

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**EFEITO DE ELEVADAS TEMPERATURAS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E
POROSIDADE DE ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND**

JULIANA DA SILVA DE ARAUJO

**BARREIRAS-BA
SETEMBRO 2017**

JULIANA DA SILVA DE ARAUJO

**EFEITO DE ELEVADAS TEMPERATURAS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E
POROSIDADE DE ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal
do Oeste da Bahia, como requisito parcial à obtenção
do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: D.Sc. Juarez Hoppe Filho

**BARREIRAS-BA
SETEMBRO 2017**

FICHA CATALOGRÁFICA

A663 Araújo, Juliana da Silva.

Efeito de elevadas temperaturas na resistência à compressão e porosidade de argamassa de cimento Portland. / Juliana da Silva Araújo. – 2017.

69 f.; il.

Orientador: Prof. Dr. Juarez Hoppe Filho.

Trabalho de Conclusão de Curso: (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias, Barreiras, BA, 2017.

1. Resistência de materiais - Argamassa. 2. Cimento portland. I. Hoppe Filho, Juarez. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD: 620.1

JULIANA DA SILVA DE ARAUJO

**EFEITO DE ELEVADAS TEMPERATURAS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E
POROSIDADE DE ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND**

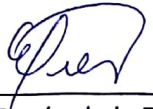
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal
do Oeste da Bahia, como requisito parcial à obtenção
do grau de Engenheiro Civil.


Aprovada em: 19 de setembro de 2017

Banca Examinadora

Orientador: _____


D.Sc. Juarez Hoppe Filho
Universidade Federal do Oeste da Bahia


Msc. Elier Pavón de la Fé
Universidade Federal do Oeste da Bahia


Msc. Kuelson Rândello Dantas Maciel
Universidade Federal do Oeste da Bahia

À minha avó Antônia Gonçalves (*in memoriam*),
que me ensinou o significado de jamais desistir.

AGRADECIMENTOS

Ao Criador, pelo dom da vida.

Aos meus pais, Maria Gonçalves e Juracy Pereira, e a minha irmã, Patrícia Gonçalves, por serem aquilo o que eu tenho de mais precioso.

Ao meu orientador, Juarez Hoppe Filho, pela paciência, confiança e principalmente pela inspiração ao longo de todo o curso.

Aos docentes da Universidade Federal do Oeste da Bahia, por compartilharem o seu conhecimento.

À Diandra Tanaka, por ter dado significado a palavra amizade.

À Ranaiane Lopes e Uilian Peixoto, por sempre terem sido as mãos estendidas em momentos difíceis.

À Dayane Gomes, pelos incontáveis momentos de parceria.

À Hindira Feitoza, Caroline Piane e Gleyson Bucker, pela generosidade.

Aos queridos amigos Vanessa Gabriele, Nivaldo Junior, Rízia Gonçalves, Erica Deai, Jader Luiz, Lázaro Farias e Itaylane Malta, pelos alegres momentos compartilhados ao longo do curso.

Aos funcionários da Universidade Federal do Oeste da Bahia, pelo pronto atendimento.

E à aqueles que não foram citados, mas de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui.

Muito obrigada!!!

RESUMO

A microestrutura do cimento Portland hidratado confere aos seus derivados (argamassa e concreto) boas características térmicas, entretanto, quando submetida à elevadas temperaturas, múltiplos processos passam a conduzir o comportamento da matriz hidratada. Com o objetivo de avaliar as alterações provocadas na resistência à compressão e porosidade da argamassa de cimento Portland, exposta a elevadas temperaturas, foram moldados corpos de prova ($\varnothing 5 \times 10$ cm), com relação água/cimento 0,40. Aos 6 (seis) e 27 (vinte e sete) dias os corpos de prova foram aquecidos em mufla na faixa de temperaturas entre de 100 °C e 600 °C, durante 24 horas, até atingirem as idades de ensaio, 7 e 28 dias. Os resultados indicaram que há um gradual acréscimo na resistência à compressão até 200 °C, sendo seguido de redução progressiva até aos 400 °C, de tal forma que a resistência à compressão se equipara à observada na argamassa mantida sob temperatura ambiente. A ação de temperaturas superiores a 400 °C tende a provocar a degradação significativa da microestrutura, com conseqüente redução na resistência à compressão e aumento da porosidade. Os resultados também evidenciaram que o grau de hidratação (maiores idades) influencia no comportamento da argamassa frente a ação térmica, ou seja, a argamassa com maior maturidade tende a ser mais resistente ao processo de degradação.

Palavras-chave: degradação de argamassa, ação térmica, porosidade, resistência à compressão.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2 - Campo de temperaturas e isotermas da seção de uma viga T submetida a ação térmica de um incêndio-padrão durante 120 minutos.	17
Figura 3 - Curva temperatura versus tempo do incêndio real.	18
Figura 4 - Curva temperatura versus tempo do incêndio natural.	19
Figura 5 - Curvas temperatura versus tempo para incêndio padrão, prescritas pelas normas ISO 834 e ASTM E 119.	22
Figura 6 - Curvas temperatura versus tempo do incêndio real (a), incêndio natural (b) e incêndio padrão (c).	23
Figura 7 - Microestrutura da pasta de cimento hidratada.....	24
Figura 8 - Tipos de água presentes na microestrutura da pasta de cimento.	25
Figura 9 - Representação diagramática da zona de transição da pasta de cimento Portland.	26
Figura 10 - Produtos da hidratação do cimento no interior de uma amostra de concreto à temperatura ambiente.....	27
Figura 11 - Produtos da hidratação do cimento no interior de uma amostra de concreto após exposição durante 5 horas à temperatura de 300°C	28
Figura 12- Difração de Raio-X da amostra de pasta de cimento e óxido de alumínio, em temperatura ambiente.....	29
Figura 13 - Difração de Raios-X das amostras de pasta de cimento com óxido de alumínio, expostas às temperaturas de 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C e 800 °C durante um período de 8 horas.	30
Figura 14 - Difração de Raios-X das amostras de pasta de cimento com óxido de alumínio, expostas a temperatura de 400 °C em diferentes períodos.....	31
Figura 15 - Difração de Raios-X das amostras de pasta de cimento com óxido de alumínio, expostas a temperatura de 500 °C em diferentes períodos.....	32
Figura 16 - Difração de Raios-X das amostras de pasta de cimento com óxido de alumínio, expostas a temperatura de 600 °C em diferentes períodos.....	32
Figura 17 - Difração de Raios-X das amostras de pasta de cimento com óxido de alumínio, expostas a temperatura de 700 °C em diferentes períodos.....	33

Figura 18 - Difração de Raios-X das amostras de pasta de cimento com óxido de alumínio, expostas a temperatura de 800 °C em diferentes períodos.	33
Figura 19 - TG e DTG do hidróxido de cálcio.	34
Figura 20 - TG e DTG da pasta de cimento Portland CP V aos 7 e 28 dias de idade.	35
Figura 21 - Distribuição granulométrica do agregado (miúdo).	42
Figura 22 - Preparo da argamassa.	44
Figura 23 - Moldagem do corpo de prova.	44
Figura 24 - Representação da disposição dos corpos de prova no interior da mufla.	45
Figura 25 - Prensa hidráulica utilizada para o ensaio de resistência à compressão axial. ..	46
Figura 26 - Representação da extração da amostra para ensaio de porosidade.	47
Figura 27 - Balança	48
Figura 28 – Liofilizador.	48
Figura 29 - Resistência à compressão média da argamassa exposta a elevada temperatura aos 7 e 28 dias de idade.	51
Figura 30 - Resistência à compressão aos 7 e 28 dias da argamassa exposta a ação térmica.	52
Figura 31 - Evolução da variação na resistência à compressão, aos 7 e 28 dias, decorrente da exposição térmica em diferentes temperaturas.	53
Figura 32 - Porosidade média da argamassa exposta a elevada temperatura aos 7 e 28 dias de idade.	55
Figura 33 - Porosidade da argamassa aos 7 e 28 dias de idade sob exposição a diferentes temperaturas.	56
Figura 34 - Evolução do incremento da porosidade decorrente da exposição térmica para as diferentes temperaturas, aos 7 e 28 dias.	57
Figura 35 - Resistência à compressão e porosidade, aos 7 e 28 dias, da argamassa exposta a temperaturas elevadas.	59

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA	9
1.2 PRINCIPAIS PESQUISAS RELACIONADAS AO TEMA	10
1.3 OBJETIVO.....	12
1.4 JUSTIFICATIVA	12
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR	13
2.2 CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	15
2.3 INCÊNDIO.....	17
2.3.1 INCÊNDIO REAL	17
2.3.2 INCÊNDIO NATURAL.....	19
2.3.3 INCÊNDIO PADRÃO.....	19
2.4 EFEITO DA AÇÃO TÉRMICA SOBRE OS COMPONENTES DA ARGAMASSA.....	23
2.4.1 PASTA DE CIMENTO	23
2.4.2 AGREGADOS.....	35
2.5 ALTERAÇÃO NO ASPECTO VISUAL.....	36
2.6 CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA	39
2.6.1 SPALLING.....	40
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1 MATERIAIS.....	41
3.1.1 CIMENTO PORTLAND	41
3.1.2 AGREGADO MIÚDO	41
3.2 DOSAGEM DA ARGAMASSA.....	42
3.3 MISTURA DA ARGAMASSA	43
3.4 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA.....	44
3.5 EXPOSIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA À ELEVADAS TEMPERATURAS.....	45
3.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	46
3.6.1 ENSAIO DE POROSIDADE	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	50
4.2 POROSIDADE	54

4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO VERSUS POROSIDADE	58
5. CONCLUSÕES.....	61
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
7. REFERÊNCIAS.....	63
APÊNDICE A	67
APÊNDICE B.....	68

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material amplamente reconhecido por sua boa resistência ao fogo em virtude de características como a baixa condutividade térmica e seu elevado fator de massividade¹ (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002a). Quando exposto a temperaturas elevadas, o concreto se comporta de forma diferente à materiais como a madeira e os polímeros, não entrando em combustão e não emitindo gases tóxicos, as duas principais causas de danos à vida humana em situação de incêndio (CALDAS, 2008; METHA; MONTEIRO, 2008).

Os diferentes materiais que constituem o concreto trabalham em conjunto, formando um compósito, ou seja, o concreto endurecido, lhe conferindo boas características térmicas para o intervalo de temperaturas dentro das condições normais de uso. Por outro lado, a sua natureza polifásica lhe impõe um comportamento complexo quando submetido a temperaturas que ultrapassam os limites estabelecidos em projeto (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002a).

Um aspecto relevante do material é a sua capacidade de conservar a resistência por períodos razoavelmente longos, reduzindo o risco de colapso da estrutura durante as operações de resgate (METHA; MONTEIRO, 2008).

A ação de temperaturas elevadas sobre o concreto e argamassa de cimento Portland pode provocar a redução da resistência característica à compressão e do módulo de elasticidade. A perda de rigidez da estrutura e a natureza heterogênea dos constituintes do concreto (pasta e agregados), conduz a desagregação polifásica do material, podendo levar o elemento estrutural a ruína (COSTA; PIGNATTA; SILVA, 2002).

O emprego de concretos de alta resistência possibilitam a adoção de elementos estruturais mais esbeltos, com seções transversais menores e maiores vãos. A redução na relação água/cimento, necessário para garantir o incremento de resistência, confere a matriz cimentícia uma maior compacidade e diminui a permeabilidade da pasta, propriedades que contribuem para o aumento da durabilidade, no entanto podem

¹ Fator de massividade é definido como a relação entre a superfície exposta do elemento estrutural e o seu volume.

antecipar a ruína do material (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002b; KALIFA; MENNETEAU; QUENARD, 2000).

A estrutura muito compacta, com baixa porosidade, dificulta o transporte de fluidos formados na matriz durante o aquecimento, de forma que os vapores de água presentes no interior dos poros não possam sair da microestrutura do material a uma mesma taxa na qual são formados, resultando no acúmulo de tensões não previstas no seu interior (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002b).

Quando o concreto é aquecido lentamente não são desenvolvidos grandes gradientes térmicos, portanto, não há degradação imediata do material como fissuração e descamação. Por outro lado, a ausência de fissuras pode impedir a liberação da água do interior da massa de concreto, tornando-o mais suscetível a ocorrência de lascamentos (MORALES; CAMPOS; FAGANELLO, 2011).

Durante a ocorrência de incêndios, as transformações na microestrutura do concreto podem levar os elementos estruturais à ruptura precoce, por isso as estruturas devem atender a um tempo mínimo de resistência requerido por normas ou legislação, a fim de garantir a segurança na fuga dos ocupantes da edificação e, quando necessário, as operações de combate ao fogo (COSTA, 2008).

Dentre as causas que podem levar uma estrutura sujeita a altas temperaturas ao colapso estão a temperatura máxima atingida, o tempo de exposição, a proporção de mistura do concreto e a velocidade, tanto da taxa de aquecimento quanto a de resfriamento (KALIFA; MENNETEAU; QUENARD, 2000; LIMA et al., 2004).

1.1 Importância do tema

A construção de edifícios de múltiplos andares possibilitou a sobreposição de unidades, resultando na elevação de cargas atuantes sobre a estrutura. Tal avanço exigiu o aperfeiçoamento de técnicas construtivas, bem como desenvolvimento de novos materiais e a melhor qualificação dos profissionais. Entretanto, mesmo com os constantes avanços no setor da construção civil, os edifícios ainda se mostram vulneráveis, principalmente, à atuação de cargas para as quais não foram projetados.

A ação de temperaturas elevadas é um evento incomum, mas que pode provocar o colapso da edificação. A falha de um dos elementos do sistema estrutural pode desencadear o colapso progressivo do edifício, levando-o ao desabamento parcialmente ou por completo.

Ações excepcionais de origem térmica implicam, de forma indireta, em esforços adicionais às estruturas de concreto. Tais esforços surgem durante o impedimento das deformações ocasionadas pela variação da temperatura. Também atuam na estrutura tensões internas resultantes de gradientes térmicos desenvolvidos ao longo de seções transversais.

Para as condições normais de uso, os critérios de dimensionamento de estruturas em concreto, os métodos construtivos e os materiais são relativamente bem dominados pelos profissionais da construção civil. Entretanto, em situações nas quais a estrutura sofre a influência de ações térmicas severas, o dimensionamento de estruturas envolve variáveis da termodinâmica e transferência de calor, não previstos nos cálculos.

Identificar as alterações ocorridas na resistência a compressão e na porosidade da argamassa de cimento Portland submetida a elevadas temperaturas, bem como a natureza de tais alterações, fornecem subsídios necessários para a compreensão do comportamento do material quando aquecido. Um estudo de grande relevância, dado os complexos mecanismos que atuam sobre a microestrutura e a atual falta de conhecimento sobre o assunto.

1.2 Principais pesquisas relacionadas ao tema

Os estudos listados a seguir apresentam grande relevância para o estudo das alterações na micro e macroestrutura do concreto submetido a ação térmica de alta intensidade. Portanto, são apresentados comentários sucintos acerca dos mesmos, a fim de situar os leitores sobre o tema a ser desenvolvido neste trabalho.

- Costa, Figueiredo e Silva (2002a) avaliaram os efeitos da temperatura sobre os componentes constituintes do concreto endurecido, bem como o comportamento do material “concreto armado”. Concluíram que, para uma faixa de temperatura entre 300 °C e 400 °C, o concreto apresenta uma redução acentuada na resistência à

compressão, com formação de fissuras visíveis na superfície. Acima dos 600 °C foi constatada perda total de resistência à compressão do material.

- Costa, Figueiredo e Silva (2002b) abordaram as principais causas e apresentaram medidas de controle da qualidade do concreto que reduzem o risco do lascamento explosivo, que normalmente ocorre nos primeiros minutos do incêndio. A utilização de fibras poliméricas que derretem em contato com o calor abre caminho para movimentação dos gases., A adição de produtos químicos que induzem a formação de poros capilares, assim como o uso de malhas finas do tipo tela armada atuando como armadura de pele, são medidas que vêm a contribuir na prevenção dos lascamentos.
- Caldas (2008) apresentou modelos numéricos não lineares para a análise térmica e mecânica de estruturas de concreto, aço e estruturas mistas, em situação de incêndio, fornecendo a distribuição de temperatura da qual se pode obter a degradação das propriedades como: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Os modelos numéricos expostos provaram ser capazes de simular com precisão o comportamento de estrutura cometida por incêndio, mostrando-se adequados, segundo os critérios das normas internacionais EN 1992-1-2 (2004) e EN 1993-1-2 (2005).
- Morales, Campos e Faganello (2011) estudaram os efeitos provocados pelo fogo no concreto armado através da análise dos resultados obtidos em argamassas, no aço e na vinculação entre ambos. Também avaliaram as consequências das dilatações quando impedidas total ou parcialmente e a produção de esforços resultantes dos incêndios. Concluíram que até 250 °C a influência da temperatura sobre a argamassa e o concreto ocorre de forma reduzida e irregular. Os efeitos são mais acentuados, chegando ao comprometimento da integridade da estrutura, para faixas de temperatura que ultrapassam os 300 °C, principalmente nos casos em que o resfriamento ocorre de modo brusco.

1.3 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência de temperaturas elevadas na resistência à compressão e porosidade de argamassa de cimento Portland submetida a aquecimento em mufla por período de 24 horas que antecedem as idades de 7 e 28 dias.

1.4 Justificativa

As normas técnicas brasileiras NBR 14.323 (ABNT, 1999) – “Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento ” e NBR 15.200 (ABNT, 2004) – “Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio - Procedimento”, assim como o Eurocode 1 (EN 1991-1-2:2002) – “Ações sobre estruturas expostas ao fogo”, ASTM E 119 (1988) – “Métodos de teste padrão para testes de incêndio em construções e materiais de construção” e a ISO 834 (1975) – “Testes de resistência ao fogo: Elementos de construção de edifícios” determinam o uso da curva-padrão para verificação de estruturas em situação de incêndio, entretanto, esse método não é capaz de representar com fidelidade todas as situações do sinistro, tão pouco apresentar os efeitos provocados a matriz cimentícia decorrente da exposição à elevadas temperaturas.

