

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES MINERAIS NO
COMPORTAMENTO DO CONCRETO SOB A AÇÃO DO
FOGO**

Marcos Fernando Gabrich

Belo Horizonte

2008

Marcos Fernando Gabrich

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES MINERAIS NO
COMPORTAMENTO DO CONCRETO SOB AÇÃO DO FOGO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Área de concentração: Materiais de Construção Civil

Linha de pesquisa: Materiais cimentícios

Orientador: Prof. Abdias Magalhães Gomes

Co-orientador: Prof. Antônio Neves C. Júnior

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES MINERAIS NO COMPORTAMENTO
DO CONCRETO SOB AÇÃO DO FOGO

Marcos Fernando Gabrich

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes
DEMC/UFMG-(Orientador)

Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior
DEMC/UFMG-(Co-Orientador)

Profa. Dra. Carmen Couto Ribeiro
DEMC/UFMG

Dr. Carlos Augusto de Souza Oliveira
Prefeitura Municipal de Belo Horizonte

Belo Horizonte, 03 de junho de 2008

À Deus,

à minha família,

ao Prof. Abdias

e Prof. Dalmo.

AGRADECIMENTOS

Quero deixar registrado aqui, minha gratidão a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a conclusão do curso de mestrado, que se concretiza com a apresentação do presente trabalho, fruto de um belo e desafiante período de estudos.

Expresso, primeiramente, minha devoção a Deus, de onde, através dos ensinamentos Bíblicos, busquei forças para enfrentar as dificuldades apresentadas pela vida durante este período, possibilitando estar hoje, concluindo o curso de Mestrado em Construção Civil.

À minha mãe Gardênia, ao meu irmão Hugo, ao meu filho Lucas, pela compreensão, apoio e incentivo dispensados. Ao meu pai, in memoria, pelo exemplo de vida e dedicação com a nossa família.

Ao Prof. Abdias Magalhães Gomes, pelos seus ensinamentos ministrados dentro e fora da sala de aula, referentes aos conhecimentos técnicos e conceitos humanitários, dignos do meu reconhecimento e admiração.

Ao Prof. Antônio Neves de Carvalho Júnior, que sempre prestativo, colaborou de modo significativo na condução, e co-orientação, deste trabalho.

Meu agradecimento especial, ao Prof. Dalmo Lúcio Mendes Figueiredo, que acreditou em meu potencial, contribuindo de modo positivo no meu ingresso ao curso de especialização, origem de meu interesse pelo curso de mestrado.

Ao Prof. Adriano e à Prof^a Maria Tereza, pelos ensinamentos adquiridos e a atenção dispensada, transmitindo confiança e amizade.

À Rosiana Barbosa pelo incentivo, e aos colegas do curso pela solidariedade e companheirismo. Aos funcionários do Laboratório de Materiais, Ricardo e Machado e a todos os funcionários e professores do Departamento de Materiais de Construção, pela seriedade e dedicação.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	lx
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
RESUMO	xv
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Introdução e Objetivos	17
1.2 Justificativa e relevância do tema	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Concreto	20
2.2 Tipos de concreto	20
2.3 Constituintes do concreto	21
2.3.1 Agregados	21
2.3.2 Cimento Portland	22
2.3.3 Aditivos	23
2.3.4 Água	23
2.3.5 Adições Minerais	23
2.3.5.1 Escória de alto-forno	25
2.3.5.2 Metacaulim	27
2.3.5.3 Sílica ativa	29
2.4 Propriedades do concreto no estado endurecido	30
2.4.1 Massa específica ou densidade	30
2.4.2 Resistência	31
2.4.3 Permeabilidade	32
2.4.4 Propriedades térmicas	32
2.4.4.1 Condutibilidade térmica	33
2.4.4.2 Calor específico	33
2.4.4.3 Dilatação térmica	33
2.4.4.4 Resistência ao fogo	34
2.5 Comportamento do concreto com adições quando submetido ao incêndio	37
2.6 Transferência de energia	39

3	METODOLOGIA DE TRABALHO	41
3.1	Composições e traços selecionados	41
3.1.1	Traços utilizados	41
3.2	Comentário sobre os traços utilizados	45
3.3	Seleção e caracterização dos materiais e equipamentos utilizados	45
3.3.1	Cimento	46
3.3.2	Agregado miúdo	46
3.3.3	Agregado graúdo	47
3.3.4	Água	48
3.3.5	Aditivo	48
3.3.6	Adições minerais	49
3.3.6.1	Escória de alto-forno ácida	49
3.3.6.2	Escória de alto-forno básica de alta reatividade	50
3.3.6.3	Sílica ativa	50
3.3.6.4	Metacaulim	51
3.3.7	Caracterização do equipamento utilizado	52
3.3.7.1	Betoneira	52
3.3.7.2	Balanças eletrônicas	53
3.3.7.3	Equipamento para teste por frequência ressonância	54
3.3.7.4	Picnômetro a “laser”	54
3.3.7.5	Estufa	55
3.3.7.6	Prensa hidráulica	55
3.3.7.7	Maçarico	56
3.4	Metodologia de produção dos concretos	57
3.5	Ensaio realizados	57
3.5.1	Ensaio de difusividade no interior do concreto	57
3.5.2	Ensaio de resistência à compressão simples	58
3.5.3	Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico	59
3.5.4	Ensaio de absorção d’água por imersão total	59
3.5.5	Ensaio de resistência a tração por compressão diametral	60
4	APRESENTAÇÃO E DISCUÇÃO DOS RESULTADOS	61
4.1	Apresentação dos resultados	61

4.1.1	Ensaio de difusividade no interior do concreto	61
4.1.2	Ensaio de resistência à compressão simples	65
4.1.3	Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico	65
4.1.4	Ensaio de absorção d'água por imersão total	66
4.1.5	Ensaio de resistência a tração por compressão diametral	66
4.2	Análise dos resultados	67
4.2.1	Difusividade no interior do concreto	67
4.2.2	Resistência à compressão simples	83
4.2.3	Módulo de elasticidade dinâmico	90
4.2.4	Absorção d'água por imersão total	94
4.2.5	Resistência a tração por compressão diametral	95
5	ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS	97
6	CONCLUSÕES FINAIS	103
7	SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS	105
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Comparação entre as diferentes densidades dos aglomerantes	29
Figura 2.2- Comparação entre a queda de resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto em função da elevação da temperatura	36
Figura 2.3 - Princípio da transferência de energia em um corpo semitransparente à radiação	40
Figura 3.1 – Betoneira	52
Figura 3.2 – Balança eletrônica, capacidade 20 kg e precisão 0,1g	53
Figura 3.3 – Balança eletrônica, capacidade 50 kg e precisão 50g	53
Figura 3.4 – Equipamento de medição do módulo de elasticidade dinâmico por frequência ressonante	54
Figura 3.5 – Picnômetro a “laser”, com leitura digital	54
Figura 3.6 – Estufa utilizada para aquecer os Corpos de prova	55
Figura 3.7 – Prensa hidráulica	56
Figura 3.8 – Maçarico	56
Figura 3.9 – Corpo-de-prova sendo aquecido com maçarico – Ponto “O”	58
Figura 4.1 – Corpos de prova após aquecimento localizado, realizado com maçarico	69
Figura 4.2 – Concreto C-3- linha d’água aparece na altura do ponto de aplicação do fogo	69
Figura 4.3 - Concreto C-4- linha d’água aparece na altura do ponto de aplicação do fogo	70
Figura 4.4 – Comparação do comportamento do concreto referência (CR) com o concreto C-1, no ponto “O”	70
Figura 4.5 - Comparação do comportamento do concreto referência (CR) com o concreto C-2, no ponto “O”	71
Figura 4.6 - Comparação do comportamento do concreto referência (CR) com o concreto C-3, no ponto “O”	71
Figura 4.7 - Comparação do comportamento do concreto referência (CR) com o concreto C-4, no ponto “O”	72
Figura 4.8 - Comparação do comportamento do concreto referência (CR) com o concreto C-5, no ponto “O”	72

Figura 4.9 – Gráfico temperatura em função do tempo, no ponto “O”	73
Figura 4.10 – Comparação do comportamento do concreto referência (CR) com o concreto C-1, no ponto “X”	73
Figura 4.11 – Comparação do comportamento do concreto referência (CR) com o concreto C-2, no ponto “X”	74
Figura 4.12 – Comparação do comportamento do concreto referência (CR) com o concreto C-3, no ponto “X”	74
Figura 4.13 – Comparação do comportamento do concreto referência (CR) com o concreto C-4, no ponto “X”	75
Figura 4.14 – Comparação do comportamento do concreto referência (CR) com o concreto C-5, no ponto “X”	75
Figura 4.15 – Gráfico temperatura em função do tempo no Ponto “X”, dos concretos referência (CR), C-1, C-2, C-3, C-4 e C-5	76
Figura 4.16 - Comparação do comportamento do concreto referência (CR) com o concreto C-1, no ponto “Y”	76
Figura 4.17 - Comparação do comportamento do concreto referência (CR) com o concreto C-2, no ponto “Y”	77
Figura 4.18 - Comparação do comportamento do concreto referência (CR) com o concreto C-3, no ponto “Y”	77
Figura 4.19 - Comparação do comportamento do concreto referência (CR) com o concreto C-4, no ponto “Y”	78
Figura 4.20 - Comparação do comportamento do concreto referência (CR) com o concreto C-5, no ponto “Y”	78
Figura 4.21 – Gráfico temperatura em função do tempo no Ponto “Y”, dos concretos CR, C1, C2, C3, C4 e C5	79
Figura 4.22 – Velocidade de propagação do calor no concreto referência (CR), partindo do ponto de incidência do mesmo, até os pontos X e Y, eqüidistantes	80
Figura 4.23 – Velocidade de propagação do calor no concreto C-1, partindo do ponto de incidência do mesmo, até os pontos X e Y, eqüidistantes	81
Figura 4.24 – Velocidade de propagação do calor no concreto C-2, partindo do ponto de incidência do mesmo, até os pontos X e Y, eqüidistantes	81

Figura 4.25 – Velocidade de propagação do calor no concreto C-3, partindo do ponto de incidência do mesmo, até os pontos X e Y, eqüidistantes	82
Figura 4.26 – Velocidade de propagação do calor no concreto C-4, partindo do ponto de incidência do mesmo, até os pontos X e Y, eqüidistantes	82
Figura 4.27 – Velocidade de propagação do calor no concreto C-5, partindo do ponto de incidência do mesmo, até os pontos X e Y, eqüidistantes	83
Figura 4.28 – Resistência à compressão simples, em MPa, do concreto referência (CR)	87
Figura 4.29 - Resistência à compressão simples, em MPa, do concreto C-1	87
Figura 4.30 - Resistência à compressão simples, em MPa, do concreto C-2	88
Figura 4.31 - Resistência à compressão simples, em MPa, do concreto C-3	88
Figura 4.32 - Resistência à compressão simples, em MPa, do concreto C-4	89
Figura 4.33 - Resistência à compressão simples, em MPa, do concreto C-5	89
Figura 4.34 – Resumo dos dados referentes ao ensaio de compressão simples, para todos os traços de concreto em estudo	90
Figura 4.35 – Comparação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto (CR) com o concreto C1	91
Figura 4.36 – Comparação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto (CR) com o concreto C2	92
Figura 4.37 – Comparação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto (CR) com o concreto C3	92
Figura 4.38 – Comparação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto (CR) com o concreto C4	93
Figura 4.39 – Comparação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto (CR) com o concreto C5	93
Figura 4.40 – Comparação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto (CR) com os concretos C1, C2, C3, C4 e C5	94
Figura 4.41- Comparação do ensaio de absorção d'água por imersão, nos traços de concreto em estudo, nas idades de 28 e 90 dias (após o aquecimento)	95
Figura 4.42- Comparação do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, dos Corpos de prova em estudo, antes e após o aquecimento	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Comparação entre a queda de resistência à compressão e o módulo de elasticidade, em função da elevação da temperatura	36
Tabela 3.1- Relação dos traços de concreto utilizados	42
Tabela 3.2- Consumo de aglomerante, em kg/m ³ de concreto	44
Tabela 3.3- Distribuição granulométrica da areia utilizada na produção dos concretos	46
Tabela 3.4- Distribuição granulométrica da brita utilizada na produção dos concretos	47
Tabela 3.5- Especificações química e física da escória de alto-forno normal	49
Tabela 3.6- Especificações química e física da escória de alto-forno de alta reatividade	50
Tabela 3.7- Especificações química e física da sílica ativa	51
Tabela 3.8- Especificações química e física do metacaulim	51
Tabela 4.1- Medição da temperatura nos pontos “O”, “X” e “Y” em função do tempo	63
Tabela 4.2- Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 90 dias	65
Tabela 4.3- Módulo de elasticidade dinâmico aos 3, 7, 28 e 90 dias	65
Tabela 4.4- Absorção relativa de água por imersão dos Corpos de prova em tanque d’água, à temperatura ambiente	66
Tabela 4.5- Resistência à tração por compressão diametral dos concretos realizadas segundo os traços: CR, C1, C2, C3, C4 e C5	66
Tabela 4.6- Resistência média à tração do concreto, referente aos traços CR, C1, C2, C3, C4 e C5, aplicando a equação apresentada no item 3.5.5	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al_2O_3 - Alumina
 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ - Caulinita
CaO- Cal
 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Hidróxido de cálcia
°C- Graus centígrados
 CO_2 - Dióxido de carbono
CP- Corpo-de-prova
CPL- Cimento Portland
CP V-ARI- Cimento Portland V de alta resistência inicial
CR- Concreto de referência
C1- Concreto executado segundo o traço 1
C2- Concreto executado segundo o traço 2
C3- Concreto executado segundo o traço 3
C4- Concreto executado segundo o traço 4
C5- Concreto executado segundo o traço 5
C-S-H- Silicato de cálcio hidratado
DMC- Dimensão máxima característica
EAFABR- Escória de alto-forno básica de alta reatividade
EAFA- Escória de alto-forno ácida
 E_c - Módulo de elasticidade
 f_c - Resistência à compressão
 Fe_2O_3 - Óxido de ferro
 f_{ck} - Resistência característica à compressão do concreto
 $f_{ct,m}$ - Resistência média a tração do concreto
k cal- quilocaloria
 K_2O - Óxido de potássio
 MgO - Óxido de magnésio
MPa- Mega Pascal
 Na_2O - Óxido de sódio
O- Ponto de aplicação do calor no corpo-de-prova
S- Sílica ativa

SO_3 - Anidrido sulfúrico

SiO_2 - Sílica

TiO_2 - Óxido de titânio

X- Ponto de medição da temperatura, oposto ao ponto “O”

Y- Ponto de medição da temperatura, na base superior do corpo-de-prova

RESUMO

O presente trabalho avaliou o comportamento de concretos produzidos a partir de diferentes adições minerais quando submetidos a temperaturas elevadas de ocorrência típica em incêndios. Foram moldados corpos-de-prova representativos de concretos contendo apenas cimento CP V (ARI - alta resistência inicial) e outros, de mesma formulação, mas com substituição parcial do aglomerante cimento por escória de alto-forno de baixa reatividade (ácida); escória de alto forno de alta reatividade (básica); sílica ativa e metacaulim. Na idade de 90 dias, os corpos-de-prova foram submetidos a um fogo localizado, através de um maçarico, sendo realizadas medições das temperaturas registradas em pontos distintos das amostras. Posteriormente foram avaliadas a resistência à compressão; a resistência à tração por compressão diametral; o módulo de elasticidade dinâmico e a absorção de água por imersão total. Foi avaliada o fluxo de calor transmitido através do corpo de prova. O comportamento desses corpos-de-prova foram comparados com exemplares de referência, que não continham adições. Os resultados mostram uma maior sensibilidade ao aquecimento nos concretos com sílica ativa e, invariavelmente, uma redução da resistência mecânica e do módulo de elasticidade e um aumento da absorção de água por imersão total, para todos os corpos-de-prova expostos a temperaturas elevadas. Em relação ao fluxo de calor transmitido através do concreto que contém, como aglomerantes, cimento Portland e sílica ativa bem como através do concreto composto por cimento Portland, sílica ativa e escória de alto-forno de alta reatividade (básica), verificou-se que estes apresentaram um comportamento diferenciado do restante dos concretos estudados, na medida em que aqueles propagaram o calor de forma mais lenta.

Palavras-chave: concreto, adições minerais, incêndio, ensaios de resistência mecânica, fluxo de calor através do concreto.

ABSTRACT

The present study assessed the behavior of concrete produced from mineral additions when subjected high temperatures typical occurrence in fire. Representative specimens were shaped using only Portland cement CP V- ARI as binder, and others, with the same amount of binder, but replacement cement by mineral additions like blast furnace slag low reactivity, blast furnace slag high reactivity (basic) silica fume and metakaolim. After 90 days, the specimens were submitted to a fire located through a blowtorch, being carried out measurements of temperatures recorded in different points of the sample. Subsequently were evaluated compressive strength, tensile strength by diametral compression, dynamics elasticity of the modal, and absorption of water by total immersion. It was evaluated the flow of heat transmitted through the specimen. The specimens' behavior with mineral additions were compared with specimens without mineral additions. Results showed that there is a sensitivity to fire in concretes with silica fume and invariably a reduction of mechanical strength and dynamic elasticity module. Not only that, but an increase in the absorption of water by total imersion, for all specimens. Regarding the flow of heat through the concrete containing as binders Portland cement and silica fume as well as through the concrete composed of Portland cement, silica fume and blast furnace slag high reactivity (basic), it was found that they had to behave differently from the rest of the concretes studied, because those concretes spread the heat on a slower.

Key-word: concrete, mineral additions, fire, mechanical strength tests, flow of heat through the concrete

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução e Objetivos

As medidas adotadas para garantir a segurança contra incêndio em todos os campos da atividade humana sempre representam custos adicionais significativos, que na maioria das vezes são dispensados em função de uma avaliação econômica superficial. Considerando que a segurança das pessoas jamais pode ser desprezada, deve-se levar em conta também os danos diretos causados pelo fogo ao atingir, além do edifício, os equipamentos, os arquivos e outros conteúdos. É relevante ainda, considerar os danos indiretos, como interrupção do trabalho, custo de reorganização da empresa e perda do mercado (DIVISÃO DE EDIFICAÇÕES DO IPT, 1995).

As perdas por incêndios constituem uma carga crescente em todos os países, influenciando diretamente na economia nacional. As mortes, famílias desabrigadas e desemprego produzido por incêndio constituem uma carga social que não pode passar despercebida. Por esse motivo, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas, no sentido de estudar o comportamento do concreto ao ser submetido à temperaturas de incêndio, objetivando prevenir colapsos estruturais (CÁNOVAS, 1988).

Pode-se dizer que o concreto tem boas características no que diz respeito à resistência ao fogo, isto é, o concreto não é combustível, é relativamente longo o período de tempo de exposição ao fogo durante o qual ele continua a ter desempenho satisfatório, além de não expelir gases tóxicos quando do seu aquecimento (NEVILLE, 1997).

O concreto ao ser exposto ao fogo, adquire alterações em sua estrutura interna, desenvolvendo-se tensões de origem térmica que podem chegar a provocar a sua desintegração. Um parâmetro importante nas ocorrências de incêndio é o tempo em que a estrutura fica submetida ao mesmo. Uma exposição prolongada provocará a evaporação da água capilar, da água fisicamente adsorvida, da água interlamelar e

da água de constituição, respectivamente. Ao chegar nesta última, ocorrerá a desintegração total da matriz do concreto.

O uso de superplastificantes e adições minerais na produção de concreto, também influencia a resposta deste à situação de incêndio. A sílica ativa, muito utilizada no CAD, induz o aparecimento do fenômeno “Spalling” ou lascamento.

O modo utilizado para se avaliar a ação deletéria do fogo sobre o concreto, neste estudo, foi realizar ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade dinâmico, absorção d'água por imersão total e medir a temperatura do concreto antes e após o seu aquecimento.

Face ao exposto, e com a crescente utilização de adições minerais como aglomerantes na produção de concretos, em substituição parcial ao tradicional cimento, com a finalidade de melhorar a trabalhabilidade desses no estado fresco e aumentar o desempenho de suas propriedades mecânicas no estado endurecido, proporcionando uma maior durabilidade, além de reduzir impactos ambientais, o presente trabalho busca avaliar, de forma comparativa, o comportamento dos concretos, com e sem adições minerais, quando submetidos a incêndio com temperaturas até 900°C.

Assim sendo, são os seguintes objetivos específicos a alcançar:

- Avaliar algumas propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com e sem substituição de cimento por adições minerais, à temperatura ambiente;
- Comparar a massa específica aparente; a absorção de água; as resistências à compressão simples e diametral; o módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com e sem adições, quando submetidos a temperatura de até 900°C;
- Observar o comportamento do fluxo de calor no interior dos diferentes tipos de concreto, quando esses são submetidos à ação do fogo, atingindo temperaturas de até 900°C.

1.2 Justificativas e relevância do Tema

O estudo da ação do fogo sobre estruturas de concreto tem sua importância alicerçada no fato de ser este um agente que representa grandes riscos de destruição e debilitação de uma edificação. Considerando os perigos que atingem os ocupantes e os danos materiais que um incêndio pode causar, precauções devem ser tomadas para que tal fato não ocorra.

E é neste sentido que este trabalho se reveste de importância, pois pretende contribuir para a compreensão do comportamento de concretos produzidos com a utilização de adições minerais em substituição ao cimento Portland, quando os mesmos são submetidos à ação do fogo intenso.

Apesar do concreto ser classificado como material incombustível e não exalar gases tóxicos quando aquecido, é notório que patologias decorrentes da ação do fogo acabem por proporcionar a redução de sua capacidade de suporte, durabilidade e solidez. Nessas condições, o uso de determinadas adições, dentre elas: metacaulim, escória de alto forno básica, escória de forno ácida e sílica ativa, pode modificar o comportamento da estrutura.

Um outro fato relevante a ser destacado é que o concreto executado nos últimos 40 anos apresenta-se menos resistente e mais poroso se comparado ao produzido nos dias atuais. Isso se deve ao uso de superplastificante, adições minerais e cimento mais fino, que acabam por proporcionar ao concreto produzido atualmente, uma maior resistência e compacidade e, por consequência, uma menor porosidade. Comparativamente, o concreto produzido no passado apresentava melhor comportamento (solidez e estabilidade) quando sob a ação de um incêndio. Hoje, as estruturas de concreto podem sofrer maior perda na capacidade de suporte em função de sua maior compacidade. Portanto, faz-se necessário estudar o comportamento do concreto contendo adições minerais, quando esse é atingido pelo fogo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto

De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994) o concreto é um material de construção constituído por mistura em proporções definidas de cimento Portland com areia, brita e água. Apresenta três importantes qualidades:

- Excelente resistência à água, ao contrário do aço comum e da madeira que deterioram em presença da mesma.
- Fácil moldabilidade. As estruturas de concreto são executadas em diversas formas e tamanhos, devido à característica do concreto fresco possuir consistência plástica. Quando o concreto endurece, após algumas horas, torna-se resistente e suas fôrmas podem ser retiradas.
- Baixo custo. O seu custo é baixo, uma vez que seus constituintes, cimento Portland e agregados são relativamente baratos e encontrados na maior parte do mundo.

2.2 Tipos de concretos

São várias as classificações dos concretos. A seguir é apresentada a classificação dos concretos quanto à massa específica e quanto à resistência a compressão, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994):

Segundo a massa específica:

- Concreto leve: é aquele cuja massa específica é inferior a 1800 kg/m^3 , sendo produzido com agregados de baixa densidade.
- Concreto normal ou concreto convencional: é aquele cuja massa específica está entre 2300 e 2400 kg/m^3 , sendo produzido com areia natural e seixos rolados ou pedra britada.

- Concreto pesado: é aquele cuja massa específica é superior a 3200 kg/m³, produzidos a partir de agregados de alta densidade.

Segundo a resistência à compressão aos 28 dias:

- Concreto de baixa resistência: apresenta resistência à compressão menor que 20 MPa.

- Concreto de resistência moderada: possui resistência à compressão de 20 a 40 MPa.

- Concreto de alta resistência: resistência à compressão superior a 40 MPa.

2.3 Constituintes do concreto

Segundo PETRUCCI (1980) o concreto é um material composto por cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, além dos aditivos e adições que atualmente estão sendo muito empregados, proporcionando ao concreto propriedades especiais.

2.3.1 Agregados

Os agregados constituem um componente importante no concreto, contribuindo com cerca de 80% do peso do concreto estrutural. Não devem reagir com o cimento e devem ser estáveis aos agentes que irão entrar em contato com o concreto. Normalmente têm resistência à compressão muito superior à da argamassa de concreto. Os agregados desempenham papel importante quando é exigido do concreto alta resistência à abrasão. A forma dos grãos do agregado graúdo influi na qualidade do concreto, ao lhe alterar a trabalhabilidade. E por fim, as impurezas, presentes principalmente no agregado miúdo é prejudicial à qualidade do concreto. Assim discorre sobre o assunto BAUER (1995).

(a) Agregado graúdo

Segundo PETRUCCI (1980), agregado graúdo é o pedregulho natural, seixo rolado ou pedra britada, proveniente do britamento de rochas estáveis, com um máximo de 15% passando na peneira de 4,8mm. Devem ter grãos resistentes, duráveis e inertes, não conter impurezas que prejudiquem o endurecimento do aglomerante e apresentar boa composição granulométrica. Devem ainda apresentar uma forma de grãos compatível com as exigências da obra e nunca apresentar mais de 15% de grãos lamelares.

(b) Agregado miúdo

Ainda segundo PETRUCCI (1980), define-se agregado miúdo como areia natural quartzosa ou pedrisco resultante do britamento de rochas estáveis, ficando no máximo de 15% das partículas retidas na peneira de 4,8mm. Dentre as propriedades do agregado miúdo, tais como, massa específica e peso unitário, umidade de absorção, inchamento e granulometria, esta última tem uma grande influência nas propriedades futuras das argamassas e concretos confeccionados com esse agregado.

