ao estipulado pela norma, podendo então ser classificados como concreto leve estrutural. O único traço com valores inferiores a 17MPa foi o traço B sem a adição de fibras, mas, deve-se considerar que aos 8 dias o concreto ainda não atingiu o limite da sua resistência, podendo atingi-lo aos 28, e atingir o estipulado pela norma.

Dos resultados da Tabela 10 obtiveram-se três gráficos da resistência a compressão em relação ao aumento da temperatura, para melhor interpretar o comportamento do concreto, com e sem as fibras de polipropileno. Para o Gráfico 10 Gráfico 11 e Gráfico 12 foram adotados os valores máximos de resistência a compressão de cada situação, considerando que algumas variações possam ser provenientes da diferença de condição de exposição ao calor dentro da mufla, ou da dificuldade de adensamento do concreto no interior dos pequenos moldes.

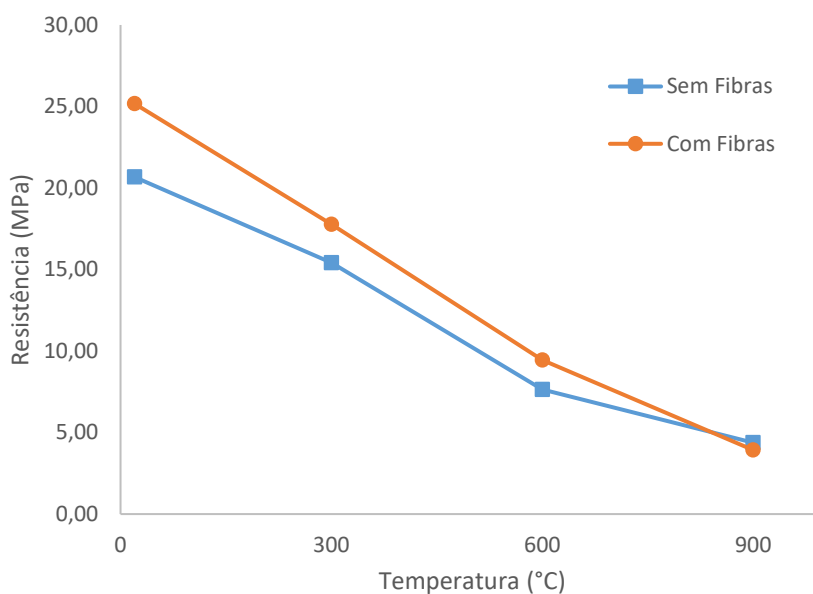


Gráfico 10 - Resistência a compressão em relação ao aumento da temperatura para o traço A
Fonte: autoria própria.

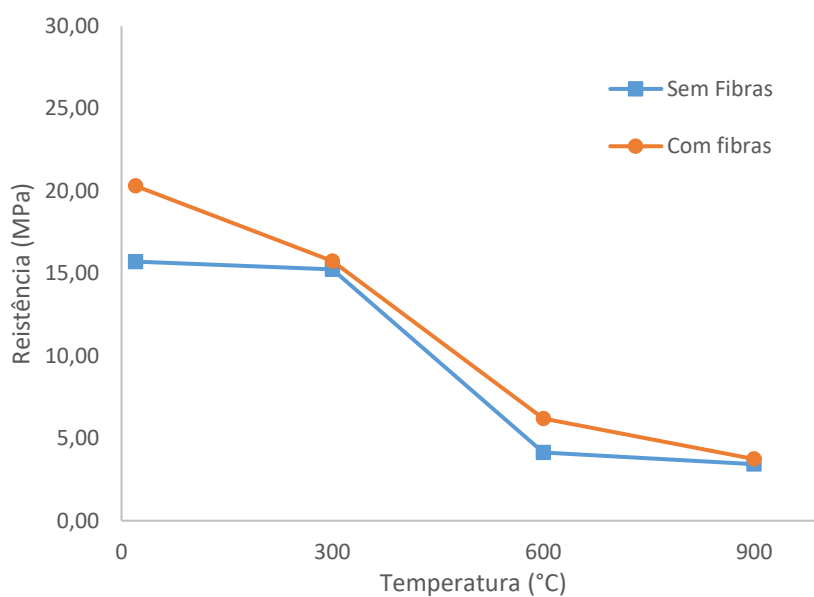


Gráfico 11 - Resistência a compressão em relação ao aumento da temperatura para o traço B
Fonte: autoria própria.

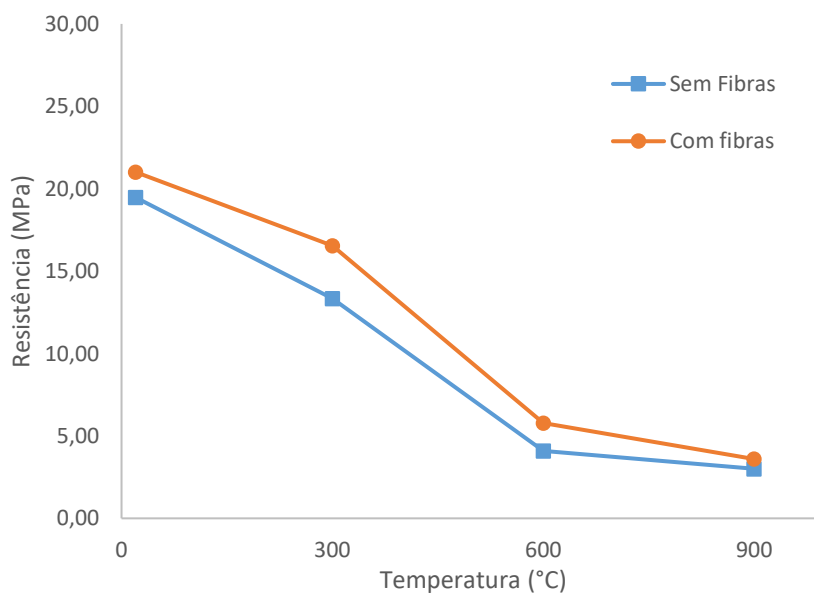


Gráfico 12 - Resistência a compressão em relação ao aumento da temperatura para o traço C
Fonte: autoria própria.