Apesar do grande avanço no desenvolvimento de novas técnicas e materiais destinados a melhorar as características do concreto, o conhecimento a respeito do desempenho do mesmo frente a ações térmicas severas ainda é bem limitado. O entendimento dos processos ocorridos na microestrutura da pasta de cimento nos fornece os recursos necessários para entender o comportamento da matriz aquecida.

O estudo da ação térmica em corpos de prova de argamassa submetidos ao aquecimento em mufla permite observar as alterações nas propriedades do material através da variação controlada da temperatura, por períodos de tempo independentes da quantidade de material combustível e sem grandes custos.

A metodologia de estudo em mufla se mostra uma alternativa viável, para centros universitários, sobre o estudo da influência de temperaturas elevadas sobre a matriz cimentícia. Assim sendo, este trabalho pretende gerar conhecimento acerca da degradação da microestrutura de argamassa quando exposta a diferentes patamares de temperatura em mufla, sob o ponto de vista da resistência à compressão e porosidade.

2. REVISÃO DE LITERATURA

As primeiras investigações sobre o comportamento da matriz cimentícia submetida a temperaturas elevadas ocorreram no início do século XIX. Por meio de experimentos rudimentares, pôde-se constatar a influência da umidade interna do concreto na desagregação do material submetido a ações térmicas extremas (MÖRSCH, 1948).

Até a década de 40, os estudos sobre os efeitos da ação térmica estavam voltados para estruturas em aço, em função da predominância no emprego do material nas construções da época e da preocupação com os acidentes, visto que as estruturas metálicas sem proteção térmica e projetadas apenas para situações de serviço em temperatura ambiente não exibiam uma resposta estrutural aceitável se comparadas as peças executadas em concreto armado (COSTA, 2008).

Foi na década de 50 que os efeitos da degradação térmica sobre a matriz cimentícia passaram a ser observados. As pesquisas da época foram utilizadas como base para as primeiras recomendações sobre o tema, propostas nos códigos norte americanos e europeus para projetos estruturais (PHAN; CARINO, 2003).

No Brasil, o tema passou a ser discutido após a publicação da ABNT NBR 15.200 (2004) – “Projeto de estruturas em situação de incêndio – Procedimento”, que trouxe novas exigências para o projeto de estruturas de concreto, prescrevendo o uso de método de cálculo para avaliar a capacidade resistente das edificações em função do tempo requerido de resistência ao fogo (COSTA; SILVA, 2006).

Segundo a NBR 15.200 (ABNT, 2004), os objetivos gerais da verificação das estruturas em situação de incêndio é: limitar o risco a vida humana, limitar o risco da vizinhança e da própria sociedade e limitar o risco da propriedade exposta ao fogo. Entende-se como atendidos esses objetivos quando a estrutura não permite que o calor a atravesse em quantidade suficiente para gerar combustão no lado oposto ao foco inicial e quando mantém a sua capacidade de suporte, evitando o colapso global ou local progressivo.

2.1 Transferência de calor

O calor é transferido entre um sistema e sua vizinhança quando as temperaturas entre estes se diferem. Na natureza há três mecanismos nos quais podem ocorrer essa

troca de calor: convecção, radiação e condução (NUSSENVEIG, 2002; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

A convecção é um mecanismo que ocorre tipicamente nos fluidos e se caracteriza pela transferência de calor devido a movimentação dos mesmos (NUSSENVEIG, 2002).

Um fluido aquecido localmente tende a reduzir sua densidade e se deslocar em direção à superfície em consequência da atuação da força gravitacional, sendo substituído por um fluido com temperatura mais baixa, gerando as chamadas correntes de convecção (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Com a elevação da temperatura, a água e o vapor presentes na base do elemento estrutural se movem até chegar à superfície através da rede de poros do material, contribuindo para o equilíbrio térmico do sistema. Durante o processo é comum que ocorra a dilatação térmica do fluido, resultando no aumento da pressão interna do material (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002a).

Nussenveig (2002) descreve a radiação como sendo a transferência de calor de um ponto a outro através de radiação eletromagnética, podendo ser propagada até mesmo no vácuo. Um corpo aquecido emite radiação térmica que pode ser absorvida por outro corpo e aquecê-lo. Um exemplo seria a radiação solar, seja na forma de luz visível, infravermelho ou outras regiões do espectro.

A condução só ocorre através de um meio material, mas ao contrário da convecção, sem que haja movimentação do próprio meio, ocorrendo tanto nos fluidos como em sólidos. A taxa de aquecimento do sistema é diretamente proporcional a área da superfície aquecida e a variação térmica. Logo quanto maior a área disponível e a diferença de temperatura entre o sistema e a vizinhança maior será a quantidade de calor transferido (NUSSENVEIG, 2002; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Quando a variação térmica ocorre na superfície devido à ação direta das chamas, o fluxo ocorre por radiação e, a partir da superfície em direção ao interior do elemento, o calor passa a ser transmitidos por condução e convecção. A baixa condutividade térmica do concreto retarda o processo, protegendo o interior do concreto e a armadura (SILVA, 1997).

2.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica é uma propriedade de suma importância para o estudo do comportamento da argamassa e do concreto em altas temperaturas, uma vez que é descrita como a capacidade que o material tem para conduzir calor (ALBUQUERQUE, 2012; CUOGHI, 2006).

Em um sistema construtivo, o coeficiente de condutividade térmica (k) de um elemento depende principalmente da natureza do material, da espessura e do gradiente térmico entre as suas faces. Em materiais compostos, como o concreto e a argamassa, a condutividade térmica é função da capacidade condutiva de cada elemento que os constituem e das frações de ar aprisionado no material (NINCE, 2006).

Nos materiais porosos, fatores como composição, percentual de matéria sólida, distribuição geométrica e tamanho dos poros, teor de umidade e quantidade de ar aprisionado são determinantes para o valor de “ k ”, de modo que materiais com porosidade homogênea se mostram melhores isolantes térmicos que materiais de maior densidade (BEZERRA, 2003).

A elevação da porosidade do concreto conduz a redução de sua condutividade térmica, uma vez que durante o aquecimento ocorre a substituição da água retida nos poros por ar, elemento com condutividade térmica inferior à da pasta de cimento e dos agregados. Logo, quanto maior a temperatura menor será a capacidade do concreto de conduzir calor (ZHENG, 1990 *apud* CUOGHI, 2006).

Na Tabela 1 são apresentados os valores da condutividade térmica de alguns materiais presentes no concreto, assim como a do próprio concreto em estado saturado.

Tabela 1 - Condutividade térmica dos materiais à temperatura ambiente.

Material	Condutividade térmica (W/m.°C)
Agregados	0,7000 – 4,2000
Concreto saturado	1,0000 – 3,6000
Pasta de cimento endurecida saturada	1,1000 – 1,6000
Água	0,5150
Ar	0,0034

Fonte: Boletim nº 38 da fib-CEB (2007) *apud* ALBUQUERQUE (2012).

O Eurocode 2 parte 1-2 (2004) recomenda a aplicação de uma faixa de valores limite para a condutividade térmica no concreto, expressa por meio da Equação (1) e Equação (2). Essa relação foi deduzida com base nos resultados obtidos em testes de exposição ao fogo para diferentes tipos de estruturas de concreto e experimentos em estruturas mistas de aço e concreto, permitindo a obtenção de valores mais realísticos em análises de distribuição de temperaturas (ALBUQUERQUE, 2012).

Para $20\text{ °C} \leq \theta_c \leq 1.200\text{ °C}$:

$$k_{c,\theta_c,\text{inf}} = 1,36 - 0,136 \left(\frac{\theta_c}{100} \right) + 0,0057 \left(\frac{\theta_c}{100} \right)^2 \quad \text{Equação (1)}$$

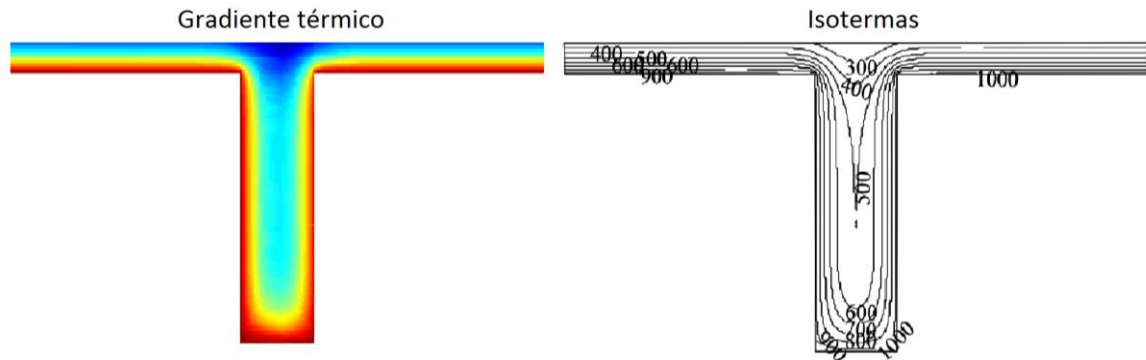
$$k_{c,\theta_c,\text{sup}} = 2,00 - 0,2451 \left(\frac{\theta_c}{100} \right) + 0,0107 \left(\frac{\theta_c}{100} \right)^2 \quad \text{Equação (2)}$$

em que:

- $k_{c,\theta_c,\text{inf}}$ - Limite inferior da condutividade térmica do concreto θ_c [W/(m.°C)]
- $k_{c,\theta_c,\text{sup}}$ - Limite superior da condutividade térmica do concreto θ_c [W/(m.°C)]
- θ_c - Temperatura do concreto [°C]

Em função da baixa condutividade térmica do concreto, a temperatura não se uniformiza ao longo da seção, resultando em um considerável gradiente térmico entre a superfície aquecida e o interior do elemento. O campo formado pela variação térmica pode ser caracterizado por isotermas, curvas delineadas por pontos de mesma temperatura na seção. A Figura 1 apresenta o gradiente térmico e suas respectivas isotermas de uma viga T (140 mm x 500 mm) e laje de 50 mm de espessura sob a ação de incêndio padrão por 120 minutos.

Figura 1 - Campo de temperaturas e isotermas da seção de uma viga T submetida a ação térmica de um incêndio-padrão durante 120 minutos.



Fonte: Adaptado de Costa (2008).

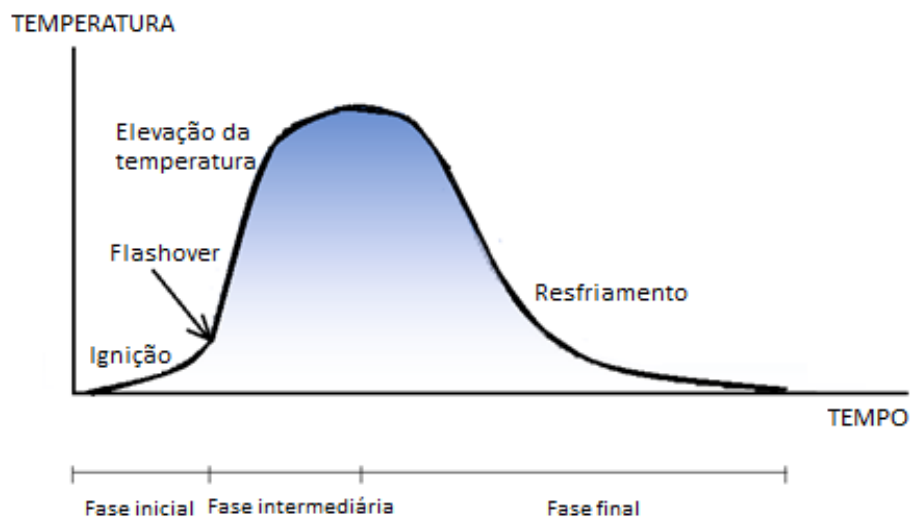
2.3 Incêndio

No estudo de estruturas em situação de incêndio uma importante ferramenta utilizada é a curva que fornece a temperatura dos gases em função do tempo, visto que a partir dela é possível obter a máxima temperatura alcançada e a capacidade resistente da peça.

2.3.1 Incêndio Real

O incêndio real é caracterizado pela curva temperatura *versus* tempo com dois ramos: ascendente e descendente que representam as fases de elevação da temperatura e resfriamento, respectivamente. Na região inicial da curva, denominada de fase de ignição, verifica-se o aumento gradual da temperatura em um curto espaço de tempo, como pode ser observado na Figura 2. Nessa fase o incêndio é considerado de pequenas proporções e sem riscos à vida humana ou à estrutura, mas quando a temperatura ultrapassa os 300 °C a perda na resistência mecânica do concreto se torna acentuada (MORALES, 2011).

Figura 2 - Curva temperatura versus tempo do incêndio real.



Fonte: Adaptado de Silva (1997).

No instante em que ocorre a transição da fase inicial para a intermediária é também onde ocorre o aumento brusco da inclinação da curva, chamado de combustão viva ou “flashover”. Neste momento ocorre a inflamação generalizada, com elevação repentina da temperatura e propagação descontrolada das chamas chegando ao ponto de irreversibilidade do incêndio (SILVA, 1997).

Na fase intermediária, o incêndio atinge grandes proporções, tomando conta de todo o compartimento e com elevação da temperatura dos gases até todo material combustível extinguir-se. Nessa fase é que ocorrem os efeitos mais danosos ao concreto, os quais se agravam em função da duração da mesma (COSTA; SILVA, 2006).

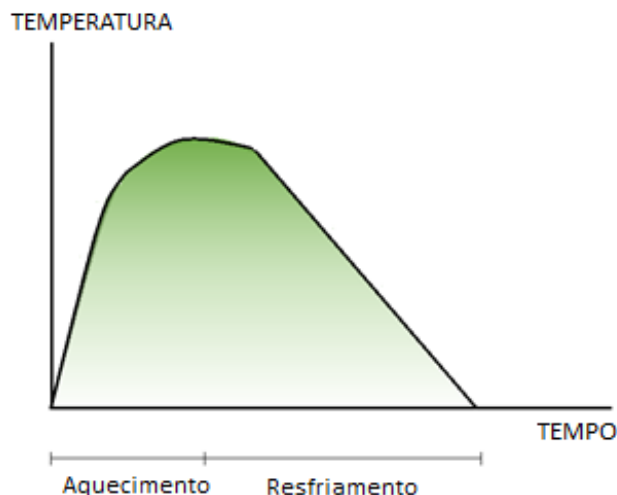
Segundo Morales (2011), a fase final é caracterizada pela redução da temperatura até a extinção do fogo. Sua influência nas estruturas de concreto se deve a maneira como ocorre a extinção e a sua duração. Quando o resfriamento se dá de forma lenta existe a possibilidade de recuperação de até 90% da resistência à compressão inicial, dependendo da temperatura máxima atingida, mas quando este ocorre de modo brusco, passa a ser responsável por uma parcela significativa da perda da resistência.

2.3.2 Incêndio Natural

Em função da dificuldade de se comprovar que as medidas de proteção à vida são eficientes para extinguir o incêndio durante a fase de ignição, é necessária a verificação do estado de segurança da estrutura. São realizadas modelagens do incêndio utilizando as curvas temperatura *versus* tempo com base em ensaios ou modelos matemáticos realísticos, que consideram a variação na quantidade de material combustível e o grau de ventilação do compartimento em chamas (ALBUQUERQUE, 2012).

Admite-se por simplicidade que o incêndio se inicia no instante do *flashover* e que o ramo referente à fase de resfriamento seja aproximado para uma reta (COSTA, 2008). A Figura 3 apresenta a curva temperatura *versus* tempo que descreve o incêndio natural.

Figura 3 - Curva temperatura versus tempo do incêndio natural.



Fonte: Adaptado de Albuquerque (2012).

2.3.3 Incêndio Padrão

Costa e Silva (2006) definem o incêndio-padrão como sendo o modelo de incêndio no qual se admite que a temperatura dos gases do ambiente em chamas respeite as curvas padronizadas para o ensaio. Essa família de curvas tem como característica principal apresentar apenas o ramo ascendente, no qual a temperatura cresce em relação ao tempo, independente da influência da carga de incêndio e do grau de ventilação do compartimento.

As curvas padronizadas mais utilizadas são as descritas pela ISO 834 (1975) e a ASTM E 119 (1988).

2.3.3.1 ASTM E 119 (2000) – Métodos de teste padrão para testes de incêndio em construções e materiais de construção (Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials)

Em 1917 a Sociedade Americana para Teste e Materiais divulgou a curva ASTM-C 19 na forma de tabela (Tabela 2), junto com uma especificação para uma curva-padrão de aquecimento, sendo posteriormente (1988) alterada para ASTM-E119. Os valores dessa tabela são baseados nas temperaturas máximas de incêndios reais, tomando por referência o ponto de fusão dos materiais conhecidos na época (COSTA; SILVA, 2006).

Tabela 2 – Evolução da máxima temperatura atingida no incêndio padrão em relação ao tempo de aquecimento, conforme ASTM E 119 (2000).

Tempo (min)	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Temperatura (°C)
0	20	55	916
5	538	60	927
10	704	65	927
15	760	70	946
20	795	75	955
25	821	80	963
30	843	85	971
35	862	90	978
40	878	120	1010
45	892	240	1093
50	905	480	1260

Fonte: Silva (1997).

Embora os ensaios de resistência ao fogo, realizados com base na ASTM E 119 sejam tidos como rigorosos, não são capazes de representar a todos os incêndios, pois as

condições de transferência de calor associadas à exposição ao fogo são diferentes para cada tipo de incêndio (COSTA, 2008).

2.3.3.2 ISO 834 (2012) – Testes de resistência ao fogo: Elementos de construção de edifícios (Fire Resistance Tests: Elements of Building Construction)

A ISO 834 surgiu através da uniformização das duas curvas-padrão tradicionais: da americana ASTM E-119 e da britânica BS 476 (1932)². Ambas apresentam características bastante similares e tiveram a mesma origem, entretanto as especificações de ensaios apresentavam algumas divergências (COSTA, 2008).

A Organização Internacional para Padronização em 1961, designou a Comissão Técnica ISO/TC 92, constituída por membros de vários países do mundo, incluindo o Brasil, para avaliar a possibilidade de harmonização entre as metodologias e para propor um padrão de especificações internacionais para os ensaios de resistência ao fogo de elementos construtivos (MALHOTRA, 1980).