2.3.2 Cimento Portland

É um aglomerante hidráulico produzido a partir da moagem do clínquer, constituído principalmente de silicato de cálcio hidratado, com uma certa quantidade de sulfato de cálcio. O clínquer é produzido a partir do aquecimento de uma mistura de matérias-primas até à temperatura de fusão, (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

De acordo com BAUER (1995), o cimento Portland é constituído principalmente pela Cal (CaO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃), Óxido de Ferro (Fe₂O₃), certa proporção de magnésia (MgO) e pequena porcentagem de gesso (SO₃), que é adicionado após a calcinação para retardar o tempo de pega do produto. Em pequena quantidade, temos ainda as impurezas: Óxido de Sódio (Na₂O), Óxido de Potássio (K₂O), Óxido de Titânio (TiO₂), além de outras substâncias de menor importância.

2.3.3 Aditivos

Segundo PETRUCCI (1980), os aditivos são substâncias químicas que adicionadas ao concreto, reforçam ou melhoram certas características do mesmo. Os aditivos podem ser aplicados em diferentes casos como: aumento da resistência à compressão, melhora na trabalhabilidade e impermeabilidade, diminuição da retração, etc.

MARTIN (2005) define os aditivos como sendo “materiais adicionados ao concreto durante o processo de mistura em uma quantidade não superior aos 5% sobre a massa do cimento contido no concreto, para modificar as propriedades da mistura no estado fresco e/ou no estado endurecido”. Ainda segundo MARTIN (2005), dentre as vantagens de se usar aditivos, destacam-se a redução de água, a aceleração ou redução da pega, a incorporação de ar ao concreto, a redução do efeito da corrosão e da reação alcali-agregado, etc.

O aditivo superplastificante atua através da repulsão eletrostática, dispersando as partículas de cimento, e conseqüentemente, reduzindo a quantidade de água necessária para alcançar a trabalhabilidade desejada.

NEVILLE (1982), resalta que o aditivo superplastificante praticamente não interfere no módulo de elasticidade, à durabilidade de concreto exposto aos sulfatos, fluência, e resistência ao congelamento e degelo.

HELENE e ANDRADE (2007) acrescentam que os aditivos, principalmente os superplastificantes, são utilizados nos dias atuais, para produzir concretos de alta resistência ou concretos auto-compactáveis.

O superplastificante à base de policarboxilato, aditivo de 3ª geração, atua de forma mais eficiente nas partículas de cimento, proporcionando maior redução da água necessária à produção do concreto, do que os superplastificantes normais.

2.3.4 Água

PETRUCCI (1980) diz que a água usada no amassamento do concreto não deve conter impurezas que possam vir a reagir com os componentes do cimento.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), a água pode estar presente na pasta de várias formas:

- água capilar, presente nos vazios maiores e chamadas de água livre;
- água adsorvida, próxima à superfície do sólido, e sob a influência de forças de atração dos sólidos da pasta;
- água interlamelar
- água quimicamente combinada, ou seja, a água que faz parte da estrutura de vários produtos hidratados do cimento

2.3.5 Adições minerais

Segundo MARISTELA GOMES DA SILVA (2007), as adições minerais podem ser divididas em três categorias, ou seja, materiais cimentícios, materiais pozolânicos e materiais não reativos. A escória de alto-forno pertence à categoria de materiais cimentícios, já o metacaulim e a sílica ativa são pozolânicos. Na categoria de materiais não reativos podemos dar como exemplo o filer calcário. Assim, os materiais cimentantes e pozolânicos, interagem química e fisicamente com os produtos da hidratação do cimento Portland, modificando a microestrutura da pasta.

MEHTA e MONTEIRO (1994) definem como materiais pozolânicos, aqueles silicosos ou silico-aluminosos que possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas quando finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes.

As adições minerais mais utilizadas na produção de concretos são a escória de alto-forno e a sílica ativa. No Brasil, o uso do metacaulim encontra-se em estado menos avançado.

A escória de alto-forno é material cimentante que é um subproduto da fabricação de ferro fundido; a sílica ativa, pozolana de alta reatividade é um subproduto resultante do processo de obtenção do ferro silício e silício metálico; e o metacaulim, também pozolana de alta reatividade derivada da calcinação de argilas cauliníticas.

Essas adições são utilizadas em substituição parcial do cimento Portland, objetivando desse modo reduzir custos, melhorar a trabalhabilidade e coesão do concreto fresco, aumentar a resistência mecânica do concreto endurecido, tais como compressão, cisalhamento e tração; aumentar a resistência a abrasão, e resistividade elétrica e contribuir com a redução de emissão de dióxido de carbono na atmosfera. É significativo também, em concretos com adições minerais, a redução da porosidade e absorção, qualidades essa que determinam maior durabilidade do concreto. Entretanto, segundo SILVA (2007), apesar das mencionadas adições melhorarem a microestrutura da zona de transição, esse fato não resulta em melhoria no módulo de elasticidade do concreto, que é mais influenciado pelas características do agregado. Como as adições são menos densas que o cimento, ocorrerá o aumento do teor de pasta, conseqüentemente o módulo reduz na mesma proporção do teor de adição mineral em substituição ao cimento.

As adições minerais acima mencionadas, interferem quimicamente no processo de hidratação do cimento, reagindo com o hidróxido de cálcio livre, presente na pasta de cimento, dando origem assim ao C-S-H, que é um composto mais estável quimicamente e mecanicamente mais resistente. Além disso, as adições minerais, por possuírem partículas de pequeno tamanho, ocupam os espaços vazios deixados pela pasta de cimento, reduzindo sua porosidade, exsudação, segregação e contribuindo para a retenção da água utilizada na mistura. Essa ação da adição mineral no concreto é denominada “EFEITO MICROFILLER”.

2.3.5.1 Escória de alto-forno

É um subproduto da fabricação do ferro fundido, que ao ser resfriado bruscamente, adquire estrutura vítrea e forma granular. A escória de alto-forno é constituída pelos óxidos de cálcio, silício e alumínio; os mesmos do cimento Portland, porém em proporções diferentes (OLIVEIRA e GOMES, 2004).

Segundo SILVA (2007), a escória de alto-forno pode ser classificada por meio da relação CaO/SiO_2 , ou seja, quando essa relação for maior do que 1, significa que a escória é básica e quando for menor do que 1 a escória é ácida. As escórias produzidas em fornos a carvão vegetal são ácidas e se resfriadas bruscamente, após a moagem, podem ser utilizadas como adição mineral. Já as produzidas em alto-fornos a carvão coque são básicas, sendo estas, no Brasil, utilizadas para produção de cimento.

MALHOTRA (1987) define cinco fatores que influenciam a reatividade da escória de alto-forno, que são o seu grau de vitrificação, sua composição química, sua finura, o emprego de formas de ativação que pode ser química, física ou térmica e sua composição mineralógica.

A fase vítrea da escória de alto-forno está diretamente relacionada com sua reatividade, ou seja, quanto maior o teor de vidro, melhor será a hidratação.

SILVA (2007) afirma que o desempenho mecânico está diretamente relacionado à solubilidade da escória de alto-forno e à composição química dos produtos de hidratação resultantes das reações entre ativadores e a fração vítrea. No que se refere à finura, sua influência é significativa na reatividade da escória de alto-forno, uma vez que partículas mais finas resultam em aumento da superfície específica, acelerando assim a dissolução do vidro, e afetando tanto a pega quanto a resistência mecânica. O método mais utilizado para determinar a superfície específica da escória de alto-forno é o método de Blaine e para avaliar a distribuição granulométrica é a granulometria a laser. A superfície específica da escória de alto-forno normalmente utilizada como adição ao cimento está entre 400 e 500 m^2/kg .

A escória de alto-forno, ao contrário das pozolanas naturais, possui hidraulicidade própria e sua energia interna pode ser usada na formação de produtos hidratados semelhantes aos originados da hidratação do cimento Portland, mesmo sem a presença do hidróxido de cálcio. SILVA (2007) acrescenta a essa afirmação o fato de que a velocidade das reações de hidratação da escória de alto-forno é muito lenta, e que a quantidade de produtos hidratados formados não é suficiente ao seu uso como material cimentício sem o emprego de uma forma de ativação, que pode ser química, física ou térmica. A ativação química, promovida principalmente pelo clínquer Portland em meio aquoso e com pH elevado é a que apresenta melhor resultado. Já a ativação física está relacionada com o aumento da finura e conseqüentemente da superfície específica da escória de alto-forno. Por fim a ativação térmica é obtida elevando-se a temperatura da mistura escória-água. Conforme CAMARINI, 1995 e SILVA, 1998, para teores de escória de alto-forno variando entre 40% e 80%, a cura térmica acelera a hidratação e o endurecimento dos cimentos, compensando o lento ganho de resistência quando comparado à cura à temperatura ambiente.

No que se refere à composição mineralógica, MALHOTRA (1987) afirma que pequenas alterações na composição química podem provocar grandes efeitos na composição mineralógica do cimento Portland. Afirma ainda que a composição mineralógica da escória vítrea é mais importante que a composição química, influenciando aquela, significativamente na reatividade e na determinação de suas propriedades hidráulicas.

Segundo OLIVEIRA e GOMES (2004) a reatividade da escória de alto-forno depende também do processo de granulação desta, ou seja, quanto mais rápido a escória é resfriada, menos cristais são formados, produzindo um sólido amorfo, que depois de seco e moído, é misturado ao cimento. Acrescentam ainda que a escória de alto-forno, quando resfriada bruscamente, conserva no estado sólido, a estrutura do líquido, mantendo-se deste modo no estado amorfo (granulação da escória), e armazenando grande energia química, em decorrência da não cristalização. Esse fato torna a escória mais reativa. Portanto, com maior aptidão para entrar em combinação com o cimento, na temperatura ambiente. Esta explicação, conforme mencionado por OLIVEIRA e GOMES (2004), foi apresentada por Le Châtelier.

A escória de alto-forno pode ser classificadas como ácida ou básica. Esta classificação se baseia fundamentalmente na relação entre os óxidos de cálcio presente e de silício, denominado módulo cálcio/sílica (CaO/SiO_2), ou seja:

- relação $\text{Ca}/\text{SiO}_2 \leq 1,1$ indica a presença de escória ácidas e não tão reativas;
- relação $\text{Ca}/\text{SiO}_2 > 1,1$ indica a presença de escória básicas e reativas.

Desta forma, quanto maior for o valor do módulo, tão mais reativa será a escória. Um outro fato que propicia a melhoria na reatividade das escórias é a granulação, normalmente utilizada pelos produtores de gusa quando da sua geração. A granulação consiste em um resfriamento brusco das escórias (geralmente obtido através da água) que proporciona a obtenção de fases menos cristalinas e mais amorfas, fato que propicia a redução na granulometria, tornando-a muito parecida com uma areia quartzosa comumente utilizada como agregado miúdo na produção de concretos.

2.3.5.2 Metacaulim

É uma pozolana de alta reatividade, em fase amorfa, que reage com o hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento Portland, formando compostos quimicamente estáveis e mecanicamente mais resistente.

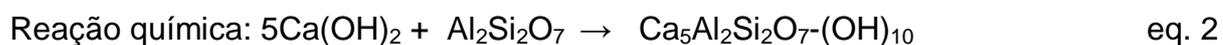
É um produto derivado da calcinação de argilas caulínicas e foi desenvolvido inicialmente na Europa em meados da década de 80. Em seu processo de produção, busca-se alcançar a máxima reatividade quando adicionados a concretos de cimento Portland. O metacaulim é constituído basicamente de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) na fase amorfa, tendo como característica principal a sua reatividade e elevada atividade pozolânica, proporcionando assim, alta reatividade com o hidróxido de cálcio presente no concreto. Em função de suas características químicas e físicas, o metacaulim melhora as propriedades mecânicas dos concretos de cimento Portland.

O processo de produção do metacaulim inicia-se na jazida, onde é retirado o material que será beneficiado, para obter a caulinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, que após passar por um processo de secagem, entra na etapa da calcinação, produzindo $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$.

Esse material passa para a etapa seguinte que é a moagem, atingindo uma área específica aproximadamente igual a 6.000 cm²/g. Em seguida é processada a etapa final onde realiza-se a micronização e separação granulométrica, alcançando a matéria prima inicial uma área superficial específica próxima de 220.000 cm²/g,

As partículas do metacaulim têm a forma lamelar, caracterizando-se por ser um material muito fino, com finura superior à do clínquer moído de cimento Portland. O metacaulim, em função do pequeno tamanho de suas partículas, ocupa os espaços vazios existentes na pasta de cimento, reduzindo desse modo sua porosidade e contribuindo para a retenção da água utilizada na mistura. Desta maneira o metacaulim contribui para a melhor hidratação do cimento, reduz as fissuras causadas por capilaridade e pela secagem durante a cura do concreto.

O metacaulim reage com o hidróxido de cálcio livre da pasta de cimento, formando compostos mais estáveis quimicamente, aumentando assim a resistência mecânica do concreto. Esse processo pode ser representado pelas equações 1 e 2, a saber:



As reações químicas iniciam-se após o fim da pega do cimento, terminando quando todo o metacaulim da mistura reagir com o hidróxido de cálcio livre na pasta.

HELENE e MEDEIROS (2004) mostraram em seu trabalho que existe uma grande diferença entre as densidades do cimento Portland e o metacaulim, como pode ser verificado na Figura 2.1. Quando realizamos a substituição de um material mais denso (cimento Portland) por um menos denso (metacaulim), ocorrerá a redução da densidade do concreto no estado fresco, o que implicará em redução do consumo de aglomerantes no concreto que possui essa adição.



Figura 2.1 – Comparação entre diferentes densidades dos aglomerantes: cimento CP V – ARI PLUS (esquerda-60g) com relação ao metacaulim (direita-60g)

2.3.5.3 Sílica ativa

Segundo MALHOTRA (1987), a sílica ativa possui estrutura amorfa, contém 85% a 98% de SiO_2 , possui elevada finura, pois o tamanho de suas partículas variam entre 0,1 a 0,2 μm e seu formato é esférico. Salienta ainda que a sílica ativa é usada em duas diferentes situações, quais sejam, como substituto do cimento Portland para obter redução na quantidade do mesmo ou como adição para melhorar as propriedades do concreto tanto no estado fresco como no estado endurecido.

A sílica ativa é um subproduto resultante do processo de obtenção do ferro silício e silício metálico, o que garante ser homogênea e sem variações em sua composição química e física. No forno elétrico, carregado com quartzo (SiO_2) e redutores (C), é gerado um gás (SiO) que ao sair deste, oxida-se formando a sílica amorfa (SiO_2), que é captada em filtros de manga e em seguida armazenada em silos pressurizados para densificação.

A sílica ativa, com seu alto teor de SiO_2 e elevada finura, o seu diâmetro é 100 vezes menor que o do cimento, age ativamente de duas formas no concreto, ou seja, quimicamente e fisicamente.

A sílica ativa reage com o hidróxido de cálcio livre da pasta de cimento, formando compostos mais estáveis quimicamente, aumentando assim a resistência mecânica do concreto. Esse processo pode ser representado pelas equações 3, 4 e 5 abaixo discriminadas;



A superfície específica da sílica ativa é, em média, $20.000\text{m}^2/\text{kg}$, enquanto a do cimento varia de 350 a $600\text{m}^2/\text{kg}$.

Segundo MALHOTRA (1987) a sílica ativa é considerada uma pozolana muito reativa e possui uma alta capacidade de incorporar íons, principalmente álcalis. A sílica ativa também age ativamente no concreto através do “efeito filer”, distribuindo o produto de hidratação de modo mais homogêneo, no espaço disponível, aumentando a coesão, promovendo a comatação dos vazios, reduzindo a exsudação e a segregação. Através dessas duas ações, química e física, a sílica ativa proporciona um grande refinamento na zona de transição da pasta de cimento hidratado com o agregado.

2.4 Propriedades do concreto no estado endurecido

2.4.1 Massa específica ou densidade

Segundo PETRUCCI (1980) a massa específica dos concretos comuns é a massa da unidade de volume incluindo os vazios, e para agregados normais, varia de 2.300 a $2.500 \text{kg}/\text{m}^3$, sendo adotado usualmente o primeiro para o concreto simples e o último para concreto armado. Quando é utilizado agregado leve, a massa específica

é reduzida para aproximadamente 1.800 kg/m^3 , e concretos executados com agregado pesado, como barita, a massa específica alcança valores da ordem de 3.700 kg/m^3 .

2.4.2 Resistência

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), a resistência de um material é definida como a capacidade de este resistir à tensão sem ruptura. A ruptura é algumas vezes identificada com o aparecimento de fissuras. Lembra ainda que o concreto contém microfissuras antes mesmo de ser submetido a tensões externas. A resistência é relacionada com a tensão requerida para causar a fratura.

Nos projetos de estrutura de concreto, a resistência é a propriedade especificada, porque é relativamente fácil de ser ensaiada e tem correlação com diversas outras propriedades como: módulo de elasticidade, estanqueidade, impermeabilidade, resistência às intempéries, podendo, portanto, essas propriedades serem deduzidas a partir dos dados da resistência. Existe uma relação fundamental inversa entre porosidade e resistência; embora a porosidade existente na argamassa de cimento endurecido possa ser relacionada à resistência, a presença de microfissuras na zona de transição entre agregado gráudo e a pasta de cimento, torna o concreto um material muito complexo e a relação resistência – porosidade muitas vezes não é válida.

A escolha dos materiais constituintes do concreto reflete na resistência, assim como as proporções dos mesmos.

A resistência varia com o inverso da relação água/cimento; o ar incorporado, devido ao adensamento inadequado, aumenta a porosidade e reduz a resistência do concreto. O tipo de cimento, o fator água/cimento e o grau de hidratação do cimento determinam a porosidade da pasta de cimento endurecida. Nos agregados, o tamanho, forma, textura da superfície, granulometria e mineralogia, influenciam na resistência do concreto. As condições de carregamento têm influência importante na resistência, pois uma estrutura de concreto pode ser submetida a uma carga permanente por um período indefinido; as cargas cíclicas ou as cargas de impacto,

apresentam em cada caso, na estrutura, comportamento distinto. As resistências à compressão e à tração estão intimamente relacionadas, contudo, não há uma proporcionalidade direta. À medida que a resistência à compressão do concreto aumenta, a resistência à tração também aumenta, mas há um velocidade decrescente.

2.4.3 Permeabilidade

Segundo BAUER (1992), o concreto é um material obrigatoriamente poroso. Os vazios presentes são de origens diversas, ou seja, excesso de água de mistura necessária à obtenção de trabalhabilidade conveniente, diminuição do volume absoluto que acompanha a hidratação dos constituintes do cimento, ar eventualmente ou propositadamente arrastado durante a operação de mistura, fissuras de diversas origens, térmicas, de retração, mecânica, má elaboração e má dosagem do material, responsáveis pelo aparecimento de vazios de maior dimensão. Como esses vazios são geralmente interligados, o concreto é normalmente permeável aos líquidos e gases.

O grau de permeabilidade do concreto é importante na construção de obras hidráulicas, e na determinação da durabilidade da estrutura de concreto, uma vez que a mesma pode sofrer ação de agentes agressivos. A ação dos agentes agressivos é tanto menor quanto menor for a permeabilidade do concreto.

Define-se, portanto permeabilidade do concreto à água e outros líquidos, pela quantidade de água que atravessa uma superfície unitária, numa espessura unitária durante a unidade de tempo, e sob pressão unitária ($l/m^2.h$).

2.4.4 Propriedades térmicas

A condutibilidade, o calor específico, a dilatação térmica e a capacidade de resistência ao fogo englobam as características térmicas do concreto, assim define BAUER (1992).

2.4.4.1 Condutibilidade térmica

Segundo BAUER (1992), os concretos usuais conduzem melhor o calor do que os concretos de baixa densidade. É, portanto, usual, relacionar o coeficiente de condutibilidade térmica dos concretos às suas respectivas densidades.

MEHTA E MONTEIRO (1992) a definem como o fluxo de calor transmitido através de uma área unitária de um material sob um gradiente de temperatura unitário. A condutibilidade térmica do concreto é influenciada pelas características mineralógicas do agregado, pelo conteúdo de umidade, massa específica e temperatura do concreto.

Um termo muito empregado no meio científico para caracterizar a condutividade térmica é a difusividade térmica, que pode ser definida como: “ o significado físico da difusividade térmica está associado à propagação do calor no meio, durante as variações de temperatura com o tempo. Quanto mais alta a difusividade térmica, mais rápida a propagação de calor no meio” (ÖZISIK, 1990).

2.4.4.2 Calor específico

Segundo BAUER (1992), o calor específico dos concretos usuais varia com a temperatura e com o teor de água entre limites relativamente estreitos, de 0,20 a 0,25 kcal / kg °C. Esse valor é utilizado no cálculo da Evolução Térmica do Concreto em grandes massas durante a cura.

Para MEHTA e MONTEIRO (1994) o calor específico é definido como a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa de um material em um grau.

2.4.4.3 Dilatação térmica

Ainda segundo BAUER (1992), o coeficiente de dilatação térmica do concreto é um valor mal determinado até o momento. Os manuais recomendam o valor $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ para o concreto e $11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ para o aço. Os concretos ricos em cimento têm coeficiente de dilatação térmica maiores que os magros. A dilatação térmica

depende da seção transversal da peça, em consequência da velocidade relativamente lenta de propagação das temperaturas no interior do concreto.

Para MEHTA e MONTEIRO (1994), o coeficiente de dilatação térmica é definido como a variação na unidade de comprimento por grau de temperatura.

A escolha de um agregado como baixo coeficiente de dilatação térmica é um fator de prevenção de fissuras em concreto massa.

2.4.4.4 Resistência ao fogo

BAUER (1992) diz que a estrutura quando sujeita a incêndio, ou seja, submetida a elevadas temperaturas em um curto espaço de tempo, experimenta grandes variações destas, inclusive choques térmicos de resfriamento.

Para analisar esse comportamento, torna-se necessário, inicialmente, analisar os diversos constituintes do concreto frente a variações de temperatura.

A água presente no concreto aparece em três condições diferentes:

- Água ligada quimicamente, que realizou a hidratação dos constituintes anidros do cimento;
- Água ligada fisicamente, adsorvida, água zeolítica e água de cristalização;
- Água no estado livre, que ocupa mais ou menos parcialmente os poros por capilaridade e porosidade.

Quando a temperatura alcança pouco mais de 100°C, ocorre a evaporação da água livre e de uma parte da água ligada fisicamente. Nessa altura as resistências mecânicas se alteram pouco. Essa desidratação conduz, entretanto, a uma diminuição de volume, uma retração, que se traduz no aumento do risco de ocorrência de microfissuras. A utilização de agregados apropriados pode corrigir esses inconvenientes.

Se a temperatura não ultrapassar 300°C, a constituição química dos componentes do concreto não será alterada. A perda de água limitar-se-á às parcelas fisicamente ligadas. A água de constituição do hidróxido de cálcio só é eliminada em temperaturas superiores a 400°C. Ocorre, a partir daí, uma queda apreciável na resistência à compressão, e mais acentuada ainda no módulo de elasticidade residual do concreto, . A Tabela 2.1 mostra o efeito da elevação da temperatura sobre a resistência à compressão e sobre o módulo de elasticidade (Calixto, 2005). Esse resultado pode ser melhor visualizado através do gráfico apresentado na Figura 2.2.

Nos casos comuns de emprego de cimento Portland artificial e agregados usuais, o concreto conserva suas qualidades mecânicas, com pequenas reduções, até uma temperatura entre 250 e 300°C, em temperaturas mais elevadas é preferível a utilização de cimento cuja hidratação não produza muito hidróxido de cálcio, cimento aluminoso e pozolânico. O hidróxido de cálcio, sendo destruído quando a temperatura ultrapassa 400°C, é responsável por perturbações importantes no aglomerante. O teor de magnésio é importante, pois pode desenvolver fenômenos de inchamento em caso de desidratação e reidratação sucessivas. É importante destacar ainda, que os concretos mais ricos em cimento ficam mais sujeitos aos riscos de retração. A 900 °C o aglomerante se encontra em risco de destruição. Esse fenômeno é menos grave e ocorre mais lentamente do que a tendência dos agregados a se dilatarem, provocando o aparecimento de fissuras.

Tabela 2.1 – Comparação da queda de resistência a compressão e módulo de elasticidade em função da elevação da temperatura (CALIXTO, 2005).

Temperatura (°C)	Cor do concreto	f_c residual (% do f_c inicial)	E_c residual (% do E_c inicial)
20	Cinza	100	100
200	Cinza	95	90
300	Rosa	85	72
400	Rosa	75	56
500	Rosa	60	36
600	Vermelho	45	20
900	Cinza avermelhado	8	1
1000	Amarelo	4	0

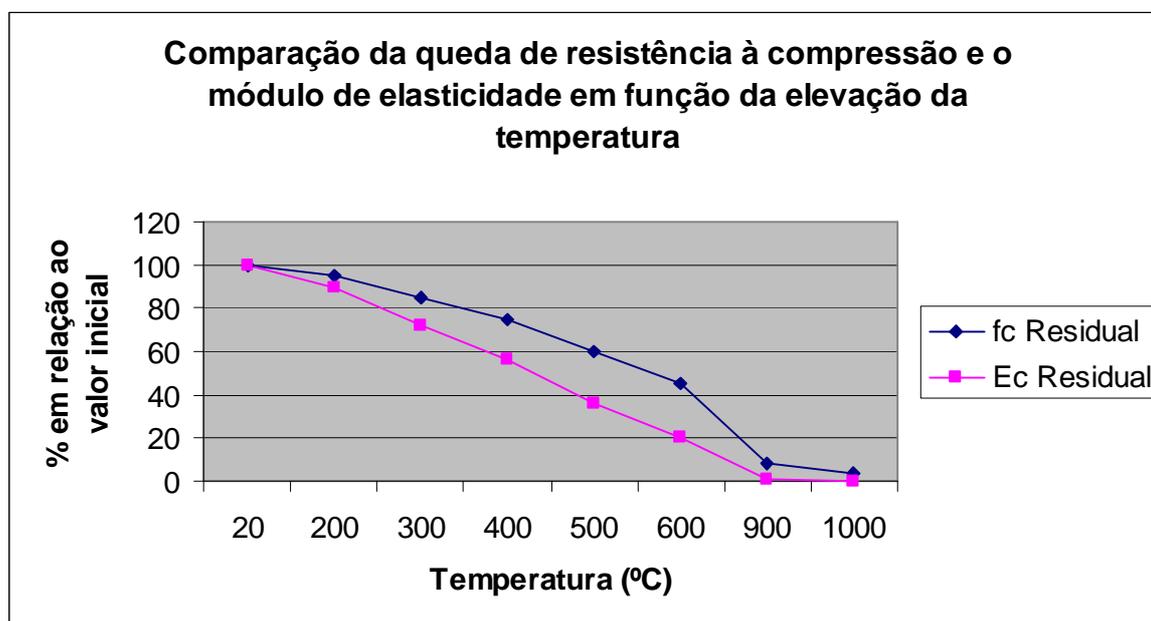


Figura 2.2- Comparação da queda de resistência a compressão e módulo de elasticidade do concreto em função da elevação da temperatura (CALIXTO, 2005).