Nos gráficos nota-se que a presença das fibras de polipropileno influenciou positivamente nos resultados da resistência a compressão, em comparação com o mesmo traço sem a adição das fibras, para todas as situações, exceto para os corpos de prova do traço A expostos a temperatura de 900°C.

A Tabela 11 traz a relação entre a resistência a compressão do concreto submetido às altas temperaturas ($f_{c\theta}$) e em situação normal (f_{ck}). Para o cálculo

tomou-se como base a resistência a compressão máxima dos corpos de prova, separadamente para cada traço, com e sem fibras.

Tabela 11 – Relação entre resistência a compressão máxima do concreto submetido a altas temperaturas e em situação normal

Temp. (°C)	Relação $f_{c\theta}/f_{ck}$					
	Traço A		Traço B		Traço C	
	Sem Fibras	Com fibras	Sem Fibras	Com fibras	Sem Fibras	Com fibras
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
300	0,75	0,71	0,97	0,78	0,68	0,79
600	0,37	0,38	0,26	0,30	0,21	0,28
900	0,21	0,16	0,22	0,18	0,15	0,17

Fonte: autoria própria.

Em geral pode-se verificar que as resistências residuais dos corpos de prova estão de acordo com o afirmado por Brites e Costa (2011). Das amostras expostas a 900°C, a resistência a compressão foi inferior a 25% da resistência original. É importante considerar que, para os casos que exibiram maior perda de resistência para os traços com adição de fibras, em comparação ao traço sem fibras, ocorreram por apresentar maior resistência a compressão em situação normal.

Entretanto, para melhor estabelecer uma comparação entre os traços com e sem fibras de polipropileno, elaborou-se a Tabela 12 utilizando a relação entre a resistência a compressão do concreto submetido a altas temperaturas ($f_{c\theta}$) e a resistência a compressão máxima do concreto sem fibras em situação normal ($f_{ck_{sem\ fibras}}$), referente a cada traço.

Tabela 12 - Relação entre resistência a compressão máxima do concreto submetido a altas temperaturas e do concreto sem fibras em situação normal

Temp. (°C)	Relação $f_{c\theta}/f_{ck_{sem\ fibras}}$					
	Traço A		Traço B		Traço C	
	Sem Fibras	Com fibras	Sem Fibras	Com fibras	Sem Fibras	Com fibras
20	1,00	1,22	1,00	1,29	1,00	1,08
300	0,75	0,86	0,97	1,00	0,68	0,85
600	0,37	0,46	0,26	0,39	0,21	0,30
900	0,21	0,19	0,22	0,24	0,15	0,18

Fonte: autoria própria.

Da Tabela 12 é possível observar que, para os três traços, na temperatura de 600°C, a adição das fibras de polipropileno proporcionou aumento mais significativo da resistência a compressão das amostras, em comparação a amostra sem as fibras.

Os corpos de prova do traço A, ensaiados a 900°C, apresentaram leve diminuição da resistência residual a compressão, que pode ser atribuída a espaços vazios decorrentes da dificuldade de adensamento do traço A, devido à baixa relação água/cimento, que associado aos vazios deixados pelo derretimento das fibras, enfraqueceu a peça. Constata-se que a adição das fibras de polipropileno melhorou o desempenho do concreto quando exposto às temperaturas de 300°C e 600°C. Entretanto, para o concreto ensaiado a 900°C, as alterações devido a adição das fibras são insignificantes.

Comparando os resultados da Tabela 11 e Tabela 12 com os propostos pela NBR 15200 (ABNT, 2004) na Tabela 4, percebe-se que o traço A com a adição das fibras, quando relacionada a resistência a compressão para cada temperatura ($f_{c\theta}$) com a resistência a compressão máxima do concreto sem fibras em situação normal ($f_{ck_{sem\ fibras}}$), foi o único que superou os valores dos concretos com agregados naturais. Essa comparação pode ser observada na Tabela 13.

Tabela 13 - Comparação entre a relação $f_{c\theta}/f_{ck}$ para os diferentes tipos de agregados

Temperatura (°C)	Agregados naturais		Argila Expandida (Traço A)		
	Silicoso $f_{c\theta}/f_{ck}$	Calcáreo $f_{c\theta}/f_{ck}$	Sem fibras $f_{c\theta}/f_{ck}$	Com fibras $f_{c\theta}/f_{ck}$	Com fibras $f_{c\theta}/f_{ck_{sem\ fibras}}$
20	1	1	1	1	1,22
300	0,85	0,91	0,75	0,71	0,86
600	0,45	0,6	0,37	0,38	0,46
900	0,08	0,15	0,21	0,16	0,19

Fonte: autoria própria.

Deve-se lembrar que os valores propostos pela NBR 15200 (ABNT, 2004) são para concretos com massa específica normal, entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³, enquanto o concreto estudado é o concreto leve e apresenta massa específica inferior a 1800 kg/m³.

Foram também elaborados gráficos da relação entre as médias da resistência a compressão e da massa específica, para os três traços, com e sem a adição de fibras, após o ensaio de simulação de incêndio. Os resultados estão no Gráfico 13, Gráfico 14 e Gráfico 15.

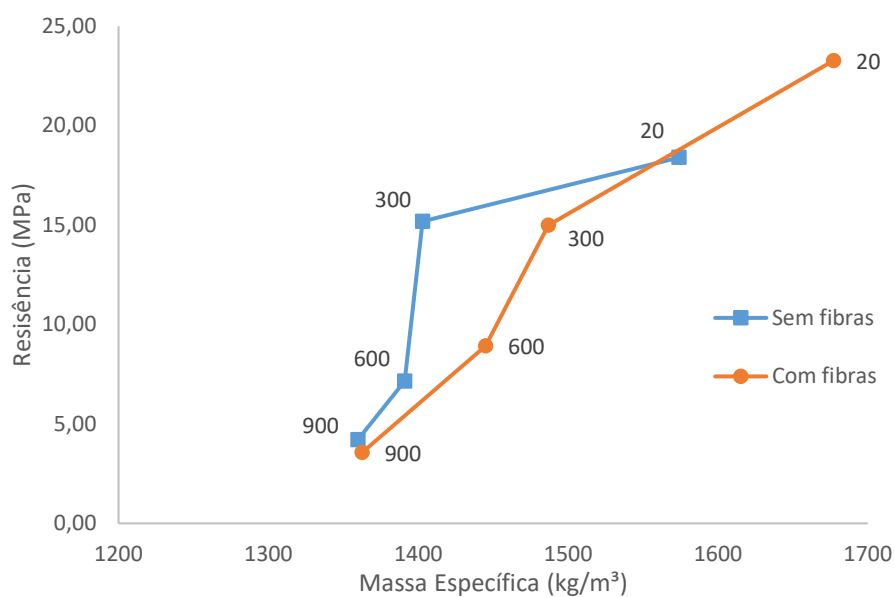


Gráfico 13 - Resistência a compressão em relação a massa específica para o traço A
Fonte: autoria própria.