Em 1975, a organização, por meio da ISO 834, determinou a relação apresentada pela Equação 3 para estimar a temperatura em função do tempo para incêndio de materiais celulósicos (COSTA; SILVA, 2006).

$$\theta_g - \theta_{g0} = 345 \log(8t + 1) \quad \text{Equação (3)}$$

em que:

- θ_g - temperatura dos gases no ambiente em chamas (°C)
- $\theta_{g,0}$ - temperatura dos gases no instante $t=0$, geralmente admitida 20 °C
- T - tempo (min)

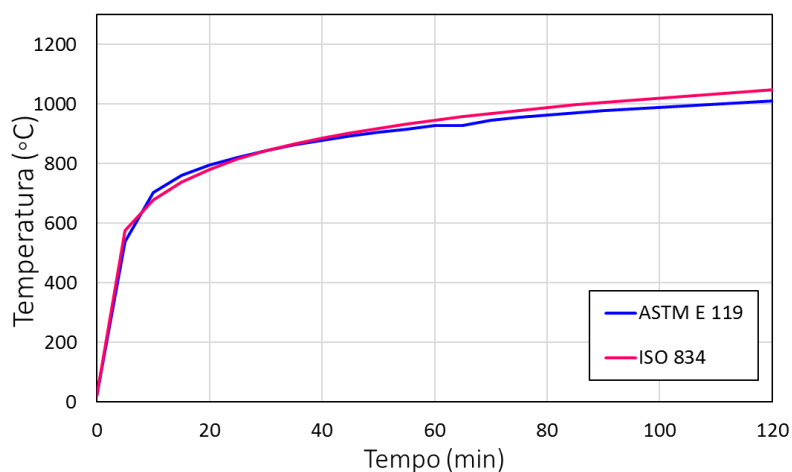
Embora as curvas-padrão, não permitam prognosticar o desempenho de elementos construtivos em situações de incêndios reais, elas permitem uma análise comparativa de

² BS 476 (1932) - Fire Tests on Building Materials and Structures: norma que prescreve o ensaio de resistência ao fogo, elaborada com base na ASTM E 119 e utilizada no Reino Unido até meados de 1975.

resistência ao fogo, servindo como indicadores qualitativas de resistência em função do grau de aquecimento (COSTA; SILVA, 2006; SILVA, 1997).

Os dados presentes na Tabela 2, na Figura 4 e obtidos por meio da Equação (3) demonstram que, para curtos intervalos de tempo, as temperaturas atingidas por um incêndio padrão são de elevada intensidade. Em apenas 2 horas de incêndio, a temperatura alcançada supera a ordem de 1.000 °C, evidenciando a elevada taxa de aquecimento que ocorre durante o incêndio, um dos principais fatores que provoca a degradação da matriz cimentícia.

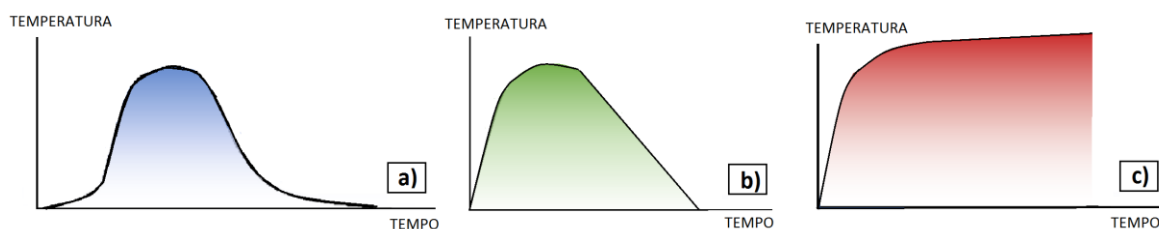
Figura 4 - Curvas temperatura *versus* tempo para incêndio padrão, prescritas pelas normas ISO 834 e ASTM E 119.



Fonte: Adaptado de Costa (2008).

A Figura 5 apresenta a representação das curvas temperatura versus tempo das três classes de incêndio, nos permitindo observar que no incêndio padrão a temperatura será sempre crescente, não havendo uma etapa correspondente a fase de resfriamento, como ocorre no incêndio real e no natural.

Figura 5 - Curvas temperatura *versus* tempo do incêndio real (a), incêndio natural (b) e incêndio padrão (c).



Fonte: Curva do incêndio real adaptado de Silva (1997), curva do incêndio natural adaptado de Albuquerque (2012) e curva do incêndio padrão adaptado de Costa (2008).

2.4 Efeito da ação térmica sobre os componentes da argamassa

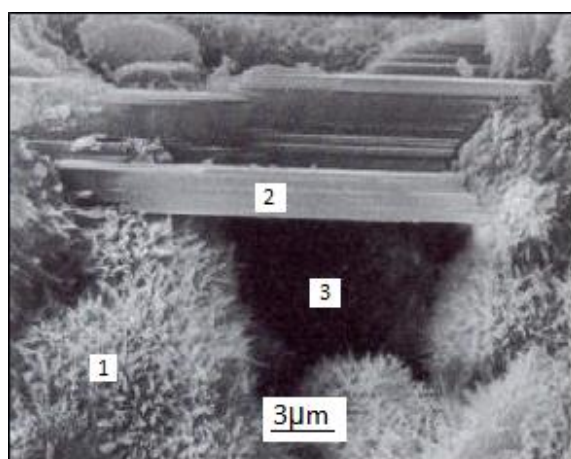
Muitos fatores controlam a resposta da matriz cimentícia ao efeito de ações térmicas elevadas. A composição da argamassa é um aspecto importante, visto que, tanto a pasta de cimento quanto o agregado miúdo são constituídos de componentes que se decompõem com o calor. A permeabilidade da microestrutura, as dimensões do elemento e a taxa de aquecimento governam o desenvolvimento de pressões no interior do material (METHA; MONTEIRO, 2008).

2.4.1 Pasta de cimento

O efeito da elevação da temperatura sobre a pasta de cimento depende do grau de hidratação e do teor de umidade. A pasta de cimento Portland hidratada é composta principalmente pelos produtos hidratados: silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio (CH) e sulfoaluminato de cálcio hidratado. Além do mais, uma pasta saturada apresenta grandes quantidades de água livre, água adsorvida e água quimicamente combinada. Toda essa água é perdida com a elevação da temperatura, restando apenas uma matriz degradada e de elevada porosidade (METHA; MONTEIRO, 2008).

A Figura 6 apresenta a microestrutura da pasta de cimento Portland, com os compostos silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio e poro capilar.

Figura 6 - Microestrutura da pasta de cimento hidratada.



- 1 - Silicato de cálcio hidratado (C-S-H)
- 2 - Hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 – (CH)
- 3- Poro capilar

Fonte: Watanabe (2004).

Ao submeter uma pasta de cimento com 70 dias de idade, curada em temperatura ambiente, à ação térmica durante um período 3 horas, toda a etringita é degradada antes de atingir os 100 °C (ALONSO; FERNANDEZ, 2004).

A etringita ou trissulfoaluminato de cálcio hidratado é um produto hidratado da fase aluminato, e normalmente é o primeiro composto a se cristalizar dada a elevada relação sulfato/aluminato na fase aquosa. A cristalização da etringita ocorre através da precipitação de pequenas agulhas de forma prismática (KIHARA; CENTURIONE, 2005).

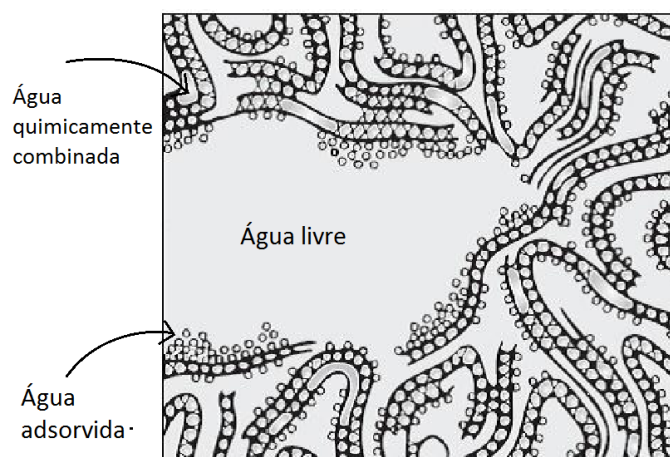
Quando a temperatura da argamassa atinge os 100 °C, toda a água livre presente nos poros da pasta de cimento é evaporada. Somente após a perda de toda umidade inicia-se a evaporação da água adsorvida e da água quimicamente combinada, ocasionando o processo de desidratação dos compostos hidratados (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002a).

A água livre ou capilar está presente nos poros maiores que 50 Angström, e pode ser descrita como a água que não sofre a influência de forças de atração exercidas pelas fases sólidas, ficando livre para evaporar durante o processo de endurecimento da pasta. A evaporação da água livre não promove a redução do volume da pasta ou causa danos a microestrutura (BRONHOLO, 2013; METHA; MONTEIRO, 2008).

A remoção da água adsorvida, que se encontra junto à superfície dos sólidos e submetida à ação de forças de atração, ocasiona o processo de retração da pasta de cimento hidratada, enquanto que a perda da água quimicamente combinada, parte constituinte da microestrutura dos produtos de hidratação do cimento, está associada a decomposição dos compostos hidratados (METHA; MONTEIRO, 2008).

A Figura 7 apresenta uma representação dos tipos de água presentes na microestrutura da matriz cimentícia, desde a água livre presente nos poros, a água adsorvida localizada junto a superfície dos sólidos até a água quimicamente combinada fixada durante o processo de hidratação.

Figura 7 - Tipos de água presentes na microestrutura da pasta de cimento.



Fonte: Bronholo(2013) *apud* Feldman e Sareda (1970).

A fase silicato de cálcio hidratado (C-S-H) corresponde a cerca de 50 % a 60 % do volume de sólidos da pasta de cimento hidratada, por isso é um produto decisivo na determinação da porosidade da pasta. Por se tratar de um composto que não possui forma e composição bem definida, a fração de água em sua composição apresenta variações (METHA; MONTEIRO, 2008).

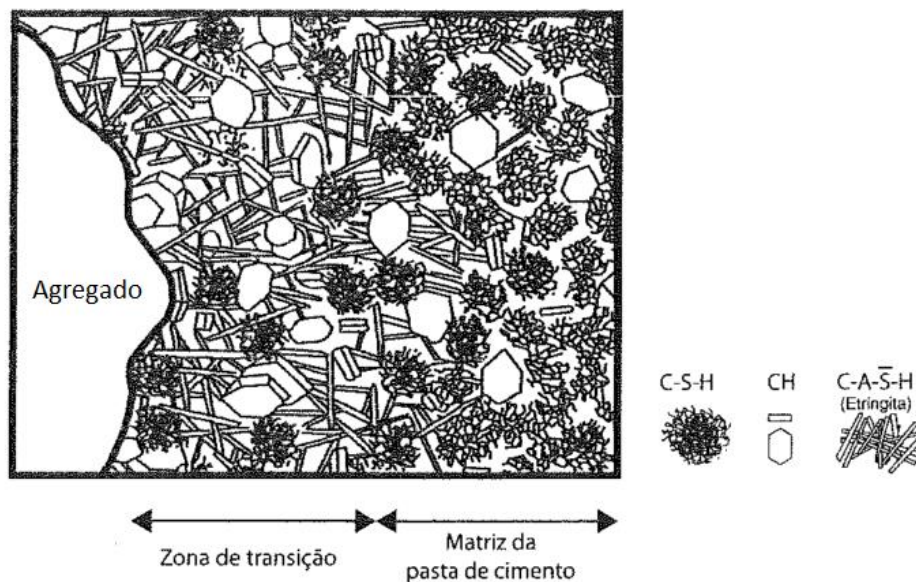
Segundo Costa, Figueiredo e Silva (2002a), acima dos 200 °C, a perda da água adsorvida reduz as forças de atração ou de Van der Waals entre as camadas de C-S-H, acentuando a propagação das fissuras e contribuindo para a redução da resistência.

A força de Van der Waals tem origem quando dois átomos neutros se aproximam e surgem forças de atração entre eles, cuja magnitude varia conforme a distância entre os átomos. Quando essa distância é superior as dimensões atômicas, ou seja, superior a ordem do raio de Bohr – $\alpha_0 \approx 0,52$ Angström, os elétrons não podem se mover de um átomo para outro reduzindo a probabilidade de sobreposição das funções de onda eletrônicas. Então, o efeito preponderante se deve a interação eletrostática entre os momentos dipolo instantâneo dos dois átomos neutros (FLEMING,2007).

Aos 204 °C, o módulo de elasticidade varia entre 70% e 80% do seu valor inicial, enquanto que, aos 427 °C, corresponde a apenas 40% a 50%. A redução na resistência à flexão e no módulo de elasticidade está diretamente relacionado a propagação de fissuras na zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado miúdo (NEVILLE, 1997 *apud* COSTA; FIGUEIREDO; SILVA 2002a).

A zona de transição é a região que se estende radialmente para fora da superfície do agregado e que, gradualmente, se funde a microestrutura da pasta, com uma espessura de aproximadamente 50 µm, como pode ser observado na Figura 8. Essa região é caracterizada por ser uma zona com relação água/cimento mais elevada e pela forte presença de hidróxido de cálcio, que se cristaliza seguindo um plano de orientação preferencial. A propagação de fissuras se torna mais fácil em cristais de maior tamanho que em apertados emaranhados cristalinos. A zona de transição constituída predominantemente pelos grandes cristais de hidróxido de cálcio, orientados preferencialmente, e com uma maior disponibilidade de água é uma região mais favorável a propagação de fissuras (PAULON; MONTEIRO, 1991).

Figura 8 - Representação diagramática da zona de transição da pasta de cimento Portland.



Fonte: Metha e Monteiro (2008).

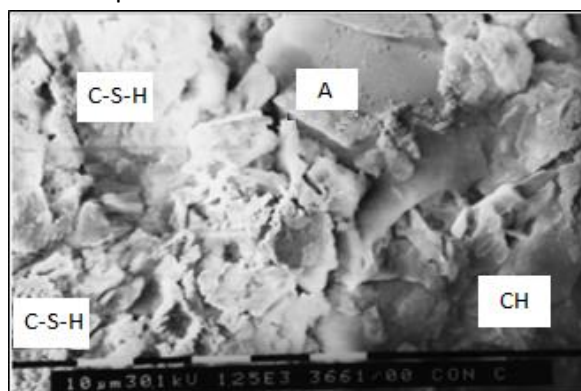
Nas pastas saturadas, cuja a matriz hidratada é muito compacta, a pressão interna de vapor ultrapassa a capacidade de liberação de vapores pelos poros. Nesses casos *spalling*³ explosivos podem ser observados nos primeiros 20 a 40 minutos, para uma faixa de temperatura entre 250 °C e 400 °C (ANDERBERG, 1997).

Entre 400 °C e 600 °C, ocorre a dessecação, desencadeando a decomposição dos produtos hidratados e a destruição do gel de C-S-H. Ocorre também a reação de desidratação do hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, liberando para o meio óxido de cálcio $[\text{CaO}]$ e água, na forma de vapor (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002a).

Handoo, Agarwal e Agarwal (2002) *apud* Fonseca (2010) constataram, através de microscópio eletrônico de varredura (MEV), alterações na morfologia dos produtos da hidratação do cimento após a exposição a temperaturas entre 100 °C e 1.000 °C, a partir de patamares crescentes a cada 100 °C, de amostras de concreto extraídas a 50 mm da superfície.

Em temperatura ambiente há a presença bem definida de cristais de hidróxido de cálcio, silicato de cálcio hidratado e aluminato de cálcio hidratado, como pode ser observado na Figura 9. Após 5 horas de exposição, a uma temperatura de 300 °C podemos observar a transformação do hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio (CaCO_3) e a deformação na forma dos cristais de hidróxido de cálcio e silicato de cálcio, conforme é apresentado na Figura 10 (HANDOO; AGARWAL; AGARWAL, 2002 *apud* Fonseca, 2010).

Figura 9 - Produtos da hidratação do cimento no interior de uma amostra de concreto à temperatura ambiente.

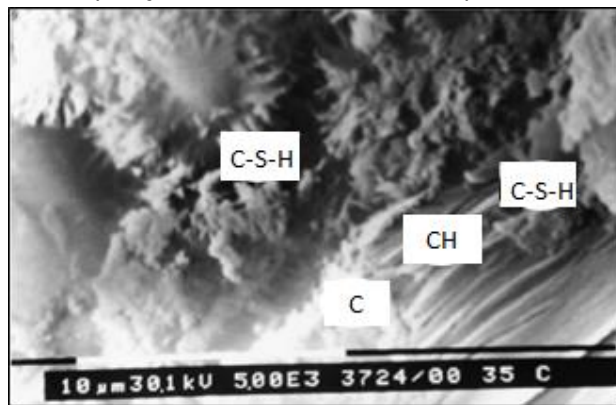


(C-S-H)-Silicato de cálcio hidratado
(A) - Aluminato de cálcio
(CH) - Hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Fonte: Handoo, Agarwal e Agarwal (2002) *apud* Fonseca (2010).

³ Spalling: lascamento explosivo, cuja perda do material ocorre de forma violenta e com grande liberação de energia.

Figura 10 - Produtos da hidratação do cimento no interior de uma amostra de concreto após exposição durante 5 horas à temperatura de 300°C .



(C-S-H)-Silicato de cálcio hidratado
(CH) - Hidróxido de cálcio Ca(OH)_2
(C) - Carbonato de cálcio CaCO_3

Fonte: Handoo, Agarwal e Agarwal (2002) *apud* Fonseca (2010).

Peng e Huang (2008) também comprovaram as modificações na estrutura cristalina da pasta de cimento aquecida, através da Difração de Raios-X (DRX), de amostras submetidas a temperaturas entre 400 °C e 800 °C em intervalos que variam de 5 minutos até 8 horas.

As amostras da pasta de cimento, com relação água/cimento 0,38 e curadas em cura submersa até os 90 dias, foram submetidas a uma série de tratamentos de aquecimento em forno com intervalos de tempo e temperatura escolhidos intencionalmente, para melhor acompanhar a degradação sofrida pela pasta. Após o aquecimento, as amostras foram finamente moídas e misturadas com óxido de alumínio, o qual foi utilizado como referência para as medidas quantitativas do ensaio de DRX (PENG; HUANG, 2008).