Os agregados e os outros constituintes do concreto, têm coeficiente de dilatação desiguais, resultando fraca resistência às elevações de temperaturas quando os primeiros (agregados) têm coeficientes mais elevados. Quando a temperatura é elevada lentamente e não ultrapassa 300°C, os agregados comuns, silicosos, são convenientes por proporcionarem uma certa correção à retração pela sua dilatação maior. Em temperaturas mais elevadas, a dilatação excessiva dos agregados é responsável pela ocorrência de fissuração excessiva. A 550°C a sílica se transforma em uma variedade alotrópica, inchando consideravelmente. A cerca de 900°C, os agregados calcários bem resistentes até aí podem-se decompor, liberando CO₂, CaO e MgO.

Um método eficiente para determinar a situação da estrutura de concreto submetida a um incêndio é o da Auscultação Dinâmica, que consiste em medir a velocidade do som através dos elementos duvidosos da estrutura, o que permite fazer a partir das medidas efetuadas, uma estimativa satisfatória da resistência mecânica do concreto. Este método consiste em medir a velocidade do som através das peças de concreto, quando possível, ou entre pontos variáveis da superfície das mesmas. Sabendo-se que o concreto deteriorado ou fraturado é responsável pela diminuição da velocidade de propagação do som, é possível pelo exame da variação dessa velocidade, quer por transparência, quer superficialmente, localizar as trincas internas e a profundidade das camadas do material atingido gravemente.

2.5 Comportamento do concreto com adições quando submetido ao incêndio

As adições minerais, tais como as estudadas neste trabalho escória de alto-forno, metacaulim e sílica ativa, interferem nas propriedades físicas e mecânicas do concreto fresco e endurecido (NEVILLE, 1997).

VERONEZ et al (2006), em seu trabalho, compara a utilização das adições minerais, sílica ativa e metacaulim, na produção de concreto, chegando à conclusão de que ambas as adições são equivalentes, apresentando propriedades físicas e mecânicas semelhantes, tanto no estado fresco quanto endurecido. Baseado em trabalhos como esse, busca-se aqui, encontrar explicações referente ao

comportamento de concretos produzidos com essas adições e outras como escória de alto-forno, quando submetidas a altas temperaturas – incêndio.

Segundo GIACCIO et al (2005), os danos causados ao concreto, quando este é exposto a altas temperaturas, estão relacionados com as diferenças entre o coeficiente de dilatação térmica dos agregados e da pasta. Afirma também que até a temperatura de 105°C, ocorre a perda de água com retração da pasta e em temperaturas superiores, a expansão dos agregados se sobrepõe à retração da pasta, provocando a dilatação do concreto. Em seu trabalho, verificou-se que a rigidez é mais afetada pela elevação da temperatura do que a resistência a compressão, conforme mencionado anteriormente.

O trabalho apresentado por COSTA et al (2002), aborda os efeitos do aumento da temperatura em estruturas de concreto, verificando-se a ocorrência de esforços adicionais que interferem nas propriedades físicas e mecânicas do mesmo, reduzindo principalmente a sua rigidez e resistência à compressão. Segundo menciona KALIFA et al (2000), o excesso de água presente na pasta de cimento Portland influencia no aparecimento de trincas decorrentes da contração ocorrida inicialmente (temperatura até 100°C), e a vaporização da água, iniciada quando a temperatura é superior a 100°C, cria um gradiente de pressão na microestrutura, responsável pelo surgimento de lascamentos no concreto. Quando a temperatura atinge 200°C, ocorre o enfraquecimento das forças de Van der Waals entre as moléculas de C-S-H, surgindo fissuras e conseqüentemente redução da resistência. A resistência à flexão e o módulo de elasticidade são afetados por microfissuras ocorridas na zona de transição agregado/pasta. Temperaturas entre 400°C e 600°C, favorecem a desidratação do hidróxido de cálcio, dando origem ao óxido de cálcio e água, sendo que esta última evapora; nesse intervalo de temperatura ocorre também a destruição do gel C-S-H. Quando ocorre o combate ao incêndio, por meio de água, o óxido de cálcio reidratado, provoca uma expansão rápida, contribuindo desse modo para o agravamento dos danos sofridos pelo concreto. Entretanto, quando é utilizado pozolanas na produção do concreto, a concentração de hidróxido de cálcio reduz, e conseqüentemente, o fenômeno da reidratação do óxido de cálcio, descrito acima, também reduz.

Segundo NOUMOWE et al (1996), concretos com adições, quando submetidos a temperaturas entre 100°C e 300°C, mesmo com baixas taxas de aquecimento, apresentam lascamentos explosivos, devido à intensa liberação de vapor. Para reduzir a incidência do lascamento em concretos que apresentam baixa porosidade, COSTA et al (2002) recomenda o uso de adições de fibras de polipropileno, fibras de aço associadas a fibras de polipropileno ou a proteção desses concretos, locando-os em áreas de menor risco de incêndio.

PIRES et al (2006) destaca em seu trabalho, que a baixa difusividade térmica, ou seja, a velocidade da variação da temperatura no interior da massa de concreto, causa um maior aquecimento na superfície dos elementos de concreto, e uma lenta transferência de calor para o seu interior. Alerta ainda, como fatores que contribuem para o agravamento dos danos causados ao concreto, pelo fogo, a face exposta ao fogo, o pré-carregamento e a forma do resfriamento, que pode ser ao ar livre ou com água.

2.6 Transferência de energia

Em termodinâmica, “ o termo calor é muitas vezes utilizado, quando o termo energia seria mais termodinamicamente correto” (MORAN e SHAPIRO,2002).

Citações dão conta que métodos baseados na experiência estão disponíveis para avaliar a transferência de energia sob a forma de calor. Estes métodos reconhecem dois mecanismos básicos de transferência: condução e radiação térmica. Além disso, relações empíricas estão disponíveis para avaliar a transferência de energia que envolve certos métodos combinados. Uma breve descrição de cada um destes métodos é dada a seguir em transcrição “in verbis” de MORAN e SHAPIRO, 2002:

“CONDUÇÃO: a transferência de energia por condução pode ocorrer em sólidos, líquidos e gases. A condução pode ser imaginada como a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para as partículas adjacentes que são menos energéticas, devido a interações entre as partículas.

RADIAÇÃO: a radiação térmica é emitida pela matéria como resultado de mudanças na configuração eletrônica dos átomos ou moléculas no seu interior. A energia é transportada por ondas eletromagnéticas (ou fótons). Diferentemente da condução, a radiação térmica não depende de nenhum meio para propagar-se e pode até mesmo ocorrer num vácuo.

CONVECÇÃO: se um fluido escoar sobre um corpo sólido ou dentro de um canal, e se as temperaturas do fluido e da superfície sólida forem diferentes, haverá transferência de calor entre o fluido e a superfície sólida em consequência do movimento do fluido em relação à superfície; este mecanismo de transferência de calor chama-se convecção”.

Segundo ÖZISIK (1990), quando um corpo, considerado semitransparente à radiação, recebe a incidência de energia em sua superfície, parte dessa energia é absorvida em sua superfície, parte dessa energia é absorvida pelo corpo, a outra parte é refletida e o restante é transmitido. Portanto, com relação ao exposto acima, “conclui-se facilmente que um corpo a uma temperatura T emite radiação devido à sua temperatura; também um corpo absorve a radiação que sobre ele incide” (ÖZISIK, 1990). A Figura 2.3 ilustra o princípio da transmissão de energia em um corpo semitransparente à radiação.

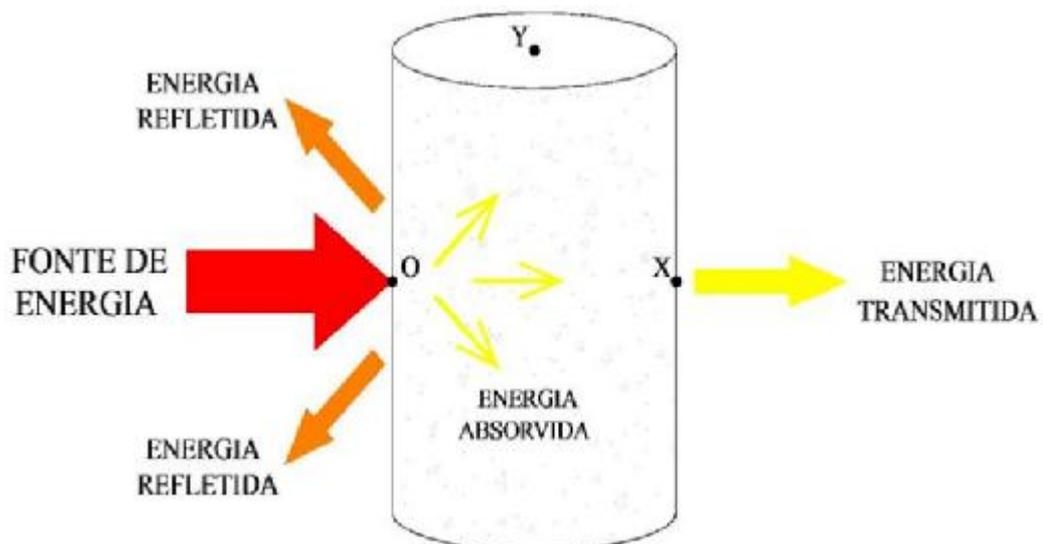


Figura 2.3 – Princípio da transferência de energia em um corpo semitransparente à radiação

3 METODOLOGIA DE TRABALHO

3.1 Composições e traços selecionados

Existem alguns métodos de dosagem para se definir a proporção entre os diversos constituintes do concreto. Cada método busca atingir o melhor desempenho, respeitando os limites estabelecidos pela Norma Brasileira. Os concretos produzidos neste trabalho são constituído de cimento, água, agregados graúdos e miúdos, aditivo superplastificante e adições minerais (escória de alto-forno normal, escória alto forno de alta reatividade, sílica ativa e metacaulim).

3.1.1 Traços utilizados

Devido ao fato deste trabalho buscar a análise comparativa do comportamento do concreto com diferentes proporções de adições minerais, quando esse é submetido ao incêndio localizado, definiu-se inicialmente um traço referência, sem adição mineral, adotando como método de dosagem dos concretos o Estudo Técnico ET-67 publicado pela ABCP (1995).

A proporção, em massa, do concreto referência, considerada adequada e que satisfaz os objetivos propostos por este trabalho é **1 : 1,24 : 2,02** (cimento, areia natural quartzosa e brita calcária nº 1), fator água/cimento igual a 0,31 e aditivo superplastificante GLENIUM 51, à base de éter policarboxílico, na proporção de 0,04% do peso do cimento. O consumo real de cimento, calculado após a execução do traço acima definido foi de 619,71 kg/m³ e o slump medido foi de 80 mm.

Na Tabela 3.1 encontram-se as proporções dos materiais constituintes dos concretos que fizeram parte deste estudo, bem como o volume de concreto produzido em cada traço.

Tabela 3.1 – Relação dos traços de concreto utilizados

	Concreto referência	Concreto C-1	Concreto C-2	Concreto C-3	Concreto C-4	Concreto C-5
Data	19/03/07	26/03/07	27/03/07	15/05/07	12/06/07	18/06/07
Cimento CP-V ARI	16,10 kg	6,45 kg (40%)	3,20 kg (20%)	14,65 kg (91%)	9,85 kg (61%)	3,35 kg (21%)
Metacaulim	-	1,60 kg (10%)	1,60 kg (10%)	-	-	-
Escória de alto-forno (ácida)-baixa reatividade	-	8,05 kg (50%)	11,30 kg (70%)	-	4,80 kg (30%)	-
Escória de alto-forno (básica) alta reatividade	-	-	-	-	-	11,30 kg (70%)
Sílica ativa	-	-	-	1,45 kg (9%)	1,45 kg (9%)	1,45 kg (9%)
Areia quartzosa	20,00 kg	20,00 kg				
Brita calcária nº 1	32,50 kg	32,50 kg				
Água	5,00 litros	7,20 litros	7,00 litros	5,85 litros	5,75 litros	5,50 litros
Aditivo Superplastif.	64 g	64 g				
Fator água/aglomerant.	0,31	0,45	0,43	0,36	0,36	0,34
Slump	80 mm	80 mm	85 mm	95 mm	110 mm	110 mm
Volume concreto produzido	14 cilindros 1 prisma	15 cilindros 1 prisma	16 cilindros 1 prisma	14 cilindros 1 prisma	14,5 cilindros 1 prisma	14 cilindros 1 prisma

Dimensões do CP cilíndrico: diâmetro igual a 10 cm e altura igual a 20 cm

Dimensões do prisma : 10 x 10 x 40 cm

O concreto C1, difere do concreto referência pela substituição de parte do cimento Portland por metacaulim e escória de alto-forno, na proporção de 10% e 50% respectivamente. O fator água/aglomerante teve de ser alterado para 0,45 para manter o slump igual a 80mm. Esse fato já era esperado, uma vez que a substituição do cimento Portland pelas adições minerais, que possuem maior área superficial específica quando comparada à do cimento, exigirá maior quantidade de água para alcançar a mesma trabalhabilidade do concreto referência. É importante salientar que foi mantida a mesma proporção do aditivo superplastificante, ou seja, 0,04% do peso do aglomerante. O consumo real de aglomerante, calculado após a

produção do concreto C1, foi de 584 kg/m³. Este dado nos leva à análise de que nos concretos produzidos com adições, quando realizamos a substituição de parte do cimento Portland (material mais denso), por igual quantidade em peso, de adições minerais (material menos denso), ocorrerá a diminuição do consumo de aglomerante. Pode-se dizer ainda que nos concretos com adições, em função da diferença de densidade, este fato nos leva a prever que haverá uma diminuição do consumo de aglomerante em relação ao concreto de referência.

O concreto C2, difere do concreto referência pela substituição de parte do cimento Portland por metacaulim e escória de alto-forno na proporção de 10% e 70% respectivamente. O fator água/aglomerante foi de 0,43 para um slump de 85 mm. Foi mantida a mesma proporção do aditivo superplastificante, ou seja, 0,04% do peso do aglomerante e o consumo real de aglomerante, calculado após a execução do concreto C2, foi de 553 kg/m³. Os dados registrados na produção do concreto C2 confirmam a dedução apresentada anteriormente, ou seja, no concreto C1.

O concreto C3, difere do concreto referência, pela substituição de parte do cimento Portland pela sílica ativa, na proporção de 9%. O fator água/aglomerante passou de 0,31 no concreto referência, para 0,36 no concreto C3; mas o slump que naquele foi igual a 80mm, neste (C3) foi igual a 95mm. Isto significa que a sílica ativa, apesar de possuir uma área superficial específica muito superior à do cimento Portland, e esse fato nos levar a imaginar que seria necessário uma maior quantidade de água para que o concreto com essa adição alcançasse a mesma trabalhabilidade do concreto referência, isso não ocorreu. Deduz-se daí, que para uma substituição de 9% de sílica ativa, o formato esférico de suas partículas compensa a sua maior área superficial específica, mantendo a mesma trabalhabilidade, com igual quantidade de água. Como nos outros traços, a proporção do aditivo superplastificante foi mantida (0,04% do peso do aglomerante) e o consumo real de aglomerante, calculado após a execução do traço C3, foi de 619,71 kg/m³, igual ao concreto referência.

O concreto C4, difere do concreto referência, pela substituição de parte do cimento Portland pela escória de alto-forno ácida (EFA) e pela sílica ativa, na proporção de 30% e 9%, respectivamente. O fator água/aglomerante passou de 0,31 no concreto referência, para 0,36 no concreto C4; mas o slump que naquele foi igual a 80mm, e

neste (C4) foi igual a 110mm. Nesse caso, também, acredita-se que a forma esférica das partículas de sílica ativa melhorou a trabalhabilidade do concreto. Como nos outros traços, a proporção do aditivo superplastificante foi mantida, 0,04% do peso do aglomerante, e o consumo real de aglomerante, calculado após a execução do traço C4, foi de 601,53 kg/m³.

O concreto C5, difere do concreto referência, pela substituição de parte do cimento Portland pela escória de alto-forno de alta reatividade-básica- (EAFAR) e pela sílica ativa, na proporção de 70% e 9%, respectivamente. . O fator água/aglomerante passou de 0,31 no concreto referência, para 0,34 no concreto C5; mas o slump que naquele foi igual a 80mm, e neste (C5) foi igual a 110mm. O consumo real de aglomerante, calculado após a execução do traço C5, foi igual ao do concreto referência, ou seja, 619,71 kg/m³. Nesse caso, fica clara a importância de um aprofundamento no estudo das propriedades físicas e químicas da escória de alto-forno de alta reatividade, pois os resultados do concreto C5, referentes à trabalhabilidade, compactidade e resistência aos 28 dias surpreenderam de forma positiva as expectativas.

Pode-se observar na Tabela 3.2 o consumo real de aglomerante em cada traço proposto.

Tabela 3.2 – Consumo de aglomerante, em kg por m³ de concreto

	Concreto referência	C-1 EM(50/10)	C-2 EM(70/10)	C-3 S(9)	C-4 ES(30/9)	C-5 TS(70/9)
Consumo aglomerante (kg/m ³)	619,71	584,00	553,00	619,71	601,53	619,71

A sigla “E” identifica a escória de alto-forno ácida; “M” o metacaulim; “ T ” a escória de alto-forno básica e “S” a sílica ativa. As proporções de cada componente encontra-se especificada entre parênteses na mesma seqüência das siglas.

3.2 Comentário sobre os traços utilizados

Sabe-se que o uso de adições minerais no concreto, é hoje, prática comum na engenharia. Neste trabalho, busca-se avaliar o comportamento do concreto com adições minerais, quando submetido ao fogo.

Foram escolhidos seis diferentes traços de concreto, estando suas proporções apresentadas na tabela 3.1. As adições minerais foram utilizadas em substituição ao cimento Portland, mantendo-se assim, a mesma quantidade, em peso, de aglomerante.

O aditivo escolhido foi o GLENIUM 51, da BASF, à base de éter policarboxílico. Esta escolha baseou-se no fato de se tratar de um produto de última geração, utilizado pelos fabricantes de concreto usinado.

Foi usado como agregado miúdo uma areia natural com módulo de finura 2,45 e densidade de massa específica 2.650 kg/m³. Como agregado graúdo usou-se brita calcária de módulo de finura 6,78 e densidade de massa específica igual a 2.650 kg/m³, atendendo assim, no que se refere aos agregados, às exigências da ABNT NBR 7211.

Empregou-se como aglomerante, o cimento CP V ARI, da marca LIZ PREMIUM; a sílica ativa da marca SILMIX; o metacaulim da marca METACULIM DO BRASIL; escória de alto-forno básica e escória de alto forno ácida, todos muito utilizados pelas centrais de concreto.

3.3 Seleção e Caracterização dos materiais utilizados

Neste item são descritas as características dos materiais utilizados na produção dos concretos, sendo que algumas destas características foram determinadas em laboratório, como a distribuição granulométrica dos agregados e sua dimensão máxima, e outras foram fornecidas por fabricantes e fornecedores.

3.3.1 Cimento

O cimento escolhido para realização dos testes deste trabalho foi o CP V – ARI da marca LIZ PREMIUM. Devido a sua alta resistência em baixas idades, possibilitando rápida desforma, esse cimento é muito utilizado pelas empresas produtoras de concreto. É um cimento que apresenta uma resistência inicial elevada, 25 MPa na idade de 1 dia. A massa específica desse material é de 3.030 kg/m³. Esses dados foram fornecidos pelo fabricante.

Neste trabalho não foi alterado o tipo de cimento utilizado, pois é importante avaliar de maneira comparativa o comportamento dos concretos com substituição do cimento por adições minerais, sem alterar o método de dosagem e os materiais constituintes.

3.3.2 Agregado miúdo

Foi utilizado para a produção dos concretos uma areia natural, quartzosa, extraída na região metropolitana de Belo Horizonte, com distribuição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima característica apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Distribuição granulométrica da areia utilizada nos concretos

Peneira	% Retida	% Acumulada
9,5 mm	0	0
6,3 mm	0,77	0,77
4,8 mm	1,42	2,19
2,4 mm	4,02	6,21
1,2 mm	14,52	20,73
0,6 mm	24,60	45,33
0,3 mm	30,77	76,10
0,15 mm	18,71	94,81
< 0,15 mm	5,19	100,00

Dimensão máxima característica (DMC) - 4,8 mm
Massa específica = 2.650 kg/m³
Módulo de finura = 2,45

3.3.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo escolhido para produzir os concretos foi a brita nº 1, de origem calcária, por se tratar de um material de grande uso na região metropolitana de Belo Horizonte. Esse agregado, proveniente de britagem, apresenta forma cúbica, aumentando assim sua massa unitária. Sua dimensão máxima é 19 mm e a distribuição granulométrica atende às exigências da ABNT NBR 7211. A Tabela 3.4 apresenta sua distribuição granulométrica e características físicas.

Tabela 3.4 – distribuição granulométrica da brita utilizada

Peneira	% Retida	% Acumulada
25 mm	0	0
19 mm	3	3
12,5 mm	56	59
9,5 mm	16	75
4,8 mm	25	100
2,4 mm	0	100
1,2 mm	0	100
0,6 mm	0	100
0,3 mm	0	100
0,15 mm	0	100
< 0,15 mm	0	100

Dimensão máxima característica (DMC) - 19 mm

Massa específica = 2.650 kg/m³

Módulo de finura = 6,78

3.3.4 Água

A água utilizada para a execução dos traços de concreto deste trabalho foi proveniente da concessionária local, sendo potável e consoante com as prescrições referenciadas pela ABNT NBR – 12.654 – Controle Tecnológico de materiais componentes do Concreto.

3.3.5 Aditivo

Foi escolhido um superplastificante de última geração à base de éter policarboxílico da marca Glenium 51, fabricado pela DEGUSSA. Nas dosagens utilizadas, foi mantida constante a proporção desse superplastificante, fixando-se essa em 0,04% do peso do aglomerante, que também permaneceu constante.

3.3.6 Adições minerais

O trabalho foi realizado a partir das seguintes adições:

3.3.6.1 Escória de alto-forno ácida

De acordo com informações obtidas do fornecedor desse material, a sua massa específica é igual a 1050 kg/m³, tem a cor cinza clara. e origina-se de alto-forno a carvão vegetal, gerada pela Mannesman, localizada no Barreio, na cidade de Belo Horizonte. O produto bruto é posteriormente moído em moinho de bola especial e pode-se observar na Tabela 3.5 a composição química média, a superfície específica Blaine e as massas específicas aparente e real.

Tabela 3.5 – Especificações química e física da escórias de alto-forno normal

Composição química (%)	
CaO	35 – 38
SiO ₂	30 – 35
Al ₂ O ₃	11 – 19
MgO	2,5 – 10
Fe ₂ O ₃	0 – 3
FeO	0 – 3
S	0,5 – 2
CaO/SiO média	1,08
Superfície específica Blaine = 380 m ² /kg	
Massa específica real = 2,91 g/cm ³	
Massa específica aparente = 1,05 g/cm ³	

3.3.6.2 Escória de alto-forno básica e de alta reatividade

De acordo com informações obtidas do fornecedor desse material, a sua massa específica é igual a 1080 kg/m³, tem a cor cinza clara e é de natureza básica. Ela foi gerada pelo Grupo Arcelor, localizado na cidade de João Monlevade no Estado de Minas Gerais. Foi posteriormente submetida a moagem, e é identificada neste trabalho como de “alta reatividade” e pode-se observar na Tabela 3.6 algumas características físico químicas.

Tabela 3.6 – Especificações química e física da escórias de alto-forno de alta reatividade

Composição química (%)	
CaO	40 – 45
SiO ₂	28 – 35
Al ₂ O ₃	10 – 17
MgO	2,5 – 9
Fe ₂ O ₃	0 – 2
FeO	0 – 2
S	0,5 – 1,5
CaO/SiO média	1,31
Superfície específica Blaine = 480 m ² /kg	
Massa específica real = 2,96 g/cm ³	
Massa específica aparente = 1,08 g/cm ³	

3.3.6.3 Sílica Ativa

Foi utilizado a sílica ativa da marca SILMIX, fabricado por CAMARGO CORRÊA METAIS S/A (Breu Branco/PA) em substituição a 9%, em peso, do cimento Portland, nos traços C-3, C-4 e C-5. De acordo com a literatura as características médias da sílica ativa estão apresentadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Especificações química e física da sílica ativa- Fonte: SILMIX

Composição química (%)	
SiO ₂	40 – 45
Fe ₂ O ₃	30 – 35
Al ₂ O ₃	11 – 18
CaO	2,5 – 9
MgO	0 – 2
Diâmetro médio das partículas = 0,15 µm	
Superfície específica Blaine 21.100 m ² /kg	
Massa específica = 2.220 kg/m ³	
Coloração = grafite	

3.3.6.4 Metacaulim

Foi utilizado o Metacaulim HP, fabricado pela METACAULIM DO BRASIL LTDA em substituição a 10%, em peso, do cimento Portland, nos traços C-1 e C-2. De acordo com o fabricante, as características médias do Metacaulim HP estão apresentadas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Especificações químicas e físicas do metacaulim

Composição química (%)	
SiO ₂	51
Al ₂ O ₃	41
Fe ₂ O ₃	< 3
TiO ₂	< 1
MgO	< 0,4
Na ₂ O	< 0,1
K ₂ O	< 0,5
SO ₃	< 0,1
CaO	< 0,5
Diâmetro médio das partículas = 12,4 µm	
Superfície específica = 30.000 cm ² /g	
Massa específica = 2.600 Kg/m ³	
Coloração = rosa claro a creme	

3.3.7 Caracterização dos equipamentos utilizados

Neste item serão especificados os equipamentos utilizados para a realização deste trabalho, a saber:

3.3.7.1 Betoneira

Foi utilizado para a produção dos traços de concreto especificados uma betoneira fabricada com capacidade de 120 litros, de eixo horizontal, sendo acionada por um motor elétrico, trifásico, de 3 cv de potência. A Figura 3.2 fornece uma visão do equipamento acima descrito.