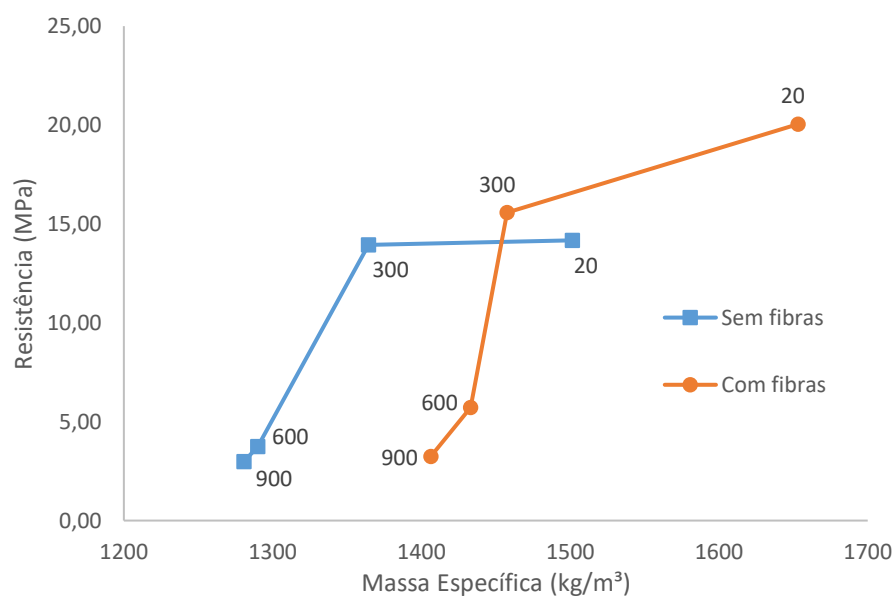


Gráfico 14 - Resistência a compressão em relação a massa específica para o traço B
Fonte: autoria própria.

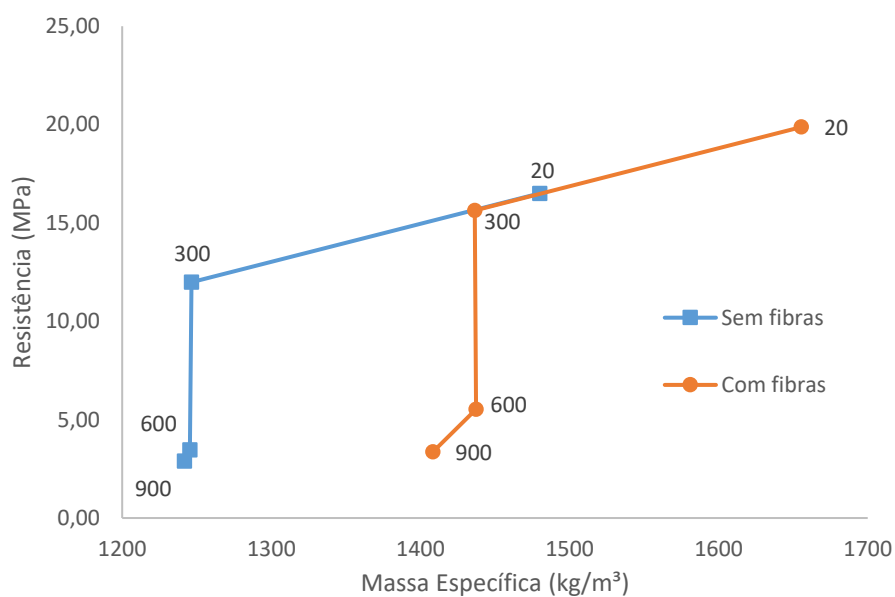


Gráfico 15 - Resistência a compressão em relação a massa específica para o traço C
Fonte: autoria própria.

Nota-se que os três traços apresentaram mesmo comportamento, onde a resistência é menor para menores valores de massa específica, que correspondem aos corpos de prova expostos a temperaturas mais elevadas, como indica o rótulo nos pontos do gráfico.

7.4 ANÁLISE VISUAL DOS CORPOS DE PROVA

Visualmente os corpos de prova apresentaram aspectos diferentes, de acordo com a temperatura a que cada um foi ensaiado, como mostram a Figura 23 e Figura 24.



Figura 23 - Diferença na coloração dos corpos de prova em relação a temperatura, para o traço B sem fibras
Fonte: acervo do autor.



Figura 24 - Diferença na coloração dos corpos de prova em relação a temperatura, para o traço B com fibras
Fonte: acervo do autor.

Nas figuras observa-se que, à medida que aumenta a temperatura de exposição do concreto, ele passa a apresentar coloração mais esbranquiçada. A variação na coloração do concreto indica que a peça sofreu alterações de temperatura. Dessa forma, a mudança de cor pode ser relacionada à perda de resistência do material devido ao calor, de acordo com Lima (2005).

Destaca-se também a diferença na coloração do agregado leve em função da variação da temperatura. No concreto de referência os agregados apresentaram coloração acinzentada, devido a absorção da pasta de cimento da mistura. Já para as temperaturas mais elevadas, voltou a apresentar sua coloração original, mais amarronzada, pois a elevação da temperatura afeta a pasta de cimento no interior do agregado, alterando também sua coloração.