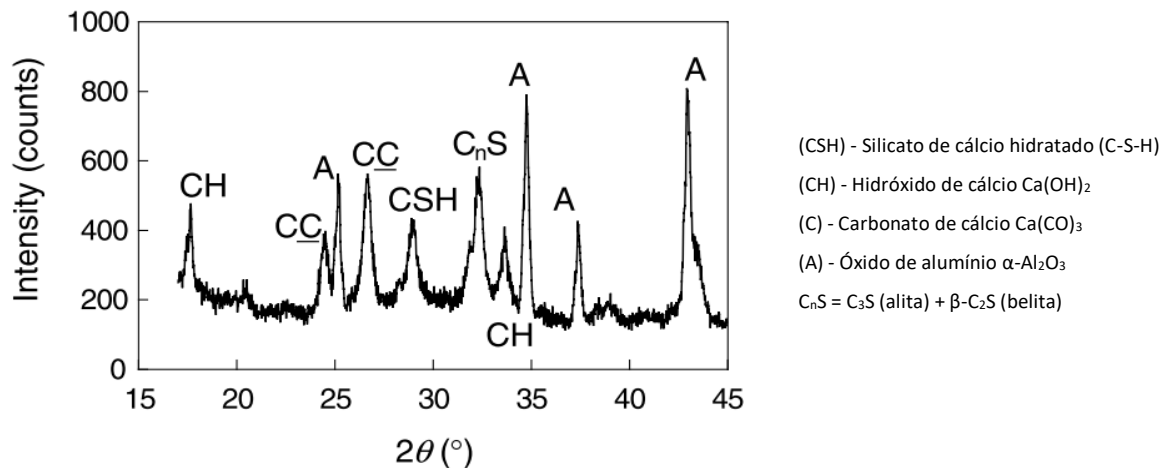
Na Figura 11 são apresentadas as principais fases identificadas na amostra de pasta de cimento misturada com óxido de alumínio, em temperatura ambiente. Entre elas temos: o silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio, carbonato de cálcio e as fases anidras alita (C_3S)⁴ e belita (C_2S)⁵ (PENG; HUANG, 2008).

⁴ Alita (C_3S): é o principal constituinte do clínquer, tem papel importante no endurecimento e no ganho de resistência do cimento nas primeiras idades.

⁵ Belita (C_2S): constituinte do clínquer responsável pelo ganho de resistência mecânica em idades mais avançadas.

Em função da dificuldade de diferenciar os picos do C_3S e C_2S no difratograma, localizados nas posições $32^\circ 2\theta$ e $33^\circ 2\theta$, respectivamente, por simplificação foram representados pelos autores como $C_nS = (C_3S + \beta-C_2S)$ (PENG; HUANG, 2008).

Figura 11 - Difração de Raio-X da amostra de pasta de cimento e óxido de alumínio, em temperatura ambiente.

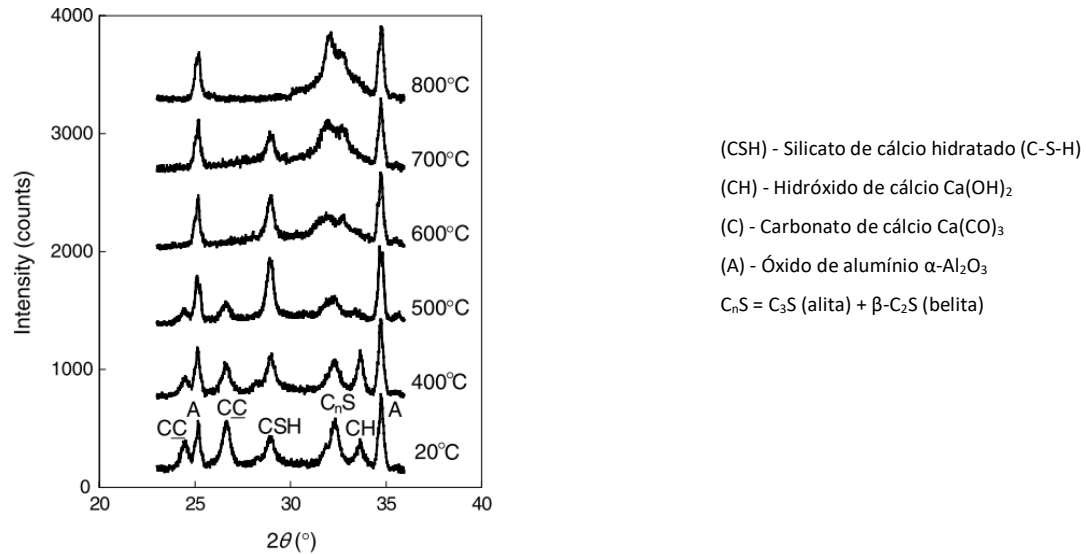


Fonte: Adaptado de Peng e Huang (2008).

A Difração de Raios-X, apresentada na Figura 12, indica que, após a exposição, por um período de 8 horas em temperaturas de $400^\circ C$ e $500^\circ C$, ainda há presença de silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio. Nessa faixa de temperatura é possível verificar que a decomposição do carbonato de cálcio ocorre de forma mais lenta que a do hidróxido de cálcio, enquanto o silicato de cálcio hidratado se mostra mais resistente à decomposição (PENG; HUANG, 2008).

Nas temperaturas de $600^\circ C$, $700^\circ C$ e $800^\circ C$, a degradação do hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio ocorre de forma muito mais acentuada, não sendo mais possível identificar a presença dos compostos aos $800^\circ C$ (PENG; HUANG, 2008).

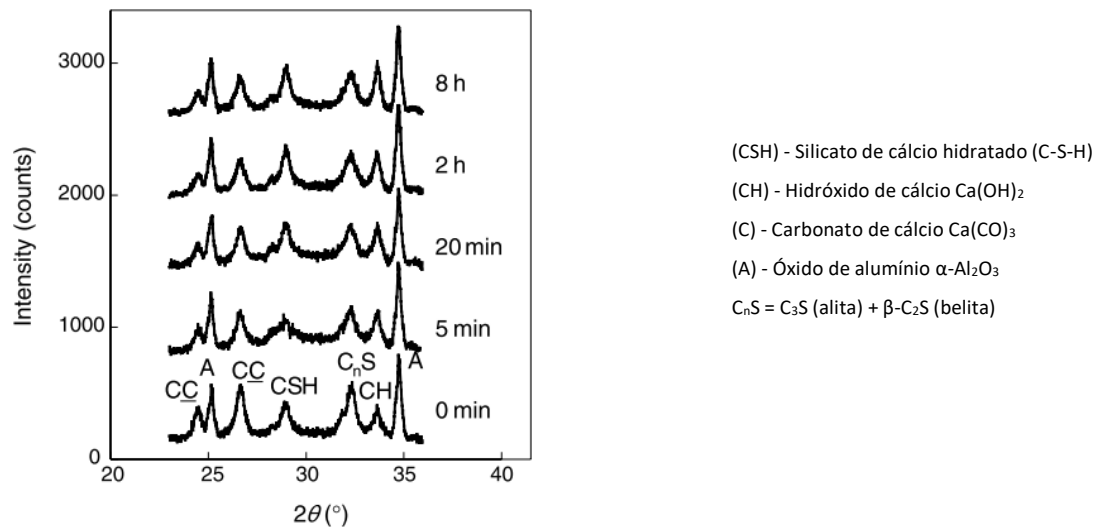
Figura 12 - Difração de Raios-X das amostras de pasta de cimento com óxido de alumínio, expostas às temperaturas de 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C e 800 °C durante um período de 8 horas.



Fonte: Peng e Huang (2008).

Nas amostras expostas à temperatura de 400 °C, em diferentes intervalos de duração, ocorreu o aumento na formação de C-S-H e CH ao longo do tempo, conforme é apresentado na Figura 13 (PENG; HUANG, 2008). Esse aumento se deve ao incremento na reação proporcionado pelo efeito de cura térmica, que possibilita que a água remanescente nos poros, sobre elevada pressão, atravesse a camada de precipitados que atua como barreira isolante para as fases anidras. Ao entrar em contato com a água, o C_3S e C_2S reagem formando mais hidróxido de cálcio e silicato de cálcio hidratado (METHA; MONTEIRO, PENG; HUANG, 2008).

Figura 13 - Difração de Raios-X das amostras de pasta de cimento com óxido de alumínio, expostas a temperatura de 400 °C em diferentes períodos.

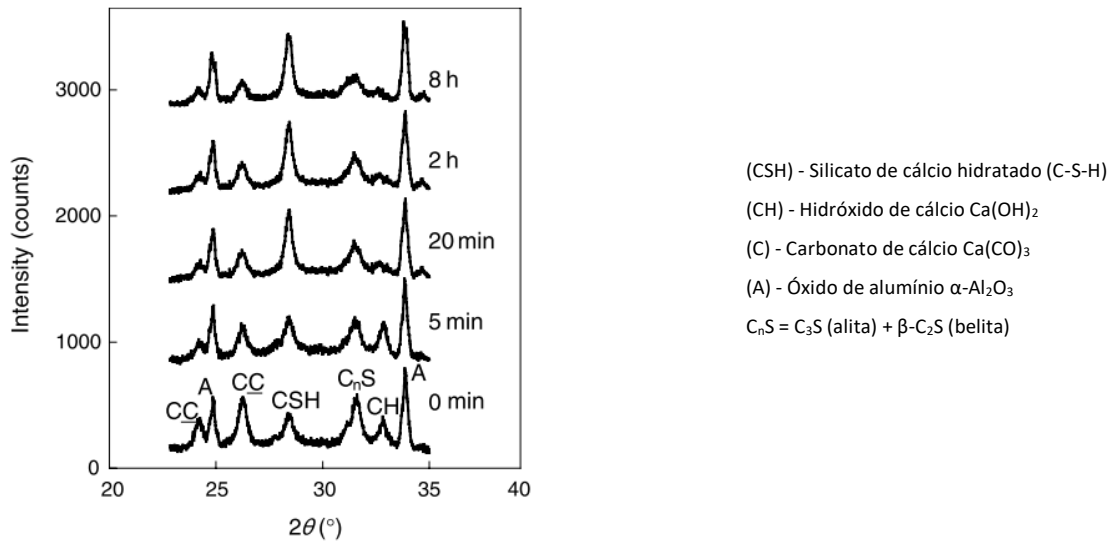


Fonte: Peng e Huang (2008).

Aos 500 °C, a formação de CH ocorreu até os primeiros 5 minutos, sendo observada a degradação do composto em períodos mais longos de exposição. Nessa mesma faixa de temperatura também aconteceu a decomposição do carbonato de cálcio, de forma mais acentuada que a do hidróxido, com redução da intensidade do pico já nos instantes iniciais, como é apresentado na Figura 14. A essa temperatura a formação de silicato de cálcio persiste ao longo do tempo (PENG; HUANG, 2008).

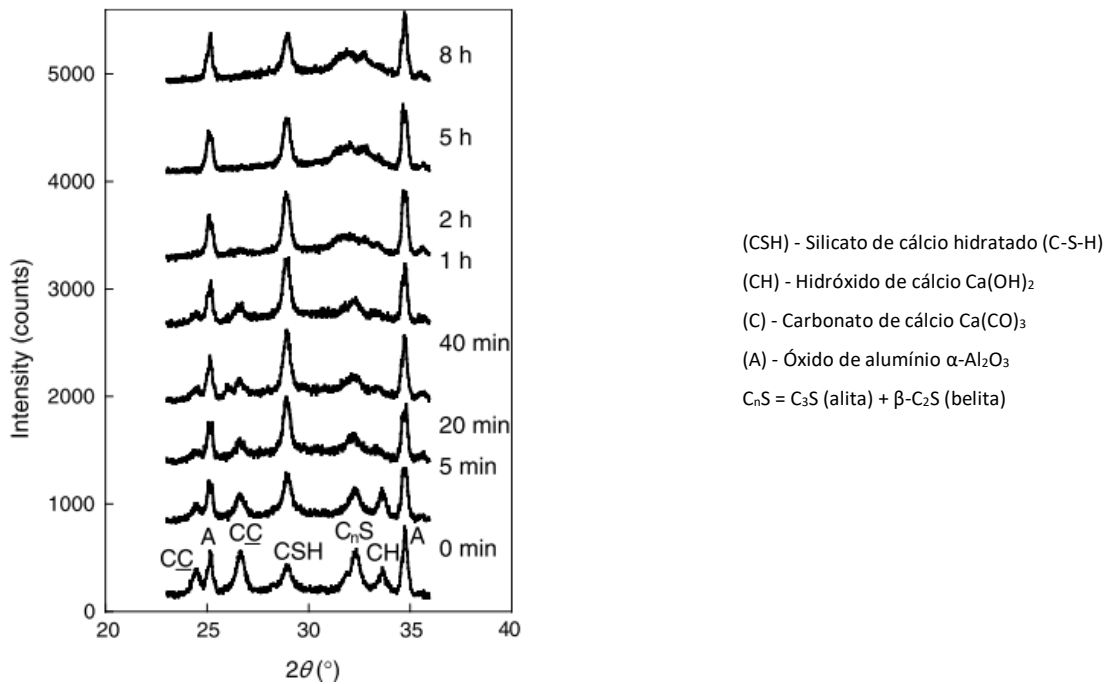
De forma semelhante aos 500 °C, as amostras submetidas à temperatura de 600 °C apresentaram decomposição do carbonato de cálcio já nos primeiros instantes, com formação de hidróxido de cálcio até os primeiros 5 minutos e, em sequência, sua decomposição, como pode ser observado na Figura 15. Entretanto, após 5 horas de exposição é possível constatar uma pequena redução na intensidade do pico de C-S-H (PENG; HUANG, 2008).

Figura 14 - Difração de Raios-X das amostras de pasta de cimento com óxido de alumínio, expostas a temperatura de 500 °C em diferentes períodos.



Fonte: Peng e Huang (2008).

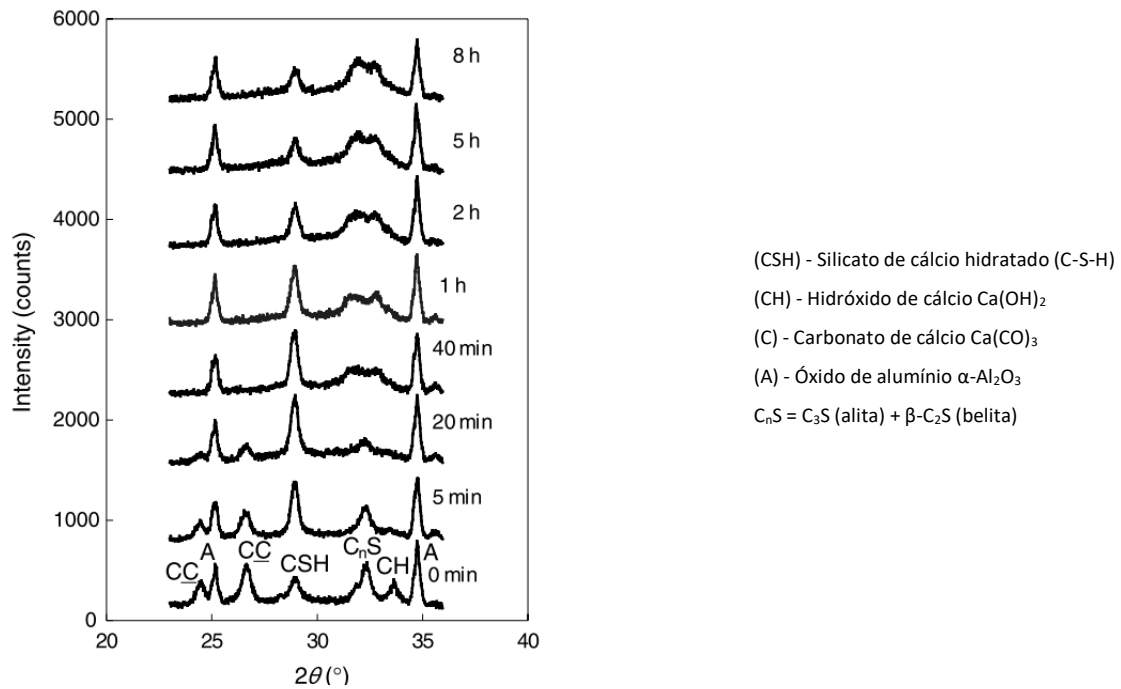
Figura 15 - Difração de Raios-X das amostras de pasta de cimento com óxido de alumínio, expostas a temperatura de 600 °C em diferentes períodos.



Fonte: Peng e Huang (2008).

As amostras submetidas a ação térmica de 700 °C apresentaram decomposição imediata do hidróxido de cálcio, superando a taxa de degradação do carbonato de cálcio (Figura 16). Aos 40 minutos de exposição iniciou-se a degradação do silicato de cálcio hidratado, tendo como produto a formação de C_3S e C_2S (PENG; HUANG, 2008).

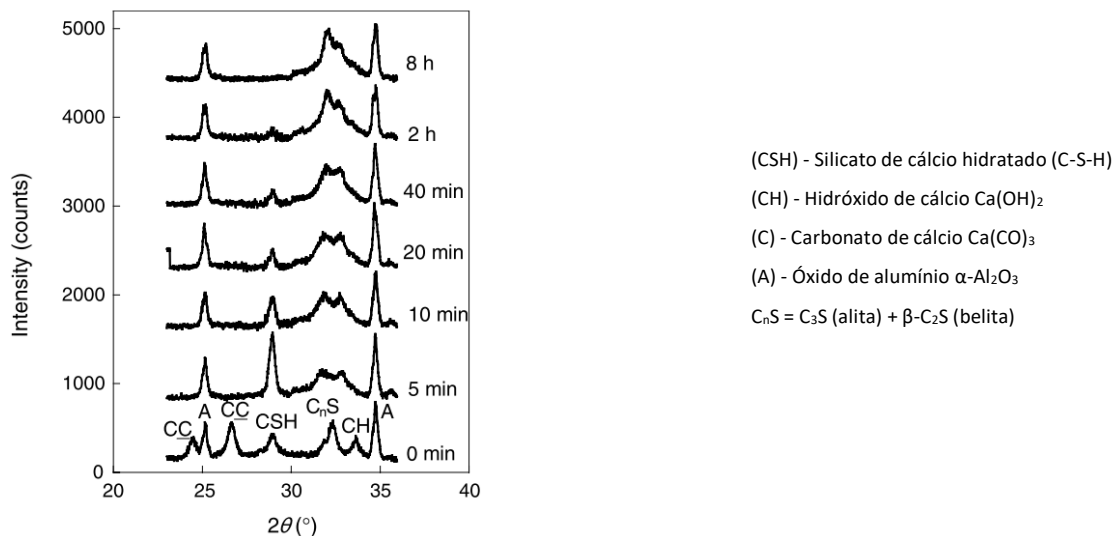
Figura 16 - Difração de Raios-X das amostras de pasta de cimento com óxido de alumínio, expostas a temperatura de 700 °C em diferentes períodos.