Figura 3.1- Betoneira de eixo horizontal, capacidade 120 litros

3.3.7.2 Balanças eletrônicas

Foram utilizadas 2 (duas) balanças eletrônicas de precisão para a pesagem dos materiais, com capacidade de 50 kg e 20 kg e sensibilidade respectivamente 50 g e 0,1 g. Pode-se observar na Figura 3.2 e Figura 3.3 as balanças referenciadas.



Figura 3.2- Balança eletrônica, capacidade 20kg e precisão 0,1g



Figura 3.3- Balança eletrônica, capacidade 50kg e precisão 50g

3.3.7.3 Equipamento para avaliação do módulo de elasticidade dinâmico por frequência ressonante

Com o objetivo de avaliar o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) utilizou-se o equipamento mostrado na Figura 3.4.



Figura 3.4- Equipamento de teste por frequência ressonante

3.3.7.4 Picnômetro a laser

Este aparelho, da marca POLIMED- modelo PM 1070, foi utilizado para medir a temperatura da superfície do corpo-de-prova a uma distância de aproximadamente 1.0 m. Esse picnômetro têm amplitude de medição que varia de -10°C até 900°C . A Figura 3.5 apresenta uma visão do equipamento.



Figura 3.5- Picnômetro utilizado para medir as temperaturas nos Corpos de prova

3.3.7.5 Estufa

A estufa utilizada para aquecimento dos corpos-de-prova destinados ao ensaio de absorção de água por imersão é apresentada na Figura 3.6.



Figura 3.6- Estufa utilizada para aquecer os Corpos de prova

3.3.7.6 Prensa hidráulica

Foi utilizado nos ensaios de concreto a prensa hidráulica fabricada pela empresa EMIC- Equipamentos e Sistemas de Ensaio Ltda, modelo PC 200 CS, acoplada a um microcomputador com o software TESC-EMIC. Esse equipamento tem o acionamento elétrico, 220V, e pode ser visualizado na Figura 3.7.



Figura 3.7- Prensa hidráulica utilizada nos ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral

3.3.7.7 Maçarico

Foi utilizado para aquecer os corpos-de-prova, um maçarico de solda, modelo MPS-200 com extensão, utilizando o sistema misturador ou injetor de gás. Esse equipamento está apresentado na Figura 3.8.



Figura 3.8- Detalhe da utilização do maçarico ao aquecer um CP

3.4 Método de produção dos concretos

A produção dos traços de concreto utilizados neste trabalho foi realizada segundo preceitos determinados pela ABNT NBR 12821 – Preparação de concreto em laboratório.

3.5 Ensaio realizados

Nos itens seguintes são apresentados os ensaios realizados com os corpos-de-prova correspondentes aos traços CR, C1, C2, C3, C4 e C5.

3.5.1 Ensaio de difusividade no interior dos concretos estudados

Os corpos-de-prova, com base circular igual a 10 cm e altura igual a 20 cm, foram submetidos a uma fonte de calor localizada, quando esses atingiram a idade de 28 dias.

O ensaio de difusividade avalia a velocidade de propagação do calor no interior do concreto, através da medição de temperatura nos pontos “X” e “Y” definidos adiante. Este ensaio apesar de não ser normatizado, tem o seu valor científico alicerçado na prerrogativa da eficácia da análise dos dados pelo método da comparação. Neste trabalho, os traços de concretos contendo em sua formulação, adições minerais, foram comparados ao concreto sem adições minerais.

Utilizando um maçarico como fonte de calor, e posicionando o corpo-de-prova na posição vertical, sobre um suporte de madeira, realizou-se então o ensaio de aquecimento.

O ponto de aplicação do calor está localizado no ponto médio da altura do corpo-de-prova, estando pois a 10 cm de cada base do cilindro.

Após o início do aquecimento, foram feitas três leituras de temperatura, nos pontos “O”, “X” e “Y”, a cada 2 minutos, até o tempo de 10 minutos, com o picnômetro digital, modelo PM 1070; em seguida, sem a incidência de fogo realizou-se mais 3 medições de temperatura, também a cada 2 minutos, com o picnômetro digital,

modelo PM 1070. O ponto de aplicação do calor, foi denominado ponto O; o ponto oposto ao ponto O, definindo juntamente com este uma linha horizontal, foi denominado ponto X; e o ponto situado na face superior do corpo-de-prova, foi denominado ponto Y. A Figura 3.9 ilustra esse procedimento.



Figura 3.9 – Corpo-de-prova sendo aquecido com maçarico –Ponto “O”

Esse procedimento foi realizado com os corpos-de-prova de cada traço especificado na Tabela 3.1 e os resultados apresentados na Tabela 4.1, correspondem a uma média de 2 medições.

3.5.2 Resistência a compressão simples

A resistência a compressão simples é o ensaio mais utilizado quando se trabalha com concreto. Mesmo quando essa propriedade não é a mais importante para determinada aplicação do concreto, sua especificação é um parâmetro relevante na averiguação e avaliação indireta de outras, cujo ensaio seria de difícil realização.

Os ensaios de resistência a compressão axial, apresentados neste estudo, foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da EEUFMG, tendo sido utilizada uma prensa hidráulica (EMIC), acoplada a um microcomputador com o “software” TESC-EMIC, conforme especificação apresentada no item 3.3.7.6.

A resistência a compressão foi avaliada nas idades de 3, 7, 28 e 90 dias, onde a superfície dos corpos-de-prova foi planada através do uso do enxofre.

3.5.3 Módulo de elasticidade dinâmico

A estrutura de concreto deve ser projetada para sofrer deformações dentro do regime elástico. Essas deformações podem ser avaliadas através do conhecimento do módulo de elasticidade. O ensaio do módulo de elasticidade dinâmico é um importante procedimento de avaliação e verificação da integridade e segurança das estruturas de concreto. Esse ensaio identifica através da variação da frequência, a presença e a dimensão de possíveis danos nessa estrutura, bem como detecta mudanças na sua deformabilidade.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), o módulo dinâmico de deformação corresponde a uma deformação instantânea muito pequena e é dado, aproximadamente, pelo módulo tangente inicial, que é o módulo da tangente para uma reta traçada desde a origem.

O módulo de elasticidade é a relação entre a tensão e a deformação reversível e é afetado pela natureza do composto, fração volumétrica e características de seus constituintes.

Segundo NEVILLE (1982), a determinação do módulo dinâmico do concreto é através de uma vibração longitudinal na frequência natural.

Para COUTINHO (1994) pode-se definir o módulo de elasticidade dinâmico através da velocidade da propagação de ondas ultra-sonoras, ou da determinação da própria frequência de vibração de um corpo-de-prova de concreto com forma geométrica bem definida.

Durante a vibração do corpo-de-prova a tensão aplicada é desprezível, sendo assim o módulo de elasticidade dinâmico refere-se a um efeito puramente elástico, não sendo, portanto, afetado pela fluência. Por essa razão o módulo de elasticidade dinâmico é mais próximo do módulo de elasticidade tangente na origem num ensaio estático muito rápido, e assim maior do que o módulo secante.

O módulo de elasticidade dinâmico dos concretos foi determinado através da utilização de equipamento por frequência ressonante marca CNS, modelo MCI, nas idades de 3, 7, 28 e 90 dias e os resultados são expressos em GPa.

3.5.4 Absorção d'água por imersão total

Como é de consenso na literatura consultada, a resistência do concreto é inversamente proporcional à sua capacidade de absorção de água. Em função dessa afirmação, foi realizado este ensaio, nas idades de 28 e 90 dias.

Os Corpos-de-prova foram colocados na estufa por 6 horas, para secagem. Após esse período, os mesmos foram retirados da estufa, pesados e imersos em água durante 24 horas e em temperatura ambiente. Por fim, os Corpos de prova foram retirados do tanque de imersão e pesados novamente. A absorção relativa de água foi calculada em percentagem usando a equação 6:

$$a(\%) \equiv \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \times 100 \quad (\text{eq 6})$$

sendo:

$a(\%)$ = absorção relativa de água;

m_1 = massa do CP após retirá-lo da estufa (seco);

m_2 = massa do CP após retirá-lo do tanque de imersão (saturado).

3.5.5 Resistência à tração por compressão diametral

O surgimento de fissuras está diretamente relacionado à durabilidade do concreto. A resistência à tração, no concreto, é de grande importância para prevenir o aparecimento de fissuras provocadas por retração por secagem, quando no estado fresco. Também, em estruturas de concreto constituídas de grandes elementos, no estado fresco, pode ocorrer a retração térmica provocada pela dissipação de calor liberado na hidratação do cimento. O tipo de agregado utilizado e a qualidade do concreto influenciam essa propriedade.

Do mesmo modo que ocorre com a resistência a compressão, a resistência a tração cresce com o passar do tempo em função da ocorrência das reações químicas de hidratação e das reações pozolânicas.

A resistência média a tração do concreto pode ser estimada, segundo a ABNT NBR 6118 a partir do valor da resistência a compressão obtidos segundo a equação 7:

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (\text{eq. 7})$$

onde:

$f_{ct,m}$ = resistência média à tração do concreto;

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto.

Segundo o que determina a NBR 7222, o ensaio de resistência à tração diametral foi realizado nos corpos-de-prova, cilindros de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. O corpo-de-prova foi colocado na prensa, na posição horizontal, apoiado em um suporte de madeira, com as dimensões: 15 mm de largura, 3,5 mm de espessura e 200 mm de comprimento. Na parte superior do corpo-de-prova foi colocado outro suporte de madeira. Em seguida foi aplicada uma carga no corpo-de-prova até a sua ruptura.

Esse ensaio foi realizado nas instalações do Laboratório de Materiais de Construção da EEUFMG, tendo sido utilizada uma prensa hidráulica (EMIC), acoplada a um microcomputador com o “software” TESC-EMIC, conforme especificação apresentada no item 3.3.7.6.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios descritos anteriormente. Os resultados foram apresentados nas Tabelas, e representados em forma de gráficos para melhor visualização e interpretação dos mesmos.

4.1 Apresentação dos resultados

Os resultados apresentados neste trabalho correspondem aos ensaios de aquecimento dos corpos-de-prova, resistência a compressão simples, módulo de elasticidade dinâmico, absorção d'água por imersão total e resistência à tração por compressão diametral.

4.1.1 Ensaio de difusividade no interior do concreto

Neste ensaio é verificado a variação das temperaturas nos pontos “O”, “X” e “Y” ao longo do tempo nos corpos-de-prova dos concretos em estudo, conforme pode ser verificado na Tabela 4.1

Tabela 4.1 – Temperatura medida (°C) nos pontos “O”, “X” e “Y” x tempo

	Tempo em minutos	Ponto "O"	Ponto "X"	Ponto "Y"
Referência - CR	0	17,4	17,4	17,4
	2	253,0	20,0	20,9
	4	396,0	20,0	23,4
	6	780,0	22,9	34,8
	8	785,0	25,5	34,8
	10	863,5	27,0	36,0
Concreto	Neste momento desliga-se o maçarico e faz-se 3 medições de temperatura			
	12	439,1	29	44,3
	14	254,2	32,4	48,1
	16	168,3	39,1	51,1
	Tempo em minutos Ponto "O" Ponto "X" Ponto "Y"			
	C1	0	17,9	17,9
2		635,0	20,0	21,7
4		652,3	20,0	23,7
6		679,6	20,9	28,8
8		729,0	21,3	29,2
10		813,9	23,6	30,7
Concreto	Neste momento desliga-se o maçarico e faz-se 3 medições de temperatura			
	12	281,9	27,8	34,2
	14	167,3	29,5	39,6
	16	115,8	31,7	41,8
Tempo em minutos Ponto "O" Ponto "X" Ponto "Y"				
C2	0	18,2	18,2	18,2
	2	480,9	20,5	21,0
	4	552,9	20,5	28,3
	6	609,7	23,1	29,5
	8	701,4	33,5	32,3
	10	820,1	35,2	37,2
Concreto	Neste momento desliga-se o maçarico e faz-se 3 medições de temperatura			
	12	300,0	38,6	39,3
	14	194,0	41,7	42,6
	16	150,0	48,4	45,0

	Tempo em minutos	Ponto "O"	Ponto "X"	Ponto "Y"
Concreto C3	0	17,8	17,8	17,8
	2	472,7	19,1	18,3
	4	772,3	20,5	19,6
	6	788,1	21,8	20,1
	8	833,6	29,0	25,0
	10	884,3	31,6	27,0
	Neste momento desliga-se o maçarico e faz-se 3 medições de temperatura			
	12	399,2	36,5	30,2
	14	268,0	40,8	31,4
	16	204,6	44,0	36,3
	Tempo em minutos	Ponto "O"	Ponto "X"	Ponto "Y"
Concreto C4	0	19,0	19,0	19,0
	2	331,2	20,9	21,5
	4	511,3	27,0	27,1
	6	695,4	32,6	29,1
	8	727,2	34,3	34,7
	10	823,5	37,3	36,4
	Neste momento desliga-se o maçarico e faz-se 3 medições de temperatura			
	12	223,8	39,4	39,8
	14	139,5	44,2	42,3
	16	100,9	47,3	49,5
	Tempo em minutos	Ponto "O"	Ponto "X"	Ponto "Y"
Concreto C5	0	19,8	19,8	19,8
	2	575,9	21,8	22,3
	4	709,3	23,1	27,9
	6	815,3	25,3	29,8
	8	835,0	27,1	33,1
	10	849,5	29,8	35,4
	Neste momento desliga-se o maçarico e faz-se 3 medições de temperatura			
	12	386,8	33,9	38,7
	14	269,8	35,9	39,0
	16	189,7	37,7	41,7

4.1.2 Ensaio de resistência à compressão simples

Os resultados obtidos para os traços: CR, C1, C2, C3, C4 e C5, especificados na Tabela 3.1, estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2- Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 3, 7, 28, 90 dias

IDADE (dias)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - MPa					
	CR	C1	C2	C3	C4	C5
3	36	20	4	38	41	25
7	39	21	7	41	46	34
28	45	24	8	51	58	40
90	47	27	16	54	60	43
90*	43	25	12	41	46	33

* resistência a compressão simples aos 90 dias, após submeter os corpos-de-prova à temperaturas elevadas e recupera-los.

4.1.3 Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico

Neste item é apresentado o resultado do módulo de elasticidade dinâmico dos traços de concreto estudados, conforme pode ser visto na Tabela 4.3

Tabela 4.3- Módulo de elasticidade dinâmico aos 3, 7, 28 e 90 dias

IDADE (dias)	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO -GPa					
	CR	C1	C2	C3	C4	C5
3	41,19	26,85	18,12	36,85	35,84	32,92
7	41,6	29,83	22,66	39,01	37,71	34,33
28	42,15	28,25	21,78	41,25	40,42	36,27
90	41,12	27,62	20,33	38,98	38,28	34,40
90*	33,12	26,50	16,26	32,76	28,67	28,71

* Módulo de elasticidade dinâmico aos 90 dias, após submeter os corpos-de-prova à temperaturas elevadas e recupera-los.

4.1.4 Ensaio de absorção d'água por imersão total

Este ensaio foi realizado com o objetivo de comparar a porosidade dos diversos traços de concreto estudados neste trabalho, bem como o efeito do calor nessa propriedade. Como é de conhecimento acadêmico, essa propriedade física está diretamente relacionada com a durabilidade do concreto. Os resultados são apresentados na Tabela 4.4 e foram calculados utilizando a equação apresentada no item 3.5.4.

Tabela 4.4- Absorção relativa de água verificada por imersão dos Corpos-de-prova em tanque d'água à temperatura ambiente

IDADE (dias)	ABSORÇÃO RELATIVA DE ÁGUA - a (%)					
	CR	C1	C2	C3	C4	C5
28	5,14	8,88	9,67	6,48	6,87	7,28
90*	5,19	9,17	9,87	8,11	6,94	8,22

* após submeter os corpos-de-prova à temperaturas elevadas e recuperá-los

4.1.5 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados na Tabela 4.5.

O valor da resistência média à tração do concreto, estimado a partir da resistência característica à compressão encontra-se apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.5- Resistência à tração por compressão diametral dos concretos realizados segundo os traços: CR, C1, C2, C3, C4 e C5

IDADE (dias)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL -MPa					
	CR	C1	C2	C3	C4	C5
28	8	5	4	12	9	9
90*	9	4,00	3	8	9	10

* após submeter os corpos-de-prova à temperaturas elevadas e recuperá-los

Tabela 4.6- Resistência média à tração do concreto referente aos traços CR, C1, C2, C3, C4 e C5, aplicando a equação apresentada no item 3.5.5

IDADE (dias)	RESISTÊNCIA MÉDIA À TRAÇÃO DO CONCRETO, ESTIMADA A PARTIR DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO (Mpa)					
	CR	C1	C2	C3	C4	C5
28	3,80	2,50	1,20	4,10	4,50	3,50
90*	3,70	2,60	1,60	3,60	3,90	3,10

* após submeter os corpos-de-prova à temperaturas elevadas e recupera-los.

4.2 Análise dos resultados

Após examinar os resultados obtidos nos ensaios de aquecimento dos Corpos-de-prova, resistência a compressão simples, módulo de elasticidade dinâmico e absorção d'água, que foram apresentados anteriormente, são feitas algumas observações, que estão registradas a seguir.

4.2.1 Difusividade no interior do concreto

Foi observado durante o ensaio de aquecimento dos corpos-de-prova correspondentes ao traço de referência, constituído de cimento Portland, areia e brita, a ocorrência do fenômeno do lascamento ("spalling") no ponto de aquecimento, entretanto, a intensidade desse fenômeno foi muito pequena. A Figura 4.1 mostra o corpo-de-prova após o ensaio.

Nos corpos-de-prova correspondentes ao traço C1, constituído de 40% de cimento, 10% de metacaulim e 50% de escória de alto-forno, durante o ensaio de aquecimento, observou-se que não ocorreu o fenômeno do lascamento ("spalling"), e sim, a fusão do concreto naquele local. A Figura 4.1 mostra o corpo-de-prova após o ensaio.

Nos corpos-de-prova correspondentes ao traço C2, constituído de 20% de cimento Portland, 10% de metacaulim e 70% de escória de alto-forno ácida, durante o ensaio de aquecimento, verificou-se um comportamento semelhante ao descrito para o traço C1, ou seja, não houve lascamento e sim a fusão do concreto. Essa verificação pode ser observada na Figura 4.1.

No concreto executado segundo o traço C3, 91% de cimento Portland e 9% de sílica ativa, foi possível verificar, no ensaio de aquecimento, a ocorrência do fenômeno de lascamento (“spalling”), com uma intensidade muito grande e uma região afetada em torno de 8 cm de diâmetro e 2 cm de profundidade. Esse fenômeno iniciou-se aproximadamente 30 segundos após o início do ensaio. A Figura 4.1 ilustra o descrito acima. Verificou-se também que 5 minutos após o início do ensaio, surgiu, na direção oposta, no mesmo nível do ponto de aquecimento, uma linha escura formada pela saída da água do interior do corpo-de-prova. Nesse caso fica claro que a água caminhou pelas fissuras criadas pela evaporação parcial da água, em função do fogo aplicado, e esta atingiu a superfície do corpo-de-prova, como pode ser observado na Figura 4.2. Entretanto no ponto de aplicação do fogo, houve uma rápida evaporação da água e a sua expansão provocou o lascamento, como era esperado, conforme preconizado pela literatura.

No traço C4, executado com cimento Portland 61%, escória de alto-forno ácida 30% e sílica ativa 9%, quando os corpos-de-prova foram aquecidos, 2 minutos após o início do ensaio, ocorreu o lascamento, mas com intensidade muito pequena se comparada à ocorrida em C3 e 4 minutos após o início do ensaio ocorreu o aparecimento de um filete de água na direção oposta ao ponto de aplicação do fogo, exatamente igual ao descrito anteriormente para o concreto C3. O lascamento do corpo-de-prova referente a esse traço pode ser visto na Figura 4.1 e o fenômeno do surgimento da linha d’água na altura do ponto de aplicação do fogo pode ser visto na Figura 4.3.

O traço C5, constituído de 21% de cimento Portland, 70% de escória de alto-forno básica de alta reatividade e 9% de sílica ativa, quando submetido ao ensaio de aquecimento, apresentou, na região de incidência do fogo, o lascamento, mas com

uma intensidade muito pequena. Além disso, foi observado nessa região, o derretimento do concreto. A Figura 4.1 ilustra a descrição acima.



Figura 4.1- Corpos-de-prova após o aquecimento localizado, realizado com maçarico. A seqüência, da esquerda para a direita é a seguinte: CR, C1, C2, C3, C4 e C5



Figura 4.2- Concreto C3- linha d'água aparece na altura do ponto de aplicação do fogo



Figura 4.3- Concreto C4- linha d'água aparece na altura do ponto de aplicação do fogo

A seguir serão apresentadas as Figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9, correspondentes aos gráficos Temperatura x Tempo, no ponto "O"- ponto de aplicação do fogo, utilizando o maçarico.

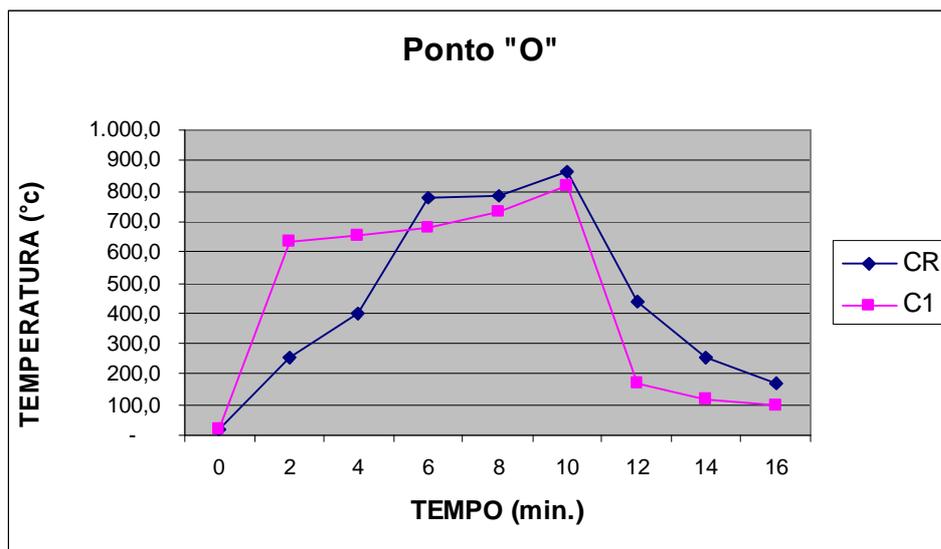


Figura 4.4- Comparação do comportamento do concreto CR (cimento Portland, areia e brita), com o concreto C-1 (cimento Portland 40%, metacaulim 10% e escória de alto-forno 50%)

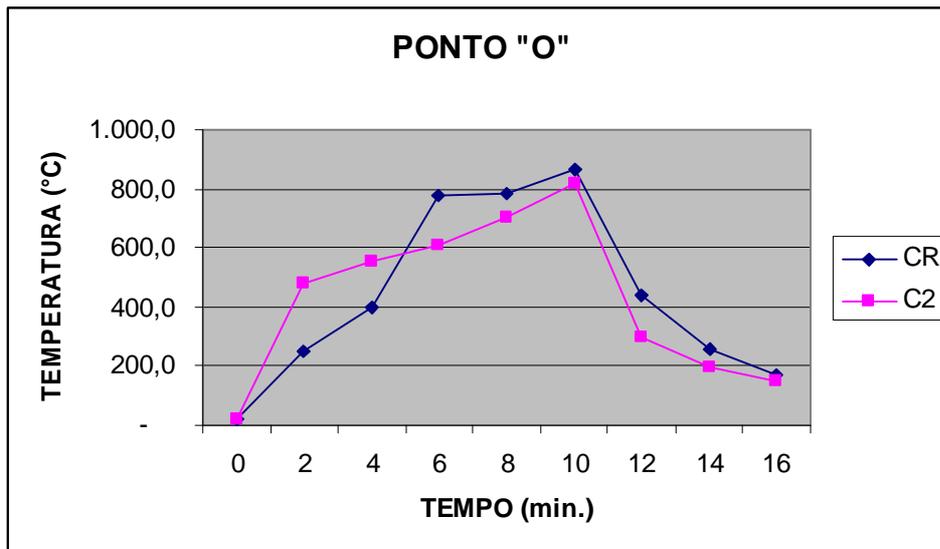


Figura 4.5- Comparação do comportamento do concreto CR (cimento Portland, areia e brita) com o concreto C2 (cimento Portland 20%, metacaulim 10% e escória de alto-forno ácida70%)

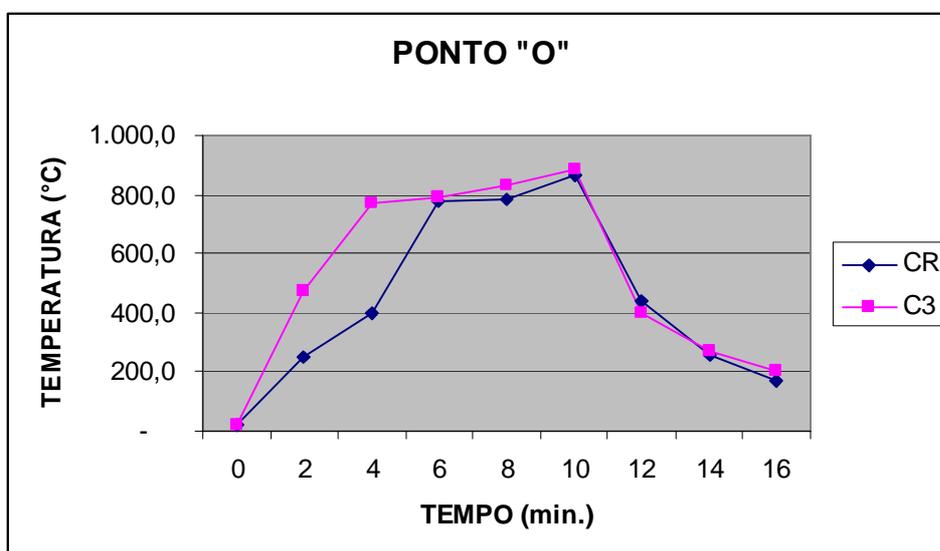


Figura 4.6- Comparação do comportamento do concreto CR (cimento Portland, areia e brita) com o concreto C3 (cimento Portland 91% e sílica ativa 9%)