O corpo de prova faltante da Figura 23 não pôde ser analisado junto aos demais, pois rompeu ainda no interior da mufla, quando estava tendo sua temperatura elevada. De acordo com o comportamento descrito por Torres e Ferreira (2003) e Bentz (2000), o aumento de temperatura elevou a pressão no interior da peça devido ao vapor d'água que não encontrou poros suficientes para sair, e resultou em seu colapso total, exemplificando o fenômeno de *spalling* no concreto.



Figura 25 - Corpo de prova após ruptura por spalling dentro da mufla
Fonte: acervo do autor.



Figura 26 - Seção de ruptura por spalling
Fonte: acervo do autor.

A condição em que o corpo de prova foi encontrado, como mostra a Figura 25, indica a ocorrência de deslocamento explosivo, pois além da peça romper, houve a projeção de parte de seu volume. Em uma estrutura de concreto armado a perda de parte da seção traria problemas relacionados não apenas com a resistência mecânica da estrutura, mas principalmente relacionados a sua durabilidade. Nessa situação a armadura ficaria exposta a ação direta do fogo comprometendo sua integridade ou, quando ainda houver cobertura por parte do concreto, a taxa de transmissão de calor para o interior da peça e para a armadura será maior, diminuindo a capacidade portante da estrutura.

Durante o processo de aquecimento, quando a temperatura alcançou valores próximos a 200°C, observou-se a saída de vapores e gases por pequenos espaços da mufla, que não possuía perfeita vedação. Devido ao cheiro forte acompanhado desse vapor, constatou-se não se tratar apenas de vapor d'água, estando presentes os gases provenientes das reações químicas que estavam ocorrendo no concreto. Além disso, ouviram-se estalos tanto durante a elevação da temperatura, quanto durante o resfriamento dos corpos de prova, após serem retirados da mufla.

As transformações físicas do concreto após ter sua temperatura elevada demonstraram estar de acordo com o apresentado por Lima (2005) no Quadro 1 e podem ser observadas na Figura 27 e Figura 28.



Figura 27 - Fissuração nos corpos de prova sem adição de fibras, em relação ao aumento da temperatura

Fonte: acervo do autor.



Figura 28 - Fissuração nos corpos de prova com adição de fibras, em relação ao aumento da temperatura

Fonte: acervo do autor.

Os corpos de prova expostos a temperatura de 300°C apresentaram o surgimento de microfissuras e pequeno aumento na porosidade, em comparação ao concreto de referência. Para os ensaiados a 600°C os efeitos térmicos se tornam mais visíveis, observados no aumento significativo das fissuras e da porosidade.

Para a temperatura de 900°C o concreto passa a apresentar características de materiais cerâmicos, com porosidade maior em comparação ao concreto de referência. Exibiu também menor fissuração em comparação ao concreto exposto a 600°C, por motivos que, devido à pouca quantidade de amostras, não pode ser justificado com precisão. Além disso, no corpo de prova número 11 pode ser observado pequeno deslocamento na parte superior, devido a ocorrência do fenômeno *spalling*.

Comparando as duas figuras, percebe-se que a adição das fibras reduziu o tamanho e o número de fissuras, principalmente para os corpos de prova expostos a temperatura de 600°C. Além disso, não houve casos de deslocamento para os concretos com adição de fibras, visto que ao derreterem elas permitiram a saída dos gases internos, evitando o aumento das pressões.

A análise do interior dos corpos de prova foi feita após a ruptura no ensaio de resistência a compressão, como mostram a Figura 30, Figura 31 e Figura 32, para também verificar onde se deu cada falha.

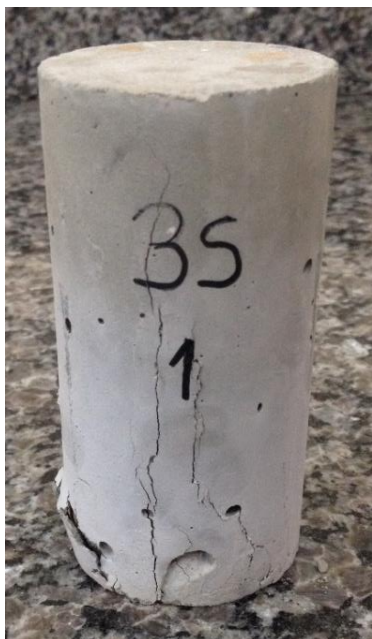


Figura 29 - Corpo de prova de referência após ruptura
Fonte: acervo do autor.



Figura 30 - Corpo de prova ensaiado a 300°C após ruptura
Fonte: acervo do autor.



Figura 31 - Corpo de prova ensaiado a 600°C após ruptura
Fonte: acervo do autor.



Figura 32 - Corpo de prova ensaiado a 900°C após ruptura
Fonte: acervo do autor.

Na amostra de referência não foi possível identificar visualmente a ruptura, pois os agregados ainda permaneceram presos a matriz de cimento que os envolvia. Em contrapartida, todos os demais apresentaram ruptura mais destrutiva, de forma a permitir a análise visual de seu interior.

Para o corpo de prova de referência e para o exposto a temperatura de 300°C (Figura 30), entende-se que a ruptura ocorreu no agregado leve que, de acordo com o informado pelo fabricante no ANEXO C. Entretanto, como o agregado leve possui estrutura interna porosa, mesmo com a camada envoltória menos permeável, ocorreu penetração de parte da pasta de cimento da mistura, fazendo com que esses corpos de prova apresentassem resistência mais elevada que a resistência unicamente do agregado.

Os corpos de prova expostos a temperatura de 900°C apresentaram ruptura na região argamassada da peça e, como pode ser observado na Figura 32, os agregados graúdos não foram afetados. Esse fato pode ser explicado associado a resistência a compressão desta amostra, que foi bem inferior a resistência do agregado leve, caracterizando a ruptura na região argamassada, já que estava enfraquecida devido a elevada porosidade.

A amostra exposta a 600°C demonstrou uma mistura das duas situações, com ruptura tanto no agregado graúdo, quanto na região argamassada. Relacionando com a resistência a compressão da amostra, verifica-se que os resultados foram similares aos da resistência a compressão da argila expandida, ocorrendo então ruptura simultânea nas duas regiões.