Fonte: Peng e Huang (2008).

Aos 800 °C ocorreu a degradação total do hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio nos primeiros instantes de exposição, seguidos de uma acentuada decomposição do silicato de cálcio hidratado após 10 minutos, chegando a sua decomposição total após 8 horas de tratamento térmico, conforme apresentado na Figura 17 (PENG; HUANG, 2008).

Figura 17 - Difração de Raios-X das amostras de pasta de cimento com óxido de alumínio, expostas a temperatura de 800 °C em diferentes períodos.



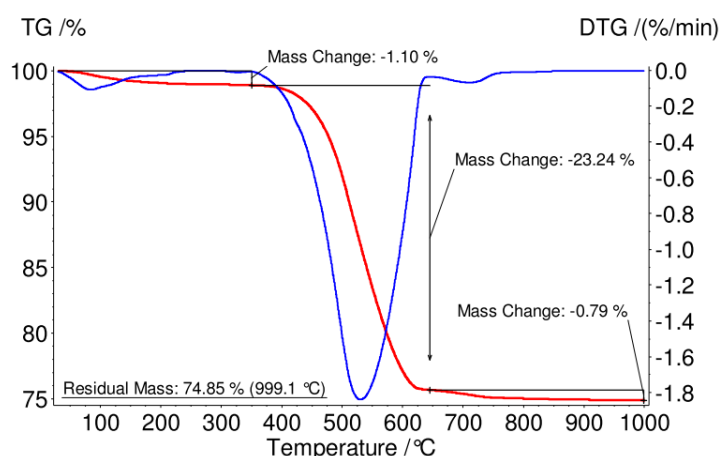
Fonte: Peng e Huang (2008).

Através da termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) de uma amostra de hidróxido de cálcio, apresentada na Figura 18, contendo 1,79% em massa de carbonato de cálcio, decorrente do efeito da carbonatação, observamos que 1,10% da massa da amostra corresponde a água livre presente no composto, introduzida pela umidade, que é evaporada no até a temperatura de 350 °C. Entretanto, é na faixa de temperatura entre 400 °C a 650 °C que ocorre a efetiva desidratação do hidróxido de cálcio, com a redução de 23,24% da massa da amostra. A partir dos 650 °C ocorre a descarbonatação do carbonato de cálcio, com a redução de mais 0,79% da massa, restando apenas 74,85% de massa residual (HOPPE FILHO, 2008).

Desse modo, podemos afirmar que a decomposição do hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento Portland hidratada acontece predominantemente entre 400 °C e 600 °C.

Segundo Metha e Monteiro (2008), o hidróxido de cálcio é um produto da hidratação que contribui pouco para o aumento da resistência à compressão da pasta de cimento, e pode facilmente ser carregado pela água, entretanto, sua presença confere ao meio a alcalinidade necessária à passivação da armadura. Portanto, a degradação desse componente pode tornar o concreto armado mais suscetível a corrosão da armadura.

Figura 18 - TG e DTG do hidróxido de cálcio.



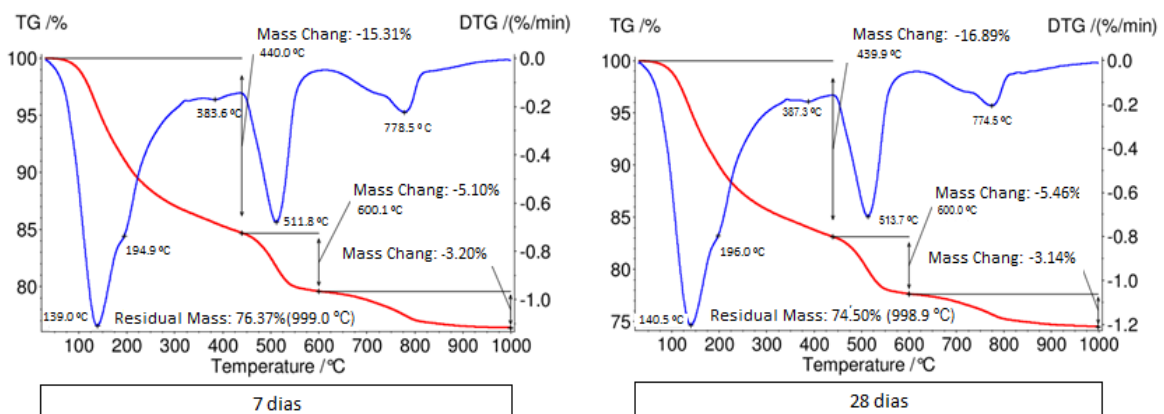
Fonte: Hoppe Filho (2008).

As termogravimetria de amostras de pasta de cimento Portland do tipo CP V – ARI, moldadas em uma relação água/cimento = 0,45, aos 7 e 28 dias de idade, são apresentadas na Figura 19.

Entre 100 °C e 440 °C ocorre a redução de 15,31 % e 16,89 % da massa da amostra, para 7 e 28 dias, respectivamente, relativa à remoção da água adsorvida e da água quimicamente combinada na formação de C-S-H e aluminatos. No intervalo de 440 °C e 600 °C, a remoção da parcela de água constituinte do hidróxido de cálcio provoca a liberação de 5,10 % e 5,46 % da massa, para as idades de 7 e 28 dias, respectivamente. A partir dos 600 °C acontece a degradação do carbonato de cálcio, provocando redução 3,20 % e 3,14 % da massa, para as idades de 7 e 28 dias, respectivamente (FILHO, 2008).

Podemos observar que a remoção da água adsorvida e/ou da água quimicamente combinada presente no hidróxido de cálcio e no C-S-H aos 28 dias é maior que aos 7 dias, isso ocorre porquê em idades mais avançadas há uma maior fixação da água nos compostos hidratados em decorrência da hidratação das fases anidras do cimento (HOPPE FILHO, 2008).

Figura 19 - TG e DTG da pasta de cimento Portland CP V aos 7 e 28 dias de idade.



Fonte: Hoppe Filho (2008).

Enquanto a pasta de cimento Portland sofre retração, devido à perda da água adsorvida e quimicamente combinada, os agregados entram em processo de expansão térmica com o avanço da temperatura (METHA; MONTEIRO, 2008).

2.4.2 Agregados

Os agregados, quando aquecidos, sofrem um processo de expansão térmica que, a depender da taxa de aquecimento, dimensão e umidade, pode ser destrutivo, visto que

esse material corresponde a parcela significativa do volume da argamassa (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002a; COSTA; SILVA, 2002; METHA; MONTEIRO, 2008).

A mineralogia dos agregados é preponderante na condutividade térmica do concreto e da argamassa. O basalto é um mineral de baixa condutividade, o calcário possui condutividade intermediária, e o quartzo é altamente condutivo (NEVILLE, 1997).

A diferença entre as dilatações da pasta de cimento e dos agregados resultam na formação de tensões na interface do agregado. A magnitude das tensões é ditada pela forma geométrica e pela combinação entre os agregados, influenciando o surgimento e a propagação das microfissuras (MINAMI *et al.*, 1987 *apud* COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002a).

Segundo Neville (1997), agregados que contêm sulfeto de ferro (FeS_2) apresentam lenta oxidação aos 150 °C. Quando oxidado, o ferro chega a aumentar cerca de cem vezes o seu volume, causando a desintegração do agregado e consequente ruptura do concreto.

Agregados silicosos com grande quantidade de quartzo, como o granito, arenito e alguns xistos, apresentam uma expansão volumétrica súbita aos 500 °C. Tal acréscimo no volume está associado à transformação dos cristais de quartzo- α em quartzo- β (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002a; METHA; MONTEIRO, 2008).

Aos 700 °C são verificadas também transformações em agregados derivados de rochas carbonáticas, devido ao início do processo de descarbonatação do material. Os efeitos destrutivos da dilatação térmica são minimizados pela pequena variação entre os coeficientes de dilatação térmica entre a matriz e o agregado (METHA; MONTEIRO, 2008).

Os agregados, quando aquecidos, sofrem um processo de expansão térmica que pode ser destrutivo, levando o concreto a um estado de pipocamento “pop outs” (METHA; MONTEIRO, 2008).

2.5 Alteração no aspecto visual

Outras formas de degradação do concreto facilmente identificadas pela alteração do aspecto visual do concreto são o esfarelamento superficial, lascamentos e alteração na cor (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002a).

O esfarelamento superficial é característico da exposição prolongada das camadas mais externas do material à ação térmica. A superfície carbonatada submetida à ação de elevada temperatura, juntamente com a fissuração proveniente da evaporação da água, a dilatação térmica dos componentes da argamassa e do concreto, seguidos de posteriores resfriamentos, provocam o enfraquecimento do material e, conseqüentemente, a redução da resistência à abrasão, levando ao esfarinhamento da superfície calcinada (MORALES; CAMPOS; FAGANELLO,2011; COSTA; SILVA, 2002).

Segundo Purkiss (2007), o lascamento pode ocorrer de dois modos: de forma gradual (*sloughing*), com a delaminação de grandes extensões e com efeito progressivo ou de modo explosivo (*explosive spalling*), no qual a perda de material é parcial, instantânea, violenta e com liberação de grande quantidade de energia.

O *sloughing* ocorre quando os gradientes térmicos entre as camadas internas e a superfície do concreto geram tensões térmicas, cuja intensidade superam a resistência à tração da matriz. A formação de fissuras na zona de transição entre as camadas de concreto faz com que essas se separem, dando origem a destacamentos de grandes proporções sem a ocorrência de estilhaçamento violento (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002a).

Mesmo não apresentando caráter explosivo ou liberação de grandes quantidades de energia, o *sloughing* requer atenção devido ao seu efeito progressivo. Uma vez ocorrido o destacamento, uma região que antes estava protegida da ação térmica agora é exposta, se tornando suscetível a ocorrência de novos destacamentos. O processo sucessivo de destacamento reduz a camada de cobertura até exposição total da armadura (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002a).

Concretos muito compactos impedem a liberação da pressão interna de vapor em função da sua porosidade reduzida. As massas muito saturadas desenvolvem uma pressão interna de vapor muito elevada ultrapassando a capacidade de liberação de vapores pelos poros. Nesses casos, lascamentos explosivos podem ser observados no primeiros minutos do incêndio (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002b). Esse fenômeno, devido à complexidade dos processos envolvidos, será abordado de forma mais aprofundada no item 2.7.1.

Compostos como óxido de ferro e hidróxidos ou óxidos de ferro hidratados são responsáveis por alterações na cor dos agregados com a elevação da temperatura. As rochas sedimentares e ígneas normalmente não apresentam alterações na coloração

quando submetidas a temperaturas elevadas. Entretanto, as rochas calcáreas apresentam variações na cor para uma faixa de temperatura superior a 250 °C. Alguns tipos de rochas metamórficas também podem apresentar mudanças de cor com a temperatura (LIN *et al.*, 1996 *apud* COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002a).

A Tabela 3 apresenta as variações de tonalidade e desempenho, ocorridas no concreto, dosado com agregado miúdo de origem calcária, expostos à elevadas temperaturas.

Para temperaturas inferiores a 250 °C não é verificada alterações na cor, entretanto, já pode ser observada uma pequena redução na resistência. Entre 250 °C e 550 °C, a tonalidade do concreto varia entre rosa e roxo, com propagação de fissuras e redução do módulo de elasticidade.

Aos 575 °C se inicia a degradação do agregado miúdo, predominando um tom de vermelho claro.

De 650 °C a 800 °C, o concreto assume um tom cinza claro, redução da resistência mecânica e exposição da armadura resultante do *sloughing*. A partir de 900 °C, o concreto apresenta um tom de amarelo com significativa perda de resistência à abrasão superficial.

Tabela 3 - Cor e característica do concreto conforme variação da temperatura.

Temperatura (°C)	Cor	Aspecto visual / Desempenho
<250	Cinza	Perda de resistência pequena e irregular
285-300	Cinza-róseo	Fissuração superficial, lascamento explosivo (vapor)
400	Rosa	Redução do módulo de elasticidade
535-550	Roxo	Fissuração profunda – friabilidade superficial
575	Vermelho pálido	Pipocamento dos grãos de quartzo
650		Perda das propriedades mecânicas, lascamentos
790-800	Cinza esbranquiçado	do cobrimento das armaduras, com exposição até 25% da superfície das mesmas
900	Amarelo alaranjado	
1000	Amarelo claro	Superfície pulverulenta

Fonte: Neville (1923) *apud* Morales, Campos e Faganello (2011).

2.6 Concreto de alta resistência

O emprego de concretos de alta resistência (CAR) permite a execução de elementos estruturais mais esbeltos, com menor seção transversal e maiores vãos. O incremento na resistência está associado à redução da relação água/cimento resultante da incorporação de aditivos e adições que conferem à pasta uma maior trabalhabilidade, compacidade e redução na porosidade. Tais características promovem melhorias na durabilidade da estrutura, entretanto, tornam o concreto mais suscetível à ação de temperaturas elevadas, antecipando a sua degradação frente à ação térmica (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002b).

A redução na massa e volume das peças estruturais ocasionam a elevação do fator de massividade, permitindo a propagação mais rápida do calor para o interior da massa de concreto, como consequência, as perdas na resistência e rigidez são mais significativas. Por essa razão, as lajes e elementos de pequena espessura sofrem os efeitos nocivos, sendo frequentemente observadas flechas excessivas (NEVILLE, 1997 *apud* COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002b).

Concretos com relação água/cimento $\leq 0,3$ possuem a matriz hidratada muito compacta, o que impede a liberação dos vapores formados durante o aquecimento, mesmo que o CAR não contenha grande quantidade de água livre (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002a). Mesmo em concretos com água/cimento = 0,4 e agregados termicamente estáveis entre 100 °C e 300 °C, lascamentos explosivos se manifestam com maior frequência que em concretos convencionais. A causa principal está no teor de partículas ativas ultra-finas que são adicionadas à pasta de cimento Portland, preenchendo os espaços vazios entre os grãos de cimento, tornando a estrutura mais densa e compacta (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002a).

Segundo Phan (1996) *apud* Metha e Monteiro (2008) em sua revisão de estudos experimentais sobre o comportamento de concretos de elevada resistência sob a ação de altas temperaturas, no intervalo entre 25 °C e 400 °C, os concretos de alta resistência apresentaram perdas relativamente maiores que concretos de resistências mais baixas. Essas perdas se mostraram menos significativas para temperaturas acima dos 400 °C.

Em concretos de baixa resistência, a maior permeabilidade favorece o fluxo de vapor, dissipando o acúmulo de tensões na superfície e minimizando a ocorrência dos lascamentos.

2.6.1 Spalling

O *spalling* é um fenômeno que resulta da ação concomitante de dois processos: o primeiro é o processo termo-mecânico, no qual há geração de tensão na matriz devido os gradientes de dilatação térmica do material. O segundo é o processo termo-hidral, provocado do acúmulo de tensões geradas a partir da formação de vapor na rede de poros (KALIFA; MENNETEAU; QUENARD, 2000).

No processo termo-mecânico, sob influência dos gradientes térmicos, ocorre a dilatação da pasta e dos agregados, e como consequência o surgimento de tensões de tração perpendiculares a superfície aquecida, tais tensões ocasionam a propagação de deformações locais na matriz hidratada e na superfície de contato entre a pasta e agregado. Simultaneamente à dilatação do material ocorre a retração da pasta de cimento por secagem, resultante da degradação química dos compostos hidratados (KALIFA; MENNETEAU; QUENARD, 2000).

Segundo Kalifa, Mennetau e Quenard (2000), o processo termo-hidral está associado à transferência de massas dentro da rede de poros, à medida que a temperatura vai se elevando a água livre vai sendo parcialmente evaporada. O vapor gera uma pressão na rede porosa e atua como a principal força motriz para transferência de massas. O ar e vapor são parcialmente conduzidos à superfície aquecida, mas também são induzidos a se deslocar ainda mais para o interior do elemento, onde se condensam formando uma zona saturada.

Com o tempo se forma no elemento de concreto, a partir da superfície aquecida, uma zona seca e desidratada, uma zona de secagem em processo de desidratação e uma zona saturada, que atua como uma parede impermeável para a passagem os gases (KALIFA; MENNETEAU; QUENARD, 2000).

O ponto de maior pressão está localizado junto zona saturada, e quanto menor a permeabilidade da pasta mais próximo da superfície a zona úmida vai se formar, resultando em um maior gradiente de pressão (KALIFA; MENNETEAU; QUENARD, 2000).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O planejamento experimental proposto busca fornecer subsídios para a análise dos efeitos da ação de temperaturas elevadas sobre a resistência à compressão e porosidade de argamassa de cimento Portland.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento Portland

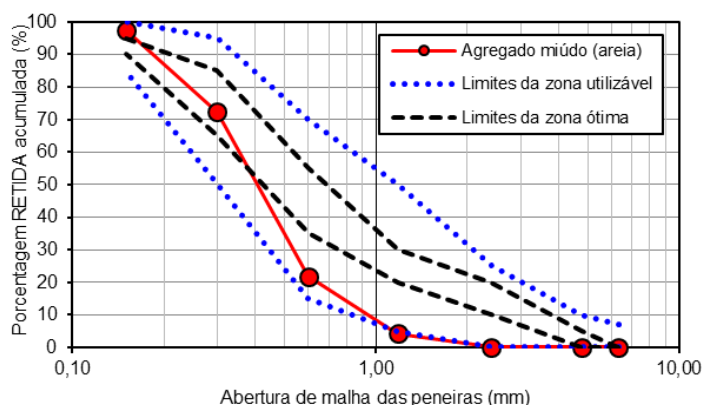
O cimento Portland empregado no trabalho foi o CP V – ARI, da marca Ciplan, de acordo com a norma ABNT NBR 5.733 (1991). A escolha por esse tipo de cimento se justifica pela ausência de adições minerais, possibilitando observar o comportamento da argamassa sem a influência de materiais complementares na composição do cimento Portland.