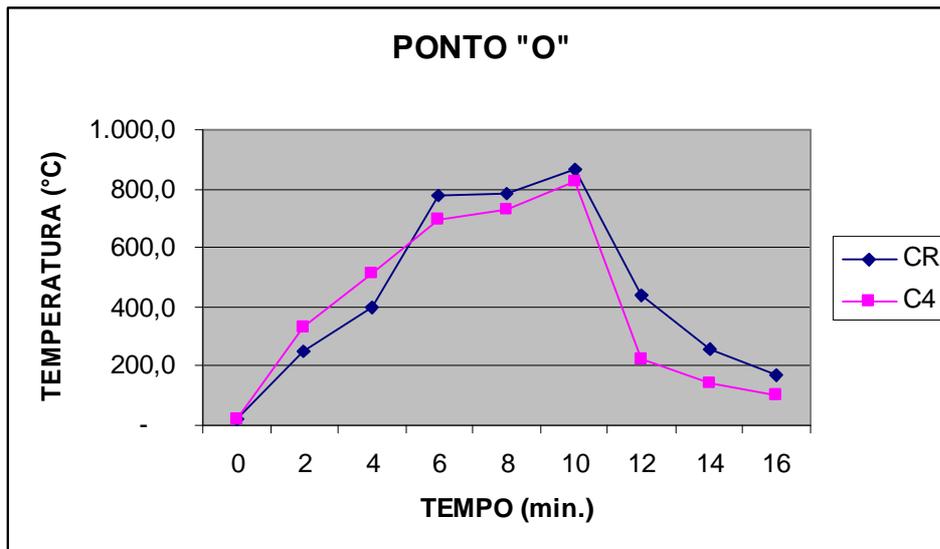


Figura 4.7- Comparação do comportamento do concreto CR (cimento Portland, areia e brita) com o concreto C4 (cimento Portland 61%, escória de alto-forno ácida 30% e sílica ativa 9%)

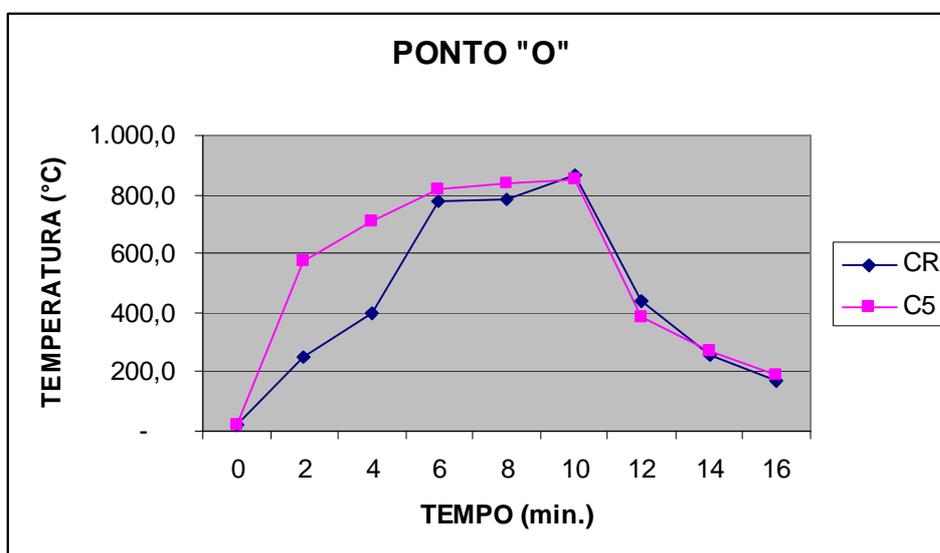


Figura 4.8- Comparação do comportamento do concreto CR (cimento Portland, areia e brita) com o concreto C5 (cimento Portland 21%, escória de alto-forno básica 70% e sílica ativa 9%)

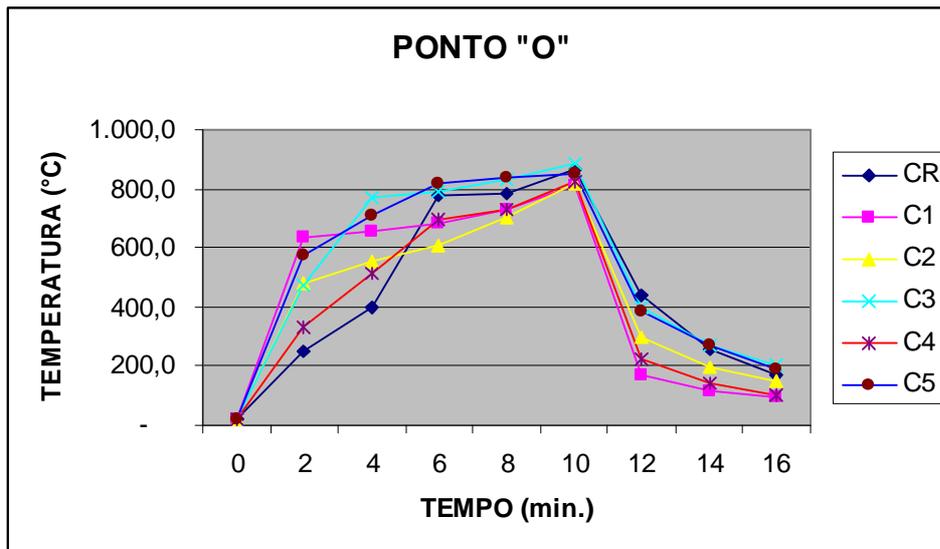


Figura 4.9- Gráfico da temperatura em função do tempo, no ponto "O", dos concretos CR, C1, C2, C3, C4 e C5

Na seqüência de gráficos que se segue, Figuras 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15, serão apresentados os resultados das temperaturas medidas no ponto "X", oposto ao ponto de incidência do fogo, comparando cada traço de concreto com o concreto referência.

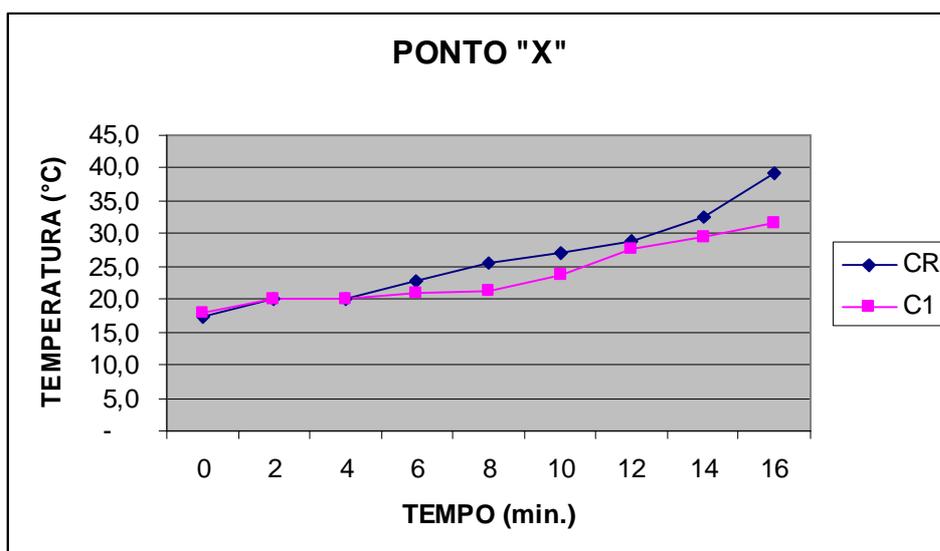


Figura 4.10- Comparação do comportamento do concreto CR (cimento Portland, areia e brita) com o concreto C1 (cimento Portland 40%, metacaulim 10% e escória de alto-forno 50%)

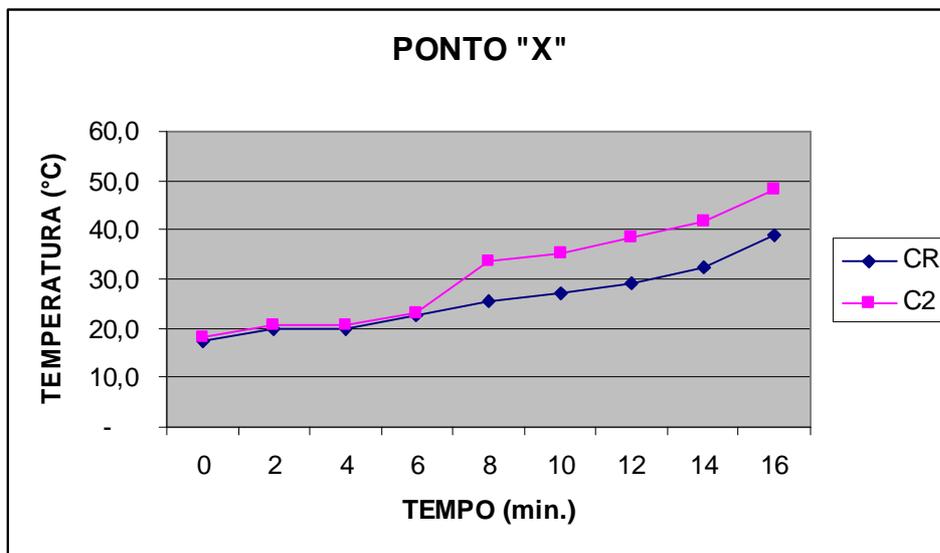


Figura 4.11- Comparação do comportamento do concreto CR (cimento Portland, areia e brita) com o concreto C2 (cimento Portland 20%, metacaulim 10% e escória de alto-forno ácida 70%)

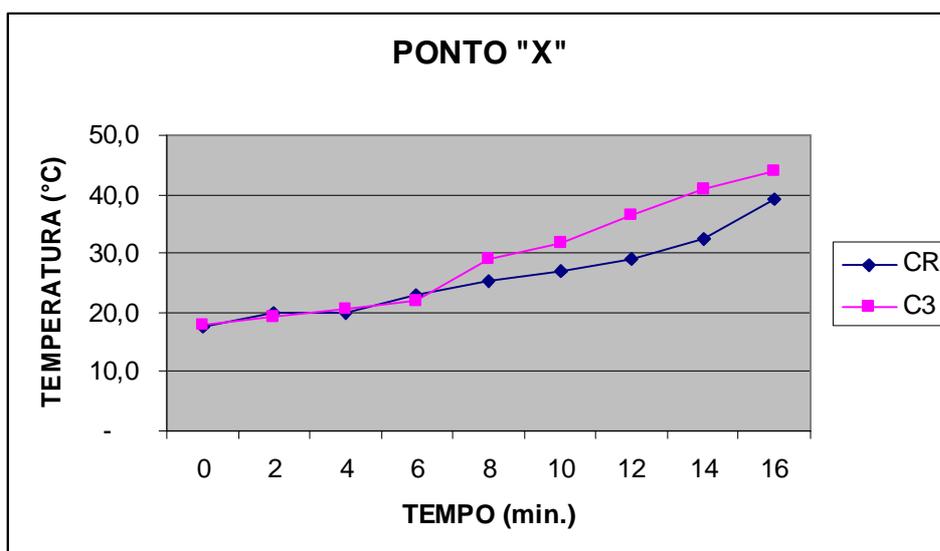


Figura 4.12- Comparação do comportamento do concreto CR (cimento Portland, areia e brita) com o concreto C3 (cimento Portland 91% e sílica ativa 9%)

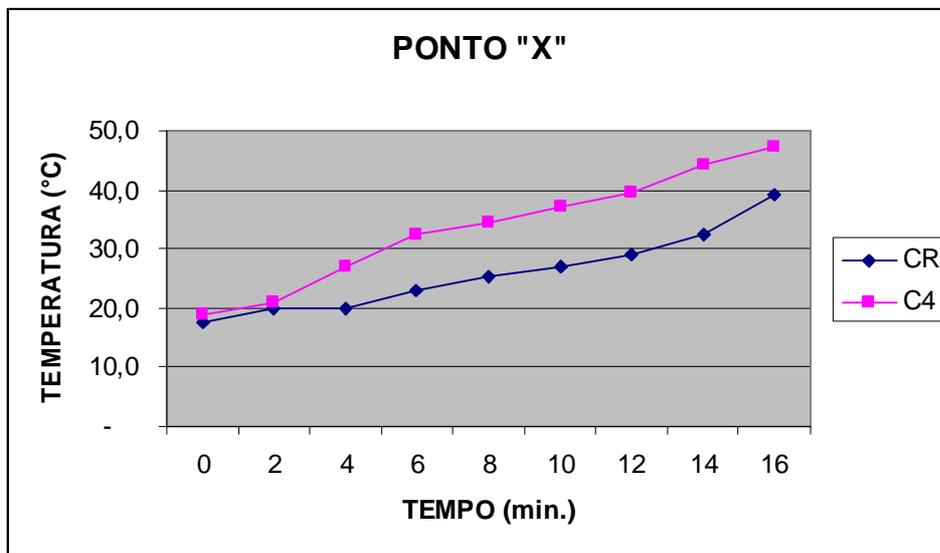


Figura 4.13- Comparação do comportamento do concreto CR (cimento Portland, areia e brita) com o concreto C4 (cimento Portland 61%, escória de alto-forno ácida 30% e sílica ativa 9%)

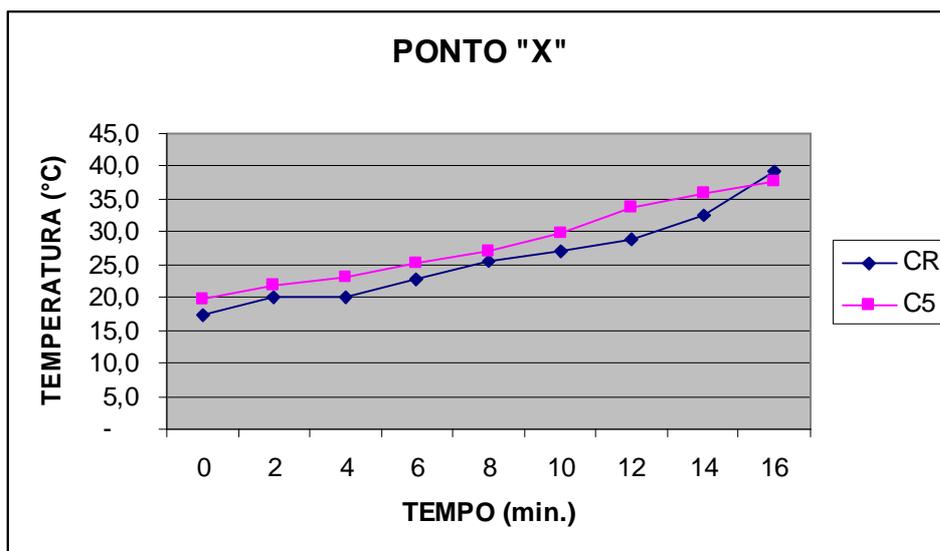


Figura 4.14- Comparação do comportamento do concreto CR (cimento Portland, areia e brita) com o concreto C5 (cimento Portland 21%, escória de alto-forno básica 70% e sílica ativa 9%)

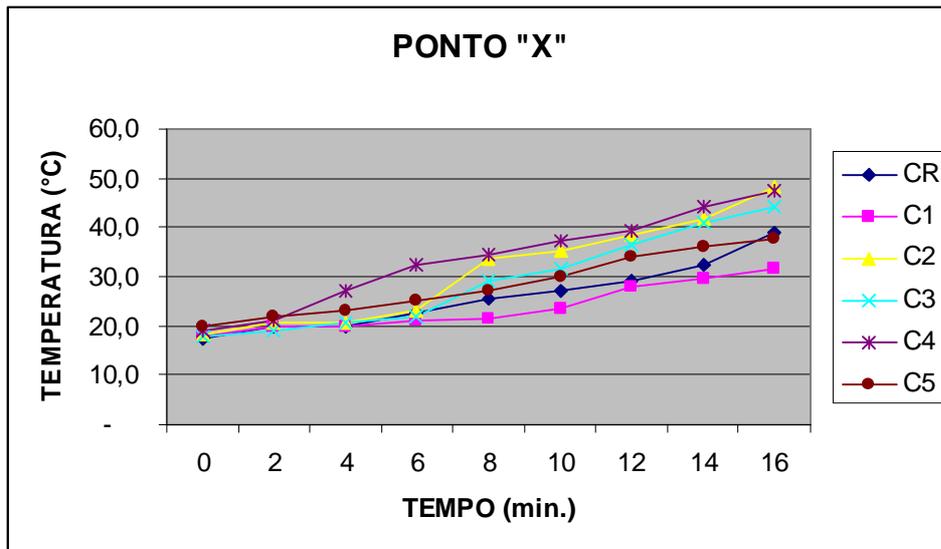


Figura 4.15- Gráfico da temperatura em função do tempo, no ponto "X", dos concretos CR, C1, C2, C3, C4 e C5

No ponto "Y", localizado na base superior do corpo-de-prova, também foram realizadas medições de temperatura, que estão apresentadas nas Figuras 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21, sempre adotando como padrão de comparação o concreto referência.

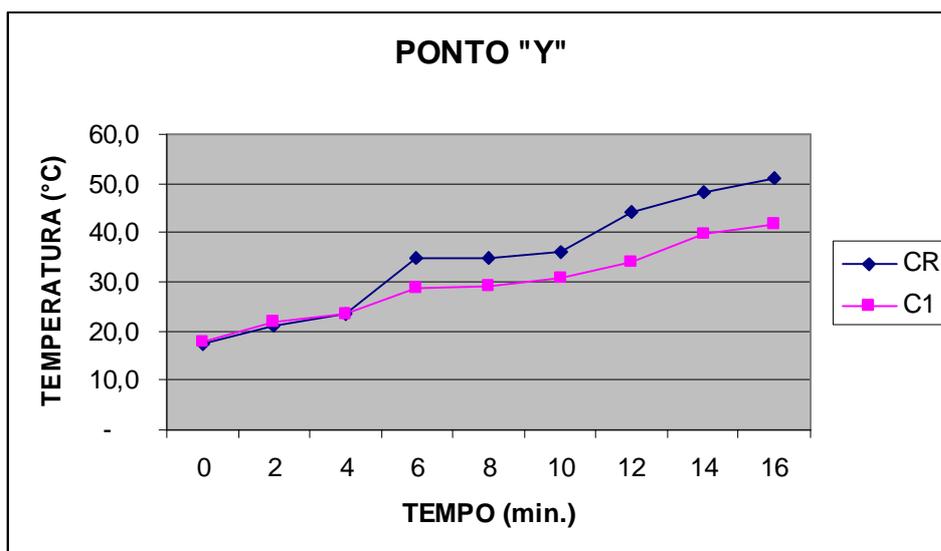


Figura 4.16- Comparação do comportamento do concreto CR (cimento Portland, areia e brita) com o concreto C1 (cimento Portland 40%, metaculim 10% e escória de alto-forno 50%)

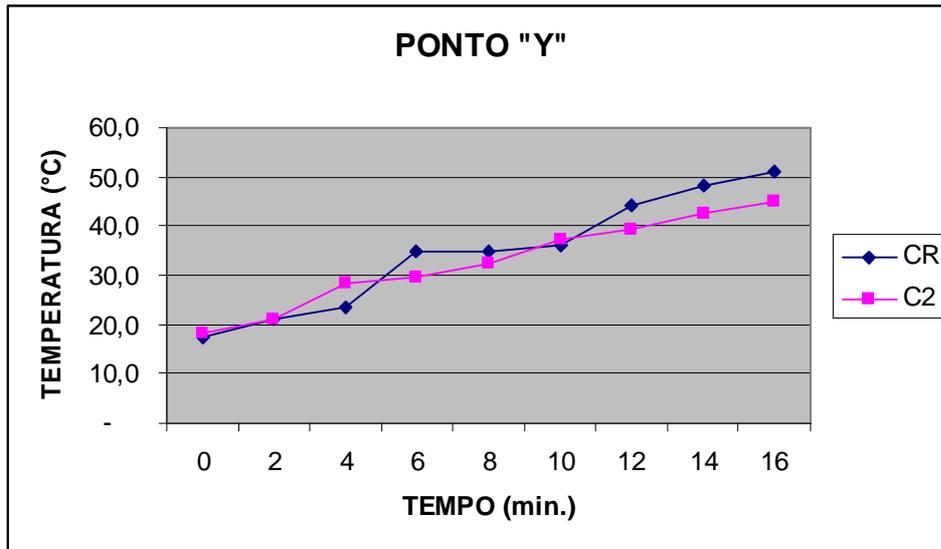


Figura 4.17- Comparação do comportamento do concreto CR (cimento Portland, areia e brita) com o concreto C2 (cimento Portland 20%, metacaulim 10% e escória de alto-forno ácida 50%)

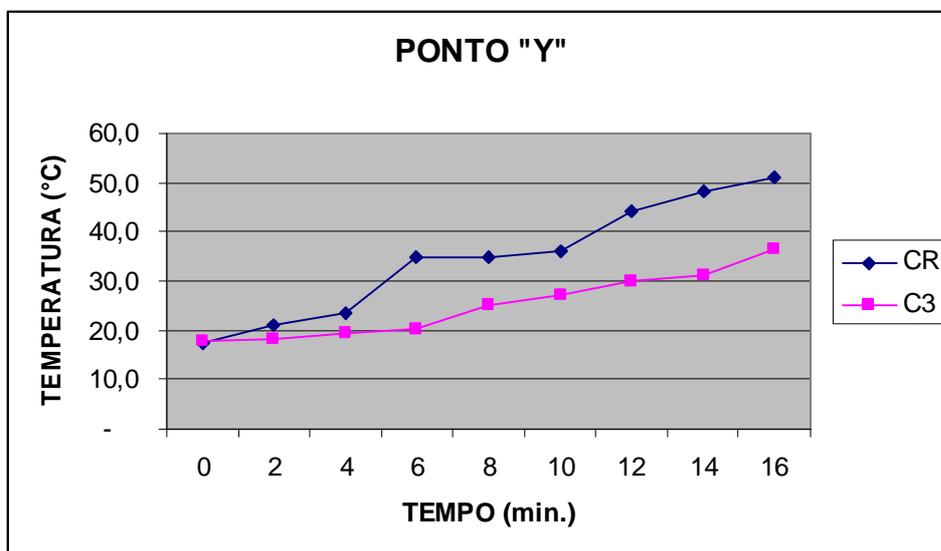


Figura 4.18- Comparação do comportamento do concreto CR (cimento Portland, areia e brita) com o concreto C3 (cimento Portland 91% e sílica ativa 9%)

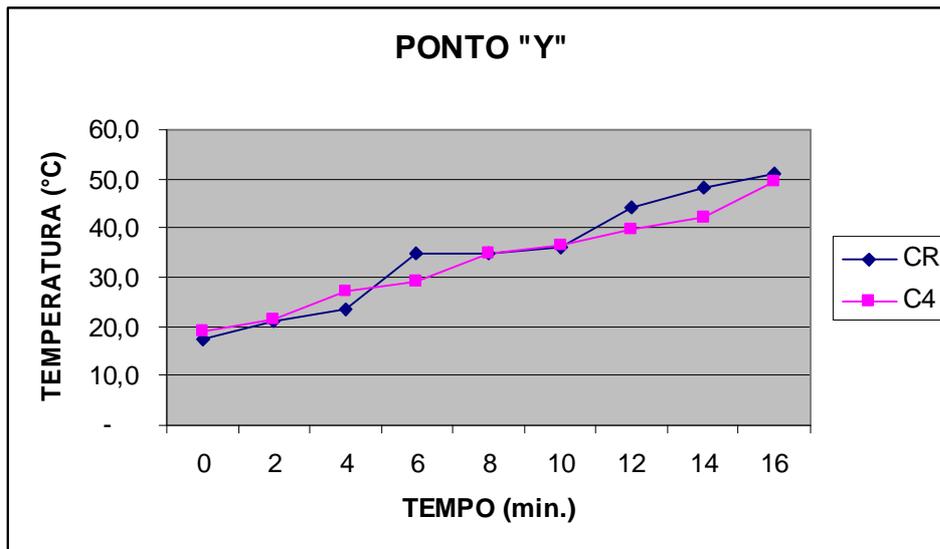


Figura 4.19- Comparação do comportamento do concreto CR (cimento Portland, areia e brita) com o concreto C4 (cimento Portland 61%, escória de alto-forno ácida 30% e sílica ativa 9%)

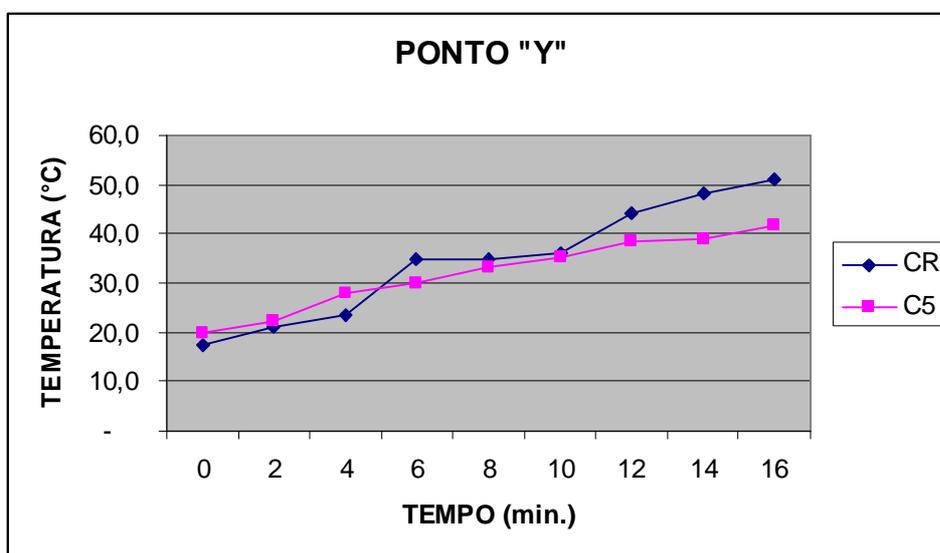


Figura 4.20- Comparação do comportamento do concreto CR (cimento Portland, areia e brita) com o concreto C5 (cimento Portland 21%, escória de alto-forno básica 70% e sílica ativa 9%)

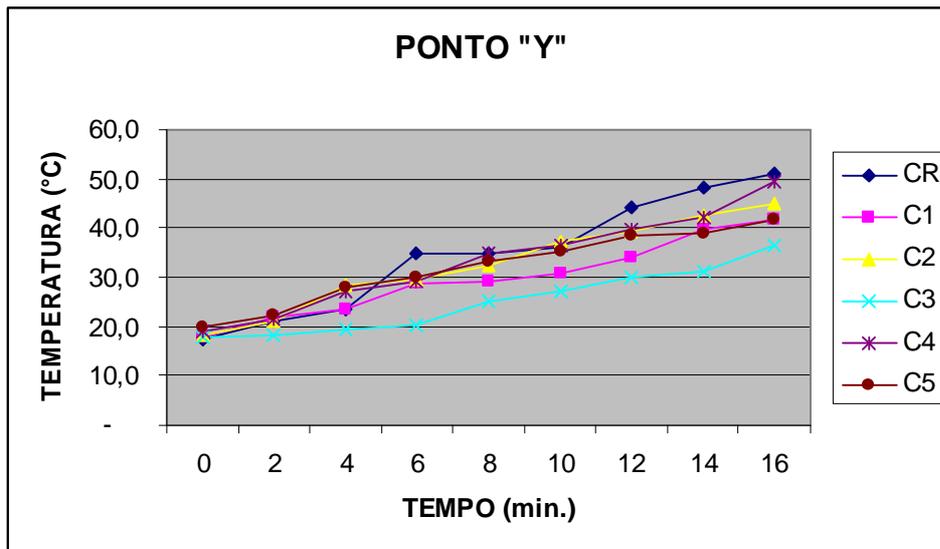


Figura 4.21- Gráfico da temperatura em função do tempo, no ponto “Y”, dos concretos CR, C1, C2, C3, C4 e C5

A seguir é mostrado através de gráficos, Figuras 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 e 4.27 a medição da temperatura nos pontos “X” e “Y”, em cada concreto estudado, ou seja, CR, C1, C2, C3, C4 e C5.