É importante ressaltar que a presença das fibras de polipropileno não alterou o método de ruptura em nenhuma das amostras. Influenciaram apenas na resistência a compressão e massa específica.

8 CONCLUSÃO

O concreto leve com argila expandida, assim como o concreto convencional, possui sua resistência a compressão consideravelmente afetada quando exposto a temperaturas elevadas. A perda de água e, conseqüentemente, a modificação nas ligações químicas da pasta de cimento, são as principais responsáveis pela queda da resistência, em comparação ao concreto ensaiado sob as condições normais de temperatura.

Ao se romperem as ligações químicas da pasta de cimento, pela perda de água da hidratação dos cristais de cimento, o concreto se torna mais poroso e gera redução no volume da pasta, enquanto os agregados continuam a dilatar. Essa variação volumétrica torna-o suscetível ao surgimento de microfissuras que, ao se propagarem, levam-no a ruptura com cargas bem inferiores àquelas suportadas antes de sofrer os efeitos da temperatura elevada.

Quanto a massa específica, o concreto leve estudado pode ser considerado concreto leve estrutural, pois, para os três traços, os valores de massa específica ficaram entre 1400 kg/m^3 e 1800 kg/m^3 , e com exceção do traço B sem fibras, apresentaram resistência a compressão média acima de 17Mpa. A perda de água descrita anteriormente diminui a massa do concreto exposto a elevadas temperaturas em relação ao concreto no estado normal, afetando diretamente os resultados da massa específica.

Comprovou-se a ocorrência do efeito *spalling* quando os gases das ligações químicas e vapor d'água liberados, impedidos de chegar a superfície, geraram tensões internas de tração na peça. Essa tensão foi tão elevada que, causou o deslocamento e explosão em um dos corpos de prova ensaiados.

De modo geral, a adição das fibras de polipropileno causou um pequeno aumento na resistência a compressão do concreto, tanto no estado normal, quanto para o exposto às elevadas temperaturas. O aumento ocorreu devido a redução do volume inicial das fibras, após o derretimento, que deixou um caminho por meio do qual os gases conseguiram sair do interior da peça, impedindo o deslocamento do material devido as pressões internas.

Para a temperatura de 900°C, o aumento de resistência a compressão proporcionado com a adição das fibras de polipropileno não foi significativo, visto que a resistência da matriz de cimento foi totalmente comprometida devido a elevada porosidade apresentada por essa amostra. A alta porosidade dos corpos de prova expostos a 900°C comprometeu tanto o material, que os valores de resistência encontrados foram inferiores a 25% da resistência original.

Observou-se que não ocorreram casos de *spalling* para o concreto com adição de fibras submetido a elevação da temperatura. Também houve redução da dimensão e da quantidade de fissuras em comparação ao concreto sem adição de fibras.

Analisando visualmente os corpos de prova, constatou-se modificação na sua coloração, em função da temperatura a qual foram submetidos. A alteração na coloração do concreto pode ser relacionada à perda de resistência do material devido ao calor, e pode servir como um parâmetro de inspeção.

Houve também diferença na coloração do agregado leve em função da variação da temperatura, relacionada à absorção de parte da matriz de cimento pela argila expandida, e da variação da coloração da matriz, no interior do agregado.

A utilização de fibras de polipropileno e da argila expandida como agregado graúdo em concretos leves estruturais, se mostrou vantajosa apenas quando associada ao baixo peso próprio proporcionado as estruturas. A argila expandida não causou alterações significativas no desempenho do concreto exposto a elevadas temperaturas, em comparação ao concreto convencional. Entretanto, para obter resultados mais precisos, deve-se realizar o estudo da transferência de calor no interior da peça de concreto.

Além da perda de suas propriedades mecânicas, é importante destacar que a durabilidade do concreto será diretamente afetada, na ocorrência de um incêndio, pela elevada porosidade apresentada após exposição do concreto às elevadas temperaturas e pela ocorrência do *spalling*, que pode deixar a armadura exposta a intempéries, reduzindo ainda mais a capacidade resistente da estrutura.

Como sugestão para futuros trabalhos, a autora recomenda uma maior diferença entre as relações água/cimento estudadas, de forma que os resultados de resistência a compressão estejam em um intervalo maior, possibilitando melhor compreensão das disparidades de cada traço; realizar os ensaios para maiores e diferentes idades, para analisar sua interferência na resistência a compressão de

concretos expostos a elevadas temperaturas; estudar a transferência de calor no interior da peça de concreto, e para a situação onde apenas uma face está exposta as elevadas temperaturas, de forma a associar com o isolamento térmico proporcionado pelo material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete. **ASTM C 330 – 77**. Philadelphia, 1991.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5737**: Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Agregados: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – preparo, controle e recebimento – procedimentos. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821**: Preparação de concreto em laboratório. Rio de Janeiro, 1993.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13860**: Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações– Procedimento. Rio de Janeiro, 2000.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 1997.

ANM - ASSOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 35**: Agregados leves para concreto estrutural – especificação. 1995.

ANM - ASSOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. 2002.

AWA, Comercial. **Microfibra de polipropileno**. Disponível em: < <http://awacomercial.com.br/produtos/microfibra-de-polipropileno/>>. Acesso em: 21 de Agosto de 2017.

BAUER, Luiz A. F. **Materiais de construção**. V1. 5 ed. Rio de Janeiro, 2012.

BENTZ, Dale P. **Fibers, percolation, and spalling of high-performance concrete**. ACI Materials Journal-American Concrete Institute 97.3. 2000.

BRITEZ, Carlos Amado; COSTA, Carla Neves. Ações do fogo nas estruturas de concreto. IBRACON. **Concreto: ciência e tecnologia**. Cap. 29. São Paulo – SP, 2011.

CÁNOVAS, Manuel Fernández. **Patologia e terapia do concreto armado**. Cap. 8. Pini. São Paulo, 1988.

CINEXPAN. **Argila expandida**. Disponível em: < <http://www.cinexpan.com.br/fabrica-argila-expandida.html>>. Acesso em 21 de Maio de 2017.