A realização da caracterização físico-química do cimento não foi possível em virtude da falta de infraestrutura laboratorial da Instituição, o que impediu a execução dos ensaios.

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado no preparo da argamassa demonstra características típicas de areia extraída de leito de rio. A determinação da massa específica da areia, realizada em duplicata, resultou em $2,56 \text{ g/cm}^3$. A massa unitária no estado solto, determinada em triplicata, foi de $1,57 \text{ g/cm}^3$. A partir dessas características obteve-se a porosidade da estrutura granular, a qual resultou em 38,59 %. Na Figura 20 é apresentada a distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Figura 20 - Distribuição granulométrica do agregado (miúdo).



Agregado miúdo:

Dimensão máxima característica: 1,20 mm.
Módulo de finura: 1,95.
Areia fina.

A distribuição granulométrica não atende aos limites da zona utilizável propostos pela ABNT NBR 7.211 (2009)

Fonte: Autor.

3.2 Dosagem da argamassa

No estudo de dosagem do concreto, a lei de Lyse determina que a invariabilidade da relação água/materiais secos (H), apesar da alteração da relação água/cimento e do teor de agregados em relação ao cimento, resulta, dentro da faixa de concretos plásticos, em abatimentos similares. Neste trabalho, utilizou-se a lei de Lyse para estabelecer uma mistura fluida e coesa, o que foi avaliado por meio do ensaio de mini tronco de cone de Kantro. Neste estudo arbitrou-se uma relação água/cimento = 0,40, tomando como base o estudo de Morales (2011), o qual afirma que argamassas com essa relação a/c já apresentam danos significativos na microestrutura decorrentes do acúmulo da pressão (vapor) nos poros, decorrente da baixa permeabilidade da pasta.

Por meio do ensaio prévio de mini cone de Kantro, pode-se observar que a relação água/materiais secos igual a 18% resultou em uma consistência adequada para a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos de $\varnothing 5 \times 10$ cm.

A lei de Lyse é representada pela Equação 4.

$$H = \frac{a/c}{(1+m)} \times 100 \quad \text{Equação (4)}$$

em que:

- H - Relação água/materiais secos [%]
- a/c - Relação água/cimento [kg/kg]

m - Relação agregados/cimento [kg/kg]

A utilização da relação água/materiais secos = 18% e da relação água/cimento = 0,40, propicia a obtenção, por meio da lei de Lyse, do teor de agregado em relação à massa de cimento de 1,22. Assim sendo, a proporção de materiais utilizado neste estudo é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Proporção de mistura da argamassa, em massa.

Argamassa	Cimento (kg)	Areia (kg)	Relação água/cimento
Mistura	1,00	1,22	0,40

Fonte: Autor.

Em virtude do interesse em avaliar mais criteriosamente o comportamento da matriz cimetícia frente a ações térmicas severas optou-se por uma proporção de mistura com elevado consumo de cimento, justificando o grande volume de pasta.

3.3 Mistura da argamassa

Para o preparo da argamassa, a água foi lançada no recipiente de mistura e, na sequência, o cimento. A pasta foi inicialmente misturada para, então, lançar a areia gradativamente, de forma a homogeneizar a argamassa, conforme apresentado na Figura 21. Vale ressaltar que foi realizado o umedecimento das paredes do recipiente de mistura previamente ao preparo da argamassa.

Em função da falta de infraestrutura laboratorial, o preparo da argamassa não foi realizado em argamassadeira, mas com o auxílio de uma hélice de batedeira acoplada em uma furadeira.

Figura 21 - Preparo da argamassa.



Fonte: Autor.

3.4 Moldagem e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova, de dimensões $\varnothing 5 \times 10$ cm, foram moldados conforme as recomendações da NBR 5.738 (ABNT, 2003), a partir do lançamento da argamassa no molde cilíndrico em quatro camadas, com espessuras aproximadamente iguais, sendo cada camada adensada manualmente com o auxílio de soquete metálico, por meio da aplicação de trinta golpes por camada, tomando-se o cuidado para o soquete não penetrar a camada anterior (Figura 22).

Os corpos de prova foram mantidos nos moldes por 24 horas e, após a desmoldagem, foram submetidos à cura submersa, em água saturada com cal, até atingirem as respectivas idades para exposição à elevadas temperaturas, em mufla laboratorial. Os corpos de prova de referência permaneceram em cura submersa até atingirem as idades de ensaio. Para cada temperatura de ensaio foram moldados 12 (doze) corpos-de-prova, sendo 6 (seis) expostos à elevada temperatura aos 6 dias e 6 (seis) expostos aos 27 dias.

Figura 22 - Moldagem do corpo de prova.



Fonte: Autor.

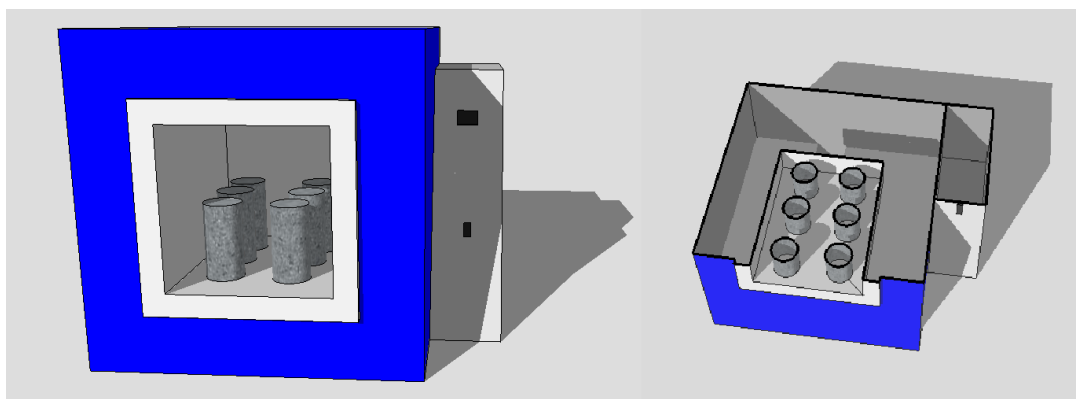
3.5 Exposição dos corpos de prova de argamassa à elevadas temperaturas

Nas idades de 6 e 27 dias, os corpos de prova destinados a cada idade de ensaio foram retirados da solução e levados diretamente, ainda no estado saturado, para acondicionamento na mufla da marca ZEZIMAQ, com potência 3.960 kW, forno de dimensões 14x14x19 cm e com resistência nas quatro paredes laterais.

As temperaturas de exposição dos corpos de prova, aos 6 e 27 dias, foram: 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C. A taxa de aquecimento do equipamento foi de 11 °C/min, o que implica em tempos diferenciados, a depender da temperatura final de exposição, para atingir a constância de energia térmica.

Durante a disposição dos corpos de prova na mufla tomou-se o cuidado de não posicioná-los de forma a obter contato com o corpo de prova vizinho ou com as paredes internas do equipamento, com o objetivo de garantir a maior uniformidade na transmissão de calor dentro do sistema. A distribuição dos corpos de prova ocorreu conforme representado na Figura 23.

Figura 23 - Representação da disposição dos corpos de prova no interior da mufla.



Fonte: Autor.

Os corpos de prova permaneceram sob as diferentes temperaturas de exposição por um período de 24 horas, terminado esse período desligou-se a mufla, de modo que o resfriamento dos corpos de prova ocorresse no interior do equipamento fechado. Atingida a temperatura ambiente procedeu-se a realização dos ensaios de resistência à compressão e porosidade nas idades de 7 e 28 dias.

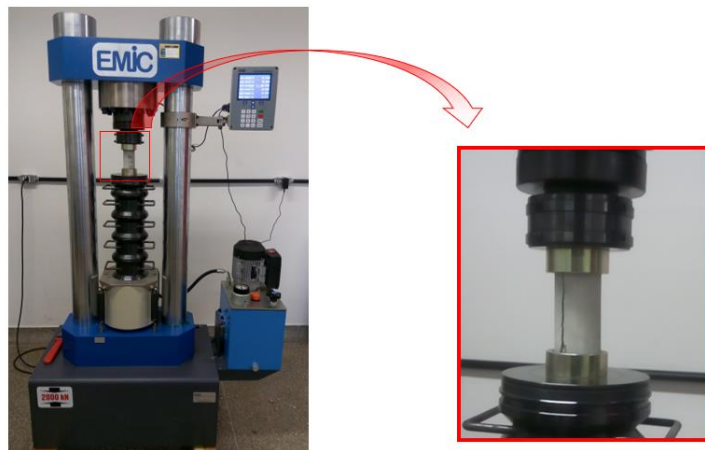
3.6 Ensaio de resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados aos 7 e 28 dias, em prensa hidráulica da marca EMIC, modelo PC200C, seguindo as recomendações da ABNT NBR 7.215 (1996), a qual prescreve o método pelo qual devem ser ensaiados à compressão os corpos de prova cilíndricos.

Para a mitigação das imperfeições presentes na superfície dos corpos de prova foram utilizados pratos de aço, que acondicionaram discos de neoprene de dureza *shore 70*.

A Figura 24 apresenta a disposição do corpo de prova, com pratos e discos de neoprene, na prensa hidráulica para a realização de ensaio de resistência à compressão.

Figura 24 - Prensa hidráulica utilizada para o ensaio de resistência à compressão axial.



Fonte: Autor.

3.6.1 Ensaio de porosidade

Após o ensaio de resistência a compressão, foram extraídas amostras dos corpos de prova já rompidos, na região central, a fim de evitar a superfície calcinada e, conseqüentemente, de maior porosidade, conforme representado na Figura 25. A extração das amostras foi realizada com o auxílio de marreta e talhadeira, objetivando obter prismas com aproximadamente 5,0 mm de aresta. De cada corpo de prova foi extraído, no mínimo, uma amostra.

Figura 25 - Representação da extração da amostra para ensaio de porosidade.



Fonte: Autor.

As amostras destinadas ao ensaio de porosidade foram acondicionadas em recipiente com água para que ocorresse a saturação das mesmas para, posteriormente, ocorrer a determinação da massa saturada superfície seca (M_{SSS}) e da massa submersa (M_{sub}). O equipamento utilizado para estas pesagens foi uma balança eletrônica da marca Marte, modelo AD2000, com precisão de 0,01 grama. A determinação da massa submersa foi realizada utilizando o acessório da própria balança, o qual permite impor carga à célula de carga pela parte inferior do equipamento.

A Figura 26 apresenta o aparato acoplado à balança, bem como o recipiente que contém a água, de forma a permitir a determinação da massa submersa da amostra de argamassa. Ao término da aquisição da respectiva massa saturada superfície seca (M_{SSS}) e massa submersa (M_{SUB}) de cada uma das amostras, as mesmas foram submetidas ao congelamento em ultrafreezer da marca Indrel, modelo CPS 10-D, a uma temperatura de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ por período mínimo de 24 horas, a fim de paralisar as reações de hidratação. A retirada da água livre congelada nos poros das amostras de argamassa foi realizada por sublimação da água (liofilização) em equipamento da marca Terroni, modelo LS 3000, a uma temperatura do condensador de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, por período de 16 horas sob vácuo máximo de $85\text{ }\mu\text{m Hg}$. A Figura 27 apresenta o liofilizador utilizado para a sublimação da água livre congelada nos poros das amostras de argamassa.

Figura 26 – Balança com dispositivo para realização da determinação da massa submersa das amostras.



Fonte: Autor.

Figura 27 – Liofilizador utilizado para a sublimação da água congelada contida nos poros da argamassa.



Fonte: Autor.

Ao término da liofilização foi determinada a massa seca (M_s) de cada uma das amostras, em temperatura ambiente.

A determinação da porosidade aparente de cada uma das amostras foi realizada por meio da Equação (4), baseada no princípio de Arquimedes e de acordo com os critérios estabelecidos na ASTM C 20.

$$P(\%) = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_{SSS} - M_{SUB}} 100$$

Equação (4)

em que:

- P - Porosidade [%]
- M_{SSS} - Massa saturada superfície seca [kg]
- M_S - Massa saturada [kg]
- M_{SUB} - Massa submersa [kg]

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resistência à compressão

Na Figura 28 são apresentadas as curvas com o desenvolvimento da resistência à compressão da argamassa em função das diferentes temperaturas de exposição, para as idades de 7 e 28 dias. Os valores apresentados na Figura 28 correspondem a média aritmética das resistências à compressão dos seis corpos prova ensaiados para cada temperatura. A totalidade dos resultados obtidos no presente estudo são apresentados no Apêndice A e Apêndice B.

Para efeito de comparação, a argamassa curada em temperatura ambiente foi utilizada como referência para análise dos resultados das demais temperaturas.

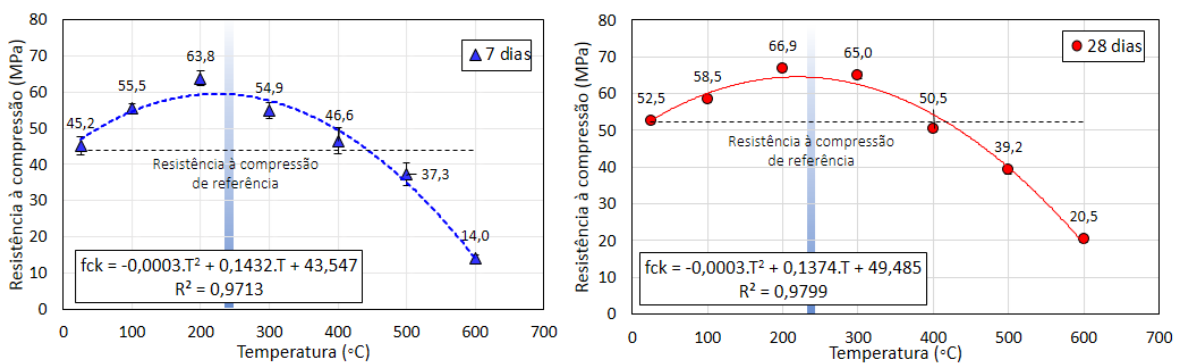
Os pontos de inflexão das equações (Figura 28) que descrevem o comportamento da resistência à compressão para as diferentes temperaturas de exposição possibilitou a identificação das temperaturas nas quais se verificam as máximas resistências atingidas pela argamassa de cimento Portland do tipo CP V – ARI, moldada na relação água/cimento = 0,40. Na idade de 7 dias, a máxima resistência à compressão foi de 60,6 MPa para uma temperatura de 239 °C. A argamassa mantida em temperatura ambiente apresentou, nesta idade, uma resistência à compressão de 45,2 MPa. Portanto, o incremento na resistência à compressão quando da exposição a uma temperatura de 239 °C é de 34,1% em comparação à argamassa de referência. Já aos 28 dias de idade, a argamassa atingiu 65,2 MPa aos 229 °C, valor 24,2% superior à resistência à compressão da argamassa mantida em temperatura ambiente.

Desse modo, podemos afirmar que, apesar da resistência à compressão ser maior em idades mais avançadas, o efeito acelerador da hidratação provocado pela exposição a elevadas temperaturas e, conseqüentemente, o efeito sobre a resistência à compressão, é mais significativo nas primeiras idades, onde o grau de hidratação do cimento é menor. Nas idades mais avançadas, o maior grau de hidratação disponibiliza menor quantidade de cimento anidro passível de influência na sua cinética de reação em decorrência da ação de elevada temperatura.

Em ambas as idades ocorreu o aumento da resistência à compressão até a temperatura próximo dos 400 °C, sendo a ocorrência dos maiores incrementos na faixa de

temperatura entre 230 °C e 240 °C. O incremento na resistência se deve ao efeito da cura térmica, que atua como acelerador das reações de hidratação dos compostos constituintes do cimento, o que resulta em maior formação de produtos hidratados que conferem uma maior resistência à matriz hidratada. A partir dos 230 °C ~ 240 °C até aproximadamente 400 °C, a aceleração das reações de hidratação é confrontada com a degradação parcial dos compostos hidratados formados, o que resultou em resistências à compressão superiores às da argamassa de referência, porém inferior às máximas resistências observadas.

Figura 28 - Resistência à compressão média da argamassa exposta a elevada temperatura aos 7 e 28 dias de idade.



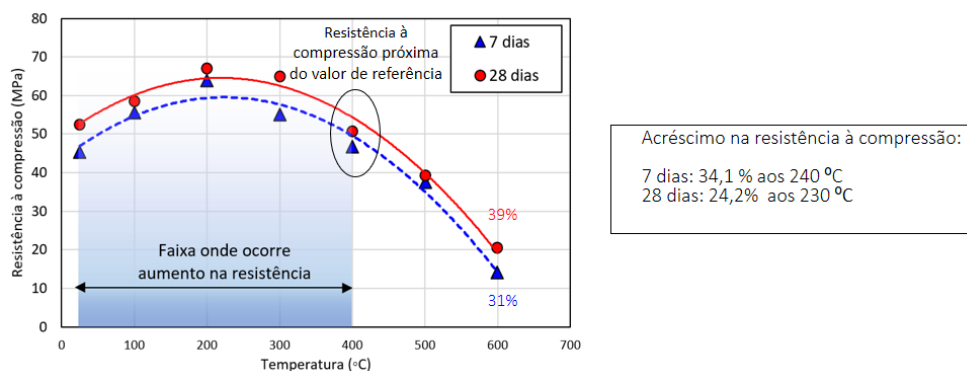
Fonte: Autor.

Nas temperaturas superiores a 230 °C ~ 240 °C, a redução da resistência à compressão é provocada pela decomposição parcial dos compostos hidratados, ou seja, do C-S-H e das fases aluminatos. A redução na resistência à compressão após 230 ~ 240 °C indica que a estrutura porosa da argamassa, isenta de água livre, passou a eliminar a água adsorvida (gel) e água quimicamente combinada, o que significa degradação dos compostos hidratados e, conseqüentemente, redução da resistência à compressão.