A velocidade de variação da temperatura no interior da massa de concreto é definida por difusividade. Buscando avaliar essa propriedade física do concreto, foi realizado medidas de temperaturas nos pontos "O", "X" e "Y", definidos no item 3.5.1, a intervalos de tempo regulares, ou seja, 8 leituras a cada 2 minutos.

Neste ensaio ficou claro a divisão dos 6 tipos de concreto estudados em 2 grupos distintos. O primeiro grupo, formado pelos concretos CR, C1, C2 e C5, apresentou uma velocidade de propagação maior no sentido perpendicular à linha de aplicação de calor emitida pelo bico da caneta do maçarico, enquanto no sentido longitudinal, uma velocidade menor, conforme pode ser verificado nas Figuras 4.22, 4.23, 4.24, 4.27. Esse fato se traduz no valor da temperatura em “Y” sempre superior à do ponto “X”, sugerindo assim que o calor se propagou com maior facilidade no sentido perpendicular do que no sentido longitudinal. Observou-se também que as temperaturas medidas nos pontos “X” e “Y” do concreto CR, são maiores que as dos concretos C5, C1 e C2, respectivamente. Portanto, pode-se associar inicialmente, uma correlação entre a difusividade e a densidade do concreto.

O segundo grupo, composto pelos concretos C3 e C4, apresentou uma similaridade durante a realização deste ensaio. Em ambos, surgiu, após 4 a 5 minutos de aquecimento, uma linha escura, formada pela água existente no interior do concreto, que em função do calor aplicado, migrou do centro para a periferia do corpo-de-prova, formando um semi-círculo escuro, conforme apresentado nas Figuras 4.2 e 4.3. Além disso, é importante observar que o concreto C3 apresenta uma velocidade de propagação do calor, inversa ao dos concretos do primeiro grupo, ou seja, a velocidade é maior no sentido longitudinal e menor no sentido perpendicular à linha de aplicação do calor, levando a um raciocínio inverso. Talvez aí esteja a explicação do aparecimento da linha d'água. Já o concreto C4 apresentou uma velocidade de propagação do calor igual em ambos os sentidos, Neste caso também apareceu a linha d'água.

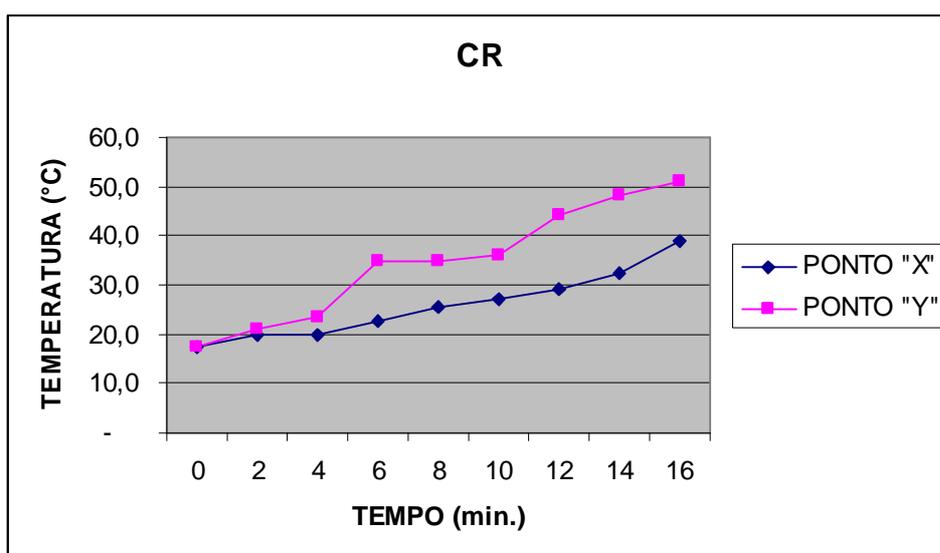


Figura 4.22 - Mostra a velocidade de propagação do calor, no concreto CR, partindo do ponto de incidência do mesmo, aos pontos X e Y, equidistantes e definidos no item 3.5.1

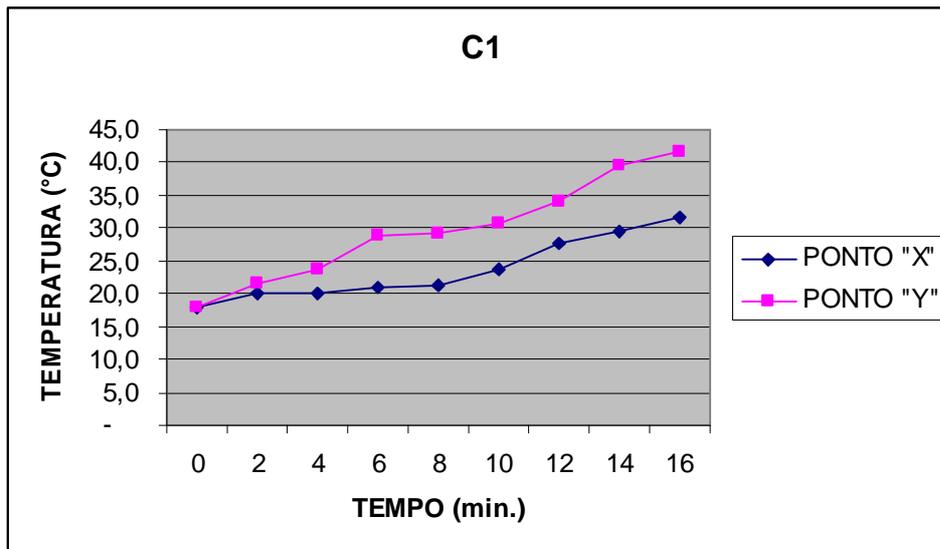


Figura 4.23 - Mostra a velocidade de propagação do calor, no concreto C1, partindo do ponto de incidência do mesmo, aos pontos X e Y, eqüidistantes e definidos no item 3.5.1

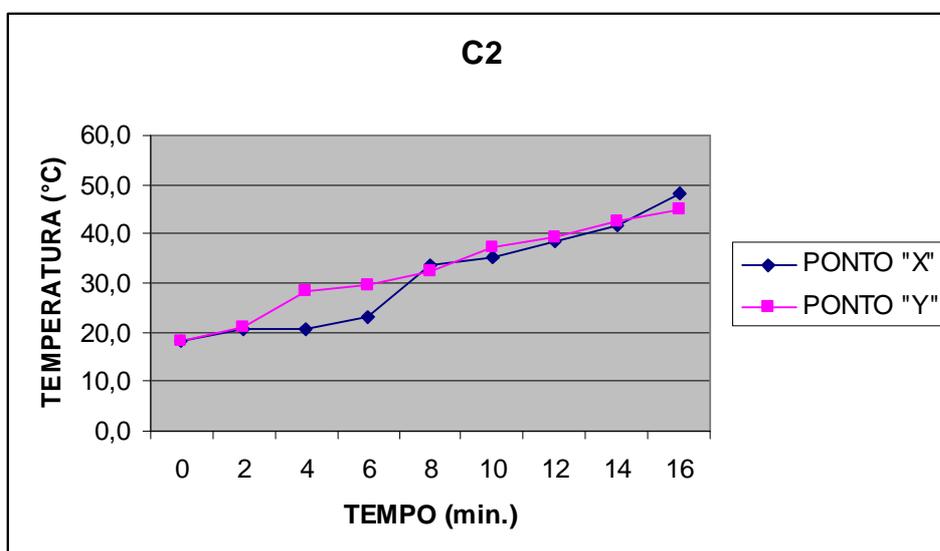


Figura 4.24 - Mostra a velocidade de propagação do calor, no concreto C2, partindo do ponto de incidência do mesmo, aos pontos X e Y, eqüidistantes e definidos no item 3.5.1

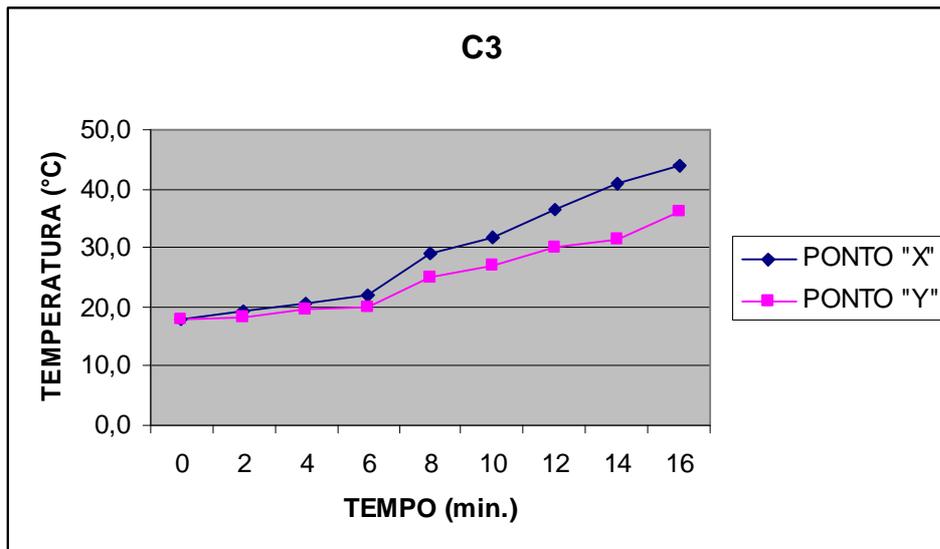


Figura 4.25 - Mostra a velocidade de propagação do calor, no concreto C3, partindo do ponto de incidência do mesmo, aos pontos X e Y, eqüidistantes e definidos no item 3.5.1

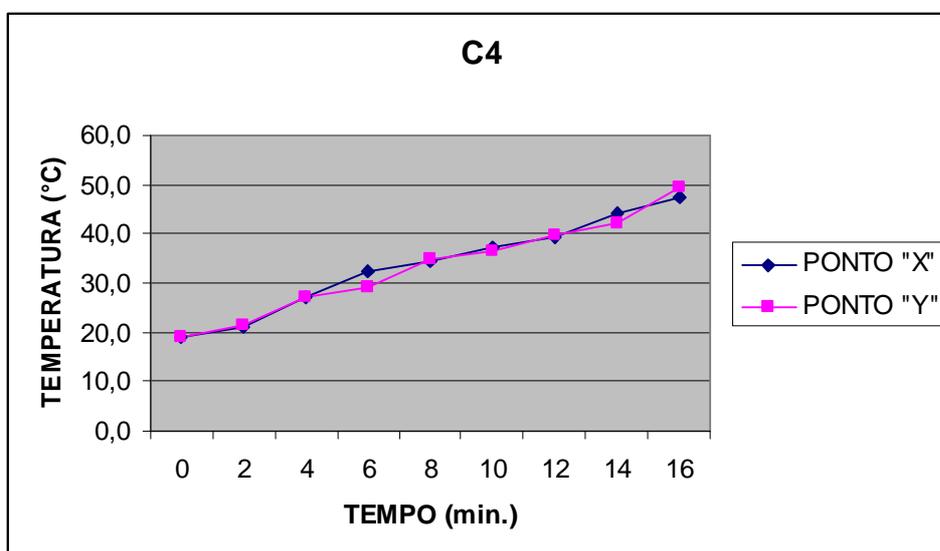


Figura 4.26 - Mostra a velocidade de propagação do calor, no concreto C4, partindo do ponto de incidência do mesmo, aos pontos X e Y, eqüidistantes e definidos no item 3.5.1

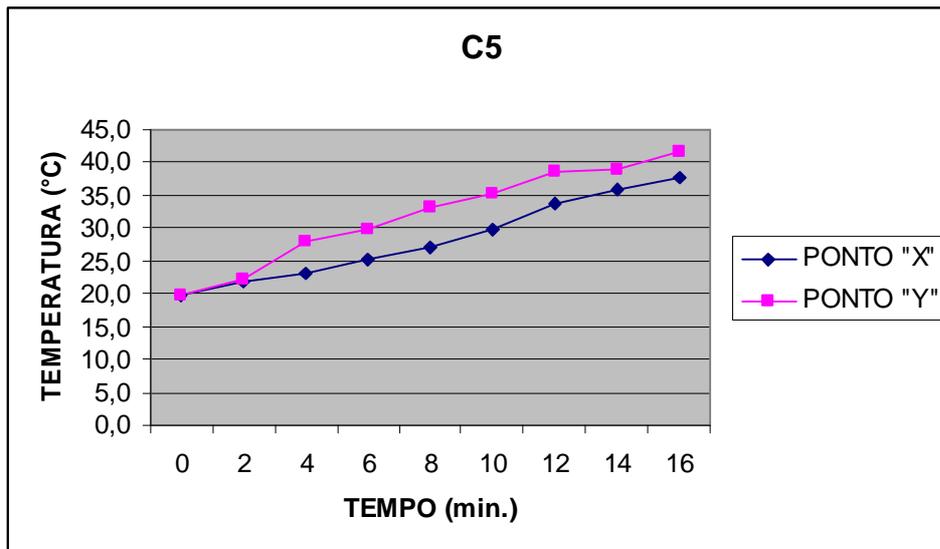


Figura 4.27 - Mostra a velocidade de propagação do calor, no concreto C5, partindo do ponto de incidência do mesmo, aos pontos X e Y, equidistantes e definidos no item 3.5.1

4.2.2 Resistência à compressão simples

O aumento da resistência à compressão em relação à idade do concreto pode ser visto nas Figuras 4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32, 4.33 e 4.34.

Os traços de concreto em estudo, contendo diferentes tipos de adições minerais, tais como metacaulim, sílica ativa e dois tipos distintos de escória de alto-forno, foram inicialmente comparados com o concreto referência, que possui como aglomerante, apenas cimento Portland, cujo ensaio de resistência à compressão simples é mostrado na Figura 4.28 e o ensaio comparativo na Figura 4.34.

O concreto C1, contendo como aglomerante 50% de cimento Portland, 10% de metacaulim e 40% de escória de alto-forno ácida, apresentou nos ensaios, resistência à compressão inferior ao concreto referência, em todas as idades, conforme mostra a figura 4.28 e o ensaio comparativo na Figura 4.34. Ao substituir o cimento Portland por parte equivalente, em peso, de metacaulim e escória de alto-forno, a resistência à compressão aos 28 dias passou de 45 MPa para 24 MPa, ou seja, ocorreu uma redução de 46,7 % em relação ao concreto referência. Este

comportamento era esperado, uma vez que a escória de alto-forno necessita de um tempo maior para realizar suas reações químicas.

Quando os corpos-de-prova foram submetidos ao calor localizado, utilizando maçarico, ocorreu a redução da resistência à compressão, passando o concreto C1 de 27 MPa para 25 MPa, aos 90 dias, reduzindo em 7,4% de seu valor aos 90 dias, antes do aquecimento. É interessante destacar que não houve o lascamento, ocorrendo apenas uma destruição localizada, ou seja, fusão do concreto.

O concreto C2, contendo como aglomerante 20% de cimento Portland, 10% de metacaulim e 70% de escória de alto-forno ácida, apresentou nos ensaios de resistência à compressão, valores bem inferiores ao concreto referência, como pode ser visto na Figura 4.30 e o ensaio comparativo na Figura 4.34, ou seja, passou de 45 MPa (CR) para 8 MPa (C2), aos 28 dias. A redução na resistência à compressão já era esperada em função do comportamento da escoria de alto-forno ácida, que apresenta uma reação química mais lenta, mas não em níveis tão baixos como o apresentado aqui.

Os resultados obtidos neste ensaio, incentivou a execução do concreto C5, cujo traço manteve 70 % de escória de alto-forno básica ao invés da escória de alto-forno ácida; e o metacaulim foi substituído pela sílica ativa, como será visto nos itens à frente. Em uma primeira análise, verificou-se que o concreto C2, não apresentou o desempenho esperado, alcançando apenas 20% da resistência do concreto referência.

Ao submeter os corpos-de-prova do concreto C2 ao fogo, em um ponto localizado, através da utilização de um maçarico, verificou-se a redução da resistência à compressão, aos 90 dias, de 16 MPa para 12 MPa, como esperado. Entretanto, não ocorreu o efeito de lascamento e sim a fusão do concreto no ponto de aplicação do calor.

O concreto C3, contém como aglomerante 91% de cimento Portland e 9% de sílica ativa (Silmix). Os resultados de resistência à compressão simples apresentaram-se coerentes com as descrições encontradas na literatura, ou seja, o concreto C3

mostrou-se mais resistente do que o concreto referência, apresentando este 45 MPa e aquele 58 MPa, aos 28 dias.

Quando submetido ao fogo, em um ponto localizado, os corpos-de-prova do concreto C3 apresentaram o fenômeno do lascamento com grande intensidade, logo no início do processo de aquecimento (40 segundos). Após 5 minutos de aquecimento, surgiu na altura da linha de aplicação do calor, uma faixa escura, caracterizando o caminhamento da água presente nos poros do concreto, em direção ao exterior, devido ao calor aplicado. Verificou-se posteriormente que nessa linha demarcada pela água percolada surgiu uma fissura visível a olho nu.

Quanto à resistência à compressão, verificou-se uma queda desta, após o aquecimento, passando de 60 MPa para 46 MPa, aos 90 dias, uma redução de 23,33 %. As Figuras 4.31 e 4.32 ilustram o exposto acima.

O concreto C4, contém como aglomerante 61% de cimento Portland, 30% de escória de alto-forno ácida e 9% de sílica ativa.

Esse concreto apresentou resultados de resistência à compressão, maiores que os do concreto referência, em todas as idades de ensaio, sendo inferior apenas aos 90 dias, após o aquecimento. Este fato se deve ao efeito do empacotamento, uma vez que a finura da sílica ativa, da escória de alto-forno e do cimento Portland são bem distintas.

O concreto C4, ao ser aquecido em seu ponto médio, com maçarico, também apresentou o fenômeno do lascamento. Entretanto, a intensidade deste foi um pouco menor, como pode ser visto na Figura 4.1. Esse fenômeno ocorreu logo no início do ensaio (40 segundos). Após 4 minutos de aquecimento, surgiu, como no concreto C3, uma faixa escura, caracterizando o caminhamento da água, do interior para a superfície externa do corpo-de-prova. Isso aconteceu em função do calor que se propagou no interior do concreto, tendo a mesma velocidade tanto no sentido longitudinal quanto transversal à reta horizontal definida pela caneta do maçarico, como pode ser visualizado no gráfico de velocidade de propagação do calor. A

Figura 4.3 ilustra esse fenômeno. Verificou-se também, posteriormente, que nessa linha demarcada pela água percolada surgiu uma fissura visível a olho nu.

No que se refere à resistência a compressão do concreto C4, verificou-se, como nos ensaios anteriores, uma redução da mesma, após o aquecimento do corpo-de-prova, como pode ser visto na figura 4.32 e 4.34. Essa redução passou, aos 90 dias, de 54 MPa para 41 MPa, ou seja, equivalente 24 %.

O concreto C5, projetado a partir do fraco desempenho do concreto C2, no que se refere às propriedades mecânicas, possui como aglomerantes: 21% de cimento Portland, 70% de escória de alto-forno básica e 9% de sílica ativa.

Como pode ser visto na Figura 4.33 e 4.34, o concreto C5 apresentou um desempenho mecânico um pouco inferior ao concreto referência, em torno de 10%. Entretanto, ao comparar os seus resultados com o concreto C2, que também apresentou 80% de adições minerais, verificou-se um ganho na resistência à compressão, da ordem de 500%, ou seja, passando, aos 28 dias, de 8 MPa no concreto C2 para 40 MPa no concreto C5.

É interessante notar que o “SPALLING” ou lascamento, observados em C3 e C4, ambos contendo sílica ativa, ocorreu também em C5, que também contém sílica ativa, mas com uma intensidade muito pequena, numa proporção que pode ser avaliada como 20% da intensidade verificada em C3.

A faixa escura e a fissura subsequente, observadas em C3 e C4, referente à formação de um caminhamento direcionado da água, sentido interior-exterior, em função do calor, não foram verificadas em C5. Observou-se no caso do concreto C5, que a velocidade de propagação do calor, no sentido transversal (ponto “Y”) à reta horizontal definida pela caneta do maçarico, é maior que a do sentido longitudinal (ponto “X”). Provavelmente, a estrutura menos densa do concreto C5, proporcionou uma difusão diferenciada do calor, no interior do corpo-de-prova. O ensaio de resistência à compressão simples, aos 90 dias, realizados nos corpos-de-prova, após o aquecimento, mostraram uma redução de valores da ordem de 23%, ou seja,

passou de 43 MPa para 33 MPa. Esse resultado já era esperado, e certifica o aparecimento de microfissuras devido ao aquecimento do corpo-de-prova.

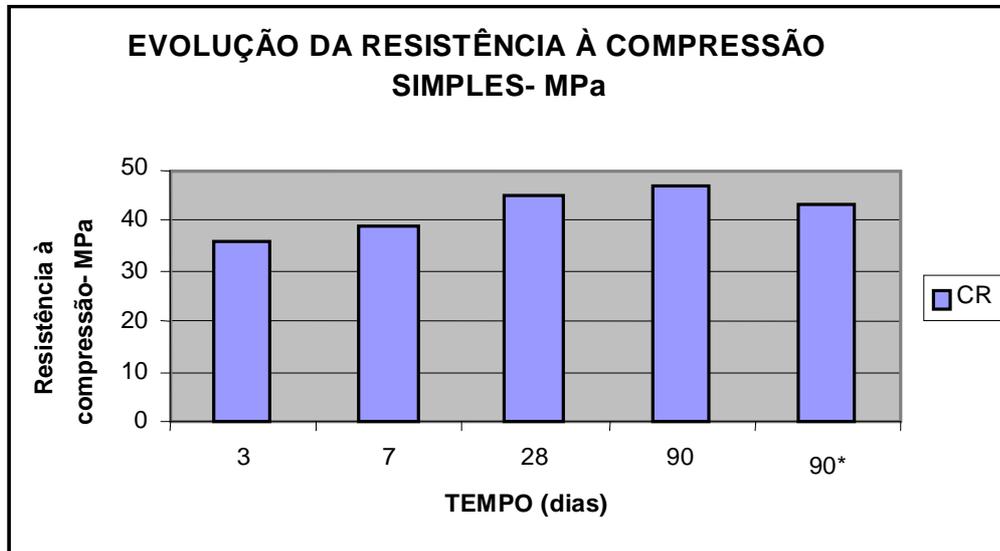


Figura 4.28- Mostra a evolução, ao longo do tempo, da resistência à compressão, em MPa, para o concreto realizado segundo o concreto de referência CR.