CEB – COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **Design of concrete structures for fire resistance: preliminar draft of an appendix to the CEB-FIP model code**. Lausanne, 1982.

COSTA, Carla Neves. **Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio**. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP). São Paulo – SP. 2008.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues. Concreto com fibras. IBRACON. **Concreto: ciência e tecnologia**. Cap.37. São Paulo – SP, 2011.

FIB – FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Fire design of concrete structures – materials, structures and modeling – State-of-art report**. Lausanne, fib 2007.

GORNINSKI, Jane Proszek. Concreto com polímeros. IBRACON. **Concreto: ciência e tecnologia**. Cap. 44. São Paulo – SP, 2011.

HALLIDAY, David. **Fundamentos de física**, volume 1. 8ª Ed. Rio de Janeiro. 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 834 - Fire resistance tests – Elements of building construction -- Part 11: Specific requirements for the assessment of fire protection to structural steel elements. 2014.

SOUSA JUNIOR, F. R.; SILVA, W. E.; SANTOS, D. A. S.; BEZERRA, A. J. V. **Estudo de dosagem de concreto leve com uso de argila expandida: análise de resistência a compressão**. Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte, 2016.

LIMA, R. C. A.; KIRCHOF L. D.; CASONATO, C. A.; FILHO, L. C. P. S.; **Efeito das altas temperaturas no concreto**. Artigo – Grupo de pesquisas LEME – UFRGS. II Seminário de patologia das edificações. Porto Alegre, 2004. Disponível em: <http://www.deecc.ufc.br/Download/TB819_Patologia_e_Recuperacao_de_Estruturas_de_Concreto/Efeito_do_fogo_no_concreto.pdf>. Acesso em 23 de Maio de 2017.

LIMA, Rogério C. A. de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 257f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2005

LUCENA, Júlio Cesar Tavares de. **Concreto reforçado com fibras e polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP. São Carlos, 2017.

MEHTA, Povindar K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Pini, 1994.

MORÁVIA, Weber Guadagnin. **Comportamento térmico e avaliação microestrutural de concretos leves produzidos com argila expandida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte, 2004.

MORITA, T. et al. **An estimation method for fire resistance concrete elements considering spalling**. *Proceedings... of the 1st fib Congress*. 2002.

NORMA DE PROCEDIMENTO TÉCNICO. **NPT 003**: Terminologia de segurança contra incêndio. Corpo de Bombeiros, Paraná. 2014.

ONGAH, R. MENDIS, P. A.; SANJAYAN, J. G. **Fire performance of high strength reinforced concrete walls**. AUSTRALIAN CONFERENCE ON THE MECHANICS OS STRUCTURES AND MATERIALS. Austrália, 2002.

PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista Concreto & Construções**. IBRACON, nº53. São Paulo – SP, 2009.

RODRIGUES, Públio PF; MONTARDO, Júlio P. **A influência da adição de fibras de polipropileno nas propriedades dos concretos para pisos e pavimentos**. 44º Congresso Brasileiro de Concreto. IBRACON, Belo Horizonte. 2002.

ROSSIGNOLO, João A.; AGNESINI, Marcos V. C. Concreto leve estrutural. IBRACON. **Concreto: ciência e tecnologia**. Cap. 42. São Paulo – SP, 2011.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SANTOS, W. N. **Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida**. Matéria. Rio de Janeiro, 2010.

SCOBAR, Renan Luna. **Concreto leve estrutural: substituição do agregado graúdo convencional por argila expandida**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Departamento de Construção Civil – UTFPR. Campo Mourão, 2016.

TANESI, Jussara; DE FIGUEIREDO, Antonio Domingues. **Fissuração por retração em concretos reforçados com fibras de polipropileno**. EPUSP, 1999.

TORRES, Alexandre J.; FERREIRA, Osny P. **Influência da alta temperatura na resistência mecânica do concreto leve de alto desempenho**. V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2003.

VIANNA, Cleverson Tabajara. **Classificação das pesquisas científicas**. Notas para alunos. Florianópolis, 2003. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/cleversontabajara1/metodologia-cientifica-tipos-de-pesquisa-ultimate>>. Acesso em: 14 de Junho de 2017.

ANEXOS

ANEXO A – TEMPOS REQUERIDOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF), EM MINUTO

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Profundidade do subsolo		Altura da edificação				
			Classe S ₂ h _s > 10 m	Classe S ₁ h _s " 10 m	Classe P ₁ h " 6 m	Classe P ₂ 6 m < h " 12 m	Classe P ₃ 12 m < h " 23 m	Classe P ₄ 23 m < h " 30 m	Classe P ₅ h > 30 m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60 (30)	30	30	60	90	120
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60 (30)	60	90	120
C	Comercial varejista	C-1 a C-3	90	60	60 (30)	60 (30)	60	90	120
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60 (30)	30	30	60	90	120
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6 e F-8	90	60	60 (30)	60	60	90	120
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
		G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60 (30)	30	30	30	30	60
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1 a H-5	90	60	30	60	60	90	120
I	Industrial	I-1	90	60 (30)	30	30	60	90	120
		I-2	120	90	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120
J	Depósitos	J-1	90	60 (30)	30	30	30	30	60
		J-2	120	90	60	60	90 (60)	120 (90)	120

Fonte: NBR 14432, 2000.