Para temperaturas superiores a 400 °C, a resistência à compressão da argamassa passou a ser inferior à observada na referência, mantida em temperatura ambiente. Portanto, a degradação dos compostos hidratados passou a ser significativa, de modo que, na temperatura de 500 °C, a resistência à compressão da argamassa, aos 7 dias, foi de 83% da observada na argamassa de referência, enquanto que, aos 28 dias, esse valor foi reduzido para 75%. O aumento da temperatura para 600 °C resultou em resistência à compressão, aos 7 dias, de 31% do valor da argamassa de referência e, aos 28 dias, o valor passou a ser de 39%.

Na Figura 29 são apresentadas as curvas de resistência à compressão nas duas idades estudadas. De fato, a maior idade resultou em maior resistência à compressão, independentemente da exposição à elevadas temperaturas. Assim sendo, ficou evidente que o maior grau de hidratação do cimento, ao propiciar redução da porosidade e, em consequência, maior compacidade da matriz hidratada, praticamente não alterou o comportamento decorrente da degradação por ação térmica. De fato, a permeabilidade da matriz hidratada é reduzida ao longo do tempo, o que deveria propiciar maior restrição à eliminação da água adsorvida e da água quimicamente combinada, alterando a tendência comportamental da curva de 28 dias em relação a curva de 7 dias. Tal situação não ocorreu, haja vista a ocorrência de tendência similar entre as curvas e, portanto, o maior grau de hidratação não foi preponderante para a degradação da microestrutura hidratada por ação térmica. A Figura 29 também apresenta, em destaque, a faixa de temperatura onde a resistência à compressão da argamassa exposta à ação térmica foi superior à argamassa de referência. Tal faixa ocorre a partir da temperatura ambiente até aproximadamente 400 °C.

Figura 29 - Resistência à compressão média aos 7 e 28 dias da argamassa exposta a ação térmica.



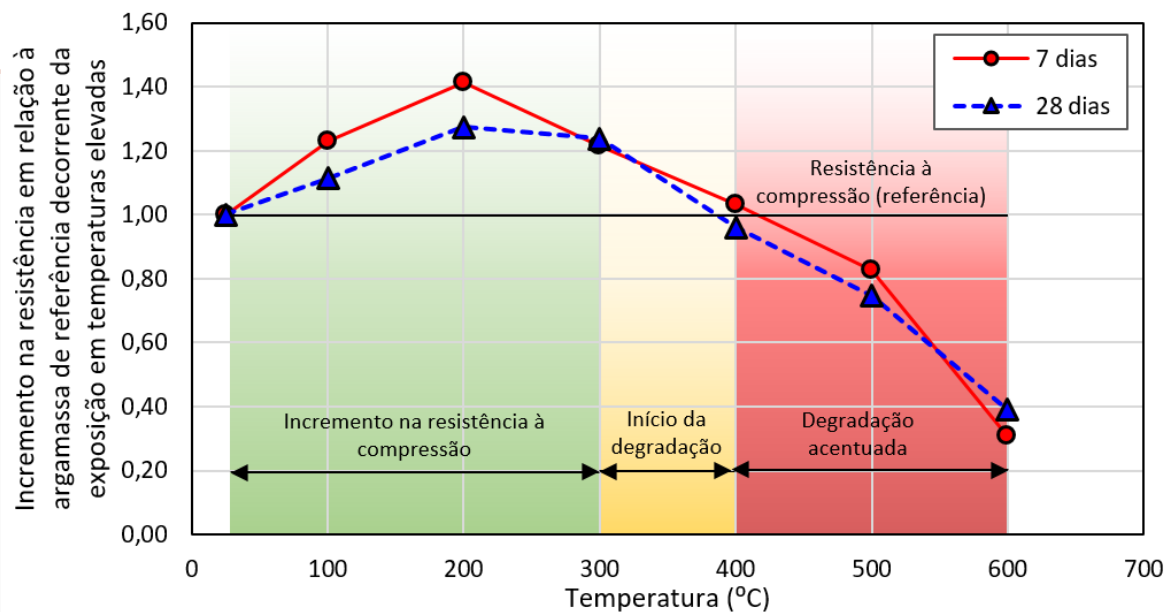
Fonte: Autor.

A Figura 30 apresenta a variação ocorrida na resistência à compressão em relação à argamassa de referência, para as idades de 7 e 28 dias. Os resultados até 200 °C evidenciam que a exposição a temperatura elevada propicia maior impacto na resistência à compressão quanto menor a idade da argamassa, ou seja, os efeitos da temperatura sobre o grau de hidratação são mais significativos quando há maior parcela de cimento anidro para reagir com a água. A partir de 300 °C, os efeitos da temperatura tendem a degradar a

microestrutura hidratada, de tal forma que a tendência comportamental independe da idade da argamassa.

De maneira geral, o gráfico da Figura 30 pode ser dividido em três faixas de temperatura onde, a primeira, até 300 °C, evidencia um incremento na resistência à compressão da ordem de 20% em comparação à argamassa de referência, independentemente da idade. A segunda faixa, entre 300 °C e 400 °C, representa a região onde a degradação da microestrutura passa a ser preponderante para ambas as idades estudadas, o que propicia gradual redução da resistência à compressão. Ao atingir a temperatura de 400 °C, a resistência à compressão tende a equiparar-se à observada na argamassa de referência. A terceira faixa, para temperaturas superiores a 400 °C, resulta em resistência à compressão inferior à referência, o que pode, na prática, resultar em colapso do material a depender do carregamento imposto ao mesmo.

Figura 30 - Evolução da variação na resistência à compressão média, aos 7 e 28 dias, decorrente da exposição térmica em diferentes temperaturas.



Fonte: Autor.

4.2 Porosidade

Na Figura 31 são apresentadas as curvas de porosidade da argamassa, aos 7 e 28 dias, para as diferentes temperaturas de exposição. Os valores presentes na Figura 31 foram obtidos através da média aritmética das porosidades dos seis corpos prova ensaiados para cada temperatura. Todos os resultados obtidos estão presentes no Apêndice A e Apêndice B.

Para análise dos resultados a argamassa curada em temperatura ambiente foi utilizada como referência.

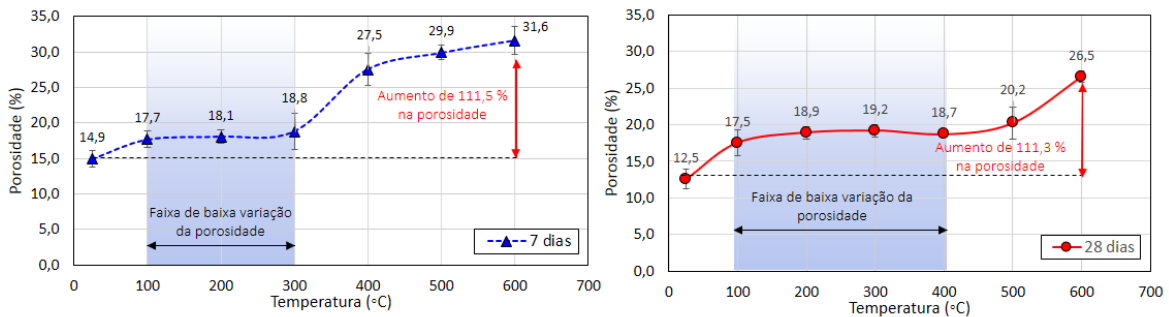
A exposição da argamassa a 100 °C, aos 7 dias, resultou em um aumento na porosidade (18,8 %) quando comparada com a porosidade da argamassa de referência (14,9 %). Este aumento foi da ordem de 18,3 %. Essa variação é decorrente da remoção de parte da água adsorvida (gel). No intervalo de temperatura entre 100 °C e 300 °C, é observada a estabilização da porosidade, ou seja, o aumento da energia térmica não foi capaz de retirar quantidade considerável de água adsorvida (gel) e/ou água quimicamente combinada. Cabe destacar que, nesta faixa de temperatura, apesar da singela variação da porosidade, foi observado aumento da resistência à compressão na temperatura de 200 °C, seguido de redução aos 300 °C. Na faixa de 300 °C a 400 °C ocorreu o aumento brusco da porosidade, a qual passou de 18,8% aos 300 °C, para 27,5% aos 400 °C. Esta faixa de temperatura representa a região onde passa a ocorrer considerável degradação da microestrutura aos 7 dias de idade. A partir de 400 °C, a degradação continua a ocorrer, porém com menor magnitude. Diante do comportamento observado no tocante à porosidade da argamassa em função das temperaturas de exposição, fica evidente que, aos 7 dias de idade, é necessário impor uma temperatura mínima de 300 °C para propiciar degradação significativa na microestrutura da matriz hidratada.

Na idade de 28 dias, a exposição da argamassa à temperatura de 100 °C também resultou em aumento da porosidade, a qual passou de 12,5% na argamassa de referência para 17,5%, o que representa um aumento de 40%. Apesar deste aumento no volume de vazios, foi observado aumento da resistência à compressão. Tal comportamento pode ser justificado pela retirada de parte da água adsorvida (gel) da microestrutura, sem que ocorresse a retirada da água quimicamente combinada como compostos hidratados. No

intervalo de temperatura entre 100 °C e 400 °C, a porosidade apresentou pequena variação, com tendência de gradual aumento. Apesar da pequena variação da porosidade, a resistência à compressão aumentou até 200 °C para, na sequência, até 400 °C, sofrer gradual redução. A partir de 400 °C foi observado um aumento na degradação da microestrutura, a qual foi degradada em maior intensidade a partir dos 500 °C. Diante deste comportamento, pode-se concluir que, aos 28 dias, é necessário impor uma temperatura mínima de 400 °C para propiciar degradação significativa da microestrutura e, a partir dos 500 °C, a degradação passa a ser bastante severa.

A Figura 31 apresenta, comparativamente, a variação da porosidade, aos 7 e 28 dias, em função da exposição a elevadas temperaturas.

Figura 31 - Porosidade média da argamassa exposta a elevada temperatura aos 7 e 28 dias de idade.

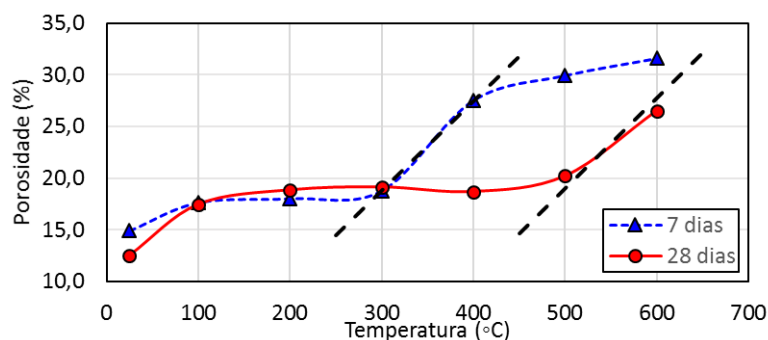


Fonte: Autor.

De fato, a porosidade da argamassa mantida em temperatura ambiente sofreu redução entre 7 e 28 dias, o que decorre da evolução da hidratação do cimento Portland. Na temperatura de 100 °C, para ambas as idades, houve aumento da porosidade, resultando em valores semelhantes. Desta forma, a variação percentual da porosidade foi maior na argamassa com 28 dias de idade, haja vista a porosidade à temperatura ambiente ser menor que a observada aos 7 dias. No intervalo entre 100 °C e 300 °C, a porosidade da argamassa foi semelhante para ambas as idades estudadas, passando a ocorrer comportamento diferenciado a partir dos 300 °C. Na idade de 7 dias, a exposição à temperatura de 400 °C impactou significativamente na porosidade da argamassa, o que ocorreu aos 28 dias somente quando da exposição a uma temperatura superior a 500 °C. A análise mais criteriosa da mudança significativa na porosidade da argamassa evidencia que o comportamento observado aos 7 dias, onde a degradação mais severa ocorre a partir

de 300 °C, se repete de forma similar aos 28 dias, porém a partir de 500 °C, o trecho da curva de 7 dias, entre 300 °C e 400 °C, é praticamente paralelo ao trecho da curva de 28 dias entre 500 °C e 600 °C (Figura 32). Isto evidencia que a degradação mais severa da microestrutura da argamassa é regida por um comportamento similar, porém, em decorrência da maior compacidade na idade mais avançada, há que se aplicar maior energia térmica para volatilizar a água adsorvida e a água quimicamente combinada. De fato, o refinamento da microestrutura como resultado do maior grau de hidratação reduz a interconectividade da rede capilar e, conseqüentemente, a movimentação da água (vapor) por meio da matriz hidratada é dificultada. Assim sendo, a movimentação da água (vapor) do interior do material para a superfície externa demandou maior temperatura, já que o tempo de exposição foi mantido constante (24 horas).

Figura 32 - Porosidade da argamassa aos 7 e 28 dias de idade sob exposição a diferentes temperaturas.

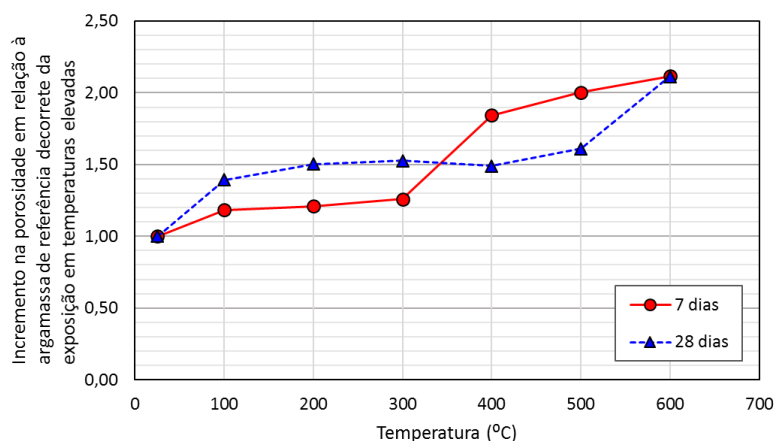


Fonte: Autor.

A Figura 32 permite observar também a semelhança no comportamento das duas curvas, visto que, o efeito causado na argamassa com 28 dias se mostrou o próximo do verificado na de 7 dias, porém, sendo necessário um maior aporte térmico para provocar o mesmo grau de degradação.

A Figura 33 apresenta a evolução do incremento na porosidade da argamassa decorrente da ação térmica, ou seja, o quanto a porosidade da argamassa aumentou em relação à argamassa de referência, mantida em temperatura ambiente.

Figura 33 - Evolução do incremento da porosidade decorrente da exposição térmica para as diferentes temperaturas, aos 7 e 28 dias.



Fonte: Autor.

A análise das curvas evidencia que a quantidade de água removida da microestrutura da matriz hidratada, seja ela água adsorvida ou água quimicamente combinada, é maior na idade de 28 dias, até a temperatura de aproximadamente 350 °C. Este fato é justificado pelo maior teor de compostos hidratados formados na idade de 28 dias em comparação aos 7 dias. Assim sendo, na idade mais avançada há maior teor de água adsorvida e, também, maior teor de água quimicamente combinada para ser removida por ação térmica. De fato, há uma parcela de água que é facilmente removida da microestrutura quando da exposição à 100 °C. Após retirada esta parcela de água, a remoção de parcela adicional requer considerável energia térmica, o que fica evidenciado pelos patamares praticamente horizontais em ambas as curvas.

Na idade de 7 dias, a remoção inicial da água de composição por exposição a 100 °C resulta em aumento médio de 18% em relação à argamassa de referência. Este teor aumenta para 26% até aproximadamente 300 °C. Já aos 400 °C, a porosidade aumentou 84% em relação à referência e, aos 500 °C, a porosidade observada é praticamente o dobro da determinada na argamassa mantida a temperatura ambiente. Aos 28 dias de idade, a remoção inicial da água aumenta a porosidade em aproximadamente 50%. Este incremento na porosidade se manteve até 400 °C, atingindo 61% aos 500 °C. Quando da exposição a 600 °C, o volume de vazios na argamassa foi 2,1 vezes maior que a da argamassa de referência. De forma que para as duas idades houve um acréscimo de 111% na porosidade.

Através da análise das curvas fica evidente que a quantidade de água adsorvida removida aos 28 dias é superior à de 7 dias, entretanto, o patamar de temperatura na qual a porosidade se mantém estável aumenta de 200 °C aos 7 dias para 400 °C aos 28 dias, comprovando que, em idades mais avançadas, temperaturas entre 100 °C e 500 °C estão propensas a causarem efeitos semelhantes na porosidade da matriz hidratada. Já a microestrutura com menor grau de hidratação se mostra mais suscetível a degradação por ação térmica.

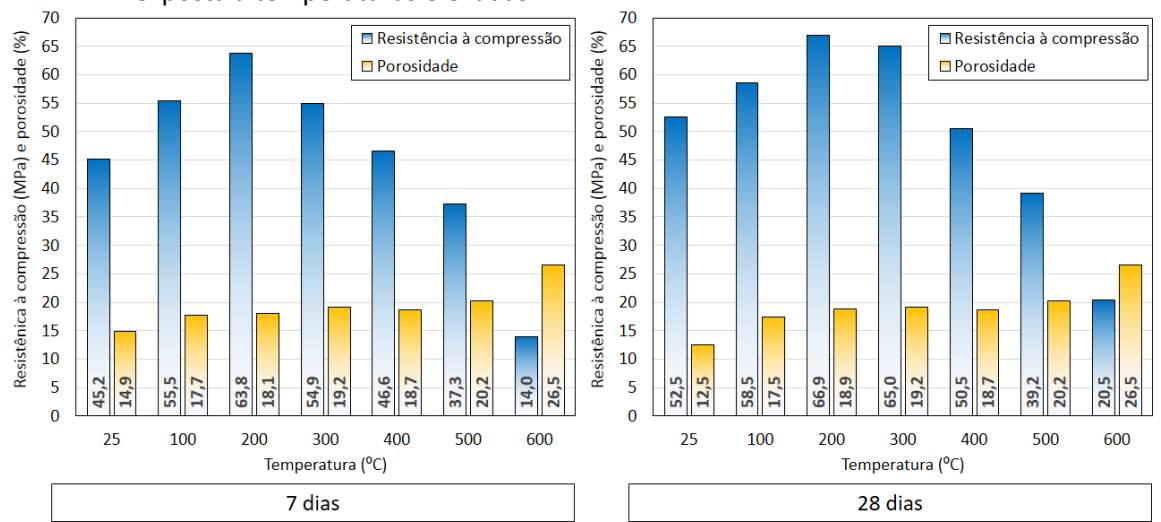
Aos 600 °C as argamassas com porosidade de 31,60 % e 26,50 % tiveram um incremento na porosidade de 2,12 e 2,11 aos 7 e 28 dias, respectivamente. Indicando que a exposição a uma temperatura dessa magnitude dobra a porosidade da argamassa, independente do grau de hidratação do cimento.