* Ensaio realizado aos 90 dias, após o aquecimento

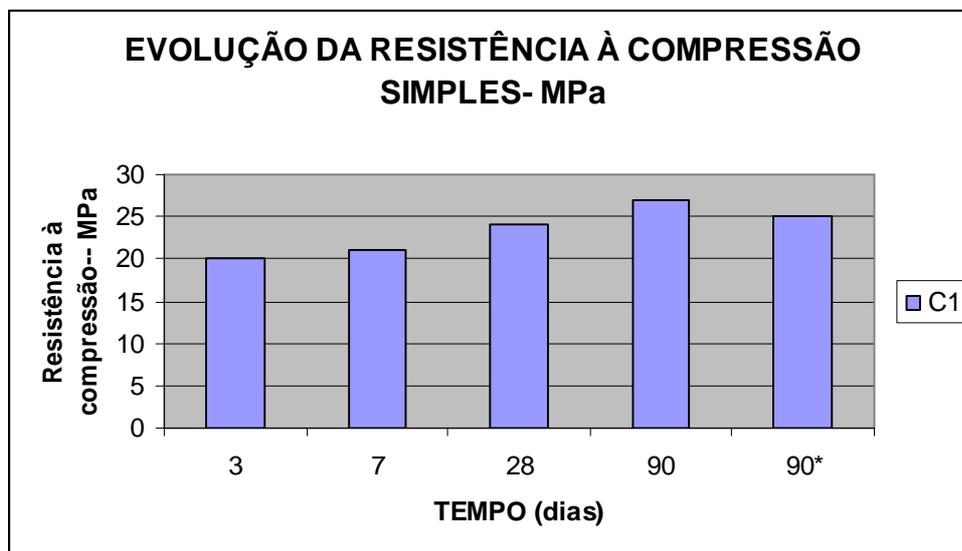


Figura 4.29- Mostra a evolução, ao longo do tempo, da resistência à compressão, em MPa, para o concreto realizado segundo o traço C1

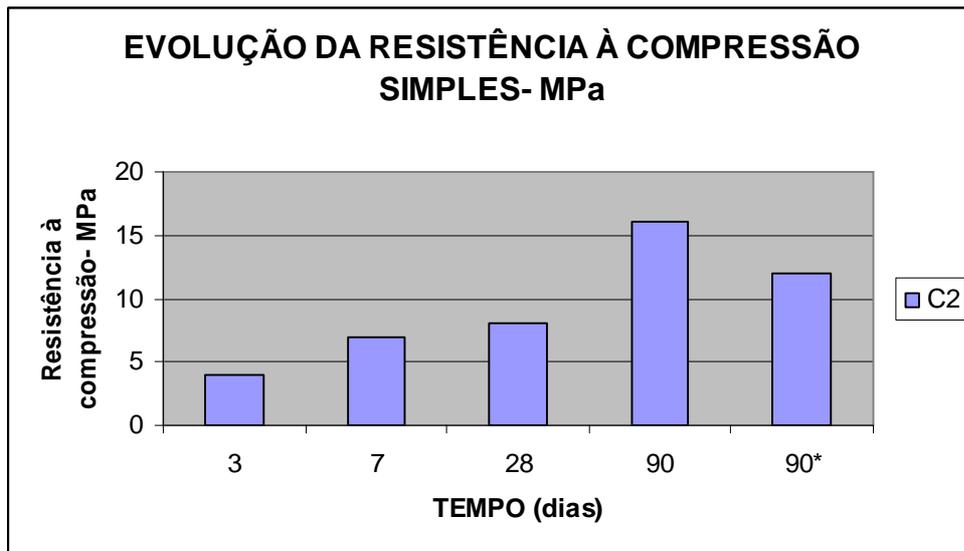


Figura 4.30- Mostra a evolução, ao longo do tempo, da resistência à compressão, em MPa, para o concreto realizado segundo o traço C2

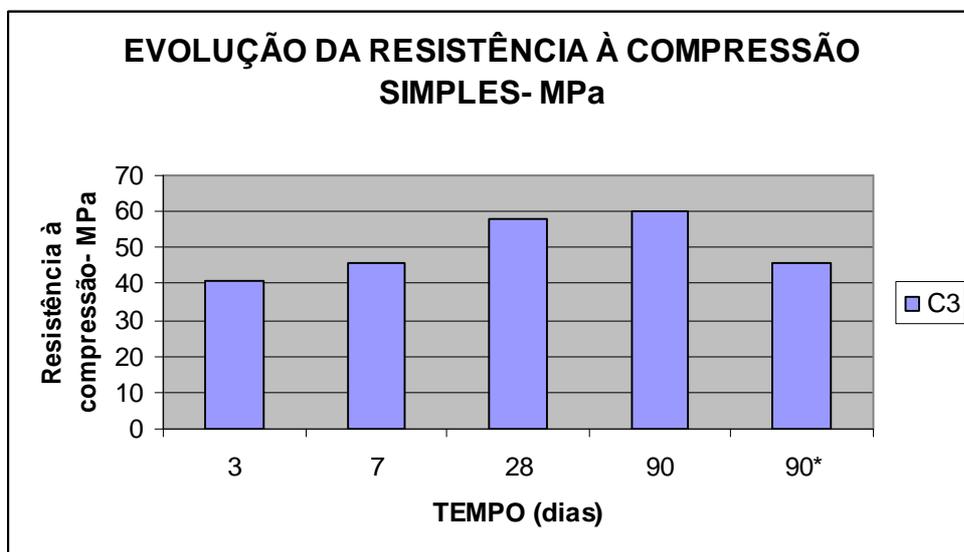


Figura 4.31- Mostra a evolução, ao longo do tempo, da resistência à compressão, em MPa, para o concreto realizado segundo o traço C3

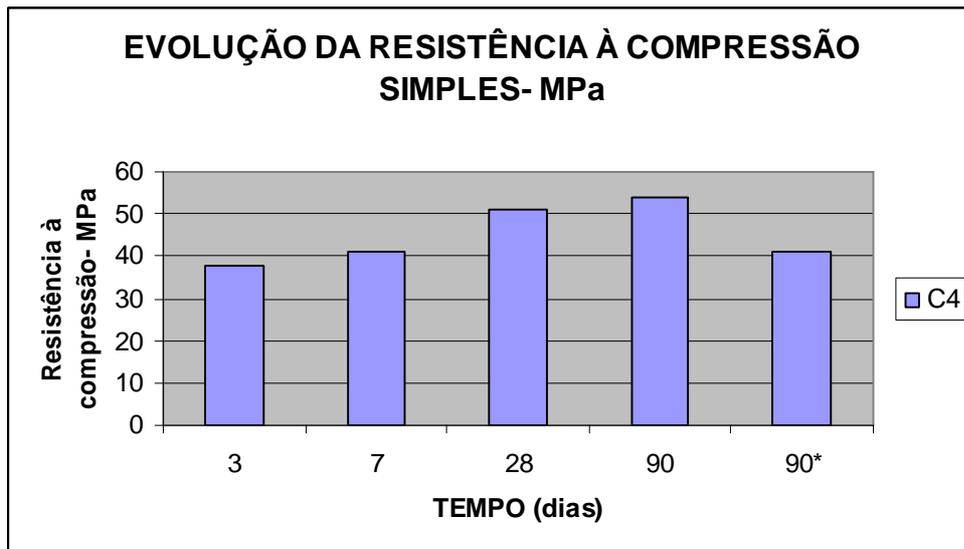


Figura 4.32- Mostra a evolução, ao longo do tempo, da resistência à compressão, em MPa, para o concreto realizado segundo o traço C4

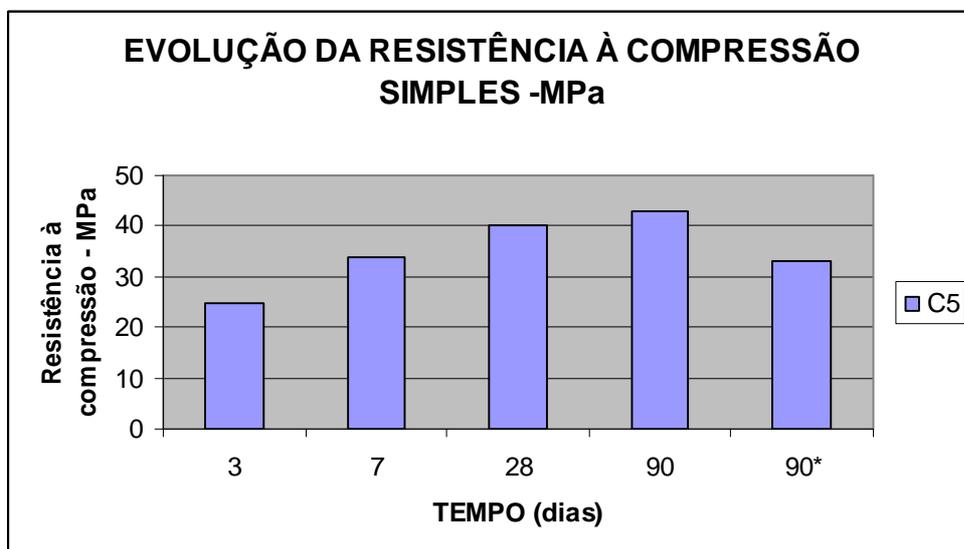


Figura 4.33- Mostra a evolução, ao longo do tempo, da resistência à compressão, em MPa, para o concreto realizado segundo o traço C5

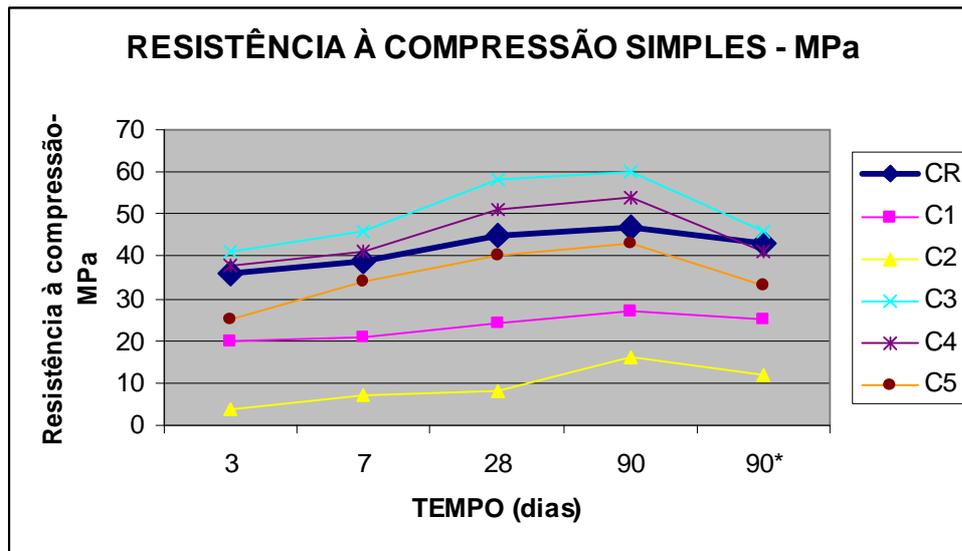


Figura 4.34- Resumo dos dados coletados nos ensaios de resistência à compressão simples, para todos os traços de concreto em estudo

4.2.3 Módulo de elasticidade dinâmico

O comportamento do módulo de elasticidade dinâmico pode ser verificado, nos traços de concreto em estudo, conforme Figuras 4.35, 4.36, 4.37, 4.38, 4.39, e 4.40. Neste item, foram feitas comparações do módulo de elasticidade dinâmico do concreto referência com cada traço de concreto estudado.

O módulo de elasticidade dinâmico do concreto referência está acima de todos os outros, sendo a seqüência em ordem decrescente a que se segue: CR, C3, C5, C4, C1 e C2.

Os traços de concreto que tiveram pior desempenho mecânico neste ensaio foram os executados com as adições metacaulim/escória de alto-forno ácida, ou seja, C1 e C2, sendo que C2 apresentou valor 50% menor que o CR e C1 20% menor.

O traço de concreto C3, contendo apenas sílica ativa como adição mineral, apresentou módulo de elasticidade dinâmico bem próximo do concreto referência, estando inferior a este em 1,09%.

Os traços C5 e C4, contendo sílica ativa e escória de alto-forno como adição mineral, apresentaram desempenho satisfatório quanto ao módulo de elasticidade dinâmico, tendo ocorrido uma redução de apenas 13% em relação ao CR. Além disso, os valores dos módulos de C5 e C4 foram praticamente idênticos. É importante destacar que a escória de alto-forno utilizada no concreto C4 é ácida, e a escória de alto-forno utilizada no concreto C5 é básica, originada por processo diferente e com características física, tais como densidade e finura dos grãos também diferentes.

Em seguida, submeteu-se outro lote de corpos-de-prova, correspondente aos traços estudados, ao aquecimento localizado, conforme descrito no item 3.5.1. Observou-se nesse momento que os concretos C3 e C4 apresentaram fissura visível a olho nu, exatamente no local onde apareceu a linha d'água, conforme pode ser visto nas Figuras 4.2 e 4.3. Essa ocorrência afetou significativamente os resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico. Em seguida realizou-se a recuperação de todos os corpos-de-prova com grout (SIKA GROUT TIX), conforme explicação apresentada no item 3.5.1. Após esse procedimento, realizou-se o ensaio do módulo de elasticidade dinâmico nos corpos-de-prova restaurados..

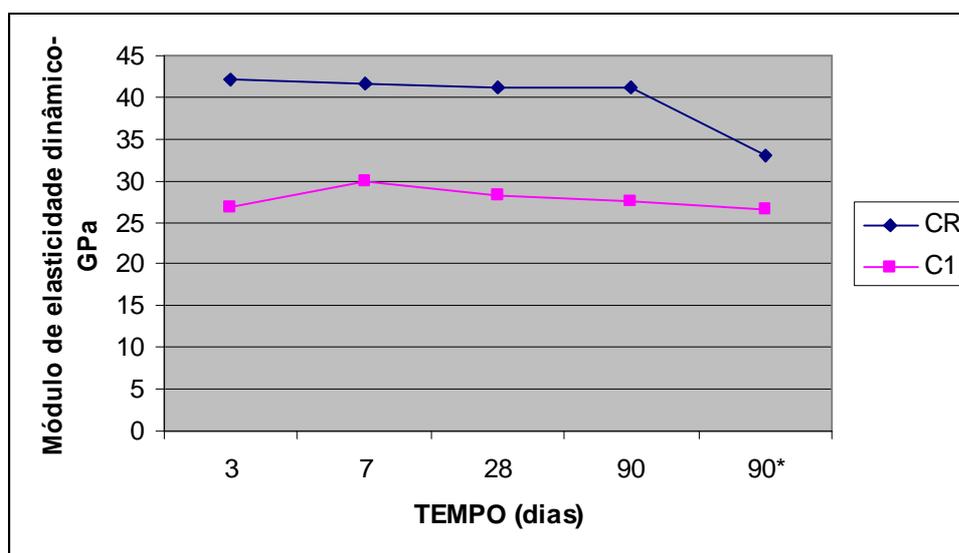


Figura 4.35- Comparação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto CR (cimento Portland 100%), com o concreto C1 (cimento Portland 40%, metacaulim 10% e escória de alto-forno ácida 50%)

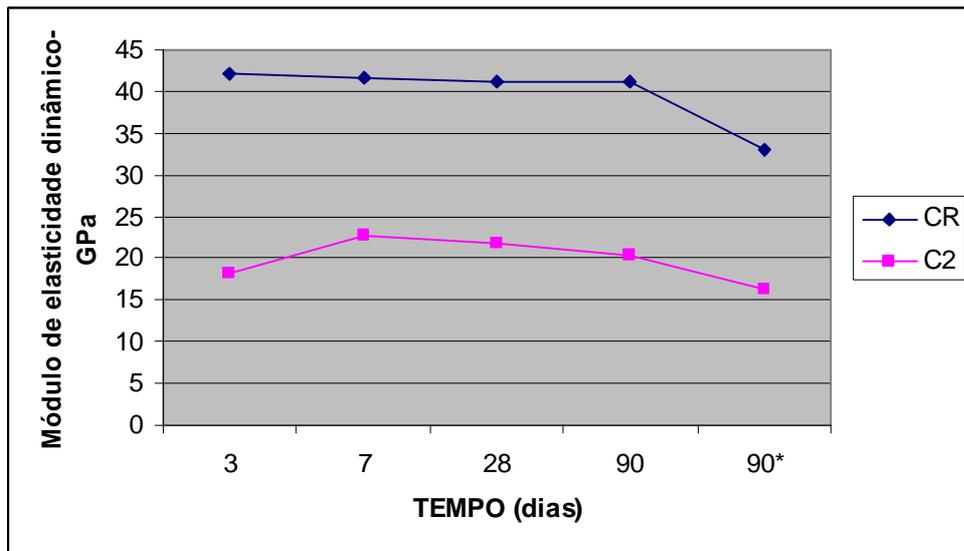


Figura 4.36- Comparação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto CR (cimento Portland 100%), com o concreto C2 (cimento Portland 20%, metacaulim 10% e escória de alto-forno ácida 70%)

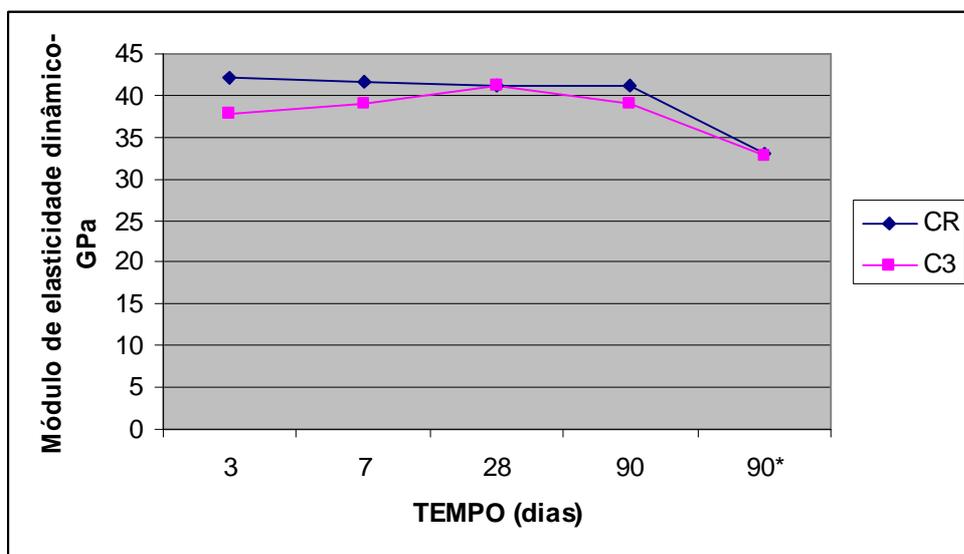


Figura 4.37- Comparação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto CR (cimento Portland 100%), com o concreto C3 (cimento Portland 91% e sílica ativa 9%)

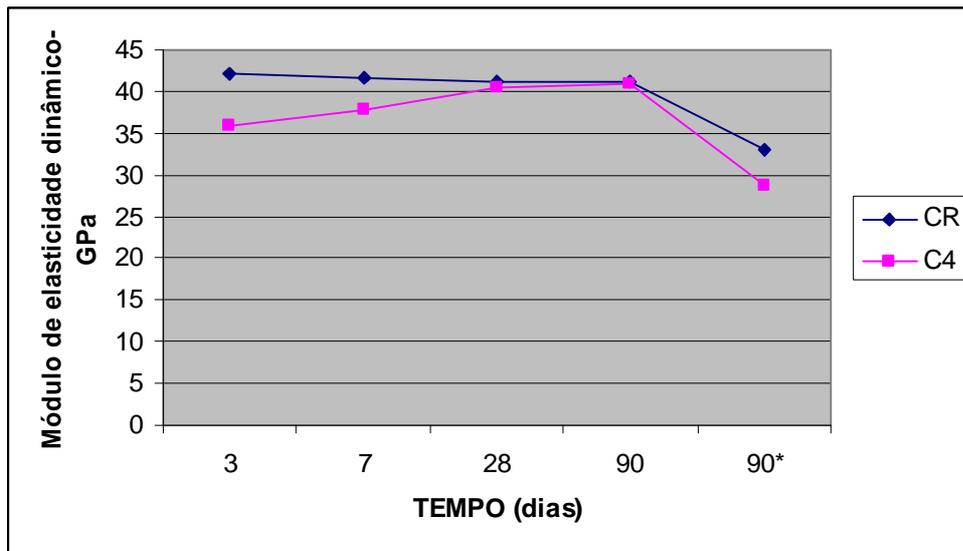


Figura 4.38- Comparação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto CR (cimento Portland 100%), com o concreto C4 (cimento Portland 61%, sílica ativa 9% e escória de alto-forno ácida 30%)

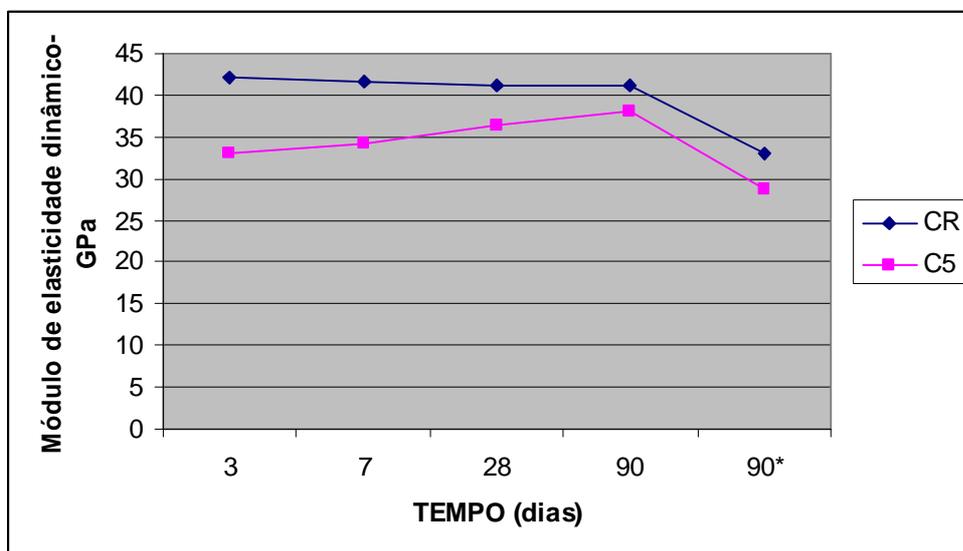


Figura 4.39- Comparação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto CR (cimento Portland 100%), com o concreto C5 (cimento Portland 21%, sílica ativa 9% e escória de alto-forno básica 70%)

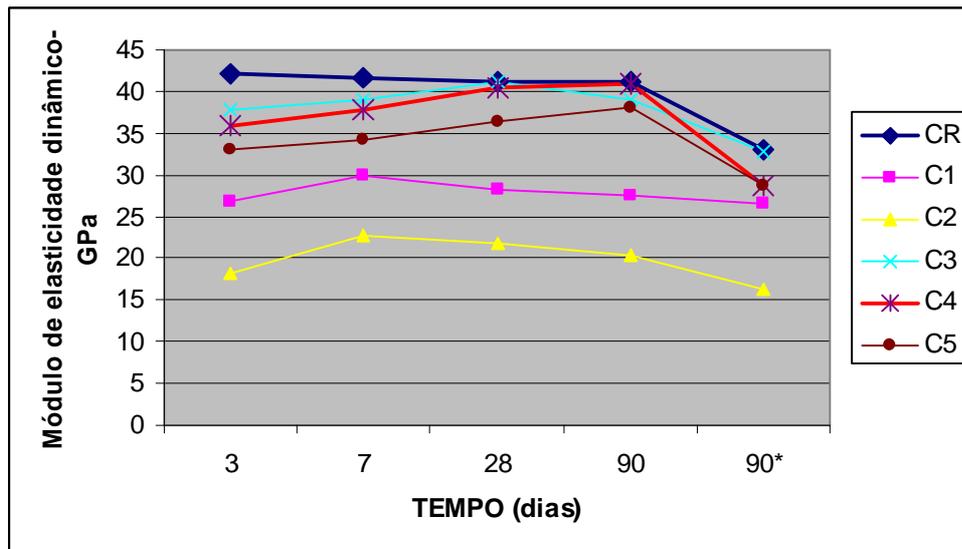


Figura 4.40- Comparação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto referência CR (cimento Portland 100%), com os concretos em estudo, C1, C2, C3, C4 e C5

4.2.4 Absorção de água por imersão total

BAUER (1995) define o concreto como um material poroso, cujos vazios têm origens diversas. Esses vazios geralmente são interligados, tornando o concreto permeável a líquidos e gases.

A absorção é o processo físico definido pela retenção de água nos poros e capilares do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A comparação, entre os diversos traços de concreto executados e aqui analisados, referente à absorção de água pelo ensaio de imersão, pode ser visto na Figura 4.41, sendo CR produzido com cimento Portland, C1 (40% de cimento Portland, 10% metacaulim e 50% de escória de alto-forno ácida), C2 (20% de cimento Portland, 10% de metacaulim e 70% de escória de alto-forno ácida), C3 (91% de cimento Portland e 9% de sílica ativa), C4 (61% de cimento Portland, 30% de escória de alto-forno ácida e 9% de sílica ativa) e C5 (21% de cimento Portland, 70% de escória de alto-forno básica e 9% de sílica ativa).

Este ensaio tem por objetivo verificar os danos causados pelo fogo na microestrutura dos diversos tipos de concretos. É consenso na literatura consultada, que o

surgimento de microfissuras interligadas, está diretamente relacionado com o aumento da absorção do elemento de concreto. Como pode ser observado na Figura 4.41, o concreto C3 apresentou maior variação da absorção de água, após o aquecimento e os concretos CR e C4 foram os que menos apresentaram variação na absorção d'água, após o aquecimento. Conclui-se portanto, que estes tiveram as suas microestruturas pouco danificadas pelo calor, enquanto aquele foi o que mais sofreu com o aquecimento.

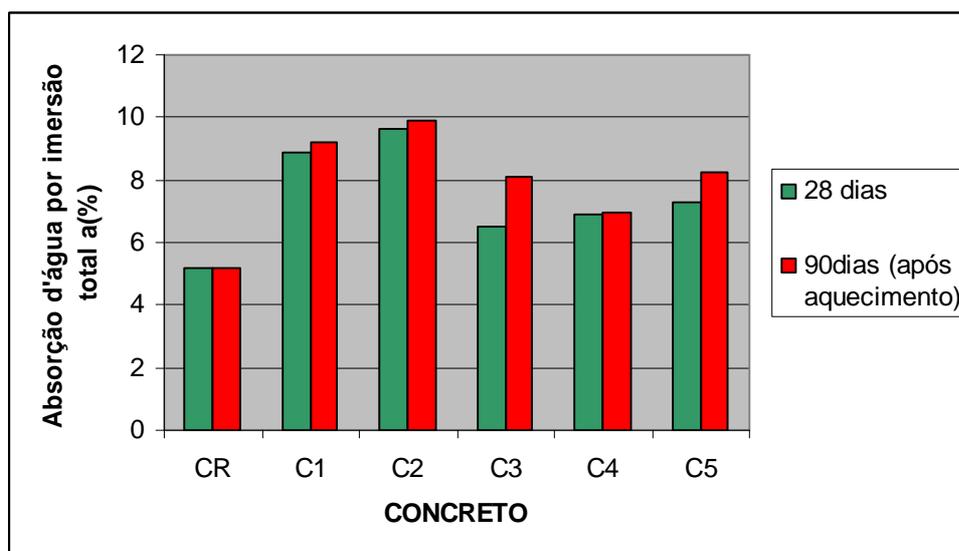


Figura 4.41- Comparação do ensaio de absorção de água por imersão, nos traços de concreto em estudo, nas idades de 28 dias e 90 dias (após aquecimento)

4.2.5 Resistência à tração por compressão diametral

Como pode ser verificado na Figura 4.42, o concreto mais sensível à ação do fogo foi C3. Os concretos C1 e C2 tiveram uma pequena alteração, mas estes apresentaram um desempenho aquém do esperado em todos os ensaios realizados. Já os concretos CR, C4 e C5 apresentaram excelentes resultados, pois não sofreram alteração nessa propriedade mecânica, após o aquecimento.