ANEXO B - BOLETIM DE ENSAIOS DE CIMENTO

Boletim de Ensaio de Cimento



Atualizado em:	30/06/2017	Produto:	CPV-ARI	Norma:	NBR 5733
Mês e ano de referência:	mai/17	Marca:	Votoran	Unidade:	Rio Branco

Ensaio	Químicos				Físicos e mecânicos										
	Teores (%)				Finura (%)		Baixa	Agulha	Tempo Pega		Impedimento à	Resistência Compressão (MPa)			
	PF	MgO	SO3 para C ₃ A+I	RI	#200	#325	(cm ² /g)	consist. (%)	Início (min)	Fim (min)	queda (mm)	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias
Limites de Norma	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,5	≤ 1,0	≤ 6,0	N/A	≥ 3000	N/A	≥ 60	≤ 900	≤ 5,0	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	N/A
01/05/2017															
02/05/2017	3,2	6,0	3,4	0,9	0,0	0,3	4940	29,6	210	270	0,0	25,4	36,6	42,4	49,5
03/05/2017	3,2	6,1	3,3	0,9	0,0	0,4	4940	29,6	210	270	0,5	25,0	37,3	43,9	50,7
04/05/2017	3,3	6,1	3,3	0,6	0,0	0,3	4920	30,2	220	290	0,5	24,1	37,5	43,8	51,9
05/05/2017	3,6	6,1	3,3	0,8	0,0	0,5	4970	30,0	230	290	0,0	25,2	36,8	40,6	49,0
06/05/2017															
07/05/2017															
08/05/2017	3,5	6,1	3,4	0,8	0,0	0,3	5010	29,2	210	285	0,0	24,5	36,6	42,6	49,2
09/05/2017	3,3	6,1	3,5	0,7	0,0	0,4	4920	29,2	190	240	0,5	25,7	36,2	42,7	49,7
10/05/2017	3,4	6,2	3,3	0,7	0,0	0,3	5010	29,2	190	260	0,0	25,2	37,5	43,5	51,4
11/05/2017	3,3	6,1	3,4	0,7	0,0	0,3	4990	29,4	200	280	0,5	25,5	37,4	42,8	51,0
12/05/2017	3,3	6,3	3,3	0,4	0,0	0,5	4900	29,8	180	240	0,0	25,7	36,6	42,3	49,0
13/05/2017															
14/05/2017															
15/05/2017	2,8	6,3	3,3	0,4	0,0	0,3	4900	30,0	200	260	0,5	26,0	37,3	42,7	51,7
16/05/2017	3,3	6,2	3,2	0,3	0,0	0,3	4780	30,3	210	275	0,5	25,1	36,8	43,0	50,5
17/05/2017	3,3	6,2	3,2	0,3	0,0	0,3	4960	30,2	200	260	0,5	25,0	37,0	42,6	50,5
18/05/2017	3,4	6,3	3,3	0,6	0,0	0,5	4960	29,6	200	260	0,5	24,9	36,2	43,8	51,5
19/05/2017	3,1	6,3	3,5	0,5	0,0	0,6	5090	29,2	195	255	0,0	25,4	37,4	41,3	51,6
20/05/2017															
21/05/2017															
22/05/2017	3,0	6,4	3,3	0,6	0,0	0,5	4920	29,2	195	250	0,5	25,9	36,7	42,8	50,5
23/05/2017	3,2	6,3	3,4	0,6	0,0	0,6	4990	29,2	200	260	0,0	26,3	37,3	44,1	51,8
24/05/2017	3,0	6,2	3,5	0,5	0,0	0,5	5010	29,2	205	265	0,5	26,0	36,4	43,6	50,7
25/05/2017	3,2	6,3	3,3	0,9	0,0	0,4	4990	29,6	210	270	0,5	26,0	37,8	43,8	51,8
26/05/2017	3,3	6,3	3,6	0,5	0,0	0,3	5100	29,6	240	300	0,5	25,4	37,6	42,7	50,9
27/05/2017															
28/05/2017															
29/05/2017	3,5	6,2	3,3	1,0	0,0	0,4	5030	29,6	230	290	0,0	25,8	39,2	44,7	53,6
30/05/2017	3,2	5,6	3,2	0,9	0,0	1,3	5010	30,0	240	305	0,0	22,5	34,0	40,6	49,9
31/05/2017	3,3	6,0	3,4	0,7	0,0	0,6	4940	30,0	210	270	0,0	27,0	37,2	42,9	51,6
Média	3,3	6,2	3,4	0,6	0,0	0,5	4950	29,6	208	268	0,3	25,5	37,0	42,9	50,8
Desvio Padrão	0,2	0,2	0,1	0,2	0,0	0,2	83	0,4	16	17	0,3	1,1	1,0	1,0	1,1
Mínimo	2,8	5,6	3,2	0,3	0,0	0,3	4780	29,2	180	240	0,0	22,5	34,0	40,6	49,0
Máximo	3,6	6,4	3,6	1,0	0,0	1,3	5100	30,3	240	305	0,5	28,3	39,2	44,7	53,6

Observações:

ME= 3,08 g/cm³

Abílio Estevão Galli Junior

Nome
Responsável Controle de Qualidade
Votorantim Cimentos S/A

Thomas Rheinegger

Nome
Gerente de 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

Fonte: VOTORANTIN.

ANEXO C - CARACTERÍSTICAS DA ARGILA EXPANDIDA



Características

CLASSES GRANULOMÉTRICAS NOMINAIS	3222	2215	1506	0500	LAM. 2,5
Resistência à compressão por esmagamento (MPa)	6	8	12	20	< 2
Massa volumétrica seca (kg/m ³)	450	500	600	850	750
Classes granulométricas (mm)	22 - 32	15 - 22	6 - 15	0 - 5	0 - 2,5
Condutibilidade térmica (kcal/(hm°C))	0,11				
Absorção de água por imersão (% em volume 24h)	10	10	7	6	10
Compactabilidade (%)	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Resistência ao fogo	Imcombustível: classe MO				
Variações ponderáveis em ambientes seco/úmido	Material não higroscópico *				
Massa específica (kg/dm ³)	0,56	0,64	1,11	1,4	1,51

* Material inerte químico - não reage com outros produtos

Fonte: CINEXPAN.

APÊNDICES

APÊNDICE A – TABELAS COM AS PROPORÇÕES E QUANTIDADE DE
MATERIAIS PARA CADA TRAÇO CONFECCIONADO

Tabela 14 - Quantidade de materiais para o traço A

Material	ρ (g/cm³)	Traço (kg)	Traço (dm³)	Massa (kg)	Volume (dm³)
Cimento	3,08	1,000	0,325	6,000	1,948
Areia	2,64	1,400	0,530	8,400	3,182
Argila Exp	1,11	0,500	0,450	3,000	2,703
Água	1,00	0,450	0,450	2,700	2,700
Fibra	0,91	0,006	0,007	0,036	0,040
Total Sem Fibra				20,100	10,533
Total Com Fibra				20,136	10,572

Fonte: autoria própria.