4.3 Resistência à compressão *versus* porosidade

A Figura 34 apresenta as curvas de resistência à compressão e porosidade das argamassas aos 7 e 28 dias de idade. A representação gráfica conjunta das curvas evidencia se há interdependência destas variáveis sob exposição a elevadas temperaturas.

A resistência à compressão e a durabilidade da argamassa de cimento Portland estão diretamente associadas à porosidade da matriz cimentícia no estado endurecido, de modo que eventuais acréscimos no volume de vazios tendem a impactar negativamente sobre essas propriedades. No caso da exposição de argamassa à elevadas temperaturas, é possível a ocorrência de aumento de porosidade e, também, da resistência à compressão. Este comportamento ficou evidente no presente estudo quando da exposição da argamassa até a temperatura de 400 °C, independentemente da idade (7 e 28 dias), haja vista as resistências terem se mantido superiores às observadas nas respectivas referências, mantidas à temperatura ambiente.

Figura 34 - Resistência à compressão média e porosidade média, aos 7 e 28 dias, da argamassa exposta a temperaturas elevadas.



Fonte: Autor.

O aumento da resistência à compressão decorrente da ação térmica ocorre até determinada temperatura, a partir da qual o comportamento se inverte, ou seja, a argamassa passa a apresentar redução da capacidade portante. A justificativa para o comportamento de incremento na resistência à compressão está na aceleração das reações de hidratação, com conseqüente aumento no teor de compostos hidratados. Por outro lado, ocorre em paralelo a redução do teor de água adsorvida, o que tende a aumentar o volume de vazios, causar retração e propiciar a microfissuração, sem interferir, de fato, na composição dos compostos hidratados, responsáveis pela resistência à compressão da argamassa. Assim sendo, a água quimicamente combinada permanece na microestrutura da matriz hidratada, sobretudo na composição do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), principal responsável pela resistência à compressão do material de base cimentícia.

A partir de 300 °C, houve acentuado aumento da porosidade na argamassa com 7 dias de idade. Já para a argamassa com 28 dias, este aumento ocorreu a partir de 400 °C. Apesar desta variação na temperatura para a ocorrência de aumento significativo da porosidade em comparação às temperaturas elevadas a partir de 100 °C, a resistência à compressão começou a apresentar redução aos 200 °C. Portanto, a partir desta temperatura, apesar do aumento do grau de hidratação, inicia-se a degradação dos compostos hidratados, de tal forma que, com o gradual aumento da temperatura, a

degradação tende a equiparar-se ao efeito acelerador de reação. A partir dos 400 °C, os benefícios da cura térmica se extinguem e a degradação da microestrutura passa a preponderar, resultando em redução progressiva da resistência à compressão.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem concluir que a ação de temperaturas elevadas na argamassa causa variações na resistência à compressão e porosidade da matriz hidratada.

A ação térmica tende a contribuir positivamente para o aumento da resistência à compressão até a temperatura de 400 °C, o que decorre do aumento da taxa de hidratação das fases anidras do cimento. A ocorrência das máximas resistências à compressão, aos 7 e 28 dias, foi aos 230 °C e 240 °C, respectivamente.

A partir de 300 °C até 400 °C, independentemente da idade, a degradação da microestrutura passa a ser relevante, o que conduz à gradual redução da resistência à compressão, apesar desta se manter acima do valor observado na respectiva argamassa de referência, mantida à temperatura ambiente.

A exposição em temperaturas acima de 400 °C resultou em redução da resistência à compressão em virtude da degradação da microestrutura, provocada pela remoção da água quimicamente combinada, principalmente aquela constituinte do silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Na argamassa com maior disponibilidade de cimento anidro, o efeito acelerador da hidratação provocado pela exposição a elevadas temperaturas se apresentou mais saliente, refletindo no aumento significativo da resistência à compressão.

Na temperatura de 600 °C há perda significativa da resistência à compressão, atingindo valores de 19,3 % e 38,9 % do valor inicial, aos 7 e 28 dias, respectivamente, em relação às argamassas de referência.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros são feitas as seguintes sugestões:

- Análise microscópica da propagação de fissuras na superfície da argamassa, resultantes do desenvolvimento de gradientes térmicos no interior da microestrutura devido à exposição a elevadas temperaturas.
- Influência da taxa de aquecimento e taxa de resfriamento na resistência à compressão e porosidade da argamassa de cimento Portland exposta a elevadas temperaturas.
- Efeito de elevadas temperaturas na resistência à compressão e porosidade de argamassa em diferentes tipos de cimento Portland.

7. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Gabriela Bandeira de Melo Lins de. **DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**. 2012. 246 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Cap. 2.

ALONSO, C. FERNANDEZ, L. **Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments**. Journal Of Materials Science. Madri, 2004. p. 3015-3024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard test methods for fire tests of building construction and materials**. ASTM E119. Philadelphia: ASTM, 2000. [ASTM E119-00].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – Procedimento**. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 17 p.

_____. **NBR 5628: Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo**. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 15 p.

_____. **NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento**. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 15 p.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 256 p.

_____. **NBR 5.738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. 9 p.

_____. **NBR 7.211: Agregados para concreto - especificação**. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 9 p.

_____. **NBR 10.520: Informação e documentos - Citações em documentos - Apresentação**. 3 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2002. 7 p.

_____. **NBR 14.72: Informação e documentação - Trabalhos acadêmicos - Apresentação**. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2005. 9 p.

_____. **NBR 6.023**: Informação e documentação Referências - Elaboração. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2002. 24 p.

ANDERBERG, Yngve. **“Spalling Phenomena of HPC and OC”**. In: PHAN, Long T.; CARINO, Nicholas J.; DUTHINH, Dat; GARBOCZI, Edward. International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete — NIST — Gaithersburg, MD, February 13-14, 1997. Proceedings. NIST. Gaithersburg (E.U.A.), February, 1997. [NIST Special Publication 919].

BEZERRA, Luciano André Cruz. **ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMA CONSTRUTIVO DE CONCRETO COM EPS COM AGREGADO GRAÚDO**. 2003. 50 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

BRONHOLO, Juliano Henrique. **EFEITOS DA TEMPERATURA DA ÁGUA DE AMASSAMENTO NA RESISTÊNCIA DO CONCRETO**. 2013. 46 f. Trabalho (Tecnólogo) - Curso de Tecnologia do Concreto, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Cap. 2

CALDAS, Rodrigo Barreto. **ANÁLISE NUMÉRICA DE ESTRUTURAS DE AÇO, CONCRETO E MISTAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**. 2008. 221 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CUOGHI, Ricardo de Scarabello. **Aspectos de análise de risco das estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2006. 247 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Cap. 5.

COSTA, Carla Neves. **DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**. 2008. 362 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

COSTA, Carla Neves; SILVA, Valdir Pignatta. **REVISÃO HISTÓRICA DAS CURVAS PADRONIZADAS DE INCÊNDIO**. NUTAU, São Paulo, 2006.

COSTA, Carla Neves e SILVA, Valdir Pignatta. **ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**. **X X X Jornadas Sul – Americanas de Engenharia Estrutural**, Brasília, 27 a 3 de maio 2002.

COSTA, Carla Neves; FIGUEIREDO, Antônio Domingues de; SILVA, Valdir Pignatta. **ASPECTOS TECNOLÓGICOS DOS MATERIAIS DE CONCRETO EM ALTAS TEMPERATURAS**. NUTAU, São Paulo, (2002a).

COSTA, Carla Neves; FIGUEIREDO, Antônio Domingues de; SILVA, Valdir Pignatta e. **O fenômeno do lascamento (“spalling”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio – uma revisão crítica**. Instituto Brasileiro do Concreto - 44^o Congresso Brasileiro, São Paulo, (2002b).

FLEMING, Henrique et al. **Forças de van der Waals**. 2007. 9 slides, P&B. Disponível em: <<http://www.hfleming.com/waals.pdf>>. Acesso em: 06 jul. 2017.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Incêndio destrói 6 andares de prédio no Rio**. São Paulo, 27 fev. 2004. Disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidian/ff2702200408.htm>. Acesso em: 11 jul. 2017.

FILHO, Juarez Hoppe. **SISTEMAS CIMENTO, CINZA VOLANTE E CAL HIDRATADA: MECANISMO DE HIDRATAÇÃO, MICROESTRUTURA E CARBONATAÇÃO DE CONCRETO**. 2008. 318 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Cap. 2.

GRATTAN-BELLEW, P. E. **Microstructural Investigation of Deteriorated Portland Cement Concretes**. Construction and Building Materials. Vol. 10. Issue 1. Elsevier Science Ltd. Amsterdam, February, 1996.

HALLIDAY, RESNICK, WALKER. **Fundamentos de Física**. Vol. 2. 8 ed. Editora LTC, 2009, p. 314.

KALIFA, Pierre; MENNETEAU, François Dominique; QUENARD, Daniel. **Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures**. Cement And Concrete Research, França, v. 30, p.1915-1927, 2000.

MELO, Aluísio Braz de. **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland**. 2000. 271 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2000. Cap. 5.

METHA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J M. **Concreto; Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto -IBRACON, 2008. 201 p.

MORALES, Gilson; CAMPOS, Alessandro; FAGANELLO, Adriana. **A Ação do fogo sobre os componentes do concreto**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, [s.l.], v. 32, n. 1, p.47-55, 22 jun. 2011. Universidade Estadual de Londrina. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0375.2011v32n1p47>.

MÖRSCH, E. **Teoría y práctica del hormigón armado**. Trad. COMPANY, M. Barcelona: Editorial Gustavo Gili S. A., 1948. 476 p. Tomo 1.

NINCE, Andréia Azeredo. **LASCAMENTO DO CONCRETO EXPOSTO A ALTAS TEMPERATURAS**. 2006. 264 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Cap.2.

NUSSENVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica: Fluidos, oscilações, ondas e calor**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2002. 313 p.

PHAN, L. T.; CARINO, N. J. Code provisions for high strength concrete strength- temperature relationships at elevated temperatures. **Materials and Structures = Matériaux et Constructions**, Paris, v. 36, n. 256, p. 91–98, 2003.

PENG, Gai-fei; HUANG, Zhi-shan. **Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures**. Construction And Building Materials, Pequim, v. 22, p.593-599, 2008.

PURKISS, John A. **Fire Safety Engineering Design of Structures**. 2. ed. Oxford: Butterworth-heinemann, 2007. 389 p.

OLIVEIRA, Clayton Reis de; MORENO JÚNIOR, Armando Lopes. **Efeito do fogo nas estruturas de concreto reforçadas com FRP**. Anais do 51º Congresso Brasileiro de Concreto, São Paulo, 2009.

SILVA, Valdir Pignatta e. **ESTRUTURAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**. 1997. 188 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. Cap. 2.

WATANABE, Fábio André. **ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE AREIA DE FUNDIÇÃO RESIDUAL COMO AGREGADO NA CONFEÇÃO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO**. 2004. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2004. Cap. 2

ZONA DE RISCO: Cesp: Investigação de um grande incêndio deixa muitas lições. São Paulo, 30 ago. 2014. Disponível em: <<https://zonaderisco.blogspot.com.br/2014/09/cesp-investigacao-de-um-grande-incendio.html>>. Acesso em: 11 jul. 2017.

APÊNDICE A

Resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e porosidade para a argamassa curada em temperatura ambiente e exposta a elevada temperatura aos 7 dias de idade.

Temperatura (°C)	Identificação	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	MSSS (g)	MSUB	MS (g)	Porosidade (%)	Porosidade média (%)	Desvio padrão (%)
25	CP 01	42,2	45,2	2,6	---	---	---	---	14,9	1,2
	CP 02	45,5			---	---	---	---		
	CP 03	41,9			2,98	1,69	2,78	15,50		
	CP 04	48,4			4,82	2,47	4,47	14,89		
	CP 05	45,9			6,81	3,72	6,40	13,27		
	CP 06	47,2			4,83	2,65	4,48	16,06		
100	CP 01	---	55,5	1,4	5,59	3,09	5,15	17,60	17,7	1,2
	CP 02	---			---	---	---			
	CP 03	56,3			---	---	---	---		
	CP 04	55,4			---	---	---	---		
	CP 05	53,6			3,80	1,56	3,43	16,52		
	CP 06	56,7			7,08	3,90	6,48	18,87		
200	CP 01	62,5	63,8	2,0	6,23	3,20	5,66	18,81	18,1	0,9
	CP 02	64,6			9,93	5,16	9,05	18,45		
	CP 03	66,3			7,74	4,02	7,05	18,55		
	CP 04	45,8			6,86	3,57	6,27	17,93		
	CP 05	49,3			6,70	3,49	6,17	16,51		
	CP 06	62,0			7,80	4,06	7,19	16,31		
300	CP 01	---	54,9	2,3	2,36	1,27	2,09	24,77	18,8	2,6
	CP 02	53,2			3,25	1,78	2,83	28,57		
	CP 03	---			5,91	3,21	5,41	18,52		
	CP 04	---			3,57	1,83	3,06	29,31		
	CP 05	57,6			6,06	3,45	5,51	21,07		
	CP 06	53,9			3,05	1,68	2,82	16,79		
400	CP 01	43,3	46,6	3,5	4,81	2,65	4,27	25,00	27,5	2,3
	CP 02	---			---	---	---			
	CP 03	43,9			6,25	3,58	5,49	28,46		
	CP 04	---			---	---	---			
	CP 05	48,5			5,05	3,00	4,43	30,24		
	CP 06	50,5			6,48	3,71	5,75	26,35		
500	CP 01	35,1	37,3	3,2	---	---	---	---	29,9	1,1
	CP 02	42,0			2,72	1,49	2,36	29,27		
	CP 03	---			5,20	2,85	4,51	29,36		
	CP 04	35,4			6,63	3,71	5,72	31,16		
	CP 05	---			---	---	---			
	CP 06	36,6			---	---	---	---		
600	CP 01	---	14,0	0,8	4,27	2,41	3,65	33,33	31,6	1,5
	CP 02	---			6,15	3,37	5,32	29,86		
	CP 03	13,4			8,85	4,85	7,64	30,25		
	CP 04	14,6			8,48	4,68	7,23	32,89		
	CP 05	---			---	---	---			
	CP 06	---			7,60	4,18	6,52	31,58		

Fonte: Autor.

--- Valores suprimidos em decorrência da inconsistência do resultado obtido.

APÊNDICE B

Resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e porosidade para a argamassa curada em temperatura ambiente e exposta a elevada temperatura aos 28 dias de idade.

Temperatura (°C)	Identificação	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	MSSS (g)	MSUB	MS (g)	Porosidade (%)	Porosidade média (%)	Desvio padrão (%)
25	CP 01	49,7	52,5	2,9	10,25	5,72	9,65	13,25	12,6	1,4
	CP 02	---			9,27	5,20	8,83	10,81		
	CP 03	54,1			11,50	6,42	10,91	11,61		
	CP 04	53,4			9,61	5,82	9,07	14,25		
	CP 05	49,4			15,59	8,65	14,70	12,82		
	CP 06	56,0			---	---	---	---		
100	CP 01	---	58,5	4,1	13,30	7,40	12,47	14,07	17,6	1,8
	CP 02	55,6			---	---	---	---		
	CP 03	---			10,82	6,11	10,30	11,04*		
	CP 04	---			14,07	9,10	13,23	16,90		
	CP 05	---			---	---	---	---		
	CP 06	61,4			7,38	4,21	6,83	17,35		
200	CP 01	66,3	66,9	0,8	12,05	6,58	11,03	18,65	18,9	0,8
	CP 02	67,8			11,42	6,20	10,43	18,97		
	CP 03	---			12,72	7,12	11,59	20,18		
	CP 04	66,7			14,76	7,99	13,51	18,46		
	CP 05	---			7,90	4,31	7,25	18,11		
300	CP 01	71,1	65,0	5,4	10,61	5,73	9,69	18,85	19,2	0,8
	CP 02	69,2			16,05	8,74	14,65	19,15		
	CP 03	---			11,46	6,18	10,43	19,51		
	CP 04	63,2			10,54	5,67	9,54	20,53		
	CP 05	64,0			10,42	5,62	9,55	18,13		
	CP 06	57,4			10,65	5,80	9,74	18,76		
400	CP 01	48,5	50,5	1,8	14,84	8,30	13,57	19,42	18,7	0,4
	CP 02	---			15,12	8,22	13,82	18,84		
	CP 03	51,7			10,78	5,91	9,86	18,89		
	CP 04	49,4			15,51	8,48	14,21	18,49		
	CP 05	---			14,31	8,02	13,16	18,28		
	CP 06	52,3			16,90	9,31	15,51	18,31		
500	CP 01	36,6	39,2	2,3	11,60	6,32	10,45	21,78	20,2	2,2
	CP 02	37,1			14,46	7,78	13,31	17,22		
	CP 03	42,9			10,76	5,82	9,69	21,66		
	CP 04	39,0			12,89	6,97	11,65	20,95		
	CP 05	39,5			13,64	7,48	12,55	17,69		
	CP 06	40,2			11,13	6,00	10,00	22,03		
600	CP 01	---	20,5	2,3	10,63	5,82	9,44	24,74	26,6	1,8
	CP 02	---			9,09	5,00	8,03	25,93		
	CP 03	22,9			---	---	---	---		
	CP 04	---			7,80	4,21	6,90	25,08		
	CP 05	18,5			10,71	5,89	9,31	29,05		
	CP 06	19,9			10,55	5,80	9,23	27,80		

Fonte: Autor.

--- Valores suprimidos em decorrência da inconsistência do resultado obtido