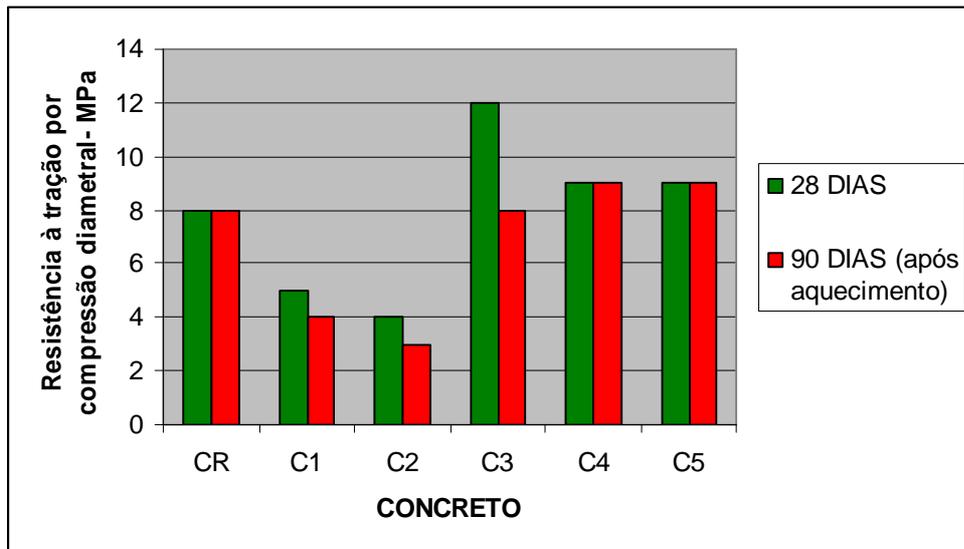


Figura 4.42- Comparação do ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos Corpos-de-prova em estudo, antes e após o aquecimento

5 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

Os ensaios de resistência à compressão simples, módulo de elasticidade dinâmico, absorção d'água por imersão total e resistência à tração por compressão diametral, realizados nos corpos-de-prova, antes de submetê-los à temperaturas elevadas, são comuns para avaliação das propriedades físicas, elásticas e mecânicas dos concretos com diferentes tipos e proporções de adições minerais.

No ensaio de resistência à compressão simples, verificou-se profundas alterações em função da utilização de adições minerais, como aglomerantes, no concreto. Nesse ensaio, o concreto C3, contendo 9% de sílica ativa em substituição ao cimento, obteve a melhor performance, 30% superior ao CR, confirmando o que preconiza a literatura. Por outro lado, os concretos C1 e C2, que possuem como aglomerantes: cimento Portland, metacaulim e escória de alto-forno ácida apresentaram os piores resultados, sendo o C2 o pior deles, com uma resistência à compressão equivalente a 20% da resistência do concreto referência, aos 28 dias. Em seguida é relevante comparar as resistências obtidas nos ensaios dos concretos C2 e C5. Ambos possuem 70% de escória de alto-forno, com a seguinte diferença: o concreto C2 utiliza a escória de alto-forno ácida e o C5 escória de alto-forno básica de alta reatividade. Além disso, em C2 utilizou-se 10% de metacaulim e em C5 9% de sílica ativa, pozolanas largamente utilizadas como aglomerante. A resistência obtida nos corpos-de-prova do concreto C5, na idade de 7/28/90 dias, é 10% inferior às de CR. Esse fato destaca a importância de se desenvolver maiores estudos com este material, uma vez que o concreto C5, por conter apenas 21% de cimento Portland, provoca menor impacto ambiental, estando portanto em consonância com a busca pela sustentabilidade na construção civil. O concreto C4 (61% Cimento Portland ARI, 30% escória de alto-forno ácida, 9% sílica ativa) apresentou resultados semelhantes aos do concreto CR nas idades de 3 e 7 dias e 13% superior na idade de 28 dias, como esperado, em função da menor velocidade de reação da escória.

Dentre os concretos estudados neste trabalho, o concreto CR foi o que apresentou melhor desempenho no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico. Em seguida estão C3 e C4, que apresentaram diferença mínima entre si, da ordem de 3%, mas diferindo de CR em 11% aos 3 dias, 8% aos 7 dias e 3% aos 28 dias; sugerindo que

ao longo do tempo estes concretos tendem a se igualar ao CR, no que tange ao módulo de elasticidade dinâmico. Já o concreto C5 apresentou redução do módulo de elasticidade dinâmico, em relação a CR, da ordem de 20% aos 3 dias, 17% aos 7 dias e 14% aos 28 dias; apresentando também uma tendência de recuperação de desempenho quando comparado a CR. Mais uma vez, o concreto C5 se destaca, apresentando ótimo desempenho quando comparado a CR. Os concretos C1 e C2 apresentaram resultados bem inferiores ao concreto CR, ou seja, C1 apresentou redução de 35% aos 3 dias, 28% aos 7 dias e 33% aos 28 dias; e C2 apresentou redução de 56% aos 3 dias, 46 % aos 7 dias e 48% aos 28 dias, não enquadrando portanto à classe de concretos em estudo, que deve apresentar resistência à compressão entre 40 e 50 MPa aos 28 dias. Conclui-se portanto que as adições minerais provocaram redução no módulo de elasticidade dinâmico.

Na avaliação dos resultados dos ensaios de absorção d'água por imersão total, ficou evidente a relação entre esta propriedade física e a densidade do concreto no estado endurecido. Como era de se esperar o concreto CR apresentou melhor resultado. Os concretos C1 e C2, contendo adições de metacaulim e escória de alto-forno ácida, apresentaram pior desempenho, ou seja, acréscimo relativo de peso, equivalente a 73% e 88%, respectivamente, em relação ao acréscimo verificado no concreto CR . Os concretos C3 e C4 apresentaram resultados próximos, diferindo em 6% os seus valores, mas estes são superiores em 26% e 34% respectivamente, quando comparados ao resultado registrado no ensaio do concreto CR. Finalmente o concreto C5 apresentou um valor superior a CR, equivalente a 42%. A partir desses resultados conclui-se que a execução de concretos contendo como aglomerante um sistema terciário contendo CPL/EAFAM, produz uma argamassa muito porosa e conseqüentemente pouco resistente mecanicamente. Já o sistema terciário composto por CPL/EAFBAR/SA apresentou um desempenho muito superior ao anterior.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração por compressão diametral mostram o melhor desempenho do concreto C3 em relação a todos os outros, estando este 50% acima de CR. Os concretos C4 e C5 também apresentaram uma boa performance, 13% superior a CR. Apenas C1 e C2 tiveram desempenho inferior a CR, 40% e 50% respectivamente. Conclui-se portanto, que as adições presentes em

C3, C4 e C5 melhoraram esta propriedade mecânica do concreto, enquanto as adições presentes em C1 e C2 produziram um desempenho insuficiente.

Os ensaios realizados nos corpos-de-prova após submetê-los a temperaturas elevadas e posterior restauração dos mesmos, utilizando "GROUT", foram: resistência à compressão simples, absorção d'água por imersão total, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade dinâmico e difusividade do calor no interior do concreto. Esses ensaios são comuns na avaliação das propriedades físicas, elásticas e mecânicas dos concretos e permitem comparar as mudanças de comportamento dos materiais com a elevação da temperatura.

Pode-se verificar que o concreto CR, neste estudo, tendo 100% de cimento Portland como aglomerante, foi a referência para a análise dos resultados pelo método da comparação, apresentando um bom desempenho de suas propriedades físicas e mecânicas tanto à temperatura ambiente quanto sob a ação do fogo. Este concreto atingiu a resistência à compressão, aos 28 dias, equivalente a 45 MPa, sendo assim classificado como um concreto de alto desempenho (CAD).

O concreto C1. apresentou após o aquecimento, uma redução de 4,10% no ensaio de resistência à compressão simples e 6,20% no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico, confirmando a afirmação preconizada na literatura, de que o módulo de elasticidade do concreto é mais sensível do que a resistência à compressão simples, quando este é submetido à ação do fogo. Quanto à absorção d'água por imersão total, pode-se dizer que houve um aumento de 3,27% em relação ao mesmo concreto antes do aquecimento. A partir deste valor conclui-se que a microestrutura do concreto em análise, pouco sofreu com o aquecimento, por apresentar-se muito porosa. O resultado referente à resistência à tração por compressão diametral, também apresentou redução, equivalente a 20%, ou seja, passou de 5MPa para 4MPa. Já o ensaio de difusividade do calor no interior do concreto mostrou que o fluxo de calor se propagou com maior velocidade no sentido transversal à horizontal traçada no ponto de aplicação do fogo. Essa observação merece estudos mais profundos.

O concreto C2 apresentou resultados ainda piores que C1. A resistência à compressão simples, reduziu em 12,5%, enquanto o módulo de elasticidade dinâmico, 25,3%. A absorção d'água por imersão total teve um aumento de 2,07%, o que equivale a dizer que o fogo pouco afetou a microestrutura desse concreto. Conclui-se então, que em concretos muito porosos, os danos provocados pelo calor à sua microestrutura são mínimos. A partir do ensaio de tração por compressão diametral, constata-se que ocorreu uma redução de 25%. Salienta-se ainda que os resultados obtidos nos ensaios à temperatura ambiente são muito baixos. Finalmente, o ensaio de difusividade do calor no interior do concreto, mostrou também que o fluxo de calor se propaga mais rapidamente no sentido transversal do que no sentido longitudinal, tomando como referência o plano horizontal que passa pelo ponto de aplicação do fogo. Comparando os resultados dos concretos C1 e C2, conclui-se que as propriedades mecânicas do concreto C2 sofreram maiores danos após o aquecimento.

O concreto C3, após ser aquecido, apresentou uma redução acentuada nos ensaios que avaliam as propriedades mecânicas, sendo estas reduções equivalentes a 24% no ensaio de resistência à compressão simples, 16% no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico e 50,0% no ensaio de tração por compressão diametral. Tal fato pode ser justificado pelo fenômeno do lascamento "Spalling", que danificou o corpo-de-prova, e conseqüentemente atingiu mais profundamente o concreto. As propriedades físicas do concreto, aqui avaliadas pelo ensaio de absorção d'água por imersão total, também apresentaram alterações significativas, tendo sofrido um acréscimo de 25,15% em seu peso, após a imersão em água. A partir desses resultados, conclui-se que o concreto C3 sofreu de modo acentuado o efeito do aquecimento. Quanto à difusão do calor neste concreto, verificou-se que ocorreu o inverso dos resultados apresentados nos concretos C1, C2 e C5, ou seja, a velocidade de propagação do calor foi maior no sentido longitudinal. Este ensaio merece uma análise mais profunda, porque ao que parece, o fluxo de calor funcionou como uma "faca", seccionando a microestrutura do corpo-de-prova no plano horizontal, que passa pelo ponto de aplicação do calor. Uma verificação dessa conclusão, no macrouniverso, foi a visualização de uma linha escura formada pela migração da água existente no interior do concreto, que surgiu na superfície deste, exatamente naquele plano horizontal que passa pelo ponto de aplicação do calor.

Em seguida, verificou-se que no lugar onde ocorreu a linha escura (água), surgiu uma fissura visível a olho nu.

O concreto C4 apresentou resultados semelhantes aos de C3 no que se refere ao ensaio de resistência à compressão simples, ou seja, redução de 23,3%. Entretanto, diferiu significativamente em relação aos demais ensaios, como comentado adiante. O módulo de elasticidade dinâmico apresentou maior redução, 25,1%, se comparado com a redução da resistência à compressão simples, nos corpos-de-prova que sofreram a ação do fogo. Já o ensaio de absorção d'água por imersão total, sofreu um acréscimo de 1,02%, levando à conclusão de que os danos provocados à microestrutura foram restritos a uma região que pouco influenciou as propriedades físicas dos corpos-de-prova ensaiados. Soma-se a isto, que o ensaio de resistência a tração por compressão diametral também não apresentou variação após aquecido, reforçando a idéia de que ocorreu danos à microestrutura, apenas no plano horizontal definido pelo ponto de aplicação do calor. Como este plano é perpendicular ao plano de aplicação de forças efetuado pela prensa hidráulica, não ocorreu alteração de resultado neste ensaio. Vale ressaltar que neste concreto, o fenômeno do lascamento "Spalling", ocorreu em uma intensidade inferior ao ocorrido em C3. No que se refere à difusividade do calor no interior do concreto, o comportamento do concreto C4 ficou bem próximo do C3. Enquanto este apresenta velocidade de propagação do calor no sentido longitudinal, superior à do sentido transversal, aquele apresenta velocidade igual nos dois sentidos. Neste concreto, C4, também é verificado o fenômeno do aparecimento da linha d'água durante o ensaio de aquecimento, com posterior surgimento de fissura visível a olho nu, no local dessa.

O concreto C5 apresentou grande redução, após o aquecimento, no ensaio de resistência à compressão simples, 23%, e 17% no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico. No ensaio de absorção d'água por imersão total apresentou-se melhor que em C3. Este obteve acréscimo de peso equivalente a 25,15% e aquele 12,91%. O ensaio de resistência a tração por compressão diametral mostrou que o aquecimento não afetou os resultados deste ensaio. Neste concreto, o fenômeno do lascamento ocorreu em proporção muito pequena, o que justifica o ótimo resultado alcançado nos ensaios de resistência a tração por compressão diametral e absorção d'água por

imersão total, quando comparados com os de C3. A difusividade do calor no interior do concreto C5 mostrou-se superior no sentido transversal ao plano horizontal, definido pelo ponto de aplicação do calor.

Após analisar os resultados obtidos, conclui-se que o concreto C1 apresentou melhor desempenho quando submetido ao fogo. Entretanto, os resultados dos ensaios correspondentes às suas propriedades mecânicas, à temperatura ambiente, apresentaram-se muito aquém dos resultados do concreto CR, referência para este estudo. Sendo assim, o concreto C1 não apresenta relevância neste estudo.

O concreto C2 apresentou o pior desempenho mecânico, em ensaios à temperatura ambiente, ficando também fora da faixa de resistência, definida neste trabalho pelo concreto CR. Não é, portanto, oportuno aprofundar-se na análise de seu comportamento frente à ação do fogo. Todavia, os seus resultados provocaram a formulação do concreto C5, com o objetivo de comparar os dois tipos de concreto, que têm em comum a quantidade, em peso, de cimento Portland, ou seja, 21% do total de aglomerante usado na produção de ambos os traços.

O concreto C3, que apresentou ótimos resultados nos ensaios realizados à temperatura ambiente, quando sob a ação do fogo mostrou-se extremamente sensível a este, tendo suas propriedades mecânicas e físicas, sido comprometidas principalmente pela ocorrência do lascamento ou “SPALLING”. Esses resultados alertam para a necessidade de se buscar técnicas e materiais novos, que evitem o citado fenômeno.

O concreto C4 diferindo de C3 apenas pelo acréscimo de escória de alto-forno ácida na composição dos aglomerantes, proporcionou uma redução considerável no fenômeno do lascamento, quando aquecido, apresentando-se como uma solução parcial para minimizar este problema.

O concreto C5, contendo apenas 21% de cimento Portland, apresentou excelente desempenho nos ensaios realizados à temperatura ambiente e quando aquecido. O fenômeno do lascamento ocorreu numa proporção inferior ao ocorrido em C3 e C4 e a resistência à compressão sofreu maior redução do que o módulo de elasticidade

dinâmico. Por fim, é importante salientar que os resultados apresentados nos ensaios do concreto C5, são compatíveis com a categoria de concreto em estudo.

6 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre os efeitos das adições minerais no concreto; as modificações de suas propriedades mecânicas, elásticas e físicas, à temperatura ambiente e quando submetido ao fogo decorrente de um incêndio. Dentre as principais observações verificadas pode-se destacar:

- § No ensaio de resistência à compressão simples, à temperatura ambiente, os concretos contendo sílica ativa em seu traço, apresentaram os melhores resultados, mesmo quando o traço continha 70% do aglomerante na forma de escória de alto-forno básica de alta reatividade. Entretanto, após aquecidos, esses concretos sofreram 24% de redução na resistência à compressão, e o concreto referência 8%, mostrando serem mais sensíveis ao fogo.
- § O módulo de elasticidade dinâmico, à temperatura ambiente, nos traços contendo adições minerais, foi inferior ao módulo do concreto de referência, o que significa que as adições minerais reduzem o módulo de elasticidade dinâmico, conforme verificou-se na literatura. Quando aquecido, o módulo de elasticidade dinâmico sofreu redução tanto no concreto de referência quanto nos concretos que contêm adições minerais.
- § O uso das adições minerais, metacaulim e escória de alto-forno ácida, nas proporções adotadas neste trabalho, apresentaram resultados de baixo desempenho em suas propriedades mecânicas, não atingindo a resistência esperada, semelhante à do concreto referência. Esse resultado pode ser interpretado como uma deficiência nas reações químicas ou na microestrutura do concreto pelo fato da densidade do metacaulim ser muito inferior à do cimento Portland. Entretanto, estudos complementares são necessários para melhor compreensão dos resultados verificados.
- § O fenômeno do “lascamento”, é acentuado no concreto que possui como aglomerante um sistema binário composto por cimento Portland e a sílica ativa. Entretanto, quando foi acrescentado escória de alto-forno a esse sistema, esse fenômeno reduziu acentuadamente. Essa verificação é de grande importância,

uma vez que o “lascamento” vem sendo muito estudado, em função da sílica ativa ser largamente empregada em concretos de alto desempenho.

§ O fluxo preferencial do calor dentro do concreto varia de acordo com os aglomerantes utilizados, podendo adquirir uma maior velocidade tanto no sentido longitudinal, quanto transversal à linha de aquecimento aplicada em um ponto específico. A partir dessa observação, fica clara a importância da microestrutura do concreto quando busca-se analisar suas propriedades térmicas. O concreto contendo como aglomerante, um sistema binário composto por cimento Portland e sílica ativa apresentou um comportamento totalmente diferente dos outros concretos, no que se refere ao fluxo de calor em seu interior. Nesse concreto, o calor é transmitido com maior velocidade no sentido longitudinal, ou seja, num plano horizontal, que passa pelo ponto de aplicação do calor no corpo-de-prova. A capacidade de retenção do calor dentro do concreto também está diretamente relacionada com o emprego dos aglomerantes. Entretanto, essa propriedade não foi o foco deste trabalho.

Como conclusão, pode-se dizer que o uso da sílica ativa melhora consideravelmente as propriedades mecânicas do concreto, à temperatura ambiente. Entretanto, esse concreto sofre mais o efeito do fogo que os outros aqui estudados. Partindo dessa consideração, fica clara a necessidade de projetar sistema de combate a incêndio mais eficiente para estruturas de concreto que utilizam sílica ativa ou adotar como aglomerante do concreto, um sistema terciário, constituída de cimento Portland, sílica ativa e, por exemplo, escória de alto-forno, aumentando assim a sua capacidade de resistir ao fogo e ao fenômeno do “lascamento”, sem comprometer suas propriedades mecânicas. Existem estudos onde acrescenta-se fibras de polipropileno ao sistema binário composto por cimento Portland e sílica ativa; no presente trabalho, alcançou-se ótimo resultado no combate ao fenômeno do “lascamento”, utilizando escória de alto-forno básica de alta reatividade. Uma comparação desses dois procedimentos torna-se fundamental para se buscar a melhor tecnologia a ser empregada no combate aos danos causados pelo fogo em estruturas de concreto.

Vale salientar ainda que nessa comparação, é importante avaliar qual dos sistemas acima mencionados reduz menos o módulo de elasticidade do concreto, uma importante propriedade a ser considerada.

7. SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

Avaliando os resultados obtidos neste trabalho, inicialmente à temperatura ambiente, destaca-se o desempenho do concreto C5, que possui 21% de cimento Portland como aglomerante. Considerando que a produção deste cimento gera uma alta emissão de CO₂ e que tanto a escória de alto-forno quanto a sílica ativa são subprodutos industriais, o que as tornam livres deste passivo ambiental, e considerando ainda a busca da sustentabilidade na construção civil, fica a sugestão de estudos que tenham como meta a utilização de maior porcentagem dessas adições minerais na composição do cimento brasileiro, contribuindo com a preservação do meio ambiente através da utilização de resíduos industriais, além de gerar para o Brasil, créditos de carbono.

Vale salientar ainda, que os resultados registrados nos concretos, após a ação do fogo, sinalizam a possibilidade de se buscar combinações de adições minerais, com a finalidade de reduzir o fenômeno do lascamento nestes, sem a perda da eficiência de suas propriedades mecânicas e físicas. Fica também esta sugestão, como proposta para novos trabalhos em busca de concretos cada vez mais eficientes, seguros quando sob a ação do fogo, preservando a vida humana e o patrimônio.

Fazer as mesmas análises, porém com barra de aço inserida no corpo-de-prova de concreto, para simulara concreto armado e também avaliar no mesmo, as variações nos fluxos de calor e o comportamento da interface entre aço/concreto.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, N; “et al.” **Seguridad Frente al fuego em los Edifícios de Vivienda: Estúdio de caso: Viviendas de madeira Cooperativa Aute.** VIII Congresso Latinoamericano de Patologia de la Construcción.v.1. Paraguay: COMPAT, 2005.

ANDRADE, T; HELENE, P. **Concreto de cimento Portland.** In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. IBRACON. São Paulo, 2007. p.905-944.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Agregados para concreto – Especificação- **NBR 7211.** Rio de Janeiro: ABNT,2005

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **EB 2:** Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **EB 1763:** Aditivos para concreto de cimento Portland – Especificação. Rio de Janeiro, 1992.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. **NBR 15200.** Rio de Janeiro: ABNT,2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Projeto de estruturas de concreto . **NBR 6118.** Rio de Janeiro: ABNT,2004.

AURÉLIO. Aurélio Buarque de Holanda Ferreira. Novo Dicionário da Língua Portuguesa. Rio de Janeiro: Nova Fronteira. 1975. 387p.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção.** 5ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1995. 435 p.

CÁNOVAS. M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado.** 1ª ed. São Paulo: Pini, 1988. 522p.

COSTA, Carla Neves; FIGUEIREDO, Antônio Domingues de; SILVA, Valdir Pignata e. **O Fenômeno do lascamento (“spalling”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio**- uma revisão crítica. Instituto Brasileiro de Concreto- 44º Congresso Brasileiro.

GIACCIO, G.; TOBES, J. M.; TORRIJOS, M.C.; ZERBINO, R. **Comportamiento Mecânico de Hormigones danados por temperatura**. VIII Congresso Latinoamericano de Patologia em la Construcción. V.II. CONPAT. Paraguay,2005.

HELENE, P. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 439-471.

HELENE, P et al. **Estudo da Influência do MetacaulimHP como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland**, 2003.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas/DED - Divisão de Edificações. **Tecnologia de Edificações**. São Paulo: Pini, 1988.

KULAKOWSKI, M. P.; “et al.” **Estudo da porosidade como condicionante da durabilidade e da carbonatação em concretos**. Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2006. IBRACON, Setembro2006.

LIMA, R. C. A.; CAETANO, L. F.; SILVA FILHO, S. C. P. **Proposição de uma Metodologia para Análise dos danos causados por incêndio em estruturas através de difração de Raios X**. VIII Congresso Latinoamericano de Patologia em la Construcción. V.III. CONPAT. Paraguay, 2005.

MALHOTRA, V. M. **Supplementary Cementing Materials for Concrete**, Canadian Government Publishing Centre, 1987. 424 p.

MARTIN, J.F.M. **Aditivos para Concreto**. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 381-406.

MEDEIROS, Marcelo Henrique F. de; HELENE, Paulo **Dissertação de Mestrado: Estudo da Influência do Metacaulim HP como adição de alta eficiência em concretos**

de cimento Portland. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP – Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2004.

MELO, Karoline A.; “et al.” **Análise das propriedades de concretos no estado fresco com emprego de metacaulim e aditivo superplastificante.** Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2006. IBRACON, Setemb. 2006.

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

MORAN, MICHAEL J.; SHAPIRO, HOWARD N. **Princípios de termodinâmica para engenharia.** 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2002. 681 p.

NEVILLE, Adan Matthew. **Propriedades do Concreto.** 2ª ed. rev. atual. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

ÖZISIK, M. NECATI, **Transferência de calor, um texto básico.** 2ª ed, Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1990. 661 p.

PETRUCCI, E. G. R.. **Concreto de Cimento Portland.** Porto Alegre: Globo, 1980. 435p.

PIRES, T.A.C.; “et al.” **Uma Abordagem Experimental para Avaliação da resistência mecânica residual de vigas em concreto armado após o incêndio.** Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2006. IBRACON, setemb. 2006.

Periódicos CAPES – (em particular a revista CEMENT AND CONCRETE RESEARCH). Disponível em: <http://www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso em: 12 de out. 2007.

RODRIGUES, Públio P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto.** 2ª ed., Estudo Técnico- Associação Brasileira de Cimento Portland- ET-67, abril 1995.

ROSA, Dalton W.; “et al.” **Influência do Teor de Escória e Ativador Químico na resistência à compressão e resistividade elétrica aparente: Avaliação Técnico/Econômica.** Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2006-48CBC0480. IBRACON, setemb. 2006.

SILVA, Maristela Gomes da; “et al.” **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** Ed.G.C.Isaia. São Paulo: IBRACON, 2007. 1v. 1.712p.

TORREGROSA, M.E. Maciá; CATALÁN, L.Vega; CERVERA, M. Llinares. **Los Avances Técnicos Reglamentarios sobre “ Seguridad em caso de incêndio”. El código técnico de La Edificación.** VIII Congreso Latinoamericano de Patología em la Construcción. V.1. CONPAT. Paraguay, 2005.

VERONEZ, Marcelo; “et al.” **Estudo das Propriedades do CAD utilizando diferentes tipos de Adição Mineral e Superplastificante.** Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2006. IBRACON, setembro 2006.

VIEIRA, Alexandre Lopes; ALHADAS, Miguel Fernando Schetini. **Concreto: Dosagem X Patologias.** Universidade Federal de Minas Gerais – Escola de Engenharia – Mestrado em Construção Civil. Jul.2006.