Tabela 15 – Proporções do traço A

a/c	0,45
Teor de argamassa (%)	65,49
Teor de argila (%)	25,66

Fonte: autoria própria.

Tabela 16 - Quantidade de fibras para confecção do traço A

Vol CP (m ³)	0,00020
Vol 13 CP (m ³)	0,00255
Vol conc. (m ³)	0,01053
Vol rest. (m ³)	0,00798
Vol fibra (m ³)	3,99001E-05
Massa fibra (kg)	0,0363

Fonte: autoria própria.

Tabela 17 - Quantidade de materiais para o traço B

Material	ρ (g/cm³)	Traço (kg)	Traço (dm³)	Massa (kg)	Volume (dm³)
Cimento	3,08	1,000	0,325	6,000	1,948
Areia	2,64	1,400	0,530	8,400	3,182
Argila Exp	1,11	0,500	0,450	3,000	2,703
Água	1,00	0,500	0,500	3,000	3,000
Fibras	0,91	0,006	0,007	0,038	0,041
Total Sem Fibra				20,400	10,833
Total Com Fibra				20,438	10,874

Fonte: autoria própria.

Tabela 18 - Proporções do traço B

a/c	0,5
Teor de argamassa (%)	65,49
Teor de argila (%)	24,95

Fonte: autoria própria.

Tabela 19 - Quantidade de fibras para confecção do traço B

Vol CP	0,00020
Vol 13 CP	0,00255
Vol conc.	0,01083
Vol rest.	0,00828
Vol fibra	4,14001E-05
Massa fibra (kg)	0,0377

Fonte: autoria própria.

Tabela 20 - Quantidade de materiais para o traço C

Material	ρ (g/cm ³)	Traço (kg)	Traço (dm ³)	Massa (kg)	Volume (dm ³)
Cimento	3,08	1,000	0,325	6,000	1,948
Areia	2,64	1,400	0,530	8,400	3,182
Argila Exp	1,11	0,500	0,450	3,000	2,703
Água	1,00	0,550	0,550	3,300	3,300
Fibras	0,91	0,007	0,007	0,039	0,043
Total Sem Fibra				20,700	11,133
Total Com Fibra				20,739	11,175

Fonte: autoria própria.

Tabela 21 - Proporções do traço C

a/c	0,55
Teor de argamassa (%)	65,49
Teor de argila (%)	24,28

Fonte: autoria própria.

Tabela 22 - Quantidade de fibras para confecção do traço C

Vol CP	0,00020
Vol 13 CP	0,00255
Vol conc.	0,01113
Vol rest.	0,00858
Vol fibra	4,29001E-05
Massa fibra (kg)	0,0390

Fonte: autoria própria.

APÊNDICE E – TABELAS COMPLEMENTARES

Tabela 23 - Dados complementares ao Erro! Fonte de referência não encontrada.

Fonte: autoria própria.

Tabela 24 - Dados complementares ao Gráfico 3
Distribuição Granulométrica da Argila Expandida

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (g)	Percentual acumulado (%)
19,0	0	0
12,5	237,91	4,76
9,5	3349,50	71,75
6,3	1062,22	92,99
4,8	346,78	99,93
2,4	0,00	99,93
1,2	0,04	99,93
0,6	0,02	99,93
0,3	0,02	99,93
0,2	0,00	99,93
0,0	1,08	99,95
Σ	4997,57	99,95
DMC (mm)		12,5

Fonte: autoria própria.

Tabela 25 - Dados complementares ao Gráfico 7, Gráfico 8, e Gráfico 10.

Traço	Temp. (°C)	Média da Massa Específica (kg/m³)	
		Sem fibras	Com fibras
A	20	1574,15	1677,14
	300	1402,96	1486,80
	600	1390,97	1444,95
	900	1359,69	1362,57
B	20	1501,45	1653,16
	300	1364,35	1457,60
	600	1289,91	1433,15
	900	1280,73	1406,33
C	20	1480,04	1655,51
	300	1246,54	1436,49
	600	1245,39	1437,24
	900	1241,84	1408,40

Fonte: autoria própria.

Tabela 26 - Dados complementares à Tabela 11

Temp. (°C)	Perda de resistência (Mpa)					
	Traço A		Traço B		Traço C	
	Sem Fibras	Com fibras	Sem Fibras	Com fibras	Sem Fibras	Com fibras
300	5,25	7,40	0,48	4,56	6,14	4,46
600	13,03	15,72	11,59	14,12	15,37	15,23
900	16,29	21,24	12,29	16,57	16,46	17,41

Fonte: autoria própria.

Tabela 27 - Dados complementares ao Gráfico 13

Temp. (°C)	TRAÇO A			
	Sem fibras		Com fibras	
	Massa Esp. (kg/m³)	Resistência (Mpa)	Massa Esp. (kg/m³)	Resistência (Mpa)
20	1574,15	18,40	1677,14	23,27
300	1402,96	15,18	1486,80	14,99
600	1390,97	7,15	1444,95	8,92
900	1359,69	4,20	1362,57	3,56

Fonte: autoria própria.

Tabela 28 - Dados complementares ao Gráfico 14

TRAÇO B				
Temp. (°C)	Sem fibras		Com fibras	
	Massa Esp. (kg/m³)	Resistência (Mpa)	Massa Esp. (kg/m³)	Resistência (Mpa)
20	1501,45	14,17	1653,16	20,04
300	1364,35	13,94	1457,60	15,57
600	1289,91	3,75	1433,15	5,72
900	1280,73	2,98	1406,33	3,25

Fonte: autoria própria.

Tabela 29 - Dados complementares ao Gráfico 15

TRAÇO C				
Temp. (°C)	Sem fibras		Com fibras	
	Massa Esp. (kg/m³)	Resistência (Mpa)	Massa Esp. (kg/m³)	Resistência (Mpa)
20	1480,04	16,50	1655,51	19,87
300	1246,54	11,99	1436,49	15,63
600	1245,39	3,46	1437,24	5,52
900	1241,84	2,89	1408,40	3,36

Fonte: autoria própria.